

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

FOTOVOLTAİK SİSTEMLER İÇİN YENİ BİR MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI
TAKİP ALGORİTMASININ GELİŞTİRİLMESİ VE UYGULAMASI

DOKTORA TEZİ

Okan GÜNGÖR

EKİM 2024

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**FOTOVOLTAİK SİSTEMLER İÇİN YENİ BİR MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI
TAKİP ALGORİTMASININ GELİŞTİRİLMESİ VE UYGULAMASI**

Okan GÜNGÖR

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"DOKTOR (ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 04 / 09 / 2024

Tezin Savunma Tarihi : 08 / 10 / 2024

Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Hakan KAHVECİ

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

“Fotovoltaik Sistemler İçin Yeni Bir Maksimum Güç Noktası Takip Algoritmasının Geliştirilmesi Ve Uygulaması” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen ve bilim insanı olma yolundaki adımlarımı atarken kıymetli bilgileriyle ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Hakan KAHVECİ’ye teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, yapıcı eleştirileri ve önerileri ile tezime büyük katkıları bulunan saygıdeğer hocalarım Sayın Prof. Dr. Halil İbrahim OKUMUŞ’a ve Sayın Doç. Dr. Mustafa Ergin ŞAHİN’e teşekkür ederim.

Doğduğum günden beri elimi hiç bırakmayan, hayatım boyunca aldığım tüm kararlarda bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım ve her kararında arkamda olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan babam Ercan GÜNGÖR ve annem Türkan GÜNGÖR’e, sevgili kardeşim Simge GÜNGÖR’e teşekkür eder, minnettarlığımı sunarım.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Okan GÜNGÖR

Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Fotovoltaik Sistemler İçin Yeni Bir Maksimum Güç Noktası Takip Algoritmasının Geliştirilmesi Ve Uygulaması” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Hakan KAHVECİ’nin sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 08/10/2024

Okan GÜNGÖR

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar DİZİNİ.....	XIV
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Tezin Amacı.....	2
1.2. FV Sistemleri	3
1.2.1. FV Panel Proteus Eşdeğer Devresi.....	8
1.2.1. FV Dizilerinde Kısmi Gölgeleme.....	8
1.2.2. Sıcak Nokta Oluşumu	9
1.2.3. Bypass Diyot Yaklaşımı	10
1.3. FV Dizisi Ara Bağlantılarının Konumlandırılması	11
1.3.1. Klasik Konumlandırma.....	12
1.3.2. Statik Yeniden Konumlandırma.....	13
1.3.3. Elektriksel Yeniden Konumlandırma	15
1.4. Maksimum Güç Noktası Takip (MGNT) Algoritmaları	20
1.4.1. Yapay Sinir Ağı (YSA) Tabanlı MGNT Algoritması	24
1.4.2. Bulanık Mantık Tabanlı MGNT Algoritması	25
1.4.3. Kesirli Kısa Devre Akımı Tabanlı MGNT Algoritması	27
1.4.4. Kesirli Açık Devre Gerilimi Tabanlı MGNT Algoritması	27
1.4.5. Dolaylı D&G Algoritması	28
1.4.6. Doğrudan D&G Algoritması.....	29
1.4.7. Artımsal İletkenlik (Aİ) Algoritması.....	30
1.4.8. Tepe Tırmanışı (TT) Algoritması.....	31
1.4.9. Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) Tabanlı MGNT Algoritması	32
1.4.10. Önerilen Yöntem	34

1.5. FV Panellerde DA-DA Dönüştürücü Seçimi.....	37
1.5.1. Artıran Dönüştürücü.....	37
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	42
2.1. Önerilen Yöntemin Benzetimi.....	43
2.1.1. FV Dizisi Benzetimi.....	43
2.1.2. Anahtarlama Devresi Benzetimi.....	44
2.1.3. Artıran (Boost) Dönüştürücünün Benzetimi.....	45
2.1.4. Mikrodenetleyici Tabanlı Önerilen Yaklaşımın Benzetimi.....	45
2.1.5. IV Takip Cihazı Benzetimi.....	46
2.2. Önerilen Yöntemin Uygulaması.....	47
2.2.1. FV Dizisi'nin Fiziksel Kurulumu.....	49
2.2.2. Anahtarlama Devresi Uygulaması.....	50
2.2.3. Artıran (Boost) Dönüştürücünün Tasarımı.....	50
2.2.4. Mikrodenetleyici Tabanlı Önerilen Yaklaşımın Uygulaması.....	53
2.2.5. IV Takip Cihazı Uygulaması.....	53
3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	56
3.1. Benzetim Çalışması.....	56
3.1.1. G1 Senaryosu.....	56
3.1.2. G2 Senaryosu.....	58
3.1.3. G3 Senaryosu.....	59
3.1.4. G4 Senaryosu.....	60
3.1.5. G5 Senaryosu.....	62
3.1.6. G6 Senaryosu.....	63
3.1.7. G7 Senaryosu.....	64
3.1.8. Benzetim Çalışması Özeti.....	65
3.2. Uygulama Çalışması.....	66
3.2.1. G8 Senaryosu.....	67
3.2.2. G9 Senaryosu.....	68
3.2.3. G10 Senaryosu.....	70
3.2.4. G11 Senaryosu.....	73
3.2.5. G12 Senaryosu.....	75
3.2.6. G13 Senaryosu.....	77
3.2.7. G14 Senaryosu.....	80
3.2.8. Uygulama Çalışması Özeti.....	82

4. SONUÇLAR	84
5. ÖNERİLER.....	86
6. KAYNAKLAR	87
ÖZGEÇMİŞ	



Doktora Tezi

ÖZET

FOTOVOLTAİK SİSTEMLER İÇİN YENİ BİR MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI TAKİP ALGORİTMASININ GELİŞTİRİLMESİ VE UYGULAMASI

Okan GÜNGÖR

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik–Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Hakan KAHVECİ
2024, 94 Sayfa

Bu tez çalışması, fotovoltaik (FV) dizilerin Maksimum Güç Noktasını (MGN) izlemek için yeni bir yöntem önermektedir. Önerilen yöntem, mevcut yöntemlerden farklı olarak Maksimum Güç Noktası Takibi (MGNT) algoritmalarına donanımsal dinamiklik katmıştır. Bu dinamiklik, FV dizisi ara bağlantılarının yer değiştirilmesiyle elde edilen karmaşıklıktan uzak ve uygulanabilir bir FV dizi yeniden konumlandırma stratejisiyle sağlanmıştır. Sunulan bu strateji ve MGNT algoritması birleştirilerek, FV dizisi ara bağlantılarını değiştirilebilen bir MGNT yaklaşımı geliştirilmiştir. Yeni yaklaşım, FV karakteristik eğrisini düzeltebilme özelliği sayesinde farklı çevre koşullarında FV dizisinden elde edilen gücü artırabilmektedir. Önerilen yaklaşımın uygulanabilirliği, Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) temelli bir MGNT algoritmasında denenmiş, benzetim ve gerçek koşullar altında performansı test edilmiştir. Geliştirilen yaklaşım, farklı kısmi gölgelenme durumlarında, PSO, Değiştir Gözle (D&G) gibi yaygın kullanılan algoritmalara kıyasla, en az %9 oranında güç artırımını sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler: Kısmi Gölgeleme (KG), FV dizi yeniden konumlandırma, Maksimum Güç Noktası Takibi (MGNT), Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO), Toplam Çapraz Bağlı (TCB)

PhD. Thesis

SUMMARY

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF A NOVEL MAXIMUM POWER POINT TRACKING ALGORITHM FOR PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

Okan GÜNGÖR

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Science
Electrical-Electronics Engineering Graduate Program
Supervisor: Assist. Prof. Dr. Hakan KAHVECİ
2024, 94 Pages

This thesis proposes a new method for tracking Maximum Power Points (MPP) of photovoltaic (PV) arrays. Different from the existing methods, the proposed method adds hardware dynamism to the Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithms. This dynamism is achieved through an uncomplicated and feasible PV array reconfiguration strategy, which is achieved by relocating the PV array interconnects. By integrating this strategy into the MPPT algorithm, an MPPT approach that can modify the PV array interconnections is developed. The new approach is able to increase the power generated from the PV array under different environmental conditions thanks to its ability to revise the PV characteristic curve. The applicability of the proposed approach is tested on a Particle Swarm Optimization (PSO) based MPPT algorithm, and its performance is tested under simulation and real conditions. The proposed approach for different partial shadowing cases achieves at least 9% power improvement compared to commonly used algorithms such as PSO and P&O.

Key Words: Partial Shading (PS), PV array reconfiguration, Maximum Power Point Tracking (MPPT), Particle Swarm Optimization (PSO), Total Cross Tied (TCT)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	FV sistem bileşenleri (a) Hücre (b) Modül (c) Panel (d) Dizi	3
Şekil 2.	FV panel tek diyot eşdeğer devresi.....	4
Şekil 3.	FV panel karakteristik eğrileri (a) I-V eğrisi (b) P-V eğrisi.....	4
Şekil 4.	FV panel elektriksel eşdeğer devresindeki RP direncinin değişiminin karakteristik eğriye olan etkisi (a) I-V eğrisi (b) P-V eğrisi	6
Şekil 5.	FV panel elektriksel eşdeğer devresindeki RS direncinin değişiminin karakteristik eğriye olan etkisi (a) I-V eğrisi (b) P-V eğrisi	6
Şekil 6.	FV panel karakteristik eğrisine ışımanın etkisi (a) I-V eğrisi (b) P-V eğrisi.....	7
Şekil 7.	FV panel karakteristik eğrisine sıcaklığın etkisi (a) I-V eğrisi (b) P-V eğrisi.....	7
Şekil 8.	FV panel Proteus eşdeğer devresi.....	8
Şekil 9.	FV dizisi P-V karakteristik eğrisi ve güç kayıpları	9
Şekil 10.	Sıcak nokta oluşumu	10
Şekil 11.	Yük akımının gölgelenmiş paneller tarafından üretilen akımın altında olduğu senaryo.....	10
Şekil 12.	Yük akımının gölgelenmiş paneller tarafından üretilen akımın üstünde olduğu senaryo.....	11
Şekil 13.	FV dizisi ara bağlantılarının konumlandırılması	12
Şekil 14.	FV sistemlerinde klasik konumlandırmalar, a:(S), b:(SP), c:(TCB), d:(KB), e:(BP)	13
Şekil 15.	Statik yeniden konumlandırma (a) FV dizisi (b) Sudoku tekniği ile yeniden yapılandırılmış FV dizisi.....	14
Şekil 16.	Statik yeniden konumlandırmada FV panellerin yer değiştirme stratejisi	14
Şekil 17.	Uyarlanabilir yeniden konumlandırma (a) FV dizisi (b) Yeniden konumlandırılmış FV dizisi.....	16
Şekil 18.	9×9 FV dizisi (a) TCB bağlı (b) Dinamik yeniden konumlandırılmış	16
Şekil 19.	Ara bağlantılar (a) Bypass diyotları olmayan TCB (b) Bypass diyotlu TCB (c) Bypass diyotları olmayan dinamik yeniden konumlandırma tekniği (d) Bypass diyotlu dinamik yeniden konumlandırma tekniği	17
Şekil 20.	MGNT algoritmalarının genel blok şeması.....	21
Şekil 21.	Yapay Sinir Ağı tabanlı MGNT genel yapısı.....	25
Şekil 22.	Bulanık Mantık kontrolünün temsili genel yapısı	26

Şekil 23.	Dolaylı D&G algoritması.....	28
Şekil 24.	D&G algoritması, a: Sabit adım aralıklı, b: Küçük adım aralıklı, c: Değişken adım aralıklı, d: Kısmi gölgelenme altında.....	28
Şekil 25.	Doğrudan D&G algoritması.....	30
Şekil 26.	Artımsal iletkenlik algoritması.....	31
Şekil 27.	TT algoritması.....	31
Şekil 28.	PSO tabanlı MGNT algoritmasının çalışması.....	33
Şekil 29.	PSO tabanlı MGNT algoritmasının akış şeması.....	34
Şekil 30.	(a) Önerilen yöntemde FV dizisi ara bağlantılarının yer değiştirme stratejisi (b) Önerilen yöntemin FV dizisine uygulanması (c) FV panel elektriksel eşdeğer devresi	35
Şekil 31.	Önerilen yaklaşımın akış şeması	36
Şekil 32.	Artıran (Boost) dönüştürücü.....	38
Şekil 33.	Artıran (Boost) dönüştürücü anahtarın iletim ve kesim durumu.....	38
Şekil 34.	Artıran (Boost) dönüştürücü için anahtarlama durumuna göre dalga şekilleri.....	39
Şekil 35.	Yapılan çalışmanın blok şeması	42
Şekil 36.	3×3 FV dizisi.....	43
Şekil 37.	FV dizisi yeniden konumlandırması için kullanılan anahtarlama devresi	44
Şekil 38.	DA-DA Artıran dönüştürücü devresi.....	45
Şekil 39.	FV dizisinin kontrol kartı.....	46
Şekil 40.	IV eğrisi çizdirme devresi	47
Şekil 41.	Deney düzeneği	48
Şekil 42.	FV dizisi fiziksel kurulumu (a) ön görünüşü (b) arka görünüşü	49
Şekil 43.	Artıran dönüştürücü devre şeması	51
Şekil 44.	Artıran dönüştürücü üç boyutlu görseli	53
Şekil 45.	IV izleyici devre şeması	54
Şekil 46.	IV İzleyici kullanıcı arayüzü	55
Şekil 47.	G1 senaryosunda FV dizisinin (a) P-T, (b) P-V, (c) I-V ve (d) T-V eğrileri	57
Şekil 48.	G2 senaryosunda FV dizisinin (a) P-T, (b) P-V, (c) I-V ve (d) T-V eğrileri	59
Şekil 49.	G3 senaryosunda FV dizisinin (a) P-T, (b) P-V, (c) I-V ve (d) T-V eğrileri	60
Şekil 50.	G4 senaryosunda FV dizisinin (a) P-T, (b) P-V, (c) I-V ve (d) T-V eğrileri	61

Şekil 51.	G5 senaryosunda FV dizisinin (a) P-T, (b) P-V, (c) I-V ve (d) T-V eğrileri	62
Şekil 52.	G6 senaryosunda FV dizisinin (a) P-T, (b) P-V, (c) I-V ve (d) T-V eğrileri	64
Şekil 53.	G7 senaryosunda FV dizisinin (a) P-T, (b) P-V, (c) I-V ve (d) T-V eğrileri	65
Şekil 54.	G8 senaryosunda FV dizisi (Işıma: 710 W/m ² , Gölge: yok)	67
Şekil 55.	G8 senaryosunda FV dizisine ait I-V ve P-V eğrileri.....	67
Şekil 56.	G8 senaryosunda FV dizisinin geriliminin osiloskop ekran görüntüsü.....	68
Şekil 57.	G9 senaryosunda FV dizisi (Işıma: 710 W/m ² , Gölge: 360 W/m ²).....	68
Şekil 58.	G9 senaryosunda FV dizisine ait I-V ve P-V eğrileri.....	69
Şekil 59.	G9 senaryosunda FV dizisinin geriliminin osiloskop ekran görüntüsü.....	70
Şekil 60.	G10 senaryosunda FV dizisi (Işıma: 840 W/m ² , Gölge: 320 W/m ²).....	71
Şekil 61.	G10 senaryosunda TCB konfigürasyonda FV dizisine ait I-V ve P-V eğrileri	71
Şekil 62.	G10 senaryosunda, önerilen yaklaşım uygulandıktan sonra FV dizisine ait I-V ve P-V eğrileri	72
Şekil 63.	G10 senaryosunda FV dizisinin geriliminin osiloskop ekran görüntüsü	73
Şekil 64.	G11 senaryosunda FV dizisi (Işıma: 848 W/m ² , Gölge: 50-400 W/m ²)	73
Şekil 65.	G11 senaryosunda TCB konfigürasyonda FV dizisine ait I-V ve P-V eğrileri	74
Şekil 66.	G11 senaryosunda, önerilen yaklaşım uygulandıktan sonra FV dizisine ait I-V ve P-V eğrileri	74
Şekil 67.	G11 senaryosunda FV dizisinin geriliminin osiloskop ekran görüntüsü.....	75
Şekil 68.	G12 senaryosunda FV dizisi (Işıma: 856 W/m ² , Gölge: 420 W/m ²).....	75
Şekil 69.	G12 senaryosunda TCB konfigürasyonda FV dizisine ait I-V ve P-V eğrileri	76
Şekil 70.	G12 senaryosunda, önerilen yaklaşım uygulandıktan sonra FV dizisine ait I-V ve P-V eğrileri	76
Şekil 71.	G12 senaryosunda FV dizisinin geriliminin osiloskop ekran görüntüsü.....	77
Şekil 72.	G13 senaryosunda FV dizisi (Işıma: 828 W/m ² , Gölge: 50 - 400 W/m ²)	78
Şekil 73.	G13 senaryosunda TCB konfigürasyonda FV dizisine ait I-V ve P-V eğrileri	78
Şekil 74.	G13 senaryosunda, önerilen yaklaşım uygulandıktan sonra FV dizisine ait I-V ve P-V eğrileri	79
Şekil 75.	G13 senaryosunda FV dizisinin geriliminin osiloskop ekran görüntüsü	79
Şekil 76.	G14 senaryosunda FV dizisi (Işıma: 832 W/m ² , Gölge: 150 W/m ²).....	80

Şekil 77.	G14 senaryosunda TCB konfigürasyonda FV dizisine ait I-V ve P-V eğrileri	80
Şekil 78.	G14 senaryosunda, önerilen yaklaşım uygulandıktan sonra FV dizisine ait I-V ve P-V eğrileri	81
Şekil 79.	G14 senaryosunda FV dizisinin geriliminin osiloskop ekran görüntüsü	82



TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. FV panel elektriksel parametreleri.....	8
Tablo 2. MGNT algoritmalarının gruplandırılması.....	24
Tablo 3. Anahtarlama matrisi.....	44
Tablo 4. Uygulama için tasarlanan dönüştürücü parametreleri	50
Tablo 5. G1 senaryosunda önerilen yöntemin ve TCB bağlantının analitik hesaplama sonuçları.....	56
Tablo 6. G2 senaryosunda önerilen yöntemin ve TCB bağlantının analitik hesaplama sonuçları.....	58
Tablo 7. G3 senaryosunda önerilen yöntemin ve TCB bağlantının analitik hesaplama sonuçları.....	59
Tablo 8. G4 senaryosunda önerilen yöntemin ve TCB bağlantının analitik hesaplama sonuçları.....	61
Tablo 9. G5 senaryosunda önerilen yöntemin ve TCB bağlantının analitik hesaplama sonuçları.....	62
Tablo 10. G6 senaryosunda önerilen yöntemin ve TCB bağlantının analitik hesaplama sonuçları.....	63
Tablo 11. G7 senaryosunda önerilen yöntemin ve TCB bağlantının analitik hesaplama sonuçları.....	64
Tablo 12. G1-G7 senaryolarında MGNT algoritmalarının performansları	66
Tablo 13. G8-G14 senaryolarında önerilen yöntemin performansı	82

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

MGN	: Maksimum Güç Noktası
MGNT	: Maksimum Güç Noktası Takibi
FV	: Fotovoltaik
PSO	: Parçacık Sürü Optimizasyonu
D&G	: Değiştir Gözle
AI	: Artımsal İletkenlik
GMGN	: Global Maksimum Güç Noktası
DA	: Doğru Akım
STK	: Standart Test Koşulu
R_s	: FV Hücre Seri Direnci
I_F	: Foto Akım Kaynağı
R_p	: FV Hücre Paralel Direnci
V_{FV}	: Panel Çıkış Gerilimi
I_s	: Seri Direnç Üzerinden Geçen Akım
D	: Dönüştürücü Görev Süresi
I_p	: Paralel Direnç Üzerinden Geçen Akım
T	: Panelin Sıcaklığı
I_d	: Diyot Üzerinden Geçen Akım
G	: Panel Üzerine Düşen Işıma
V_{MGN}	: Maksimum Güç Noktası Gerilimi
I_{KD}	: Kısa Devre Akımı
V_{AD}	: Açık Devre Gerilimi
I_{MGN}	: Maksimum Güç Noktası Akımı
P_{MGN}	: Maksimum Güç Noktasındaki Güç
n	: Kalite Faktörü
k	: Boltzman Sabiti
q	: Elektron Yüğü
I_o	: Diyot Ters Doyum Akımı
K_I	: Kısa Devre Akımına Bağlı Sıcaklık Katsayısı
YGN	: Yerel Güç Noktası

KK	: Klasik Konfigürasyon
SYK	: Statik Yeniden Konumlandırma
EYK	: Elektriksel Yeniden Konumlandırma
S	: Seri
SP	: Seri-Paralel
TCB	: Toplam Çapraz Bağlı
KB	: Köprülü Bağlantı
BP	: Bal Peteği
AYK	: Adaptif Yeniden Konumlandırma
DYK	: Dinamik Yeniden Konumlandırma
AK	: Arama Kurtarma
GÇO	: Geliştirilmiş Çekirge Optimizasyonu
GKO	: Gri Kurt Optimizasyonu
PSO	: Parçacık Sürüsü Optimizasyonu
GKA	: Guguk Kuşu Araması
DE	: Diferansiyel Evrim
ÇTA	: Çiçek Tozlaşma Algoritması
ÖÖTO	: Öğretme-Öğrenim Tabanlı Optimizasyon
SDA	: Su Döngüsü Algoritması
HAA	: Harmony Arama Algoritması
YA	: Yusufçuk Algoritması
MPA	: Mayın Patlama Algoritması
KAO	: Karınca Aslanı Optimizasyonu
ERA	: Emperyalist Rekabetçi Algoritma
RHO	: Radyal Hareket Optimizasyonu
ÇEO	: Çoklu Evren Optimizasyonu
BOA	: Balina Optimizasyon Algoritması
SKA	: Sinüs Kosinüs Algoritması
YAA	: Yerçekimsel Arama Algoritması
GKA	: Guguk Kuşu Arama
AA	: Ateşböceği Algoritması
GA	: Genetik Algoritma
JA	: Jaya Algoritması

1. GENEL BİLGİLER

Hızla artan dünya nüfusu ve yaşam standartlarının yükselmesi, enerjiye olan talebi de artırmıştır. Geçmiş yıllarda, enerji talebi büyük oranda fosil enerji kaynaklarından sağlanmaktaydı. Ancak, fosil enerji kaynakları sınırlı olmasının yanı sıra sera gazı salınımına yol açması nedeniyle çevre kirliliğine sebep olmaktadır. Bu kirlenmeyi sınırlamak için, Avrupa Birliği, 2030 yılına kadar net sera gazı emisyonlarını 1990 seviyelerine göre en az %55 oranında azaltmayı hedeflemektedir (PVPS Snapshot of Global PV Markets, 2024). Bu hedefi tutturabilmek için rüzgar enerjisi, dalga enerjisi, jeotermal enerji ve güneş enerjisi gibi alternatif enerji kaynaklarına yönelmiştir. Bu kaynakların arasında da en popüler olan güneş enerjisidir.

Güneş enerjisini elektrik enerjisine çevirmekte FV hücreler kullanılmaktadır. Bu üreteçler, ilk olarak ilkel seviyede Edmond Becquerel tarafından 1839'da geliştirildi (Becquerel, 1839). Sonrasında, 1883'te Charles Edgar Fritts, ilk pratik güneş hücresini oluşturdu. Ancak hücrelerin verimliliği %1'den düşük seviyede idi (Mertens, 2018). 1954 yılına gelindiğinde Bell Laboratuvarında %6 verimde ve silisyum tabanlı ilk güneş hücresi üretildi (Chapin vd., 1954). 1958 yılında, Hoffman Electronics firması FV hücre verimini %9'a çıkarttı ve bu hücreler ABD'nin FV teknolojisini kullanan ilk uydusu Vanguard I'de 8 yıl süreyle kullanıldı. Aynı firma, FV hücre verimini 1959'da %10'a, 1960'da %14'e çıkarmıştır (L. M. Fraas & O'Neill, 2014). FV hücre verimi üzerine çalışan araştırmacılar 1978 yılına gelindiğinde, InGaP/GaInAs/Ge temelli %40 verime sahip FV hücresi ortaya koymuştur (Loo vd., 1978). 1990'larda karasal uygulamalar için geliştirilen GaAs/GaSb temelli FV hücresinden %35'in üzerinde verim elde edildiği kaydedilmiştir (L. Fraas vd., 1990). Ancak Galyum (Ga) temelli FV hücrelerinin verimi yüksek olmasına rağmen üretimi ve işlenmesi çok maliyetlidir (Atia, 2023). Dolayısıyla, pratik uygulamalarda düşük maliyetlerinden dolayı silisyum tabanlı hücreler üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Silisyum tabanlı FV hücreleri arasında da monokristal hücreler yüksek verimlerinden dolayı öne çıkmaktadır. 1977 yılında %13.9 olan monokristal hücrelerin verimleri 2019 yılı itibarıyla %26 seviyelerine ulaşmıştır (URL-1, 2024).

FV sistemlerinin verimli ve daha uygun fiyatlı hale gelmesiyle, FV teknolojisinin küresel olarak benimsenmesinin de önü açılmıştır (Mollahasanoglu & Okumus, 2023; Şahin, 2020; Şahin & Blaabjerg, 2022). Dünya genelinde, FV sistemlerinin toplam kurulu

kapasitesi, 2012 yılında 102 GW iken, 2022 yılı sonunda 1184 GW'a yükselmiştir (PVPS Snapshot of Global PV Markets, 2023). Ülkemizde de kurulu FV santral gücü dünya ile uyumlu olarak artış göstermiştir. 2020 yılı sonunda kurulu santral gücü 6.7GW'a, 2024 yılı ilk çeyreği sonunda ise 12.4 GW'a ulaşmıştır. Enerji bakanlığı, 2035 yılı sonuna kadar her yıl 3.5 GW'lık güneş enerji santrali kurulumunu hedeflemektedir (URL-2, 2024).

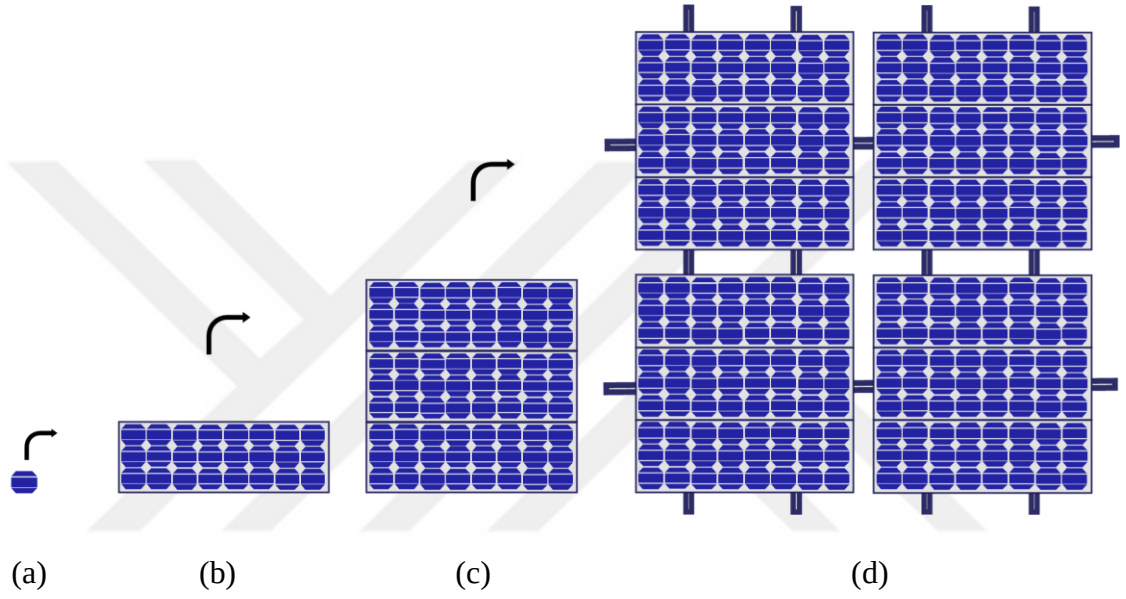
FV santrallerin çevreyle etkileşim içerisinde olması nedeniyle; tozlanma, gölgelenme, sıcaklık, panelin konumu ve eğimi gibi faktörler santralin işletme verimini etkilemektedir (Güngör vd., 2023). Örneğin, tozlanmanın FV panel performansına etkisini araştıran Klugmann-Radziemska (2015), toz birikimi ile FV panellerinin verimliliğindeki azalma arasında doğrusal bir ilişki olduğunu raporlamıştır. Ayrıca, toz birikiminin panellerin eğim açısı ile ters orantılı olduğu da hesaplanmıştır (Hachicha vd., 2019). Bir diğer çalışmada ise, yüksek sıcaklıklarda FV panellerin çıkış güçlerinin azaldığı görülmüştür (Ebhotu & Tabakov, 2023). Ancak çıkış gücünü azaltmada en büyük çevresel faktör gölgelenmedir (Ajmal vd., 2020; Aljafari vd., 2022; Li vd., 2022; Rezazadeh vd., 2022; Satpathy vd., 2022). Gölgelenme, FV panellerin karakteristik eğrilerinde bozulmalara yol açmaktadır. Bunun sonucunda FV sistemlerinin çıkış güçleri azalmaktadır. Bu tez çalışması, FV sistemlerinde gölgelenmenin etkisinden kaynaklı güç kayıplarını azaltmaya yönelik bir yaklaşım ortaya koymuştur.

1.1. Tezin Amacı

Bu tez çalışması, çevresel etkilerden kaynaklanan FV dizilerindeki güç kayıplarını azaltmak için yeni bir MGNT algoritması yaklaşımı önermektedir. Önerilen yaklaşım FV dizilerinde meydana gelen uyumsuzluk (çoğunlukla kısmi gölgelenme durumunda ortaya çıkmaktadır) ve yanlış MGN bulmaktan kaynaklanan kayıpları ortadan kaldırmayı amaçlamaktadır. Bu amaçla, FV dizi gölgelenmesi durumunda, gölgeleri dengeli bir şekilde dizi içerisinde dağıtarak (uyumsuzluk kaybını azaltmakta), FV dizi karakteristik eğrisinde yerel minimumları en aza indirip ya da yok edip, MGNT algoritmalarının GMGN'ye ulaşması hedeflenmiştir. Bu bağlamda, önerilen yöntemin anlaşılması için, genel bilgiler bölümünde FV sistemleri, FV sistemlerin konfigürasyonu, MGNT algoritmaları ve DA-DA dönüştürücüler hakkında bilgiler verilmiştir. Yapılan çalışmalar bölümü ise, önerilen yöntemin benzetimi ve uygulaması olmak üzere iki alt başlık altında ele alınmış olup, tartışma ve bulgular bölümünde sonuç görselleri sunulmuştur.

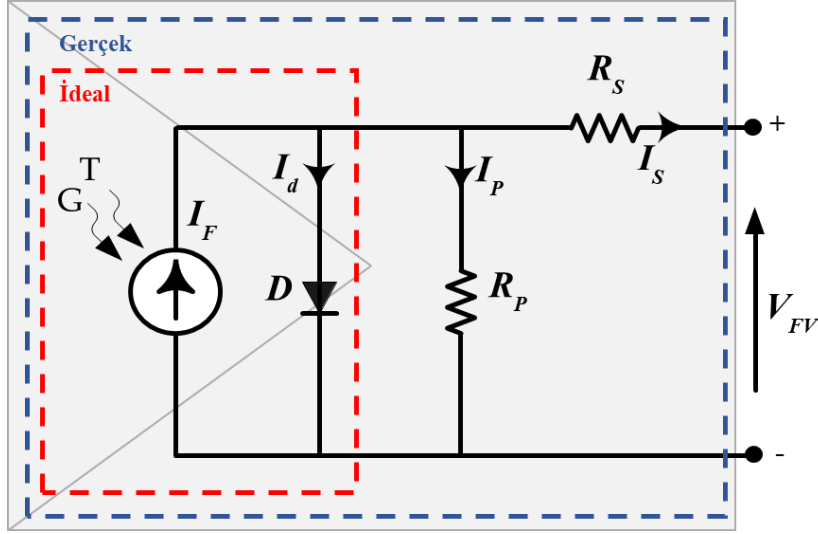
1.2. FV Sistemleri

Güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürmekte fotovoltaik hücreler kullanılmaktadır. Hücrelerin birleştirilmesinden FV modüller, modüllerin birleştirilmesiyle FV paneller meydana gelir. Güneş santrallerinin kurulumunda FV panellerin birbirleriyle bağlanması sonucu FV dizileri oluşturulmaktadır. Şekil 1, FV uygulamalarında sıklıkla kullanılan terimleri görsel olarak özetlemektedir.



Şekil 1. FV sistem bileşenleri (a) Hücre (b) Modül (c) Panel (d) Dizi

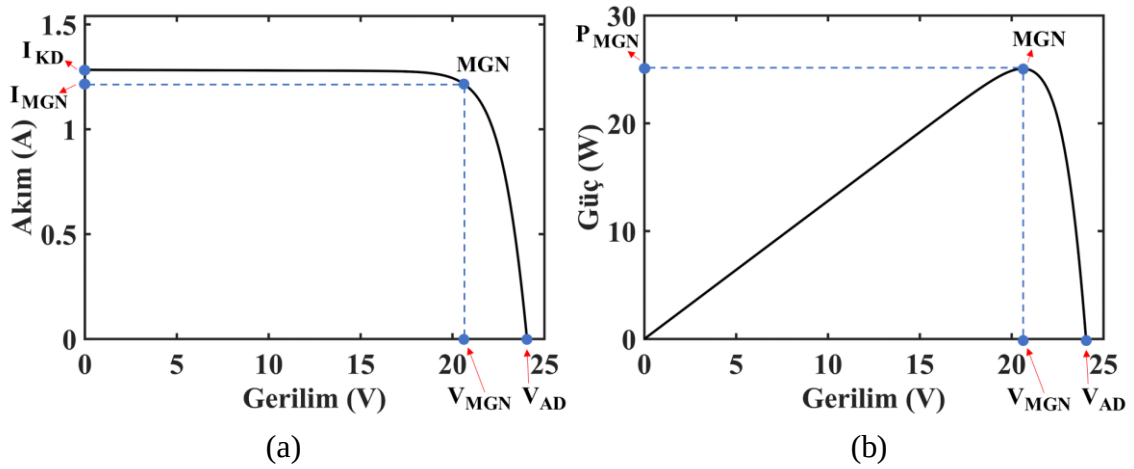
FV sisteminin çalışmasını analiz etmek için, FV panel elektriksel eşdeğer devre modelinin elde edilmesi ve bu modelin FV panelin gerçek performansına uygun olması gerekmektedir. Bu amaçla literatürde tek diyot, iki diyot ve üç diyot FV panel elektriksel eşdeğer devre modelleri geliştirilmiştir (Quaschnig, 2014). Bu tez çalışmasında, literatürde en yaygın kullanılan tek diyot eşdeğer devre modeli (Şekil 2) üzerinde çalışmalar yapılmıştır.



Şekil 2. FV panel tek diyot eşdeğer devresi

Şekil 2'deki FV panel elektriksel eşdeğer devresinde ideal ve gerçek olmak üzere iki işaretleme yapılmıştır. İdeal hücre, bağımsız akım kaynağına paralel bağlanmış bir diyottan oluşmaktadır. Ancak gerçek FV panellere, en yakın performansı gösteren elektriksel devre modelini elde etmek için, devreye R_s (seri direnç) ve R_p (paralel direnç) olmak üzere iki adet direnç eklenmiştir. Devre üzerinde gösterilen I_s , seri direnç üzerinden geçen akımı; I_p , paralel direnç üzerinden geçen akımı; I_d , diyot üzerinden geçen akımı; I_F , fotoakımı; V_{FV} , panel çıkış gerilimini; D , diyotu; T , panel sıcaklığını ve G , panel üzerine düşen ışımayı temsil etmektedir.

Şekil 3'de FV panel karakteristik eğrileri ve eğriler üzerindeki önemli noktaların açıklamaları gösterilmiştir.



Şekil 3. FV panel karakteristik eğrileri (a) I-V eğrisi (b) P-V eğrisi

Şekil 3’deki grafikler üzerinde gösterilen MGN, maksimum güç noktasını; I_{KD} , kısa devre akımını; I_{MGN} , maksimum güç noktası akımını; V_{MGN} , maksimum güç noktasındaki gerilimi; V_{AD} , açık devre gerilimini; P_{MGN} , maksimum güç noktasındaki gücü temsil etmektedir.

Şekil 2’de gösterilen FV panel tek diyot eşdeğer devresinden, FV panel elektriksel denklemleri aşağıda türetilmiştir. Denklem (1), FV panel tarafından üretilen akımı göstermektedir.

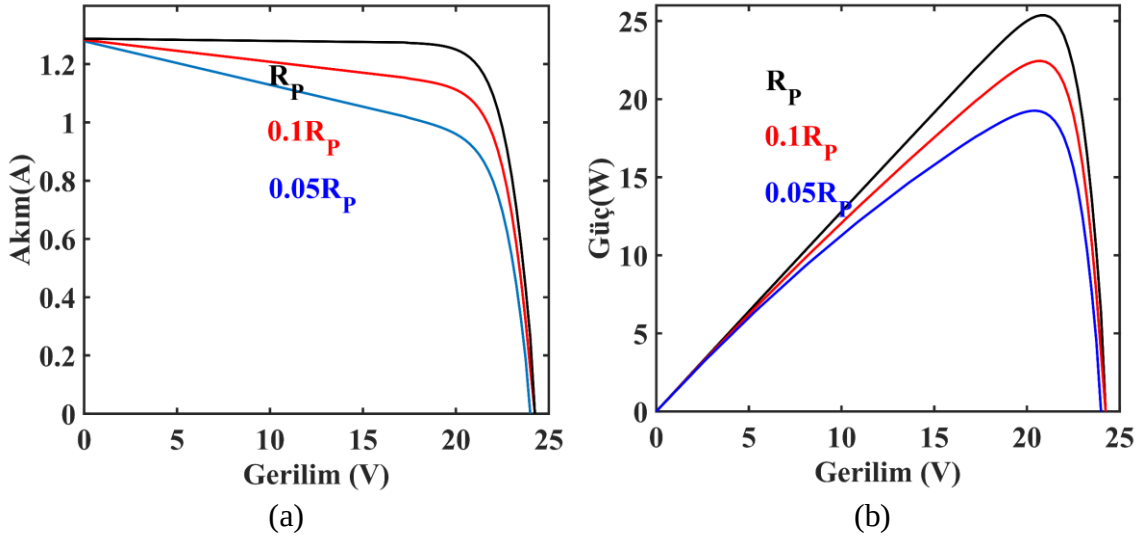
$$I_S = I_F - I_O \left(\exp \frac{q(V_{FV} + R_S I_S)}{n \cdot k \cdot T} - 1 \right) - \frac{(V_{FV} + I_S R_S)}{R_P} \quad (1)$$

Denklem (1)’de, n kalite faktörünü, k boltzman sabitini, q elektron yükünü, I_O diyot ters doyum akımını, K_I kısa devre akımına bağlı sıcaklık katsayısını göstermektedir. Foto akım kaynağı (I_F) tarafından üretilen akım denklem (2)’de gösterilmiştir.

$$I_F = (I_{KD} + K_I(T - 298.15)) \frac{G}{1000} \quad (2)$$

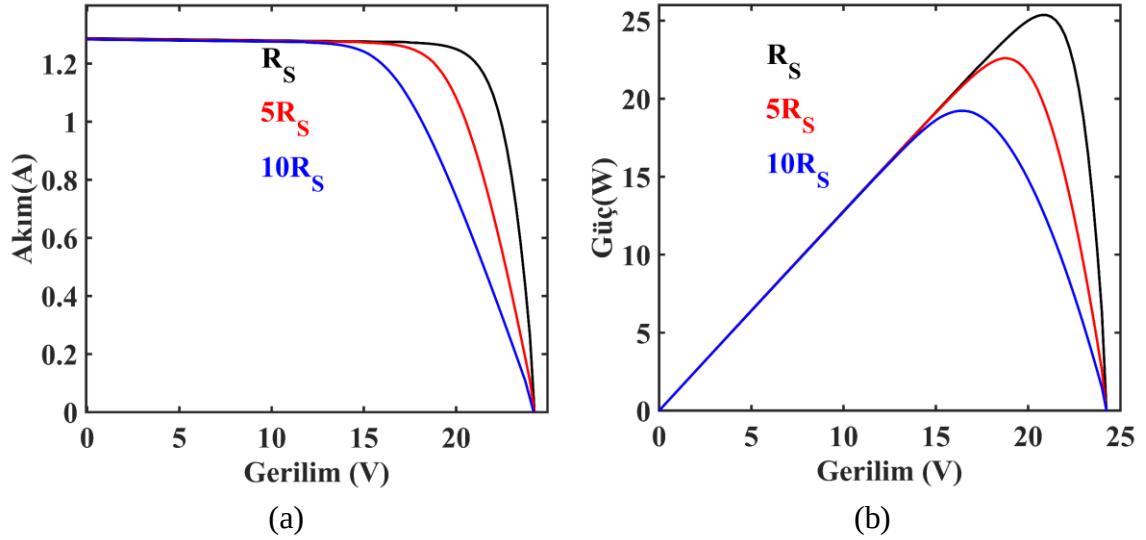
Denklem (1) ve (2)’de sunulan FV panelin elektriksel denklemlerinden de anlaşılacağı üzere; seri (R_S) ve paralel (R_P) dirençler, panel üzerine düşen ışıma (G), sıcaklık (T) FV panel performansını etkilemektedir.

R_P direncinin teorik olarak sonsuz ve pratikte mümkün olduğunca yüksek olması istenilmektedir. R_P ’nin düşük değerlikte olması, ışıktan üretilen akıma alternatif bir akım yolu sağlayarak güneş pillerinde güç kayıplarına neden olur. Şekil 4’de paralel direncin değişiminin, FV karakteristik eğrilerine olan etkisi gösterilmiştir.



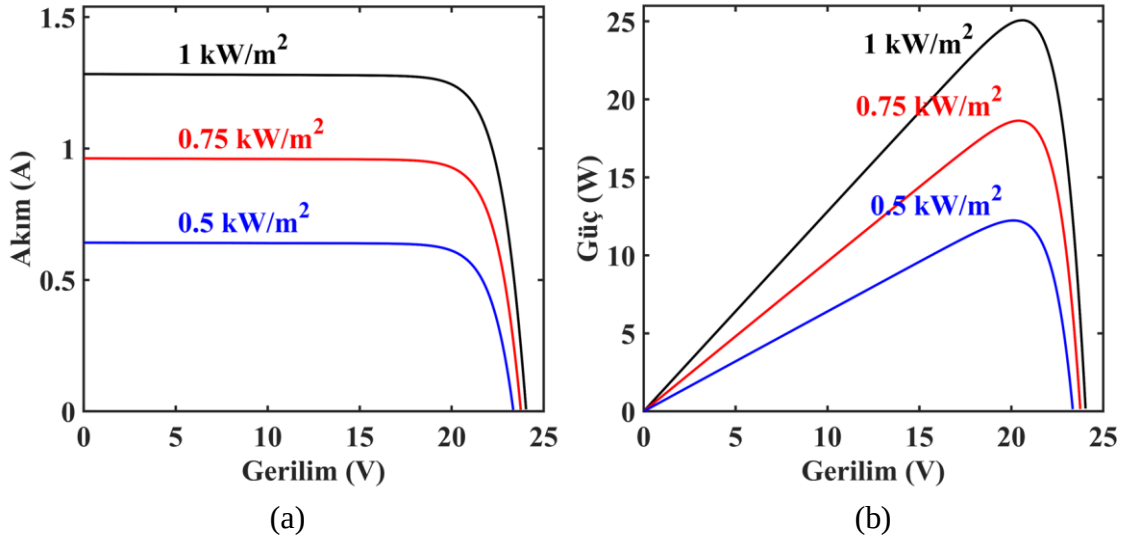
Şekil 4. FV panel elektriksel eşdeğer devresindeki R_p direncinin değişiminin karakteristik eğriye olan etkisi (a) I-V eğrisi (b) P-V eğrisi

FV panel eşdeğer devresinde gösterilen seri direnç değerinin ise, sıfır ya da sıfıra çok yakın olması eşdeğer devreyi ideale FV panele yaklaştırmaktadır. Şekil 5, seri direnç değişiminin, FV panel karakteristik eğrisine olan etkisini göstermektedir.



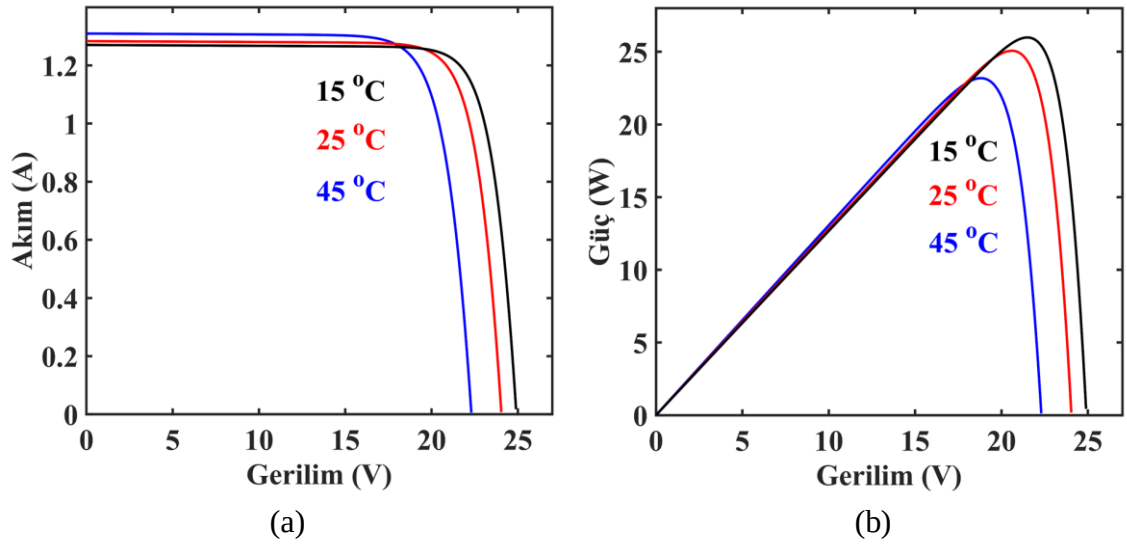
Şekil 5. FV panel elektriksel eşdeğer devresindeki R_s direncinin değişiminin karakteristik eğriye olan etkisi (a) I-V eğrisi (b) P-V eğrisi

Şekil 6'da ışımanın 500 W/m^2 'den 1000 W/m^2 'ye değişimi gösterilmiştir. Işıma miktarı arttıkça, FV panel gerilim ve çıkış akımı artmaktadır ancak akım değişim oranı gerilim değişim oranından daha yüksektir.



Şekil 6. FV panel karakteristik eğrisine ışımanın etkisi (a) I-V eğrisi (b) P-V eğrisi

Şekil 7'de ortam sıcaklığının 15°C ile 45°C arasındaki değişiminin, FV panel karakteristik eğrisi üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Sıcaklık artışı panel açık devre gerilimini azaltırken, kısa devre akımını da düşük bir oranda etkilemektedir.



Şekil 7. FV panel karakteristik eğrisine sıcaklığın etkisi (a) I-V eğrisi (b) P-V eğrisi

Özet olarak, sıcaklık değişimi FV panel gerilimini; ışıma değişimi ise FV panel çıkış akımını büyük oranda etkilemektedir.

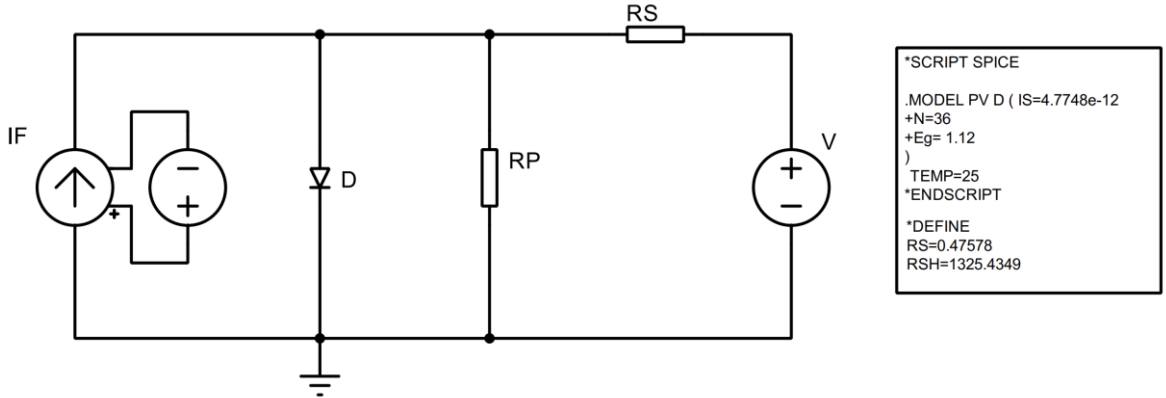
Tablo 1, bu tez çalışmasında kullanılan FV panelin Standart Test Koşulları (STK) altındaki (1000 W/m² ışıma ve 25 C° sıcaklık) elektriksel özelliklerini vermektedir.

Tablo 1. FV panel elektriksel parametreleri

Parametre	Değer
R_s	0.47Ω
R_p	1325.43Ω
I_{KD}	1.28 A
I_{MGN}	1.22 A
V_{AD}	20.60 V
V_{MGN}	24.05 V
P_{MGN}	25 W

1.2.1. FV Panel Proteus Eşdeğer Devresi

Bu tez çalışmasında önerilen yöntem Proteus'ta geliştirilmiştir. Yöntemin uygulanabilirliğini test etmek için Saad Motahhir tarafından Proteus'ta geliştirilmiş FV panel tek diyot eşdeğer devresi (Şekil 8) kullanılmıştır (Motahhir, 2018).

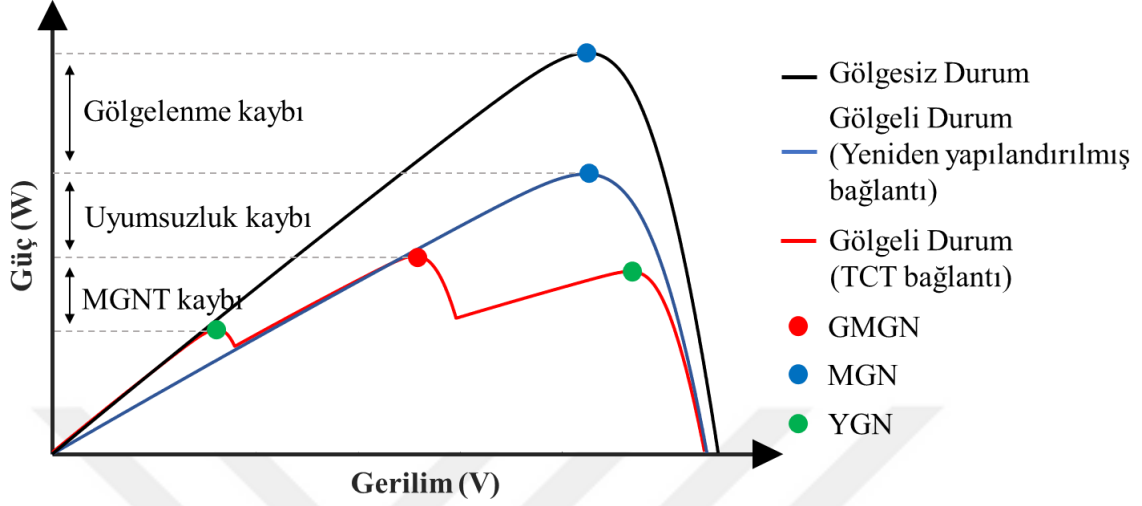


Şekil 8. FV panel Proteus eşdeğer devresi

1.2.1. FV Dizilerinde Kısmi Gölgeleme

FV diziler dengeli bir ışıma altında çalıştırıldıklarında tek tepe noktalı karakteristik eğrilere sahip olurlar. Bu nokta dizi Maksimum Güç Noktası (MGN) olarak adlandırılır. Ancak FV dizisi içindeki panellerin üzerine düşen ışımaların farklılık göstermesi, kısmi gölgeleme durumunun ortaya çıkmasına sebep olur. Bu durumda FV dizi karakteristik eğrisi üzerinde birden fazla tepe noktası meydana gelir. Bu noktalar içinde en yüksek güç değerine sahip olan nokta, Global Maksimum Güç Noktası (GMGN) diğerleri ise Yerel Güç Noktası (YGN) olarak adlandırılmaktadır (Ajmal vd., 2020). Şekil 9'da, yukarıda açıklanan

FV panel P-V karakteristik eğrilerindeki üç farklı güç noktası (MGN, GMGN, YGN) gösterilmiştir.



Şekil 9. FV dizisi P-V karakteristik eğrisi ve güç kayıpları

Şekil 9’da, verilen güç noktalarına ek olarak FV dizilerinde yaşanan güç kayıpları da gösterilmiştir. Bunlar aşağıda açıklanmıştır.

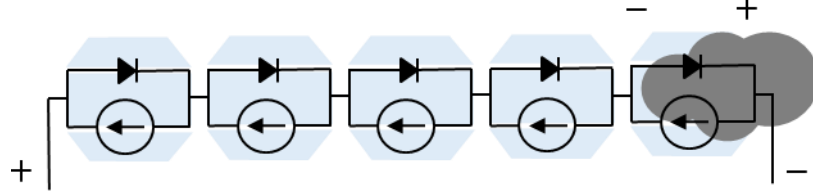
- 1) Gölgeleme kaybı: FV dizilerinin gölgelemesi durumunda, FV çıkış gücü bir miktar azalmaktadır ve buna gölgeleme kaybı denilmektedir.
- 2) Uyumsuzluk kaybı: FV dizileri kısmi gölgelediğinde, dizi ara bağlantılarından kaynaklı olarak yaşanan güç kaybına denilmektedir.
- 3) MGNT kaybı: P-V karakteristik eğrisinin karmaşıklığı, MGNT algoritmasının düşük performansa sahip olması gibi sebeplerden ötürü FV dizileri YGN’de çalışabilir. Bu durumda yaşanan güç kaybına MGNT kaybı denilmektedir (Ajmal vd., 2020).

1.2.2. Sıcak Nokta Oluşumu

FV sistemlerinde bulunan panellerin gölgelemesi sonucu, gölgelenen hücrelerin uçlarında negatif polarite oluşmaktadır. FV panelde gölgelenen tek bir hücrenin uçları arasında negatif bir gerilim meydana gelmesi, ilgili hücrenin yük gibi davranmasına sebep olmakta ve hücrenin çekmiş olduğu enerji, ısı enerjisine dönüştürülerek harcanmaya

çalışılmaktadır. Gölgeleyen hücrenin aşırı ısınması sonucunda (sıcak nokta oluşumu), hücreler yapısal olarak zarar görmekte ve tekrar kullanılamaz hale gelmektedir.

Şekil 10'da bir FV sisteminde sıcak nokta oluşumu gösterilmiştir.

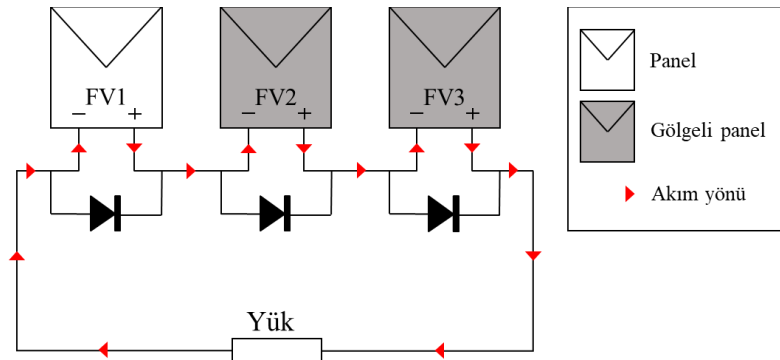


Şekil 10. Sıcak nokta oluşumu

1.2.3. Bypass Diyot Yaklaşımı

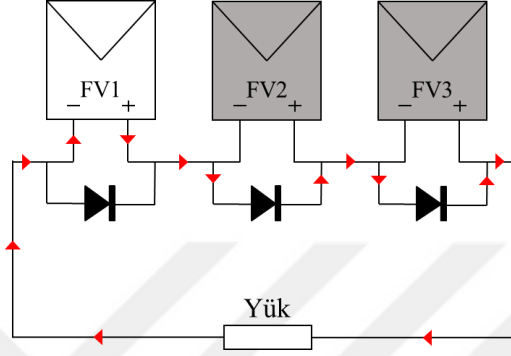
Kısmi gölgelenme altında FV dizileri içindeki panellerde, sıcak nokta etkisini önlemek için, panellere paralel diyotlar (bypass diyot) bağlanmaktadır. Normal çalışma sırasında aktif olmayan bu diyotlar, gölgelenme meydana geldiğinde devreye girerler. Böylelikle, yüksek negatif gerilim oluşma olasılığı ortadan kalkar ve gölgelenen güneş panellerinin sıcaklığı kontrol altına alınır.

Bypass diyotların çalışma stratejisi Şekil 11 ve Şekil 12'de anlatılmıştır. Şekil 11'de, üç FV panelin seri bağlandığı ve bunların ikisinin gölgelendiği gösterilmiştir. Yükün çektiği akım, (n birim) gölgelenmiş paneller tarafından üretilen akımın ($2n$ birim) altında olduğu zaman dizideki panellerin hepsi yüke güç aktarımı sağlamaktadır ve bypass diyotlar devreye girmemektedir (Teo vd., 2018).



Şekil 11. Yük akımının gölgelenmiş paneller tarafından üretilen akımın altında olduğu senaryo

Yük tarafından çekilen akım ($2n$ birim), gölgelenmiş paneller tarafından üretilen akımın (n birim) üstünde olduğu zaman, panellere paralel konumda bağlanmış olan diyotlar devreye girerek gölgelenmiş olan panelleri devreden çıkarmaktadır (Teo vd., 2018). Şekil 12’de yük akımı, gölgelenmiş paneller tarafından üretilen akımdan fazla olduğu durumda, bypass diyotların devreye girmesi gösterilmektedir.

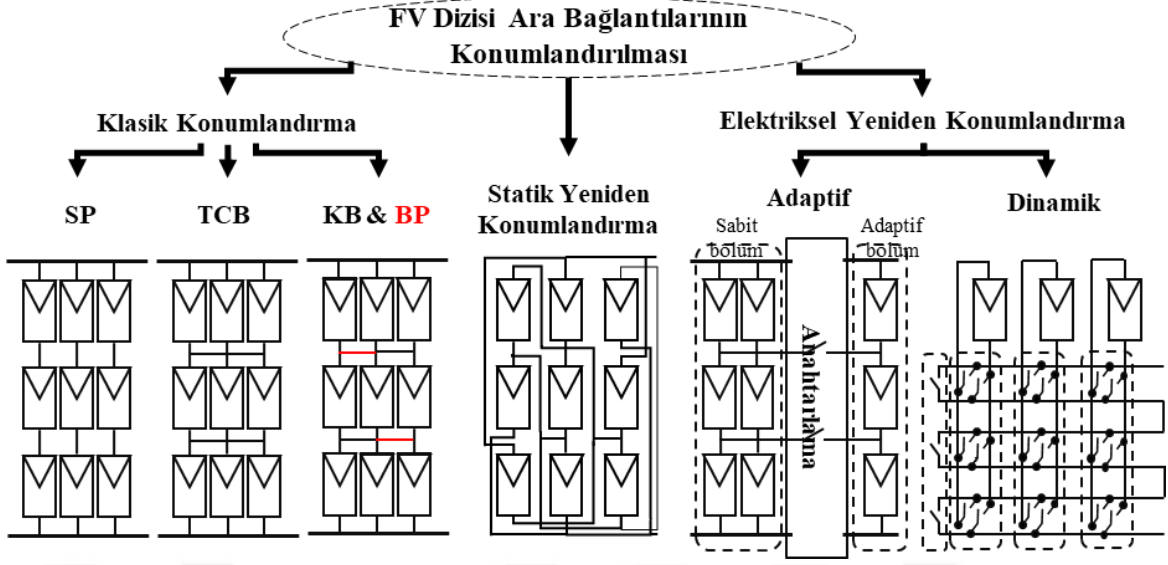


Şekil 12. Yük akımının gölgelenmiş paneller tarafından üretilen akımın üstünde olduğu senaryo

1.3. FV Dizisi Ara Bağlantılarının Konumlandırılması

Kısmi gölgelenmenin FV panel performansı üzerindeki etkilerini azaltmak için kullanılan bypass diyot yaklaşımı, gerilim dengesizliğine ve FV karakteristik eğrilerinde çoklu tepe noktalarının oluşmasına yol açmaktadır (Deng vd., 2017). Bu sorunların çözümüne yönelik olarak, FV dizileri için farklı ara bağlantı şemaları geliştirilmiştir (Ajmal vd., 2020).

Temel olarak FV dizi ara bağlantı yaklaşımları üç türe ayrılır: Klasik Konumlandırma (KK), Statik Yeniden Konumlandırma (SYK), Elektriksel Yeniden Konumlandırma (EYK).



Şekil 13. FV dizisi ara bağlantılarının konumlandırılması

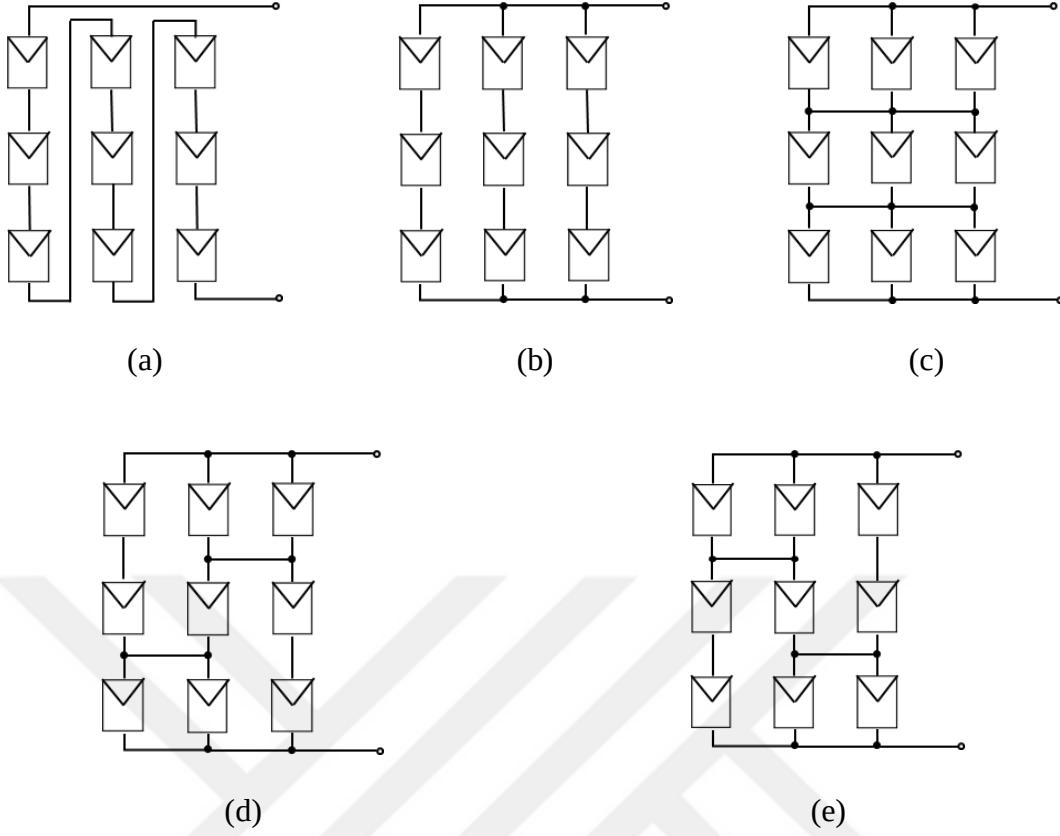
Klasik Konumlandırma yaklaşımında, FV dizilerindeki panellerin konfigürasyonunda herhangi bir değişiklik yapılmamaktadır.

Statik yeniden konumlandırmada, FV dizilerinin fiziksel konumu gölge etkisini dağıtmak için değiştirilir. Ancak FV panellerinin elektriksel bağlantıları değişmeden kalır. Statik yeniden konumlandırma algoritmalarının en büyük dezavantajı, dinamik değişen gölgelemeyi yüksek verimle dağıtamamalarıdır. Elektriksel yeniden konumlandırma yöntemi ise, bir anahtarlama matrisi kullanarak, FV dizilerinin elektriksel ara bağlantılarını değiştirmektedir (La Manna vd., 2014). Yöntemin temel amacı, çıkış gücünü maksimuma çıkarmak için anahtarlama matrisinin optimum modelini bulmaktır.

1.3.1. Klasik Konumlandırma

FV dizilerinin ara bağlantılarının ve fiziksel konumlarının sabit tutulduğu yaklaşımdır. Literatürde yaygın olarak kullanılan KK bağlantı şekilleri: Seri (S), Seri-Paralel (SP), Toplam Çapraz Bağlı (TCB), Köprülü Bağlantı (KB) ve Bal Peteğidir (BP) (Ajmal vd., 2020).

Bu şemalar arasında SP konumlandırması en yaygın olanıdır. TCB konfigürasyonu ise, çoğu gölgeleme modelinde en iyi performansı gösterir (Bingöl & Özkaya, 2018; Kaushika & Gautam, 2003). Fakat gölgeleme desenlerine göre konfigürasyon şeması sistem performansını önemli ölçüde değiştirmektedir (Satpathy vd., 2022).



Şekil 14. FV sistemlerinde klasik konumlandırmalar, a:(S), b:(SP), c:(TCB), d:(KB), e:(BP)

Kaushika and Gautam (2003), panellerin bağlantı şemaları SP'den TCB'ye değiştiğinde FV sisteminin performansının %4'ten fazla artabileceğini bildirmiştir. Verimdeki bu artışa rağmen, KK teknikleri hala çıkış gücünü iyileştirmede ve kısmi gölgelenme altındaki uyumsuzluk kayıplarını azaltmakta başarısız olmaktadır.

1.3.2. Statik Yeniden Konumlandırma

SYK, panellerin fiziksel olarak yeniden konumlandırılmasına dayanan etkili bir yeniden konumlandırma yöntemidir. EYK tekniklerinin aksine herhangi bir sensöre, anahtarlama matrisine veya karmaşık bir algoritmaya ihtiyaç duymaz. Ancak FV dizisindeki panellerin konumunu düzenlemek için etkili bir modele ihtiyaç vardır.

SYK yaklaşımları arasında, en temel ve en yaygın model Sudoku yaklaşımıdır (Rani vd., 2013).

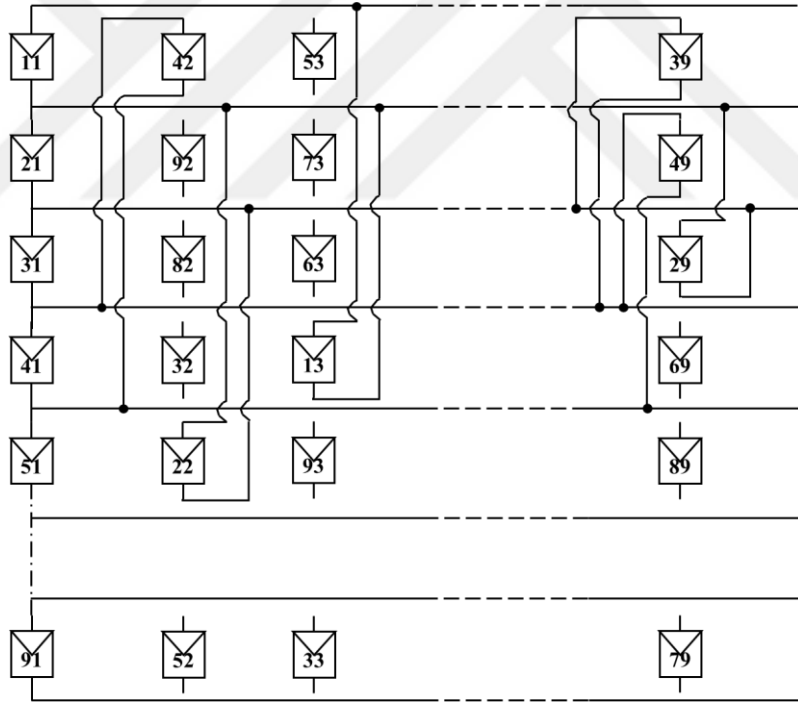
11	12	13	14	15	16	17	18	19
21	22	23	24	25	26	27	28	29
31	32	33	34	35	36	37	38	39
41	42	43	44	45	46	47	48	49
51	52	53	54	55	56	57	58	59
61	62	63	64	65	66	67	68	69
71	72	73	74	75	76	77	78	79
81	82	83	84	85	86	87	88	89
91	92	93	94	95	96	97	98	99

(a)

11	42	53	94	25	76	87	68	39
21	92	73	84	35	66	57	18	49
31	82	63	44	55	16	97	78	29
41	32	13	54	85	96	77	28	69
51	22	93	64	75	46	17	38	89
61	72	83	24	15	36	47	98	59
71	12	23	34	45	56	67	88	99
81	62	43	74	95	26	37	58	19
91	52	33	14	65	86	27	48	79

(b)

Şekil 15. Statik yeniden konumlandırma (a) FV dizisi (b) Sudoku tekniği ile yeniden yapılandırılmış FV dizisi



Şekil 16. Statik yeniden konumlandırmada FV panellerin yer değiştirme stratejisi

Sudoku yaklaşımına benzeyen bir diğer çalışmada ise, 4×4 FV dizisi için Sihirli Kare (SK) modeli geliştirilmiştir (Yadav vd., 2017). Geliştirilen modelin performansı, TCB'ye kıyasla 300 W'lık bir güç artırımını sağlamıştır. Bir diğer çalışmada ise, Gölge Dağılımı-Fiziksel Dizinin Yer Değiştirmesi (GD-FDYD) olarak adlandırılan model geliştirilmiş ve

performansı 5×5 ve 3×3 FV dizilerinde analiz edilmiştir. Sonuçlar, GD-FDYD'nin SP, BL ve TCB'den daha az uyumsuzluk kaybı yaptığını göstermiştir (Velasco-Quesada vd., 2009). GD-FDYD'nin üstünlüğü, uygulama maliyetinin düşük olması ve diğer konfigürasyonlarla karşılaştırıldığında yüksek performansdır. Bu algoritmalara ek olarak SuDoKu (Rani vd., 2013), Optimal SuDoKu (Krishna & Moger, 2019), Zig-Zag (Vijayalekshmy vd., 2016) ve Bulmaca Gölge Dağılımı (Yadav vd., 2016) yöntemleri gibi birçok SYK şeması bulunmaktadır. Fakat bu yaklaşımlar yalnızca sütun bazında gölge dağılımı gerçekleştirir. Dolayısıyla bu sınırlama, bazı gölgeleme desenleri altında yöntemlerin performansını azaltır. Ancak başka bir çalışmada yazarlar, satır ve sütun bazında gölge dağılımına dayalı Baskın Kare (BK) bulmaca şemasını önererek bu sınırlamanın üstesinden gelmiştir (Dhanalakshmi & Rajasekar, 2018). Bu yöntem 5×5 FV üzerinde uygulanmış ve elde edilen sonuçlar, BK yönteminin geleneksel ara bağlantı şemalarından daha üstün olduğunu ve uyumsuzluk kayıplarını önemli ölçüde azalttığını göstermiştir.

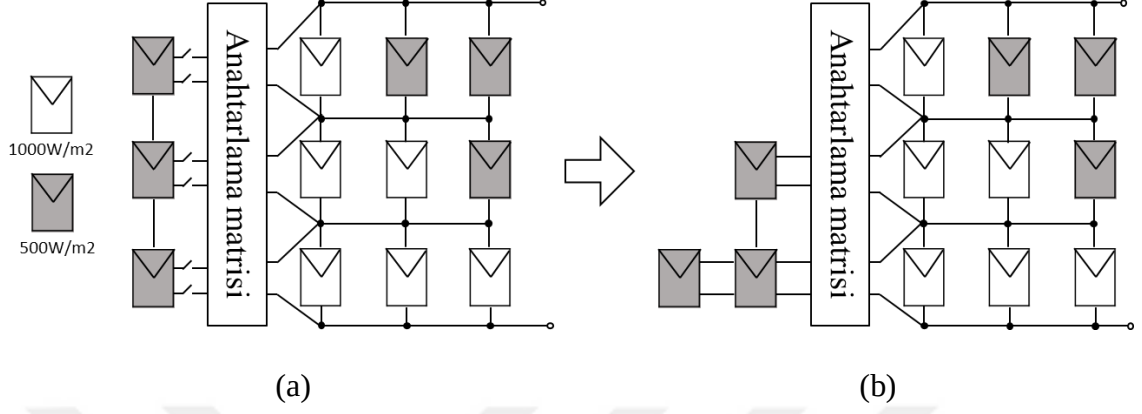
Yapılan başka bir çalışmada ise, Etarhouni vd. (2022) Sihirli Kare - Gelişmiş Konumlandırma adı verilen, FV dizileri için yüksek performanslı yeni bir model önerdiler. Bu çalışma; TCB konfigürasyonu, Latin Karesi (LK) (Madhusudanan vd., 2018), SK (Yadav vd., 2017) ve BK (Dhanalakshmi & Rajasekar, 2018) ile karşılaştırıldığında FV dizisinin çıkış gücünde %16 ila %43 arasında bir iyileşme elde etti. Ancak belirtilen ve mevcut literatürde bulunan SYK tekniklerinin birçoğu, FV dizisindeki panellerin tek seferlik fiziksel olarak yeniden konumlandırılmasına dayanmaktadır (Dhanalakshmi & Rajasekar, 2018; Horoufiany & Ghandehari, 2018; Pillai vd., 2018; Rani vd., 2013; Satpathy & Sharma, 2019; Venkateswari & Rajasekar, 2020). Bu sebeple, SYK tekniklerinin gölgenin dinamik olarak değiştiği durumlarda performansları düşüktür (Ajmal vd., 2020).

1.3.3. Elektriksel Yeniden Konumlandırma

EYK yaklaşımlarında, gölgenin FV dizisindeki etkisi dizi ara bağlantılarının değiştirilmesiyle azaltılır (Ajmal vd., 2020). EYK yaklaşımları temel olarak ikiye ayrılır: Adaptif Yeniden Konumlandırma (AYK), Dinamik Yeniden Konumlandırma (DYK).

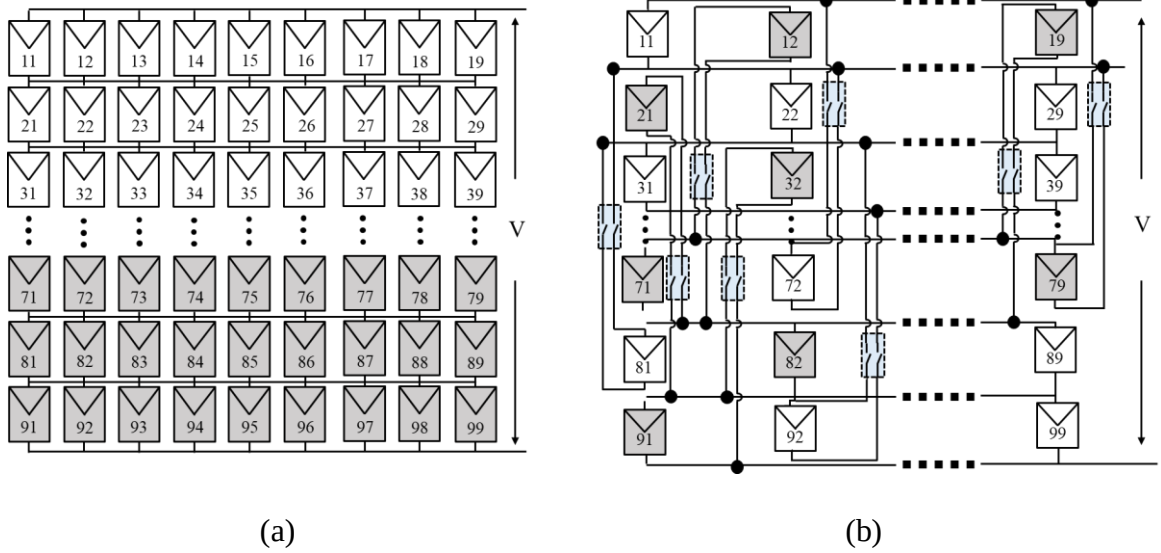
AYK yaklaşımı sabit ve adaptif olmak üzere iki bölüme sahiptir (Nguyen & Lehman, 2008a). Bu teknik, her sıradaki akım düşüşünü telafi etmek için adaptif FV panelleri sabit panellere bağlamayı amaçlamaktadır (Nguyen & Lehman, 2008b).

Şekil 17’de, bir 3×4 FV dizisinde AYK tekniklerinin genel işleyişi sunulmuştur. Bu dizide ilk sütunda bulunan paneller anahtarlama elemanları yardımıyla yer değiştirmektedir.



Şekil 17. Uyarlanabilir yeniden konumlandırma (a) FV dizisi (b) Yeniden konumlandırılmış FV dizisi

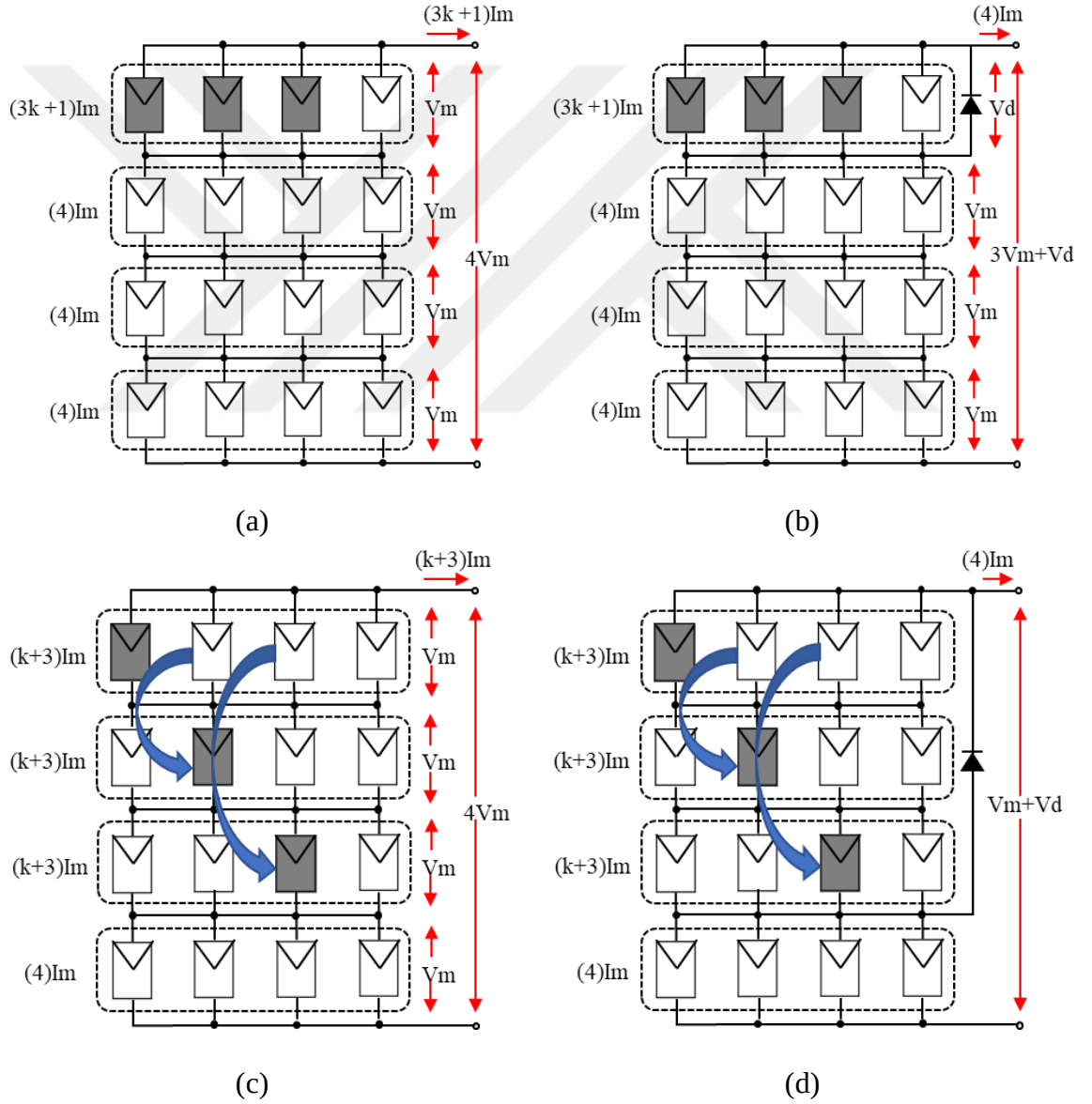
AYK tekniğinde, satır akımının dağıtılmasında sistem performansının düşük olması sebebiyle son zamanlarda araştırmacılar DYK teknikleri üzerine yoğunlaşmıştır (Ajmal vd., 2020). Bu teknikte FV dizisindeki panellerin konumu anahtarlama ile sütun boyunca yer değiştirebilmektedir. Bu durum Şekil 18’ de gösterilmektedir.



Şekil 18. 9×9 FV dizisi (a) TCB bağlı (b) Dinamik yeniden konumlandırılmış

Şekil 19’da dinamik yeniden konumlandırma tekniğinin çalışma stratejisi 4×4’lük bir FV dizisi için, matematiksel olarak anlatılmıştır.

Şekil 19’da ara bağlantısı TCB ve yeniden yapılandırılmış 4×4 FV dizisinin, bypass diyotlu ve diyotsuz davranışları görselleştirilmiştir. Şekil 19(a)’da TCB bağlantılı FV dizisinin ilk satırındaki üç panel gölgelenmiştir. FV dizisi çıkış akımı gölgelenmiş panellerin bulunduğu satır tarafından üretilen $(k+3)I_m$ akımla sınırlanmıştır. Şekil 19(b)’de ise gölgelenmiş satır bypass diyot tarafından devreden çıkarılmaktadır. Gölgeleyen panellerin devreden çıkmasıyla FV dizisi çıkış akımı $4I_m$ ’ye yükselmiş ve dizi çıkış gerilimi $3V_m + V_d$ ’ye düşmüştür. Ayrıca, diyot gerilimi (V_d) panel gerilimine oranla çok düşük bir değerlikte olduğu için ihmal edilmektedir (Etarhouni vd., 2022). Bu sebeple devam eden hesaplamalarda kullanılmamaktadır.



Şekil 19. Ara bağlantılar (a) Bypass diyotları olmayan TCB (b) Bypass diyotlu TCB (c) Bypass diyotları olmayan dinamik yeniden konumlandırma tekniği (d) Bypass diyotlu dinamik yeniden konumlandırma tekniği

Şekil 19(c)'de gölgelenmiş paneller, dizi içerisine dengeli bir biçimde dağıtılmıştır. Gölge panellerin dengeli bir şekilde dağıtılması sonucunda, FV dizisi çıkış akımı $(k+3)I_m$ 'ye yükselmiştir. Şekil 19(d)'de gölgeli satırların bypass diyot yardımıyla devreden çıkarılması durumunda ise, FV dizisi çıkış akımı $(4)I_m$ 'ye yükselmiş ve çıkış gerilimi de V_m+V_d 'ye düşmüştür. Bypass diyotlar FV panellerin yapısal ve fiziksel sağlamlığını korumak amacıyla devreye girmektedir. Eğer FV panel grubu tarafından üretilen güç, kısmi gölgelenme durumunda daha düşük akıma sahip tüm dizi tarafından üretilen güçten daha yüksekse, FV panellerin gölgeli grupları arasındaki bypass diyotları devreye girmektedir. Ancak pratikte bu durumla nadiren karşılaşmaktadır (Etarhouni vd., 2022). Bu sebeple incelemeler yapılırken bypass diyotsuz durum dikkate alınarak karşılaştırmalar yapılmaktadır.

Şekil 19'da gösterilen FV dizisinin bir satırının akımını hesaplamak için aşağıdaki denklemler kullanılmaktadır.

$$I_{SATIR} = \sum_{K=1}^m \frac{G_K}{G_0} I_m \quad (3)$$

$$I_{SATIR} = K_1 I_m + K_2 I_m + K_3 I_m + K_4 I_m \quad (4)$$

Denklemden kullanılan K, panele gelen ışımının 1000 W/m^2 ışımaya oranından hesaplanmaktadır. Şekil 19(a)'daki FV dizisi satır akımları denklem (5) ve (6)'da gösterilmiştir.

$$I_1 = 3KI_m + I_m = (3K + 1) I_m \quad (5)$$

$$I_2 = I_3 = I_4 = 4I_m = 4I_m \quad (6)$$

FV dizisinde en düşük akımı üreten satır, dizinin çıkış akımını vermektedir. Bu sebeple, Şekil 19(a)'daki FV dizisi çıkış akımı $(3K + 1)I_m$ ve üretilen güç $(12K + 4)I_m V_m$ 'dir.

$$P_{MGN} = (3K + 1)I_m \times 4V_m = (12K + 4)I_m V_m \quad (7)$$

Şekil 19(c)'deki FV dizisinde olduğu gibi gölgeler dağıtıldığında ilk üç satırın ürettiği akım birbirine eşittir ve dördüncü satır akımı farklıdır.

$$I_1 = I_2 = I_3 = KI_m + 3I_m = (K + 3)I_m \quad (8)$$

$$I_4 = 4I_m \quad (9)$$

FV dizisi tarafından üretilecek maksimum güç $(4K + 12)I_m V_m$ olarak hesaplanır.

$$P_{MGN} = (K + 3)I_m \times 4V_m = (4K + 12)I_m V_m \quad (10)$$

Uyumsuzluk güç kaybını hesaplamak için aşağıdaki denklem kullanılmaktadır.

$$P_{UYUMSUZLUK} = P_{TOPLAM} - P_{MGN} \quad (11)$$

FV dizisindeki her bir panelin bireysel olarak üretebileceği güce P_{TOPLAM} denilmektedir.

$$P_{TOPLAM} = (3K + 13)I_m V_m \quad (12)$$

Denklem (7) ve (10)' da hesaplanan güçler (P_{MGN}) denklem (11)'de yerine yazılarak uyumsuzluk kaybı hesaplanmaktadır. Gölge dağılımı yapılmadan önceki ($P_{U_ÖNCE}$) ve sonraki (P_{U_SONRA}) uyumsuzluk kayıpları aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$P_{U_ÖNCE} = (3K + 13)I_m V_m - (12K + 4)I_m V_m = (9 - 9K)I_m V_m \quad (13)$$

$$P_{U_SONRA} = (3K + 13)I_m V_m - (4K + 12)I_m V_m = (1 - K)I_m V_m \quad (14)$$

Yapılan hesaplama sonucunda gölgeli panellerin FV dizisine dengeli olarak dağıtılması durumunda uyumsuzluk kaybının dokuz kat azaldığı hesaplanmıştır.

Gölgeli panelleri FV dizisi içerisinde dengeli bir şekilde dağıtmak için, en etkili yöntem metasezgisel optimizasyon tabanlı algoritmalardır. Deshkar vd. (2015), FV dizisi yeniden konumlandırma çalışmalarında sezgisel yöntemi uygulayan ilk ekiptir. Ayrıca bir

amaç fonksiyonu önermişler ve bunu 9×9 FV dizisi üzerinde Genetik Algoritma (GA) kullanarak optimum bağlantı şemasını hesaplamak için kullanmışlardır. Başka bir ilginç çalışmada, Babu vd. (2017) aynı amaç fonksiyonuyla diziyi yeniden konumlandırmak için PSO'yu uygulamışlardır ve yineleme sayısı 500 olan analizde, FV dizisinin yeniden konumlandırmasında PSO algoritmasının performansının GA algoritmasından daha iyi olduğunu rapor etmişlerdir. Bu algoritmalara benzer şekilde, 9×9 FV dizileri için Çekirge Optimizasyon Algoritması (ÇOA) adı verilen yeni bir yeniden konumlandırma yöntemi sunulmuştur (Fathy, 2018). Fathy (2018) ÇOA'nın performansının, GA, Sudoku ve TCB bağlantılı yöntemlerden üstün olduğunu bildirmiştir. Ayrıca, Yousri vd. (2020) Harris Şahinleri Optimizasyon (HŞO) algoritmasına dayalı bir yeniden konumlandırma algoritması önermişlerdir. Bu yöntem, farklı gölgeleme desenleri altında ve 9×9 , 6×4 , 6×20 gibi çeşitli FV sistem ölçeklerinde analiz edilmiştir. Çok yakın zamanda, FV dizisinin yeniden yapılandırılması için Yusufçuk Algoritması (YA) optimizasyonu tanıtılmıştır (Aljafari vd., 2022). YA algoritmasının performansı SP, KB, BP, TCB, GD-FDYD, SuDoKu, GA, PSO ile karşılaştırılarak değerlendirilmiş ve sırasıyla ortalama çıkış gücü iyileştirmesini %24.3, %23.9, %21.5, %10.1, %5.9, %2.9, %2.6, %1.1 ile diğerlerinden daha fazla gerçekleştirmiştir.

DYK teknikleri; gölgeleme desenini belirleyen sensörlere, optimum konfigürasyonu elde etmek için konfigürasyon algoritmasına ve uygulamada FV panellerinin ara bağlantılarını değiştirmek için çok sayıda anahtara ihtiyaç duyar (Ajmal vd., 2020; Rezazadeh vd., 2022; Zhu vd., 2020). Bu gereksinimler, sistemi karmaşıktırmasının yanı sıra, FV sisteminin kurulum ve işletme maliyetini de artırır. Ayrıca bu yaklaşımların FV sistemlere entegrasyonu zordur. Bu algoritmalar yinelemeli işlemleri gerçekleştirmek için yüksek performanslı işlemcilerle ihtiyaç duymakta bu nedenle, algoritmanın gerçek zamanlı olarak uygulanma şansını azaltmaktadır (Aljafari vd., 2022; Deshkar vd., 2015).

1.4. Maksimum Güç Noktası Takip (MGNT) Algoritmaları

FV panellerden maksimum güç elde etmek için, panele bağlanan yük direnciyle panel iç direncinin eşit olması gerekmektedir (Nayak vd., 2017). Ancak panelin almış olduğu güneş ışığı şiddetinin gün içindeki değişimi, ortam sıcaklığı gibi çevresel etkilerden dolayı FV panel iç direnci değişkenlik göstermektedir. Panel iç direncini yük direncine eşitleyebilmek için donanımsal olarak DA-DA dönüştürücüler kullanılmaktadır.

karakteristik eğrisindeki eğimin sıfır olduğu nokta) olacak şekilde ayarlar (Li vd., 2022; Tozlu & Çalık, 2021). MGN'yi bulmak için gözlem değişkenini değiştirerek, FV panel çıkış gücü ve gerilimini ölçüp eğim hesabı yapar. Hesaplanan eğim pozitif (dP/dV) olduğunda gözlem değişkeni MGN'nin solunda, negatif olduğunda ise MGN'nin sağında konumlanmış olduğu prensibiyle MGN'ye yakınsamaya çalışır (Killi & Samanta, 2015, 2018). Ancak, D&G algoritması MGN etrafında salınım yapmaktadır. Bu sorunu gidermek için geliştirilen Artımsal İletkenlik (Aİ) algoritması FV panelin anlık ve artımlı iletkenlik değişimini takip ederek MGN'yi bulmaktadır. D&G algoritmasıyla kıyaslandığında, Aİ algoritması MGN'de daha az salınım (sıfır değil) yapsa da, uygulamada daha gelişmiş donanım ve yazılım gereksinimi gibi dezavantajları vardır (Radjai vd., 2014). Ayrıca olumsuz hava şartlarında bu algoritmaların performansları çok düşüktür.

Performansı artırmak için, D&G algoritmasının geçmiş görev sürelerini kullanarak optimal görev süresini hesaplayan yeni bir MGNT algoritması geliştirilmiştir (Yue vd., 2021). Benzer bir diğer çalışmada ise gözlem değişkeninin adım aralığının optimum değerinin hesaplandığı Tepe Tırmanma algoritması ortaya atılmıştır (Jately vd., 2021). Ancak her iki algoritmada da gözlem değişkeninin adım aralığı sabittir. Sabit adım aralığına sahip algoritmalarda, ortam şartlarının ani değişimi, bu algoritmaların MGN noktasına ulaşmaya çalışırken güç kayıpları yaşamasına sebep olmaktadır. Kayıpların önüne geçmek için ani değişen şartlara hızlı cevap verebilen, sürekli durumda düşük salınım yapan değişken adım aralıklarına sahip algoritmalar geliştirilmiştir (Abdelsalam vd., 2011). D&G algoritmasının, adım aralıklarının değişken hale getirilmesi için Pisagor teoremine dayanan yeni bir D&G algoritması önerilmiştir (Charaabi vd., 2022). Benzer şekilde Aİ algoritmasının adım aralıklarını değişken hale getirmek için de Bulanık Mantık kontrolcüsü kullanılmıştır (Radjai vd., 2014). Ancak yukarıda bahsedilen algoritmaların hepsi, FV panellerin dengeli bir ışığa altında kalması durumunda, yüksek verimle çalışacak yöntemlerdir.

FV paneller, bazı durumlarda çevresel faktörlerden dolayı kısmi gölgelenirler. Bu durumda, FV panel karakteristik eğrisinde birden çok MGN meydana gelir ve D&G, Aİ ya da bunlardan türetilen algoritmalar genel maksimum güç noktasını bulamayabilir (Ahmad vd., 2019; De Brito vd., 2012; Selvan & Nair, 2016). Bu sebeple literatürde esnek hesaplama tabanlı yöntemlere dayanan MGNT algoritmaları geliştirilmiştir.

FV panellerde MGNT uygulaması için, esnek hesaplama tekniklerinde kullanılan bazı yöntemler şunlardır: Bulanık Mantık Kontrolü (BMK) (Altas & Sharaf, 2008; Güngör, 2019;

Güngör & Hussaini, 2017), Yapay Sinir Ağı (YSA) (Özdemir & Güngör, 2018), Uyarlamalı Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemi (UATBÇS) (Güngör, 2018b; Güngör & Hussaini, 2017), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) (Miyatake vd., 2011), Gri Kurt Algoritması (Eltamaly & Farh, 2019), Karınca Kolonisi Optimizasyonu (Jiang vd., 2013). Bu algoritmalar arasında kural ve ağ eğitimi tabanlı algoritmalar, uygulandığı sistem hakkında detaylı bilgiye ihtiyaç duymaktadırlar. Ancak MGN takip performansları yüksektir. Al-Majidi vd. (2019) deneysel olarak elde edilen verilerden, eğitmiş olduğu UATBÇS tabanlı bir yaklaşım geliştirmiştir. Geliştirilen yaklaşım %99.3'ün üzerinde verimlilikle maksimum güç noktasını takip etmiştir. Ayrıca, Mahdi vd. (2020) UATBÇS tabanlı geliştirilen MGNT algoritmasının kısmi gölgelenme durumlarında da çalışabileceği sonucuna ulaşmıştır. Yaichi vd. (2014) ise Yapay Sinir Ağları tabanlı MGNT algoritması geliştirerek MGN'yi yüksek performansta takip etmiştir. Ayrıca, bu algoritmalar başka MGNT algoritmalarıyla birlikte kullanıldığında uygulandıkları algoritmaların da verimleri artırırılar. Bu bağlamda, UATBÇS ve Aİ yöntemi birlikte kullanılarak %99.3'lük verimde bir MGNT algoritması önerilmiştir (Tao vd., 2021). Bir diğer hibrit yöntemde ise Kurbağa Sıçrama algoritması kullanılarak, Bulanık Mantık üyelik fonksiyonlarının optimum noktaları belirlenmiş ve MGNT algoritmasının performansı artırılmıştır (Aldosary vd., 2021). Ancak veri setinin oluşturulmasında yaşanan zorluklar (özellikle kısmi gölgelenme durumlarında) ve uzman bilgisine ihtiyaç duyulması, algoritmaların zayıf yönü olarak değerlendirilebilir. Bu sebeple literatürde, metasezgisel optimizasyon tabanlı MGNT algoritmaları daha popülerdir.

Zafar vd. (2021) literatüre %99.93 gibi yüksek verime sahip, Arama ve Kurtarma (AK) optimizasyonu tabanlı yeni bir MGNT algoritması önermiş ve bu algoritmayı Geliştirilmiş Çekirge Optimizasyonu (GÇO), Gri Kurt Optimizasyonu (GKO), Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO), Guguk Kuşu Araması (GKA) ve PSO- Yerçekimsel Arama (PSOYA) algoritmalarıyla kıyaslamıştır. Bu kıyaslamada, çoğu çalışmada olduğu gibi panel çıkış güçleri kullanılmıştır. Rezk vd. (2019) yaptığı çalışmada ise altı farklı metrik kullanarak Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Diferansiyel Evrim (DE), Çiçek Tozlaşma Algoritması (ÇTA), Öğretme-Öğrenim Tabanlı Optimizasyon (ÖÖTO), Gri Kurt Optimizasyonu (GKO), Su Döngüsü Algoritması (SDA), Harmony Arama Algoritması (HAA) , Yusufçuk Algoritması (YA), Mayın Patlama Algoritması (MPA), Karınca Aslanı Optimizasyonu (KAO), Emperyalist Rekabetçi Algoritma (ERA), Radyal Hareket Optimizasyonu (RHO), Çoklu Evren Optimizasyonu (ÇEO), Balina Optimizasyon Algoritması (BOA), Sinüs Kosinüs Algoritması (SKA), Yerçekimsel Arama Algoritması

(YAA), Guguk Kuşu Arama (GKA), Ateşböceği Algoritması (AA), Genetik Algoritma (GA), Jaya Algoritması (JA) tabanlı MGNT'lerin karşılaştırmalı performans analizini yapmıştır. Çalışma sonucunda ÖÖTO ve GKO tabanlı MGNT algoritmalarının takip performansları sırasıyla %98 ve %97'lik başarıyı gösterirken en kötü performansı KAO sergilemiştir.

Metasezgisel optimizasyon tabanlı MGNT algoritmaları, kısmi gölgelenme altında yüksek performans göstermelerine rağmen aday çözümlerin başlangıç konumlarını belirlemekte zorluklar yaşamaktadır. Bu sorunun üstesinden gelmek için yapılan bir çalışmada, görev süresinin başlangıç değerlerinin belirlenmesi için Lagrange İnterpolasyonu formülüne dayalı yeni bir PSO algoritması sunulmuştur. Önerilen teknik, takip hızını önemli ölçüde artırmış aynı zamanda MGN'ye ulaşıldıktan sonra sürekli durumdaki salınımı (pratik olarak sifıra) azaltmıştır (Koad vd., 2016).

MGNT algoritmaları üzerine yapılan çalışmaların özetlendiği bu bölümde, MGNT algoritmaları; görev süresinin hesaplanmasına ve ölçülen değere göre Tablo 2'de gruplandırılmıştır.

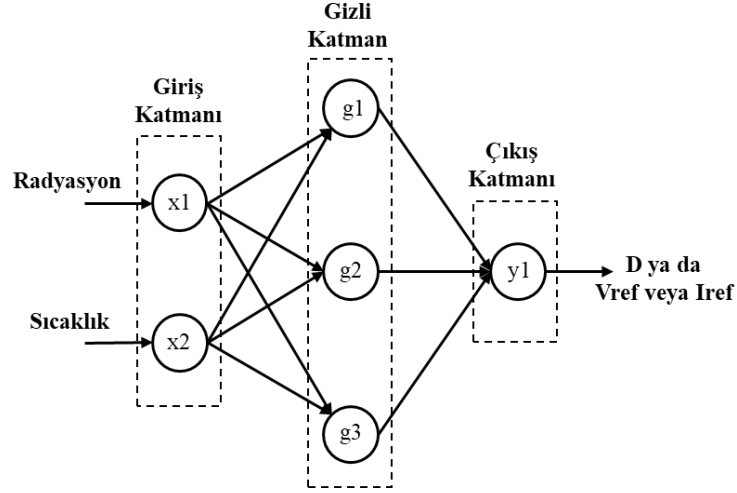
Tablo 2. MGNT algoritmalarının gruplandırılması

		Ölçülen değer	
		Akım veya gerilim	Işıma veya sıcaklık
Görev süresi hesaplanması	Dolaylı	A Grubu	B Grubu
	Doğrudan	C Grubu	D Grubu

Sonraki alt başlıklarda başlıca MGNT algoritmaları detaylı bir biçimde anlatılmış ve Tablo 2'de gösterilen gruplandırmaya göre grupları belirtilmiştir.

1.4.1. Yapay Sinir Ağı (YSA) Tabanlı MGNT Algoritması

YSA, sinir sisteminin çalışmasını taklit eden bir bilgi işlem modelidir. Giriş katmanı, gizli katman ve çıkış katmanı olmak üzere üç temel katmandan oluşmaktadır. Giriş katmanında eğitim verileri öğrenme yoluyla işlenir ve çıkış katmanından tahmin verileri çıkışa aktarılır (Güngör, 2019; Özdemir & Güngör, 2018). Gizli katman ise çıkış katmanı ile giriş katmanı arasında bağlantıyı sağlar.



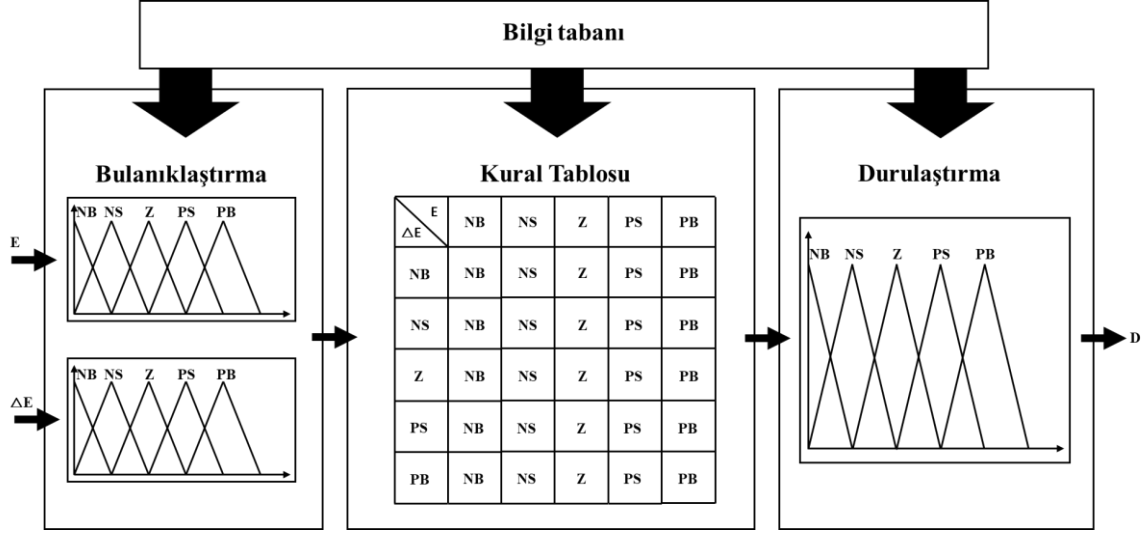
Şekil 21. Yapay Sinir Ağı tabanlı MGNT genel yapısı

YSA tabanlı MGNT algoritmalarında YSA giriş verileri; ısıma, sıcaklık, açık devre gerilimi veya kısa devre akımı gibi değişkenler olabilir. YSA'nın çıktıları ise referans gerilimi, akım değeri, görev süresi gibi değişkenlerdir. Tablo 2'deki MGNT gruplandırmasında, YSA tabanlı MGNT algoritması eğitim verilerine göre tüm gruplara girebilmektedir. Ancak genellikle dolaylı MGNT algoritmaları grubunda (A ve B Grubu) bulunacağı düşünülmektedir.

1.4.2. Bulanık Mantık Tabanlı MGNT Algoritması

Bulanık Mantık kontrollü sistemlerde matematiksel modellemeye ihtiyaç duyulmaksızın tamamen uzman bilgisine dayalı tasarım yapılmaktadır. Bu sistemlerin performansı, tasarımcının çıktılarıyla girdiler arasındaki ilişkiyi bilmesiyle orantılı olarak değişmektedir.

Bulanık Mantık kontrolcüsünün temel yapısı Şekil 22'de gösterilmektedir. Bu yapı temel olarak Bulanıklaştırma, Kural Tablosu ve Durulaştırma olmak üzere üç bloktan oluşur.



Şekil 22. Bulanık Mantık kontrolünün temsili genel yapısı

Bulanıklaştırma işlemi, sayısal girdi değişkenlerinin dilsel değişkenlere dönüştürüldüğü bölümdür. Bu bölümde Şekil 22’ de gösterildiği gibi üyelik fonksiyonları tanımlanmaktadır (NL (negatif büyük), NS (negatif küçük), Z (sıfır), PS (pozitif küçük) ve PL (pozitif büyük). Bir sonraki bölümde ise kural tablosu içinde kararların bilgi tabanı yardımıyla, çıkarımlarda bulunmaktadır. Bu çıkarımlar pratik deneyimlerden elde edilen sezgisel bilgiye dayanmaktadır. Elde edilen sözel çıkarımlar, durulaştırma bölümünde sayısal verilere dönüştürülmektedir (Craciunescu & Fara, 2023).

Bulanık Mantık tabanlı MGNT algoritmaları, genellikle hata ve hata değişimi olmak üzere iki adet girişe sahiptir. Bu giriş değerleri anlık güç ve çıkış gerilimi değerlerine bağlıdır. Şekil 22’ de giriş olarak belirtilen E ve Δ E değerler aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır (Ngan & Tan, 2011).

$$E(t) = \frac{P(t) - P(t-1)}{V(t) - V(t-1)} \quad (15)$$

$$\Delta E(t) = E(t) - E(t-1) \quad (16)$$

Çıkış, Şekil 22’de gösterildiği gibi doğrudan görev döngüsüdür. Ancak gerilim veya akım çıkışı Bulanık Mantık tabanlı MGNT algoritmaları da literatürde mevcuttur. Ayrıca giriş olarak sıcaklık ve ısıma değerlerini kullanan Bulanık Mantık tabanlı MGNT algoritmalarının da olması sebebiyle, bu algoritma Tablo 2’deki tüm gruplara dahildir.

1.4.3. Kesirli Kısa Devre Akımı Tabanlı MGNT Algoritması

Bu yöntem FV panelin kısa devre akımı (I_{KD}) ile maksimum güç noktasındaki akım (I_{MGN}) arasında bir ilişki olduğu varsayımı üzerinden maksimum gücü takip etmektedir. Bu durum denklem (17)'de gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$$I_{MGN} = K_i * I_{KD} \quad (17)$$

Denklem (17)'de kullanılan K_i değeri bir sabittir. Bu sabit genellikle 0.78 - 0.92 değerleri arasında alınmaktadır (Alghuwainem, 1994). Ancak bu sabit; FV panel markası, modeli ve serisine göre değişkenlik göstermesi sebebiyle, farklı çevre şartlarında (farklı ışıma ve sıcaklıklarda) deney ya da simülasyon yardımıyla belirlenmesi gerekmektedir. Algoritmanın ana dezavantajı, sistemin çalışır durumda olduğu süre boyunca kısa devre akımının ölçülerek, maksimum güç noktasındaki akımın belirlenmesidir. Bu ölçüm sırasında kısa süreli de olsa FV panelin sistemden ayrılması nedeniyle güç kayıpları yaşanmaktadır. Ayrıca kısmi gölgelenme altında, I_{MGN} ile I_{KD} arasında doğrusal bir ilişki kurulması zor olduğu için algoritmanın bu şartlar altında düşük verimde çalışacağı düşünülmektedir. Yöntemin avantajı ise, MGN'yi çok basit bir işlem ile bularak referans akım sinyali üretebilmesidir. Bu algoritma A grubu bir MGNT algoritmasıdır.

1.4.4. Kesirli Açık Devre Gerilimi Tabanlı MGNT Algoritması

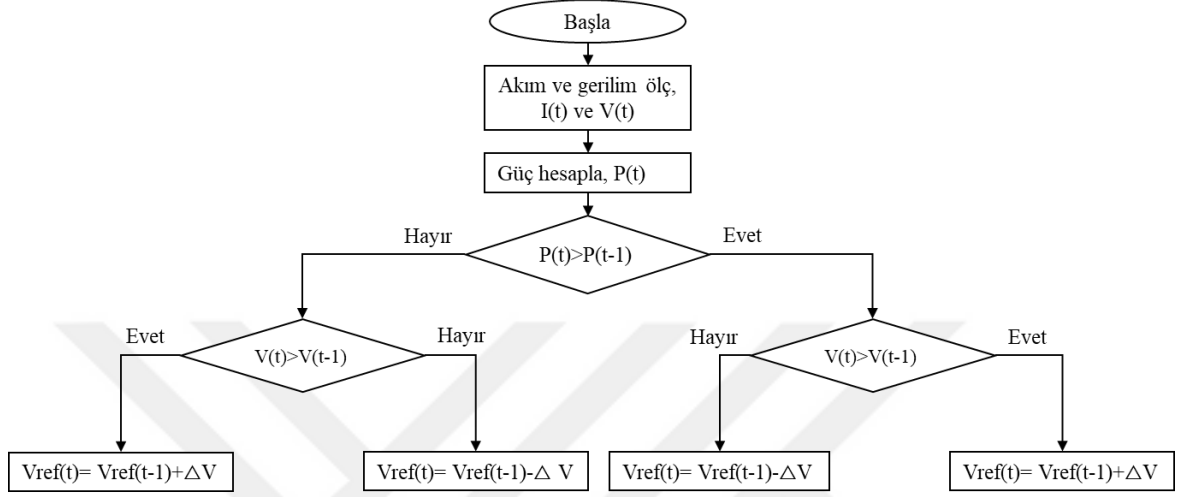
Kesirli Açık Devre Gerilimi tabanlı MGNT algoritması, FV panelin açık devre gerilimi (V_{AD}) ile maksimum güç noktasındaki gerilim (V_{MGN}) arasında bir ilişki olduğu varsayımı üzerinden maksimum güç noktasını bulmaktadır. Bu durum denklem (18)'de gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır. Denklem (15)'de kullanılan K_v değeri bir sabittir. Bu sabit genellikle 0.7-0.8 arasındadır (Salman vd., 2018).

$$V_{MGN} = K_v * V_{AD} \quad (18)$$

Bu algoritma, Kesirli Kısa Devre Akımı tabanlı MGNT algoritmasıyla benzer avantajlara ve dezavantajlara sahiptir. Tek farkı, FV sisteminde V_{AD} geriliminin periyodik olarak ölçümüne ihtiyaç duyulmasıdır. MGNT algoritmalarının gruplandırılması tablosuna göre bu algoritma A grubuna girmektedir.

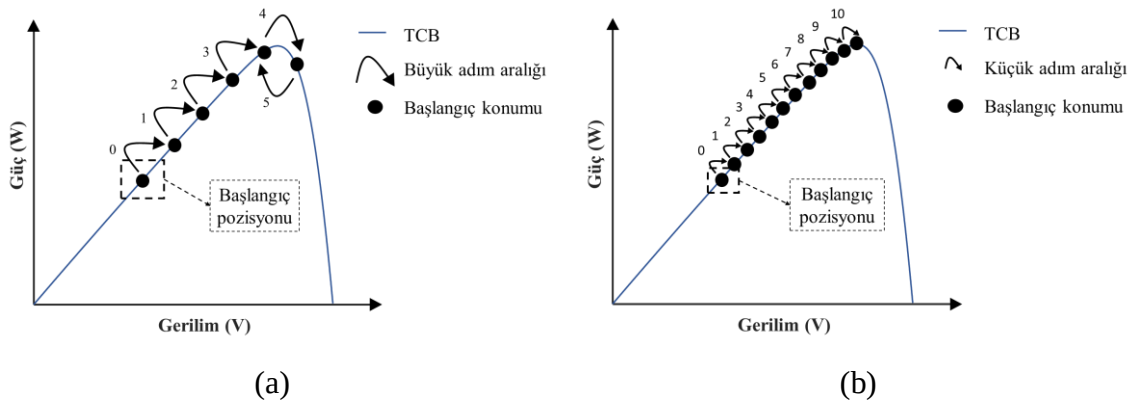
1.4.5. Dolaylı D&G Algoritması

Dolaylı D&G algoritması, PI kontrolcü için referans akım veya gerilim işareti üretmek MGNT yapmaktadır. Dolaylı D&G algoritması akış şeması aşağıda sunulmuştur.



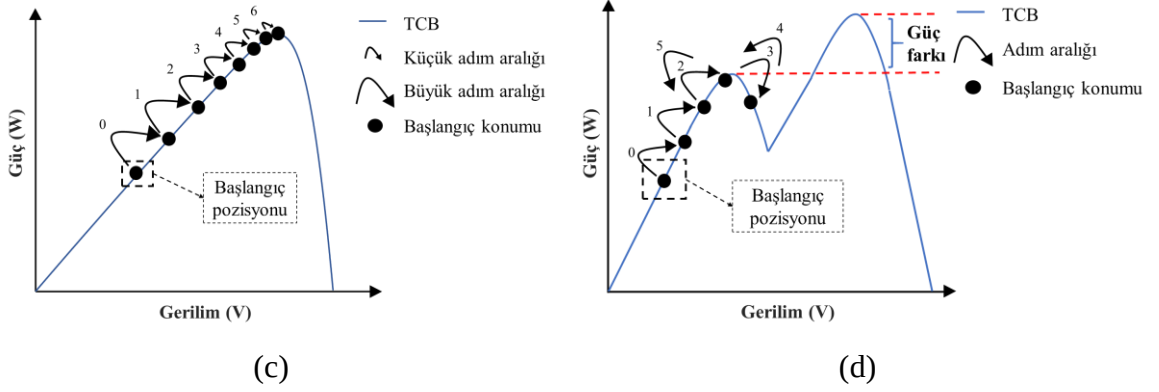
Şekil 23. Dolaylı D&G algoritması

Algoritma çıkışında gerilim referansı üretilmektedir. Ancak D&G algoritması, gözlem değişkeni (ΔV) sabit ve büyük bir değer olduğunda, Şekil 24(a)'da gösterildiği üzere güç noktası etrafında (4. ve 5. noktalar arasında) arama işlemi yapmaktadır.



Şekil 24. D&G algoritması, a: Sabit adım aralıklı, b: Küçük adım aralıklı, c: Değişken adım aralıklı, d: Kısmi gölgelenme altında

Şekil 24'ün devamı

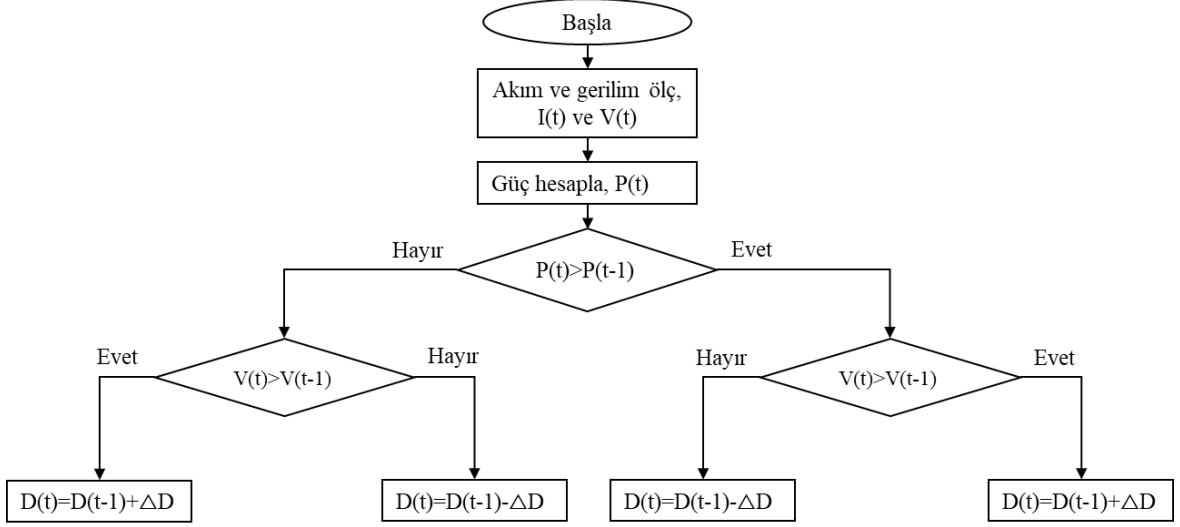


MGN etrafındaki sürekli arama işlemini ortadan kaldırmak için ΔV değeri azaltıldığında ise (Şekil 24(b)) MGN'yi bulmakta gecikme yaşanmaktadır (10 adım). Literatürde algoritmaların MGN'ye hızlı ulaşması ve güç noktasında salınım yapmaması istenmektedir. Bu sebeple D&G algoritmasının adım aralıkları değişken yapılarak performansı artırılmıştır. Şekil 24(c) değişken adım aralıklı D&G algoritmasının çalışma prensibini göstermektedir.

FV panel karakteristik eğrisinde birden çok güç noktası olduğunda (kısmi gölgelenmiş güneş paneli), D&G algoritması Şekil 24(d)'de görüldüğü üzere genel güç noktasını bulamamaktadır. Bu sebeple D&G algoritmalarında başlangıç arama noktasının belirlenmesi, genel maksimum güç noktasını bulmakta önemlidir.

1.4.6. Doğrudan D&G Algoritması

Doğrudan D&G algoritması, DA-DA dönüştürücü görev süresi (D) ile FV panel çıkış gücü arasındaki ilişkiyi temel alarak MGNT yapmaktadır. Şekil 25'de algoritmanın akış şeması gösterilmiştir.



Şekil 25. Doğrudan D&G algoritması

1.4.7. Artımsal İletkenlik (Aİ) Algoritması

Aİ algoritması D&G algoritmasında olduğu gibi, FV panel karakteristik eğrisinde MGN'deki eğimin sıfır olması prensibiyle çalışmaktadır (Tozlu & Çalık, 2021).

$$\frac{d(P)}{d(V)} = \frac{d(VI)}{d(V)} = \frac{Vd(I)}{d(V)} + \frac{Id(V)}{d(V)} = 0 \quad (19)$$

$$\frac{d(P)}{d(V)} = V * \frac{d(I)}{d(V)} + I \quad (20)$$

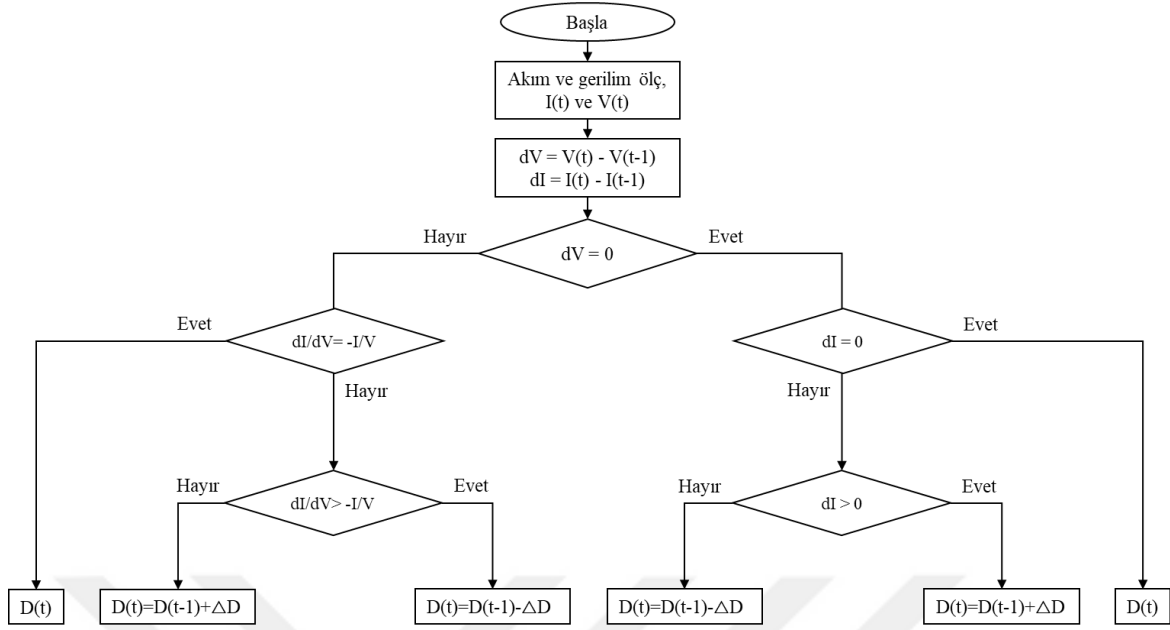
Denklem (21) MGN'yi göstermektedir.

$$\frac{d(P)}{d(V)} = 0 \quad (21)$$

Ancak bu algoritma, eğimin belli bir tolerans (E) değerinin altına düştüğünde MGN'yi bulduğu kabulüyle çalışmaktadır.

$$\frac{d(I)}{d(V)} + \frac{I}{V} = E \quad (22)$$

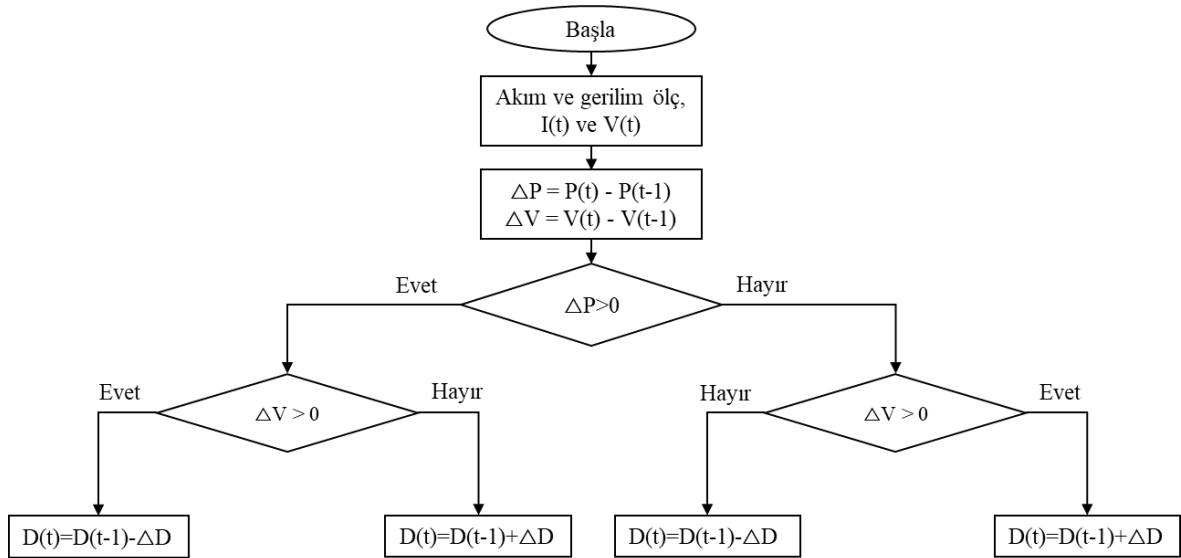
Şekil 26 Aİ algoritmasının akış şemasını göstermektedir.



Şekil 26. Artımsal iletkenlik algoritması

1.4.8. Tepe Tırmanışı (TT) Algoritması

TT algoritması, güç artışı olduğu sürece sabit bir ΔD değişimi ile MGN'yi arayan bir yöntemdir (Jately vd., 2021). Bu durumun anlatıldığı, TT algoritmasına ait akış şeması Şekil 27'de sunulmuştur.



Şekil 27. TT algoritması

1.4.9. Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) Tabanlı MGNT Algoritması

Karmaşık ve büyük ölçekli problemlerin çözümünde meta sezgisel optimizasyon algoritmaları kullanılmaktadır. Bu algoritmalarından birisi de PSO algoritmasıdır.

PSO' da her aday çözüm, farklı konum ve hız vektörlerine sahip bir parçacığı temsil eder (Kennedy & Eberhart, 1995). D boyutlu bir problemde, parçacığın (i.) konumu ve hızı şu şekilde ifade edilir.

$$x_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{iD}) \quad (23)$$

$$v_i = (v_{i1}, v_{i2}, v_{i3}, \dots, v_{iD}) \quad (24)$$

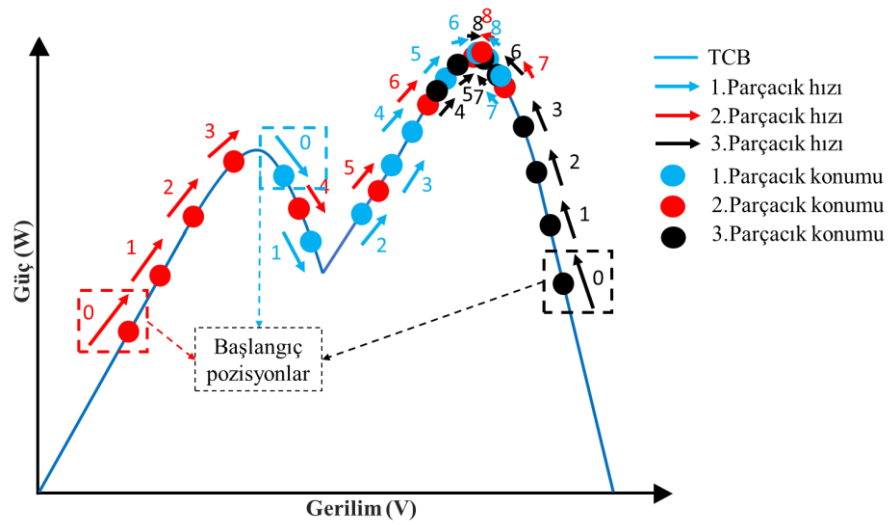
x_i ve v_i sırasıyla parçacıkların konumu ve hızıdır. Her yinelemede parçacıkların hızını ve konumunu güncellemek için aşağıdaki denklemler kullanılır.

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (25)$$

$$v_i(t+1) = wv_i(t) + R_1c_1(P_i - x_i(t)) + R_2c_2(P_g - x_i(t)) \quad (26)$$

R_1 ve R_2 , 0 ile 1 arasında rastgele değerlerdir. 'w' ağırlık katsayısıdır, c_1 ve c_2 sırasıyla bireysel ve toplumsal hızlanma katsayılarıdır. P_g , sürüdeki tüm bireyler arasında en iyi konumdur, P_i ise şimdiye kadarki en iyi bireysel konumdur (Kennedy & Eberhart, 1995).

MGNT tabanlı PSO algoritmasında, parçacık olarak çoğunlukla görev süresi kullanılmaktadır (Ishaque & Salam, 2012; Ishaque, Salam, Amjad, vd., 2012; Ishaque, Salam, Shamsudin, vd., 2012). Aday çözüm olarak kullanılan görev süreleri başlangıçta FV karakteristik eğrisi üzerine rastgele dağıtılmaktadır (Ishaque, Salam, Shamsudin, vd., 2012).

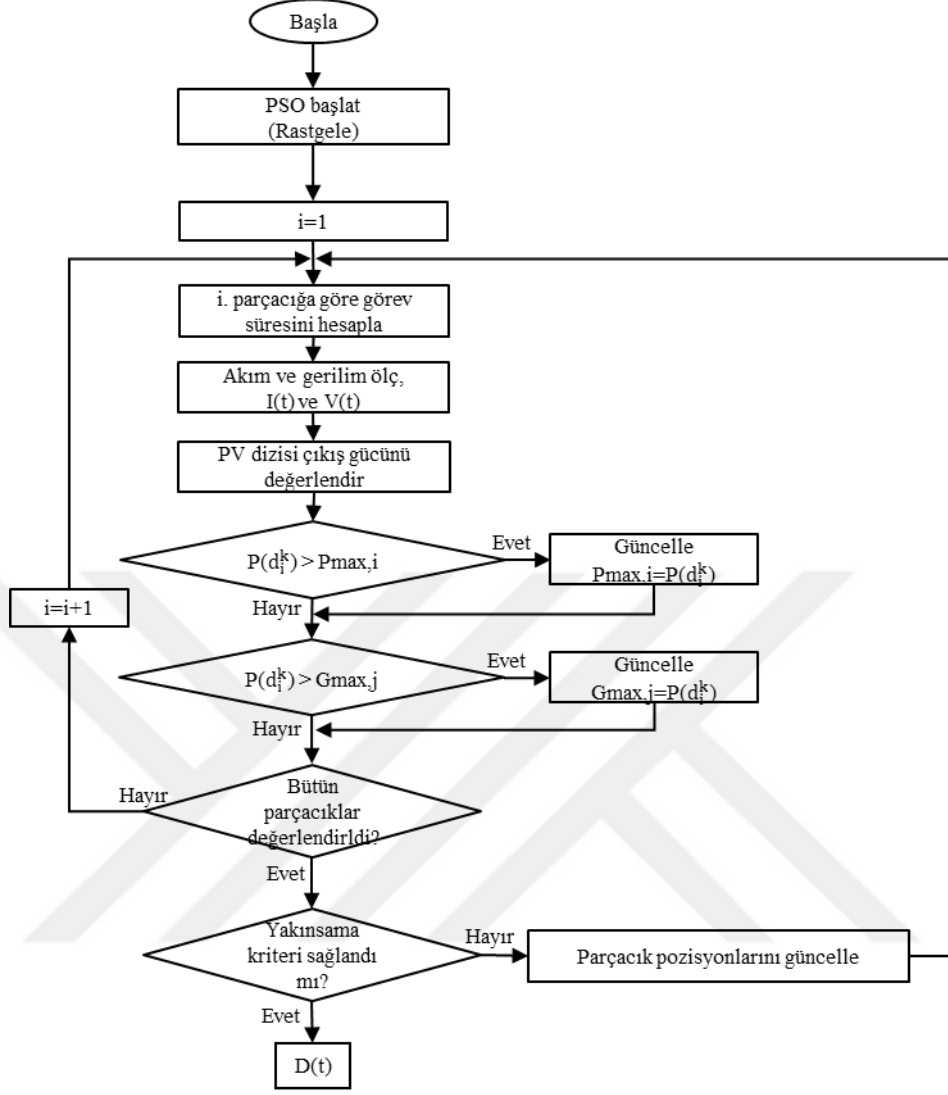


Şekil 28. PSO tabanlı MGNT algoritmasının çalışması

Dağıtılan başlangıç pozisyonları (üç adet parçacık) yinelemeli işlemler sonucunda tek bir noktada buluşmaktadır (Ishaque & Salam, 2012; Ishaque, Salam, Amjad, vd., 2012; Ishaque, Salam, Shamsudin, vd., 2012).

MGNT tabanlı PSO algoritmasında, amaç fonksiyonu FV panel çıkış gücünü maksimum yapmayı hedeflemektedir. Bu sebeple üç parçacığın da genel maksimum güç noktasında bir araya gelmesi beklenmektedir. Şekil 28'de de görüldüğü üzere, sekiz iterasyon sonunda üç farklı parçacık aynı noktaya ulaşmıştır.

Şekil 29 PSO tabanlı MGNT algoritmasının akış şemasını göstermektedir.

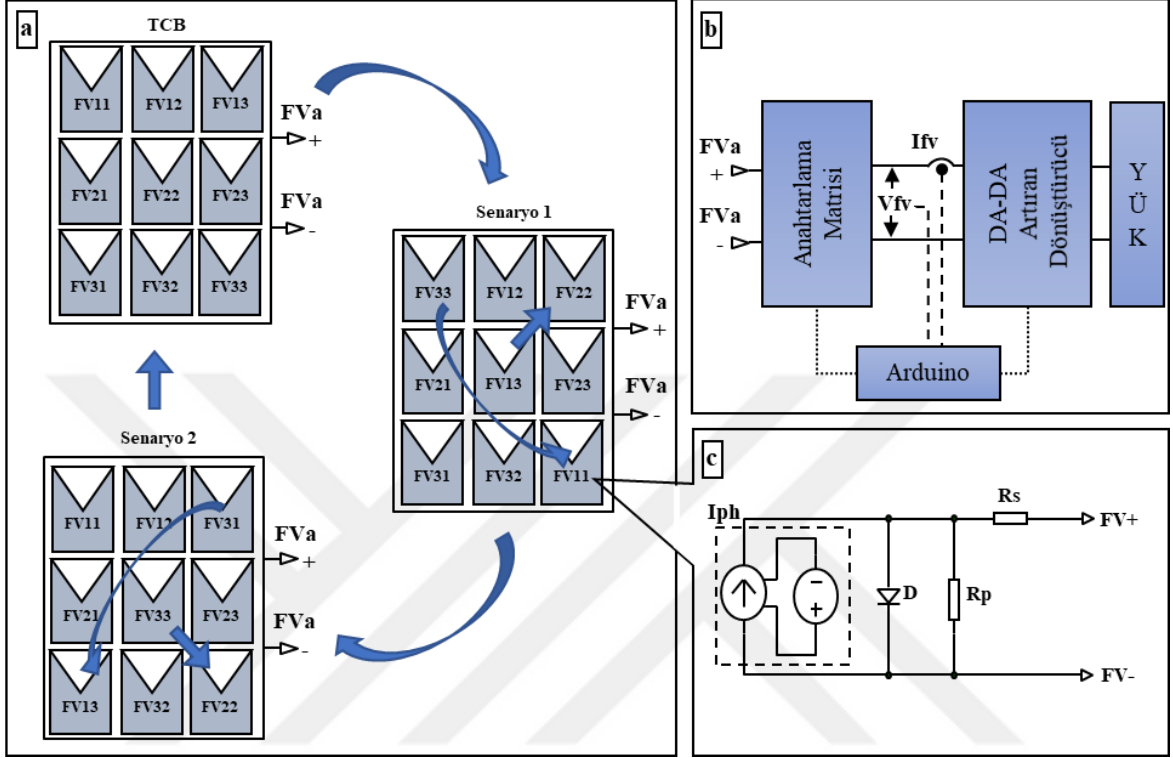


Şekil 29. PSO tabanlı MGNT algoritmasının akış şeması

1.4.10. Önerilen Yöntem

Önceki başlıklar altında anlatılan algoritmaların hepsi, mevcut panel ya da panel gruplarından maksimum güç elde etmeye odaklanmıştır. Ancak bu algoritmalar bazı durumlarda yerel maksimum güç noktalarına takılarak FV gruplarında güç kaybına (MGNT kaybı) neden olmuştur. Bu güç kaybının yanında, kısmi gölgelenme durumunda FV dizilerinde oluşan uyumsuzluk kaybı da genel sistemin verimini düşürmektedir. Bu sebeple, bu tez çalışmasında, FV sistemlerinde yaşanan MGNT ve uyumsuzluk güç kaybını azaltan bir MGNT yaklaşımı geliştirilmiştir.

Bu yaklaşım, gölgeyi dizi yüzeyinin tamamına eşit şekilde dağıtarak uyumsuzluk kayıplarını (gölgeleme nedeniyle) en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Bu amaçla yaklaşım, Şekil 30a'daki gibi üç farklı ara bağlantıya sahiptir (TCB, Senaryo 1 ve Senaryo 2).



Şekil 30. (a) Önerilen yöntemde FV dizisi ara bağlantılarının yer değiştirme stratejisi (b) Önerilen yöntemin FV dizisine uygulanması (c) FV panel elektriksel eşdeğer devresi

Yaklaşımın temel amacı, FV dizisindeki panellerin ara bağlantılarını değiştirerek en yüksek FV çıkış gücünü veren ara bağlantıyı belirleyip MGNT yapmaktır. Bu yaklaşım, bağlantıları değiştirirken Tablo 3'deki anahtarlama matrisini kullanır. Önerilen yaklaşımın çalışmasını anlatan akış şeması Şekil 31'de sunulmuştur.

1.5. FV Panellerde DA-DA Dönüştürücü Seçimi

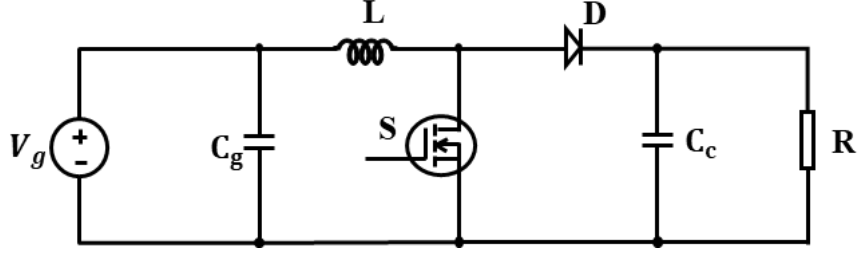
FV panelleri maksimum güç üretebilecekleri noktada çalıştırmak için DA-DA dönüştürücüler kullanılmaktadır. Bu dönüştürücüler, yük direncini FV panelin iç direncine eşitleyerek FV panellerden maksimum güç transferinin yapılmasını sağlamaktadır (Güngör, 2018a).

FV uygulamalarında DA-DA dönüştürücüler seçilirken, yük direncinin panel iç direnciyle olan ilişkisi göz önüne alınır. Panel iç direncinin, yük direncinden büyük olduğu durumlarda Azaltan (Buck) dönüştürücüyle MGN bulunabilmektedir. Yük direncinin, panel iç direncinden büyük olduğu durumlarda ise Artıran (Boost) dönüştürücü aracılığıyla MGNT yapılabilmektedir. Azaltan - Artıran (Buck - Boost) dönüştürücü ise, yük direncinin panel iç direnciyle olan ilişkisinden bağımsız olarak MGN takibine olanak sağlamaktadır (Nayak vd., 2017). Ancak bu dönüştürücünün giriş akımının süreksizliğinden dolayı uygulamalarda doğru ölçüm alınabilmesi için ek donanımlara ihtiyaç duyulabilir. Cuk, Sepic gibi yüksek mertebeli DA-DA dönüştürücüler ise maliyetlerinin yüksek olması sebebiyle MGNT uygulamalarında tercih edilmemektedir.

Bu tez çalışmasında, MGNT uygulamalarında yaygın olarak kullanılan Artıran (Boost) dönüştürücü kullanılmış ve devre parametrelerinin hesaplanmasında kullanılan denklemler bölüm 1.5.1’de verilmiştir.

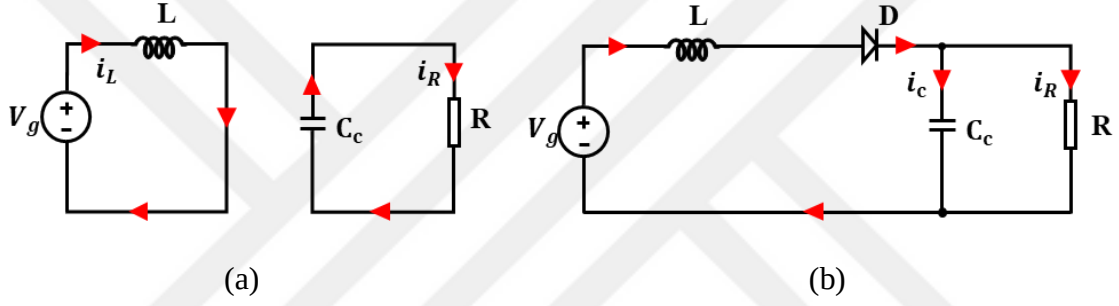
1.5.1. Artıran Dönüştürücü

Artıran dönüştürücü, giriş gerilimini Darbe Genişlik Modülasyonu (DGM) kontrolüyle yükselterek çıkışa aktarmaktadır. Dönüştürücü temel topolojisinde bir adet bobin (L), bir adet kondansatör (C_C) olmak üzere iki adet enerji depolayan devre elemanı; bir adet anahtar (S) ve diyot (D) bulunmaktadır. Bunların yanında bir adet giriş filtre kondansatörü (C_g) bulunduran topolojinin görseli Şekil 32’de gösterilmiştir. Ancak filtre kondansatörü giriş gerilim dalgalanmasının düşük olması sebebiyle genellikle dönüştürücünün analizinde ve modellenmesinde hesaba katılmamaktadır.



Şekil 32. Artıran (Boost) dönüştürücü

Artıran (Boost) dönüştürücünün dinamik davranışını incelemek için S anahtarının iletim ve kesim durumlarındaki çalışması, sırasıyla Şekil 33 (a) ve (b)'de gösterilmiştir.



Şekil 33. Artıran (Boost) dönüştürücü anahtarın iletim ve kesim durumu

Anahtar iletim durumunda, kaynak ile bobin paralel konuma gelir. Bobin üzerindeki gerilim ve kaynak gerilimi eşit olur.

$$V_g = L \frac{di_L}{dt} \quad (27)$$

Çıkış kondansatörü ve direnç üzerinden geçen akımlar aynıdır ancak yönleri zıttır.

$$-i_R = C_c \frac{dV_{C_c}}{dt} \quad (28)$$

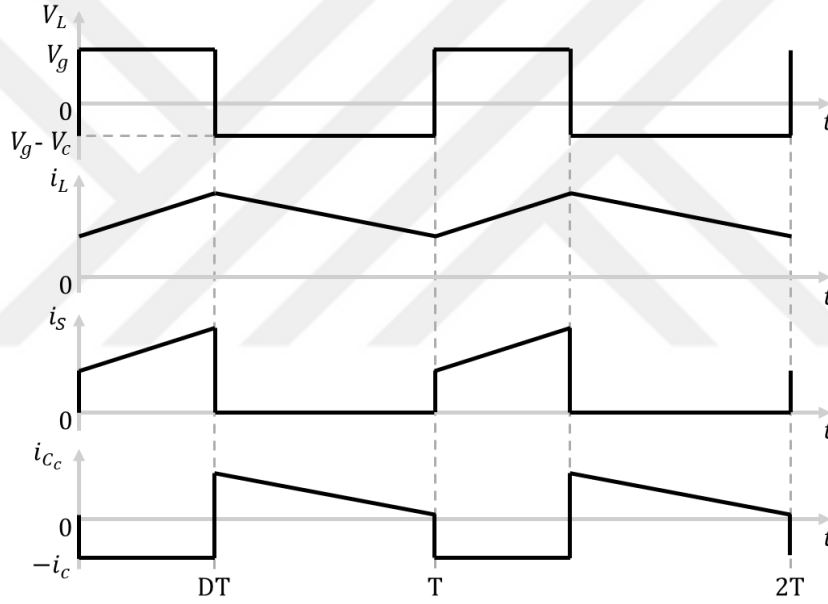
Anahtar kesim konumuna geçince, iletim konumunda şarj olan bobin ve kaynak aynı anda çıkışı besler. Çıkışta en az giriş gerilimi kadar bir gerilim oluşur. Bobin uçlarında ise giriş gerilimi ile çıkış gerilimi arasındaki fark kadar gerilim indüklenir.

$$V_g - V_R = L \frac{di_L}{dt} \quad (29)$$

Bobin üzerinden geçen akım iki kola ayrılarak çıkış kondansatörü ve yük direnci üzerinden devresini tamamlamaktadır.

$$-i_R + i_L = C_c \frac{dV_{C_c}}{dt} \quad (30)$$

Şekil 34’de artıran dönüştürücünün iki periyod boyunca bobin gerilimi, bobin akımı, anahtar ve çıkış kondansatörü akımları dalga değişimi gösterilmiştir.



Şekil 34. Artıran (Boost) dönüştürücü için anahtarlama durumuna göre dalga şekilleri

Şekil 33’de gösterildiği üzere anahtar (S) iletim durumunda olduğu zaman, endüktör akımı doğrusal olarak artmaktadır ve diyot kesimdedir. Anahtar kesime gittiğinde ise endüktör depolamış olduğu enerjiyi diyot yardımıyla çıkış kondansatörü ve yük üzerine aktarmaktadır.

Sürekli durumda, endüktör üzerinde bir periyot (T) boyunca oluşan ortalama gerilim sıfırdır.

$$V_g \times (D)T - (V_g - V_R) \times (1 - D)T = 0 \quad (31)$$

Gerekli sadeleştirmelerin yapılması sonucunda, görev süresiyle çıkış gerilimi ve çıkış akımı arasındaki ilişkiyi ifade eden denklemler aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{V_R}{V_g} = \frac{1}{1 - D} \quad (32)$$

$$\frac{I_R}{I_g} = (1 - D) \quad (33)$$

Panel iç direnciyle ($R_{eşdeğer}$) yük direnci (R) arasındaki ilişki denklem (34)'de gösterilmektedir.

$$R_{eşdeğer} = R(1 - D)^2 \quad (34)$$

Çevre şartlarının değişmesiyle FV panellerin iç dirençleri değişmektedir. Bu sebeple, panel iç direncini kontrol etmek mümkün değildir. Görev süresini kontrol ederek yük direncini panel iç direncine eşitleyip maksimum güç transferi sağlanmaktadır. Bu tez çalışmasında, güç transferi artıran dönüştürücü tarafından sağlanmaktadır.

Artıran dönüştürücü tasarımında sistemin performansı, büyük oranda bobin seçimine bağlıdır. Özel durumlar dışında, bobin akımının sıfırın altına düşmesi istenmemektedir. Bu nedenle optimum endüktör değerinin belirlenmesi önemlidir.

Endüktör dalgalanma değeri (ΔI_L) aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$\Delta I_L = \frac{V D}{L f} \quad (35)$$

Endüktör akımının sürekli olması için, bir periyot boyunca endüktör dalgalanma akımının $\Delta I_L \leq 2I$ şartını sağlaması gerekmektedir (Rashid, 2017). Bu şartlar altında çıkış akımının sürekli olabilmesi için ihtiyaç duyulan minimum endüktör değeri aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$L \geq \frac{D(1 - D)^2 R}{2 f} \quad (36)$$

Dönüştürücü çıkış kondansatörü yüke paralel olarak bağlanmaktadır. Çıkış gerilim dalgalanması %2 olarak alındığında çıkış kondansatörü minimum değeri denklem (37) kullanılarak hesaplanmaktadır (Mohan vd., 2003).

$$C_c \geq \frac{D}{0.02 f R} \quad (37)$$

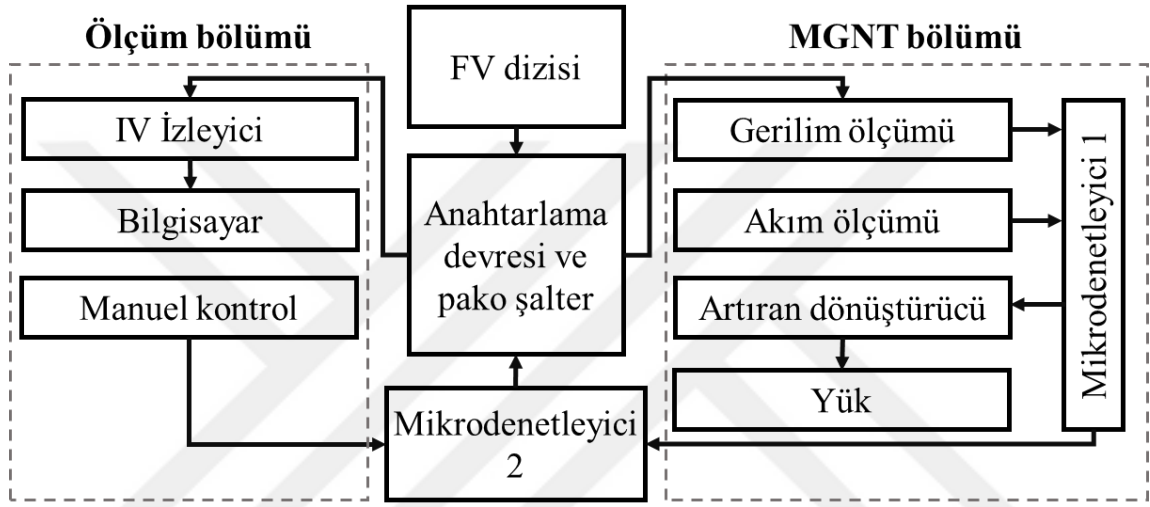
Giriş kondansatörü değeri hesaplanırken, gerilim dalgalanma sabitinin giriş geriliminin %1'ine eşit olduğu kabul edilmiştir. Kondansatör değeri denklem (38)'de gösterildiği gibi hesaplanır (Mohan vd., 2003).

$$C_g \geq \frac{D}{8 f^2 L 0.01} \quad (38)$$

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Yapılan çalışmalar bölümü, benzetim ve uygulama çalışmaları olarak iki alt başlık halinde kurgulanmıştır. Benzetim çalışmaları bölümünde, önerilen yöntem Proteus ortamında kurulmuş ve uygulama bölümünde kurulan bu yapının uygulaması yapılmıştır.

Yapılan çalışmanın özetlendiği blok şema Şekil 35’te sunulmuştur.



Şekil 35. Yapılan çalışmanın blok şeması

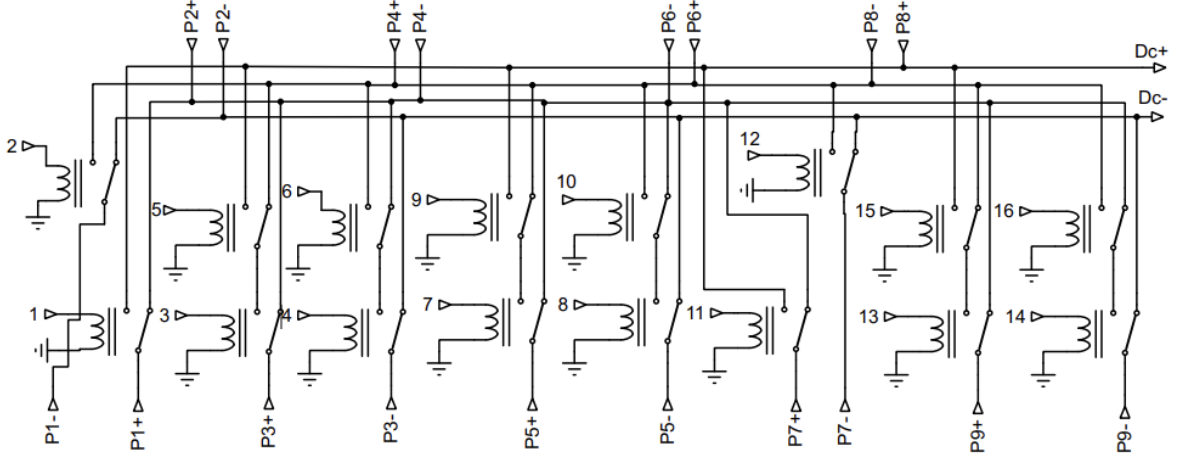
Çalışma temel olarak ölçüm ve MGNT olmak üzere iki temel bölüme ayrılmıştır. Bölümler arasında geçiş bir pako şalter üzerinden yapılmaktadır. Ayrıca, bir bölüm çalışırken diğer bölüm pasif halde olacak şekilde sistem kurulmuştur. MGNT bölümünde FV dizisi çıkış akım ve gerilim ölçümlerinin alınması, artıran dönüştürücü denetimi, anahtarlama devresinde bulunan rölelerin durumu mikrodnetleyici 1 tarafından dinamik olarak kontrol edilerek önerilen yaklaşım çalıştırılmıştır.

Ölçüm bölümünde, anahtarlama devresinde bulunan rölelerin konumu manuel olarak kontrol edilerek FV dizisinin karakteristik eğrileri çizdirilmektedir. Her iki bölümde de röle kartının kontrolü mikrodnetleyici 2 tarafından sağlanmaktadır.

Ayrıca benzetim çalışmasında mikrodnetleyici (Arduino UNO) çıkış pinlerinin sayısı önerilen yaklaşımı çalıştırmak için yeterli olmasından dolayı mikrodnetleyici 2 kullanılmamıştır (uygulama çalışmasında kullanılmıştır).

2.1.2. Anahtarlama Devresi Benzetimi

Bölüm 2.1.1’de oluşturulan FV dizisinin ara bağlantılarını oluşturmak için 16 adet röle kullanılmıştır. Bu röle devresi (Şekil 37) sayesinde FV dizi ara bağlantıları değiştirilebilir hale gelmiştir.



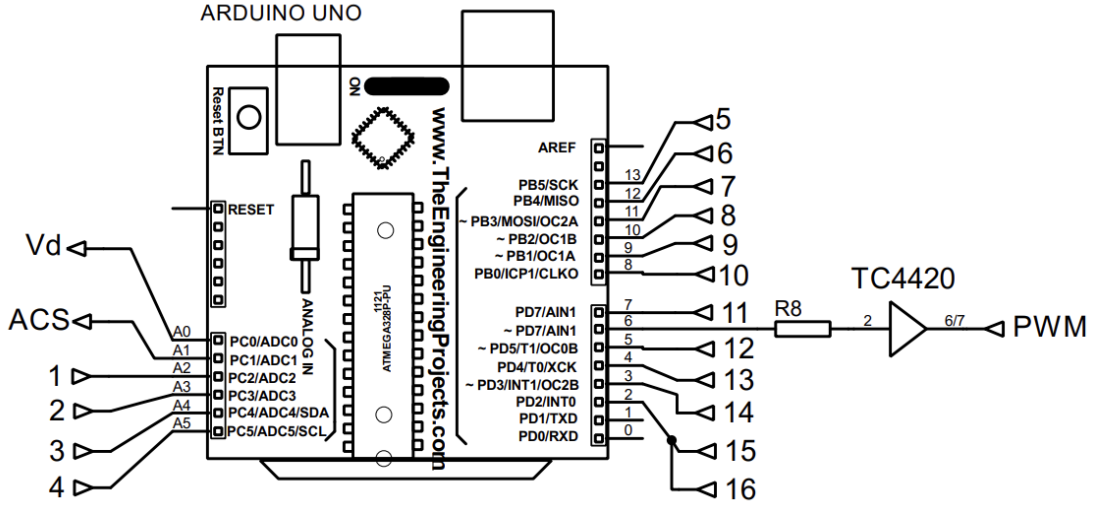
Şekil 37. FV dizisi yeniden konumlandırması için kullanılan anahtarlama devresi

Şekil 37’de gösterilen DC+ ve DC- etiketleri FV dizisi çıkışını belirtmektedir. Bu çıkışlar IV izleyiciye ve artıran dönüştürücüye gitmektedir. P kodlu etiketler, Şekil 36’da sunulan FV panellerindeki (1 numaralı FV panel için) artı (P1+) ve eksi uçları (P1-) göstermektedir. Röle girişleri ise doğrudan numaralarla etiketlenmiştir. Röle etiketleri Şekil 39’da sunulan kontrol kartı çıkışlarındaki etiketler ile ilişkilidir.

FV panellerinin ara bağlantılarının değiştirilmesinde, Tablo 3’deki röle anahtarlama sırası kullanılmaktadır.

Tablo 3. Anahtarlama matrisi

Bağlantı	Röle Pozisyonları															
	RL1	RL2	RL3	RL4	RL5	RL6	RL7	RL8	RL9	RL10	RL11	RL12	RL13	RL14	RL15	RL16
TCB	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1
Sen 1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
Sen 2	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0



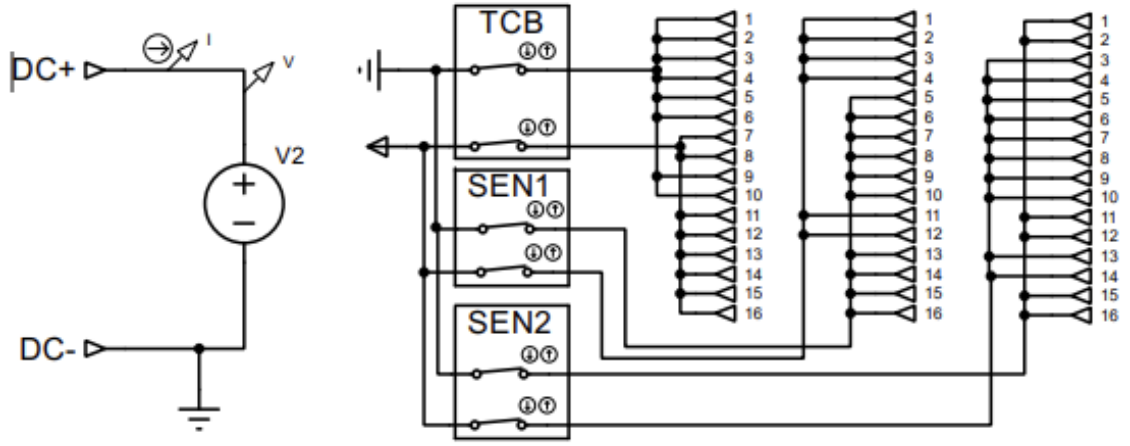
Şekil 39. FV dizisinin kontrol kartı

Arduino analog pinleri, gerilim (A0) ve akım ölçümü (A1) yapmaktadır. Dört analog pin (A2-A5) ve dijital pinler (D2-D13, D6 hariç) röleleri kontrol etmek için kullanılmaktadır. D6 pini, TC4420 MOSFET sürücü entegresini kontrol etmektedir. Ayrıca 15 ve 16 numaralı röleler önerilen yöntemin bütün senaryolarında aynı çıkışlara sahip olduğu için birleştirilmiştir.

2.1.5. IV Takip Cihazı Benzetimi

FV dizilerinde üretilen güç ve akım, gerilimin fonksiyonu olarak değişim göstermektedir. Bu ilişkinin görselleştirilmesiyle FV panelin I-V ve P-V karakteristik eğrileri oluşturulur.

FV panel katalog bilgilerinde, STK altındaki panel P-V ve I-V karakteristik eğrileri mevcuttur. Ancak farklı ortam koşullarındaki FV panel karakteristik eğrileri bulunmamaktadır. Bunu oluşturabilmek için, Şekil 40'da gösterildiği üzere FV dizisi çıkışına değişken değerlikte bir gerilim kaynağı bağlanarak, I-V ve P-V karakteristik eğrileri Proteus Analogue Analysis yardımıyla çizdirilmiştir.

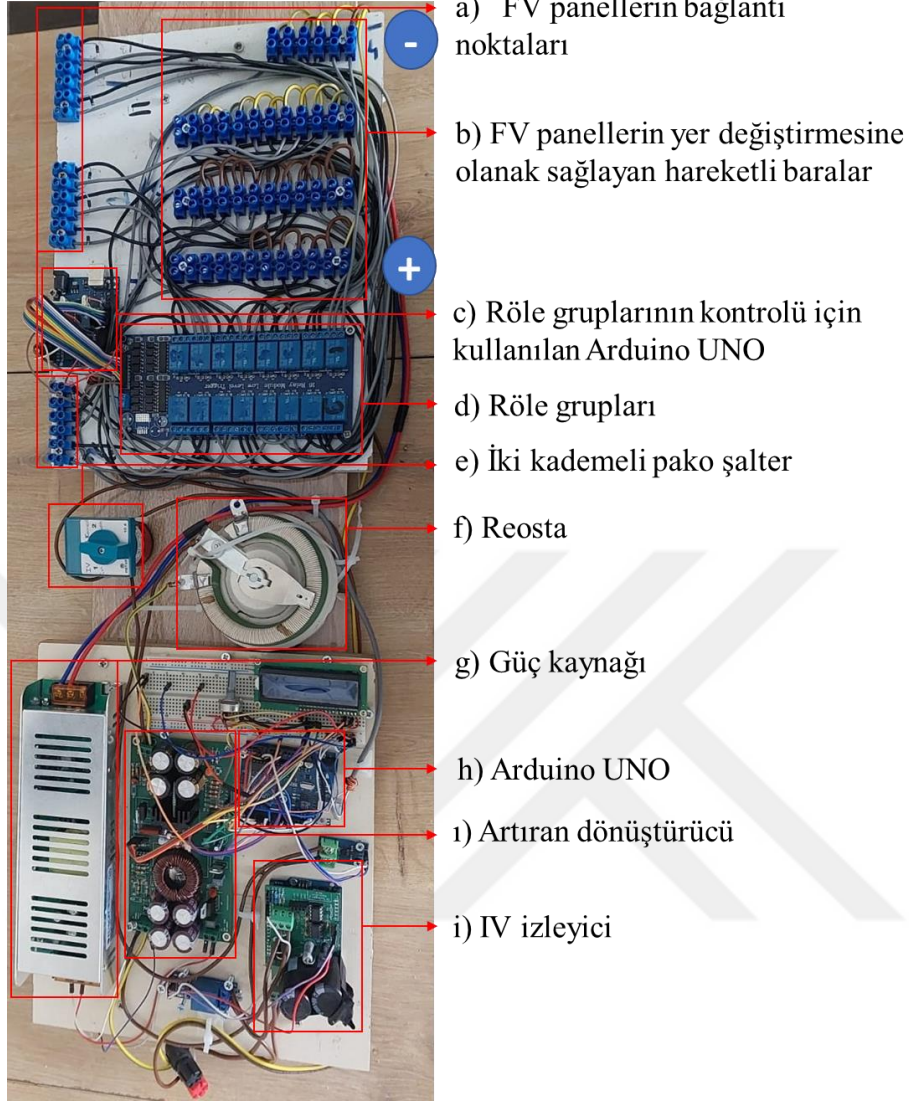


Şekil 40. IV eğrisi çizdirme devresi

Şekil 40’da sayılar ile belirtilen etiketler, bölüm 2.1.2’deki röleler ile ilişkilidir. DC+ ve DC- etiketleri de anahtarlama devresine bağlanarak, IV eğrisi çizdirme devresi tarafından FV dizisi karakteristik eğrileri çizdirilmiştir.

2.2. Önerilen Yöntemin Uygulaması

Benzetim ortamında geliştirilen yöntemin performansının, uygulamada test edilebilmesi için Şekil 41’de gösterilen deney düzeneği kurulmuştur.



Şekil 41. Deney düzeneği

Deney düzeneği 10 bölüme ayrılmıştır. Bu bölümlerin açıklamaları aşağıda verilmiştir.

- a:** Bu bölümde FV panellerin deney düzeneğine bağlantıları yapılmaktadır. Her bir panelin bağlandığı klemense paralel olacak şekilde bypass diyotlar yerleştirilmiştir.
- b:** Bu bölümde, klemenslere bağlı olan FV panellerin ara bağlantıları yer değiştirmektedir.
- c:** Bu bölümde, Arduino UNO kart tarafından FV dizisi ara bağlantı senaryolarının değiştirilmesi sağlanmaktadır.
- d:** Bu bölümde bulunan röleler, **b** bölümündeki bağlantıları kendi arasında yer değiştirebilir hale getirir.

- e: Bu bölümde bir adet pako şalter yer alır ve iki kademeye sahiptir. İlk kademesi FV dizisinde MGNT yapılmasına ve diğer kademesi ise FV karakteristik eğrisinin çizdirilmesine olanak sağlar.
- f: Bu bölümde, dönüştürücü çıkışına bağlanan $200\ \Omega$ ve $200\ W$ özelliklerine sahip bir reosta bulunmaktadır.
- g: Bu bölümde, kullanılan entegrelerin beslemelerini sağlayan $12\ V$ 'luk güç kaynağı yer almaktadır.
- h: Bu bölümde; FV dizisinin giriş akım ve geriliminin ölçülmesi (ayrıca LCD ekranda gösterilmesi), artıran dönüştürücünün kontrolü ve c bölümünde bulunan kontrol kartının senaryo değiştirme talimatı Arduino UNO tarafından sağlanmaktadır.
- i: Bu bölümde artıran dönüştürücü bulunmaktadır.
- i: Bu bölümde IV izleyici bulunmaktadır.

Özetlemek gerekirse, Şekil 41'de gösterilen deney düzeneğinin iki temel görevi vardır. İlki, FV dizisi I-V ve P-V karakteristik eğrilerini çizdirip MGN'yi belirlemektir. İkincisi ise önerilen yaklaşımın MGN'yi bulma performansını test etmektir.

2.2.1. FV Dizisi'nin Fiziksel Kurulumu

FV dizisi, $25\ W$ 'lık güce sahip dokuz adet özdeş FV panelin birbirlerine vidalanmasıyla Şekil 42'de gösterildiği gibi oluşturulmuştur.



(a)



(b)

Şekil 42. FV dizisi fiziksel kurulumu (a) ön görünüşü (b) arka görünüşü

Şekil 42(b)'deki panellerden çıkan kablolar, Şekil 41'deki deney düzeneğinin a bölümüne bağlanmaktadır.

2.2.2. Anahtarlama Devresi Uygulaması

Şekil 41'deki deney düzeneğinin d bölümünde, önerilen yaklaşımda FV dizisi ara bağlantılarının değiştirilmesinde kullanılan anahtarlama devresi gösterilmiştir. Bu devre, 30 V(DA) ve 220 V(AA) gerilimde 10 A'e kadar çıkış veren, 5 V ile kontakların kontrol edilebildiği 16 röle bulunduran röle kartından oluşmuştur. Röle kontaklarının kontrolü ise Şekil 41'de c bölümünde gösterilen Arduino UNO kartı tarafından sağlanmaktadır.

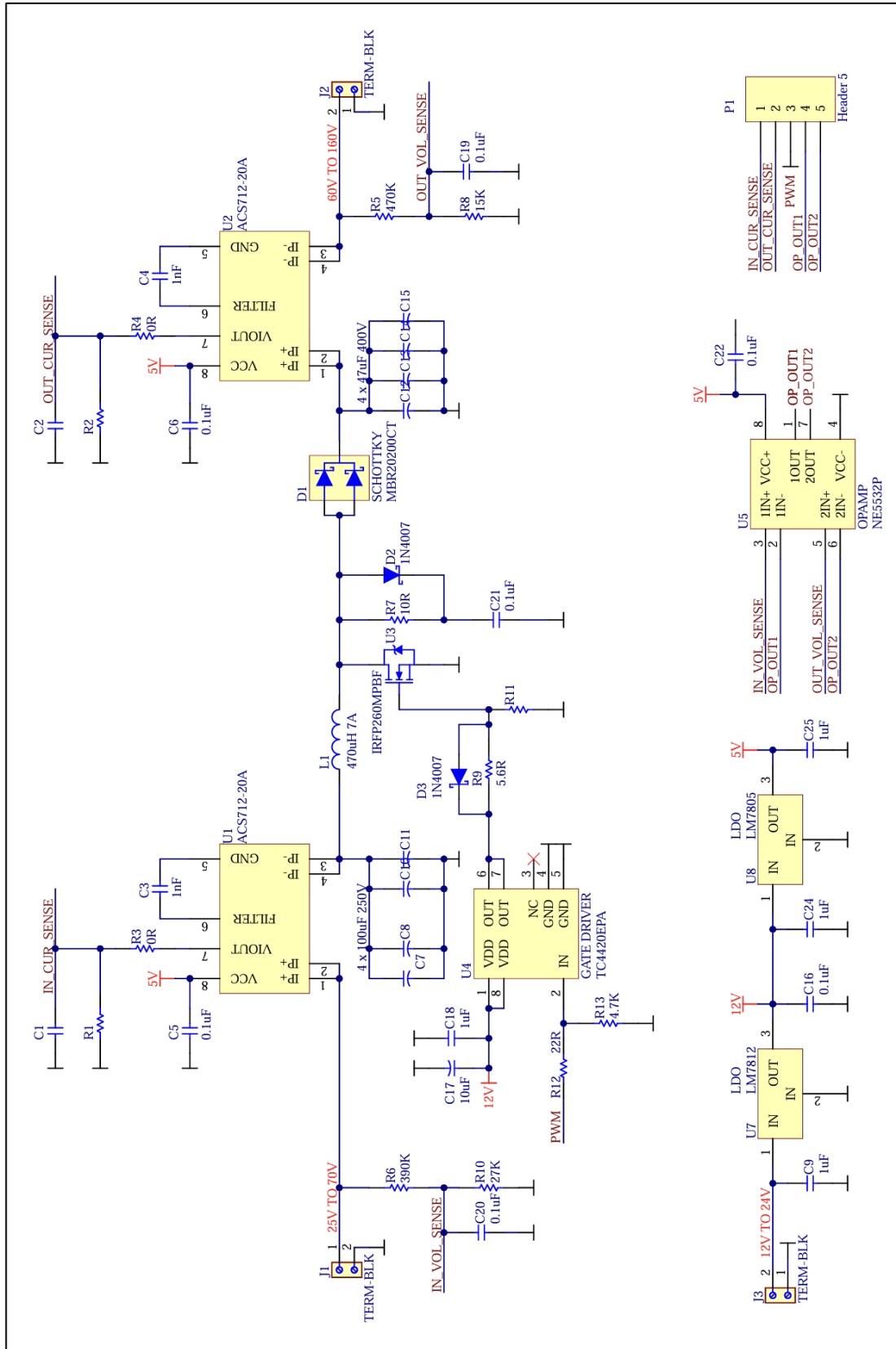
2.2.3. Artıran (Boost) Dönüştürücünün Tasarımı

Bölüm 1.5.1'de artıran dönüştürücü devre tasarım denklemleri yardımıyla hesaplanan ve bu tez çalışmasında kullanılan dönüştürücü parametreleri Tablo 4'de sunulmuştur.

Tablo 4. Uygulama için tasarlanan dönüştürücü parametreleri

Parametre	Değer
f	10 kHz
L	470 uH
C _g	4×47 uF
C _c	4×47 uF
R	100 Ω

Benzetimi yapılan dönüştürücünün uygulaması, Altium Designer programı kullanılarak oluşturulmuştur. Tasarlanan dönüştürücü devre şeması Şekil 43'de gösterilmiştir.

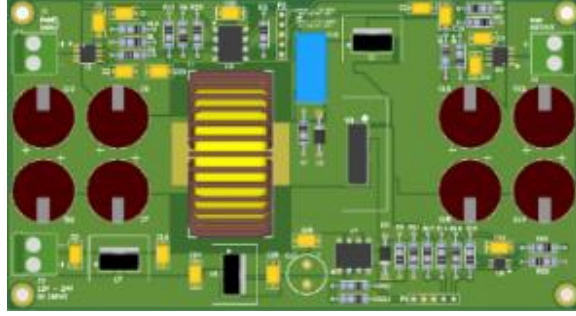


Şekil 43. Artıran dönüştürücü devre şeması

Şekil 43'deki tasarlan devreye ait teknik bazı özellikler aşağıda maddeler halinde sunulmuştur:

- Dönüştürücü giriş ve çıkışında dört adet paralel bağlı kapasiteye yer verilmiştir. Paralel olarak kullanılan kapasiteler sayesinde, toplam iç direnç değeri tek kullanılan kapasiteye göre daha düşük olacağından dönüştürücünün giriş ve çıkışında oluşacak güç kaybı azaltılmıştır.
- Dönüştürücü giriş ve çıkış akımı ölçümü, U1 ve U2 (ACS712-20 A) üzerinden sağlanmaktadır.
- Dönüştürücü giriş ve çıkış gerilimi ölçümü, gerilim bölücü R6, R10 (giriş gelimi) ve R5, R8 (çıkış gelimi) dirençleri üzerinden yapılarak opamplarla (NE5532P) yükseltilip, kontrol kartına aktarılmıştır.
- 10 kHz anahtarlama frekansı kullanılmıştır.
- Anahtarlama elemanı olarak N kanal 200 V 50 A IRFP260M (U3) MOSFET'i seçildi. MOSFET'i sürebilmek için TC4420EPA (U4) entegresi kullanıldı.
- PWM sinyalinin hızlı anahtarlama yapmasından dolayı MOSFET'i sürerken gate kapısında oluşabilecek pik gerilim seviyelerini engellemek için R9 direnci kullanıldı.
- R9 direncine paralel kullanılan D3 diyodu ise MOSFET'in gate kapısından sızabilecek anlık yüksek gerilimlerden U4 entegresini korumak için kullanıldı.
- Anahtarlama sonucu bobin üzerinde oluşacak ani pik gerilimlerinin MOSFET'e zarar vermesini engellemek için R7, D2 ve C21 elemanlarından oluşan "snubber" yapısı kullanıldı.
- PCB bağlantı arayüzü DA-DA dönüştürücü giriş ve çıkışında yüksek akım ve gerilim olacağından J1 ve J2 terminal tipi vidalı konektörler kullanıldı.
- Düşük akım çeken çiplerin beslemesi ve dijital arayüz bağlantıları için altı pinli header kullanıldı.

Tasarlanan devrenin üç boyutlu görünümü Şekil 44’de gösterilmiştir.



Şekil 44. Artıran dönüştürücü üç boyutlu görseli

2.2.4. Mikrodenetleyici Tabanlı Önerilen Yaklaşımın Uygulaması

Bu tez çalışmasının uygulama bölümünde iki adet mikrodenetleyici (Arduino UNO kartı) kullanılarak önerilen yaklaşım çalıştırılmıştır. Kartlardan ilki, FV dizisi ölçüm verilerini anlık göstermek için LCD’yi kontrol etmeyi, MGNT yapmayı ve ikinci Arduino’nun kontrolü görevlerini üstlenmiştir. İkincisi ise sadece anahtarlama devresindeki rölelerin kontrolünü sağlamaktadır. İlk kartın, D2-D5 ve D11, D12 pinleri (dijital) LCD kontrolünde; D9 pini TC4420 MOSFET sürücü entegresinin kontrolünde kullanılmıştır (Artıran dönüştürücü anahtarlama frekansının yüksek olması sebebiyle, Arduino’nun timer register’ları ayarlanarak D9 pininin anahtarlama frekansı 10 kHz’e yükseltilmiştir). Analog A0 ve A1 pinleri ise MGNT yapabilmek için ihtiyaç duyulan FV panel giriş gerilimi ve giriş akımının ölçümlerinin okunması için tahsis edilmiştir. İlk kartın D6 pini, ikinci karta FV dizisi ara bağlantı senaryolarının değiştirilmesi talimatını vermektedir.

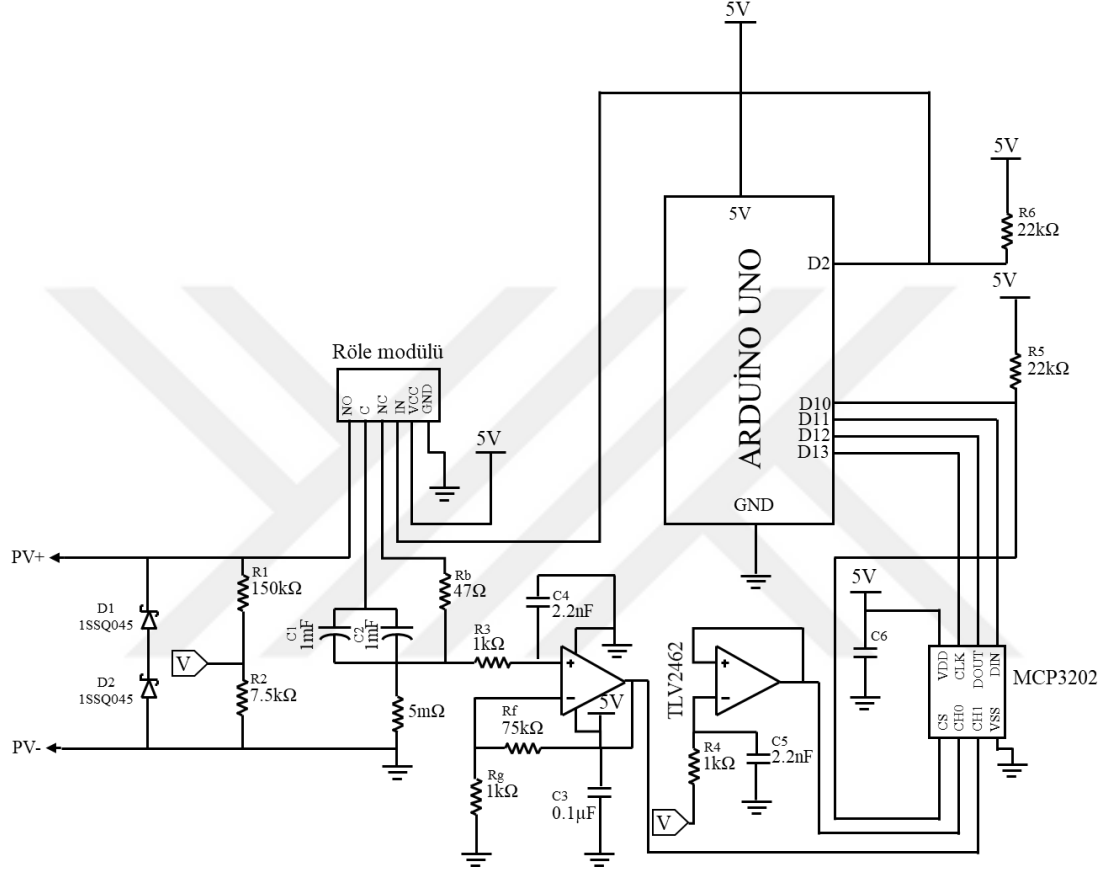
İkinci kartın D2 pini, ilk karttan gelen bilgiyi okumakta kullanılırken; kalan dijital pinler (D3-D13) ve analog pinler (A0-A5) anahtarlama devresinde bulunan röle kartını kontrol etmektedir.

2.2.5. IV Takip Cihazı Uygulaması

Benzetim çalışmalarında kullanılan FV sisteminin almış olduğu ışıma miktarı dengelidir. Ancak uygulamalarda FV panel yüzeyine düşen ışıma miktarı her noktada eşit değildir. Bu nedenle, FV panel maksimum güç noktasını hesaplamak zordur. Bu tez çalışmasında donanımsal ve yazılımsal olarak açık kaynak olan IV izleyici aygıtı,

uygulamadaki FV dizisine ait MGN'yi hesaplamak için oluşturulmuştur. Bu aygıt yardımıyla, bölüm 3.2'deki FV dizisi P-V ve I-V eğrileri elde edilmiştir.

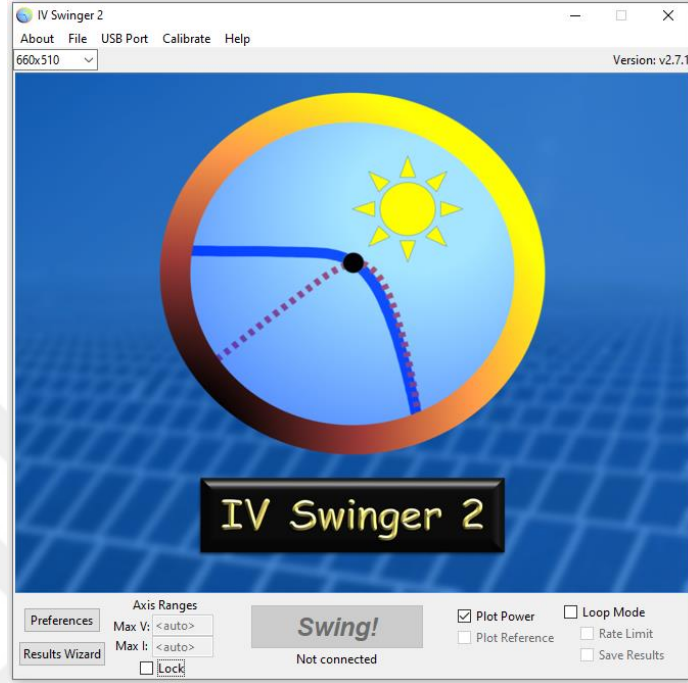
Hazırlanan IV izleyici maksimum 10 A'lık kısa devre akımı ve maksimum 80 V'luk açık devre gerilimine sahiptir.



Şekil 45. IV izleyici devre şeması (Satterlee, 2017)

Şekil 45'de devre şeması verilen IV izleyicinin çalışma ilkesi, kondansatörün şarjı esnasında şarj akımı ve geriliminin ölçümüne dayanmaktadır. Arduino UNO tarafından iki adet paralel bağlı 1000 μ F değerindeki kondansatörün şarj için FV dizi girişe, deşarj için Rb direncine anahtarlanabilmesi için 5 V röle modülü kullanılmıştır. FV dizisi akım ölçümü için 0.005 Ω 3 W'lık direnç, gerilim ölçümü için gerilim bölücü devre (Şekil 45'deki R1 ve R2 dirençleri tarafından oluşturulmuş) kullanılmıştır. İşlemsel yükselteçli gerilim izleyici ile gerilim bölücünün empedansı uygunlaştırılmış ve R2 direnci üzerindeki gerilim, işlemsel yükselteçli evirmeyen yükselteç ile yükseltilmiştir (Karagöz, 2021). Ölçülen analog akım ve gerilim değerleri 12-bitlik MCP3202 ADC'si ile sayısallaştırılmıştır. Sayısallaştırılan akım

ve gerilim değerleri, Arduino UNO yardımıyla Şekil 46’da gösterilen IV izleyici kullanıcı arayüzüne aktarılmıştır.



Şekil 46. IV İzleyici kullanıcı arayüzü (Satterlee, 2017)

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölüm temel iki alt başlığa bölünmüştür. Bölüm 3.1.'de geliştirilen MGNT algoritmasının farklı gölge desenleri altındaki performansı D&G ve PSO temelli MGNT algoritmalarıyla karşılaştırılmıştır.

Bölüm 3.2.'de geliştirilen yaklaşımın uygulanabilirliği, gerçek çevre koşulları altında incelenmiştir. Uygulamada, benzetim ortamında kullanılan donanımsal yapılar kurulmuştur. Uygulamada kullanılan FV paneller özdeş olmasına rağmen, aynı ortam şartlarında farklı güçler üretmektedir. Buna ek olarak, benzetim ortamında oluşturulan ışıma değerleri gerçek çalışmada oluşturulamamaktadır. Bu sebeplerden dolayı, bu tez çalışmasında geliştirilen yaklaşımın gerçek ve benzetim ortamındaki sonuçlarının analizi ayrı ayrı sunulmuştur.

3.1. Benzetim Çalışması

Bu bölümde, yedi farklı senaryo (G1-G7) ile önerilen yöntemin performansı incelenmiştir. Her senaryo incelenirken FV dizisinin performansı teorik olarak hesaplanmış ve devamında Proteus ortamında yapılan benzetim sonuçları sunulmuştur.

3.1.1. G1 Senaryosu

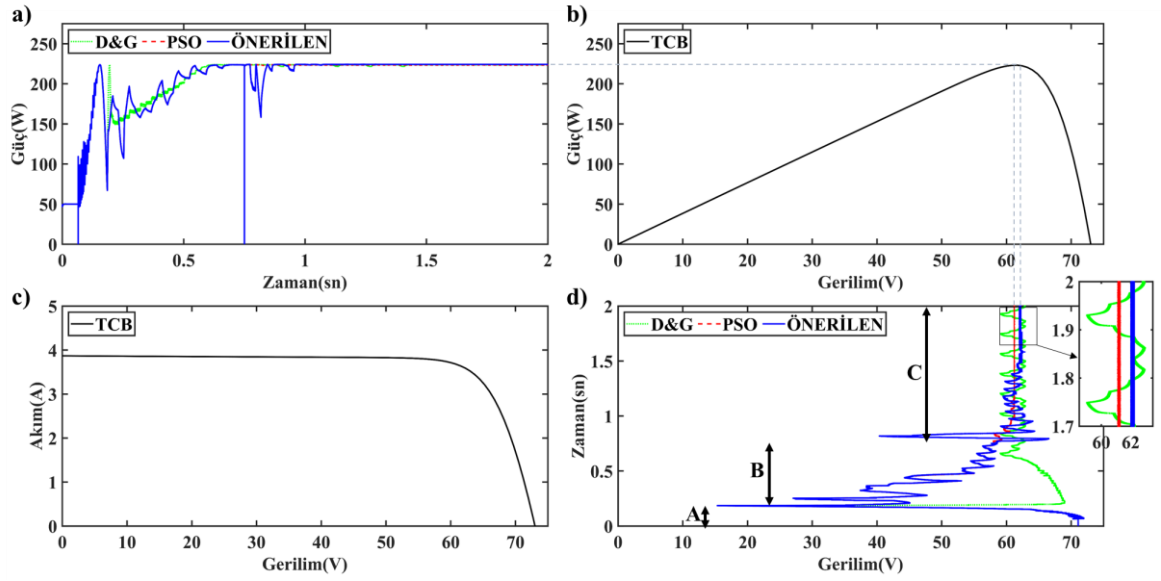
G1 senaryosunda dokuz adet FV panel 1000 W/m^2 'lik ışımaya maruz bırakılmıştır. Bölüm 1.3.3'de detayları verilen analitik hesaplamalar kullanılarak önerilen yaklaşımın ve TCB bağlantının teorik hesaplama sonuçları Tablo 5'de sunulmuştur.

Tablo 5. G1 senaryosunda önerilen yöntemin ve TCB bağlantının analitik hesaplama sonuçları

TCB					Önerilen				
Gölge deseni	Satır	Akım (A)	Gerilim (V)	Güç (W)	Gölge deseni	Satır	Akım (A)	Gerilim (V)	Güç (W)
	S1	$3I_M$	$3V_M$	$9V_M I_M$		S1	$3I_M$	$3V_M$	$9V_M I_M$
	S2	$3I_M$	$3V_M$	$9V_M I_M$		S2	$3I_M$	$3V_M$	$9V_M I_M$
	S3	$3I_M$	$3V_M$	$9V_M I_M$		S3	$3I_M$	$3V_M$	$9V_M I_M$

Analitik hesaplamalar sonucunda, paneller kısmi gölgelenmeye maruz kalmadığı için FV dizisi satır akımları arasında herhangi bir fark yoktur. Ayrıca, önerilen yöntemin teorik olarak hesaplanan gücü TCB ile aynıdır ($9V_M I_M$).

G1 senaryosu için yapılan benzetim sonuçları Şekil 47’de gösterilmiştir. Şekil 47(b)’de gösterilen P-V eğrisi, teorik hesaplamalarla örtüşecek şekilde tek bir tepe değerine sahiptir. Şekil 47(c)’de gösterilen I-V eğrisinin ise düzgün olduğu görülmektedir.



Şekil 47. G1 senaryosunda FV dizisinin (a) P-T, (b) P-V, (c) I-V ve (d) T-V eğrileri

Algoritmaların performansları karşılaştırıldığında, D&G, PSO ve önerilen MGNT algoritması yaklaşık olarak aynı sürelerde MGN’ye (224.2 W ve 61.6 V) ulaşmıştır. Ancak D&G algoritması sabit adım aralığına sahip olması nedeniyle, MGN etrafında (58.9- 62.9 V) yaklaşık 4 V’luk bir salınım ile güç takibi yapabirmiştir.

PSO ve önerilen yaklaşım ise G1 senaryosunda aynı gücü üretirken, MGN’deki gerilimleri farklılık göstermiştir (MGN gerilimleri sırasıyla 61.2 V ve 62.0 V). Bunun sebebi, Proteus’ta oluşturulan FV dizisinin, 60.6-62.1 V’luk gerilimler arasında yaklaşık olarak 124.2 W’lık bir güç üretmesidir. Bu sebeple, iki algoritmanın MGN’deki gerilimleri G1 senaryosunda farklılık göstermiştir.

Bunlara ek olarak, bu tez çalışmasında algoritmaların performanslarını adil bir şekilde inceleyebilmek için MGNT algoritmaları, MGN’yi aramaya başlamadan önce dönüştürücü görev sürelerinin alt ve üst sınırlarını belirlemektedir. Bu amaçla, FV dizisi geriliminin 25V-65V olduğu aralıklara karşılık gelen görev süreleri, her ölçüm öncesinde Şekil 47(d)’de

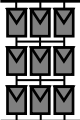
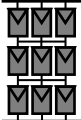
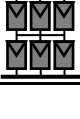
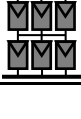
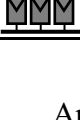
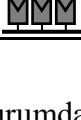
gösterilen A bölümündeki gibi aranmaktadır. Belirlenen görev süresi aralığının orta noktası, D&G algoritmasının aramaya başlama noktası olarak belirlenmiştir. PSO ve önerilen yaklaşım ise aynı sayıda aday çözüm (üç adet görev süresi) ve aynı başlama noktalarını kullanarak aramaya başlamaktadır. Üç arama noktasının ilki görev süresinin tam orta noktası (D&G algoritmasıyla aynı nokta), diğer iki nokta ise alt ve üst görev sürelerinin sırasıyla 0.2 üstü ve 0.2 altıdır. Önerilen algoritmanın gerçek uygulamasında da, görev süresinin alt ve üst sınırlarının belirlenmesi için A bölümü bulunmaktadır (Şekil 71).

Şekil 47(d)'deki B ve C bölümleri, FV dizisinin farklı ara bağlantılarının olduğu bölümlerdeki MGN geriliminin değişimini göstermektedir.

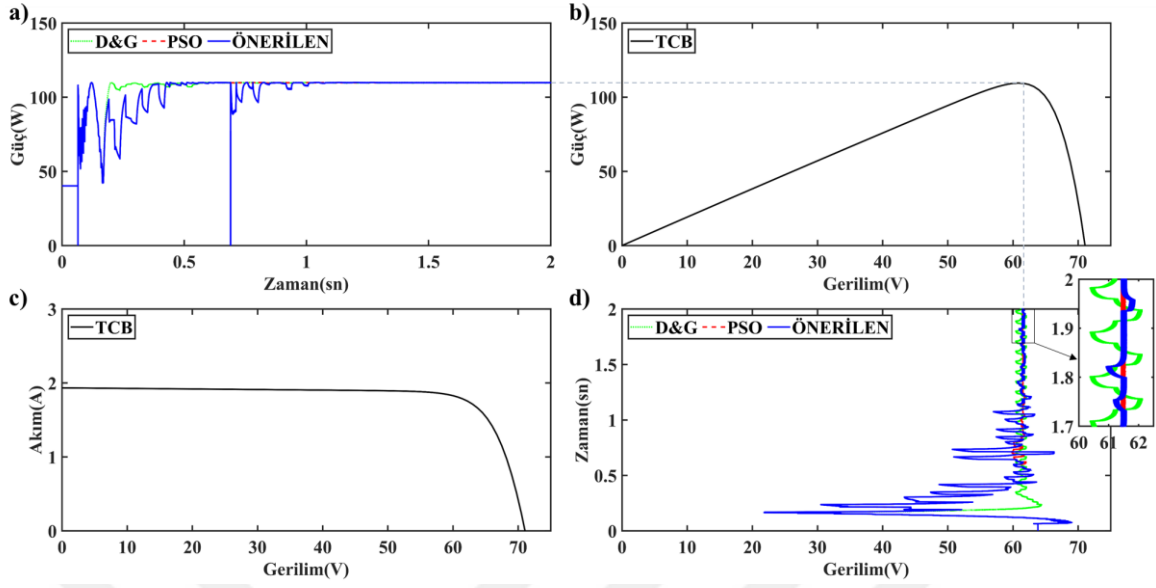
3.1.2. G2 Senaryosu

G2 senaryosu, FV dizisinin tamamının 500 W/m^2 ışımayla gölgelendirilmiş durumdaki performansını incelemektedir. Tablo 6'da dizinin iki farklı ara bağlantı için teorik analiz sonuçları sunulmuştur.

Tablo 6. G2 senaryosunda önerilen yöntemin ve TCB bağlantının analitik hesaplama sonuçları

TCB					Önerilen				
Gölge deseni	Satır	Akım (A)	Gerilim (V)	Güç (W)	Gölge deseni	Satır	Akım (A)	Gerilim (V)	Güç (W)
	S1	$1.5I_M$	$3V_M$	$4.5V_M I_M$		S1	$1.5I_M$	$3V_M$	$4.5V_M I_M$
	S2	$1.5I_M$	$3V_M$	$4.5V_M I_M$		S2	$1.5I_M$	$3V_M$	$4.5V_M I_M$
	S3	$1.5I_M$	$3V_M$	$4.5V_M I_M$		S3	$1.5I_M$	$3V_M$	$4.5V_M I_M$

Analitik sonuçlar doğrultusunda, her iki durumda da satır akımları farkı sıfırdır (P-V karakteristik eğrisinde tek bir tepe noktası olacağını göstermektedir) ve üretililecek maksimum güç değerleri birbirine eşittir ($4.5V_M I_M$).



Şekil 48. G2 senaryosunda FV dizisinin (a) P-T, (b) P-V, (c) I-V ve (d) T-V eğrileri

Şekil 48(b)'de görüldüğü üzere, G2 senaryosu için FV dizisinin karakteristik eğrisi teorik hesaplamalarla tutarlı olarak tek bir maksimum güç noktasına sahiptir. Şekil 48(a)'daki MGNT algoritmalarının güç takibi performansları incelendiğinde, her üç algoritmanın da MGN'yi doğru bulduğu görülmektedir. Ancak D&G algoritması 60.3- 62.07 V aralığındaki gerilimlerde salınım yapmıştır. PSO ve önerilen yaklaşım ise 61.6 V gerilimde MGN'yi (109.8 W) bulmuştur.

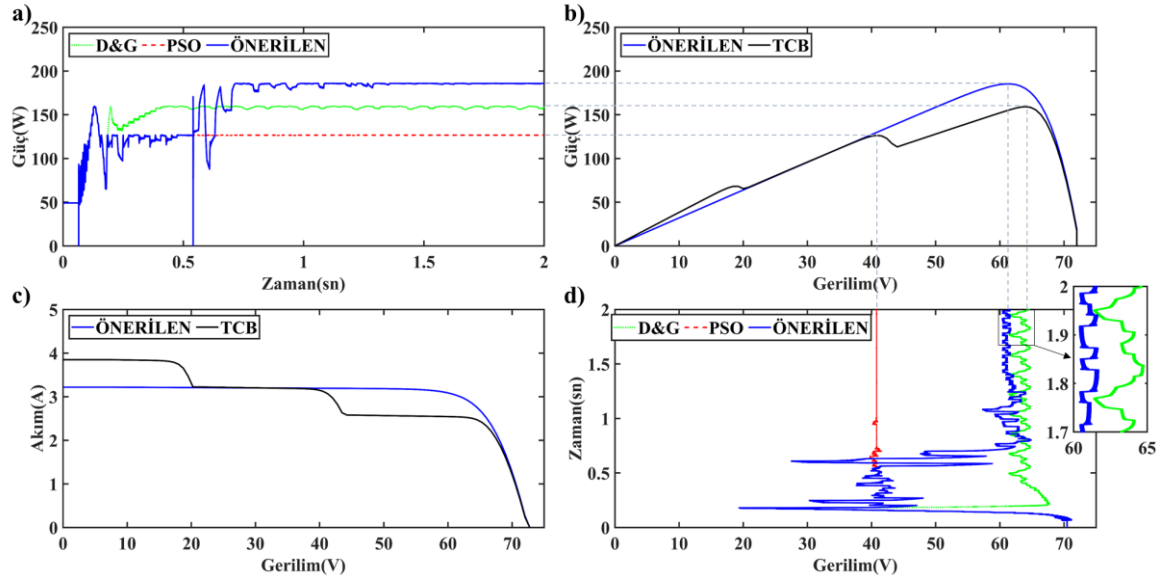
3.1.3. G3 Senaryosu

G3 senaryosunda, FV dizisinin 3 paneli 500 W/m^2 'lik ışımaya ve kalan altı panel ise 1000 W/m^2 'lik ışımaya maruz bırakılmıştır. Bu senaryoda, FV dizisi için kullanılan iki farklı ara bağlantının analitik hesaplamaları Tablo 7'de sunulmuştur.

Tablo 7. G3 senaryosunda önerilen yöntemin ve TCB bağlantının analitik hesaplama sonuçları

TCB					Önerilen				
Gölge deseni	Satır	Akım (A)	Gerilim (V)	Güç (W)	Gölge deseni	Satır	Akım (A)	Gerilim (V)	Güç (W)
	S1	$2I_M$	$3V_M$	$6V_M I_M$		S1	$2.5I_M$	$3V_M$	$7.5V_M I_M$
	S2	$2.5I_M$	$2V_M$	$5V_M I_M$		S2	$2.5I_M$	$3V_M$	$7.5V_M I_M$
	S3	$3I_M$	$1V_M$	$3V_M I_M$		S3	$2.5I_M$	$3V_M$	$7.5V_M I_M$

TCB şeması için, Tablo 7’de sunulan teorik hesaplamalarda, FV dizisinin satırları arasında akım farkı vardır. Bu durum, FV dizisinin P-V eğrisinde birden çok tepe noktası oluşmasına ve I-V eğrisinin bozulmasına sebep olmaktadır (Şekil 49(b)). Önerilen yöntemin uygulanması sonucunda FV dizisi satır akımları arasındaki fark ortadan kalkmış, P-V eğrisinde (Şekil 49(b)) tek bir tepe noktası oluşmuş ve I-V eğrisi (Şekil 49(c)) düzeltilmiştir. Sonuç olarak, FV dizisi uyumsuzluk kaybı sıfıra inmiş ve teorik olarak üretilen güç miktarı $6V_M I_M$ ’den $7.5V_M I_M$ ’ye yükseltilmiştir.



Şekil 49. G3 senaryosunda FV dizisinin (a) P-T, (b) P-V, (c) I-V ve (d) T-V eğrileri

Algoritmaların MGN’yi bulma performansları karşılaştırıldığında, PSO algoritması yerel bir MGN’ye (126.7 W ve 40.7 V) takılmıştır. D&G algoritması ise küresel maksimum güç noktasını (159.7 W ve 61.7- 64.7 V) bulmuştur. Ancak, TCB bağlantıda FV dizisinde uyumsuzluk kayıpları vardır. Önerilen yaklaşım, bu uyumsuzluk kayıplarını ortadan kaldırarak küresel maksimum güç noktasını 159.7 W’dan 185.6 W’a (61.1 V) çıkartıp, bu noktayı bulmuştur.

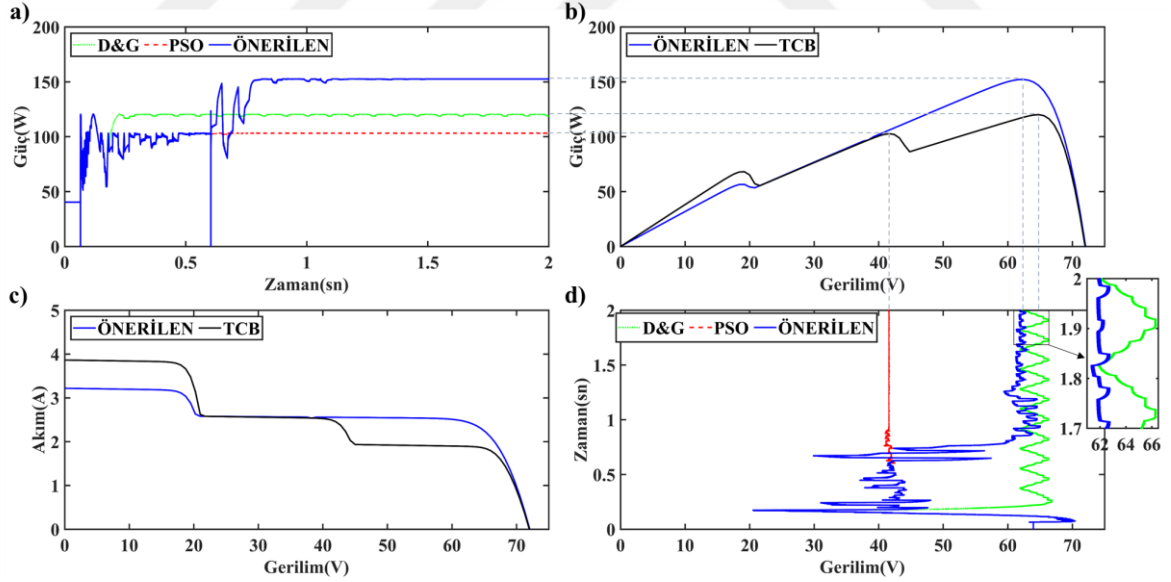
3.1.4. G4 Senaryosu

G4 senaryosunda, simetrik olmayan bir gölgelenme senaryosunun analiz edilmesi için, beş panel 500 W/m^2 ’lik ışıma maruz kalırken, kalan dört panel 1000 W/m^2 ’lik ışıma altındadır.

Tablo 8. G4 senaryosunda önerilen yöntemin ve TCB bağlantının analitik hesaplama sonuçları

TCB					Önerilen				
Gölge deseni	Satır	Akım (A)	Gerilim (V)	Güç (W)	Gölge deseni	Satır	Akım (A)	Gerilim (V)	Güç (W)
	S1	$3I_M$	$1V_M$	$3V_M I_M$		S1	$2I_M$	$3V_M$	$6V_M I_M$
	S2	$2I_M$	$2V_M$	$4V_M I_M$		S2	$2.5I_M$	$1V_M$	$2.5V_M I_M$
	S3	$1.5I_M$	$3V_M$	$4.5V_M I_M$		S3	$2I_M$	$3V_M$	$6V_M I_M$

FV dizisi çıkış akımının, dizi içindeki en düşük akıma sahip olan satır akımına eşit olduğu bilinmektedir (Ajmal vd., 2020). Tablo 8’de teorik hesaplama sonuçları gösterilen TCB bağlantıda, S3 en düşük satır akımına ($1.5I_M$) sahiptir (FV dizisi çıkış akımını sınırlamaktadır) ve satır akımları arasında fark vardır. Bu fark, P-V karakteristik eğrisi üzerinde birden fazla tepe noktası olduğunu göstermektedir (Şekil 50(b)). Önerilen yöntem, analitik olarak satır akımları arasındaki farkı azaltmıştır. Bunun sonucunda ise P-V karakteristik eğrisinde yerel maksimum güç noktası sayısı azalmış ve dizi çıkış akımı $2I_M$ ’ye, çıkış gücü de $6V_M I_M$ ’ye çıkmıştır.



Şekil 50. G4 senaryosunda FV dizisinin (a) P-T, (b) P-V, (c) I-V ve (d) T-V eğrileri

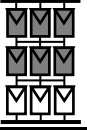
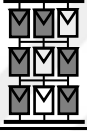
Şekil 50(a)’da, D&G algoritması MGN’yi 120.3 W (61.8- 66.4 V) bulmuştur. Buna karşın, PSO ise yerel güç noktasına (103.2 W ve 41.5 V) takılmıştır. Ancak hem PSO hem de D&G, TCB şemasını kullanır ve dolayısıyla her ikisi de aynı uyumsuzluk kaybına sahiptir. Önerilen yaklaşım FV dizisi ara bağlantılarını değiştirerek uyumsuzluk kaybını

azaltıp, karakteristik eğriyi düzelterek mümkün olan global maksimum güç noktasına (152.6 W ve 61.9 V) ulaşmıştır (Şekil 50(b)).

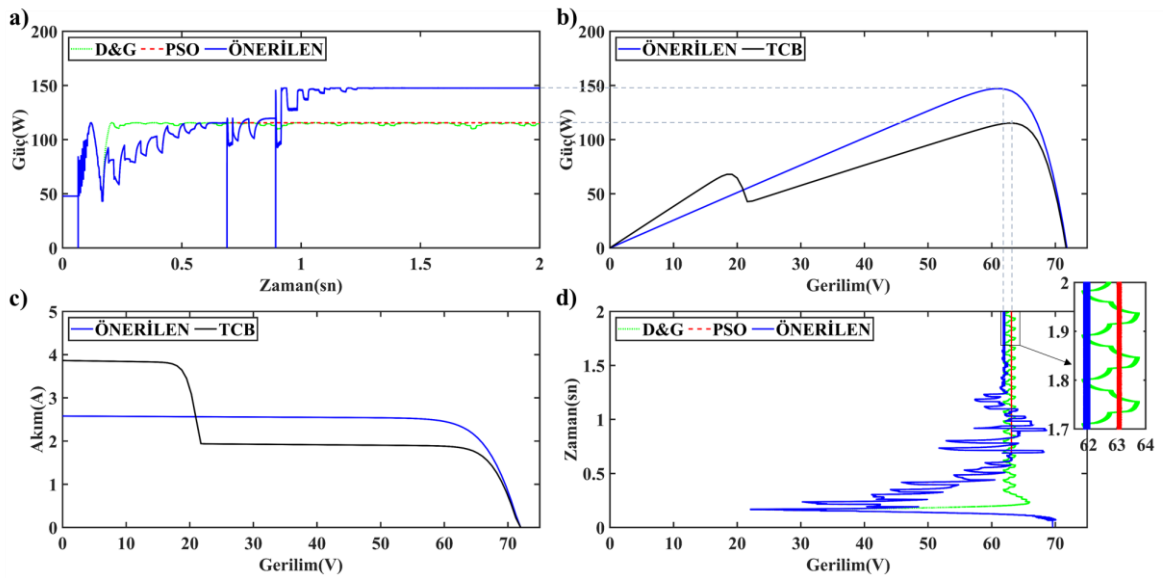
3.1.5. G5 Senaryosu

G5 senaryosunda, FV dizisinin ilk iki satırı 500 W/m²'lik ışıma ile gölgelenirken, son satırın 1000 W/m²'lik ışıma maruz kaldığı bir senaryo kurgulanmıştır.

Tablo 9. G5 senaryosunda önerilen yöntemin ve TCB bağlantının analitik hesaplama sonuçları

TCB					Önerilen				
Gölge deseni	Satır	Akım (A)	Gerilim (V)	Güç (W)	Gölge deseni	Satır	Akım (A)	Gerilim (V)	Güç (W)
	S1	$1.5I_M$	$3V_M$	$4.5V_M I_M$		S1	$2I_M$	$3V_M$	$6V_M I_M$
	S2	$1.5I_M$	$3V_M$	$4.5V_M I_M$		S2	$2I_M$	$3V_M$	$6V_M I_M$
	S3	$3I_M$	$1V_M$	$3V_M I_M$		S3	$2I_M$	$3V_M$	$6V_M I_M$

Tablo 9'daki analitik sonuçlarda, TCB konfigürasyonunda FV dizi çıkış akımı $1.5I_M$ ve çıkış gücü $3V_M I_M$ olarak gösterilmiştir. Ayrıca, satır akımları arasındaki farklılık sebebiyle FV dizisine ait P-V karakteristik eğrisi bozuktur (Şekil 51(b)). Önerilen yaklaşım satır akım farkını sıfıra indirerek FV dizisi karakteristik eğrisini düzeltmiştir. Böylelikle, önerilen yaklaşım uyumsuzluk kaybını sıfıra indirmiştir.



Şekil 51. G5 senaryosunda FV dizisinin (a) P-T, (b) P-V, (c) I-V ve (d) T-V eğrileri

Algoritma performanslarının karşılaştırıldığı Şekil 51(a)'da gösterildiği gibi, PSO ve D&G algoritmaları maksimum güç noktasına (115.5 W ve 63.1 V) ulaşmış olsa da uyumsuzluk kaybı nedeniyle mümkün olan global maksimum güce (147.6 W ve 61.9 V) sadece önerilen algoritma tarafından ulaşılmıştır.

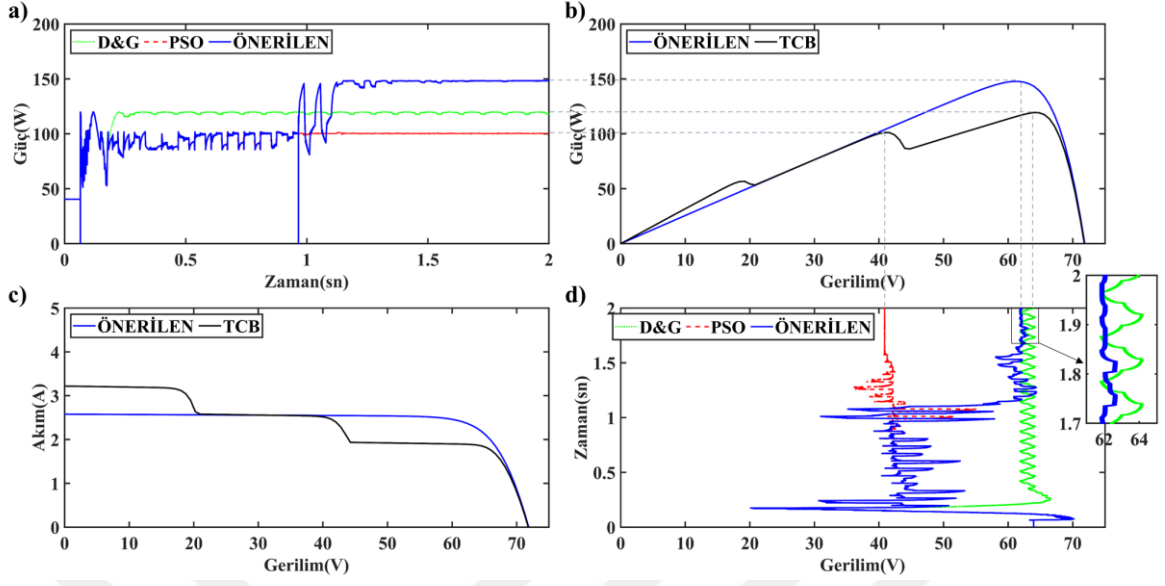
3.1.6. G6 Senaryosu

G6 senaryosunda, altı panel 500 W/m²'lik ışımaya ve kalan üç panel ise 1000 W/m²'lik ışımaya maruz bırakılmıştır.

Tablo 10. G6 senaryosunda önerilen yöntemin ve TCB bağlantının analitik hesaplama sonuçları

TCB					Önerilen				
Gölge deseni	Satır	Akım (A)	Gerilim (V)	Güç (W)	Gölge deseni	Satır	Akım (A)	Gerilim (V)	Güç (W)
	S1	$2.5I_M$	$1V_M$	$2.5V_M I_M$		S1	$2I_M$	$3V_M$	$6V_M I_M$
	S2	$2I_M$	$2V_M$	$4V_M I_M$		S2	$2I_M$	$3V_M$	$6V_M I_M$
	S3	$1.5I_M$	$3V_M$	$4.5V_M I_M$		S3	$2I_M$	$3V_M$	$6V_M I_M$

Tablo 10'daki teorik sonuçlarda gösterildiği üzere, önerilen algoritma panel çıkış gücünü $2.5V_M I_M$ 'den $6V_M I_M$ 'ye çıkarmıştır. Ayrıca, önerilen yöntem satır akımları arasındaki farkı sıfıra indirerek, yerel minimum noktalarına takılma ihtimalini ortadan kaldırmıştır.



Şekil 52. G6 senaryosunda FV dizisinin (a) P-T, (b) P-V, (c) I-V ve (d) T-V eğrileri

Şekil 52'deki grafikler incelendiğinde, D&G algoritması MGN'ye (119.8 W ve 61.8-64.2 V) ulaşmıştır. Önerilen yöntem ve PSO tabanlı MGNT algoritması ise yaklaşık olarak 1sn boyunca bir yerel güç noktasına takılmıştır (99.9 W ve 40.8 V). Ancak önerilen yöntem FV dizisi ara bağlantılarını değiştirerek uyumsuzluk kayıplarını ortadan kaldırıp ve GMGN'ye (148.2 W ve 61.7 V) ulaşmıştır.

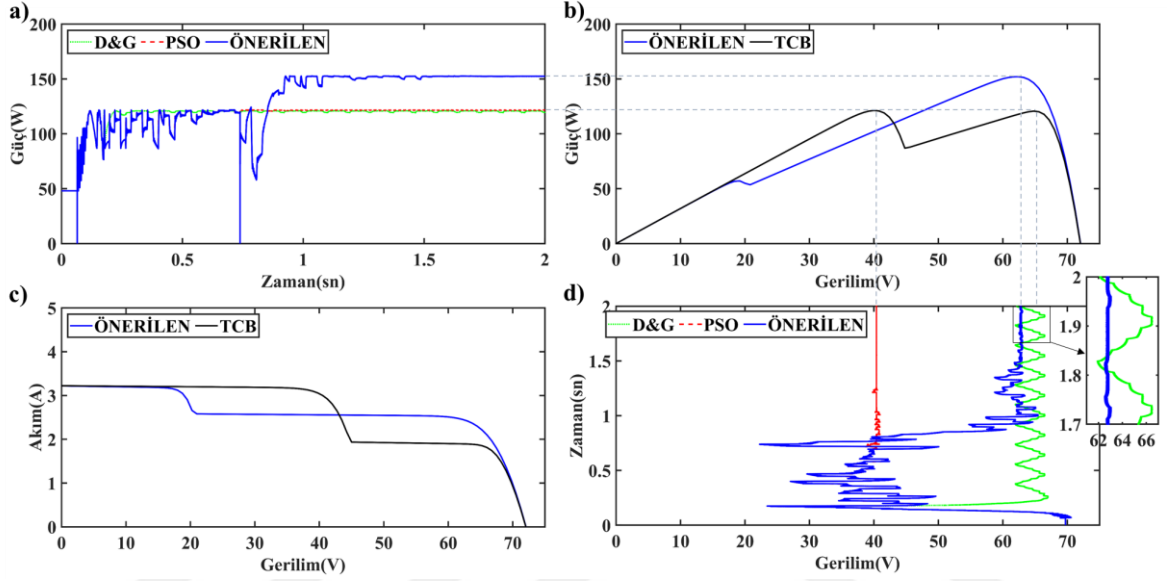
3.1.7. G7 Senaryosu

Asimetrik olarak gölgelendirilen FV dizisinde beş panel 500 W/m^2 'lik ışımaya, kalan dört panelin ise 1000 W/m^2 'lik ışımaya maruz kaldığı G7 senaryosunda, TCB ve önerilen yönteme ait teorik hesaplamalar Tablo 11'de sunulmuştur.

Tablo 11. G7 senaryosunda önerilen yöntemin ve TCB bağlantının analitik hesaplama sonuçları

TCB					Önerilen				
Gölge deseni	Satır	Akım (A)	Gerilim (V)	Güç (W)	Gölge deseni	Satır	Akım (A)	Gerilim (V)	Güç (W)
	S1	$2.5I_M$	$2V_M$	$5V_M I_M$		S1	$2I_M$	$3V_M$	$6V_M I_M$
	S2	$1.5I_M$	$3V_M$	$4.5V_M I_M$		S2	$2I_M$	$3V_M$	$6V_M I_M$
	S3	$2.5I_M$	$2V_M$	$5V_M I_M$		S3	$2.5I_M$	$1V_M$	$5V_M I_M$

Tablo 11'de önerilen yaklaşım tarafından FV dizisinin çıkış akımının $1.5I_M$ 'den $2I_M$ 'ye çıkartıldığı gösterilmiştir. Buna ek olarak, önerilen algoritma TCB konfigürasyona kıyasla satır akımları arasındaki farkı azaltarak uyumsuzluk kayıplarını azaltmıştır. Ancak sıfıra indirememesi sebebiyle, P-V karakteristik eğrisinde birden fazla güç noktası oluşmuştur (TCB'ye kıyasla P-V karakteristik eğrisi önerilen yaklaşımda daha düzgündür).



Şekil 53. G7 senaryosunda FV dizisinin (a) P-T, (b) P-V, (c) I-V ve (d) T-V eğrileri

Şekil 53(b)'de gösterildiği üzere, D&G ve PSO algoritmaları benzer gücü üreten iki farklı güç noktası bulmuşlardır (yaklaşık 121 W). Ancak bu gücü D&G algoritması 62.0-66.5 V gerilim aralığında, PSO algoritması ise 40.4 V gerilimde üretebilmiştir (Şekil 53d). Önerilen algoritma ise uyumsuzluk kayıplarını azaltarak, üretilen güç miktarını artırmış ve de GMGN'yi bulmuştur (152.5 W ve 62.8 V) (Şekil 53(b)).

3.1.8. Benzetim Çalışması Özeti

Benzetim çalışmasında 7 farklı senaryo için, 3 farklı MGNT algoritmasının bulduğu MGN değerleri Tablo 12'de sunulmuştur. Bütün senaryolar incelendiğinde, D&G algoritması MGN etrafında salınım yaparak FV dizisi çıkış gücünde dalgalanmalara sebep olmuştur.

G3, G4 ve G6 senaryoları incelendiğinde, PSO algoritması yerel maksimum güç noktasına takılırken, D&G algoritması bu sorunu yaşamadığı için daha yüksek güç üretebilmiştir.

Tablo 12. G1-G7 senaryolarında MGNT algoritmalarının performansları

Senaryo	MGN (W) TCB	MGNT algoritmaları			Kazanç (%)
		D&G (W)	PSO (W)	Önerilen (W)	
G1	224.2	224.2	224.2	224.2	-
G2	109.8	109.8	109.8	109.8	-
G3	159.7	159.7	126.7	185.6	16.2
G4	120.3	120.3	103.2	152.6	26.8
G5	115.5	115.5	115.5	147.6	27.7
G6	119.8	119.8	99.9	148.2	23.7
G7	121.5	120.9	121.5	152.5	25.5

G1 ve G2 senaryolarında ise, FV dizisi dengeli bir ışıma altında olması nedeniyle üç algoritmanın da çıkış gücü aynıdır. Diğer senaryolarda (G3-G7) FV dizisi kısmi gölgelendiği için önerilen yaklaşım, gölgeleri FV dizisine dengeli bir şekilde dağıtarak uyumsuzluk kayıplarını azaltmış ve GMGN'yi %16.2 ile %26.8 arasında artırmıştır.

3.2. Uygulama Çalışması

Deney düzeneği, önerilen algoritmanın uygulanabilirliğini test etmek amacıyla 6 haziran 2024 tarihinde, Bayburt merkezde kurulmuştur. FV dizisi ölçümler boyunca güneye bakacak konumda ve 62° eğimli olacak şekilde yerleştirilmiştir. Yedi farklı senaryonun (G8-G14) incelendiği deneyde, her bir ölçümden önce FV dizisi üzerine düşen ortalama ışıma ölçülüp kaydedilmiştir. Ölçümler boyunca panel sıcaklıkları yaklaşık olarak 37°C ölçülmüştür.

Deneyde G8 ve G9 senaryolarında panel kısmi gölgelenmeye maruz bırakılmamış ve sistemin uzun süreli çalışma performansını incelemek amacıyla Time/Div değeri 10 s, Volts/Div değeri 20 V seçilmiştir. Diğer senaryolarda (G10-G14) ise FV dizisi kısmi olarak gölgelendirilmiş ve Time/Div değeri 1s, Volts/Div değeri 20 V olarak ayarlanmıştır.

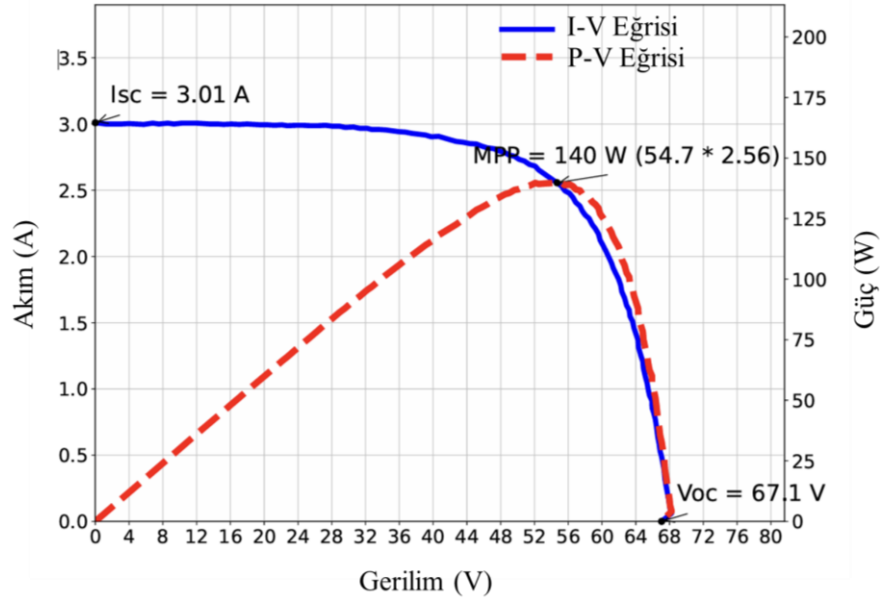
3.2.1. G8 Senaryosu

Gölgenin olmadığı ve FV dizisi üzerine düşen ışımanın yaklaşık 710 W/m^2 olarak ölçüldüğü G8 senaryosu Şekil 54’de gösterilmektedir.



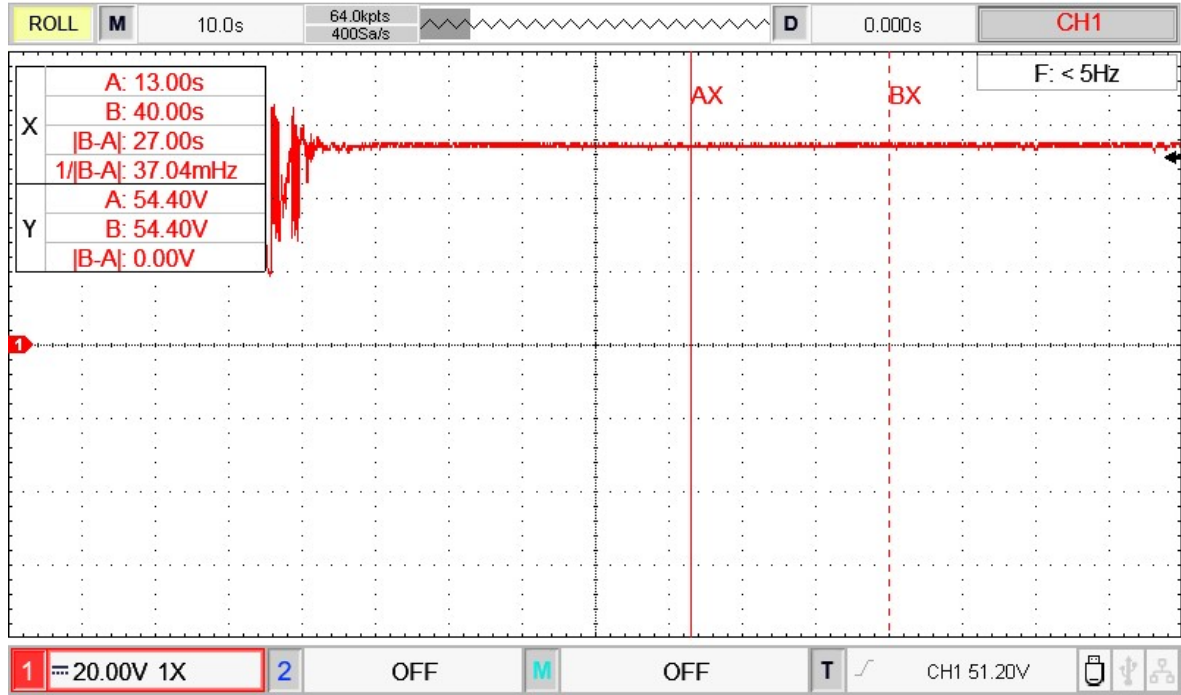
Şekil 54. G8 senaryosunda FV dizisi (Işıma: 710 W/m^2 , Gölge: yok)

Şekil 54’de gösterilen FV dizisinin IV izleyici yardımıyla yapılan ölçümleri sonucunda MGN 140 W, bu noktadaki gerilim 54.7 V, akım 2.56 A olarak ölçülmüştür (Şekil 55). Ayrıca FV dizisi açık devre gerilimi 67.1 V, kısa devre akımı 3.01 A olarak tespit edilmiştir.



Şekil 55. G8 senaryosunda FV dizisine ait I-V ve P-V eğrileri

Şartlar değiştirilmeden, önerilen yöntemin çalıştırılması sonucunda, FV dizisi geriliminin osiloskop ekran görüntüsü Şekil 56'da sunulmuştur. Önerilen yöntem, FV dizisinin MGN'deki gerilimini 54.4 V olarak hesaplamıştır.



Şekil 56. G8 senaryosunda FV dizisinin geriliminin osiloskop ekran görüntüsü

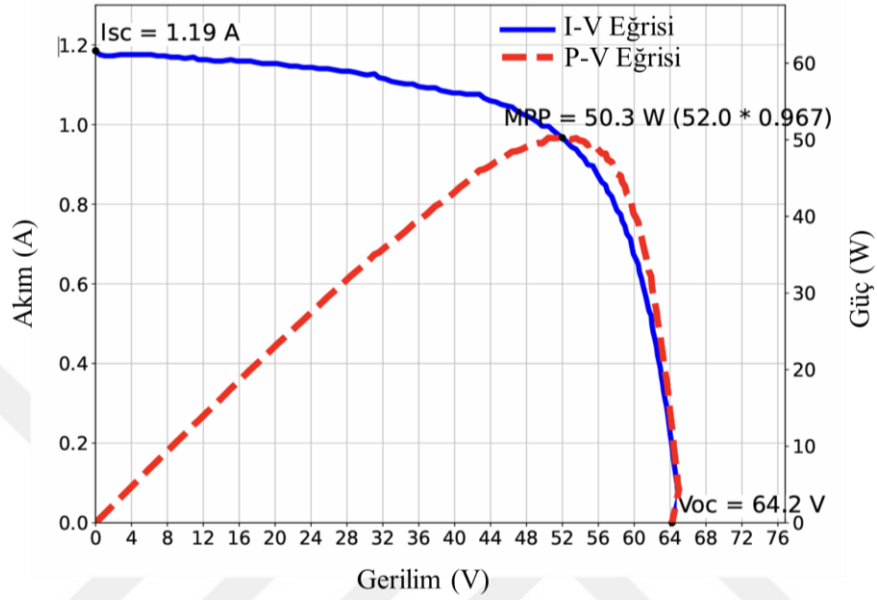
3.2.2. G9 Senaryosu

FV dizisinin tamamen gölgelendirildiği G9 senaryosu Şekil 57'de sunulmuştur. FV dizisine ulaşan ışıma miktarı ortalama 360 W/m^2 ölçülmüştür.



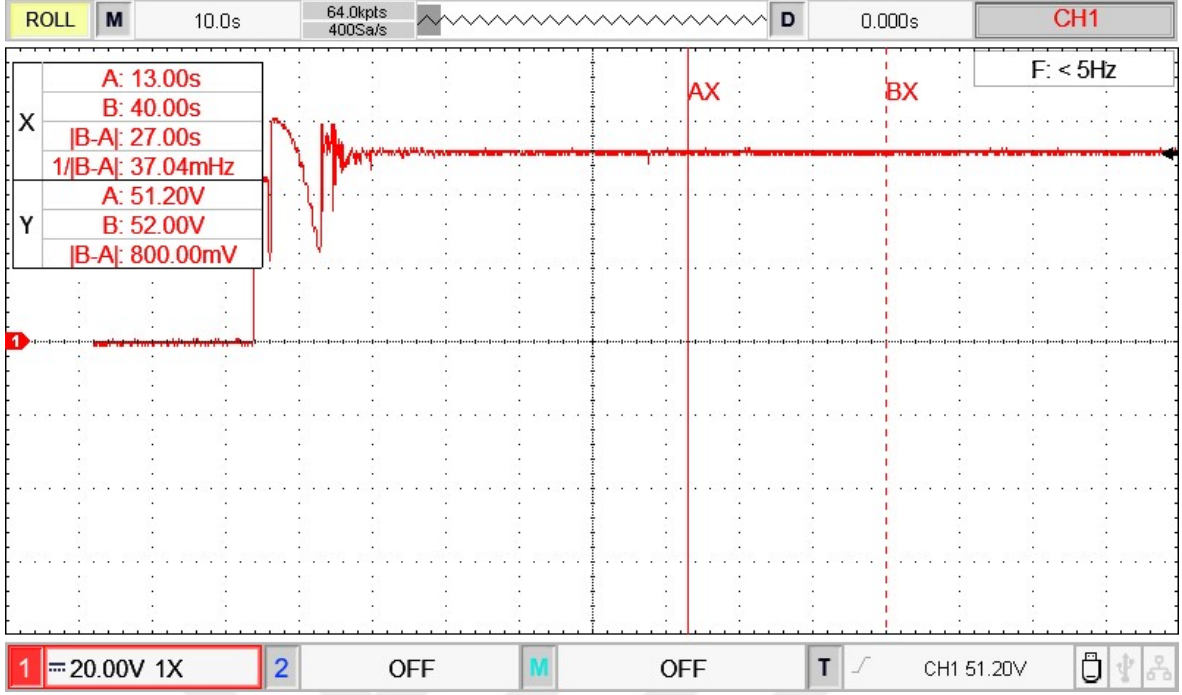
Şekil 57. G9 senaryosunda FV dizisi (Işıma: 710 W/m^2 , Gölge: 360 W/m^2)

G9 senaryosunda, FV dizisi karakteristik eğrileri (Şekil 58) IV izleyici yardımıyla çizdirilmiştir. MGN 50.3 W, MGN'deki gerilim 52.0 V ve MGN'deki akım 0.96 A olarak ölçülmüştür. FV dizisi açık devre gerilimi ise 64.2 V ve kısa devre akımı 1.19 A olarak bulunmuştur.



Şekil 58. G9 senaryosunda FV dizisine ait I-V ve P-V eğrileri

Şekil 59'da verilen osiloskop ekran görüntüsünden yola çıkarak, önerilen yöntemin FV dizisi çalışma gerilimini 51.2 V ve 52.0 V aralığında tuttuğu görülmüştür.



Şekil 59. G9 senaryosunda FV dizisinin geriliminin osiloskop ekran görüntüsü

Gölge oluşturmak için kullanılan engelleyici, FV dizisi üzerine düşen ışımayı yaklaşık %50 oranında azaltmasına rağmen, FV dizisi çıkış gücünde %64'lük bir düşüş hesaplanmıştır. Bunun sebebi, FV panellerinin lineer olmayan yapısıdır.

G8 ve G9 senaryolarında, önerilen yöntem herhangi bir güç artırımını gerçekleştirememiştir. Her iki senaryoda da FV dizisi herhangi bir kısmi gölgelenmeye maruz kalmadığı için, P-V karakteristik eğrisinde bozulma olmamıştır. Bu sebeple, önerilen yöntem TCB konfigürasyonunda kalarak MGN takibi yapmıştır.

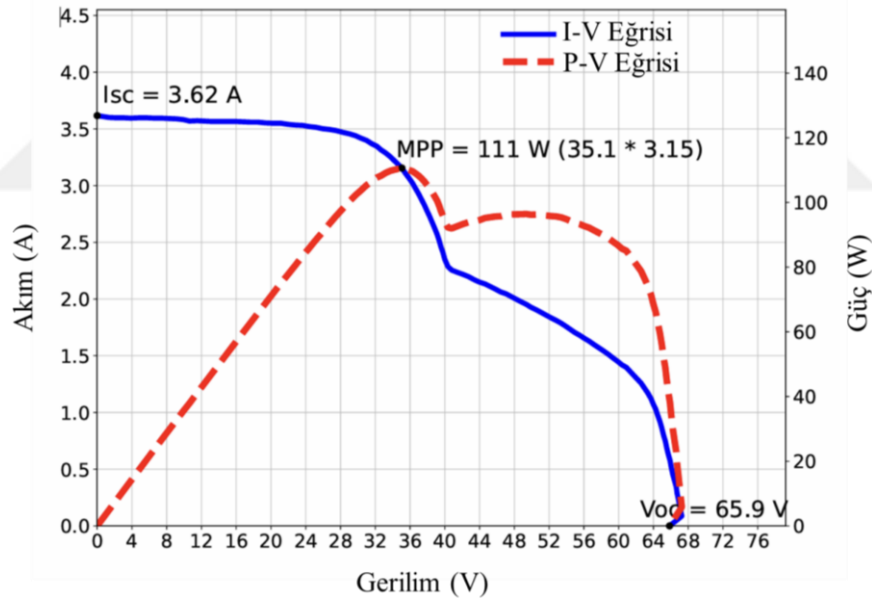
3.2.3. G10 Senaryosu

FV dizisinin 840 W/m^2 ışıma altında, Şekil 60'ta gösterildiği şekilde bir kısmının yaklaşık 320 W/m^2 'lik ışıma ile gölgelendirilmesi G10 senaryosu olarak incelenmektedir.



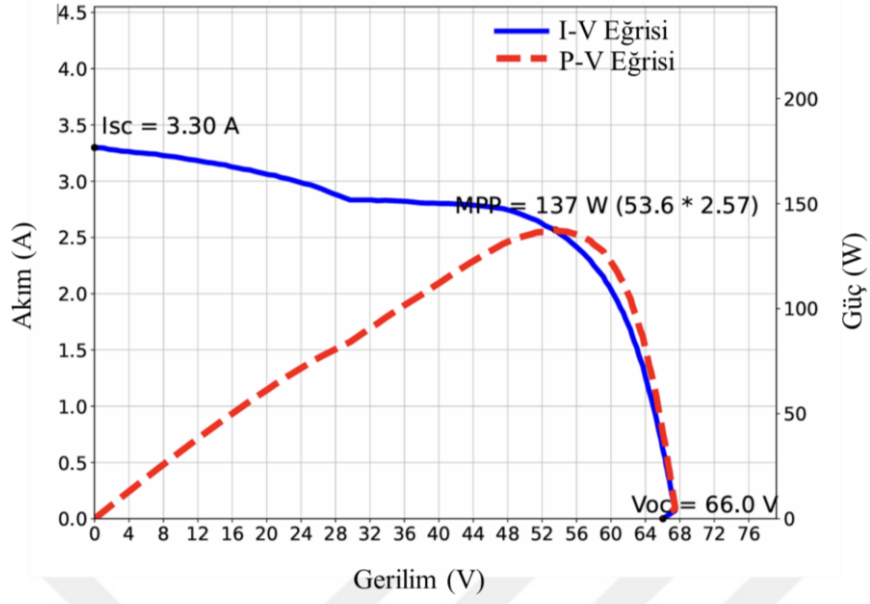
Şekil 60. G10 senaryosunda FV dizisi (Işıma: 840 W/m^2 , Gölge: 320 W/m^2)

Şekil 60'taki FV dizisi TCB konfigürasyonda, MGN 111 W, MGN gerilimi 35.1 V, MGN akımı 3.15 A, açık devre gerilimi 65.9 V ve kısa devre akımı 3.62 A olarak ölçülmüştür (Şekil 61).



Şekil 61. G10 senaryosunda TCB konfigürasyonda FV dizisine ait I-V ve P-V eğrileri

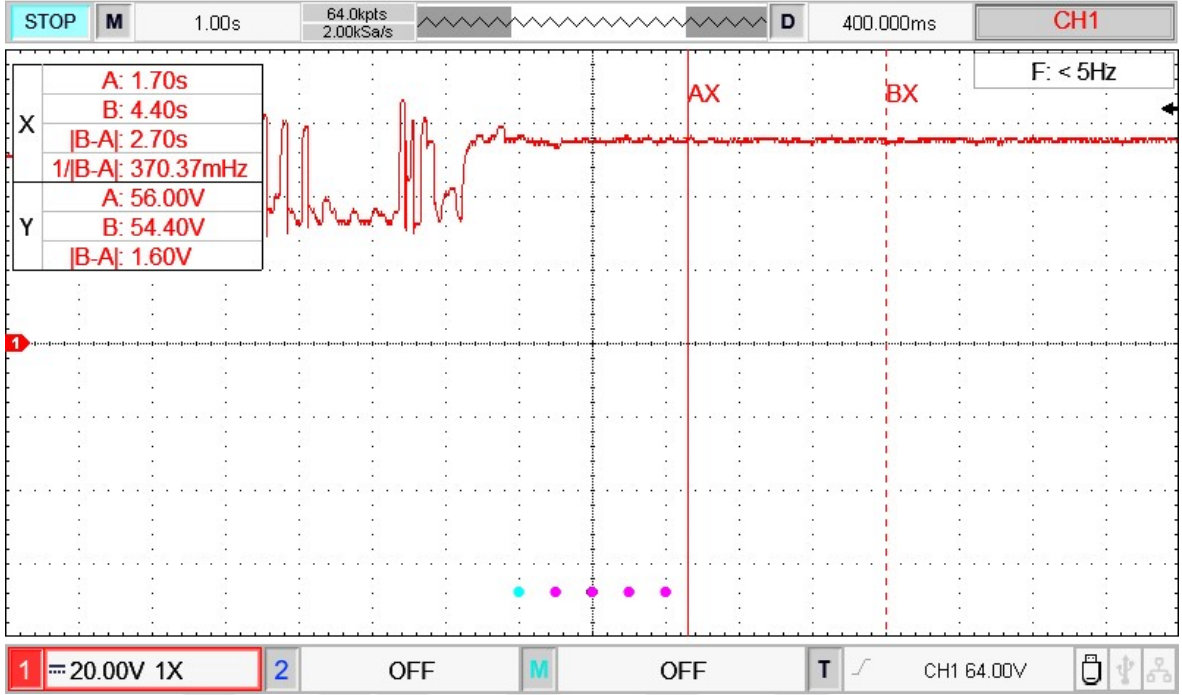
Önerilen yöntemin gölgelenmiş panelleri tüm diziye yayması sayesinde, FV dizisinden üretililecek maksimum güç 16 W artarak 137 W olmuştur. Ayrıca, FV karakteristik eğrisi Şekil 62'de görüldüğü üzere daha düzgün bir hale gelmiştir. Ancak, gölgelenmiş panellerin gölgelenme oranlarının farklı olması sebebiyle, çok düzgün bir I-V ve P-V eğrisi oluşmamıştır.



Şekil 62. G10 senaryosunda, önerilen yaklaşım uygulandıktan sonra FV dizisine ait I-V ve P-V eğrileri

Önerilen yöntemin MGN'deki gerilimi takip etmesini gösteren osiloskop ekran görüntüsü Şekil 63'de sunulmuştur. Yöntem öncelikle Şekil 61'de bulunan MGN gerilimini (35.1 V) içine alacak şekilde yaklaşık 32 V- 37 V aralığında salınım yapmaktadır. Bunun temel sebebi; önerilen algoritmada, üç adet görev süresinin aralarındaki farkın toplamı belirli bir değerin altına indiğinde, başka bir senaryoya geçilmesidir. Eğer üç adet görev süresi farkı sıfıra çok yakın bir değer seçilmiş olsaydı salınım meydana gelmeyecekti. Ancak GMGN'yi bulmakta gecikmemek için yüksek bir değer seçilmiştir.

Önerilen yöntem, FV dizisi ara bağlantılarını değiştirip Şekil 62'daki MGN gerilimine (53.6 V) yakınsamıştır.



Şekil 63. G10 senaryosunda FV dizisinin geriliminin osiloskop ekran görüntüsü

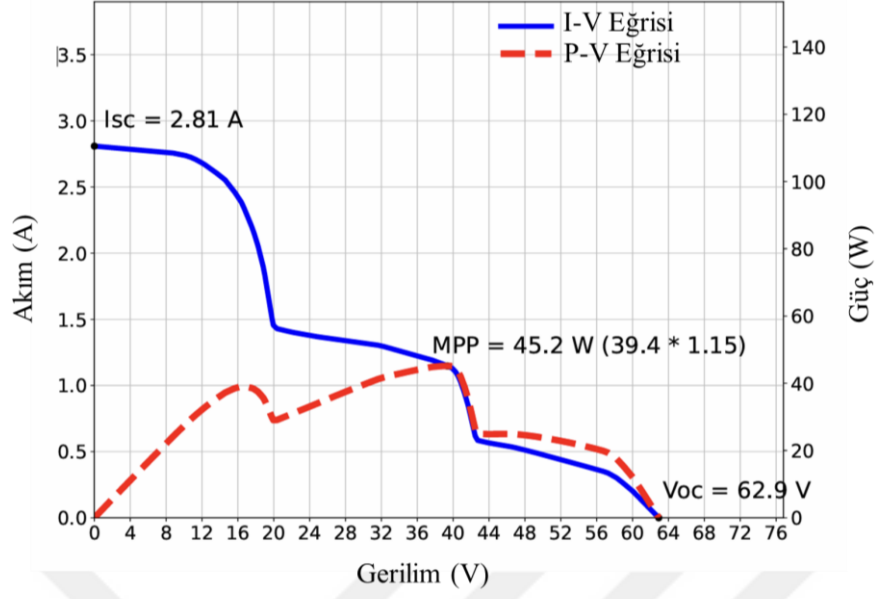
3.2.4. G11 Senaryosu

FV dizisinin yaklaşık 848 W/m^2 ışıma altında, dizinin bir bölümünün $50\text{--}400 \text{ W/m}^2$ arasında kısmi olarak gölgelendirildiği G11 senaryosu Şekil 64’de sunulmuştur.



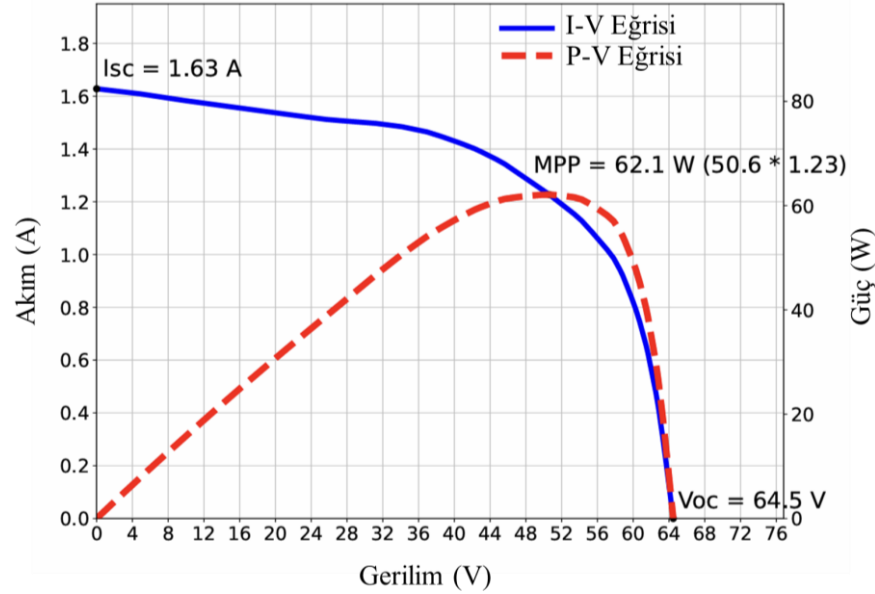
Şekil 64. G11 senaryosunda FV dizisi (Işıma: 848 W/m^2 , Gölge: $50\text{--}400 \text{ W/m}^2$)

G11 senaryosu için, TCB konfigürasyonda P-V ve I-V karakteristik eğrileri, IV izleyicisi tarafından çizdirilmiş ve Şekil 65’te sunulmuştur.



Şekil 65. G11 senaryosunda TCB konfigürasyonda FV dizisine ait I-V ve P-V eğrileri

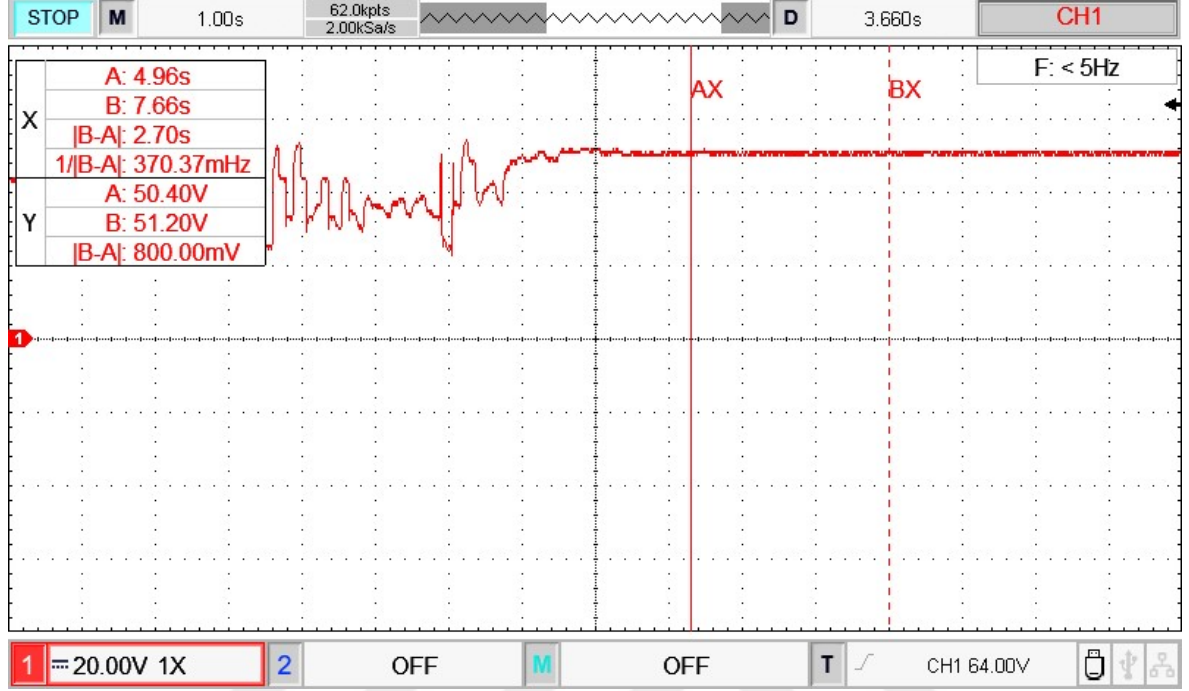
TCB konfigürasyonda, FV dizisi P-V karakteristik eğrisinde üç adet maksimum güç noktası bulunmaktadır. GMGN'deki güç 45.2 W, gerilim 39.4 V ve akım 1.15 A olarak ölçülmüştür. Önerilen yöntemde, FV dizisi karakteristik eğrileri düzeltilerek GMGN'deki güç 16.9 W artırılmış ve gerilim değeri 50.6 V (Şekil 66) olarak ölçülmüştür.



Şekil 66. G11 senaryosunda, önerilen yaklaşım uygulandıktan sonra FV dizisine ait I-V ve P-V eğrileri

Şekil 67'de, deney sırasında FV dizisinin MGN'deki gerilim değişimleri sunulmuştur. Önerilen yöntem TCB konfigürasyonda yaklaşık 34–39 V aralığında salınım yaparken, FV

dizisi ara bağlantılarını değiştirdikten yaklaşık bir saniye sonra MGN'deki gerilim değerine (50.6 V) yakınsamıştır.



Şekil 67. G11 senaryosunda FV dizisinin geriliminin osiloskop ekran görüntüsü

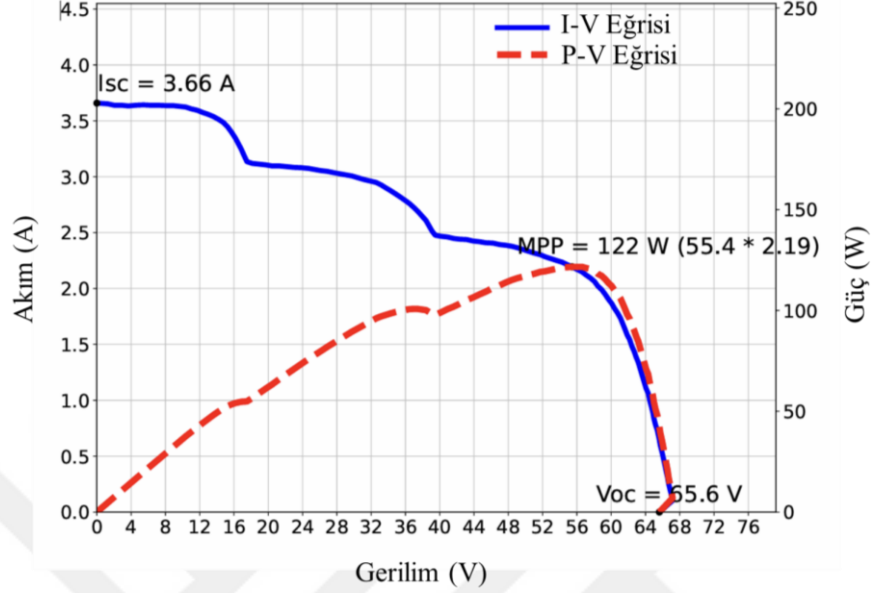
3.2.5. G12 Senaryosu

G12 senaryosunda, FV dizisi ortalama 856 W/m^2 ışıma altında, Şekil 68'de gösterildiği şekilde kısmi olarak gölgelendirilmiştir (Gölge altına ulaşan ışıma yaklaşık 420 W/m^2 'dir).



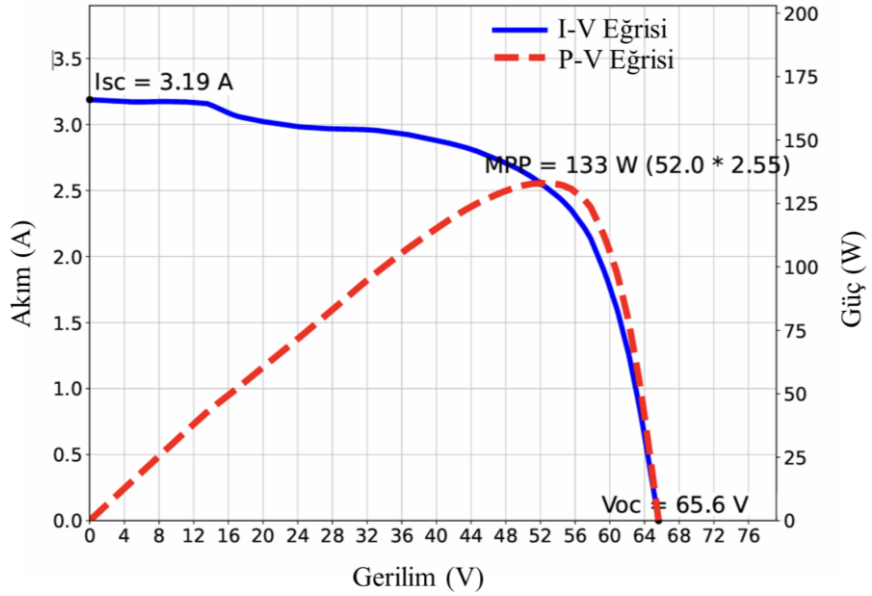
Şekil 68. G12 senaryosunda FV dizisi (Işıma: 856 W/m^2 , Gölge: 420 W/m^2)

TCB konfigürasyonda, FV dizisinin GMGN’de 122 W güç, 55.4 V gerilim ve 2.19 A akıma sahip olduğu ölçülmüştür (Şekil 69).



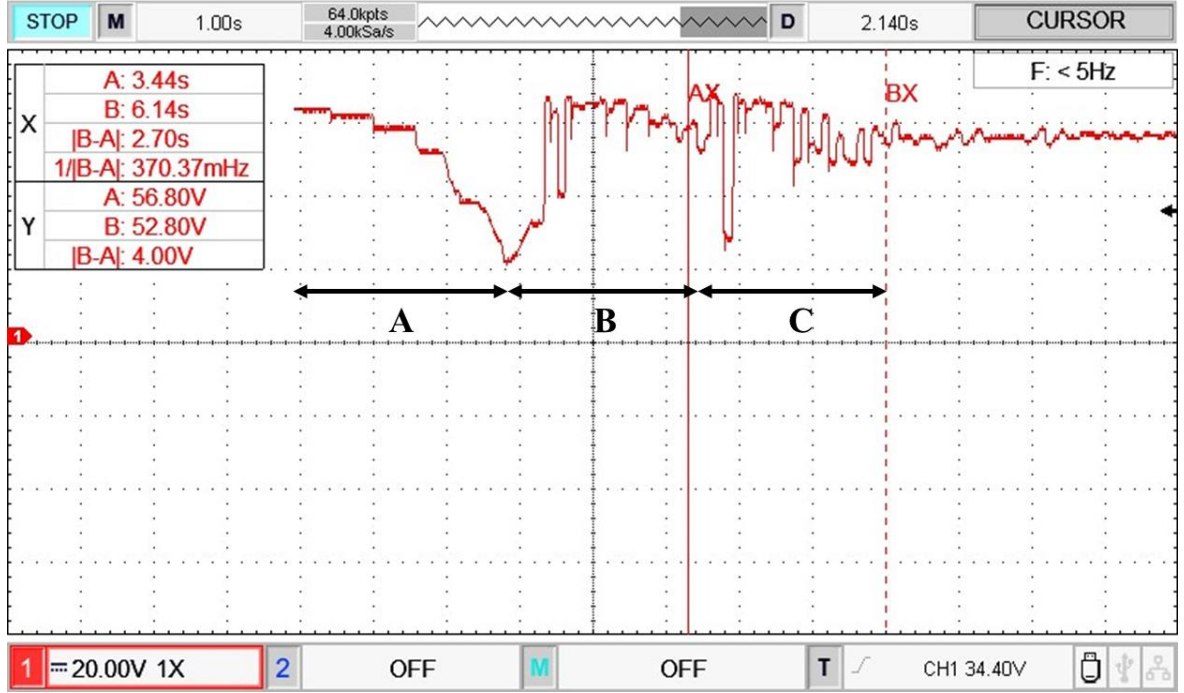
Şekil 69. G12 senaryosunda TCB konfigürasyonda FV dizisine ait I-V ve P-V eğrileri

TCB konfigürasyonda, FV dizisinin P-V karakteristik eğrisinde yerel güç noktaları ve I-V karakteristik eğrisinde bozukluk vardır (Şekil 69). Önerilen yöntem, FV dizisinin ara bağlantılarını değiştirmesi sonucunda, karakteristik eğriler düzelmiştir (Şekil 70).



Şekil 70. G12 senaryosunda, önerilen yaklaşım uygulandıktan sonra FV dizisine ait I-V ve P-V eğrileri

G12 senaryosunda; önceki kısmi gölgelenme senaryolarından (G10 ve G11) farklı olarak MGN'de 11 W'lık güç artışı olurken, MGN gerilim değeri azalmıştır (55.4 V'dan 52.0 V'a düşmüştür). Şekil 71, G12 senaryosunda önerilen yöntemin MGN'deki gerilim takibinin osiloskop ekran görüntüsünü göstermektedir.



Şekil 71. G12 senaryosunda FV dizisinin geriliminin osiloskop ekran görüntüsü

Şekil 71' deki osiloskop ekran alıntısı, Şekil 47(d)'de olduğu gibi üç gruba bölünmüştür. A bölümünde önerilen yöntemdeki aday çözümlerin (görev süresi) sınırları hesaplanmıştır. B ve C bölümlerinde ise FV dizisi ara bağlantıları değiştirilmiştir.

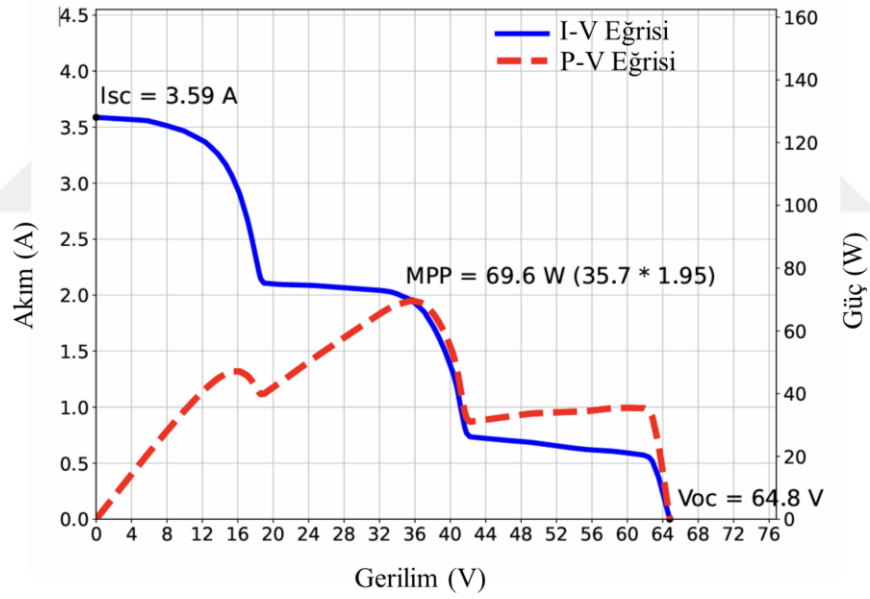
3.2.6. G13 Senaryosu

G13 senaryosunda, FV dizisi 828 W/m² ışıma altında ve 50-400 W/m²'lik ışıma ile kısmi olarak gölgelendirildiği gölge deseni Şekil 72'de sunulmuştur.



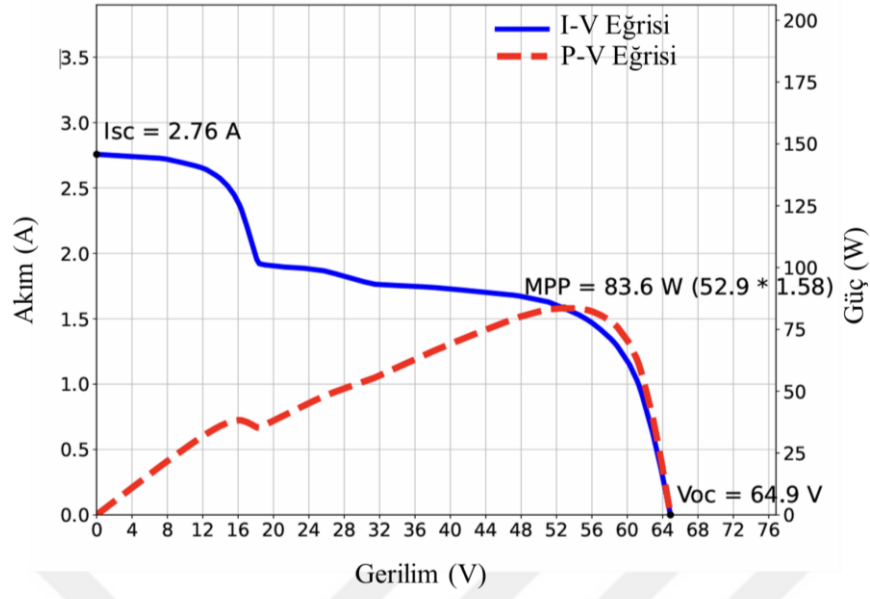
Şekil 72. G13 senaryosunda FV dizisi (Işıma: 828 W/m^2 , Gölge: $50 - 400 \text{ W/m}^2$)

TCB konfigürasyonda, FV dizisi üç adet maksimum güç noktasına sahip bir karakteristik eğri oluşturmuştur (Şekil 73).



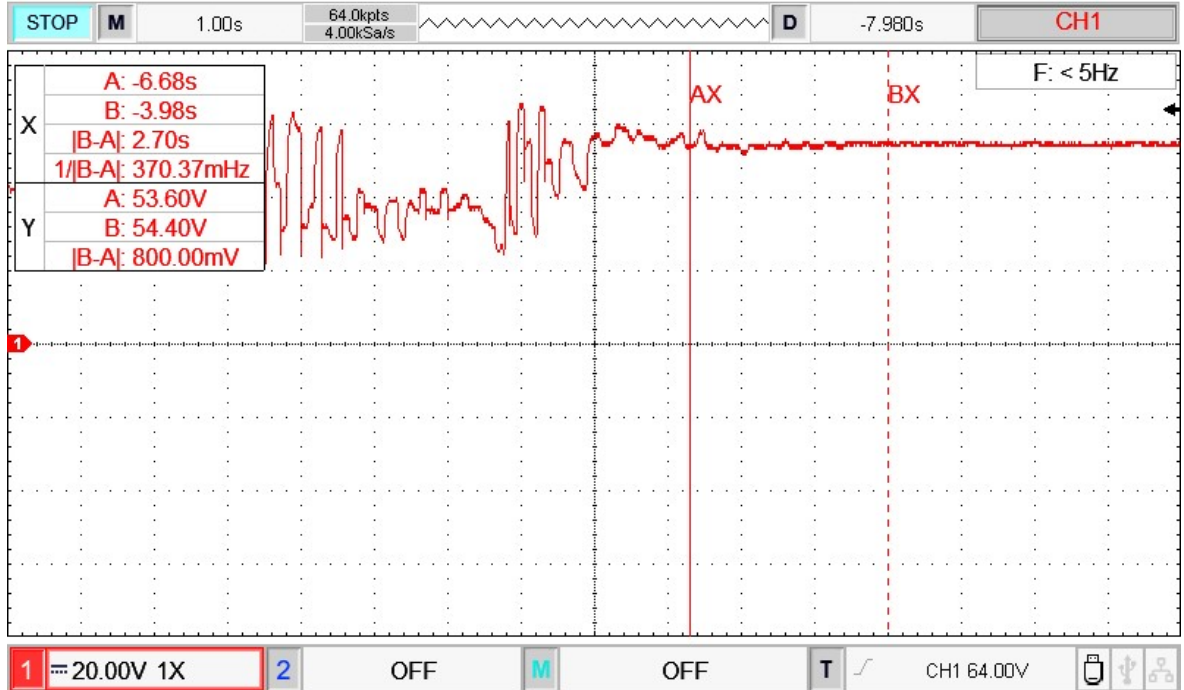
Şekil 73. G13 senaryosunda TCB konfigürasyonda FV dizisine ait I-V ve P-V eğrileri

FV dizisi GMGN'de 69.6 W 'lık güç, 35.7 V gerilim ve 1.95 A akıma sahiptir. Önerilen yöntemin dizideki ara bağlantıları elektriksel olarak değiştirmesiyle; GMGN'deki güç 83.6 W 'a, gerilim 52.9 V 'a yükselmiştir (Şekil 74). Ayrıca yerel minimum sayısı üçten ikiye düşmüştür. Bu sayede önerilen yaklaşımın yerel minimuma takılma ihtimali azalmıştır.



Şekil 74. G13 senaryosunda, önerilen yaklaşım uygulandıktan sonra FV dizisine ait I-V ve P-V eğrileri

Şekil 75'te, önerilen yaklaşımın TCB konfigürasyonda 36 V etrafında $\pm 1 \text{ V}$ 'luk salınımlar yaptığı ve ara bağlantılar değiştikten sonra 54.0 V etrafında $\pm 0.4 \text{ V}$ 'luk salınım yaptığını görülmektedir.



Şekil 75. G13 senaryosunda FV dizisinin geriliminin osiloskop ekran görüntüsü

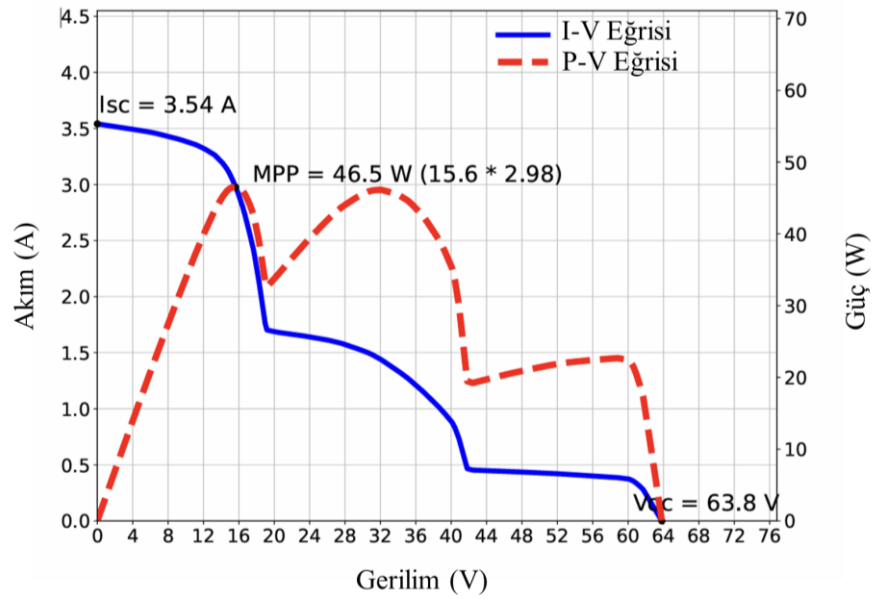
3.2.7. G14 Senaryosu

G14 senaryosunda, FV dizisi 832 W/m^2 ışıma altında ve yaklaşık 150 W/m^2 'lik ışıma ile simetrik olmayan bir şekilde kısmi olarak gölgelendirildiği gölge deseni Şekil 76'da sunulmuştur.



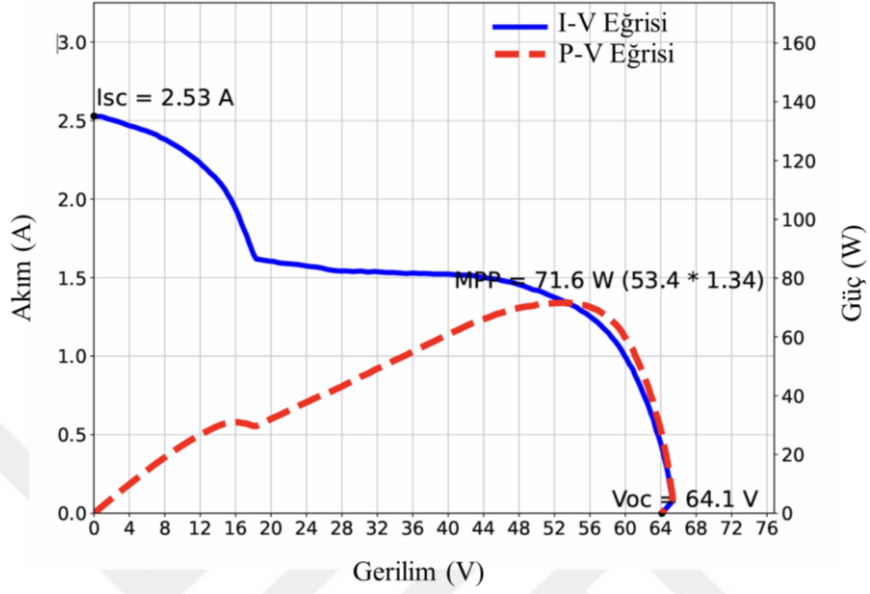
Şekil 76. G14 senaryosunda FV dizisi (Işıma: 832 W/m^2 , Gölge: 150 W/m^2)

G14 senaryosunda, TCB konfigürasyonda IV izleyicisinin ölçmüş olduğu GMGN, Şekil 77'de sunulduğu üzere 46.5 W ve 15.6 V 'dur. Ancak bu değere çok yakın bir değerde (yaklaşık 46 W güç ve $32\text{-}33 \text{ V}$ arasında bir gerilimde) yerel MGN bulunmaktadır.



Şekil 77. G14 senaryosunda TCB konfigürasyonda FV dizisine ait I-V ve P-V eğrileri

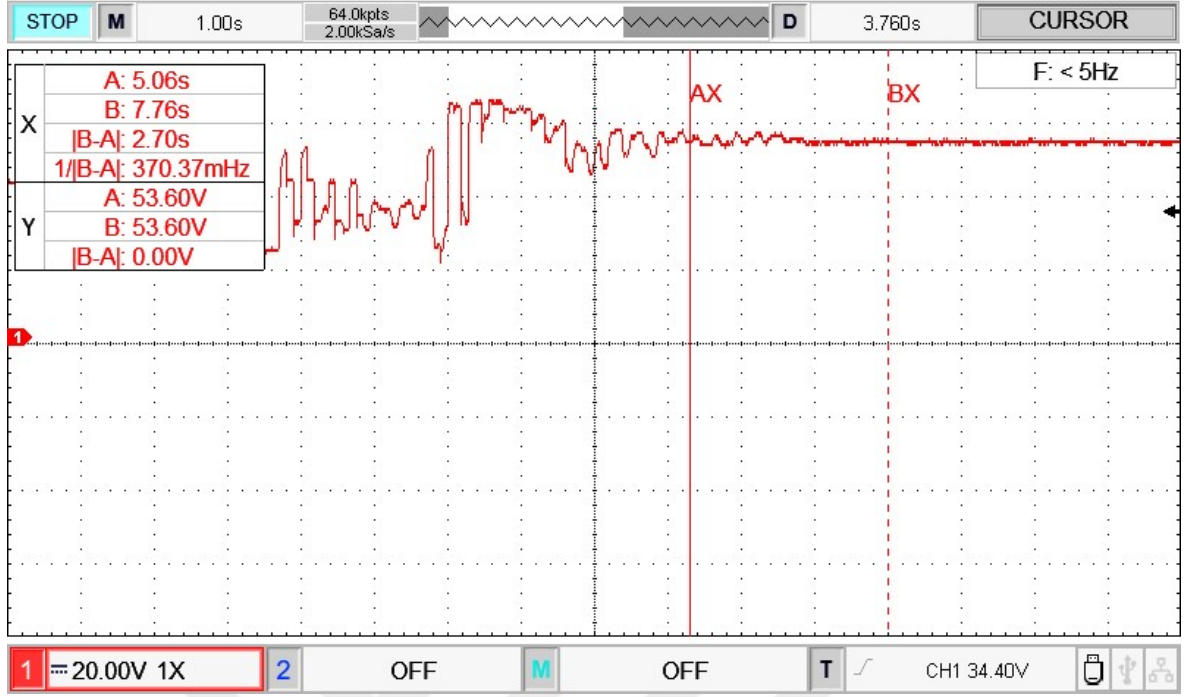
Önerilen yöntemin FV dizisi ara bağlantılarını değiştirmesi sonucunda, GMGN'deki güç 25.1 W artmış ve gerilim 53.4 V'a yükselmiştir. Ayrıca karakteristik eğrideki bozukluk mümkün olduğunca düzeltilmiş ve P-V eğrisi üzerindeki yerel minimum sayısı azaltılmıştır.



Şekil 78. G14 senaryosunda, önerilen yaklaşım uygulandıktan sonra FV dizisine ait I-V ve P-V eğrileri

TCB bağlantıda GMGN'deki gerilim 15.6 V olarak ölçülmesine rağmen, G14 senaryosunun deneyi esnasında osiloskop üzerinde bu gerilim değeri ölçülememiştir. Bunun sebebi, artıran dönüştürücü tasarımında giriş gerilimi ölçüm aralığının 24 V – 77 V olarak belirlenmesidir. Bu gerilim aralıkları dışında MGNT algoritması güç takibi yapmamaktadır. Dolayısıyla önerilen yöntem ikinci en yüksek güç noktasındaki gerilim değerine yakınsamıştır (34.0 V civarında ± 2 V salınımda).

Önerilen yöntemin FV dizisi ara bağlantılarını değiştirmesiyle, osiloskop ekran görüntüsünde görüldüğü gibi GMGN'deki gerilim değerine (53.6 V) ulaşılmıştır. Ancak bu gerilimde de küçük dalgalanmalar olmuştur (Dalgalanma değerinin küçüklüğünden dolayı, sıfır olduğu kabul edilmiştir).



Şekil 79. G14 senaryosunda FV dizisinin geriliminin osiloskop ekran görüntüsü

3.2.8. Uygulama Çalışması Özeti

Uygulama çalışmasında, yedi farklı senaryo için önerilen yaklaşımın MGN'yi takip etmedeki performansı Tablo 13'de sunulmuştur. Benzetim çalışmasından farklı olarak, uygulamada önerilen yöntemin GMGN'yi bulma performansı FV dizisi çıkış gerilimi yardımıyla incelenmiştir. Kazanç (%) ise arama yapıldıktan sonra FV dizisinin karakteristik eğrisi üzerindeki IV izleyici tarafından ölçülen GMGN ile arama yapılmadan önce TCB bağlantıda IV izleyici tarafından ölçülen GMGN'nin oranlanması sonucunda elde edilmiştir.

Tablo 13. G8-G14 senaryolarında önerilen yöntemin performansı

Senaryo	IV izleyici ölçümü				Osiloskop ölçümü	Kazanç (%)
	TCB		Önerilen			
	MGN	V _{MGN}	MGN	V _{MGN}	V _{MGN}	
	(W)	(V)	(W)	(V)	(V)	
G8	140.0	54.7	-	-	54.4 ± 0	-
G9	50.3	52.0	-	-	51.6 ± 0.4	-
G10	111.0	35.1	137.0	53.6	55.2 ± 0.8	23
G11	45.2	39.4	62.1	50.6	50.8 ± 0.4	37
G12	122.0	55.4	133.0	52.0	53.6 ± 0.6	9
G13	69.6	35.7	83.6	52.9	54.0 ± 0.4	20
G14	46.3	32.3	71.6	53.4	53.6 ± 0	54

Önerilen yaklaşımın uygulamadaki performansı, benzetim çalışması sonuçlarıyla tutarlıdır. Dengeli ışıma altındaki (G8 ve G9 senaryolarında) FV dizilerde geliştirilen yöntem, herhangi bir güç artırımını sağlayamamıştır. Ancak kısmi gölgelenmeler altında (G10-G14) FV dizisi çıkış gücü, TCB bağlantıya kıyasla %9 ila %54 arasında artmıştır.



4. SONUÇLAR

Önerilen yaklaşım, kısmi gölgelenme altında MGNT algoritmalarının Şekil 9'da gösterilen MGNT kaybı (yerel minimum noktasına takılma problemi) ve FV dizisi uyumsuzluk kaybını azaltmıştır. Bu kayıpların her ikisini de tek bir algoritmayla çözmeye odaklanan literatürdeki ilk çalışma olması sebebiyle yapılan tez çalışması özgün bir değere sahiptir.

Bu tez çalışmasında geliştirilen yöntemin benzetimi Proteus'ta geliştirilmiş olup, önerilen yaklaşım PSO tabanlı MGNT algoritmasına uygulanmıştır. Geliştirilen yaklaşımın performansı, yedi farklı senaryoda D&G ve PSO tabanlı MGNT algoritmalarıyla karşılaştırılmıştır. Geliştirilen algoritma FV dizisindeki panellerin eşit güneş ışığına maruz kaldığı senaryolarda (G1 ve G2) D&G ve klasik PSO ile aynı MGN'yi bulmuştur. Ancak FV dizisindeki panellerin bir bölümünün gölgelendiği senaryolarda (G3-G7) diğer iki algoritmaya kıyasla önerilen yaklaşım, FV dizisi çıkış gücünü en az %16.2 oranında artırmıştır.

Önerilen yaklaşımın gerçek çevre koşulları altındaki performansı da yedi farklı gölge senaryosu (G8-G14) altında incelenmiştir. TCB bağlı FV dizilerinin kısmi olarak gölgelendiği senaryolarda (G10-G14), önerilen yaklaşımın FV çıkış gücünü en az %9 oranında artırdığı hesaplanmıştır.

Tez çalışması sonucunda, bu tez çalışmasının literatüre katmış olduğu kazanımlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- ✓ Geliştirilen yaklaşım dengeli ışıma altında FV dizisi çıkış gücünde bir artış sağlayamazken, kısmi gölgelenme altında FV çıkış gücünde %54'lere varan artış sağlamıştır.
- ✓ Önerilen yaklaşım; MGNT algoritmalarının, yeniden konumlandırma stratejileriyle birlikte kullanılarak verimlerinin artırılabilceğini 3×3'lük bir FV dizisinde göstermiştir.
- ✓ Önerilen yaklaşım; literatürde kullanılan yeniden konumlandırma stratejilerindeki uzun bağlantı, gölgelenme tespiti için kullanılan ilave sensor, karmaşık kablolama ve anahtarlama gibi maliyet artıran ve performans düşüren gereksinimlere ihtiyaç duymadan çalışabilmektedir.

- ✓ Geliştirilen yaklaşım FV dizisi karakteristik eğrisini düzelterek, MGNT algoritmalarının yerel güç noktasına takılma ihtimalini en aza indirip genel maksimum güç noktasını bulabilmektedir.

Sonuç olarak; bu tez çalışmasında geliştirilen yaklaşımın, MGNT algoritmalarına yeni bir bakış açısı katarak FV sistemlerin işletme verimlerinin artırılmasına büyük katkı sağlayacağı düşünülmektedir.



5. ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, FV sistemlerinde kullanılan MGNT algoritmaları üzerine bir çalışma yapılmıştır. Tez sürecinde bu alanda eksik olduğu düşünülen bazı bilgi ve çalışma konuları, gelecekteki araştırmacılara yol göstermesi için aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- ✓ Bu tez çalışmasında geliştirilen yaklaşım 3×3 'lük bir FV dizisi için uygulanmıştır. Ancak farklı boyutlardaki FV dizilerinde uygulanabilirliği bulunmamaktadır. Gelecek çalışmalarda, farklı boyutlardaki FV dizileri için konfigürasyon stratejileri geliştirilebilir.
- ✓ MGNT algoritmaları MGN'ye ulaşmada, başlangıç noktası olarak rastgele bir nokta veya sabit bir nokta seçmektedir. Bazı durumlarda belirlenen başlangıç noktası, MGNT algoritmasının performansını olumsuz etkilemektedir. Bu sorunu ortadan kaldırmak için, başlangıç noktası belirleme stratejilerinin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.
- ✓ Bu tez çalışmasında ve literatürde PSO algoritması sabitleri genellikle deneme yanılma yoluyla bulunmaktadır ve bu sabitler algoritmanın performansını büyük oranda etkilemektedir. Bu sebeple ilgili sabitlerin belirlenmesinde bir standart ya da yönteme ihtiyaç duyulmaktadır.
- ✓ MGNT algoritmalarında, G14 senaryosunda olduğu gibi DA-DA dönüştürücünün çalışma aralığının doğru belirlenememesi sonucunda, GMGN'ye ulaşamamıştır. Bu sebeple, uygulamalarda dönüştürücü çalışma gerilimi aralıklarının doğru belirlenmesi önemlidir.
- ✓ Ortam sıcaklığının FV panellerin enerji üretimini önemli ölçüde etkilediği bilinmektedir. Ancak, farklı ortam sıcaklıklarında FV dizisinin yeniden yapılandırılmasının çıkış gücü üzerindeki etkisi hakkında yeterli bilgi yoktur.
- ✓ Önerilen MGNT yaklaşımı PSO algoritmasına entegre edilmiştir. Gelecek çalışmalarda geliştirilen yaklaşımın farklı MGNT algoritmalarına da entegrasyonu sağlanabilir.

6. KAYNAKLAR

- Abdelsalam, A. K., Massoud, A. M., Ahmed, S., & Enjeti, P. N. (2011). High-performance adaptive perturb and observe MPPT technique for photovoltaic-based microgrids. *IEEE transactions on Power Electronics*, 26(4), 1010-1021.
- Ahmad, R., Murtaza, A. F., & Sher, H. A. (2019). Power tracking techniques for efficient operation of photovoltaic array in solar applications—A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 101, 82-102.
- Ajmal, A. M., Babu, T. S., Ramachandramurthy, V. K., Yousri, D., & Ekanayake, J. B. (2020). Static and dynamic reconfiguration approaches for mitigation of partial shading influence in photovoltaic arrays. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 40, 100738.
- Al-Majidi, S. D., Abbod, M. F., & Al-Raweshidy, H. S. (2019). Design of an efficient maximum power point tracker based on ANFIS using an experimental photovoltaic system data. *Electronics*, 8(8), 858.
- Aldosary, A., Ali, Z. M., Alhaider, M. M., Ghahremani, M., Dadfar, S., & Suzuki, K. (2021). A modified shuffled frog algorithm to improve MPPT controller in PV System with storage batteries under variable atmospheric conditions. *Control Engineering Practice*, 112, 104831.
- Alghuwainem, S. (1994). Matching of a dc motor to a photovoltaic generator using a step-up converter with a current-locked loop. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 9(1), 192-198.
- Aljafari, B., Satpathy, P. R., & Thanikanti, S. B. (2022). Partial shading mitigation in PV arrays through dragonfly algorithm based dynamic reconfiguration. *Energy*, 257, 124795.
- Altas, I., & Sharaf, A. (2008). A novel maximum power fuzzy logic controller for photovoltaic solar energy systems. *Renewable Energy*, 33(3), 388-399.
- Atia, A. M. M. (2023). *Characterisation and modelling of photovoltaic cells and modules under partial shading*. Cardiff University.
- Babu, T. S., Ram, J. P., Dragičević, T., Miyatake, M., Blaabjerg, F., & Rajasekar, N. (2017). Particle swarm optimization based solar PV array reconfiguration of the maximum power extraction under partial shading conditions. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 9(1), 74-85.

- Becquerel, M. (1839). Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires. *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*, 9, 561-567.
- Bingöl, O., & Özkaya, B. (2018). Analysis and comparison of different PV array configurations under partial shading conditions. *Solar Energy*, 160, 336-343.
- Bollipo, R. B., Mikkili, S., & Bonthagorla, P. K. (2020). Hybrid, optimal, intelligent and classical PV MPPT techniques: A review. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 7(1), 9-33.
- Chapin, D. M., Fuller, C. S., & Pearson, G. L. (1954). A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power. *Journal of applied physics*, 25(5), 676.
- Charaabi, A., Zaidi, A., Barambones, O., & Zanzouri, N. (2022). Implementation of adjustable variable step based backstepping control for the PV power plant. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 136, 107682.
- Craciunescu, D., & Fara, L. (2023). Investigation of the Partial shading effect of photovoltaic panels and optimization of their performance based on high-efficiency FLC algorithm. *Energies*, 16(3), 1169.
- De Brito, M. A. G., Galotto, L., Sampaio, L. P., e Melo, G. d. A., & Canesin, C. A. (2012). Evaluation of the main MPPT techniques for photovoltaic applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(3), 1156-1167.
- Deng, S., Zhang, Z., Ju, C., Dong, J., Xia, Z., Yan, X., . . . Xing, G. (2017). Research on hot spot risk for high-efficiency solar module. *Energy Procedia*, 130, 77-86.
- Deshkar, S. N., Dhale, S. B., Mukherjee, J. S., Babu, T. S., & Rajasekar, N. (2015). Solar PV array reconfiguration under partial shading conditions for maximum power extraction using genetic algorithm. *Renewable and sustainable energy reviews*, 43, 102-110.
- Dhanalakshmi, B., & Rajasekar, N. (2018). Dominance square based array reconfiguration scheme for power loss reduction in solar PhotoVoltaic (PV) systems. *Energy Conversion and Management*, 156, 84-102.
- Ebhota, W., & Tabakov, P. (2023). Influence of photovoltaic cell technologies and elevated temperature on photovoltaic system performance. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(7), 101984.
- Eltamaly, A. M., & Farh, H. M. (2019). Dynamic global maximum power point tracking of the PV systems under variant partial shading using hybrid GWO-FLC. *Solar Energy*, 177, 306-316.
- Etarhouni, M., Chong, B., & Zhang, L. (2022). A novel square algorithm for maximising the output power from a partially shaded photovoltaic array system. *Optik*, 257, 168870.

- Fapi, C. B. N., Wira, P., Kamta, M., Tchakounté, H., & Colicchio, B. (2021). Simulation and dSPACE hardware implementation of an improved fractional short-circuit current MPPT algorithm for photovoltaic system. *Applied Solar Energy*, 57, 93-106.
- Fathy, A. (2018). Recent meta-heuristic grasshopper optimization algorithm for optimal reconfiguration of partially shaded PV array. *Solar Energy*, 171, 638-651.
- Femia, N., Petrone, G., Spagnuolo, G., & Vitelli, M. (2005). Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method. *IEEE transactions on Power Electronics*, 20(4), 963-973.
- Fraas, L., Avery, J., Sundaram, V., Kinh, V., Davenport, T., Yerkes, J., . . . Emery, K. (1990). *Over 35% efficient GaAs/GaSb stacked concentrator cell assemblies for terrestrial applications*. Paper presented at the Conference Record, 21st IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Kissimmee.
- Fraas, L. M., & O'Neill, M. J. (2014). *Low-cost solar electric power*: Springer.
- Güngör, O. (2018a). *Fotovoltaik modüllerde maksimum güç takibi için dönüştürücü ve algoritmik yöntemlerin incelenmesi*. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya.
- Güngör, O. (2018b). Güneş panellerinde IC ve ANFIS tabanlı mppt algoritmalarının karşılaştırmalı performans analizi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 34(2), 50-59.
- Güngör, O. (2019). Güneş Panellerinde Cuk Dönüştürücü Tabanlı Değişken Şartlar Altında PNO, BM ve YSA Algoritmalarının Karşılaştırmalı Performans Analizi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6(1), 66-76.
- Güngör, O., & Hussaini, M. (2017). Uyarlamalı Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemi ve Bulanık Mantık Tabanlı MPPT Tasarımı ve Kıyaslanması. *EMO Bilimsel Dergi*, 7(14), 13-20.
- Güngör, O., Kahveci, H., & Gökçe, H. S. (2023). The effect of various industrial dust particles on the performance of photovoltaic panels in Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(6), 15128-15144.
- Hachicha, A. A., Al-Sawafta, I., & Said, Z. (2019). Impact of dust on the performance of solar photovoltaic (PV) systems under United Arab Emirates weather conditions. *Renewable Energy*, 141, 287-297.
- Hmidet, A., Subramaniam, U., Elavarasan, R. M., Raju, K., Diaz, M., Das, N., . . . Boubaker, O. (2021). Design of Efficient Off-Grid Solar Photovoltaic Water Pumping System Based on Improved Fractional Open Circuit Voltage MPPT Technique. *International Journal of photoenergy*, 2021(1), 4925433.

- Horoufiany, M., & Ghandehari, R. (2018). Optimization of the Sudoku based reconfiguration technique for PV arrays power enhancement under mutual shading conditions. *Solar Energy*, 159, 1037-1046.
- Ishaque, K., & Salam, Z. (2012). A deterministic particle swarm optimization maximum power point tracker for photovoltaic system under partial shading condition. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(8), 3195-3206.
- Ishaque, K., Salam, Z., Amjad, M., & Mekhilef, S. (2012). An improved particle swarm optimization (PSO)-based MPPT for PV with reduced steady-state oscillation. *IEEE transactions on Power Electronics*, 27(8), 3627-3638.
- Ishaque, K., Salam, Z., Shamsudin, A., & Amjad, M. (2012). A direct control based maximum power point tracking method for photovoltaic system under partial shading conditions using particle swarm optimization algorithm. *Applied Energy*, 99, 414-422.
- Jately, V., Azzopardi, B., Joshi, J., Sharma, A., & Arora, S. (2021). Experimental Analysis of hill-climbing MPPT algorithms under low irradiance levels. *Renewable and sustainable energy reviews*, 150, 111467.
- Jiang, L. L., Maskell, D. L., & Patra, J. C. (2013). A novel ant colony optimization-based maximum power point tracking for photovoltaic systems under partially shaded conditions. *Energy and Buildings*, 58, 227-236.
- Karagöz, M. K. (2021). *Design and implementation of the BAT algorithm based maximum power point tracker that able to manage partial shadow conditions for PV systems*.
- Kaushika, N. D., & Gautam, N. K. (2003). Energy yield simulations of interconnected solar PV arrays. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 18(1), 127-134.
- Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). *Particle swarm optimization*. Paper presented at the Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks.
- Killi, M., & Samanta, S. (2015). An adaptive voltage-sensor-based MPPT for photovoltaic systems with SEPIC converter including steady-state and drift analysis. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(12), 7609-7619.
- Killi, M., & Samanta, S. (2018). Voltage-sensor-based MPPT for stand-alone PV systems through voltage reference control. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 7(2), 1399-1407.
- Klugmann-Radziemska, E. (2015). Degradation of electrical performance of a crystalline photovoltaic module due to dust deposition in northern Poland. *Renewable Energy*, 78, 418-426.
- Koad, R. B., Zobaa, A. F., & El-Shahat, A. (2016). A novel MPPT algorithm based on particle swarm optimization for photovoltaic systems. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 8(2), 468-476.

- Krishna, S. G., & Moger, T. (2019). Optimal SuDoKu reconfiguration technique for total-cross-tied PV array to increase power output under non-uniform irradiance. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 34(4), 1973-1984.
- La Manna, D., Vigni, V. L., Sanseverino, E. R., Di Dio, V., & Romano, P. (2014). Reconfigurable electrical interconnection strategies for photovoltaic arrays: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 33, 412-426.
- Li, J., Wu, Y., Ma, S., Chen, M., Zhang, B., & Jiang, B. (2022). Analysis of photovoltaic array maximum power point tracking under uniform environment and partial shading condition: A review. *Energy Reports*, 8, 13235-13252.
- Loo, R., Knechtli, R., Kamath, G., Goldhammer, L., & Anspaugh, B. (1978). *Electron and proton degradation in/AlGa/As-GaAs solar cells*. Paper presented at the Photovoltaic Specialists Conference.
- Madhusudanan, G., Senthilkumar, S., Anand, I., & Sanjeevikumar, P. (2018). A shade dispersion scheme using Latin square arrangement to enhance power production in solar photovoltaic array under partial shading conditions. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 10(5).
- Mahdi, A., Mahamad, A., Saon, S., Tuwoso, T., Elmunsyah, H., & Mudjanarko, S. (2020). Maximum power point tracking using perturb and observe, fuzzy logic and ANFIS. *SN Applied Sciences*, 2(1), 89.
- Mertens, K. (2018). *Photovoltaics: fundamentals, technology, and practice*: John Wiley & Sons.
- Miyatake, M., Veerachary, M., Toriumi, F., Fujii, N., & Ko, H. (2011). Maximum power point tracking of multiple photovoltaic arrays: A PSO approach. *IEEE transactions on aerospace and electronic systems*, 47(1), 367-380.
- Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. (2003). *Power electronics: converters, applications, and design*: John wiley & sons.
- Mollahasanoglu, M., & Okumus, H. I. (2023). Performance evaluation of the designed two-axis solar tracking system for Trabzon. *IETE Journal of Research*, 69(8), 5338-5350.
- Motahhir, S. (2018). Contribution to the optimization of energy withdrawn from a PV panel using an Embedded System. *Available at SSRN 3804081*.
- Mousa, H. H., Youssef, A.-R., & Mohamed, E. E. (2021). State of the art perturb and observe MPPT algorithms based wind energy conversion systems: A technology review. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 126, 106598.
- Nayak, B., Mohapatra, A., & Mohanty, K. B. (2017). Selection criteria of dc-dc converter and control variable for MPPT of PV system utilized in heating and cooking applications. *Cogent Engineering*, 4(1), 1363357.

- Ngan, M. S., & Tan, C. W. (2011). *A study of maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems*. Paper presented at the 2011 IEEE applied power electronics colloquium (IAPEC).
- Nguyen, D., & Lehman, B. (2008a). An adaptive solar photovoltaic array using model-based reconfiguration algorithm. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(7), 2644-2654.
- Nguyen, D., & Lehman, B. (2008b). *A reconfigurable solar photovoltaic array under shadow conditions*. Paper presented at the 2008 Twenty-Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition.
- Özdemir, A., & Güngör, O. (2018). Güneş panellerinde hibrit ve YSA tabanlı algoritmalar ile güç takibi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(3), 258-266.
- Pillai, D. S., Ram, J. P., Nihanth, M. S. S., & Rajasekar, N. (2018). A simple, sensorless and fixed reconfiguration scheme for maximum power enhancement in PV systems. *Energy Conversion and Management*, 172, 402-417.
- PVPS Snapshot of Global PV Markets. (2023). Retrieved from International Energy Agency.
- PVPS Snapshot of Global PV Markets. (2024). Retrieved from International Energy Agency.
- Quaschnig, V. (2014). *Understanding renewable energy systems*: Routledge.
- Radjai, T., Rahmani, L., Mekhilef, S., & Gaubert, J. P. (2014). Implementation of a modified incremental conductance MPPT algorithm with direct control based on a fuzzy duty cycle change estimator using dSPACE. *Solar Energy*, 110, 325-337.
- Rani, B. I., Ilango, G. S., & Nagamani, C. (2013). Enhanced power generation from PV array under partial shading conditions by shade dispersion using Su Do Ku configuration. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 4(3), 594-601.
- Rashid, M. H. (2017). *Power electronics handbook*: Butterworth-heinemann.
- Rezazadeh, S., Moradzadeh, A., Pourhossein, K., Akrami, M., Mohammadi-Ivatloo, B., & Anvari-Moghaddam, A. (2022). Photovoltaic array reconfiguration under partial shading conditions for maximum power extraction: A state-of-the-art review and new solution method. *Energy Conversion and Management*, 258, 115468.
- Rezk, H., Mazen, A.-O., Gomaa, M. R., Tolba, M. A., Fathy, A., Abdelkareem, M. A., . . . Abou Hashema, M. (2019). A novel statistical performance evaluation of most modern optimization-based global MPPT techniques for partially shaded PV system. *Renewable and sustainable energy reviews*, 115, 109372.
- Salman, S., Ai, X., & Wu, Z. (2018). Design of a P-&O algorithm based MPPT charge controller for a stand-alone 200W PV system. *Protection and control of modern power systems*, 3(1), 1-8.

- Satpathy, P. R., Aljafari, B., & Thanikanti, S. B. (2022). Power losses mitigation through electrical reconfiguration in partial shading prone solar PV arrays. *Optik*, 259, 168973.
- Satpathy, P. R., & Sharma, R. (2019). Power and mismatch losses mitigation by a fixed electrical reconfiguration technique for partially shaded photovoltaic arrays. *Energy Conversion and Management*, 192, 52-70.
- Satterlee, C. (2017). IV Swinger 2 - a \$50 IV Curve Tracer. Retrieved from <https://www.instructables.com/IV-Swinger-2-a-50-IV-Curve-Tracer/>
- Selvan, S., & Nair, P. (2016). A Review on Photo Voltaic MPPT Algorithms. *International Journal of Electrical & Computer Engineering* (2088-8708), 6(2).
- Şahin, M. E. (2020). A photovoltaic powered electrolysis converter system with maximum power point tracking control. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(16), 9293-9304.
- Şahin, M. E., & Blaabjerg, F. (2022). PV powered hybrid energy storage system control using bidirectional and boost converters. *Electric Power Components and Systems*, 49(15), 1260-1277.
- Tao, H., Ghahremani, M., Ahmed, F. W., Jing, W., Nazir, M. S., & Ohshima, K. (2021). A novel MPPT controller in PV systems with hybrid whale optimization-PS algorithm based ANFIS under different conditions. *Control Engineering Practice*, 112, 104809.
- Teo, J., Tan, R. H., Mok, V., Ramachandramurthy, V. K., & Tan, C. (2018). Impact of partial shading on the PV characteristics and the maximum power of a photovoltaic string. *Energies*, 11(7), 1860.
- Tozlu, Ö. F., & Çalık, H. (2021). A review and classification of most used MPPT algorithms for photovoltaic systems. *Hittite Journal of Science and Engineering*, 8(3), 207-220.
- URL-1.(2024, Temmuz 11). Best Research - Cell Efficiency Chart: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> adresinden alınmıştır
- URL-2.(2024, Temmuz 12). Türkiye'nin Güneş Enerjisi Kurulu Gücü İlk Kez 12 Bin MW'ı Aştı: <https://enerji.gov.tr/> adresinden alınmıştır.
- Velasco-Quesada, G., Guinjoan-Gispert, F., Piqué-López, R., Román-Lumbreras, M., & Conesa-Roca, A. (2009). Electrical PV array reconfiguration strategy for energy extraction improvement in grid-connected PV systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(11), 4319-4331.
- Venkateswari, R., & Rajasekar, N. (2020). Power enhancement of PV system via physical array reconfiguration based Lo Shu technique. *Energy Conversion and Management*, 215, 112885.

- Vijayalekshmy, S., Bindu, G., & Iyer, S. R. (2016). A novel Zig-Zag scheme for power enhancement of partially shaded solar arrays. *Solar Energy*, 135, 92-102.
- Yadav, A. S., Pachauri, R. K., & Chauhan, Y. K. (2016). Comprehensive investigation of PV arrays with puzzle shade dispersion for improved performance. *Solar Energy*, 129, 256-285.
- Yadav, A. S., Pachauri, R. K., Chauhan, Y. K., Choudhury, S., & Singh, R. (2017). Performance enhancement of partially shaded PV array using novel shade dispersion effect on magic-square puzzle configuration. *Solar Energy*, 144, 780-797.
- Yaichi, M., Fellah, M.-K., & Mammeri, A. (2014). A neural network based MPPT technique controller for photovoltaic pumping system. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 4(2), 241.
- Yousri, D., Allam, D., & Eteiba, M. B. (2020). Optimal photovoltaic array reconfiguration for alleviating the partial shading influence based on a modified harris hawks optimizer. *Energy Conversion and Management*, 206, 112470.
- Yue, X., Geng, D., Chen, Q., Zheng, Y., Gao, G., & Xu, L. (2021). 2-D lookup table based MPPT: Another choice of improving the generating capacity of a wave power system. *Renewable Energy*, 179, 625-640.
- Zafar, M. H., Khan, N. M., Mirza, A. F., Mansoor, M., Akhtar, N., Qadir, M. U., . . . Moosavi, S. K. R. (2021). A novel meta-heuristic optimization algorithm based MPPT control technique for PV systems under complex partial shading condition. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47, 101367.
- Zhu, Z., Hou, M., Ding, L., Zhu, G., & Jin, Z. (2020). Optimal photovoltaic array dynamic reconfiguration strategy based on direct power evaluation. *IEEE Access*, 8, 210267-210276.

ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise eğitimini aynı şehirde tamamladı. 2014 yılında Süleyman Demirel Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2018 yılında Sakarya Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisansını tamamladı. 2019 yılında Bayburt Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokuluna Öğretim Görevlisi olarak atandı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında doktora çalışmasına başlamıştır.

