



T.C.

TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK – ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

**MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI TAKİP ALGORİTMALARINDA
DÖNÜŞTÜRME SÜRESİ VE ORTALAMA ALMA SAYISININ
PERFORMANS ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Salih Can DEMİRYÜREK

Danışman: Doç. Dr. Abdullah Hakan YAVUZ

TOKAT- 2024

ETİK SÖZLEŞME

Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç. Dr. Abdullah Hakan Yavuz danışmanlığında hazırlamış olduğum “MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI TAKİP ALGORİTMALARINDA DÖNÜŞTÜRME SÜRESİ VE ORTALAMA ALMA SAYISININ PERFORMANS ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ” adlı Yüksek Lisans tezinin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

21/08/2024

Tez Yazarı (Ad Soyad) İmza

Salih Can DEMİRYÜREK



TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında desteklerini esirgemedен yanımda olan sevgili aileme ve tez çalışmam boyunca her aşamada maddi manevi desteğini ve yardımını esirgemeyen değerli danışman hocam Doç. Dr. Öğr. Üyesi A. Hakan YAVUZ'a teşekkür ederim.



ÖZET

MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI TAKİP ALGORİTMALARINDA DÖNÜŞTÜRME SÜRESİ VE ORTALAMA ALMA SAYISININ PERFORMANS ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

DEMİRYÜREK, Salih Can

Yüksek Lisans, Elektrik – Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Abdullah Hakan YAVUZ

Ağustos 2024, xvi + 99 sayfa

Yenilenebilir enerji sistemlerinin verimliliğinin artırılması için maksimum güç noktasında (MPP) çalıştırılması gerekir. Maksimum Güç Noktası Takibi (MPPT) olarak isimlendirilen bu yöntem elektronik bir devre ve kontrolü sağlayan bir algorithmadan oluşmaktadır. Değiştir ve Gözle (P&O) ve artırılmış iletkenlik (INC) algoritmaları en yaygın olarak kullanılan, akım ve gerilim ölçümlerine dayanan MPPT algoritmalarıdır. Bu çalışmada klasik MPPT algoritmalarında ölçüm doğruluğunu etkileyen ortalama alma sayıları ve dönüştürme sürelerinin algoritmaların performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Termoelektrik jeneratörler kullanılarak benzetim çalışması, solar paneller kullanılarak deneysel çalışmalar yapılmıştır. Ortalama alma sayısı ve dönüştürme süresi arttıkça dalgalanma faktörünün azaldığı ancak maksimum noktaya ulaşma sürelerinin arttığı görülmüştür. P&O algoritmasında ortalama alma sayıları ve dönüştürme süreleri artırıldığında gücün minimum değerinde azalma gözlemlenirken INC algoritmasında artış meydana gelmektedir. 1.1 ms dönüştürme süresinde P&O algoritmasında 64/128/256 ortalama alma sayıları için minimum güç sırasıyla 8.3/8.0/7.7 W olarak ölçülürken, INC algoritması için 7.5/7.75/7.8 W değerleri ölçülmüştür. 2.116 ms dönüştürme süresinde aynı durum tespit edilmiştir. P&O ve INC algoritmaları için MPP’de ortalama güç değerleri hesaplanmıştır. Her iki algoritma için tüm dönüştürme sürelerinde 128 ortalama alma sayısı için ortalama güç daha büyük hesaplanmıştır. P&O algoritması için 1.1 ms dönüştürme süresinde 64/128/256 ortalama alma sayıları için ortalama güç 12.005/12.007/11.99 W olarak hesaplanırken, INC algoritması için 11.70/11.78/11.78 W hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yenilenebilir enerji, enerji verimliliği, maksimum güç noktası takip algoritmaları, ortalama alma sayısı, dönüştürme süresi

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CONVERSION TIME AND AVERAGE NUMBER ON PERFORMANCE IN MAXIMUM POWER POINT TRACKING ALGORITHMS

Demiryürek, Salih Can

Master's Thesis, Electrical and Electronics Engineering

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Abdullah Hakan Yavuz

August 2024, xvi + 99 pages

In order to increase the efficiency of renewable energy systems, they need to be operated at maximum power point (MPP). This method, called Maximum Power Point Tracking (MPPT), consists of an electronic circuit and an algorithm that provides control. Switch and Observe (P&O) and Increased Conductance (INC) algorithms are the most widely used MPPT algorithms based on current and voltage measurements. In this study, the effects of averaging numbers and conversion times, which affect the measurement accuracy in classical MPPT algorithms, on the performance of the algorithms were investigated. A simulation study was conducted using thermoelectric generators and experimental studies were conducted using solar panels. It was observed that the ripple factor decreased as the averaging number and conversion time increased, but the times to reach the maximum point increased. While the averaging numbers and conversion times were increased in the P&O algorithm, a decrease in the minimum value of the power was observed, while an increase occurred in the INC algorithm. The minimum power for 64/128/256 averaging numbers in the P&O algorithm at a conversion time of 1.1 ms was measured as 8.3/8.0/7.7 W, respectively, while for the INC algorithm it was 7.5/7.75/7.8 W. The same situation was observed at a conversion time of 2,116 ms. The average power values were calculated in MPP for the P&O and INC algorithms. The average power was calculated greater for 128 averaging numbers in all conversion times for both algorithms. The average power for 64/128/256 averaging numbers in the P&O algorithm at a conversion time of 1.1 ms was calculated as 12.005/12.007/11.99 W, while for the INC algorithm it was 11.70/11.78/11.78 W.

Keywords: Renewable energy, energy efficiency, maximum power point tracking algorithms, averaging number, conversion time

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ETİK SÖZLEŞME.....	i
JÜRİ KABUL VE ONAY	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
TABLolar LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
SİMGE VE KISALTMALAR.....	xiv
KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE LİTERATÜR ÖZETLER	
2.1. Kuramsal Temeller	4
2.1.1. Termoelektrik.....	4
2.1.2. Termoelektrik Jeneratörler.....	7
2.1.3. MPPT Algoritmaları	11
2.2. Literatür Özetleri.....	14
3. MATERYAL VE YÖNTEM	
3.1. Materyal	19
3.1.1. TEJ Modellemesi	19

3.1.2. DA-DA Dönüştürücü Modellemesi	22
3.1.3. Maksimum Güç Noktası Takibi (MPPT).....	27
3.2. Yöntem.....	35
3.1.4. Tasarımı Gerçekleştirilen Devre	35
3.1.5. Deney Düzeneği.....	42
3.1.6. Performans Kriterleri	44
 4. BULGULAR VE TARTIŞMA	
4.1. Matlab/Simulink ile Elde Edilen Bulgular.....	52
4.1.1. Matlab/Simulink ile MPPT Yokken Elde Edilen Bulgular	52
4.1.2. Matlab/Simulink ile P&O algoritmali MPPT Bulguları	54
4.1.3. Matlab/Simulink ile Artan İletkenlik Algoritmali MPPT Bulguları.....	59
4.2. Uygulama Devresi ile P&O ve INC algoritmali MPPT Bulguları	62
 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	90
Kaynaklar	97
Özgeçmiş	100

TABLÖLER LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1. Bir TEJ'in katalog değerleri	19
Tablo 3.2. INA 226 modülüne ait veri adresleri, isimleri, tipleri ve değerleri	39
Tablo 3.3. Devrede kullanılan bazı ekipmanlar	41
Tablo 3.4. Deney düzeneğine ait modüllerin bilgileri	42
Tablo 3.5. Zamana bağlı yük direnci değerleri	45
Tablo 3.6. Ortalama alma sayısı, dönüştürme süresi ve algoritma türlerine göre deney başlangıçlarında kaydedilen sıcaklık değerleri ve deney numaraları	47
Tablo 4.1. TEJ modülünden yük dirençlerine göre elde edilen akım, gerilim ve güç değerleri	54
Tablo 4.2. MPPT'li devrenin giriş ve çıkışındaki anlık akım, gerilim ve güç değerleri	58
Tablo 4.3. MPPT'siz devrede yük dirençlerine göre elde edilen verim değerleri	58
Tablo 4.4. Yük direncine göre devrenin giriş ve çıkışına ait anlık akım, gerilim ve güç değerleri	61
Tablo 4.5. Ortalama alma sayısı 64 iken 1.1 ms ve 2.116 ms için direnç değerlerine göre INC algoritması için MPP'deki ortalama güç (W) değerleri	80
Tablo 4.6. INC algoritmasında ortalama alma sayısı 64 iken 1.1 ms ve 2.116 ms için direnç değerlerine göre MPP'deki dalgalanma yüzdeleri	81
Tablo 4.7. INC algoritması için 64 ortalama alma sayısında dönüşüm sürelerine göre MPP'ye ulaşma zamanları (sn)	82
Tablo 4.8. Ortalama alma sayısı 64 iken 1.1 ms ve 2.116 ms için direnç değerlerine göre P&O algoritması için MPP'deki ortalama güç (W) değerleri	83
Tablo 4.9. P&O algoritmasında ortalama alma sayısı 64 iken 1.1 ms ve 2.116 ms için direnç değerlerine göre MPP'deki dalgalanma yüzdeleri	84
Tablo 4.10. P&O algoritması için 64 ortalama alma sayısında dönüşüm sürelerine göre MPP'ye ulaşma zamanları (sn)	85
Tablo 5.1. P&O algoritmasında 1.1 ms için çıkış direnci değerleri ve ortalama alma sayılarına göre P_{min} (W) değerleri	90
Tablo 5.2. P&O algoritmasında 2.116 ms için çıkış direnci değerleri ve ortalama alma sayılarına göre P_{min} (W) değerleri	90
Tablo 5.3. INC algoritmasında 1.1 ms için çıkış direnci değerleri ve ortalama alma sayılarına göre P_{min} (W) değerleri	90
Tablo 5.4. INC algoritmasında 2.116 ms için çıkış direnci değerleri ve ortalama alma sayılarına göre P_{min} (W) değerleri	91

Tablo 5.5. P&O algoritmasında 1.1 ms için çıkış direnci değerleri ve ortalama alma sayılarına göre MPP'ye ulaşma süreleri (sn)	91
Tablo 5.6. P&O algoritmasında 2.116 ms için çıkış direnci değerleri ve ortalama alma sayılarına göre MPP'ye ulaşma süreleri (sn)	91
Tablo 5.7. INC algoritmasında 1.1 ms için çıkış direnci değerleri ve ortalama alma sayılarına göre MPP'ye ulaşma süreleri (sn)	92
Tablo 5.8. INC algoritmasında 2.116 ms için çıkış direnci değerleri ve ortalama alma sayılarına göre MPP'ye ulaşma süreleri (sn)	92
Tablo 5.9. P&O algoritmasında 1.1 ms için çıkış direnci değerleri ve ortalama alma sayılarına göre ortalama güç (W) değerleri	93
Tablo 5.10. P&O algoritmasında 2.116 ms için çıkış direnci değerleri ve ortalama alma sayılarına göre ortalama güç (W) değerleri.....	93
Tablo 5.11. INC algoritmasında 1.1 ms için çıkış direnci değerleri ve ortalama alma sayılarına göre ortalama güç (W) değerleri	93
Tablo 5.12. INC algoritmasında 2.116 ms için çıkış direnci değerleri ve ortalama alma sayılarına göre ortalama güç (W) değerleri.....	93
Tablo 5.13. P&O algoritmasında 1.1 ms için çıkış direnci değerleri ve ortalama alma sayılarına göre dalgalanma faktörü değerleri.....	94
Tablo 5.14. P&O algoritmasında 2.116 ms için çıkış direnci değerleri ve ortalama alma sayılarına göre dalgalanma faktörü değerleri.....	94
Tablo 5.15. INC algoritmasında 1.1 ms için çıkış direnci değerleri ve ortalama alma sayılarına göre MPP'ye ulaşma süreleri (sn)	94
Tablo 5.16. INC algoritmasında 2.116 ms için çıkış direnci değerleri ve ortalama alma sayılarına göre MPP'ye ulaşma süreleri (sn)	95
Tablo 5.17. Yapılan 12 ayrı deney için toplamda elde edilen süreler ve algoritma türleri arasında oluşan süre farkları (sn)	95

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Seeback Etkisi Şematik Gösterim (teknoloji.org, 2024)	4
Şekil 2.2: Seebeck etkisiyle oluşan elektron yoğunlukları (elektrikport.com, 2024)	5
Şekil 2.3: Peltier etkisi(teknoloji.org).....	6
Şekil 2.4: Elektrik enerjisinin ısı enerjisine dönüşümü (elektrikport.com, 2024)	7
Şekil 2.5: Termoelement şeması.....	8
Şekil 2.6: Termoelektrik modülün generatör şeması (Ahıska ve Mamur, 2014)	8
Şekil 2.7: Termoelektrik Modül (Mamur, 2020)	9
Şekil 2.8: TEJ modülün eşdeğer devresi (Mamur ve Çoban, 2020)	10
Şekil 3.1: TEJ modülün Matlab modellemesi.....	20
Şekil 3.2: Modül içerisindeki sıcaklık farkı ve iç direnç hesabının gösterimi.....	21
Şekil 3.3: TEJ modülün çıkış gerilim ve akım ölçüm noktaları	21
Şekil 3.4: DA-DA yükseltici dönüştürücünün Matlab ile modellenmesi	22
Şekil 3.5: MPP için tetikleme ve doluluk oranı modellemesi.....	23
Şekil 3.6: Duty ve pwm oluşturmak için kullanılan modelin iç yapısı.....	23
Şekil 3.7: Giriş akım, gerilim ve güç değerlerinin gösterimi.....	24
Şekil 3.8: Modül içerisinde akım gerilim ve güç değerlerinin gösterimi	24
Şekil 3.9: Değişken direnç modeli	25
Şekil 3.10: Değişken direnç modelinin iç yapısı	25
Şekil 3.11: MPPT sistemine ait modellemenin genel şeması	26
Şekil 3.12: TEJ modülün eşdeğer devresi (Montecucco, 2014)	28
Şekil 3.13: TEJ modüle ait P-V karakteristik eğrisi	29
Şekil 3.14: P&O Algoritması akış diyagramı	31
Şekil 3.15: P-V güç eğrisinde eğimin belirtilen noktalara göre durumları	32
Şekil 3.16: Artımsal iletkenlik algoritması akış diyagramı	34
Şekil 3.17: Uygulama Devresi	36
Şekil 3.18: a) Pic 16f876a mikrodenetleyici entegresi b) 16f876a giriş çıkış pin diyagramı	37
Şekil 3.19: INA 226 akım gerilim ve güç modülü.....	37
Şekil 3.20: INA 226 modülünün blok diyagramı	38

Şekil 3.21: Devrede kullanılan fonksiyon butonları	40
Şekil 3.22: 2x16 LCD Ekran.....	40
Şekil 3.23: Irfp260n Mosfet Bağlantı uçları ve akım gerilim değerleri.....	41
Şekil 3.24: Panelin ışıyım miktarını değiştirmek için kullanılan UV lambaya ait ayar potu	42
Şekil 3.25: Deney düzeneğinin genel bir görüntüsü	43
Şekil 3.26: UV lamba ve Fotovoltaik Panel	44
Şekil 3.27: Zamana göre uygulanan direnç değerleri	46
Şekil 3.28: Deneylerdeki yük direnci değişimleri	48
Şekil 3.29: Dönüşüm sürelerine göre sinyal durumları	49
Şekil 3.30: P-V karakteristik eğrisi.....	49
Şekil 4.1: Değişken yüke göre seri ve paralel bağlantılı TEJ modül grubu modeli	52
Şekil 4.2: TEJ modül grubunun çıkış yük dirençlerine göre çıkış güç değerleri.....	53
Şekil 4.3: P&O algoritmaları ile yapılan Matlab modellemesi.....	54
Şekil 4.4: Görev döngüsün değişimi.....	55
Şekil 4.5: P&O algoritması sonucu oluşan PWM tetikleme değişimi.....	56
Şekil 4.6: Modelleme sonucu oluşan D'nin grafiği	57
Şekil 4.7: P&O algoritmasına göre MPPT giriş ve çıkış grafikleri	59
Şekil 4.8: INC algoritmali MPPT devresi çıkış akım, gerilim ve güç grafikleri	60
Şekil 4.9: P&O ve INC algoritmalarına göre elde edilen çıkış güçleri grafiği.....	62
Şekil 4.10: P&O algoritması 64 ortalama alma sayısı ve 1.1 ms dönüştürme süresi için gerilim ve akım osiloskop görüntüsü.....	63
Şekil 4.11: INC algoritması 64 ortalama alma sayısı ve 1.1 ms dönüştürme süresi için osiloskop görüntüsü	64
Şekil 4.12: P&O algoritmasına göre 64 ortalama alma sayısı ve 2.116 ms dönüştürme süresi için osiloskop gerilim ve akım görünümü	64
Şekil 4.13: INC algoritmasına göre 64 ortalama alma sayısı ve 2.116 ms dönüştürme süresi için osiloskop gerilim ve akım görünümü	65
Şekil 4.14: INC algoritması 128 ortalama alma sayısı ve 1.1 ms dönüştürme süresi için gerilim ve akıma ait osiloskop görüntüsü	65
Şekil 4.15: P&O algoritması 128 ortalama alma sayısı ve 1.1 ms dönüştürme süresi için gerilim ve akıma ait osiloskop görüntüsü	66
Şekil 4.16: P&O algoritması için devreden alınan verilerine göre 64 ortalama alma sayısı ve 1.1 ms dönüştürme süresi için filtrelenmiş güç grafiği.....	67

Şekil 4.17: INC algoritması için devreden alınan verilerine göre 64 ortalama alma sayısı ve 1.1 ms dönüştürme süresi için filtrelenmiş güç grafiği.....	67
Şekil 4.18: INC algoritması uygulama devresinden alınan verilere göre 128 ortalama alma sayısı ve 1.1 ms dönüştürme süresi için güce ait grafik.....	70
Şekil 4.19: P&O algoritması uygulama devresinden alınan verilere göre 128 ortalama alma sayısı ve 1.1 ms dönüştürme süresi için güce ait grafik.....	70
Şekil 4.20: P&O algoritması uygulama devresinden alınan verilere göre 128 ortalama alma sayısı ve 2.116 ms dönüştürme süresi için güce ait grafik.....	71
Şekil 4.21: INC algoritması uygulama devresinden alınan verilere göre 128 ortalama alma sayısı ve 2.116 ms dönüştürme süresi için güce ait grafik.....	72
Şekil 4.22: INC algoritmasına göre devre üzerinden alınan verilere göre 64 ortalama alma sayısı ve 2.116 ms dönüştürme süresi için güç değişim grafiği.....	73
Şekil 4.23: P&O algoritmasına göre devre üzerinden alınan verilere göre 64 ortalama alma sayısı ve 2.116 ms dönüştürme süresi için güç değişim grafiği.....	73
Şekil 4.24: P&O algoritmasına göre tüm ortalama alma sayıları için 25 Ω 'dan 50 Ω 'a değişiminde elde edilen güç grafikleri.....	74
Şekil 4.25: INC algoritmasına göre tüm ortalama alma sayıları için 25 Ω 'dan 50 Ω 'a değişiminde elde edilen güç grafikleri.....	75
Şekil 4.26: INC ve P&O algoritmaları için devre üzerinden alınan verilere göre 64 ortalama alma sayısı ve 1.1 ms dönüştürme süresine göre 25 Ω 'dan 50 Ω 'a güç değişim grafiği	76
Şekil 4.27: Dönüşüm süresi 2.116 ve 64, 128, 256 ortalama alma sayıları için P&O algoritmasına göre 50 Ω 'dan 75 Ω 'a olan değişim grafiği	77
Şekil 4.28: Dönüşüm süresi 2.116 ve 64, 128, 256 ortalama alma sayıları için P&O algoritmasına göre 50 Ω 'dan 75 Ω 'a olan değişim grafiği	77
Şekil 4.29: INC ve P&O algoritması 64 ortalama alma sayısı ve 1.1 ms dönüşüm süresi için 50 Ω 'dan 75 Ω 'a olan güç değişimi	78
Şekil 4.30: INC ve P&O algoritması 64 ortalama alma sayısı ve 2.116 ms dönüşüm süresi için 50 Ω 'dan 75 Ω 'a olan güç değişimi	79
Şekil 4.31: INC algoritması uygulama devresinden alınan verilere göre 64 ortalama alma sayısı, 1.1 ms ve 2.116 ms dönüştürme süreleri için güce ait grafikler	80
Şekil 4.32: INC algoritması uygulama devresinden alınan verilere göre 64 ortalama alma sayısı 1.1 ms ve 2.116 ms dönüştürme süreleri için direnç değişim anlarında güce ait grafikler	82
Şekil 4.33: P&O algoritmasında uygulama devresinden alınan verilere göre 64 ortalama alma sayısı, 1.1 ms ve 2.116 ms dönüştürme süreleri için güce ait grafikler.....	83

Şekil 4.34: P&O algoritması uygulama devresinden alınan verilere göre 64 ortalama alma sayısı, 1.1 ms ve 2.116 ms dönüştürme süreleri için direnç değişim anlarında güce ait grafikler	85
Şekil 4.35: INC ve P&O algoritması 128 ortalama alma sayısı ve 1.1 ms dönüşüm süresi için 25 Ω 'dan 50 Ω 'a olan güç değişimi	86
Şekil 4.36: INC ve P&O algoritması 128 ortalama alma sayısı ve 2.116 ms dönüşüm süresi için 25 Ω dan 50 Ω a olan güç değişimi	87
Şekil 4.37: INC ve P&O algoritması 128 ortalama alma sayısı ve 1.1 ms dönüşüm süresi için 50 Ω 'dan 75 Ω 'a olan güç değişimi	88
Şekil 4.38: INC ve P&O algoritması 128 ortalama alma sayısı ve 2.116 ms dönüşüm süresi için 50 Ω 'dan 75 Ω 'a olan güç değişimi	88



SİMGE VE KISALTMALAR

SİMGELER

V:	Volt
ΔT :	Sıcaklık Farkı
α :	Seebeck Katsayısı
q:	Birim zamanda üretilen ısı miktarı
π :	Peltier katsayısı
I:	Akım (A)
Q_T :	Thomson ısısı
τ :	Thomson katsayısı
T_h :	Sıcak yüzey sıcaklığı
T_c :	Soğuk yüzey sıcaklığı
Q_h :	Sıcak yüzeydeki ısı akışı
Q_c :	Soğuk yüzeydeki ısı akışı
$R_{iç}$:	İç direnç
K:	Termal iletkenlik
P:	Güç(Watt)
R_L :	Yük direnci
V_{OC} :	Açık devre voltajı
N:	Termoelement sayısı
I_{SC} :	Kısa devre akımı
Ω :	Ohm(Elektrik direnç birimi)

$R_{i\dot{C}}$:	İç direnç
C:	Derece santigrad
μs :	Mikrosaniye
ms:	Milisaniye
kHz:	Kilohertz
m:	Eğim
w:	Görev çevrimi değişim oranı

KISALTMALAR

IEA : Uluslararası Uzay Ajansı

TEJ : Termoelektrik Jeneratörler

RTG : Radyoizotop Termoelektrik Jeneratörler

SNAP : Systems Nuclear Auxiliary Power

MPPT : Maksimum Güç Noktası Takibi

P&O : Değişir Gözetle

INC : Artan İletkenlik

PSO : Parçacık Sürüşü optimizasyonu

GD-MPPT : Güç Diferansiyeli Maksimum Güç Noktası Takibi

MPP : Maksimum Güç Noktası

YSA : Yapay sinir ağları

DA : Doğru Akım

PWM : Pulse-Width-Modulation

D : Duty

FV : Fotovoltaik

UV : Ultraviyole

1. GİRİŞ

Dünyada artan nüfus yoğunluğu, finansal gelişmeler, teknolojik gelişmeler ve giderek artan yaşam standartları kaydedilir bir şekilde elektrik enerjisine olan talebi artırmıştır. 2040 yılına kadar enerji ihtiyacının %40 artacağı öngörülmektedir (Yavuz, 2020). Mevcut enerji ihtiyacının büyük bir bölümü doğal gaz, kömür ve petrol gibi fosil yakıtlardan sağlandığı için sera gazı salınımlarının artmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle sera gazı salınımlarındaki artış ortam sıcaklığının artmasına sebep olarak iklim şartlarını olumsuz etkilemektedir. Küresel ısınma olarak isimlendirilen bu sıcaklık artışına enerji üretiminde kullanılan kaynakların yanında ormanların yok edilmesi, hayvancılık ve çiftçilik gibi endüstrileşen sektörlerin artması sonucu oluşan kimyasal atıklar ve tüketim alışkanlıkları sebep olmaktadır. Özellikle fosil yakıtlar bu etkinin oluşmasında önemli bir yer tutmaktadır. Endüstrinin gelişimine paralel olarak enerjiye olan ihtiyacın artması ve buna bağlı olarak küresel ısınmadaki artış, insanları daha temiz enerji kaynaklarını kullanmaya sevk etmiştir (Thankakan ve ark., 2021).

Rüzgâr, güneş, hidro, jeotermal ve biyokütle gibi yenilenebilir enerji kaynakları enerji talebini karşılamada kritik bir role sahiptir. Ülkelerin gelecekteki güvenliği açısından enerji ihtiyacı ve bu ihtiyacı karşılama yöntemleri önem arz etmektedir. Fosil yakıtların kullanımının azalması sera gazı salınımlarının azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA) raporuna göre enerji sektörü, dünya genelinde sera gazı salınımlarının dörtte üçünden sorumludur.

2050 yılına kadar CO₂ emisyonlarının sıfıra indirilmesi için planlar yapılmaktadır (Tohidi ve ark., 2022). Kyoto Protokolünde “Yeni ve yenilenebilir enerji türleri, karbondioksiti gideren teknolojiler ile çevre dostu ileri ve yenilikçi teknolojilerin araştırılmaları, teşvik edilmeleri, geliştirilmeleri ve kullanımlarının arttırılması” maddesi ile taraf ülkelerin planlar hazırlamaları zorunlu kılınmıştır (Kyoto Protokolü, 1998, s. 4). Yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemli dezavantajı verimliliklerinin düşük olmasıdır. Bu nedenle yenilenebilir enerji sistemleri üzerinde yapılan çalışmaların çoğu mevcut sistemlerin verimliliklerinin artırılması ve yeni enerji kaynaklarının kullanımına yöneliktir. Verimleri düşük olmasına rağmen yenilenebilir enerji kaynaklarına olan talep giderek artmaktadır.

Endüstriyel süreçlerde kullanılan enerjinin %90'ından fazlası termal prosesler içermektedir. Aynı zamanda termal işlemler neticesinde sadece üçte biri proste faydalı iş olarak kullanılırken geri kalan kısmı atık ısı olarak atılmaktadır. Atık ısıların geri kazanımı enerji taleplerinin arttığı bu yüzyılda önemli katkı sağlayacaktır (Zhao ve ark., 2021). Son yıllarda araştırmacılar güneş ve jeotermal gibi doğal, otomobil egzoz gazı ve baca gazı gibi termal prosesler neticesinde ortaya çıkan, radyoaktif bozunum ve nükleer tepkime sonucu ortaya çıkan, toprak-hava sıcaklık farkı ve insan vücudu gibi küçük ölçekli ısı kaynaklarının geri kazanımına yönelik çalışmalara hız vermişlerdir. Bu amaca yönelik olarak araştırmacılar ısı enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çevirebilen Termoelektrik Jeneratörler (TEJ) üzerinde yoğunlaşmaktadırlar.

TEJ'ler yüzeyler arasında sıcaklık farkı meydana geldiğinde Seebeck etkisini kullanarak elektromotor kuvveti üretebilen ısı pompalarıdır. TEJ'lerin ilgi odağı olmasının sebebi, ek bir elemana ihtiyaç duymadan doğrudan enerji dönüşümüne imkân tanınması, hareketli parçalarının olmaması, güvenilir ve ölçeklenebilir olması, elektronik olarak kontrol edilebilmesi gibi özellikleridir. TEJ'lerin verimlilikleri düşük olmasına rağmen atık ısı ve uzay araçları gibi verimliliğin ikinci planda olduğu uygulamalar için uygun bir teknolojidir (Tohidi ve ark., 2022). TEJ'ler ısı enerjisini kullanarak enerji dönüşümünü gerçekleştirdiği için TEJ'lerin kullanım alanları da bu ısı kaynaklarına bağlı olarak gelişmiştir (Zoui ve ark., 2020a).

TEJ'lerin verimleri yüke bağlı olarak değişir. Maksimum güç transferi sağlamanın şartı jeneratör iç direncinin yük direncine eşit olmasıdır. Bu şart sağlandığında verimin maksimum olabilmesi termoelektrik malzemenin Kalite Faktörü, (Figure-Of-Merit), yüzeyler arasındaki sıcaklık farkı ve ortalama sıcaklık değerine bağlı olarak değişmektedir. Kalite faktörü üretim esnasında kullanılan malzemelerin özelliklerine bağlıdır (Yavuz, 2020). Sıcaklık farkının artırılması ısı transfer sistemlerinin performansına bağlı olup aktif veya pasif soğutma sistemleri gibi ya da nano akışkanlar gibi maddeler kullanılan çalışmalar yapılmaktadır (Li ve ark., 2017). Ancak elektriksel olarak verimin maksimum noktada tutulması için mikrodenetleyici tabanlı sistemler ile kontrol edilen DA-DA dönüştürücüler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemin temel

amacı gücü darbe genişlik modülasyonu (PWM) sinyallerinin doluluk oranlarını kontrol ederek en kısa sürede maksimize etmek ve en az salınım ile maksimum noktada tutabilmektir (Mamur ve Çoban, 2020).

DA-DA dönüştürücü kullanılarak uygulanan klasik MPPT algoritmalarında akım ve gerilim sinyallerinin ölçümleri sistem performansı üzerinde etkilidir. Ölçüm doğruluğu açısından ortalama alma sayısı ve dönüştürme süresi önemli iki parametre iken gürültü bileşenlerinin azaltılması önemlidir. Analog Dijital Dönüştürücülerde (ADC) ortalama alma özelliği sinyali etkili bir şekilde filtreleyerek ölçüm doğruluğunu önemli ölçüde artırabilir. Bu yaklaşım sinyal üzerinde gürültüden kaynaklanabilecek her türlü etkiyi azaltabilir. Dönüştürme sürelerinin de ölçüm doğruluğu üzerinde etkisi olabilir. Dönüştürme sürelerinin ölçüm üzerindeki etkisinin incelenmesi ve değerlendirilmesi gerekir. Aynı zamanda dönüştürme süresi ve ortalama alma sayısı birbirinden bağımsız düşünülemez ve etkileşimlidir. Çünkü ortalama alma sayılarının artması ölçme sürelerinin de artması anlamına gelmektedir. Literatürde klasik MPPT algoritmalarında dönüştürme süresi ve ortalama alma sayılarının etki değerlendirmesi ve optimizasyonu ile ilgili bir çalışma bulunmamaktadır.

Bu tez çalışmasında dönüştürme süresi ve ortalama alma sayılarının MPPT algoritmalarının performansı üzerindeki etkilerini incelemek üzere deneysel çalışmalar yapılmış ve etki analizleri ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

Bu tez çalışması beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm olan “Giriş” bölümünde tezin amacı ve içeriğine ait genel bilgilere yer verilmiştir. İkinci bölümde termoelektrik teknoloji ve maksimum güç noktası takip algoritmaları konusunda genel bilgilere yer verilmiştir. Üçüncü bölüm olan “Materyal ve Yöntem” bölümünde ise çalışmada kullanılan algoritmalar, modellemelerden bahsedilmiştir. Dördüncü bölüm “Bulgular ve Tartışma” da kullanılan veriler değerlendirilmiş ve tartışılmıştır. Beşinci ve son bölümde ise çalışmanın sonuçları ortaya konulmuş ve gelecek çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

2. KURAMSAL TEMELLER VE LİTERATÜR ÖZETLERİ

Bu bölümde termoelektrik ve maksimum güç noktası takibi algoritmaları ile ilgili genel bilgiler verilmiş olup ısı kaynaklarına bağlı olarak termoelektrik ve MPPT ile yapılan örnek çalışmalar yer almaktadır.

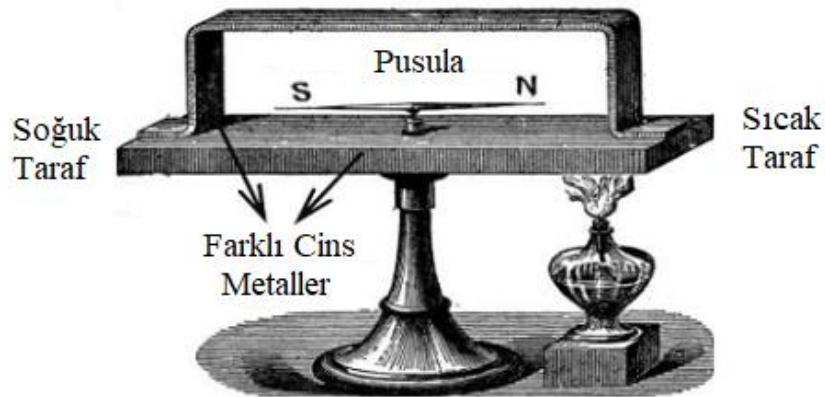
2.1. Kuramsal Temeller

2.1.1. Termoelektrik

Isı ve elektrik enerjilerinin doğrudan birbirine dönüşümünü inceleyen bilim dalı termoelektrik olarak isimlendirilmektedir. Termoelektrik etki ise ısı enerjisinin elektrik enerjisine ya da elektrik enerjisinin ısı enerjisine dönüşümü olarak tanımlanmaktadır. Bu etki sayesinde elektrik enerjisi üretimi, malzemelerin sıcaklıklarının değiştirilmesi ve sıcaklık ölçümleri sağlanmaktadır. Termoelektrik etkiler Seebeck etkisi, Peltier etkisi ve Thomson etkisi olmak üzere üç etkiyle açıklanmaktadır.

Seebeck Etkisi

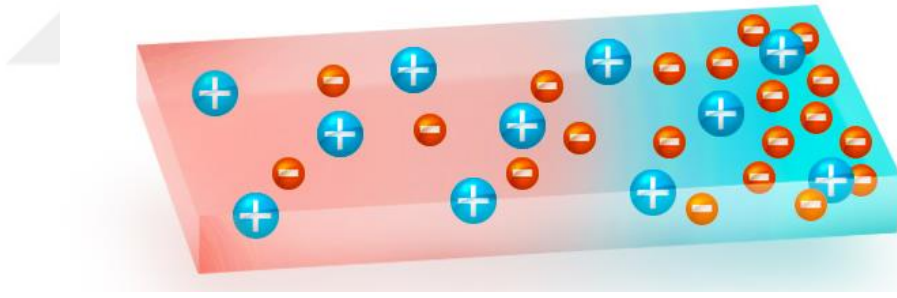
1821 yılında Alman fizikçi Thomas J. Seebeck tarafından keşfedilmiş bir etkidir. Seebeck iki farklı metali uçlarından birleştirerek bir düzenek hazırlamıştır. Düzenek Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Seebeck Etkisi Şematik Gösterim (teknoloji.org, 2024)

Şekil 2.1’de gösterildiği gibi kapalı bir devre olan bu düzende Seebeck farklı cins iki metalin birleştirildiği uçların tek tarafından ısıtıldığında devrenin ortasında bulunan pusulada sıcaklığın etkisiyle bir sapmanın olduğunu fark etmiştir. Seebeck deneyi farklı sıcaklıklarda tekrarladığında pusulanın farklı oranlarda hareket ettiğini görmüştür. Buradan yola çıkılarak oluşan elektrik akımından dolayı bir elektrik alanının oluştuğu, bu alanın etkisiyle pusulanın hareket ettiği ve sıcaklık farkından dolayı elektrik gerilimi oluştuğu belirtilmiş olup bu etkiye Seebeck etkisi, oluşan gerilime de Seebeck voltajı denilmiştir.

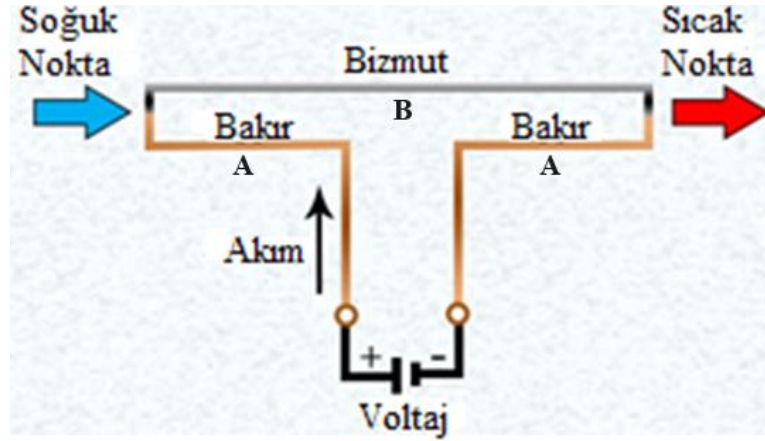
Seebeck voltajı birbirinden farklı bu iki metaldeki serbest elektron yoğunluğunun farklılığından kaynaklanmaktadır. Uçlar arasındaki sıcaklık farkından dolayı elektronların sıcak uçtan soğuk uca doğru hareketi Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Bu nedenle sıcak uç ile soğuk uç arasında bir potansiyel fark oluşmaktadır.



Şekil 2.2. Seebeck etkisiyle oluşan elektron yoğunlukları (elektrikport.com, 2024)

Peltier Etkisi

1834 yılında Fransız fizikçi Charles Peltier iki farklı iletkenin birleştirilmesiyle oluşturulan bir halkadan elektrik akımının geçirilmesiyle iletkenin birleşim noktalarından birinin ısınırken diğerrinin soğuduğunu keşfetmiştir. Peltier etkisi olarak isimlendirilen bu olaya elektronların hareketi sebep olmaktadır ve bu sayede oluşan sıcak ve soğuk yüzeyler Şekil 2.3’te gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Peltier etkisi (teknoloji.org, 2024)

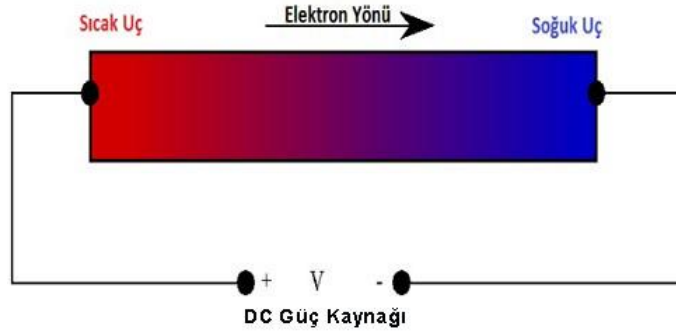
Bir eklemde üretilen ısı miktarı Eşitlik 2.1. ile hesaplanmaktadır.

$$q = (\pi_A - \pi_B) I \quad (2.1)$$

Burada, q bir eklemde birim zamanda üretilen ısı miktarı, π_A ve π_B , A ve B iletkenlerinin Peltier etkisi, I ise A ve B iletkenleri arasındaki akım değerini ifade etmektedir. Peltier katsayısını amper/watt olarak ifadesi Eşitlik 2.2.'de verilmiştir (Aykara 2016).

$$\pi = I / q \quad (2.2)$$

Peltier etkisi, Seebeck etkisinin tersi şeklinde oluşan bir etkidir. Bu etki ile elektrik enerjisi ısı enerjisine dönüştürülmektedir. Peltier etkisine göre ısınan ve soğuyan yüzeyler Şekil 2.4'te gösterilmiştir. Burada hangi yüzeyin ısınıp hangi yüzeyin soğuyacağı elektronların yönüne bağlı olarak değişmektedir. Enerji dönüşüm miktarı ise iletken üzerinden geçirilen akımın yoğunluğu ile doğru orantılı olarak değişmektedir.



Şekil 2.4. Elektrik enerjisinin ısı enerjisine dönüşümü (elektrikport.com, 2024)

Thomson Etkisi

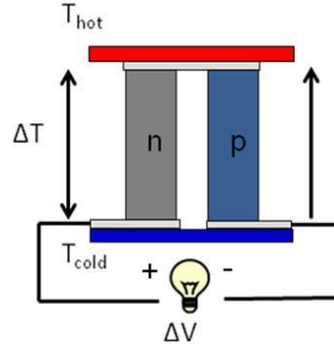
W. Thomson termoelektrik etkilerin üçüncüsünü 1851 yılında keşfetmiştir. Thomson homojen bir iletkenin uçlarını farklı sıcaklıklarda tutarak bu iletkenin bir akım geçirdiğinde akım yönüne bağlı olarak iletkene ısı verilmesi veya iletkenin ısı alınması olaylarının gerçekleştiğini görmüştür. Bu olay Thomson etkisi olarak isimlendirilmiştir. Sıcaklıkları farklı uçlara sahip iletkenin ısı alışverişi bu iletkenin akım geçtiği süreçte olmaktadır. Thomson ısısı olarak isimlendirilen açığa çıkan ısı, Eşitlik 2.3. ile hesaplanmaktadır.

$$Q_T = \iota \Delta T I \quad (2.3)$$

Burada Q_T , Thomson ısısı (W), ΔT , iletkenin uçları arasındaki sıcaklık farkı ($^{\circ}\text{C}$), I , iletken üzerinden geçen akım şiddeti (A), ι , Thomson katsayısıdır ($\text{V}/^{\circ}\text{C}$) (Elzalı ve ark., 2018).

2.1.2. Termoelektrik Jeneratörler

Termoelement (TE) farklı iki yarı iletken malzemenin birleştirilmesiyle oluşturulmaktadır. TE'nin yapısı Şekil 2.5'te gösterilmiştir. TEJ'lerde kullanılan bu iki yarıiletken malzemeden biri p tipi diğeri ise n tipi malzemelerdir.



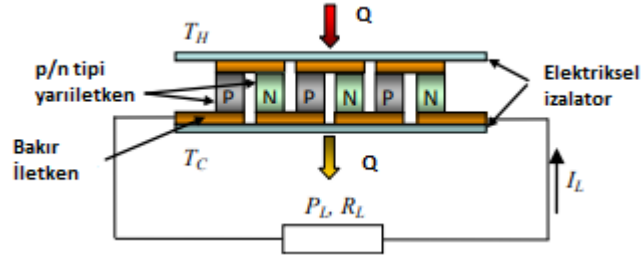
Şekil 2.5. Termoelement şeması

Şekil 2.5'te gösterildiği gibi p ve n tipi bu malzemelerin birer uçlarından elektriksel olarak bir iletken aracılığı ile birbirine bağlanmasıyla oluşturulan termoelektrik yapıdan akım geçirildiğinde p ve n tipi malzemelerin bir yüzeyinin ısınıp diğer yüzeyin soğuyarak yüzeyler arasında sıcaklık farkı oluşmaktadır. Bu olayın tam tersinde ise yani yüzeyler arasında sıcaklık farkı oluşturulduğunda p ve n tipi bu iki iletkenin uçlarında bir potansiyel fark oluşmaktadır. Oluşan bu potansiyel farkın büyüklüğü ise yüzeyler arasında meydana gelen sıcaklık farkıyla doğru orantılı olarak değişmektedir. Bu şemada Seebeck etkisiyle potansiyel farkın oluşumu ve Peltier etkisiyle sıcak ve soğuk yüzeylerin oluşumu görülebilmektedir.

Bir termoelementte üretilen gerilim Eşitlik 2.4. ile ifade edilir.

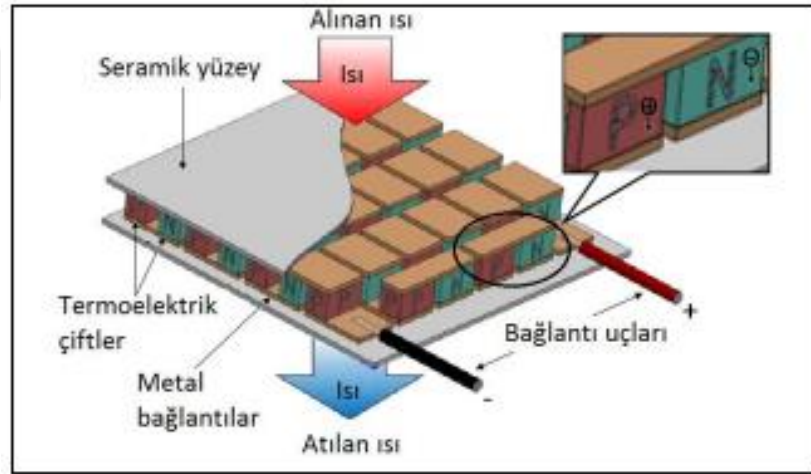
$$V = \alpha (T_H - T_C) \quad (2.4)$$

Burada, V, termoelement voltajı (V), T_H , termoelementin sıcak yüzey sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$), T_C , termoelementin soğuk yüzey sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$), α , seebeck katsayısı ($\text{V}/^{\circ}\text{C}$) olarak ifade edilir. Şekil 2.6'da 3 adet termoelementin seri bağlanmasıyla oluşturulan termoelektrik jeneratörü görülmektedir.



Şekil 2.6. Termoelektrik modülün jeneratör şeması (Ahıska ve Mamur, 2014)

Termoelementlerin elektriksel olarak bir araya getirilmesiyle oluşan termoelektrik jeneratörler Şekil 2.7’ de gösterilmiştir. Termoelektrik jeneratörden elde edilen enerji de termoelementlerin sayısına bağlı olarak değişmektedir. Daha yüksek çıkış gerilimi ve akımı elde etmek için termoelektrik modüller elektriksel olarak seri, paralel veya seri-paralel bağlanabilmektedir.



Şekil 2.7. Termoelektrik Modül (Mamur, 2020)

Termoelektrik jeneratörü sıcak yüzey, soğuk yüzey ve termoelektrik modül olmak üzere üç bölümden oluşmaktadır. İki yüzey arasında oluşan sıcaklık farkı ile TEJ çıkış uçlarında bir voltaj (V) üretilmektedir. TEJ çıkışına bir yük (R_L) bağlandığında Üretilen voltajın etkisiyle yük üzerinden bir I akımı geçmektedir. Burada üretilen P_L gücü ise yarıiletken malzemenin cinsine, sıcaklık farkına ve R_L yük direncine bağlıdır. Termodinamiğin birinci yasasına göre ısı enerjisi, yüksek sıcaklık tarafından düşük sıcaklık tarafına doğru hareket etmektedir (Elzalı ve ark., 2018).

Ortaya çıkan ısı enerjileri Eşitlik 2.5. ve 2.6. ile hesaplanır.

$$Q_H = \alpha I_{TEJ} T_H + K \Delta T - I_{TEJ}^2 R_{i\zeta} / 2 \quad (2.5)$$

$$Q_C = \alpha I_{TEJ} T_C + K \Delta T + I_{TEJ}^2 R_{i\zeta} / 2 \quad (2.6)$$

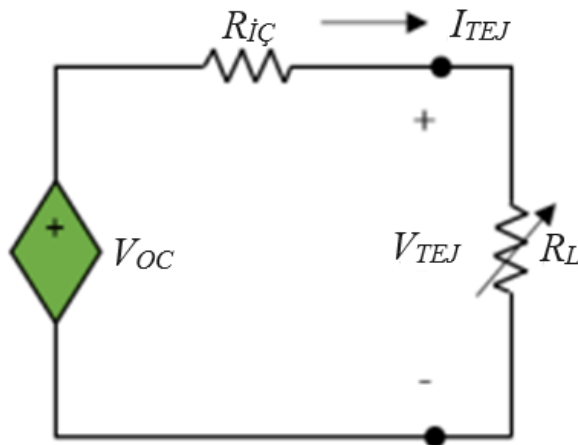
Burada Q_H , sıcak yüzeydeki ısı akışı, Q_C , soğuk yüzeydeki ısı akışı, $R_{i\zeta}$, termoelektrik modüldeki toplam iç direnç, K , termal iletkenlik, $\Delta T (T_H - T_C)$, yüzeyler arasındaki sıcaklık farkı α , Seebeck katsayısıdır. Termoelektrik modüldeki çıkış gücü Eşitlik 2.7-2.10 ile ifade edilir.

$$P_{TEJ} = Q_H - Q_C \quad (2.7)$$

$$P_{TEJ} = \alpha \Delta T I_{TEJ} - I_{TEJ}^2 R_{i\zeta} \quad (2.8)$$

$$P_{TEJ} = (\alpha \Delta T - I_{TEJ} R_{i\zeta}) I_{TEJ} \quad (2.9)$$

$$P_{TEJ} = V_{TEJ} I_{TEJ} \quad (2.10)$$



Şekil 2.8. TEJ modülün eşdeğer devresi (Mamur ve Çoban, 2020)

R_L yük direnci üzerindeki voltaj ise Eşitlik 2.11. ile ifade edilir.

$$V_{TEJ} = \alpha \Delta T - I_{TEJ} R_{i\zeta} = V_{OC} - I_{TEJ} R_{i\zeta} = I_{TEJ} R_L \quad (2.11)$$

Bir termoelektrik jeneratörün en yüksek çıkış gerilimi TEJ çıkışı açık devre iken elde edilir. Şekil 2.8'deki eşdeğer devrede OHM yasasına göre açık devre voltajı V_{OC} , Eşitlik 2.12. ile elde edilir.

$$V_{OC} = N (\alpha_p - \alpha_n) (T_H - T_C) \quad (2.12)$$

Burada N , termoelement sayısı, α_p , p tipi yarıiletken, α_n , n tipi yarıiletken malzemelerin Seebeck katsayılarıdır. T_H , sıcak yüzey, T_C , soğuk yüzey sıcaklıklarını ifade etmektedir. Üretilen güç değeri ise Eşitlik 2.13.'te belirtildiği gibi elde edilmektedir.

$$P_L = I_L V_{TEJ} = I_L (\alpha \Delta T - I_{TEJ} R_{i\zeta}) = \alpha^2 \Delta T^2 R_L / (R_L - R_{i\zeta})^2 \quad (2.13)$$

Bir termoelektrik modülde maksimum güç değeri yük direnci R_L ile iç direnç $R_{i\zeta}$ birbirine eşitken ($R_L = R_{i\zeta}$) elde edilir (Üstüner ve ark., 2022). Bu durumda P_{LMAX} Eşitlik 2.14. ile elde edilir.

$$P_{LMAX} = \alpha^2 \Delta T^2 / 4R_L \quad (2.14)$$

2.1.3. MPPT Algoritmaları

Fotovoltaik ve TEJ sistemlerinde bugüne kadar birçok algoritma yöntemi geliştirilmiş olup bu algoritmalar farklı uygulama tekniklerinde kullanılmıştır. Bu algoritmalar geleneksel ve akıllı algoritmalar olarak sınıflandırılmıştır. Değiştir-gözetle, artımsal iletkenlik, açık devre gerilimi yöntemi ve kısa devre akımı yöntemi klasik algoritmalar olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Daha karmaşık sorunları farklı metotlarla çözebilmek için klasik algoritmaların yanında akıllı algoritmalar geliştirilmiştir. Yapay sinir ağları, bulanık mantık, parçacık sürüsü optimizasyonu ve karınca kolonisi algoritması maksimum güç noktası takibi için kullanılan algoritmalar (Gökkuş & Kulaksız, 2021).

Klasik Algoritma Yöntemleri

Değiştir-gözetle algoritması sistemde bozulmalar oluşturarak güç noktasına ulaşmayı amaçlamaktadır. Bunu ise TEJ çıkışındaki gerilimi değiştirerek sağlamaktadır. Dolayısıyla bu gerilim MPP etrafında salınım yapmaktadır. Bu salınımların büyüklüğü ise görev döngüsünün büyüklüğüne bağlı olarak değişmektedir (Marroquin ve ark., 2022). Bu algoritma yönteminde görev döngüsü değişimi sonrasında güç artarsa görev döngüsü aynı yönlü olarak artmaktadır. Eğer güç azalırse görev döngüsünün azaltılması gerekmektedir.

Artan iletkenlik algoritmasında P-V eğrisine göre eğimin sıfır olduğu nokta maksimum güç noktasını belirtmektedir. MPP'nin sol tarafında eğim pozitif, sağ tarafında ise eğim negatif olmaktadır (Badak & Yıldız, 2021). Bu algoritma yönteminde kaynak gerilim ve akım değerleri hesap edilerek en iyi çalışma noktası belirlenmektedir (Zhang ve ark., 2022). Artan iletkenlik algoritmasında I/V iletkenliği ile dI/dV artan iletkenliğinin karşılaştırılması yapılmaktadır (Ay & Arserim, 2019). Bu karşılaştırma neticesinde görev döngüsü değeri değiştirilerek MPPT sağlamaktadır.

Bir termoelektrik jeneratörünün çıkış uçları boştayken bu uçlardan yapılan ölçüme açık devre gerilimi (V_{OC}), çıkış uçları doğrudan birbirine bağlandığında oluşan hattan geçen akıma (I_{SC}) ise kısa devre akımı denmektedir. TEJ sisteminde maksimum noktadaki gerilim yaklaşık olarak V_{OC} geriliminin %50'si, akım ise I_{SC} akımının %50'si olmaktadır (Marroquin ve ark., 2022). Açık devre gerilimi algoritması ile V_{OC} ölçümüne bağlı olarak V_{MPP} noktası belirlenmektedir. Benzer şekilde kısa devre akımı algoritması ile I_{SC} ölçümüne bağlı olarak I_{MPP} noktası belirlenmektedir. Bu yöntemin uygulaması kolay olmasına rağmen ölçüm yapılması için yük bağlantısının kesilmesi gerekmektedir (Katche ve ark., 2023). Bu ise bu yöntemin bir dezavantajıdır.

Akıllı Algoritma Yöntemleri

Yapay sinir ağları (YSA) insan beyninin çalışması örnek alınarak geliştirilen bir algoritmadır. Kendi kendine öğrenebilen bu algoritma giriş katmanı, gizli katman ve çıkış katmanı olmak üzere üç katmandan oluşmaktadır. Giriş katmanı dış ortamdan verilerin

alındığı katmandır. Bilgilerin işlendiği katman gizli katmandır. Çıkış katmanı ise gizli katmandan gelen verileri işleyerek çıkış üretilen bölümdür. Sıcaklık gibi ortam verileri, V_{OC} ve I_{SC} gibi modül parametreleri veya bu ikisinin birlikte kullanımı YSA için giriş değişkenleri olarak değerlendirilebilir. Çıkış verisi olarak görev döngüsü değişimi ile dönüştürücüde MPP takibi yapılmaktadır (Katche ve ark., 2023; Demirel ve ark., 2013).

Bulanık mantık yönteminin temelinde bulanık küme ve alt kümeler bulunmaktadır. Klasik küme teorisine göre bir varlık kümenin ya üyesidir ya da değildir. Eğer varlık kümenin üyesi ise 1, kümenin üyesi değil ise 0 olmaktadır. Bulanık mantıkta ise varlığın üyelik dereceleri vardır. Bu üyelik dereceleri 0 ile 1 aralığında olmaktadır (Aslan & Yılmaz 2018). Bu algoritma bulanıklaştırma, çıkarsama ve durulaştırma olmak üzere üç aşamadan oluşmaktadır (Katche ve ark., 2023). Bulanık mantık yönteminde MPP takibi için giriş gerilimi ve akımı okunarak görev döngüsünün değeri hesaplanmaktadır. Burada gerilim ve akımın aldığı değerlere göre üyelik dereceleri belirlenerek MPPT sağlanmaktadır (Marroquín ve ark., 2022).

Parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO) sürü halinde hareket eden kuş ve balık gibi canlıların davranışlarından yola çıkılarak geliştirilmiş bir algoritmadır (Lüy ve ark., 2021). Her bir kuş parçacık olarak değerlendirilirse parçacığın yiyeceğe göre konumları belirlenerek uygunlukları ölçülmektedir. Parçacıklar yiyeceğe ulaşmadaki bir önceki konumlarına göre bir sonraki en iyi çözüm bilgisine ulaşmaktadır. Burada her iterasyonda her bir parçacık en iyi iki değerle güncellenir. Sürüdeki her bir parçacığın bireysel olarak elde ettiği yerel en iyi çözüm birinci değeri, sürüdeki tüm parçacıkların elde ettiği global en iyi çözüm ise ikinci değeri temsil etmektedir (Demirel ve ark., 2013). Bu algoritma ile TEJ modülüne ait akım ve gerilim değerleri alınarak güç değeri hesaplanır. Ardışık hesaplanan güç değerleri arasındaki fark ile PSO algoritmasında belirlenen referansa ve iterasyon sayısına göre görev döngüsü tekrar güncellenerek MPP takibi yapılmaktadır.

Karınca kolonisi optimizasyon algoritmasında karıncaların yuvalarından uzunlukları aynı olmayan iki farklı yolu tercih ederek ulaşabilecekleri bir gıdaya ilk başlarda iki yolu da tercih ederek eşit olasılıklarla ulaşabilmektedirler. Ancak zaman ilerledikçe karıncaların en kısa yol üzerinde yoğunlaşarak gıdaya ulaştığı görülmüştür. Bunu ise önceki geçişlerinde yollarda bıraktıkları feromon izlerine göre yapmaktadırlar. Kısa olan yoldan

birim zamanda geçen karınca sayısı uzun yola göre daha fazla olacağı için zamanla kısa yolda biriken feromon sayısı da daha fazla olacaktır. Böylece karıncaların feromon miktarı daha fazla olan yolu tercih etme olasılıkları da daha fazla olmaktadır (Kapukaya & Güneş 2019).

2.2. Literatür Özetleri

TEJ'lerin ilk enerji kaynağı olarak kullanımını sağlayan tasarıma 1950'li yıllarda başlanmıştır. 1954 yılında yapılan bir çalışmada plütonyum (238) atomunun doğal yollarla radyoaktif olarak bozunması neticesinde plütonyum dioksit (PuO_2) dönüşmesini sağlayan bir çalışma yapılmıştır. Her ne kadar radyoaktif bir bozunma olsa da füzyon ve fizyon işlemlerini içermemektedir (Zoui ve ark., 2020a). Bu radyoaktif bozunma sonrası açığa çıkan enerjinin TEJ'lerde kullanılmasıyla radyoizotop termoelektrik jeneratörler (RTEJ) ortaya çıkmıştır.

RTEJ'ler uzay sistemlerinde ilk olarak 1960'lı yıllarda NASA tarafından SNAP (Systems Nuclear Auxiliary Power) olarak isimlendirilen uzay programında kullanılmış olup daha sonraki yıllarda da gelişimini sürdürerek uzay araçlarının ihtiyaç duydukları enerjiyi karşılamak için kullanılmıştır. 1966 yılında Amerika Birleşik Devletleri'ne ait Fairway Rock isimli bir adacıkta RTEJ'ler güç kaynağı olarak 1995 yılına kadar uzunca bir süre kullanılmıştır. Bu RTEJ'lerin karasalda kullanımının ilk örneğidir. Ayrıca RTEJ'lerin tıbbi alanlarda uzun ömürlü batarya olarak kullanımı gerçekleştirilmiştir. Lityum piller üretilene kadar kalp pili olarak uzun yıllar kullanılmıştır (Jaziri ve ark., 2020; Zoui ve ark., 2020a).

Doğal kaynakların TEJ'ler ile birlikte kullanılarak enerji dönüşümlerinin sağlanması gün geçtikçe daha da artmaktadır. Global Power Technologies şirketi katalitik bir brülörde doğalgazın yakılmasıyla açığa çıkan ısı enerjisiyle TEJ'lerden elektrik üretimini sağlamıştır (<https://www.globalte.com> 2024). Aynı zamanda jeotermal enerjilerinde TEJ'ler ile dönüşümü sağlanmaktadır (Kayabaşı & Atik, 2018). Bir diğer doğal kaynak olan güneş enerjisi de TEJ ile yapılan çalışmaların ana kaynağını oluşturmaktadır.

Doğal gaz ile yanan ev tipi bir kombi kullanılarak elde edilen sıcak su ve şebeke suyu TEJ'in yüzeylerinden geçirilerek kombi TEJ yapılmıştır. Tasarlanan bu sistemde yüzeyler arasında oluşan maksimum sıcaklık farkı 48 °C olarak gerçekleşmiştir ve 14.28 Wh'lik güç üretimi sağlanmıştır (Yavuz, 2019).

Vina ve Alagao, (2018) parabolik güneş ışığı yoğunlaştırıcı kullanarak TEJ ile enerji üretimini gerçekleştirmişlerdir. Burada %98 yansıtma özelliği bulunan yansıtıcı bir film kullanarak parabolik yoğunlaştırıcıyı oluşturmuşlardır. Parabolik yoğunlaştırıcıdan yansıtılan ışınlar siyaha boyanarak karartılan bakır plakaya yönlendirilerek TEJ için sıcak yüzeyler oluşturulmuştur. TEJ'in soğuk yüzeylerinde ise alüminyum dikdörtgen bir tüp kullanılmıştır. Soğutucu deposundaki saf su bir pompa yardımıyla alüminyum tüpün içerisinden akıtılarak TEJ'in soğuması sağlanmıştır. Ayrıca sistemde güneş takip düzeneği ile güneşin hareketine göre konumlandırma yapılmıştır. Bu çalışmada 8 adet seri bağlı TEJ modül kullanıldığında 55 cm ve 122 cm kenar ebatlarındaki yansıtma alanında 10.4 V gerilimde 179.6 mA ile 1.87 W güce ulaşmışlardır.

Doğal ve sabit bir ısı kaynağı olan insan vücudu giyilebilir TEJ'ler için ısı kaynağı olarak kullanılmaktadır. Enerji dönüşüm verimliliği henüz iyi bir düzeyde olmasa da insan vücut sıcaklığının 37 °C'de olması bir avantaj olarak görülmektedir (Sattar ve Yeo, 2022). Xing ve ark., (2023) yaptıkları bir çalışmada ANSYS sonlu elemanlar programı ile cilt, esnek alt tabaka ve termoelektrik modüller kullanarak bir model oluşturmuşlardır. Bu modelde her biri 16x4 mm²'lik sekiz adet termoelektrik modül birbirine seri olarak bağlanıp gümüş bir folyo üzerine monte edilerek esnek bir yapı oluşturmuşlardır. Daha sonra bir deney düzeneği hazırlayarak deneyleri hem gerçek ortamda hem de simülasyon ortamında gerçekleştirmişlerdir.

Atık ısılar TEJ'ler ile elektrik enerjisi üretiminde önemli bir yer tutmaktadır. Otomobillerde içten yanmalı motorlarda giren enerjinin %40'ı ısı olarak egzozdan dışarı atılmaktadır. Buhar kazanları, fırınlar, reaktörler gibi üretim proseslerinde ise giren enerjinin %20-%50 arası oranlarda dışarı atılmaktadır (Bijukumar ve ark., 2018). TEJ'ler ile bu atık ısılar kullanılarak hem atık ısıların çevreye verdikleri zararlar önlenmiş olmakta hem de sistemin daha ekonomik olması sağlanmaktadır. Bu sayede atık ısıyı

oluşturan sistemin daha verimli hale dönüşmesi sağlanmaktadır. TEJ'ler atık ısıların değerlendirildiği birçok çalışmada kullanılmıştır. TEJ'lerin uygulama alanlarına otomobil endüstrisi, kazanlar, buhar bazlı güç tesisleri, fırınlar örnek gösterilebilir.

Günay ve ark., (2020) atık ısıları dönüştürmek için bir simülasyon ve bir uygulama çalışması yapmışlardır. Yaptıkları bu çalışmada her birinde 5 TEJ modül bulunan 4 ayrı alüminyum bloktan iki blok birbirine seri bağlanarak iki ayrı TEJ grubu oluşturmuşlardır. Devrede kullanılan kontrol birimi TEJ'in çıkışından elde edilen gerilim değerine göre TEJ gruplarının birbirine seri veya paralel bağlanmasını sağlamaktadır. Sistemde bulunan alüminyum bloklardan sanayi kuruluşunun su sistemi kullanılarak saatte 1200 litre su geçirilerek soğuk yüzeyler oluşturulmuştur. TEJ blokların sıcak yüzeyleri ise endüstriyel prosesteki borunun yüzey sıcaklığının fazla olması nedeniyle boru yüzeyine izolasyon malzemesi uygulanarak 275 °C'nin üzerindeki yüzey sıcaklığının düşürülerek TEJ blokların yüzeyine 108 °C olarak yansımaları sağlanarak TEJ'ler için sıcak yüzeyler elde edilmiştir. Simülasyon sonucuna göre elde ettikleri güç 43.16 W, uygulamada elde ettikleri güç ise 41.3 W değerinde olmuştur. Tasarlanan bu sistem $\Delta T = 100$ °C iken 150 W güç üreterek geri ödeme süresi 6 yıl olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlara göre atık ısının dönüştürülmesinde termoelektrik teknolojilerinin önemli bir alternatif oluşturduğunu belirtmişlerdir.

TEJ'ler üzerinde yapılan bu iyileştirme çalışmalarının başında ısı iletimini en iyi şekilde sağlanması gelmektedir. Bu nedenle nano akışkanlar kullanılmaktadır. Nano akışkanlar temel akışkan içerisine ısı iletkenliği daha yüksek olan nano boyuttaki partiküllerin karıştırılmasıyla elde edilmektedir. Li ve ark., (2017) TEJ'ler ile yapılan otomotiv atık ısı geri kazanım sisteminin nano akışkan bir soğutucu ile performans analizlerini yapmışlardır. Bu çalışmada bakır-etilen glikol (Cu-EG) nano akışkan soğutucu ile sulu etilen-glikol soğutucunun eşit kütle akış hızlarında karşılaştırıldığında nano akışkanın TEJ'in çıkış gücünü etkili bir şekilde iyileştirerek termoelektrik sistemin verimini artırdığı görülmüştür. Egzoz sıcaklığı değişimi 500K-710K aralığında iken sulu etilen glikola göre %3'lük nano akışkan konsantrasyonunun, çıkış gücünde 2.5-8 W aralığında yani %12.65-%13.95 artış sağladığı görülmüştür. Nano akışkanın konsantrasyonunun gerçekleştirilebilir aralıkta (%6) artırmanın çıkış performansını olumlu yönde etkileyeceğini belirtmişlerdir.

Buraya kadar anlatılan bu çalışmaların miktarı aslında TEJ’lerde kullanılan ısı kaynağı çeşitliliğiyle paralellik göstermektedir. TEJ’ler ile yapılan çalışmalar son yıllarda verimliliği artırmaya yönelik olarak gerçekleştirilmektedir. TEJ’lerin maksimum güç noktası takibi ile birlikte kullanılmasıyla enerji üretiminde maksimum oranda verim elde edilmesi hedeflenmektedir. Bu nedenle araştırmacılar belirli algoritmalar eşliğinde çalışan devre tasarımlarıyla verimlilik artışı sağlamanın yöntemlerini geliştirmektedirler.

Shahat ve Bhuiyan (2021) maksimum güç noktasını izlemek için dört farklı yöntemi kullanarak Matlab/Simulink ile bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada ilk olarak maksimum güç noktası takibi devrede değilken ve daha sonra ise sırayla P&O, INC ve PSO algoritmalarını kullanarak deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada TEJ yüzeylerinde 5 °C’lik sıcaklık farkından başlanarak her 5 °C’lik sıcaklık farkı artışı için deneyler 100 °C’lik sıcaklık farkına ulaşana kadar gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre P&O algoritmalarının MPPT yokken elde edilen verimlerden nispeten daha iyi olduğunu, artan iletkenlik algoritmasının ise P&O algoritmasına göre neredeyse iki kat daha verimli olduğunu belirtmişlerdir. Böylece MPPT yokken elde edilen verim %3.253, P&O algoritmasında %5.499, INC algoritmasında %9.991 olarak gerçekleşmiştir. Son metot olan PSO algoritmasında ise verimde en iyi sonuçların elde edilerek en yüksek verimin %16.58 olduğunu belirtmişlerdir.

Yahya ve Alomari (2020) güç diferansiyeli maksimum güç noktası takibi (GD-MPPT) algoritmasını geliştirerek bir çalışma yapmışlardır. Bu algoritmaya göre P-I eğrisi üzerinde iki farklı bölge için güç değerleri hesaplanmıştır. Birinci bölgedeki güç noktası dönüştürücünün görev döngüsü sıfıra yakinken başlamakta, ikinci bölgedeki güç noktası ise görev döngüsü bire yakinken başlamaktadır. GD-MPPT algoritmasına göre hesaplanan bu güç noktalarının karşılaştırılması yapılarak en büyük değer seçilmektedir. Böylece elde edilen en büyük güç noktası güncellenerek yeni güç noktası bulunmaktadır. Bu çalışmada sıcaklık farkı 80, 100, 130 °C için algoritmanın etkisi üç farklı TEJ bağlantı yöntemi için denenmiştir. $\Delta T = 130$ °C iken tek bir TEJ için 1.9404 W, üç seri bağlı TEJ için 5.79584 W ve üç paralel bağlı TEJ için 5.814 W güç elde edilmiştir. Böylece MPPT verimliliğinin %97.7 değerini aştığını ve bu algoritmanın MPP başarılı bir şekilde takip ettiğini görmüşlerdir.

Mamur ve Çoban (2020) 20 adet TEJ modülü birbirine seri bağlayarak iki ayrı TEJ grubu oluşturmuşlardır. Bu iki TEJ grubunu üç adet alüminyum plakanın arasına birbirine paralel olacak şekilde bağlantılarını yaparak dış tarafta kalan alüminyum plakalardan soğuk su, ortada bulunan plakadan sıcak su geçirip P&O algoritması eşliğinde MPP takibini gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca deneyleri Matlab/Simulink ile modellemesini yapmışlardır. Bu modellemede deneyler MPPT yokken değişken yük dirençleri, P&O algoritmaları eşliğinde değişken yük direnci ve değişken sıcaklık farkları için gerçekleştirilmiştir. 230 °C sabit sıcaklık farkında ve 200 Ω 'luk yük direnci değerinde çıkış gücü 239.48 W, verim %93.94 olurken 15 Ω 'luk yük direncinde ise çıkış gücü 254.02 W ile verim %98.64 olmaktadır. 7 Ω 'luk sabit yük direnci değerinde ise soğuk yüzey sıcaklığı 20 °C iken her 20 °C'lik sıcaklık farkı artışı için deneyler tekrarlanarak sıcaklık farkı 10 °C iken %65.24 ile en düşük, 180 °C iken %97.60 ile en yüksek verim elde edilmiştir. Bu durumda çıkış güçleri ise 10 °C'lik sıcaklık farkında 0.317 W, 180 °C'lik farkta 154.63 W olarak gerçekleşerek her sıcaklık farkı artışında verim değerinin arttığını görmüşlerdir.

Elzalı ve ark., (2019) sıcak ve soğuk yüzeyler oluşturmak için iki bakır bloğu TEJ'in iki yüzeyine yerleştirmişlerdir. Bir soğutucuda suyu soğutarak pompa ile sabit basınçlı olacak şekilde suyu soğuk yüzey tarafı için konulan bakır bloktan geçirmişlerdir. Sıcak yüzeyi ise elektrikli ısıtıcı kullanarak sağlamışlardır. Sistemin kontrolünü ise bir mikro denetleyici yardımıyla DA-DA yükseltici dönüştürücü ile sağlamışlardır. DA-DA dönüştürücünün çıkışına 16 Ω 60 W'lık omik bir yük bağlayarak INC algoritması ile devrenin testlerini yapmışlardır. Bu çalışma aynı zamanda Matlab/Simulink ile modellenmiştir. Bu modellemeye göre soğuk yüzey 46 °C'de tutulup sıcak yüzey ise 125 °C'den başlanarak 221 °C olana kadar kademeli olarak artırılmıştır. Her bir deney 17 saniye süresince gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlara göre MPP çevresinde daha az dalgalanmayla 1.5 saniyede MPP'ye ulaşılmaktadır. Bu test sonuçlarına göre Matlab/Simulink de verim %96.9 ile %98.6 arasında, uygulama devresinde ise %88 ile %98 arasında olduğu belirtilmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Bu çalışmada ilk olarak MPPT sisteminin bilgisayar ortamında Matlab/Simulink programı ile modellenmesi yapılmıştır. Bu modelleme, tercih edilen TEJ modülün katalog bilgilerine göre yapılmıştır. Daha sonra ise DA-DA dönüştürücünün değişken yük direncine göre modellenmesi yapılarak, P&O ve INC algoritmaları eşliğinde çalışma verilerinin araştırılması amaçlanmıştır. Çalışmanın ikinci aşamasında ise tasarımı gerçekleştirilen devrenin testlerinin gerçekleştirileceği deney düzeneğinin kurulum aşamaları ve deneylerde kullanılan ekipmanlar anlatılmıştır.

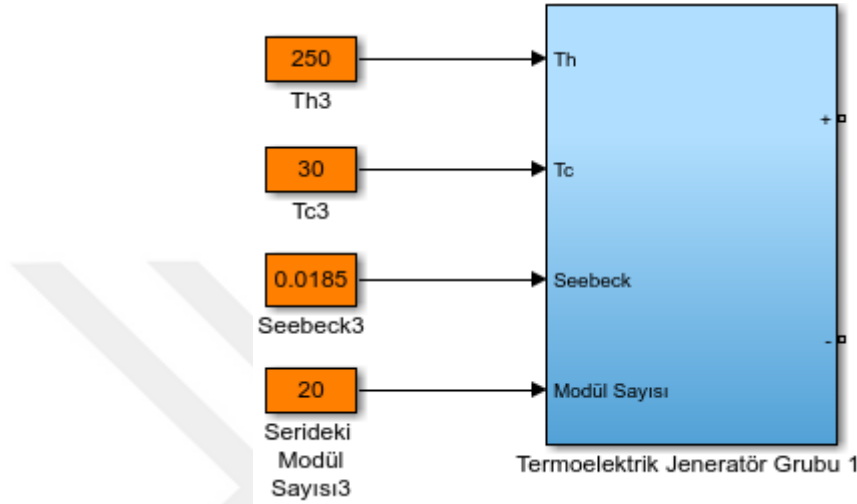
3.1.1 TEJ Modellemesi

Bu modellemede kullanılan TEJ'ler TES Termoelektrik Sistemler şirketine ait olup katalog bilgileri Tablo 3.1'de verilmiştir. (Mamur & Çoban, 2020)

Tablo 3.1. Bir TEJ'in katalog değerleri

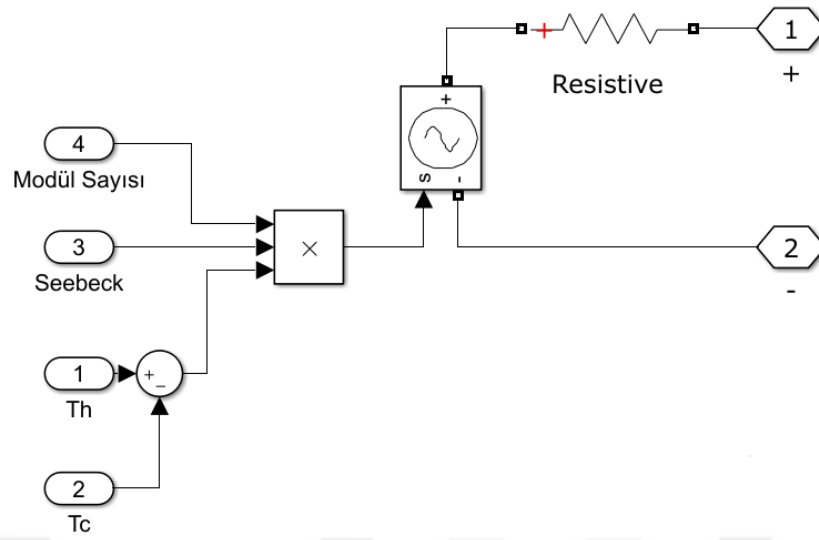
Özellikler	Değerler
Sıcak yüzey sıcaklığı	250 °C
Soğuk yüzey sıcaklığı	30 °C
Açık devre voltajı	4 ± 0.4 (V)
Kısa devre akımı	5.8 ± 0.6 (A)
MPP'deki iç direnç	0.7Ω
MPP'deki çıkış gerilimi	2 ± 0.2 (V)
MPP'deki çıkış akımı	2.9 ± 0.3 (A)
MPP'deki çıkış gücü	5.8 W
Seebeck katsayısı	185 $\mu\text{V/K}$
Kalite katsayısı	$2.86 \times 10^{-3} \text{K}^{-1}$

T_H sıcak ve T_C soğuk yüzey sıcaklıkları olmak üzere bu sıcaklıklara bağlı olarak oluşturulan TEJ'in modellemesi Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Bu modellemede TEJ'den elde edilen güç miktarı, Seebeck katsayısına, yüzey sıcaklığına ve serideki modül sayısına bağlıdır.



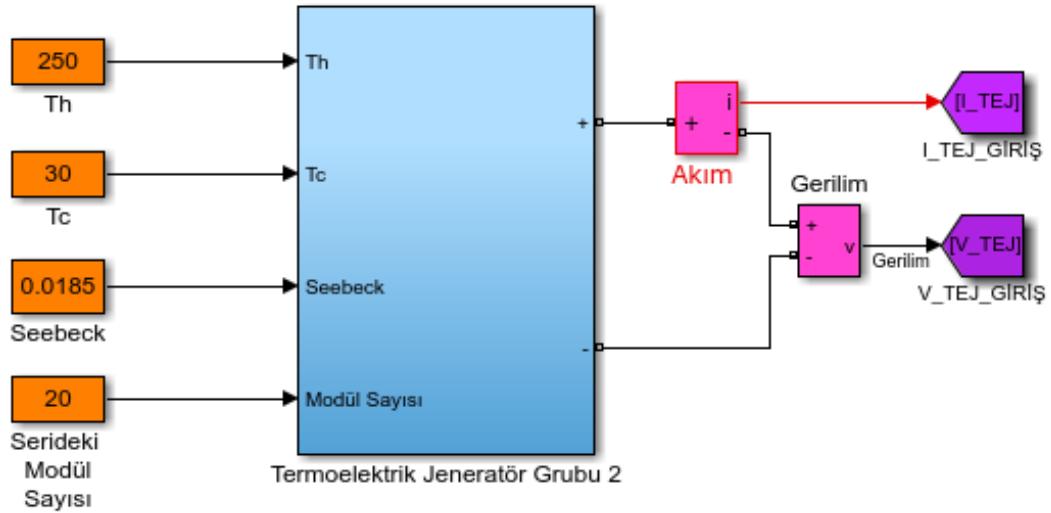
Şekil 3.1. TEJ modülün Matlab modellemesi

Şekil 3.1' de verilen termoelektrik jeneratör grubunun iç yapısı ise Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Bu şekil, sıcaklık farkına bağlı olarak iç direncin benzetimi olup, model içerisinde 20 adet TEJ'in birbirine seri olarak bağlanmasıyla oluşturulan devre şemasıdır. Bu şekilde model içerisinde sıcak ve soğuk yüzeylere ait sıcaklıkların farkları alınarak Seebeck katsayısı ve modül sayısı ile çarpılarak gerilim ve iç direnç değerinin elde edilmesi gösterilmektedir. Burada iç direnç değeri kullanılan seri bağlı termoelektrik modül sayısı ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Bu TEJ modülün katalog verilerine göre iç direnci 0.7Ω değerindedir. Dolayısıyla toplam iç direnç (modül sayısı) $\times 0.7 \Omega$ değerinde olmaktadır. Şekil 3.2'deki gösterimde 1 ve 2 numaralı sırasıyla artı ve eksi uçlar termoelektrik jeneratörün gerilim çıkış uçlarıdır. Bu uçlara herhangi bir yük bağlı değilken termoelektrik modülden Voc açık devre gerilimi elde edilmektedir.



Şekil 3.2. Modül içerisindeki sıcaklık farkı ve iç direnç hesabının gösterimi

Bir TEJ modülden elde edilen gerilim ve akım değerlerinin ölçüm noktaları Şekil 3.3'te gösterilmektedir. Bu ölçüm noktaları MPPT'nin DA-DA yükseltici dönüştürücü kısmı için giriş değerlerini ifade etmektedir. Burada ölçüm değerlerinin Matlab/Simulink programı içerisinde başka noktalara aktarmak amacıyla etiketler kullanılmıştır.

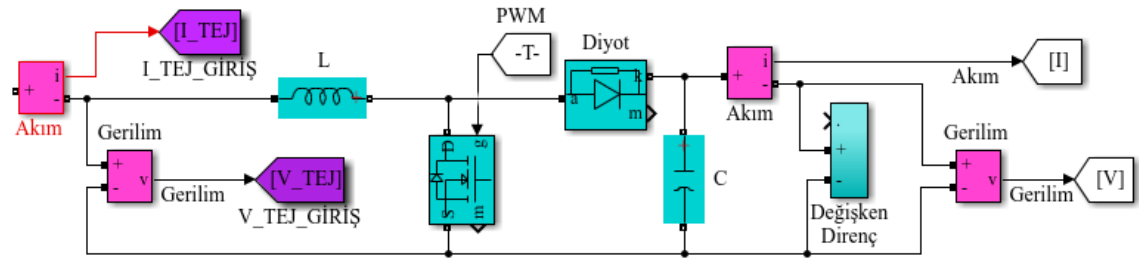


Şekil 3.3. TEJ modülün çıkış gerilim ve akım ölçüm noktaları

3.1.2. DA-DA Dönüştürücü Modellemesi

Yenilenebilir enerji sistemlerinde DA-DA dönüştürücüler sistemin ayrılmaz bir parçasını oluşturmaktadır. Özellikle Fotovoltaik ve TEJ sistemlerinde kullanılan MPPT tekniğinin uygulama alanı DA-DA dönüştürücülerdir. MPPT algoritmaları bu devrelere uygulanarak maksimum güç noktası takibi yapılabilmektedir. MPPT tekniğinde DA-DA dönüştürücü türleri ile yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışma ise yükseltici tip dönüştürücü ile yapılmıştır.

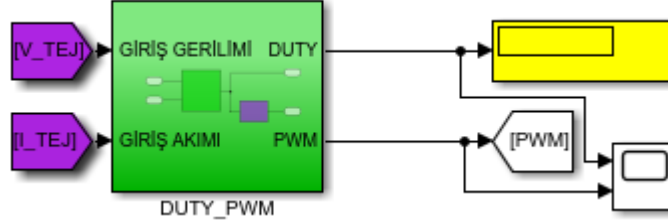
Yükseltici dönüştürücüler, uygulanan giriş gerilimini çıkışta daha büyük gerilime dönüştürür. Çıkış gerilimi anahtarlama elemanının açık ve kapalı kalma süresine göre belirlenmektedir. Sabit frekansta anahtarlamanın açık ve kapalı kalma sürelerinin ayarlanması PWM olarak isimlendirilir. Anahtarlama görev döngüsü (D) anahtarlama elemanının açık kalma süresinin anahtarlama periyodu süresine oranı olarak tanımlanır. Yükseltici dönüştürücü bobin, diyot, yarı iletken (MOSFET), kapasitör olmak üzere dört elemandan oluşmaktadır. Şekil 3.4'te yükseltici tip DA-DA dönüştürücünün modellenmesi gösterilmiştir.



Şekil 3.4. DA-DA yükseltici dönüştürücünün Matlab ile modellenmesi

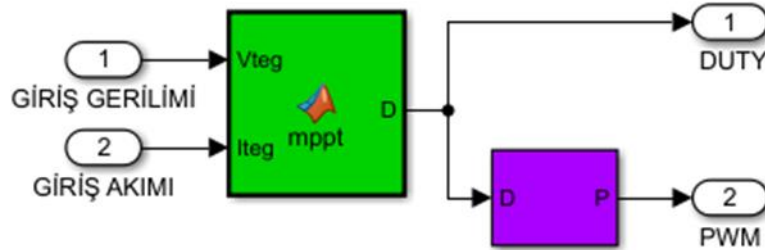
TEJ modüle ait çıkışlar Şekil 3.4'te verilen devrenin girişine uygulandığında yükseltici tip dönüştürücünün çıkışından maksimum güç değeri elde edilmektedir. Bu modelleme PWM üretici, değişken direnç, ölçüm değerlerinin izlendiği ve ölçüm değerlerine ait sinyallerin takip edildiği kısımlardan oluşmaktadır.

Yapılan simülasyonda MPP takibini sağlayabilmek için DA-DA dönüştürücüdeki yarıiletken malzemenin tetiklemesini sağlayan kısım Şekil 3.5’te gösterilmiştir. Bu kısımda P&O ve INC algoritma yöntemlerine göre hazırlanan program işletilmektedir.



Şekil 3.5. MPP için tetikleme ve doluluk oranı modellemesi

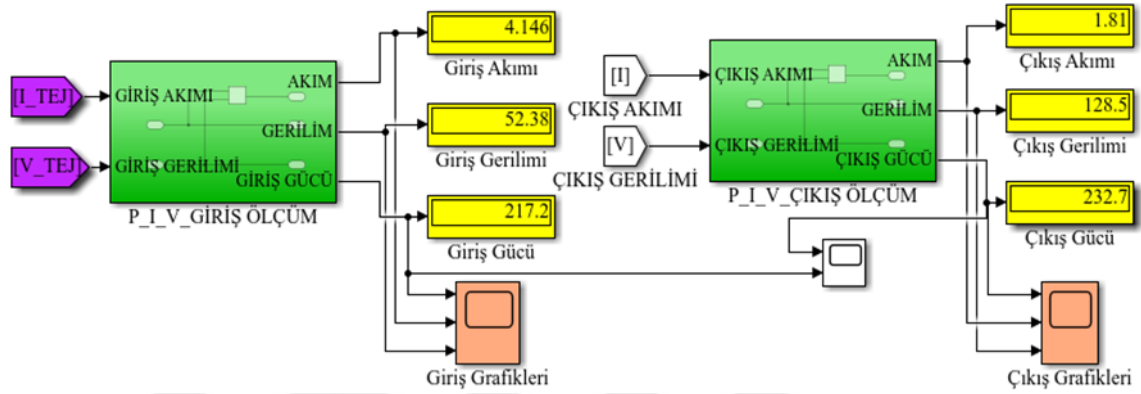
Şekil 3.5’te verilen “duty_pwm“ bloğunun iç yapısı Şekil 3.6’da gösterilmiştir. Burada kullanılan fonksiyon bloğunda işletilen program neticesinde D doluluk oranı belirlenmektedir. Bu ise çıkıştaki güç değerinin ölçüm sonucuna göre doluluk oranının artırılarak veya azaltılarak değiştirilmesiyle sağlanmaktadır. İşletilen programın her bir döngüsünde bu işlem tekrar edilerek sonuca yansıtılmaktadır.



Şekil 3.6. D ve PWM oluşturmak için kullanılan modelin iç yapısı

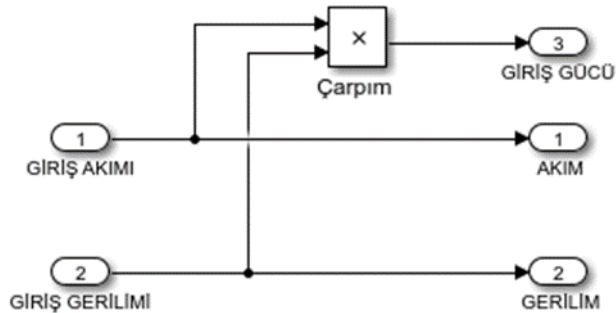
Görev döngüsü doluluk oranı modellemede PWM üretici bloğu kullanılarak her bir periyottaki darbe süresini oluşturmaktadır. Algoritmalar eşliğinde fonksiyon bloğunda belirlenen D görev döngüsü Şekil 3.6’daki PWM üretici bloğuna uygulanmaktadır. Bu blokta gelen D bilgisi her bir tetiklemeye uygulanarak PWM oluşturulmakta ve bu sayede yarıiletkenin anahtarlanması sağlanmaktadır. Burada kullanılan fonksiyon bloğunda giriş akım ve gerilim değerleri ölçülerek bu işlemler yapılmaktadır.

Yükseltici dönüştürücünün giriş ve çıkışından ölçülen akım, gerilim ve güç değerleri Şekil 3.7’de gösterilmiştir. Güç değeri, giriş akım ve geriliminin çarpılmasıyla elde edilmektedir. Ayrıca bu kısımda belirtilen değerlerin grafik halinde gösterimi sağlanmaktadır.



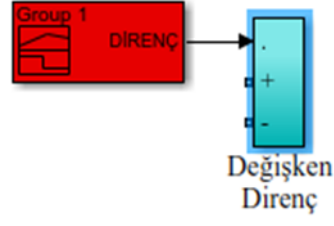
Şekil 3.7. Giriş akım, gerilim ve güç değerlerinin gösterimi

Model içerisinde akım ve gerilimin çarpılarak güç değerinin elde edilmesiyle ölçülen değerler Şekil 3.8’de gösterilmiştir. Modelin bu iç yapısı hem giriş hem de çıkış ölçümleri için kullanılmaktadır.



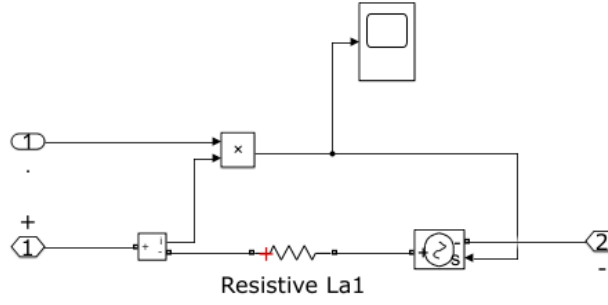
Şekil 3.8 Modül içerisinde akım gerilim ve güç değerlerinin gösterimi

Yükseltici dönüştürücünün çıkışındaki yük değerini değiştirmek için Şekil 3.9’daki modelleme kullanılmıştır. Bu modelleme ile çıkış direncinin belirlenen zaman dilimlerinde değiştirilerek farklı değerler alması sağlanmaktadır.

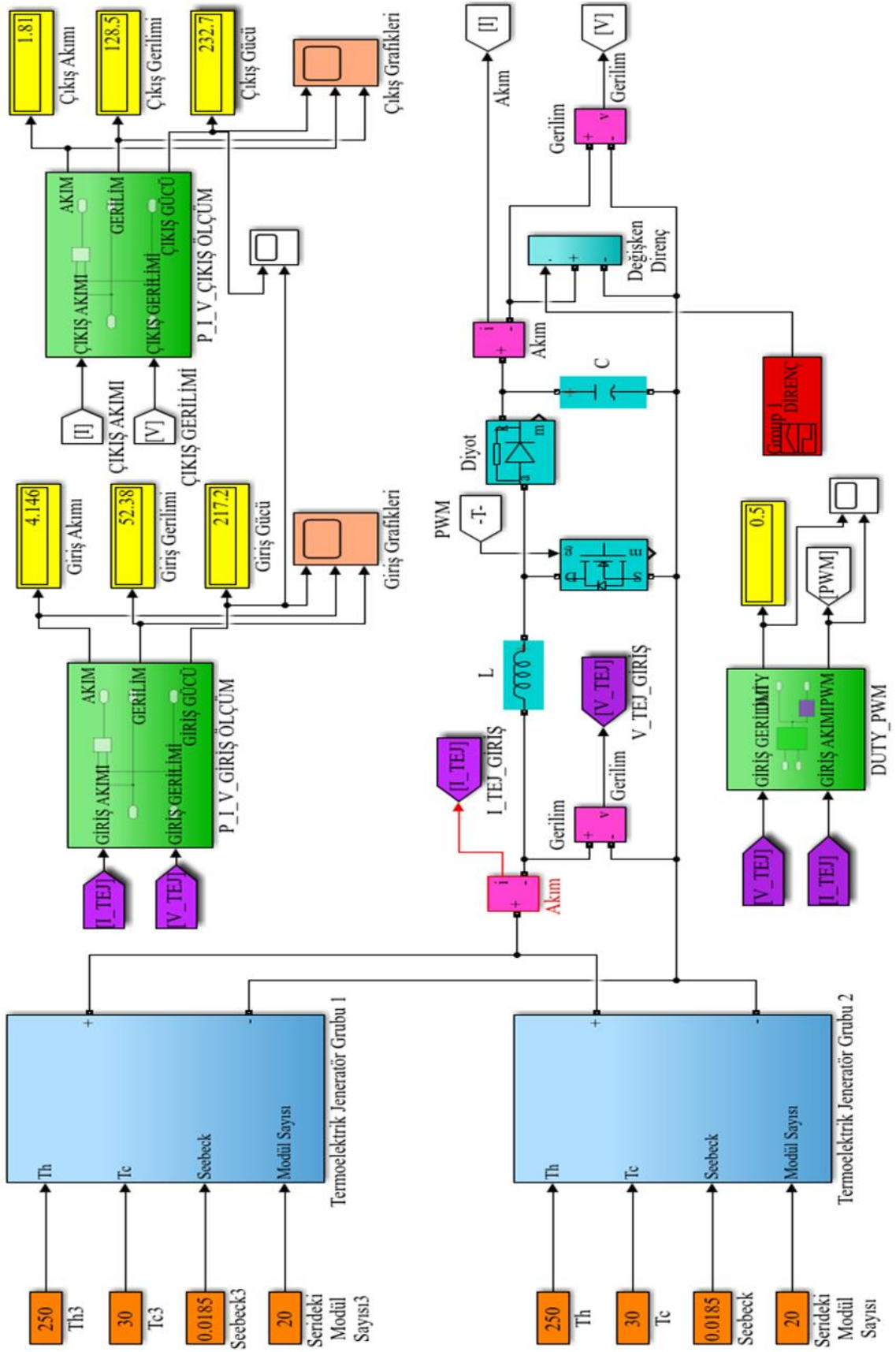


Şekil 3.9. Değişken direnç modeli

MPPT devresinin çıkış uçlarına Şekil 3.10'daki 1 ve 2 nolu uçların sırasıyla artı ve eksi olmak üzere bağlanmasıyla devrenin çıkışı için değişken yük sağlanmaktadır. Şekil 3.11'de ise MPPT sistemine ait modellemenin genel şeması verilmiştir.



Şekil 3.10. Değişken direnç modelinin iç yapısı



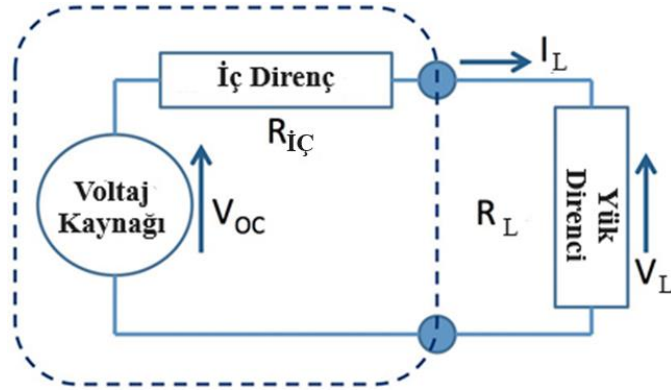
Şekil 3.11. MPPT sistemine ait modellemenin genel şeması

3.1.3. Maksimum Güç Noktası Takibi (MPPT)

Ortam koşulları elektrik üretim kaynaklarından elde edilen enerji miktarını belirlemektedir. Solar sistemlerde aydınlık düzeyi ve süresi, termoelektrik jeneratörlerde yüzeyler arası sıcaklık farkı ve yüzey alanı buna örnek gösterilebilir. Elde edilen güç değerindeki değişimlerin nedeni bu değişken parametrelerdir. Bu anlık güç değişimlerinin direkt olarak bir yüke verilmesi birçok sorunu beraberinde getirmektedir. Bu yüzden elektronik kontrol birimi olan MPPT tekniği geliştirilmiştir.

Maksimum güç noktası takibi bir sistemden çıkan güçten maksimum verim elde etmek amacıyla, çıkışta bu gücü başka bir yüke aktarmak için kullanılan tekniktir. İsmini daha çok solar sistemlerle birlikte duyduğumuz bu teknik enerji üretim cihazıyla enerji tüketen yük arasında DA-DA dönüştürücü devresi kullanılarak bir geçiş sağlamaktadır. Bu sayede maksimum güç transferi sağlanmaktadır. Elektrik üretici olarak kullanılan sistemde ortam koşullarının değişebilmesinden dolayı çıkışta değişken bir DA gerilim elde edilmektedir. Değişken bu DA gerilim MPPT tekniğiyle devrenin sürekli maksimum güce ulaştığı noktada tutulmasını sağlamaktadır.

MPPT tekniğinde kullanılan algoritmalar ile sürekli olarak gerilim ve akım değerlerinin bir önceki durum ile karşılaştırılması yapılarak MPP takibi sağlanmaktadır. TEJ’lerde çıkış gücü yük direncinin değerine göre değişmektedir. DA bir güç kaynağı düşünüldüğünde çıkış yük miktarı değiştikçe çıkış gerilim değeri güç kaynağının güç sınır değerlerine kadar sabit kalmaktadır. Ancak bir TEJ ve fotovoltaik (FV) panel için aynı durum gerçekleşmemektedir. Çünkü yük direncindeki değişimle aynı yönlü olarak çıkış gerilimi de değişecektir. Yani yük direnci artarsa gerilimde artacak yük direnci azalırsa gerilimde azalacaktır. Yük direnci azalırsa akım artacağı için TEJ üzerine düşen güç miktarı iç dirençten dolayı dahada artacaktır. Bu durum ise sistemin çalışmasını olumsuz etkileyecektir. Şekil 3.12’de TEJ modülün eşdeğer devresi verilmiştir.



Şekil 3.12. TEJ modülün eşdeğer devresi (Montecucco, 2014)

Şekil 12'deki TEJ modüle ait eşdeğer devreye göre I_{TEJ} , Eşitlik 3.1., V_L , Eşitlik 3.2. ve V_{TEJ} , Eşitlik 3.3. ile elde edilmektedir.

$$I_{TEJ} = I_L = V_{OC} / (R_{iÇ} + R_L) \quad (3.1)$$

$$V_L = I_L R_L \quad (3.2)$$

$$V_{TEJ} = V_L = V_{OC} R_L / (R_{iÇ} + R_L) \quad (3.3)$$

Burada aktarılan güç miktarı ise Eşitlik 3.4. ile hesaplanmaktadır.

$$P_L = V_L^2 / R_L \quad (3.4)$$

Bu eşitliklerden de anlaşılacağı üzere maksimum güç aktarımı TEJ'in iç direnci $R_{iÇ}$ ile yük direnci R_L 'nin birbirine eşit olduğu anda gerçekleşmektedir (Mamur & Çoban, 2020). Böylece MPP gerilimi açık devre geriliminin yarısı (Eşitlik 3.5.), MPP akımı ise kısa devre akımının yarısı (Eşitlik 3.6.) olarak gerçekleşmektedir.

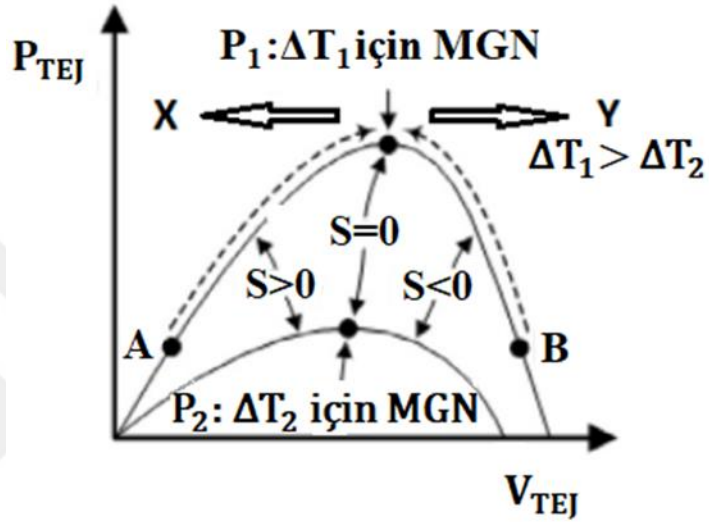
$$V_{MPP} = V_{OC} / 2 \quad (3.5)$$

$$I_{MPP} = I_{SC} / 2 \quad (3.6)$$

Bir TEJ modüle kısa devre akımı, Eşitlik 3.7. ile hesaplanmaktadır.

$$I_{SC} = V_{TEJ} / R_{i\zeta} \quad (3.7)$$

Şekil 3.13'te bir TEJ modüle ait P-V karakteristik e rresi verilmiştir.



Şekil 3.13. TEJ modüle ait P-V karakteristik e rresi

Bu grafiğe göre yatay eksen V_{TEJ} gerilimini dikey eksen ise P_{TEJ} gücünü belirtmekte olup TEJ'in yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı ise ΔT_1 ve ΔT_2 olarak verilmiştir. P_1 , ΔT_1 sıcaklık farkında oluşan MPP, P_2 ise ΔT_2 sıcaklık farkı için elde edilen MPP'dir. ΔT_1 sıcaklık farkı ΔT_2 sıcaklık farkından daha büyük bir değerdedir. Dolayısıyla grafik üzerindeki herhangi bir V_{TEJ} geriliminde ΔT_1 sıcaklık farkı için elde edilen P_{TEJ} gücü değeri ΔT_2 sıcaklık farkında elde edilen P_{TEJ} gücü değerinden daha büyük olduğu görülmektedir. Bu durum sıcaklık farkındaki artış ile TEJ modülden elde edilen gücü miktarının doğru orantılı olarak de i ti ini göstermektedir. Grafikte belirtilen S ise değişimi ifade etmektedir. Başka bir ifadeyle grafikteki e rresinin herhangi bir noktasında e riye teğet olarak çizilen paralelin eğimi yani türevidir.

Bu durumda değişim, Eşitlik 3.8. ile ifade edilir.

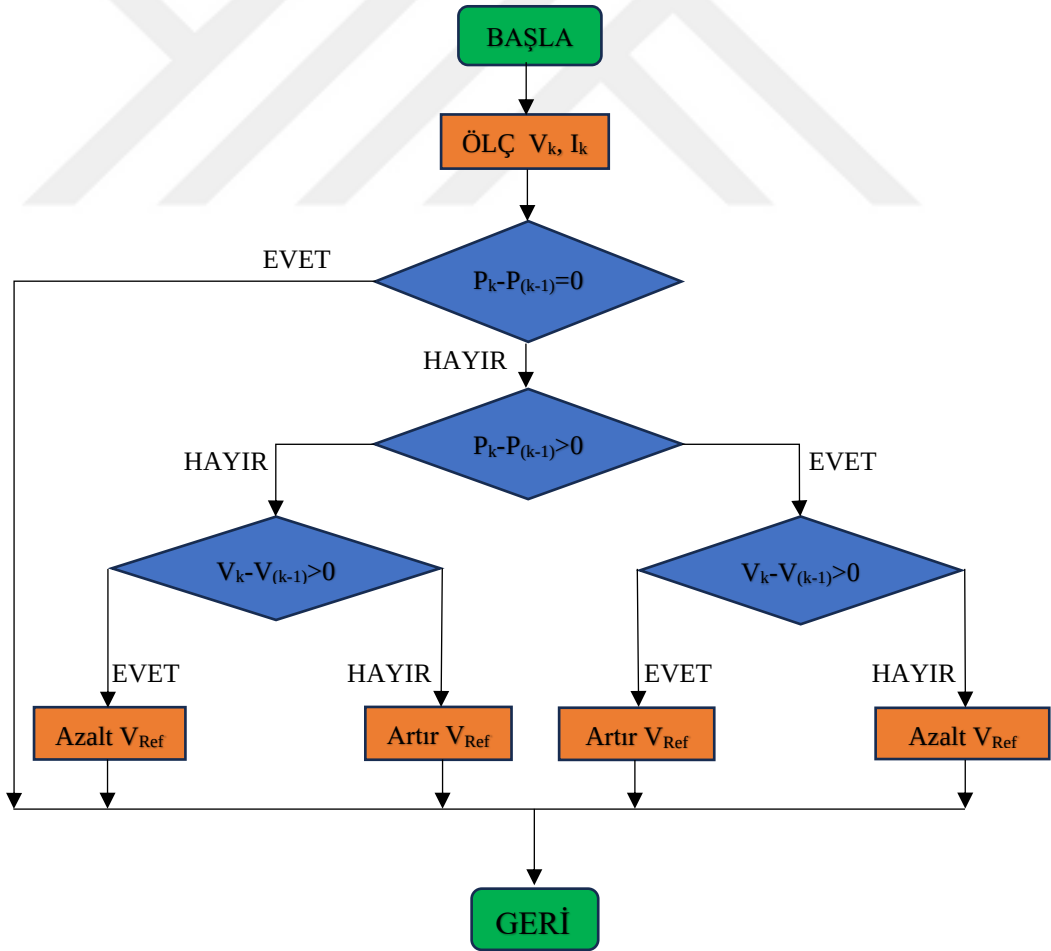
$$S = \frac{dP}{dV} \quad (3.8)$$

A noktasından P_1 noktasına doğru gerilim değerindeki artış ile birlikte güç değerinde de bir artış olmaktadır. Bu bölgede güç ve gerilim pozitif olduğundan $S > 0$ olmaktadır. P_1 ve P_2 noktalarında güçte ve gerilimde herhangi bir değişiklik olmadığından $S = 0$ olmaktadır. S'nin sıfır olduğu bu noktalar ise maksimum güç noktalarıdır. B noktasından P_1 noktasına doğru güç değerinde bir artış, gerilim değerinde ise bir azalma olmaktadır. Bu durumda güçteki değişim pozitifken gerilimdeki değişim negatif yönlüdür. Dolayısıyla B noktasında $S < 0$ olmaktadır.

Grafik üzerindeki bu A ve B noktalarının MPP'ye taşınması için MPPT tekniğinin uygulanması gerekmektedir. MPPT tekniğinde kullanılan metotlar aslında kullanılan algoritma yöntemlerini ifade etmektedir. Bu teknikte bugüne kadar birçok algoritma yöntemi kullanılmıştır. Bu algoritmaları birbirinden ayıran temel özellik ise değişime karşı gösterdikleri tepki süresidir. P&O ve INC algoritma yöntemleri MPPT tekniğinde kullanılan en yaygın metotlardandır. Bu yöntemler ile elektrik üreticinden elde edilen güç değişimleri, oluşturulan programda akım ve gerilim değerleri gözlemlenerek izlenmektedir. Böylece bu güç dalgalanmaları programın her bir döngüsünde gerilim değeri değiştirilerek önlenmektedir. Bu değişim ise DA-DA konvertörde kullanılan yarı iletkenin PWM tetikleme frekansında görev döngüsü (tetikleme doluluk oranı) değerini değiştirerek sağlanmaktadır. Tetikleme doluluk oranında yapılan bu değişikliğin etkisiyle gerilim değeri değişmektedir. Bu sayede çıkış gücü değeri sabit tutulabilmektedir. Buradan da anlaşılacağı üzere MPPT'nin iki kısımdan oluştuğu söylenebilir. Biri kontrol birimini oluşturan yazılım kısmı diğeri ise DA-DA konverter devresi ile donanım kısmıdır.

P&O Algoritmasıyla MPPT Tekniği

Şekil 3.13'te verilen P-V karakteristik eğrisinde P_1 noktasının sol tarafı X, sağ tarafı Y olmak üzere iki bölüm şeklinde belirtilmiştir. X bölgesinde başlangıç noktası olarak A'nın maksimum güç noktası olan P_1 noktasına çekilebilmesi için güç değerinin ve V_{TEJ} geriliminin artırılması gerekmektedir. Bunu sağlayabilmek için görev döngüsünün doluluk oranının azaltılması gerekmektedir. Y bölgesinde ise B başlangıç noktasının P_1 maksimum güç noktasına çekilebilmesi için güç değerinin artırılması gerekmektedir. Bunun için görev döngüsü doluluk oranının artırılarak V_{TEJ} gerilim değerinin düşürülmesi gerekmektedir. Bu koşulların gerçekleştirilebilmesi için geliştirilmiş algoritma yöntemleri vardır. Bunlardan biri de P&O algoritmasıdır. Şekil 3.14'te P&O algoritmasının akış diyagramı verilmiştir.

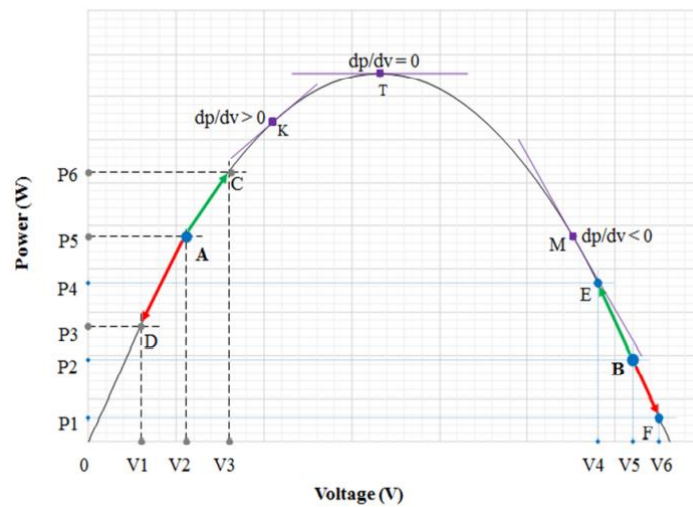


Şekil 3.14. P&O Algoritması akış diyagramı

Bu algoritma yöntemine göre her bir ardışık program döngüsünden elde edilen gerilim ve akım değerlerinin ölçülerek P_k ve $P_{(k-1)}$ güç verileri hesaplanmaktadır. Daha sonra P_k ve $P_{(k-1)}$ verilerinin karşılaştırılması yapılmaktadır. Son güç ölçüm değeri P_k programın bir önceki döngüsünden elde edilen $P_{(k-1)}$ güç değerinden büyükse ardışık iki program döngüsünden elde edilen V_k ve $V_{(k-1)}$ gerilimlerinin karşılaştırılması yapılmaktadır. $\Delta P = (P_k - P_{(k-1)}) > 0$ iken $\Delta V = (V_k - V_{(k-1)}) > 0$ ise güç noktası şekil 3.13'te verilen P-V eğrisine göre X bölgesinde ve $S > 0$ olmaktadır. Bu durumda gerilim değerinin artırılarak MPP'ye çekilmesi gerekmektedir. Bunun içinde görev döngüsü doluluk oranının azaltılması gerekmektedir. $\Delta P > 0$ iken $\Delta V < 0$ ise güç noktası Y bölgesinde olmaktadır. Bu durumda ise gerilim değerinin azaltılarak güç noktasının MPP'ye çekilmesi sağlanır. $\Delta P < 0$ iken $\Delta V > 0$ durumu gerçekleşmiş ise güç noktası Y bölgesinde olup gerilimin düşürülmesi gerekmektedir. $\Delta P < 0$ iken $\Delta V < 0$ ise güç noktası X bölgesinde olup MPP'ye ulaşabilmek için gerilimin artırılması gerekmektedir. $\Delta P = 0$ durumunda ise bir değişiklik yapılmasına gerek yoktur.

Artan İletkenlik ile MPPT Tekniği

Bir TEJ modülün P-V karakteristiğine göre maksimum güç noktasındaki gerilimden daha küçük veya daha büyük bir işletme gerilimindeki bir noktada Şekil 3.15'te gösterildiği gibi güç eğrisinin eğimi pozitif veya negatif olabilmektedir.



Şekil 3.15. P-V güç eğrisinde eğimin belirtilen noktalara göre durumları

Şekil 3.15'te T noktası maksimum güç noktası olup bu noktada eğim değeri sıfırdır (Eşitlik 3.9.). Güç değeri ise Eşitlik 3.10. ile ifade edilir.

$$0 = \frac{dP_{TEJ}}{dV_{TEJ}} \quad (3.9)$$

$$P = V \times I \quad (3.10)$$

Eşitlik 3.10.'daki P değeri Eşitlik 3.9.'da yerine yazıldığında, Eşitlik 3.11.-13. elde edilir.

$$0 = \frac{dV_{TEJ} I_{TEJ}}{dV_{TEJ}} \quad (3.11)$$

$$0 \cong I_{TEJ} + V_{TEJ} \frac{\Delta I_{TEJ}}{\Delta V_{TEJ}} \quad (3.12)$$

$$\frac{\Delta I_{TEJ}}{\Delta V_{TEJ}} = - \frac{I_{TEJ}}{V_{TEJ}} \quad (3.13)$$

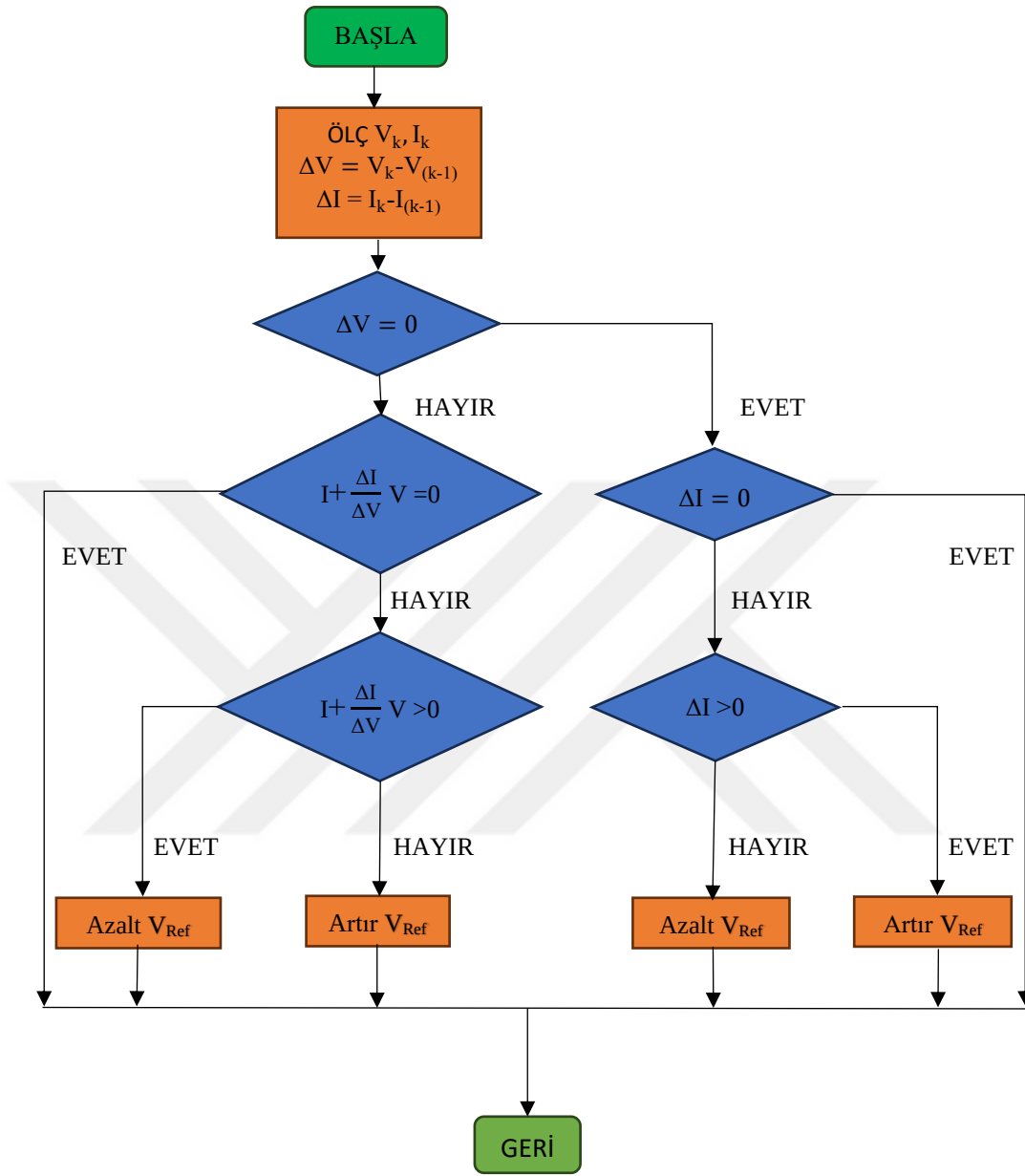
Buradan, V_L yük geriliminin V_{MPP} 'ye göre durumları Eşitlik 3.14-15-16'da belirtilmiştir.

$$\frac{\Delta I_{TEJ}}{\Delta V_{TEJ}} = - \frac{I_{TEJ}}{V_{TEJ}} \text{ için } V_L = V_{MPP} \quad (3.14)$$

$$\frac{\Delta I_{TEJ}}{\Delta V_{TEJ}} > - \frac{I_{TEJ}}{V_{TEJ}} \text{ için } V_L < V_{MPP} \quad (3.15)$$

$$\frac{\Delta I_{TEJ}}{\Delta V_{TEJ}} < - \frac{I_{TEJ}}{V_{TEJ}} \text{ için } V_L > V_{MPP} \quad (3.16)$$

Bu şartlara göre negatif anlık iletkenlik değeri, artan iletkenlik değerine eşit olduğunda MPP'ye ulaşılmaktadır (Yahya 2018). Şekil 3.16'da INC algoritmasının akış şeması verilmiştir.



Şekil 3.16. Artan iletkenlik algoritması akış diyagramı

Şekil 3.16'daki Artan iletkenlik algoritmasına göre ardışık iki program döngüsünde ölçülen anlık I ve V değerlerinin farkı ΔI ve ΔV olarak hesaplanmaktadır. Bu hesaplamadan sonra ΔV değerinin aldığı değere göre $\Delta I/\Delta V$ değeri ile o döngü içerisindeki $-I/V$ değerinin arasındaki eşitliklere bakılmaktadır. Diğer bir kontrol ise ΔI 'nın aldığı değerlere göre yapılmaktadır.

$\Delta V \neq 0$ iken $\Delta I / \Delta V = -I / V$ olması P_{TEJ} gücünün maksimum noktada olduğunu göstermektedir. Bu durumda görev döngüsü oranında herhangi bir değişiklik yapılmamaktadır. Eğer $\Delta I / \Delta V > -I / V$ durumu oluşmuşsa MPP noktasına ulaşmak için görev döngüsü oranının (D) artırılması gerekmektedir. Böylece gerilim değeri azalmaktadır. $\Delta I / \Delta V < -I / V$ olması durumunda ise MPP'yi elde edebilmek için D'nin azaltılması gerekmektedir.

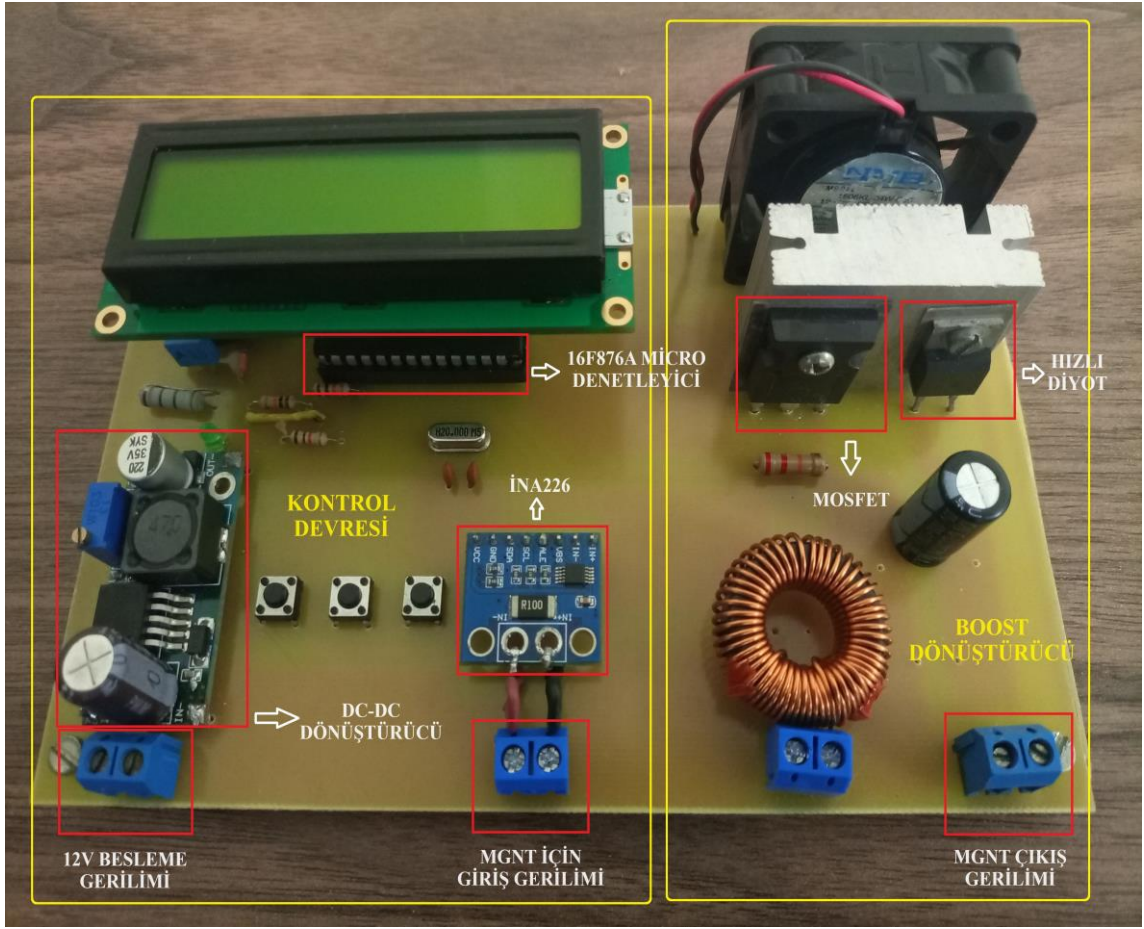
$\Delta V = 0$ iken $\Delta I = 0$ ise görev döngüsü oranı değişmeyecektir. $\Delta I > 0$ olduğunda D'nin azaltılarak, $\Delta I < 0$ durumu gerçekleşmişse D değeri artırılarak MPP'ye ulaşılmaktadır.

3.2. Yöntem

Bu bölümde Matlab ile simülasyonu yapılan devrenin bir prototipi yapılarak değiştir-gözetle ve artan iletkenlik algoritmalarının davranışlarının incelenmesi için bir deney düzeneği hazırlanmıştır. Bu deney düzeneği ölçüm değerlerinin alındığı ölçü aletlerinden, deney tezgahından, elektrik üretiminde kullanılan fotovoltaiik panel ve UV lamba düzeneğinden oluşmaktadır. Oluşturulan sistemin ve tasarımı gerçekleştirilen devrenin özellikleri bu bölümde açıklanmaktadır.

3.2.1. Tasarımı Gerçekleştirilen Devre

Tasarımı gerçekleştirilen devre MPPT algoritmalarının kontrol edildiği bir kontrol birimi ve gücün aktarıldığı yükseltici dönüştürücü biriminden oluşmaktadır. Bu devre 12 voltluk bir DA besleme gerilimi ile çalıştırılmaktadır. Ancak devre elemanları 5 voltluk bir DA gerilim ile çalıştığından 12 voltluk besleme gerilimi DA-DA dönüştürücü ile önce 7 voltluk gerilime dönüştürülmüştür. Daha sonra bu 7 voltluk gerilim bir gerilim regülatörü üzerinden geçirilerek sabit 5 voltluk bir gerilim elde edilmiştir. Bu sayede devrede olumsuz etki oluşturabilecek gerilim dalgalanmalarının önüne geçilmesi amaçlanmıştır. Şekil 3.17'de uygulama devresi gösterilmiştir.

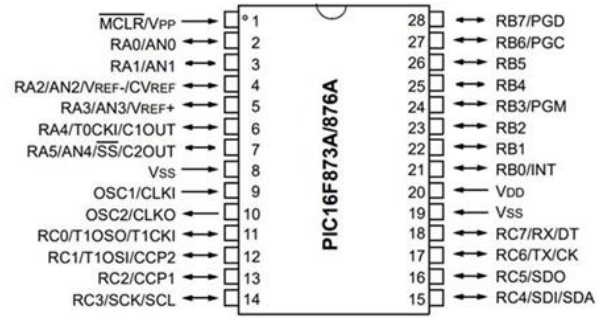


Şekil 3.17. Uygulama Devresi

Devrenin kontrol birimi MPPT algoritmalarının işlendiği kısım olarak tanımlanabilir. Kontrolü ise devrede kullanılan PIC16F876A mikro denetleyicisi ile sağlanmaktadır. Birçok uygulamada yaygın olarak kullanılan bu mikro denetleyici ihtiyaç duyulan giriş, çıkış donanımlarını ve hafıza kapasitesini karşılıyor olmasından dolayı tercih edilmiştir. Şekil 3.18’de devrede kullanılan mikro denetleyici ve bu mikro denetleyiciye ait pin bağlantı uçları verilmiştir. Bu mikro denetleyicide toplamda 28 adet pin bağlantı ucu bulunmaktadır. Pin uçları A, B, C olmak üzere üç portta bulunmaktadır. A, B ve C portları hem giriş hem de çıkış olarak seçilebilmektedir. Ayrıca A portu analog giriş olarak kullanılabilir.



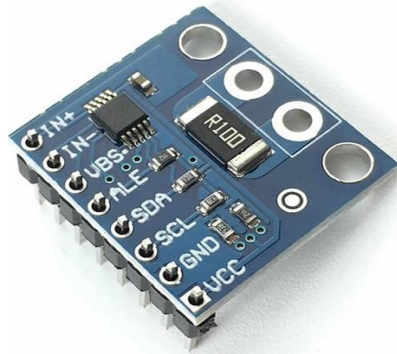
a)



b)

Şekil 3.18. a) PIC16f876A mikrodnetleyici entegresi b) PIC16f876A giriş çıkış pin diyagramı

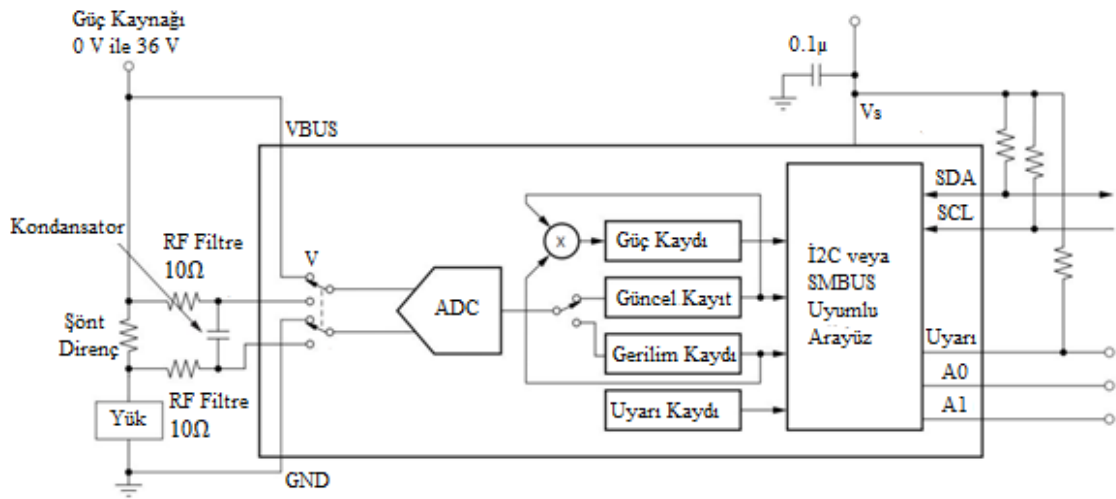
MPPT algoritmalarının işlenebilmesi için TEJ'in çıkış akım gerilim ve güç bilgilerinin biliniyor olması gerekmektedir. Dolaysı ile ölçüm noktaları kontrol biriminin önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Burada elde edilen ölçüm sonuçlarındaki dalgalanmalar devrenin düzgün çalışmasını etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Bu nedenle elde edilen sonuçların yazılım içerisindeki örnekleme sayısı büyük önem arz etmektedir. Tasarımı yapılan uygulama devresinde bu faktör göz önünde bulundurularak devrede akım gerilim ve güç ölçümlerini yapan Şekil 3.19'da ki INA 226 modülü kullanılmıştır.



Şekil 3.19. INA 226 akım gerilim ve güç modülü

INA 226 modülünün birçok avantajı bulunmaktadır. INA 226 entegresinin 16 bit ADC çözünürlüğüne sahip olması yüksek hassasiyetle ölçüm yapılmasını sağlamaktadır. Modül üzerinde bulunan şönt direnç ile akım değeri ve V_{BS} pini üzerinden DA gerilim değeri ölçülmektedir. Burada akım sınır değeri şönt direncin değerine bağlı olarak değiştirilebilmektedir. Bu ise INA 226 modülünün bir başka avantajıdır. Ayrıca ortalama

alma sayısı ve dönüşüm süresi modülün yapılandırma ayarlarında belirlenerek çalışma modu modüle programlanabilmektedir. Kalibrasyon ve yapılandırma ayarları belirlendikten sonra akım ve gerilim değerleri ölçülebilmektedir. Bu aşamadan sonra ise elde edilen ölçüm sonuçlarından güç değerini entegre kendi hesaplamaktadır. Uygulama devresinde kullanılan İNA 226 modülü 0-36 volt arasındaki gerilimi ve 1.2 ampere kadar olan akım değerlerini ölçebilmektedir (Texas Instruments, 2011). Bu ise ölçülebilir güç değerinin düşük olduğunu göstermektedir. Gerilimin ölçüm sınır değerlerinin küçük olması bu modülün bir dezavantajı olarak değerlendirilebilir. Şekil 3.20’de INA 226 modülünün blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 3.20. INA 226 modülünün blok diyagramı (Texas Instruments, 2011)

INA 226 cihazı üzerinden geçen akım değerini belirleyebilmek için Şekil 3.20’de görüldüğü gibi şönt direncin uçları arasındaki fark geriliminin ölçülmesi ve cihazın bu değeri raporlayabilmesi için şönt direncin değerinin ve akımın ölçüm çözünürlüğünün programlanarak cihaza kaydedilmesi gerekmektedir. Ayrıca INA 226 modülünde örnekleme sayısının, akım gerilim ölçüm çevrim sürelerinin belirlenerek yapılandırma ayarlarında ayrı ayrı programlanması gerekmektedir. Kalibrasyon ve konfigürasyon ayarlarında belirtilen her bir parametrenin modül içinde bir kayıt adresi bulunmaktadır. Mikro denetleyici istenen verileri bu adresler üzerinden okuma veya yazma yaparak modül ile veri alışverişinde bulunmaktadır. Tablo 3.2’de uygulama devresinde kullanılan INA 226 modülüne ait bazı veri adresleri, isimleri ve tipleri belirtilmiştir. Bu tabloya göre

hex değerleri 01, 02, 03, 04 olarak verilen kayıt adreslerinde bulunan veriler sadece okunabilir verilerdir. Yapılandırma ve kalibrasyon olarak belirtilen ve hex değerleri sırasıyla 00 ve 05 olan kayıt adresleri hem okunabilir hem de yazılabilir verileri içermektedir.

Tablo 3.2. INA 226 modülüne ait veri adresleri, isimleri, tipleri ve değerleri

Kayıt Adresi(hex)	Kayıt Adı	Kayıt Tipi
00h	Yapılandırma Kaydı	Okuma/Yazma
01h	Şönt Voltaj Kaydı	Okuma
02h	Voltaj Kaydı	Okuma
03h	Güç Kaydı	Okuma
04h	Akım Kaydı	Okuma
05h	Kalibrasyon Kaydı	Okuma/Yazma

Uygulama devresinde 00h adresindeki yapılandırma değeri yapılan deneylere göre değişkenlik göstermekte olup, 05h adresindeki kalibrasyon değeri ise 0x0033 olarak hesaplanmıştır (Texas Instruments, 2011).

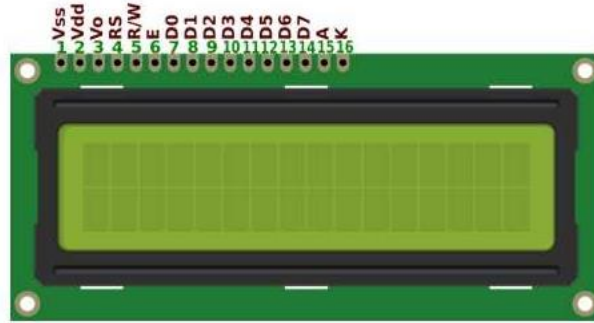
INA 226 cihazı i²c haberleşme protokolü ile veri akışını desteklemektedir. Dolaysı ile mikro denetleyici yapısındaki i²c donanımı sayesinde yazılım eşliğinde Tablo 3.2’de verilen adreslerden modül üzerindeki scl ve sda pinlerini kullanarak okuma ve yazma işlemleri gerçekleştirmektedir.

Uygulama devresinde kullanılan fonksiyon tuşları Şekil 3.21’de gösterilmiştir. Bu devrede numaraları ile birlikte verilen üç adet kalıcı olmayan tip buton kullanılmıştır. Bir numaralı buton mikrodenetleyicide meydana gelebilecek herhangi bir olumsuz durumda devreyi resetlemek için kullanılmaktadır. İki numaralı buton devrede MPPT sisteminin başlatılıp durdurulması ve devrenin hangi algoritma ile çalışacağını belirlenmesi için kullanılmaktadır. Üç numaralı buton ise 2X16 LCD ekranda sayfalar arası geçişi sağlamaktadır.



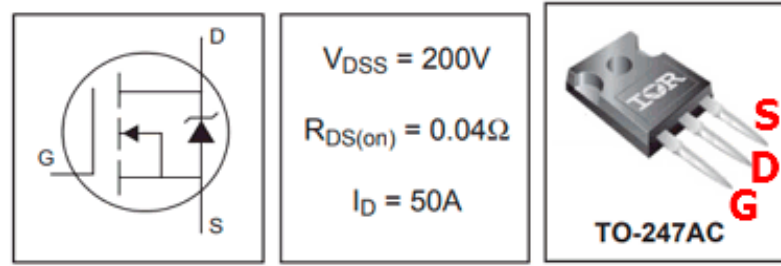
Şekil 3.21. Devrede kullanılan fonksiyon butonları

Akım, gerilim, güç gibi değerlerin okunabilmesi için devrede 2x16 LCD ekran kullanılmıştır. Şekil 3.22’de 2x16 LCD ekran görseli verilmiştir. Bu ekranda iki adet veri sayfası bulunmaktadır. İlk sayfada MPPT girişine ait gerilim, akım, güç ve programın bir önceki döngüsünden elde edilen güç değerleri bulunmaktadır. İkinci sayfada ise görev döngüsünün değişim miktarı ve yüzde değeri, güç farkı ve sistemin ulaşabildiği maksimum güç değeri bulunmaktadır.



Şekil 3.22. 2x16 LCD Ekran

Devrede kullanılan tetiklemeli yarıiletken, Şekil 3.23’te gösterildiği gibi IRFP260N model mosfet olarak tercih edilmiştir. Bu mosfet N kanal olup maksimum gerilimi 200 V akım taşıma kapasitesi ise 50 A değerlerindedir (International Rectifier).



Şekil 3.23. Irfp260n mosfet bağlantı uçları ve akım gerilim değerleri (International Rectifier)

Uygulama devresinde kullanılan diyot ise rhr15120 kodu ile verilen hyperfast diyottur. Bu diyotun gerilim değeri 1200 V olup akım taşıma kapasitesi ise 15 amper değerindedir (Fairchild Semiconductor, 2013). Tablo 3.3'te devrede kullanılan ekipmanlar verilmiştir.

Tablo 3.3. Devrede kullanılan bazı ekipmanlar

Ekipman	Açıklama
16F876A Mikrodenetleyici	20 Mhz osilatör frekansı
LM2596 ayarlanabilir voltaj düşürücü güç modülü	Giriş 4-35 V DA gerilim Çıkış 1-30 V DA gerilim
LCD ekran	2X16 karakter
INA 226	Akım, gerilim, güç ölçüm modülü
Irfp260n mosfet	200V Gerilim 50 A akım
Rhr15120 hyperfast diyot	1200 V Gerilim 15 A akım
Fan	12 V DA gerilim
LM7805 gerilim regülatörü	Giriş 7-35 V DA gerilim Çıkış 5 V Sabit DA Gerilim

3.2.2. Deney Düzenegi

Tasarımı gerçekleştirilen devrede MPPT algoritmalarının ve bu algoritmaların uygulama alanı olan DA-DA yükseltici dönüştürücünün işlevselliğinin analizi için bir deney düzenegi hazırlanmıştır. Bu deney düzeneginde yapılan ölçümler güneş paneli ve bu panelden enerji üretilmesini sağlayan bir adet UV lamba kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tablo 3.4'te kullanılan deney düzenegine ait modüllerin bilgileri verilmiştir.

Tablo 3.4. Deney düzenegine ait modüllerin bilgileri

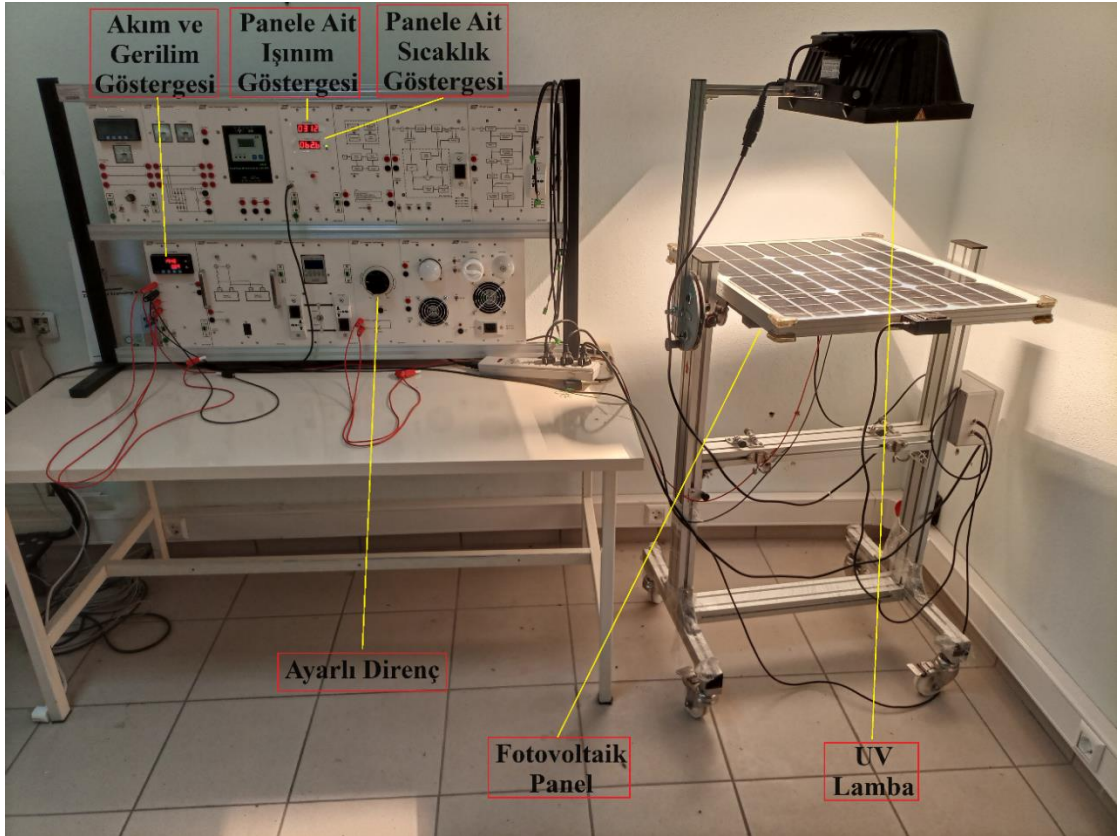
Test düzenegi modülleri	V (AA-DA)	I (A)	P (W)
Güneş paneli	17,5 DA	2,86	50
Halojen lamba	220 AA	4,55	1000
Dimmer	220 AA	-	1200
Akü bankası modülü (14.4 Ah)	12 DA	-	-
MPPT solar şarj denetleyici modülü	-	-	150
DC-AC çevirici modülü	-	-	300
Şebeke bağlantısı invertör modülü	-	-	400
Üç fazlı doğrultucu modülü	100 AA	10	-
Rüzgâr ve güneş hibrit denetleyici modülü	-	-	130
DC jeneratör yük direnci modülü (100 Ω)	-	10	200

Bu deneyde kullanılan güneş paneli 50 W güç, 17.5 V gerilim ve 2.86 A akım üretebilmektedir. Panelin açık devre voltajı 21.5 V kısa devre akımı ise 3.23 A değerlerindedir. Bu düzenekte UV lambanın ışınım miktarını değiştirebilmek için kullanılan ayar potansiyometresi Şekil 3.24'te gösterilmiştir.



Şekil 3.24. Panelin ışınım miktarını değiştirmek için kullanılan UV lambaya ait ayar potu

Paneldeki ışıınım miktarını ve panelin sıcaklık değeriini ölçmek için panel üzerinde sensörler bulunmaktadır. Bu sensörlerden elde edilen ölçüm değeriileri ise göstergeler ile izlenebilmektedir. Ayrıca panelin çıkış voltajını ve akım değeriini ölçen bir gösterge deney düzeneğı içerisinde mevcut olup gösterge bu çalışmada kullanılmamıştır. Deneyde yük olarak 0 ile 100 Ω arasında değıştirilebilen ayarlı bir direnç düzenek içerisinde bulunmaktadır. Şekil 3.25'te deney düzeneğinin genel bir görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.25. Deney düzeneğinin genel bir görüntüsü

Şekil 3.26'da gösterildiğı gibi UV lamba panel üzerinde ışınların panele dik olacak şekilde yansıması sağlanarak konumlandırılmıştır. Bu sayede panelden maksimum oranda güç elde edilmesi amaçlanmıştır. Fotovoltaik panelin enerji çıkışları doğrudan MPPT devresinin girişine bağlanmıştır. MPPT devresinin çıkışı ise deney tezgâhı içerisinde mevcut olan 0 ile 100 Ω aralığında değıştirilebilen ayarlı bir dirence bağlanmıştır. Daha sonra devrenin çalışması için besleme gerilimi olarak 12 V DA güç kaynağı bağlantıları yapılmıştır.



Şekil 3.26. UV lamba ve fotovoltaik panel

3.2.3. Performans Kriterleri

Bu bölümde devrenin hangi şartlar altında testlerinin gerçekleştirildiği hem simülasyon devresi hem de uygulama devresi için ayrı ayrı açıklanmıştır.

Matlab/Simulink Devresi için Performans Kriterleri

Matlab ile yapılan simülasyon devresinde seri ve paralel bağlı TEJ modülün çıkışına uygulanan sekiz farklı yük direnci değerlerine göre testleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra seri ve paralel bağlı TEJ modülüne DA-DA yükseltici dönüştürücü bağlanarak önce

P&O algoritmaları ile TEJ yüzeylerindeki sabit sıcaklık farkı altında sekiz farklı yük direnci değerlerinde yük değişimleri yapılarak testleri yapılmıştır. Bu deneyden sonra aynı devre üzerine INC algoritması uygulanarak simülasyon testleri tamamlanmıştır. Bu simülasyon çalışmasında yapılan üç deney yöntemi için tüm şartlar aynı olacak şekilde ayarlanmıştır.

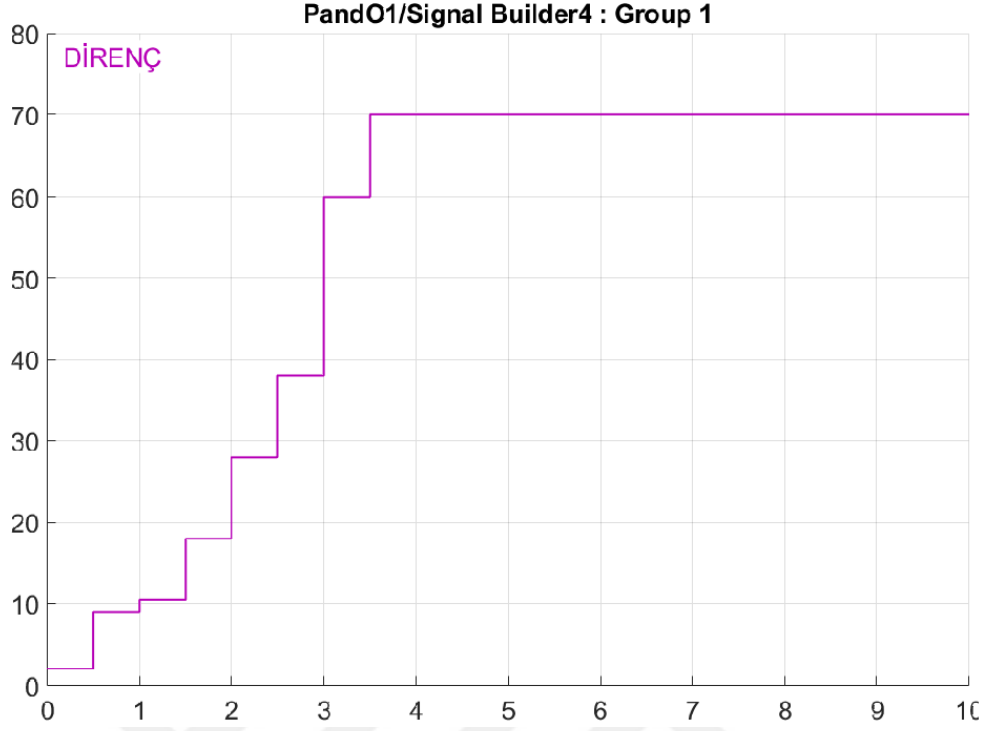
MPPT yokken yapılan simülasyon çalışmasında TEJ modüllerin sıcak ve soğuk yüzeyleri arasındaki sıcaklıklar sabit değerli olarak alınmıştır. Dolayısıyla yüzeyler arasındaki sıcaklık farkları da sabit bir değer olacaktır. Bu modelde çıkış yükü için kullanılan dirençler zamana bağlı olarak değişmektedir. Tablo 3.5'te zamana göre direnç değerlerindeki değişimler verilmiştir.

Tablo 3.5. Zamana bağlı yük direnci değerleri

Zaman(sn)	0-0.5	0.5-1	1-1.5	1.5-2	2-2.5	2.5-3	3-3.5	3.5-4
Direnç (Ω)	2	9	14	18	28	38	60	70

Bir termoelektrik modülün iç direnci $0,7 \Omega$ olduğundan, her bir TEJ modül grubu için 20 adet TEJ modül birbirine seri olarak bağlandığında her bir modül grubunun iç direnci $20 \times 0,7 = 14 \Omega$ değerinde olmaktadır. Paralel bağlı iki TEJ modül grubunun iç direnci ise $14/2 = 7 \Omega$ olmaktadır. Yani maksimum güç değerine 7Ω 'luk direnç değerinde ulaşılmaktadır. TEJ modül gruplarına $T_H = 250^\circ\text{C}$, $T_C = 30^\circ\text{C}$ olacak şekilde 220°C 'lik sabit sıcaklık farkı uygulanmıştır. Bir TEJ modülün girişinde sürekli sabit bir sıcaklık farkı oluşması beklenmez ancak burada değişken yük etkisinde devrenin nasıl bir tepki göstereceğini görmek için sabit bir sıcaklık farkı uygulanmıştır. DA-DA yükseltici dönüştürücü devresinde bobin 1 mH , kondansatör ise 1 mF olarak seçilmiştir.

Bir enerji sisteminde tüketilen güç talep miktarına göre değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle simülasyonda modellenen devreye değişken direnç uygulanmıştır. Burada, belirlenen zaman dilimlerine göre uygulanan direnç değerleri Şekil 3.27'de verilmiştir. Bu grafiğe göre her 0.5 saniyede yük direnci 2Ω dan başlanarak sırasıyla 9, 14, 18, 28, 38, 60 ve 70Ω değerlerine çıkartılarak 4 saniye boyunca devrenin tepkileri incelenmiştir.



Şekil 3.27. Zamana göre uygulanan direnç değerleri

DA-DA yükseltici dönüştürücünün çıkış değerlerini etkileyen diğer faktörler ise devrede kullanılan yarıiletken malzemenin tetikleme frekansı ve görev döngüsüdür. Devreye uygulanan frekans sabit bir değer olup 20 kHz değerindedir. Burada frekans bobin ve kondansatörün tetikleme sıklığını, görev döngüsü ise bir periyottaki bobin ve kondansatöre uygulanan gerilim süresinin oranını ifade etmektedir. Görev döngüsü MPPT sisteminde uygulanan algoritmalar ile belirlenmektedir. Bu sayede maksimum güç değeri sabit tutulabilmektedir.

Uygulama Devresi için Performans Kriterleri

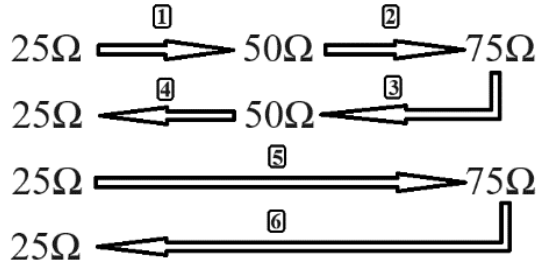
Uygulama devresi ile yapılan deneylerde elektrik üretici olarak fotovoltaik panel kullanılmıştır. Fotovoltaik panelin ışınlam miktarı ise UV lambanın ayar potu ile 312 W/m^2 değerinde bütün deneylerde aynı olacak şekilde ayarlanmıştır. Deneyler sırasıyla gerçekleştirildiğinden zamanla panel sıcaklığı değiştiği için yapılan deneylerde panel sıcaklıkları arasında farklılıklar oluşmuştur. Tablo 3.6 ortalama alma sayısı, dönüştürme süresi ve algoritma türüne göre deney başlangıçlarında kaydedilen sıcaklık değerlerini göstermektedir. Ayrıca bu çizelgede deneyler yapılma sıralarına göre numaralandırılarak

belirtilmiştir. Tabloda her bir ortalama alma sayısı altında belirtilen deney numaralarına göre deneyler yukardan aşağıya doğru sırasıyla yapılmıştır. Ardışık iki deney bittiğinde UV lamba enerjisi ve panel kapatılarak ortalama alma sayısı artırılıp bir sonraki deney parametreleri hazırlanmıştır. Bu süreç içerisinde panelin bir miktar soğuması sağlanmıştır. Her iki algoritma türü için belirlenen aynı ortalama alma sayısı ve dönüştürme süresine göre deneyler 6 ayrı direnç değişimi için önce P&O algoritmasında daha sonra da INC algoritmasında olacak şekilde yapılmıştır.

Tablo 3.6. Ortalama alma sayısı, dönüştürme süresi ve algoritma türlerine göre deney başlangıçlarında kaydedilen sıcaklık değerleri ve deney numaraları

Dönüştürme Süresi	1.1 ms			2.116 ms		
Ortalama Alma Sayısı	64	128	256	64	128	256
Deney No	1	3	5	7	9	11
P&O (°C)	73.2	72.6	75	79	68.3	73.6
Deney No	2	4	6	8	10	12
INC (°C)	80	78.1	80.2	83.3	77.3	80.4

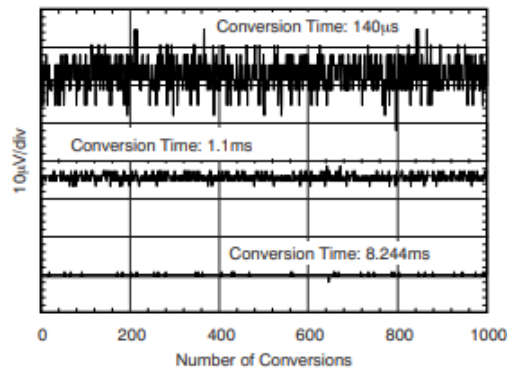
MPPT devredeyken yapılan ölçümler INC ve P&O algoritmaları için ayrı ayrı yapılmış olup yapılan bütün ölçümler için panel sıcaklığı hariç aynı koşullar sağlanmıştır. Deneylerde değişken parametreler kullanılmış olup bu parametrelerin ilkinin yük direnci oluşturmaktadır. Yük direnci değerleri maksimum gücün elde edildiği $R_L = 25 \Omega$ değerinden başlanarak önce $R_L = 50 \Omega$ değerine daha sonrada 75Ω değerine yükseltilmiştir. 75Ω , yük direncinin maksimum değeri olarak belirlenmiştir. Deney 75Ω dan sonra tekrar 50Ω değerine ve bundan sonrada 25Ω değerine kademeli olarak düşürülmüştür. Bu aşamaya kadar yük direnci değişimleri 25Ω olarak gerçekleştirilmiştir. Bundan sonraki aşamalarda ise yük direnci değişimi 50Ω değerine çıkartılarak önce 25Ω dan 75Ω 'a yükseltilmiştir. Son olarak ise 75Ω 'dan 25Ω değerine tekrar düşürülmüştür. Yük direncindeki bu değişimlerin tamamı maksimum güç noktasına ulaştıktan belirli bir süre sonra gerçekleştirilmiştir. Böylece yük direncinde altı farklı değişim sırasıyla gerçekleştirilerek deneyler yapılmıştır. Şekil 3.28'de MPPT devredeyken yapılan deneylerdeki yük direncin değişimleri gösterilmiştir.



Şekil 3.28. Deneylerdeki yük direnci değişimleri

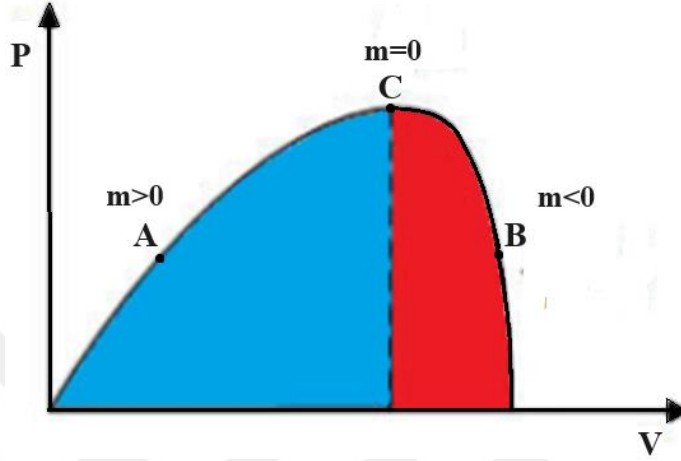
Deneylerdeki bir diğer değişken parametre ise INA 226 akım gerilim ve güç sensöründen alınan değerlerin ölçümünde kullanılan ortalama alma sayısı ve dönüştürme süresi olmuştur. Ortalama alma sayısı ardışık olarak alınan her bir ölçüm değerinin toplanarak ölçüm adet sayısına bölünmesiyle elde edilmektedir. INA 226 modülünde ortalama alma sayısı 1, 4, 16, 64, 128, 256, 512, 1024 ile sekiz farklı değerde isteğe bağlı olarak belirlenmektedir. Dönüştürme süresi olarak ise 140 μ s, 204 μ s, 332 μ s, 588 μ s, 1.1ms, 2.116 ms, 4.156 ms, 8.244 ms olmak üzere sekiz farklı süre seçeneği tercih edilebilmektedir. Bu çalışmada 64, 128, 256 ortalama alma adedi sayısında ve 1.1 ms, 2.116 ms dönüştürme süreleri için P&O ve INC algoritmalarına göre deneyler gerçekleştirilmiştir. Her bir ortalama alma adedi sayısı için bu iki dönüştürme süreleri kullanılarak iki algoritma türünde toplamda 12 deney için sonuçlar elde edilmiştir.

Ortalama alma ve dönüştürme süresi sinyaller üzerinde filtreleme yaparak ölçüm değerlerinde dalgalanmaları önlemektedir. Şekil 3.29’da dönüştürme sürelerine göre elde edilen sinyallerin durumları gösterilmektedir. Bu şekile göre dönüştürme süresi arttıkça daha doğrusal bir sinyal olduğu görülmektedir.



Şekil 3.29. Dönüştürme sürelerine göre sinyal durumları

Deneylerdeki son değişken parametre ise PWM tetiklemedeki görev dngs değişim oranıdır (w). Bu oran TEJ ve fotovoltaiik panel çıkışındaki gerilimin değişimini sağlamaktadır. şekil 3.30’da TEJ modülüne ait P-V karakteristik eğrisi gösterilmiştir.



şekil 3.30. P-V karakteristik eğrisi

Görev dngs oranının sabit adımlarla değişiminin bazı dezavantajları vardır. Eğer bu değişim oranı küçük adımlarla olursa sistemin maksimum noktaya ulaşma süresi uzayacaktır. Eğer adım aralığı büyük olursa sistem istenildiği gibi P_{MPP} noktasına ulaşamayacak ve bu noktanın sağında ve solunda sürekli salınım yapacaktır. şekil 3.30’daki P-V karakteristik eğrisi üzerinde A, B, C noktaları belirtilmiştir. A noktasından C noktasına gidildikçe eğri üzerindeki her bir noktanın eğimi azalmakta ve C noktasında sıfır olmaktadır. Dolayısıyla bu çalışmada eğri üzerindeki iki noktadan geçen doğrunun eğimi görev dngs oranının değişim miktarını belirtmektedir. Burada eğim Eşitlik 3.17. ile ifade edilmektedir.

$$m = \frac{P_k - P_{(k-1)}}{V_k - V_{(k-1)}} \quad (3.17)$$

Sistemde P-V karakteristik eğrisindeki güç noktası C noktasının sağında veya solunda olabilmektedir. Eğer güç noktası C noktasının sağ tarafında kalırsa eğim negatif olmaktadır. Bu ise görev dngs değişim miktarının da negatif olmasına ve dolayısıyla algoritmaların yanlış işlemesine sebep olmaktadır. Sistemde böyle bir sorunun

oluşmaması için görev döngüsü değişim oranı (w) mutlak eğime $|m|$ göre belirlenmelidir. Bu çalışmada görev döngüsü değişim oranının maksimum değeri $w=5$ olarak belirlenmiştir. Bu orana göre görev döngüsünün değişim miktarının en büyük değeri %2 olmaktadır. Bu değişim miktarı ise mikro denetleyiciye yüklenen program ile Eşitlik 3.17'ye göre hesaplanmaktadır. Yapılan hesap neticesinde görev döngüsünün değişim miktarı %0 ile %2 arasında bir değer almaktadır.

Bu deneylerde veriler ilk olarak Rigol marka ve DS 1102Z-E model bir osiloskop üzerinden alınmıştır. Bu osiloskop 100 Mhz bant genişliğine sahip olup CH1 ve CH2 olmak üzere iki kanal kullanılarak ölçümler yapılabilmektedir. Bu kanallardan yapılan ölçümler ile ilgili parametreler cihaz üzerinden ayarlanmaktadır. Bu cihazda iki kanal ile aynı anda ölçüm yapıldığında saniyede 500 Msa örnekleme, tek kanal kullanıldığında saniyede 1Gsa örnekleme yapılabilmektedir. Osiloskop ekranında yatay eksen (X eksen) zaman değerini ifade edip 2.00 ns hassasiyetle ölçüm yapabilirken dikey eksen (Y eksen) ise kanallardan yapılan ölçümün değerini göstermekte olup en düşük 1 mV hassasiyetle ölçüm yapılabilmektedir.

Osiloskop voltaj cinsinden ölçüm yaptığı için ölçüm değişkenlerinin voltaja dönüştürülmesi gerekmektedir. Deneylerde osiloskop ile devrenin MPPT girişindeki DA voltaj ve akım değerlerinin ölçümleri yapılmaktadır. Dolayısıyla akım değerlerinin voltaja dönüştürülerek osiloskop bağlantısının yapılması gerekmektedir. Akım değişkeni için ölçülen osiloskop girişindeki voltaj değerinin akım değeri ile birebir aynı olması için INA169 akım sensörü kullanılmıştır. Bu sensör 5 V DA besleme gerilimi ile çalışmakta olup 0-5 V aralığında analog çıkış vermektedir. Sensörün akım ölçüm aralığı ise 0-5 A değerleri arasındadır. Yani sensörden geçen akım değeri, bir amper iken sensörün analog çıkış değeri bir volt beş amper iken sensörün analog çıkış değeri beş volt olmaktadır. Böylece sensörden ölçülen akım değeri herhangi bir dönüştürmeye ihtiyaç olmadan doğrudan sensörün analog çıkış voltajına eşit olmaktadır.

Diğer bir yöntemde ise gerilim, akım, güç ve görev döngüsü bilgileri uygulama devresi ile bilgisayar arasında RS232 usb dönüştürücü kullanılarak bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Bu veriler bilgisayarda hyper terminal programı ile alınıp TXT formatında doküman olarak kaydedilmiştir. Daha sonra TXT formatındaki dosyalar excele

dönüştürülmüştür. Bu çalışmada verilen deney grafikleri oluşturulan excel dosyalarının Matlab programında işlenmesi ile elde edilmiştir. Her bir deney sonucunda elde edilen veri adedi sayısı farklı değerlerde olmuştur. Veri adedi sayılarının farklı değerlerde olması deneyler tek bir grafik üzerinde gösterilirken direnç değişiminin başlangıç anlarının farklı noktalarda olmasına sebep olmuştur. Dolaysı ile aynı direnç değerleri için grafiklerde verilen direnç değişim anlarının başlangıcı aynı noktada olacak şekilde grafikler oluşturulmuştur. Bu nedenle direnç değişim anlarının MPP'deki aynı noktadan itibaren başlaması için değişim anından önceki ve MPP'ye tekrar ulaştıktan sonraki veriler değiştirilmemek kaydı ile veri sayıları azaltılmıştır. Bunun amacı ise farklı deneylerin MPP'ye ulaşma süreleri arasındaki farkların net olarak görülebilmesini sağlamaktır. Ancak bu durum sadece iki ayrı deney tek bir grafik üzerinde gösterilirken uygulanmıştır. Bu çalışmada belirtilen süreler ise deneyler başlatıldığı andan bittiği ana kadar ve bu deney süreci boyunca her bir yük direnci değişim anından MPP'yi yakaladığı ana kadar olan süreler bir kronometre aracılığı ile ölçülerek elde edilmiştir. Bir verinin elde edilme süresi ise bir deneydeki bütün yük değişimleri için geçen toplam sürenin o deney için elde edilen toplam veri sayısına bölünmesi ile hesaplanmıştır.

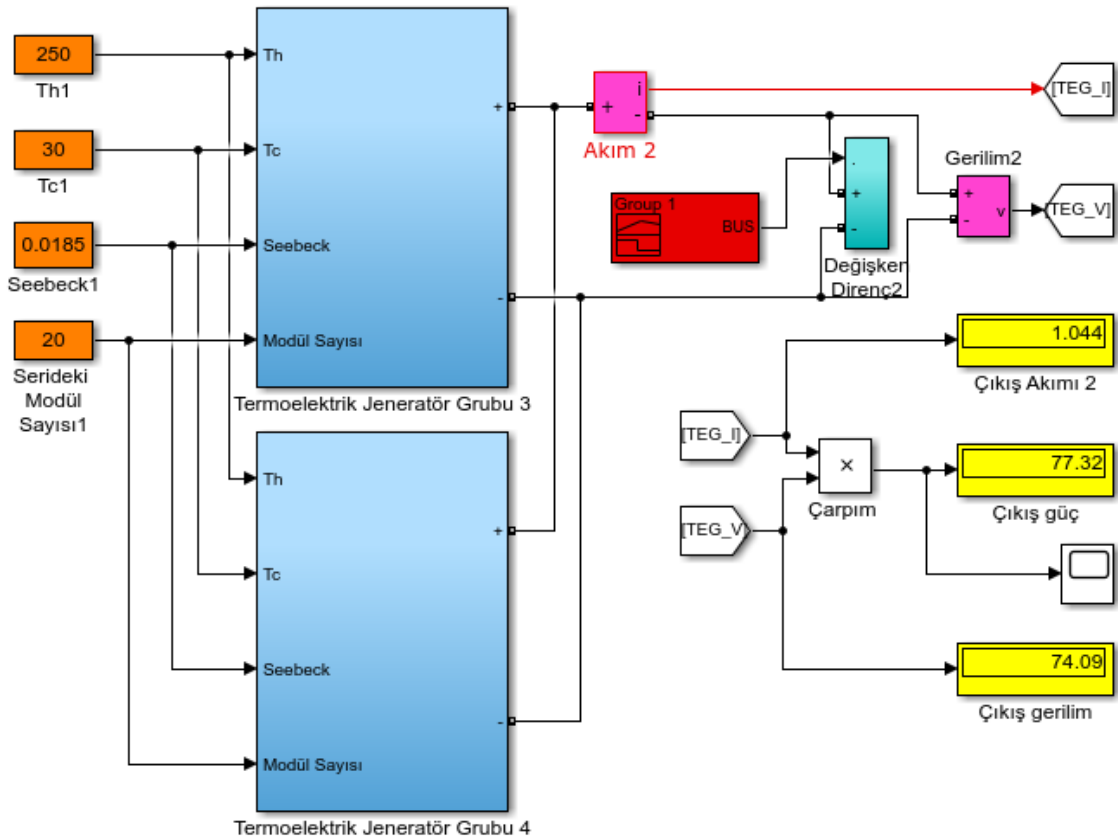
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde hem sanal ortamda oluşturulan hem de uygulamalı olarak yapılan devrelerin çalıştırılmasıyla elde edilen deney bulguları açıklanmıştır. Bu iki deney düzeneği için P&O ve INC algoritmaları eşliğinde MPPT'li devrelerin etkinliği incelenmiştir.

4.1. Matlab/Simulink ile Elde Edilen Bulgular

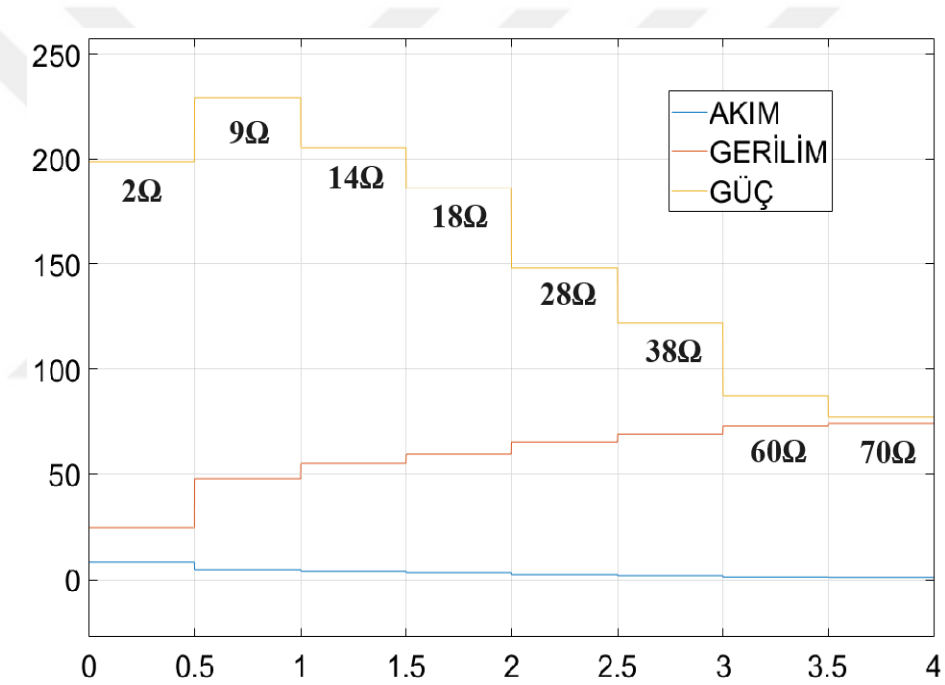
4.1.1. Matlab/Simulink ile MPPT Yokken Elde Edilen Bulgular

MPPT devrede değilken sanal ortamda yapılan deneylerde kullanılan devrenin Matlab benzetimi Şekil 4.1'de verilmiştir. Oluşturulan modelin çıkışına ise değişken direnç bağlanarak sistemin çıkışından güç, akım ve gerilim verileri elde edilmiştir.



Şekil 4.1. Değişken yüke göre seri ve paralel bağlantılı TEJ modül grubu modeli

Uygulanan yük direnci değerlerine göre elde edilen çıkış akım, gerilim ve güce ait sinyal değişimlerini gösteren grafik Şekil 4.2’ de verilmiştir. Modellemede iki paralel TEJ grubunun eş değer iç direnci 7Ω değerindedir. Bu durumda 7Ω değeri modellenen TEJ grubunun maksimum noktadaki direnç değerini belirtmektedir. Bu grafiğe göre 0.5’inci saniyeye kadar uygulanan 2Ω ’luk direnç değeri, $R_{i\zeta}=R_{MPP}=7 \Omega$ değerinden küçük olduğundan, elde edilen güç değeri de maksimum güç noktasındaki direnç ($R_{MPP}=7 \Omega$) değerindeki güçten düşük olmaktadır. TEJ modül grubunun çıkışındaki R_L yük direnci, R_{MPP} direncinden büyük bir değer aldığımda ise yine çıkış güç değeri R_{MPP} ’deki güç değerinden küçük olmaktadır.



Şekil 4.2. TEJ modül grubunun yük dirençlerine göre çıkış akım (A), gerilim (V), ve güç (W) grafiği

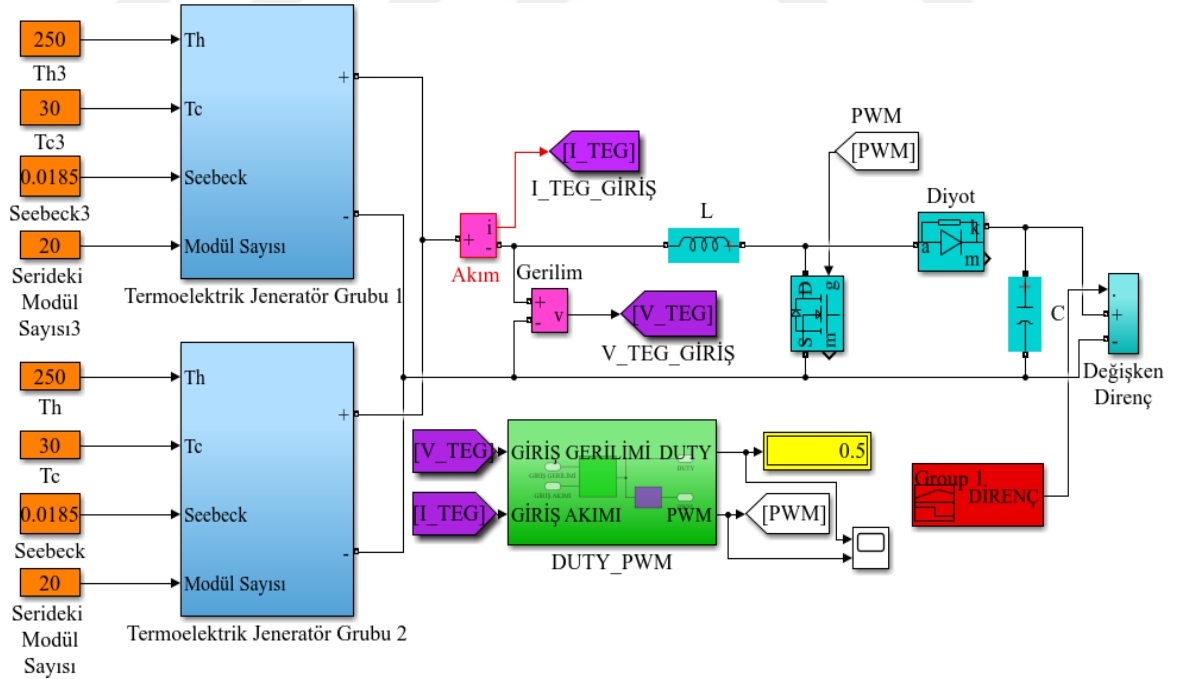
Tablo 4.1’de TEJ modül grubuna uygulanan yük dirençlerine göre akım, gerilim ve güç değerleri verilmiştir. Bu çizelgeye göre maksimum güç noktası takibi yokken uygulanan yük direnci değerleri R_{MPP} değerinin dışında bir değer aldığımda çıkış güç değeri daha düşük değerler almaktadır. $R_L > R_{MPP}$ durumunda akım değerinin her yük direnci değeri artışımda azaldığı, gerilim değerinin ise arttığı görülmektedir. Bu durumda en yüksek güç değeri 9Ω ’luk direnç değerinde 229.3 W olarak gerçekleşmiştir. En düşük güç değeri ise 70Ω ‘luk direnç değerinde ve 77.32 W değerinde olmuştur.

Tablo 4.1. TEJ modülden yük dirençlerine göre elde edilen akım , gerilim ve güç değerleri

Direnç(Ω)	2	9	14	18	28	38	60	70
Akım(A)	8.14	4.788	3.7	3.131	2.261	1.177	1.197	1.044
Gerilim(V)	24.42	47.88	55.5	59.48	65.57	69.01	73.02	74.09
Güç(w)	198.8	229.3	205.4	186.2	148.3	122.1	87.41	77.32

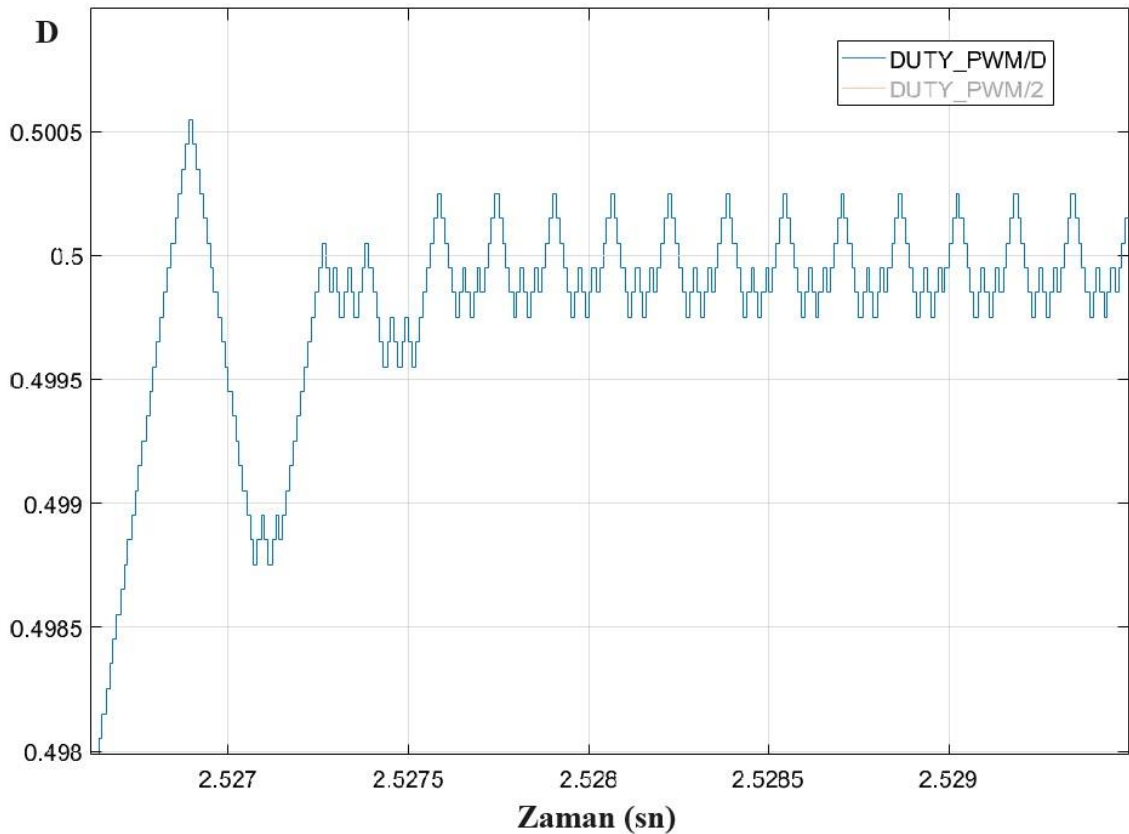
4.1.2. Matlab/Simulink ile P&O algoritmalı MPPT Bulguları

Bir TEJ ve fotovoltaik sistemde MPPT kullanılmasıdaki asıl amaç sistemin çıkışındaki güç değerinden en yüksek oranda faydalanmaktır. Bir TEJ'in çıkış gücünü MPPT yokken etkileyen en önemli faktörler iç direncin yanında yük ve sıcaklık değişimleri olmaktadır. TEJ modül çıkışına DA-DA yükseltici dönüştürücü bir devre bağlandığında ve bu devreye MPPT algoritmaları uygulandığında yük ve sıcaklık değişimindeki etki en aza indirgenmekte ve böylece MPPT sağlanmaktadır



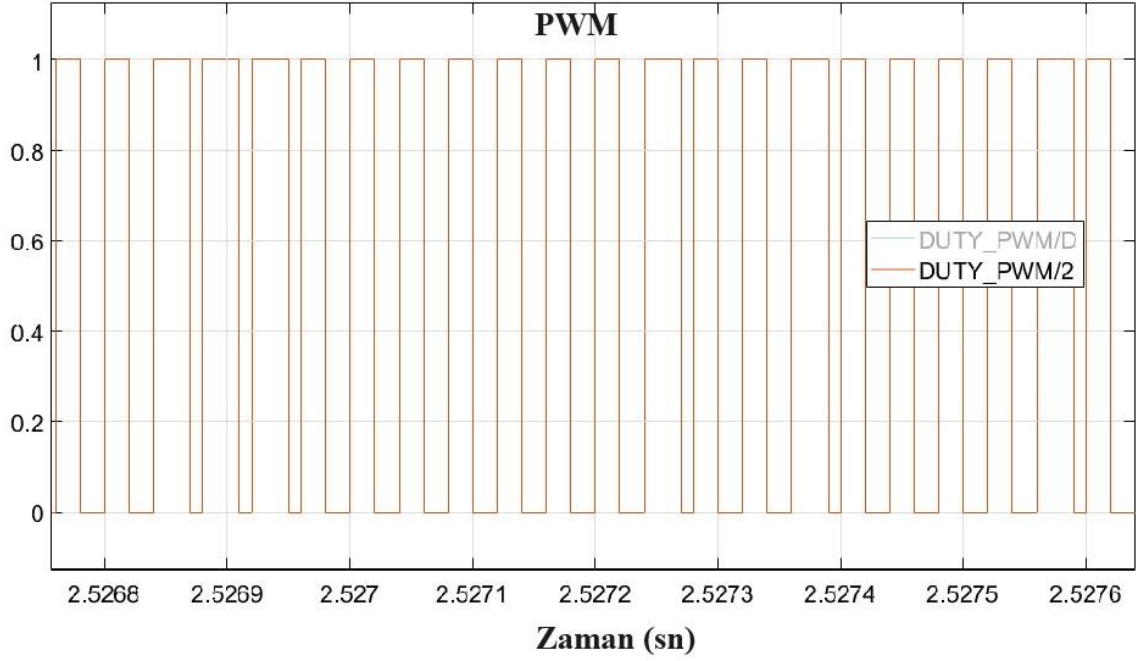
Şekil 4.3. P&O algoritmaları ile yapılan Matlab modellemesi

Şekil 4.3'te Matlab/Simulink ile modellenen DA-DA yükseltici dönüştürücüye P&O algoritma yönteminin uygulanmasıyla oluşturulan MPPT devresi verilmiştir. Bu devrenin çıkışına farklı zaman aralıklarında 8 farklı yük direnci bağlanarak deneyler yapıldığında elde edilen güç değişimleri işletilen algoritmanın bir çıktısı olan görev döngüsündeki değişimler ile belirlenmekte ve bu sayede güç değerinin hep MPP'ye taşınması sağlanmaktadır. Modelleme sonucunda elde edilen görev döngüsü değerinden bir kesitin grafiksel olarak gösterimi Şekil 4.4'te yatay eksen zaman, dikey eksen görev döngüsü olacak şekilde gösterilmiştir. Bu grafiğe göre D'nin zamana göre değerinin P&O algoritması sonucuna göre değişkenlik gösterdiği görülmektedir. D'nin bu değişim miktarı ise fonksiyon bloğunda işletilen programda 0.0001 olarak belirlenmiştir. Grafiğe göre görev döngüsünün 0.498'den daha düşük bir değerden başlayıp yükselerek 0.5 değeri etrafında salınımlar yaptığı görülmektedir.



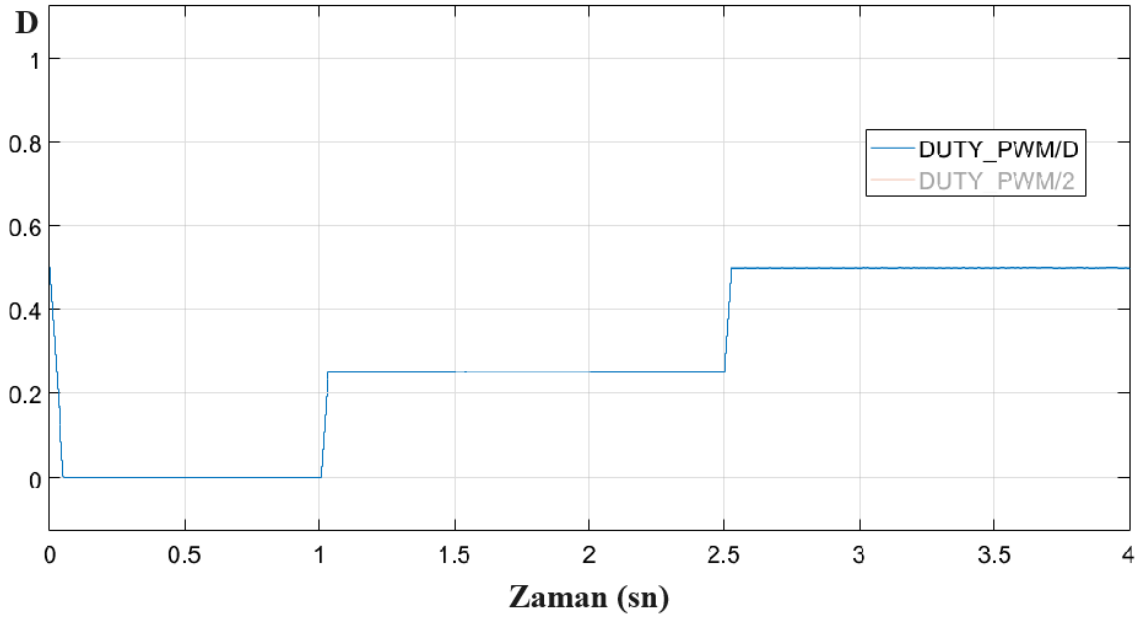
Şekil 4.4. Görev döngüsü değişimi

D'deki bu değişkenlik PWM ile yapılan tetiklemelerde anahtarlama uzunluklarının karşılaştırılmasıyla da anlaşılmaktadır. Şekil 4.5'te modellemedeki PWM tetikleme uzunluklarından bir kesit verilmiştir. Buna göre D'nin PWM tetiklemedeki uzunluklarının farklı olduğu görülmektedir.



Şekil 4.5. P&O algoritması sonucu oluşan PWM tetikleme değişimi

Görev döngüsü değişimi Şekil 4.6'da verilmiştir. Bu şekle göre görev döngüsü 0 ile 1'inci saniyeler arasında 0 değerini alarak herhangi bir değişime uğramamıştır. Bu zaman dilimi aralığında bir değişimin olmamasının nedeni $R_L \leq R_{MPP}$ durumunun gerçekleşmiş olmasıdır. Çünkü MPPT devrede değilken devrede PWM tetikleme olmamakta ve TEJ iç direnç değerine eşit bir yük direnci TEJ çıkışına bağlanarak $R_L = R_{iç}$ durumu gerçekleştirilmektedir. Böylece TEJ çıkışından maksimum güç değeri elde edilmektedir. Dolayısıyla MPPT sisteminde MPP'deki iç dirence eşit bir yük direnci devreye bağlandığında doğal bir direnç eşleşmesi gerçekleştiği için bu nokta maksimum güç noktası olmakta ve sistem daha büyük bir güç değerine ulaşamayacağından görev döngüsü oranı (D) bu durumda sıfır olmaktadır.



Şekil 4.6. Modelleme sonucu oluşan D'nin grafiği

Şekil 4.6'da verilen grafiğe göre 1 ile 2.5'inci saniyeler arasında D oranı 0.25 olmaktadır. Burada $D > 0$ olması P&O algoritmasının TEJ modülün iç direncini yük direnci değeriyle eşitlemeye çalıştığını göstermektedir. 2. ve 4. saniyeler arasında ise D, 0.50 ile MPPT'yi sağlamaktadır. Görev döngüsü oranı devredeki yük direnci değerine bağlı olarak 0 ile 1 arasında herhangi bir değer alabilmektedir.

DA-DA yükseltici dönüştürücü devresine P&O algoritmaları uygulanarak yapılan modellemede sıcaklık farkı 220 °C de sabit tutularak 4. Saniyeye kadar her 0.5 saniyede bir yük direnci değiştirilmiştir. Devrenin bu haliyle çıkış ve girişindeki akım, gerilim ve güç değerleri Tablo 4.2'de verilmiştir. Elde edilen bu veriler devre MPP'ye ulaştıktan sonra alınmıştır. Bu çizelgeye göre giriş ve çıkış akımlarının, yük direnci değeri arttıkça azaldığı, çıkış gerilimlerinin ise arttığı görülmektedir. Giriş gerilimi ise yük direnci 14 Ω 'u aştıktan sonra 41 V gerilim değeri etrafında daha düşük değerler ile değişmiştir. Bu sonuçlara göre en yüksek verim 0.991 ile $R_L = 70 \Omega$ değerindeyken, en düşük verim ise 0.9687 ile $R_L = 2 \Omega$ değerindeyken elde edilmiştir. Devrenin çıkışına $R_L = 2 \Omega$ değerinde yük direnci bağlandığında devrenin girişinde maksimum akım, minimum gerilim değerleri elde edilerek 150.2 W ile en düşük güç değeri elde edilmiştir. Bu tabloya göre devrenin en yüksek güce 236.6 W değerinde ulaştığı görülmektedir.

Tablo 4.2. MPPT’li devrenin giriş ve çıkışındaki anlık akım, gerilim ve güç değerleri

T_H	T_C	R_L (Ω)	I_g (A)	I_{ζ} (A)	V_g (V)	V_{ζ} (V)	P_g (W)	P_{ζ} (W)	Verim (%)
250	30	2	9.328	6.963	16.1	20.89	150.2	145.5	0.9687
		9	6.34	4.801	37.02	48.01	234.7	230.5	0.9821
		14	5.811	3.944	40.72	59.16	236.6	233.3	0.9860
		18	5.739	3.507	41.23	66.63	236.6	233.7	0.9877
		28	5.639	2.842	41.93	82.41	236.4	234.2	0.9906
		38	5.729	2.45	41.29	95.54	236.6	234.0	0.9890
		60	5.65	1.958	41.85	119.4	236.5	233.9	0.9890
		70	5.649	1.817	41.86	129.0	236.4	234.3	0.9911

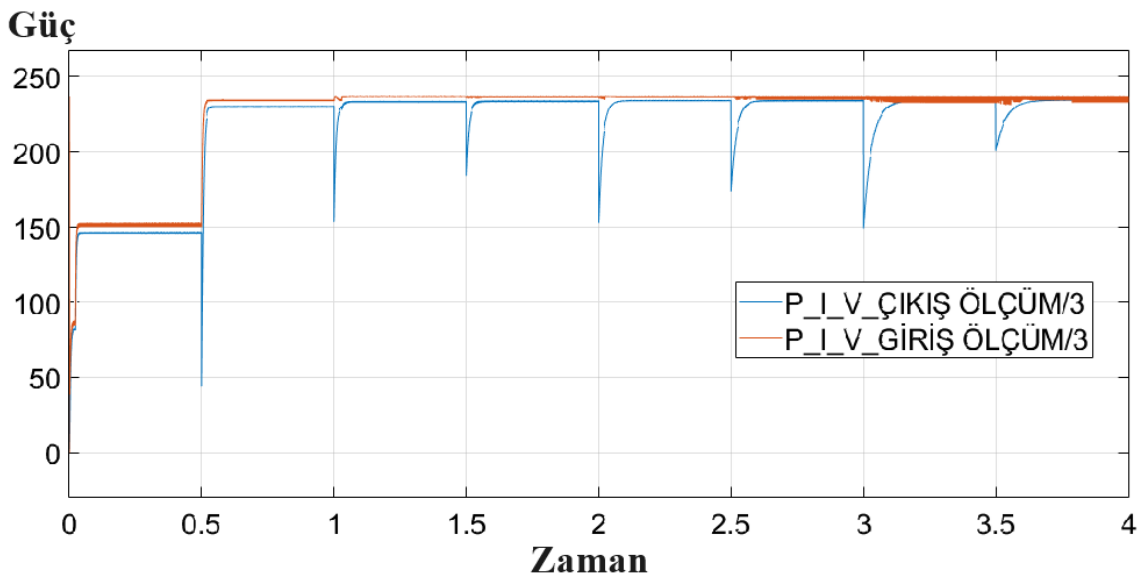
MPPT’ siz devreye, MPPT’li devreye uygulanan Tablo 4.2’deki $T_H=250$, $T_C=30$ yüzey sıcaklıkları ve belirtilen zaman dilimlerindeki aynı yük dirençleri ile aynı TEJ modül grupları uygulandığında MPPT’siz devre için Tablo 4.3’teki değerler elde edilmiştir.

Tablo 4.3. MPPT’siz devrede yük dirençlerine göre elde edilen verim değerleri

Direnç(Ω)	2	9	14	18	28	38	60	70
Güç(w)	198.8	229.3	205.4	186.2	148.3	122.1	87.41	77.32
Verim (%)	0.8669	1	0.8957	0.812	0.6467	0.5324	0.3812	0.3372

Tablo 4.3’te belirtilen verim değerleri, MPPT’siz devredeki maksimum güç değerinin yakalandığı noktadaki giriş güç değeri MPP olarak kabul edilerek hesaplanan değerlerdir. 229.3 W’lık güç değerinin her bir yük direnci için takip edilmesi gereken güç değeri olacağından MPPT olmadığı için verim değerlerinin de her bir direnç artışında daha da düştüğü görülmektedir. Bu varsayımdan yola çıkılarak MPPT’siz modellemeye en yüksek verim değeri 1.0 ile 9 Ω ’luk yük direnci değerindeyken, en düşük verim ise 0.3372 ile yük direnci 70 Ω değerindeyken elde edilmektedir. Tablo 4.1’de ise maksimum güç değeri takip edildiğinden yük direnci değişimlerinden verim farklarının ihmal edilecek düzeylerde olduğu görülmektedir.

Şekil 4.7’de P&O algoritmasının işletilmesiyle Tablo 4.1’de belirtilen yük direnci değerlerinde elde edilen giriş ve çıkış güç değerlerine göre çizdirilen grafik görülmektedir. Bu grafiğe göre 0.5 ile 1. saniyeler arasında 9Ω ’luk yük direnci uygulandığında devreden maksimum güç değeri elde edilmektedir. 1.ve 4. saniyeler arasında $R_L > R_{MPP}$ durumunda uygulanan altı farklı yük direnci değerlerinde ise gücün anlık olarak düşerek tekrar MPP’ye ulaştığı görülmektedir. Kırmızı renkli giriş gücü sinyalinin ise direnç değişimlerinden etkilenmediği gösterilmiştir.

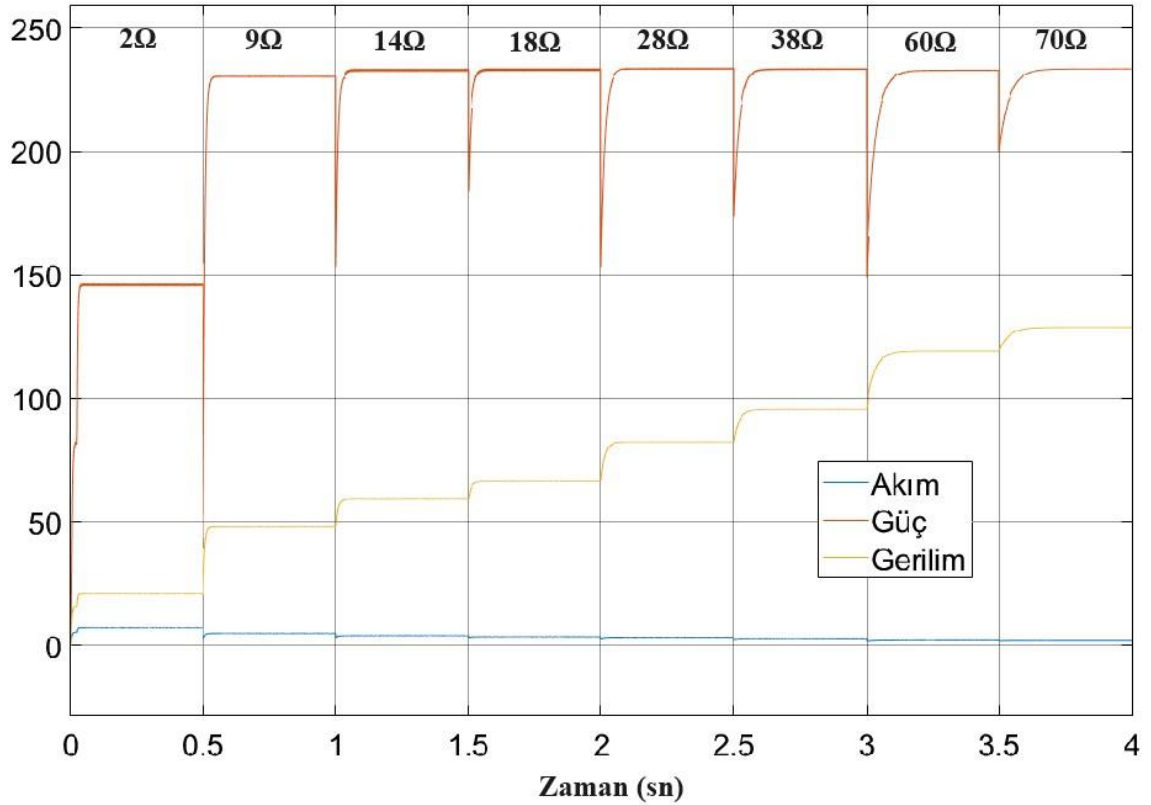


Şekil 4.7. P&O algoritmasına göre MPPT giriş ve çıkış güç grafikleri

4.1.3. Matlab/Simulink ile Artan İletkenlik Algoritmalı MPPT Bulguları

Artan iletkenlik algoritmaları verimli ve basit olmasından dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu algoritmaya göre akım ve gerilim kontrolü yapılarak devrede MPPT sağlanmaktadır. Aynı ortam koşulları sağlanarak P&O algoritmasının uygulandığı devreye artan iletkenlik algoritmaları uygulanarak Matlab/Simulink ile deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu devrede her 0.5 saniyede yük direnci değeri değiştirildiğinde yüke ait akım, gerilim ve güç değişimleri grafiği Şekil 4.8’ de gösterilmiştir. Bu grafiğe göre 0 ile 0.5’inci saniyeler arasında uygulanan 2Ω ’luk yük direnci 7Ω ’luk TEJ iç direncinden küçüktür. Dolayısıyla bu aralıkta elde edilen çıkış gücü maksimum noktadaki güçten daha düşük bir değer almaktadır. Diğer zaman aralıklarında ise her bir direnç değişiminde

maksimum güç noktasına ulaşıldığı ve gücün sabit bir değerde olduğu görülmektedir. Bu direnç değişimlerinin akım ve gerilime olan etkileri grafikte görüldüğü gibi gerilim artarken akımın düşmesi şeklinde olmaktadır. Gerilimdeki değişimler yük direncindeki değişimlerle paralellik göstermektedir. Bu değişimin büyüklüğünü ise uygulanan yük direncinin değeri belirlemektedir. Gücün sabit olması dolayısıyla ve gerilimin her kademedede artış göstermiş olmasından dolayı akım değeri de düşmektedir.



Şekil 4.8. INC algoritmalı MPPT devresi çıkış akım, gerilim ve güç grafikleri

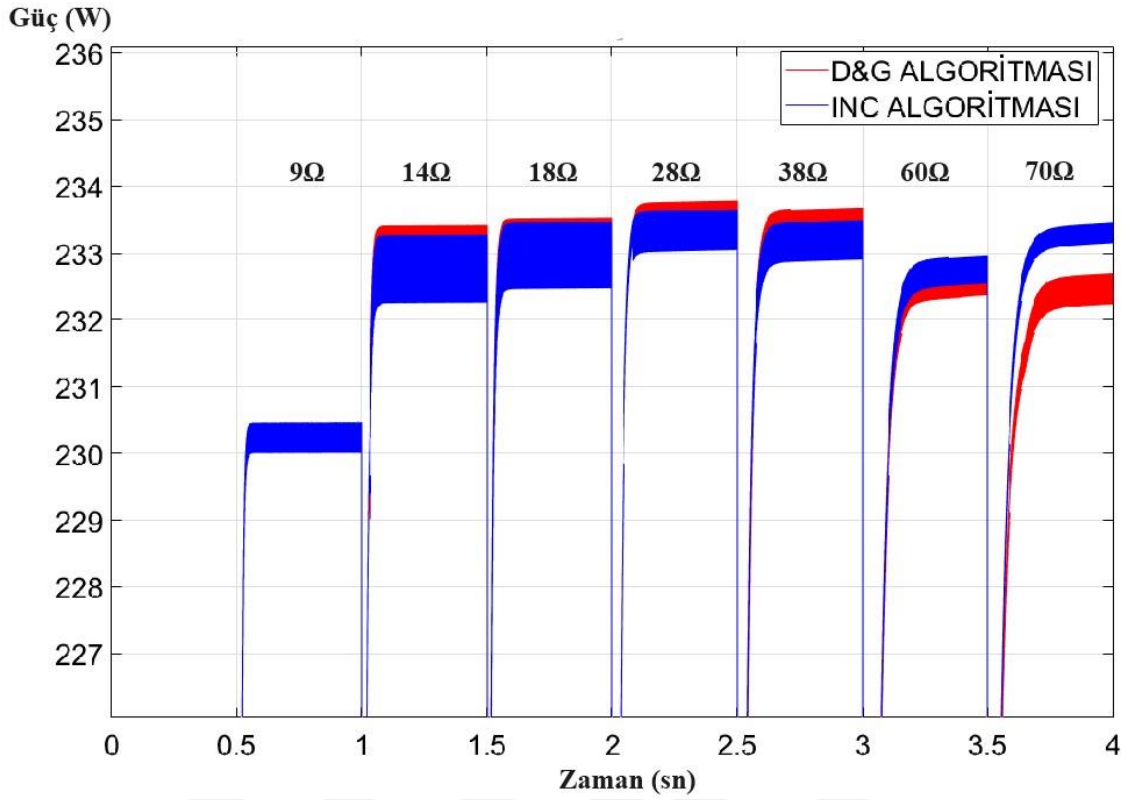
Şekil 4.8’de verilen grafiğe göre dikkat edilmesi gereken bir diğer konu her bir yük direnci değişiminde çıkış güç değerinin tekrar maksimum noktadaki güce ulaşma süresinin, uygulanan yük direnci değerinin büyüklüğü ile doğru orantılı olarak değişmesidir. 2. saniyede 28 Ω luk direnç uygulandığında tekrar P_{MPP} değerine ulaşma süresi yaklaşık 60 ms iken 3. saniyede 60 Ω luk direnç uygulandığında bu değer yaklaşık 100 ms sürmektedir. Yani direnç değeri arttıkça MPP’ye ulaşma süreside artmıştır.

Tablo 4.4'te devrenin INC algoritması ile çalıştırılmasıyla elde edilen sonuçlar verilmiştir. Bu çizelgede devreye 220 °C'lik sabit sıcaklık farkı uygulandığında yük dirençlerine göre devrenin giriş ve çıkışına ait akım, gerilim ve güç değerleriyle verim değerlerinin, direncin uygulandığı zaman dilimi içerisindeki MPP'ye ulaştığı herhangi bir anda alına veriler gösterilmektedir. Bu sonuçlara göre bütün yük direnci değerlerinde verim %98.4'ün üzerinde olduğu görülmektedir.

Tablo 4.4. Yük direncine göre devrenin giriş ve çıkışına ait anlık akım, gerilim ve güç değerleri

T_H (°C)	T_C (°C)	R_L (Ω)	I_G (A)	I_C (A)	V_G (V)	V_C (V)	P_G (W)	P_C (W)	MPPT (%)
250	30	2	9.384	6.963	15.71	20.89	147.4	145.4	0.9864
		9	6.458	4.798	36.19	47.98	233.7	230.2	0.9850
		14	6.142	3.938	38.41	59.07	235.9	232.6	0.9860
		18	5.798	3.502	40.81	66.53	236.6	233.0	0.9847
		28	5.794	2.837	40.84	82.28	236.6	233.4	0.9864
		38	5.825	2.445	40.62	95.36	236.6	233.1	0.9852
		60	6.108	1.953	38.64	119.1	236.0	232.6	0.9855
		70	5.524	1.811	42.73	128.6	236.1	232.9	0.9864

Tablo 4.4'te verilen sonuçlara göre MPPT devresinin çıkış akımı direnç değeri arttıkça azalarak en düşük değerine 1.811 A ile 70 Ω değerinde ulaşmıştır. En yüksek akım değeri ise 6.963 A ile 2 Ω 'luk yük direnci değerinde elde edilmiştir. Devrenin çıkış gerilimi yük direnci değeri arttıkça artarak en yüksek değeri 70 Ω 'luk yük direncinde 128.6 V olarak gerçekleşmiştir. Giriş akım ve gerilim değerlerinin ise devre çıkışındaki yük değişimlerinden daha az etkilendiği görülmektedir. Bu durumda giriş akım ve gerilim değerlerindeki değişimler giriş gücü değerinde en fazla 2.9 W'lık bir etki oluşturarak sistemin MPP'ye ulaşmasından sonra en düşük 233.7 W, en yüksek ise 236.6 W güç değerleri elde edilmiştir.



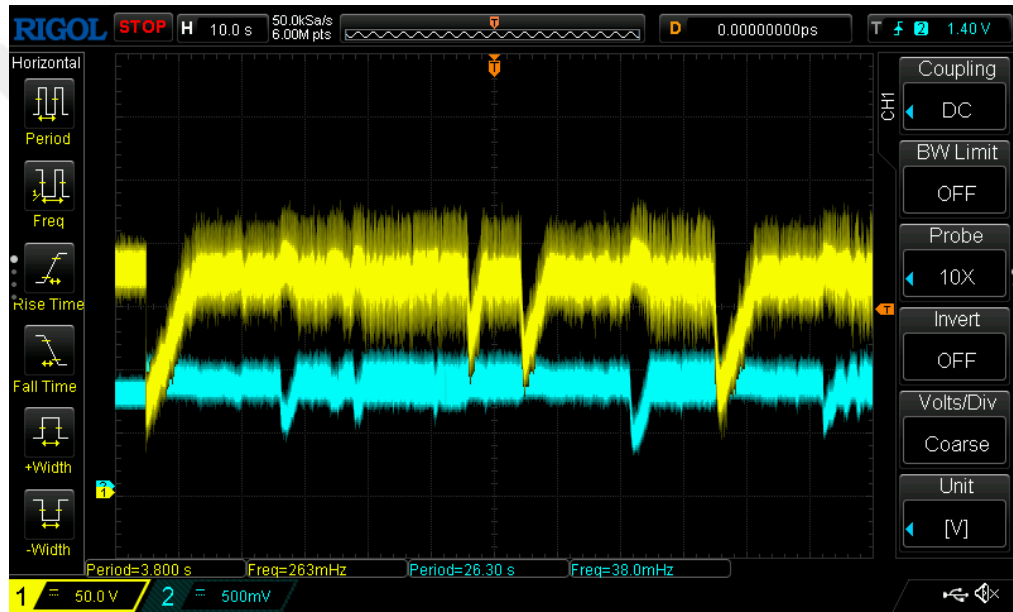
Şekil 4.9. P&O ve INC algoritmalarına göre elde edilen çıkış güçleri grafiği

Şekil 4.9’da P&O ve INC algoritmalarına göre devrenin çıkışında elde edilen güç grafiği verilmiştir. Bu grafiğe göre 14, 18, 28, 38 Ω ’luk yük dirençlerinde kırmızı renkli P&O algoritmasının mavi renkli INC algoritmasına göre daha yüksek bir güç değerine ulaştığı görülmektedir. Devreye 60 ve 70 Ω ’luk yük dirençleri bağlandığında ise INC algoritmasında elde edilen güç değerinin P&O algoritmasına göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durumda en yüksek güç farkı 70 Ω ’luk yükte yaklaşık 1 W olarak gerçekleşmiştir. 9 Ω ’luk çıkış yükünde ise P&O ve INC algoritmaları arasında güç farkının oluşmadığı görülmektedir.

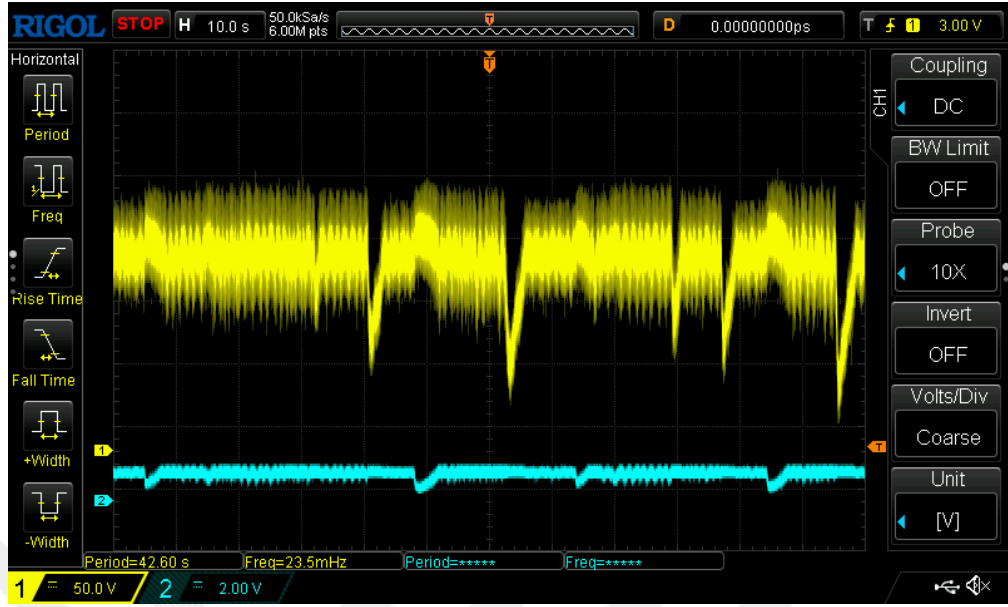
4.2. Uygulama Devresi ile P&O ve INC algoritmaları MPPT Bulguları

Bu bölümdeki deneylerde elde edilen veriler iki farklı yöntem ile alınmıştır. Deneyler her bir yöntem için tekrar edilmiş olup birinci yöntemde osiloskop üzerinden akım ve gerilim değerleri, ikinci yöntemde ise elektronik devre üzerinden akım gerilim ve güç verileri kaydedilmiştir. Testler maksimum güç noktası şartları sağlandıktan sonra çıkış direncinin aniden değiştirilmesi ve sistemin maksimum güç noktasına tekrar ulaşması esnasında

verilerin osiloskop ve tasarımı yapılan devre üzerinden elde edilmesine dayanmaktadır. Osiloskop üzerinden alınan görüntülerde sarı renkli sinyal MPPT girişindeki gerilimi, cyan renkli sinyal ise MPPT devresinin girişindeki akımda meydana gelen değişimleri belirtmektedir. Elde edilen osiloskop görüntülerinde dikey eksen değişkenin aldığı değeri, yatay eksen ise deney süresini ifade etmektedir. Bu görüntülerde geçen sürelerin uzunlukları deney parametrelerine göre farklılık göstermektedir. Yapılan deneylerde P&O ve INC algoritmaları için 64 ortalama alma sayısı ve 1.1 ms için elde edilen osiloskop görüntüleri Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'deki gibi elde edilmiştir.

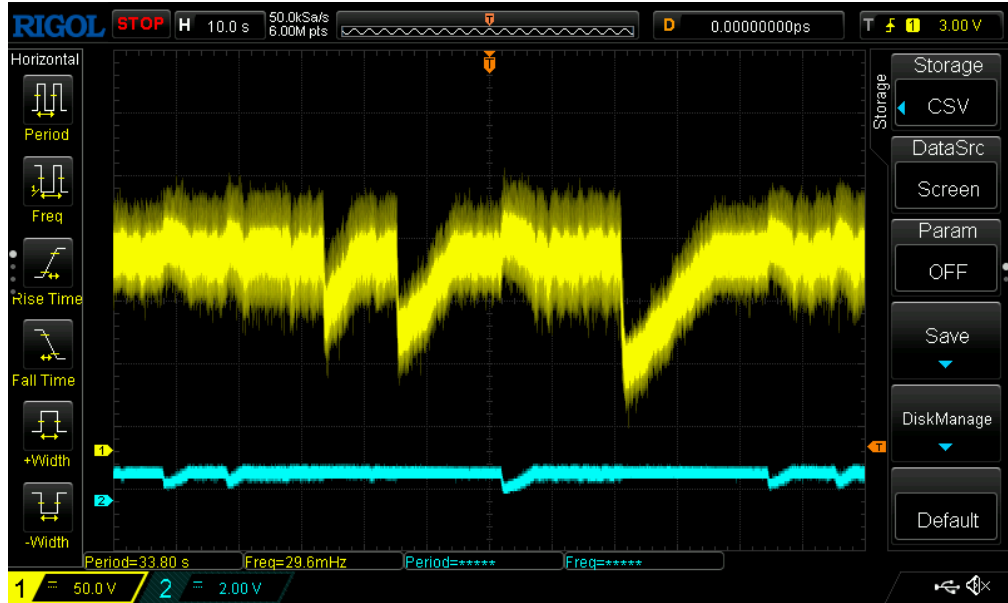


Şekil 4.10. P&O algoritması 64 ortalama alma sayısı ve 1.1 ms dönüştürme süresi için gerilim ve akım osiloskop görüntüsü



Şekil 4.11. INC algoritması 64 ortalama alma sayısı ve 1.1 ms dönüştürme süresi için osiloskop görüntüsü

Ortalama alma sayısı 64 iken dönüşüm süresi 2,116 ms yapılarak elde edilen akım ve gerilim grafiklerini gösteren osiloskop görüntüleri Şekil 4.12’de ve Şekil 4.13’te her iki algoritma içinde verilmiştir.



Şekil 4.12. P&O algoritmasına göre 64 ortalama alma sayısı ve 2.116 ms dönüştürme süresi için osiloskop gerilim ve akım görünümü

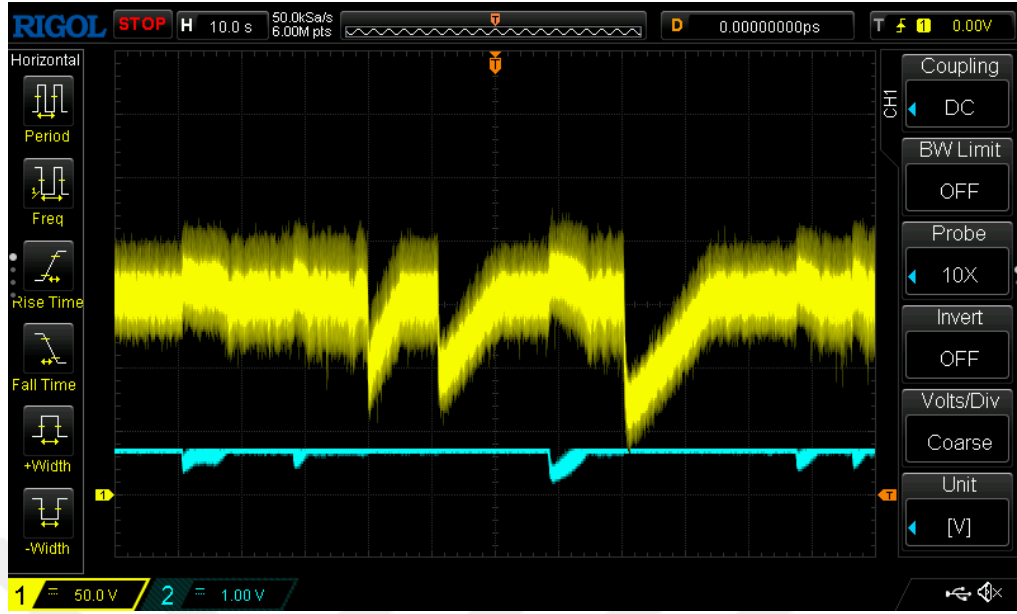


Şekil 4.13. INC algoritmasına göre 64 ortalama alma sayısı ve 2.116 ms dönüştürme süresi için osiloskop gerilim ve akım görünümü

Maksimum güç noktasında kendiliğinden çalışan bir sistemin yük direnci değiştirildiğinde 64 ortalama alma sayısı için yapılan testler 128 için yapılmış ve grafikler Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'te gösterildiği gibi elde edilmiştir.



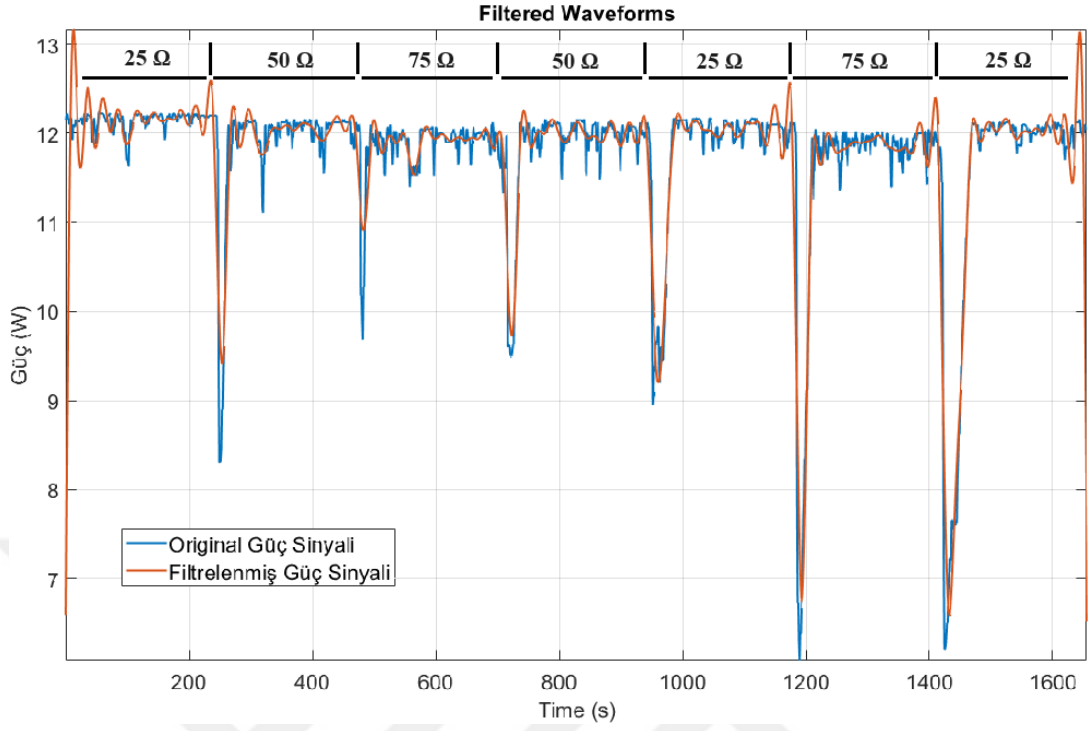
Şekil 4.14. INC algoritması 128 ortalama alma sayısı ve 1.1 ms dönüştürme süresi için gerilim ve akıma ait osiloskop görüntüsü



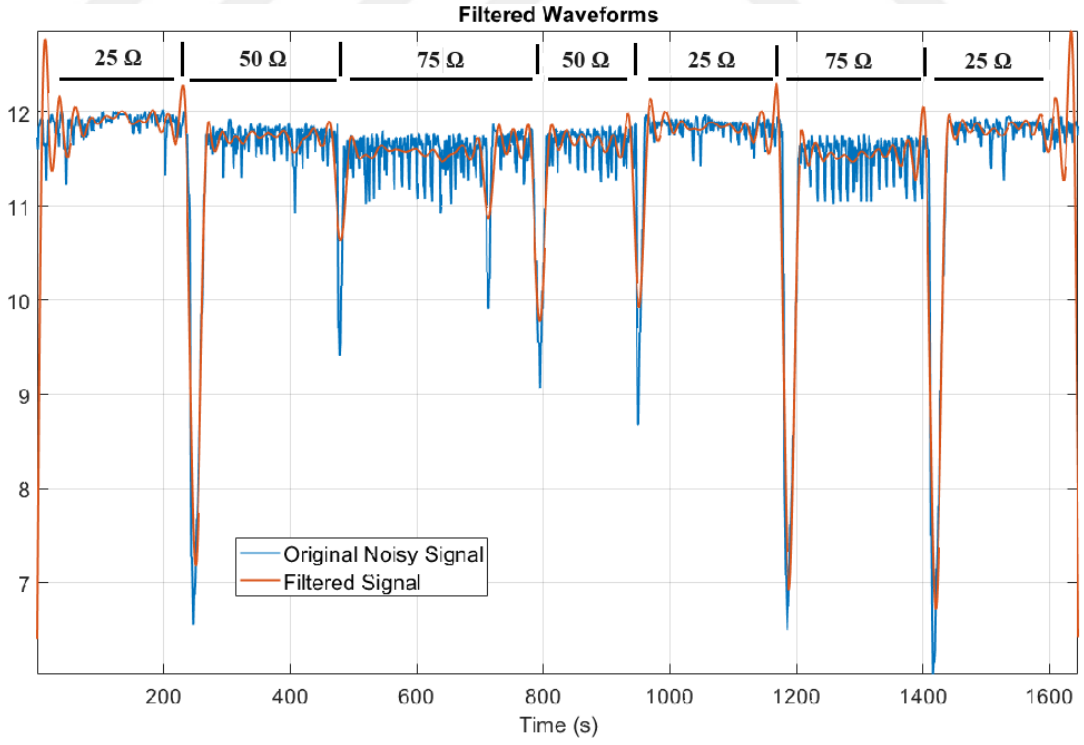
Şekil 4.15. P&O algoritması 128 ortalama alma sayısı ve 1.1 ms dönüştürme süresi için gerilim ve akıma ait osiloskop görüntüsü

Yapılan deneylerde devre üzerinden alınan ölçümlerden güç verileri kullanılarak 64 ortalama alma sayısı ve 1.1 ms dönüşüm süresinde Şekil 4.16 P&O algoritması için Şekil 4.17 ise INC algoritması için Matlab ile oluşturulan filtrelenmiş güç grafiklerini göstermektedir. Bu grafikler üzerinde mavi renk orijinal güç sinyalini turuncu renk ise filtrelenmiş güç sinyalini belirtmektedir. Güç sinyallerinin filtrelenmesindeki asıl amaç sinyal gürültülerini minimize ederek değişimlerin net olarak görülmesini sağlamaktır. Bu nedenle hem INC algoritması hem de P&O algoritması için $F_s=1200$, $N=1200$ ve $F_{norm}=50/(F_s/2)$ değişkenleri kullanılarak Matlab ile dijital filtre işlemi uygulanmıştır.

Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de sinyal durumlarına göre belirtilen aralıklarda devreye uygulanan yük direncinin aldığı değerler verilmiştir. Bu şekillerde verilen grafiklerde deneyler P&O ve INC algoritmaları için fotovoltaik paneldeki ışıma miktarı 312 w/m^2 olarak ayarlanmış olup deney başlangıçlarında P&O algoritması için panel sıcaklığı 73°C , INC algoritmasında ise 80°C olarak kaydedilmiştir. Deneyler ilk olarak P&O algoritması için yapıldığından zamanla panel sıcaklığı arttığı için bundan sonraki deneyin INC algoritmasına göre yapılması nedeniyle panel sıcaklığı daha yüksek bir değer olarak kaydedilmiştir.



Şekil 4.16. P&O algoritması için devreden alınan verilerine göre 64 ortalama alma sayısı ve 1.1 ms dönüştürme süresi için filtrelenmiş güç grafiği



Şekil 4.17. INC algoritması için devreden alınan verilerine göre 64 ortalama alma sayısı ve 1.1 ms dönüştürme süresi için filtrelenmiş güç grafiği

64 ortalama alma sayısı ve 1.1 ms dönüşüm süresine göre devre sadece MPP’de iken elde edilen veriler kullanılarak INC algoritmasına göre hesaplanan ortalama güç değeri 11.70 W, P&O algoritmasında ise bu değer 12.005 W olarak hesaplanmıştır. Böylece elde edilen bu değerlere göre iki algoritma türü arasındaki ortalama güç farkı 0.305 W olarak gerçekleşmiştir.

Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’ye göre 25 Ω ’dan 50 Ω ’a olan direnç değişiminde MPP’ye ulaşma süreleri P&O algoritması için 2.32 sn iken INC algoritmasına göre 2.66 sn olarak elde edilmiştir. Böylece 0.34 sn’lik fark ile INC algoritmasının P&O algoritmasına göre MPP’ye ulaşma süresi daha uzun sürmüştür. Bu değişim anında gücün minimum değeri INC algoritmasında 6.55 W, P&O algoritmasında ise 8.3 W olarak gerçekleşmiştir. Direnç değişim anlarında MPP’deki güç değeri ile minimum noktadaki güç değerleri arasındaki fark INC algoritmasında 5.225 W, P&O algoritmasında ise 3.525 W değerinde olmuştur.

50 Ω ’dan 75 Ω ’a olan değişimde MPP’ye ulaşma süreleri INC algoritmasında 1.06 sn P&O algoritmasında 1.16 sn ile her iki algoritma için bu deneydeki tüm değişimler içerisindeki en kısa süreli değişimler elde edilmiştir. Böylece bu deneydeki en kısa süreli değişim 1.06 sn ile INC algoritmasında olmuştur. Gücün minimum değeri ise INC algoritmasında 9.4 W, P&O algoritmasında 9.675 W olarak gerçekleşmiştir. 9.675 W değeri ise P&O algoritması için bu deneydeki en yüksek minimum noktadaki güç değeri olmuştur. Direnç değişim anında MPP’de elde edilen güç değeri ile minimum noktadaki güç değeri arasındaki fark ise INC algoritmasında 2.475 W P&O algoritmasında 2.225 W değerinde olmuştur.

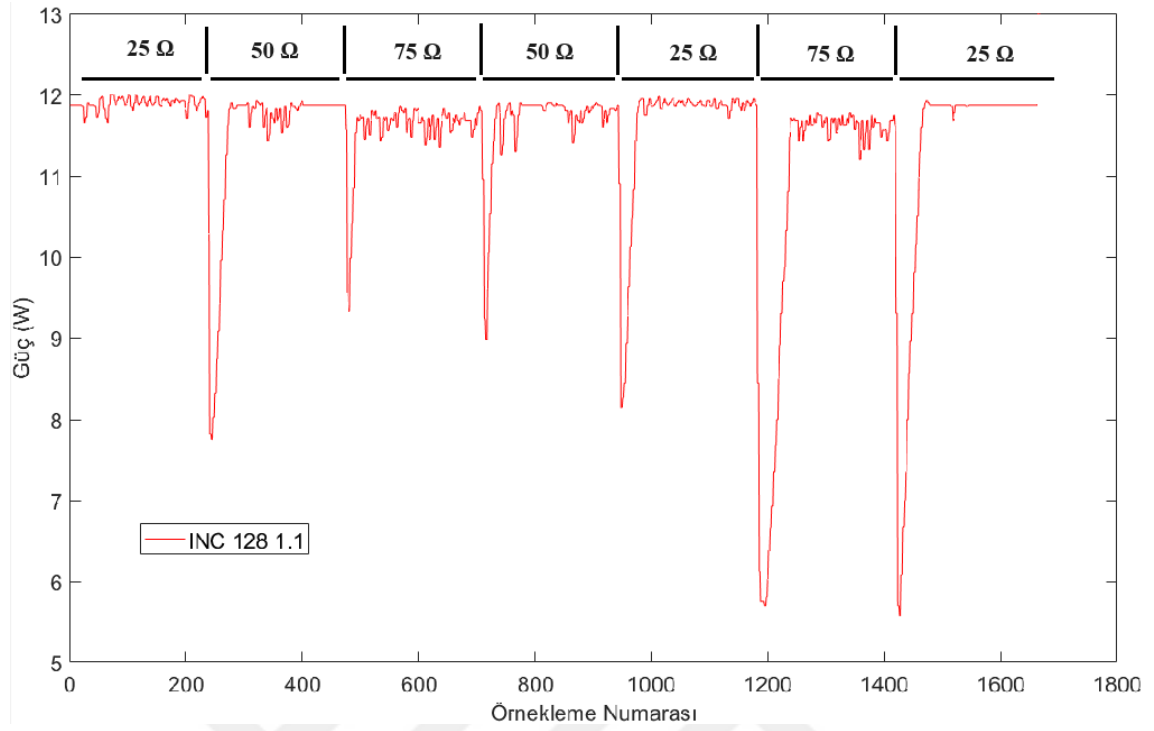
Yük direnci 75 Ω ’dan 50 Ω değerine düşürüldüğünde MPP’ye ulaşma süresi INC algoritmasında 1.17 sn, P&O algoritmasında 2.32 sn sürmüştür. Minimum güç değeri ise INC algoritmasında 9.9 W, P&O algoritmasında 9.5 W değerini almıştır. Bu durumda maksimum noktadaki güç değeri ile minimum noktadaki güç değeri arasındaki fark INC algoritmasında 1.65 W, P&O algoritmasında 2.475 W olarak gerçekleşmiştir.

Direnç değeri 50 Ω 'dan 25 Ω değerine alındığında INC algoritmasının MPP'yi yakalama süresi 1.59 sn, P&O algoritmasının ise 3.69 sn olmuştur. Gücün minimum değeri ise INC algoritmasında 8.7 W, P&O algoritmasında 8.95 W olarak gerçekleşmiştir. Minimum ve maksimum noktadaki güç değeri arasındaki fark ise INC algoritmasında 3.175 W, P&O algoritmasında 2.525 W değerini almıştır.

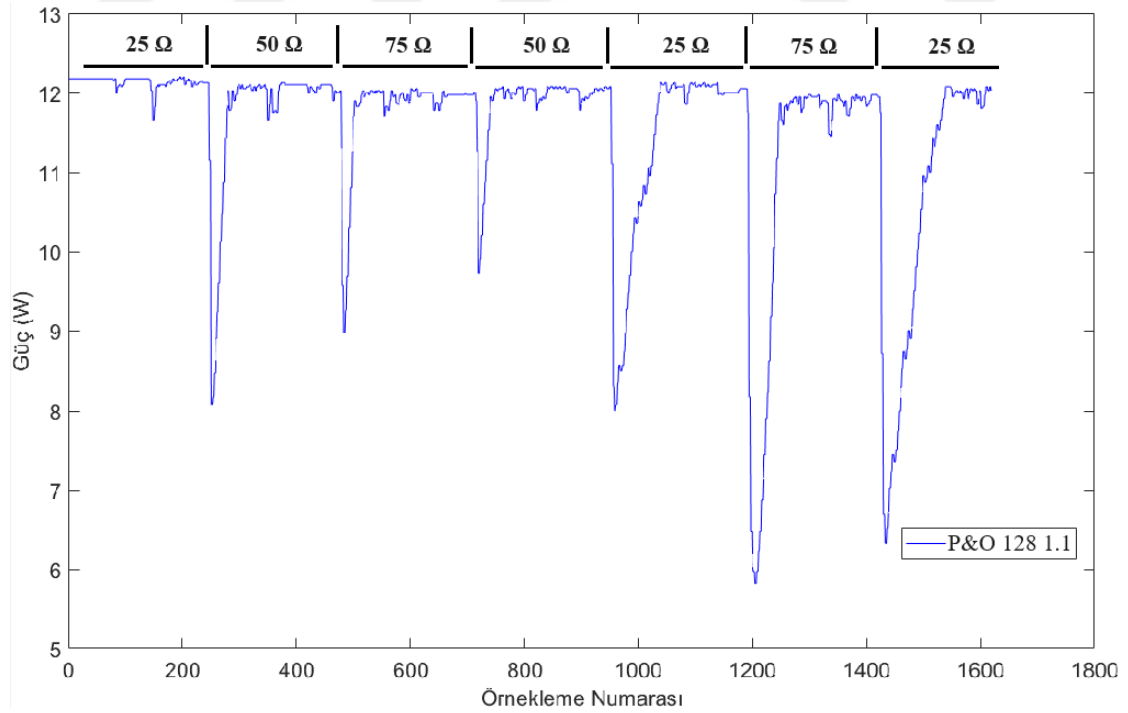
Yük direnci değişimi artırılarak 50 Ω değerine çıkartıldığında 25 Ω 'dan 75 Ω değerine yapılan değişimde INC algoritmasının maksimum güç noktasına ulaşma süresi 2.66 sn, P&O algoritmasının ise 2.64 sn olmuştur. INC algoritmasında minimum noktadaki güç değeri 6.5 W, P&O algoritmasında 6.075 W olarak gerçekleşmiştir. Böylece maksimum ve minimum noktalar arasındaki güç farkı INC algoritmasında 5.3 W, olurken P&O algoritmasında bu değer 5.95 W olmuştur. 6.075 W değeri ise bu deneydeki P&O algoritması için minimum noktadaki en küçük güç değeri olmuştur.

Bu deneydeki son değişim ise 75 Ω 'dan 25 Ω 'a yapılan 50 Ω 'luk yük direnci azalışı olmuştur. Bu durumda MPP'ye ulaşma süresi 2.98 sn ile INC algoritmasında, 4.96 sn ile P&O algoritmasında gerçekleşmiştir. Böylece bu süreler her iki algoritma için en uzun değişim süreleri olmuştur. Minimum noktadaki güç değerleri ise INC algoritmasında 6.025 W ile bu deneydeki en küçük güç değeri olup P&O algoritmasında ise 6.2 W olarak gerçekleşmiştir. Maksimum nokta ile olan güç farkları ise INC algoritmasında 5.45 W P&O algoritmasında 5.25 W olmuştur.

Şekil 4.18 ve Şekil 4.19 128 ortalama alma sayısı ve 1.1 ms dönüştürme süresi için sırasıyla INC ve P&O algoritmalarına ait güç değişim grafiklerini belirtmektedir. Deney başlangıçlarında panel sıcaklığı P&O algoritması için 72.1 °C, INC algoritmasında ise 78.1 °C olarak kaydedilmiştir.



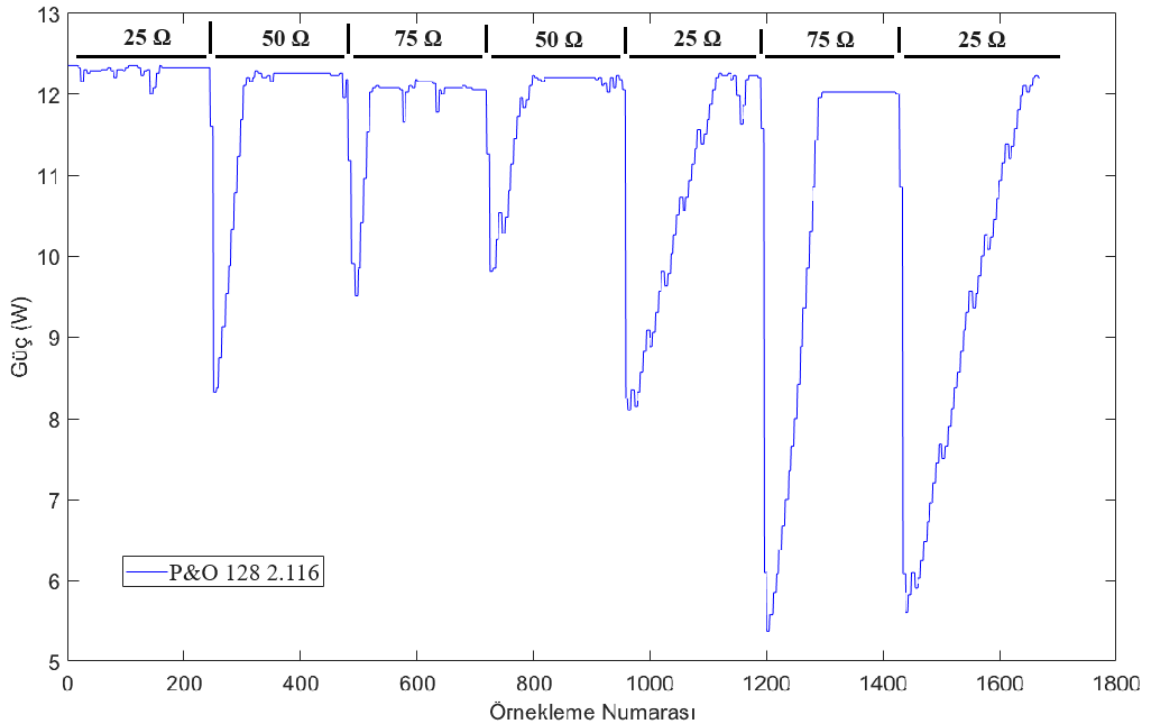
Şekil 4.18. INC algoritması uygulama devresinden alınan verilere göre 128 ortalama alma sayısı ve 1.1 ms dönüştürme süresi için güce ait grafik



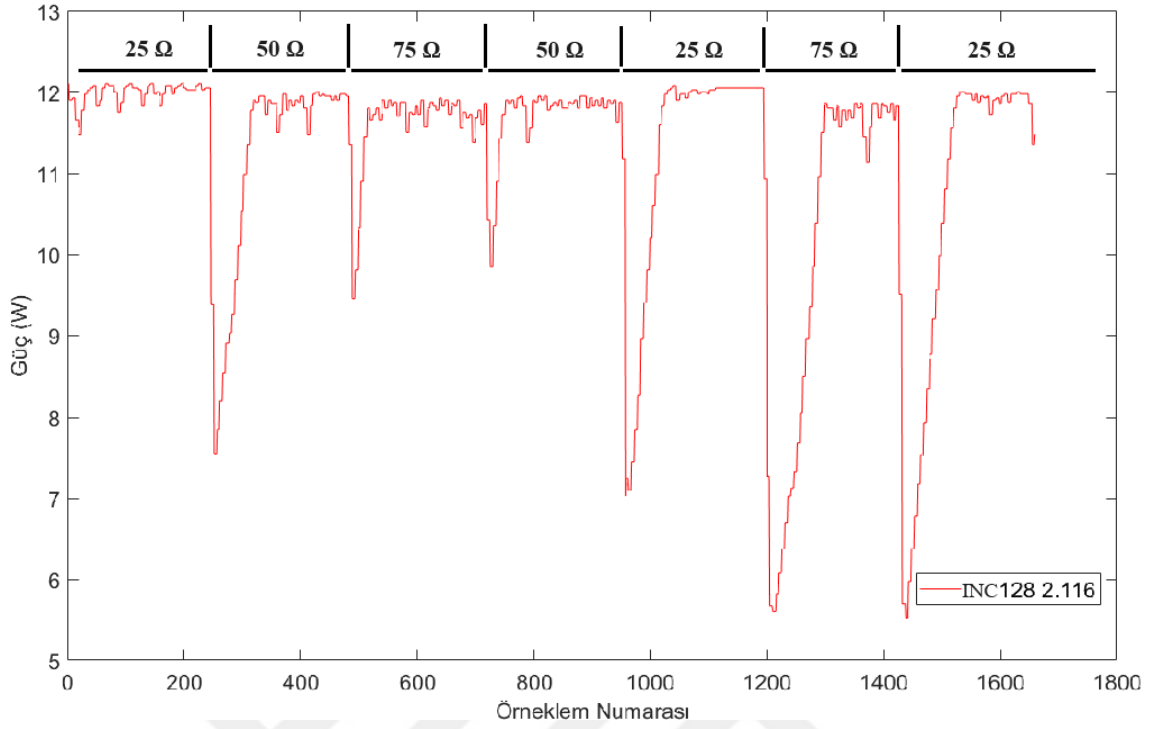
Şekil 4.19. P&O algoritması uygulama devresinden alınan verilere göre 128 ortalama alma sayısı ve 1.1 ms dönüştürme süresi için güce ait grafik

128 ortalama alma sayısı ve 1.1 ms dönüştürme süresi için Şekil 4.18 ve Şekil 4.19’da verilen grafiklere göre en uzun süreli değişim 13.9371 sn ile P&O algoritmasında 75 Ω ’dan 25 Ω ’a olan yük değişiminde gerçekleşmiştir. INC algoritmasında ise en uzun süreli değişim 6.0546 sn ile 25 Ω ’dan 75 Ω ’a olan değişimde olmuştur. En kısa süreli değişim INC algoritmasında 1.5933 sn ile, P&O algoritmasında 2.6396 sn ile 50 Ω ’dan 75 Ω ’a olan değişimlerde gerçekleşmiştir. En küçük P_{min} değeri INC algoritmasında 75 Ω ’dan 25 Ω ’a olan değişimde 5.575 W, P&O algoritmasında 25 Ω ’dan 75 Ω ’a olan değişimde 5.825 W olarak elde edilmiştir. En büyük P_{min} değeri ise INC algoritması için 9.325 W ile 50 Ω ’dan 75 Ω ’a olan yük değişiminde, P&O algoritmasında 75 Ω ’dan 50 Ω ’a olan yük değişiminde 9.725 W olarak gerçekleşmiştir.

Şekil 4.20 ve Şekil 4.21’de ortalama alma sayısı 128 iken 2.116 ms dönüştürme süresi için P&O ve INC algoritmalarına ait güç değişim grafikleri verilmiştir. Deney başlangıçlarında panel sıcaklığı P&O algoritması için 68.3 °C, INC algoritmasında ise 77.3 °C olarak kaydedilmiştir.



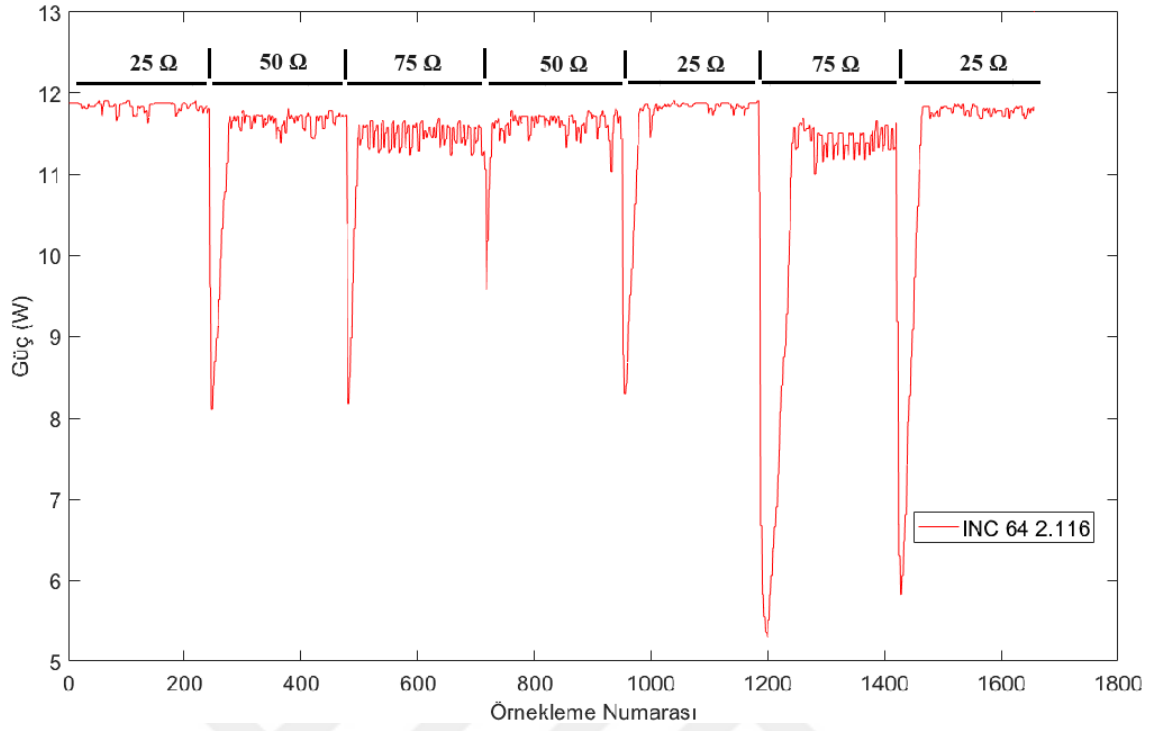
Şekil 4.20. P&O algoritması uygulama devresinden alınan verilere göre 128 ortalama alma sayısı ve 2.116 ms dönüştürme süresi için güce ait grafik



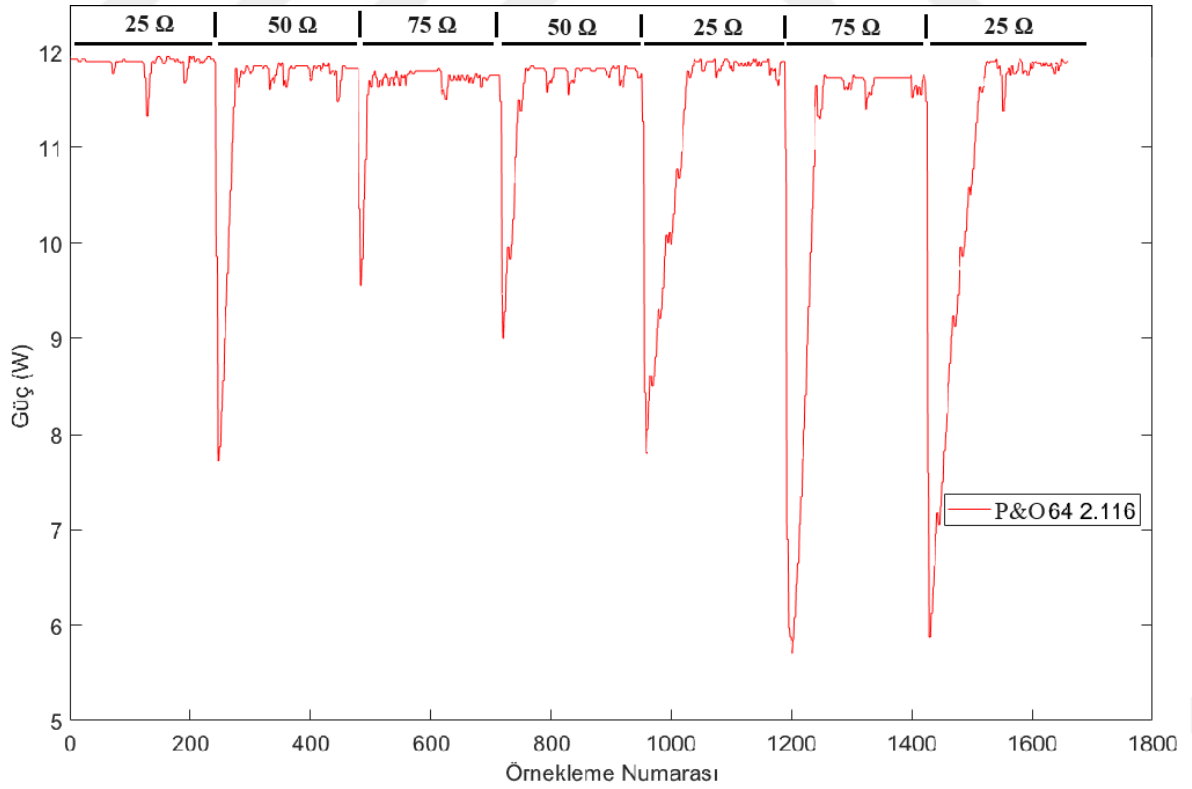
Şekil 4.21. INC algoritması uygulama devresinden alınan verilere göre 128 ortalama alma sayısı ve 2.116 ms dönüştürme süresi için güce ait grafik

Ortalama alma sayısı 128 ve dönüşüm süresi 2.116 ms iken MPP'ye en uzun ulaşma süresi INC algoritmasında 10.9864 sn ile 25 Ω 'dan 75 Ω 'a olan yük değişiminde olmuştur. Bu süre P&O algoritmasında 75 Ω 'dan 25 Ω 'a olan yük değişiminde ve 21.926 sn olarak gerçekleşmiştir. En kısa süreli değişimler ise 50 Ω 'dan 75 Ω 'a olan direnç değişiminde INC algoritmasında 3.38 sn, P&O algoritmasında 4.0057 sn olmuştur. En küçük P_{min} değeri INC algoritmasında 5.525 W ile 75 Ω 'dan 25 Ω 'a olan direnç değişiminde, P&O algoritmasında ise 5.375 W ile 25 Ω 'dan 75 Ω 'a olan direnç değişiminde elde edilmiştir. En büyük P_{min} değeri INC algoritması için 9.85 W ile 75 Ω 'dan 50 Ω 'a olan yük değişiminde, P&O algoritmasında 75 Ω 'dan 50 Ω 'a olan yük değişiminde 9.8 W olarak gerçekleşmiştir.

Şekil 4.22 ve Şekil 4.23 ortalama alma sayısı 64 iken dönüştürme süresi 2.116 ms yapıldığında INC ve P&O algoritmaları için elde edilen güç değişim grafiklerini göstermektedir. Deney başlangıçlarında kaydedilen panel sıcaklıkları ise P&O algoritmasında 85.5 °C, INC algoritmasında 86.5 °C olmuştur.



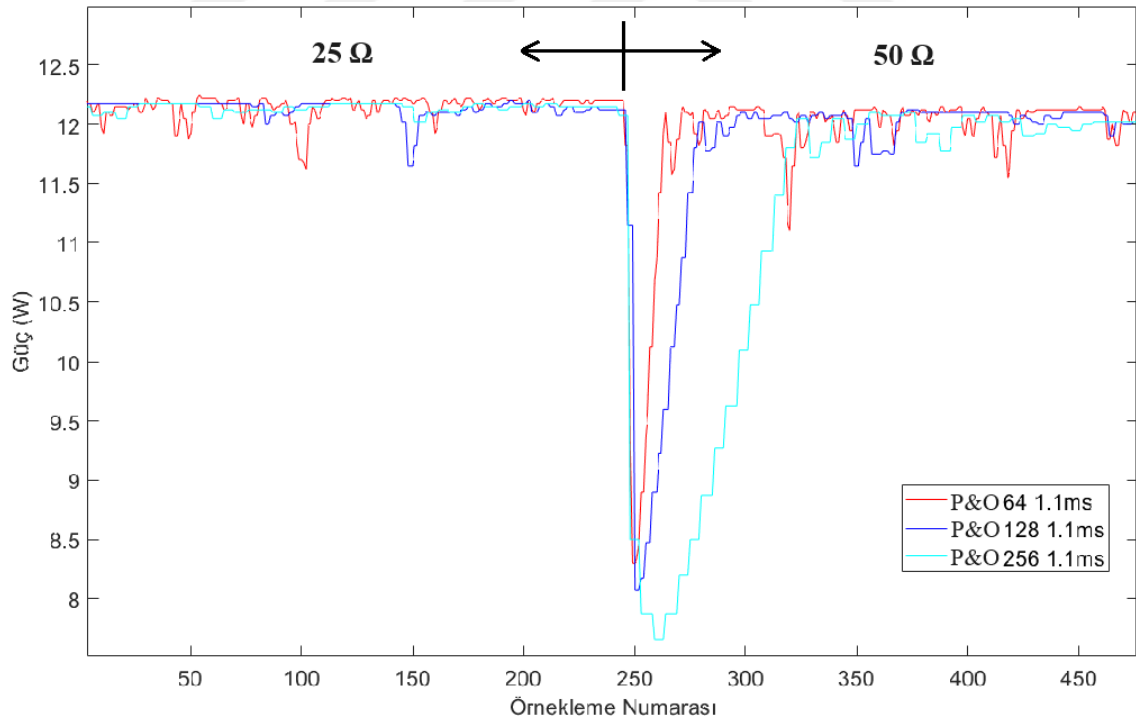
Şekil 4.22 INC algoritmasına göre devre üzerinden alınan verilere göre 64 ortalama alma sayısı ve 2.116 ms dönüştürme süresi için güç değişim grafiği



Şekil 4.23 P&O algoritmasına göre devre üzerinden alınan verilere göre 64 ortalama alma sayısı ve 2.116 ms dönüştürme süresi için güç değişim grafiği

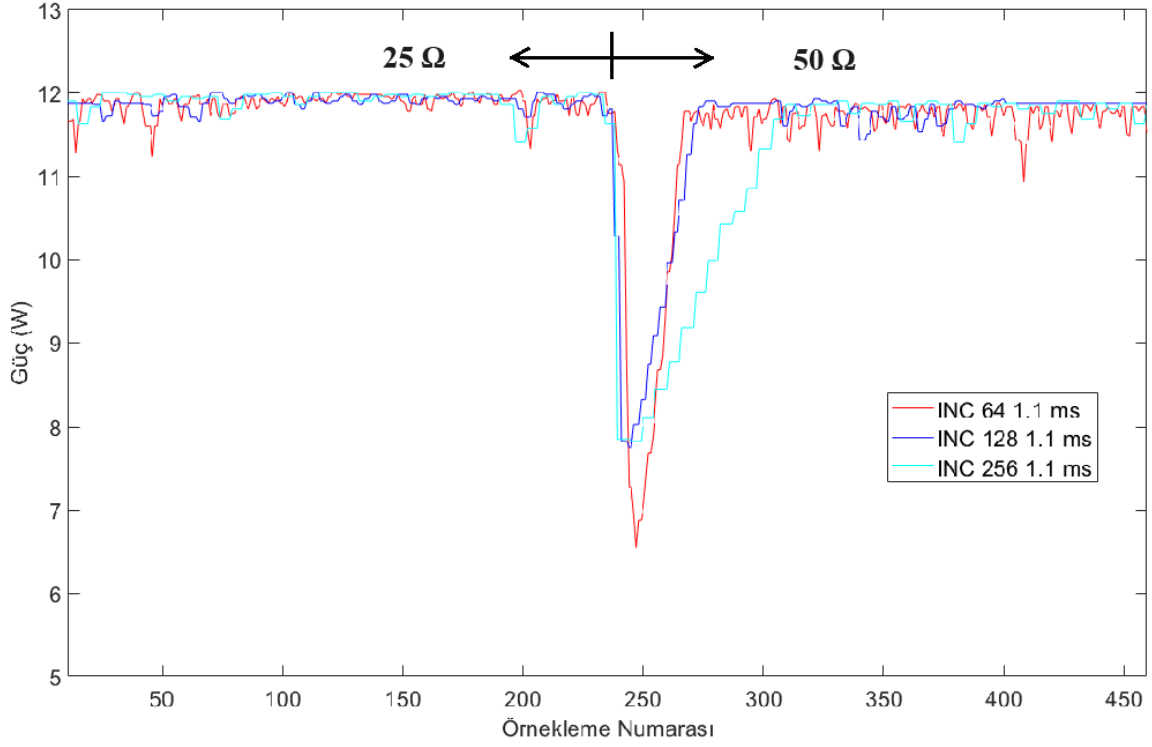
Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'te verilen grafiklerde MPP'ye ulaşma süreleri incelendiğinde en uzun süre INC algoritması için 6.0417 sn ile 25 Ω 'dan 75 Ω 'a olan yük değişiminde olmuştur. Bu süre P&O algoritması için 75 Ω 'dan 25 Ω 'a olan değişimde 10.4546 sn olarak gerçekleşmiştir. Bu deneydeki minimum süreler ise INC için 75 Ω 'dan 50 Ω 'a olan direnç değişiminde 1.4839 sn, P&O için 50 Ω 'dan 75 Ω 'a olan direnç değişiminde 1.7952 sn olmuştur. Minimum güç değeri INC algoritmasında 5.3 W, P&O algoritmasında 5.7 W ile 25 Ω 'dan 50 Ω 'a olan direnç değişiminde elde edilmiştir. En büyük P_{min} değeri ise 75 Ω 'dan 50 Ω 'a olan değişimde 9.575 W ile INC algoritmasında, 50 Ω 'dan 75 Ω 'a olan değişimde 9.55 W ile P&O algoritmasında gerçekleşmiştir.

Devre maksimum güç noktasında dengede iken yük direnci değeri $R_L=25 \Omega$ iken 50 Ω yapıldığında 1.1 ms için 64-128-256 ortalama alma sayıları kullanılarak P&O algoritması için elde edilen grafik Şekil 4.24'te verilmiştir. Grafikte belirtilen sinyal renkleri ortalama alma sayısı 64 için kırmızı, 128 için mavi ve 256 için cyan olarak belirtilmiştir.



Şekil 4.24. P&O algoritmasına göre tüm ortalama alma sayıları için 25 Ω 'dan 50 Ω 'a değişiminde elde edilen güç grafikleri

Bu grafiğe göre MPP'yi yakalama süreleri 64 için 2.3248 sn, 128 için 3.4842 sn 256 için 8.0123 sn olmuştur. P_{min} değerleri ise 64 için 8.3 W, 128 için 8.075 W, 256 için 7.65 W olarak elde edilmiştir.

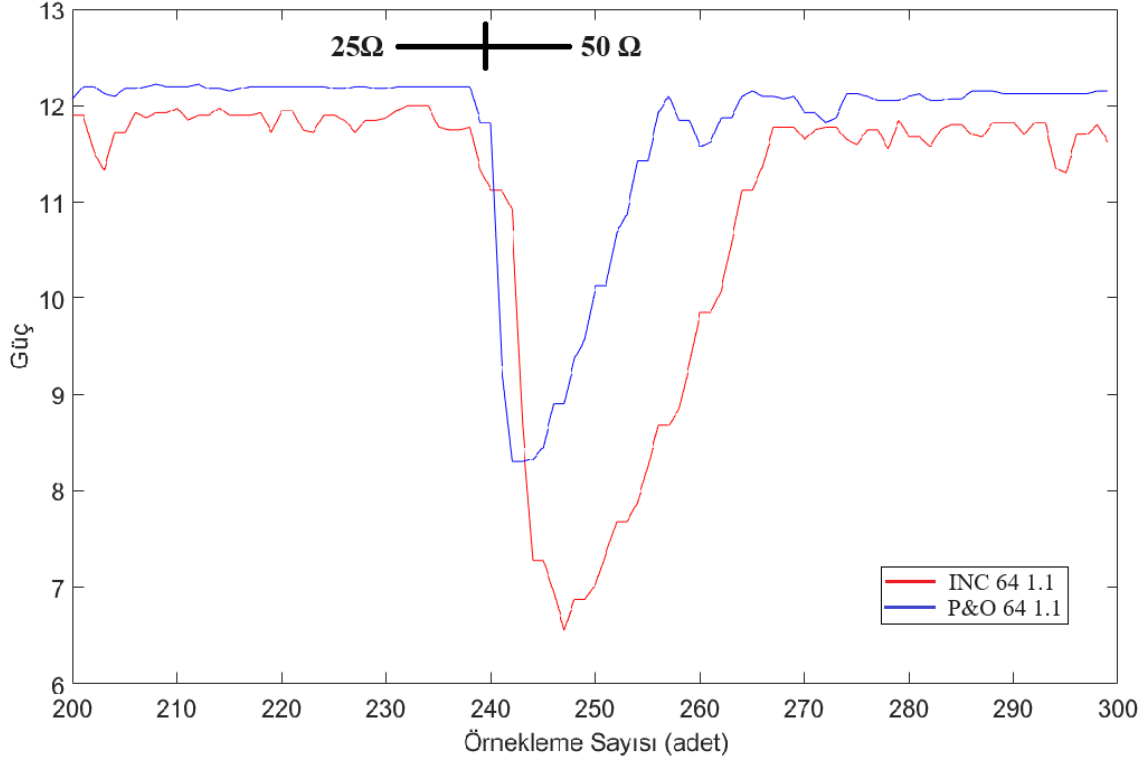


Şekil 4.25. INC algoritmasına göre tüm ortalama alma sayıları için 25 Ω 'dan 50 Ω 'a değişiminde elde edilen güç grafikleri

Şekil 4.25 INC algoritmasına göre yük direnci değeri $R_L=25 \Omega$ iken 50 Ω yapıldığında 1.1 ms için 64, 128, 256 ortalama alma sayıları kullanılarak elde edilen grafiklerdir. Bu grafiğe göre MPP'yi yakalamak için geçen süreler 64 için 2.661 sn, 128 için 3.8239 sn ve 256 için 7.5025 sn olarak gerçekleşmiştir. Minimum noktadaki güç değerleri ise ortalama alma sayısı 64 için 6.55 W, 128 için 7.75 W, 256 için 7.825 W olmuştur.

Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'te verilen grafiklerde 25 Ω 'dan 50 Ω 'a olan değişimde ortalama alma sayısı arttıkça MPP'ye ulaşma sürelerinin de arttığı görülmektedir. Minimum güç değerinin ise ortalama alma sayısı arttıkça P&O algoritmasına göre azaldığı, INC algoritmasına göre arttığı görülmektedir.

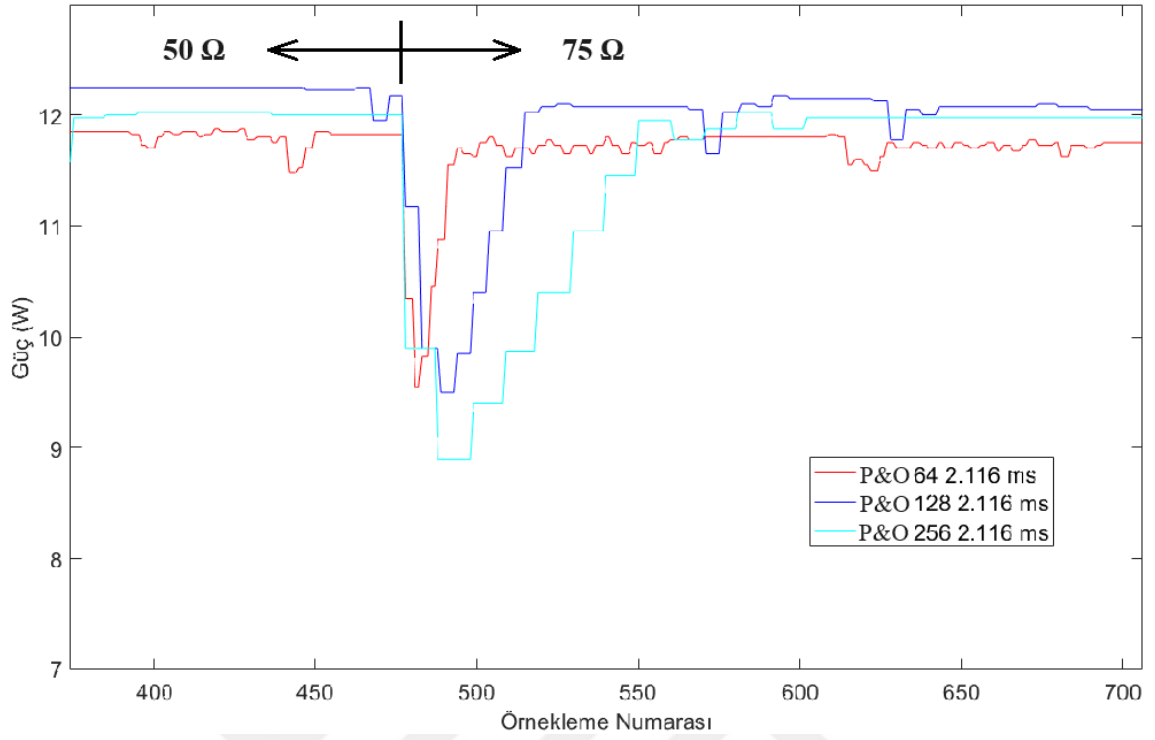
Yük direnci $25\ \Omega$ 'dan $50\ \Omega$ 'a çıkartıldığında 64 ortalama alma sayısı ve 1.1 ms dönüşüm süresine göre MPP algoritmalarını karşılaştırmak için Şekil 4.26'daki grafik çizdirilmiştir.



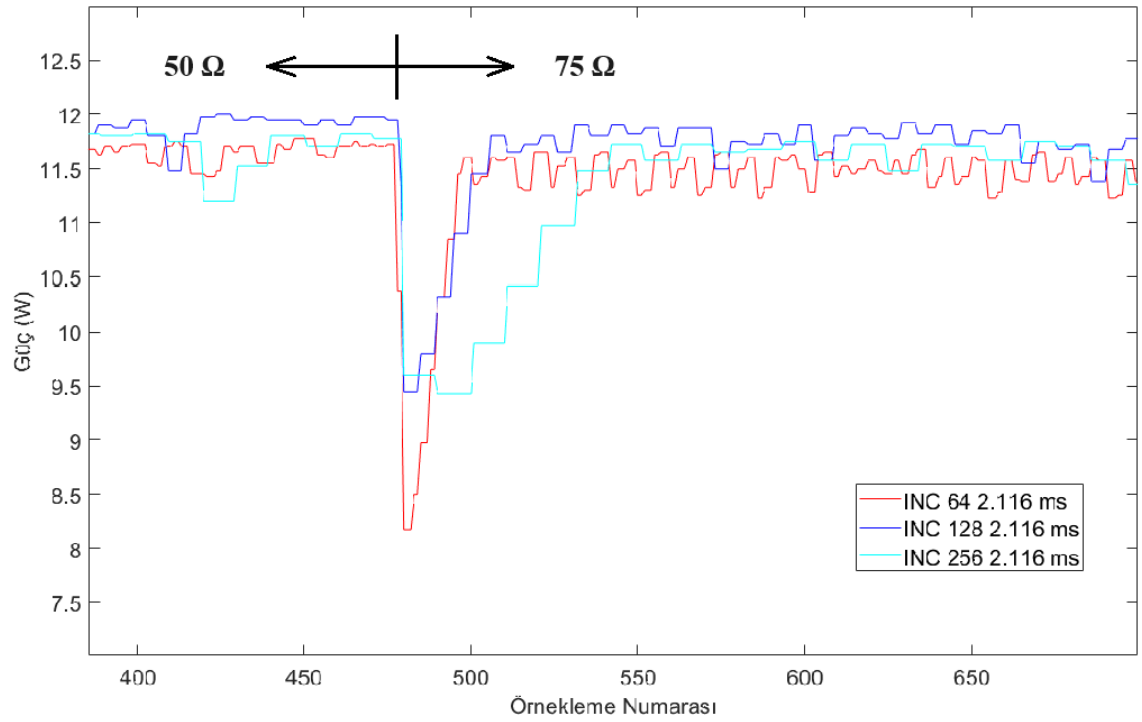
Şekil 4.26. INC ve P&O algoritmaları için devre üzerinden alınan verilere göre 64 ortalama alma sayısı ve 1.1 ms dönüştürme süresine göre $25\ \Omega$ 'dan $50\ \Omega$ 'a güç değişim grafiği

Şekil 4.26'da verilen P&O algoritmasına göre çizdirilen mavi renkli sinyalin MPP'yi yakalama süresi 2.3248 sn olmuştur. Bu süre INC algoritmasına ait kırmızı renkli sinyalde ise 2.661 sn sürmüştür. Böylece P&O algoritması INC algoritmasına göre 0.3362 sn önce MPP'ye ulaşmıştır. Minimum noktadaki güç değerleri ise P&O için 8.3 W, INC için 6.55 W olup iki algoritma arasındaki P_{min} farkı ise 1.75 W değerinde olmuştur.

Şekil 4.27'de ve Şekil 28'da devre MPP'de iken yük direnci değeri $R_L=50\ \Omega$ 'dan $75\ \Omega$ 'a çıkartıldığında 2.116 ms için 64-128-256 ortalama alma sayıları kullanılarak sırasıyla P&O ve INC algoritmaları için elde edilen grafikler verilmiştir. Şekil üzerinde sinyal renklerinin hangi deneye ait olduğu belirtilmiştir.



Şekil 4.27. Dönüşüm süresi 2.116 ve 64, 128, 256 ortalama alma sayısı için P&O algoritmasına göre 50 Ω'dan 75 Ω'a olan değişim grafiği

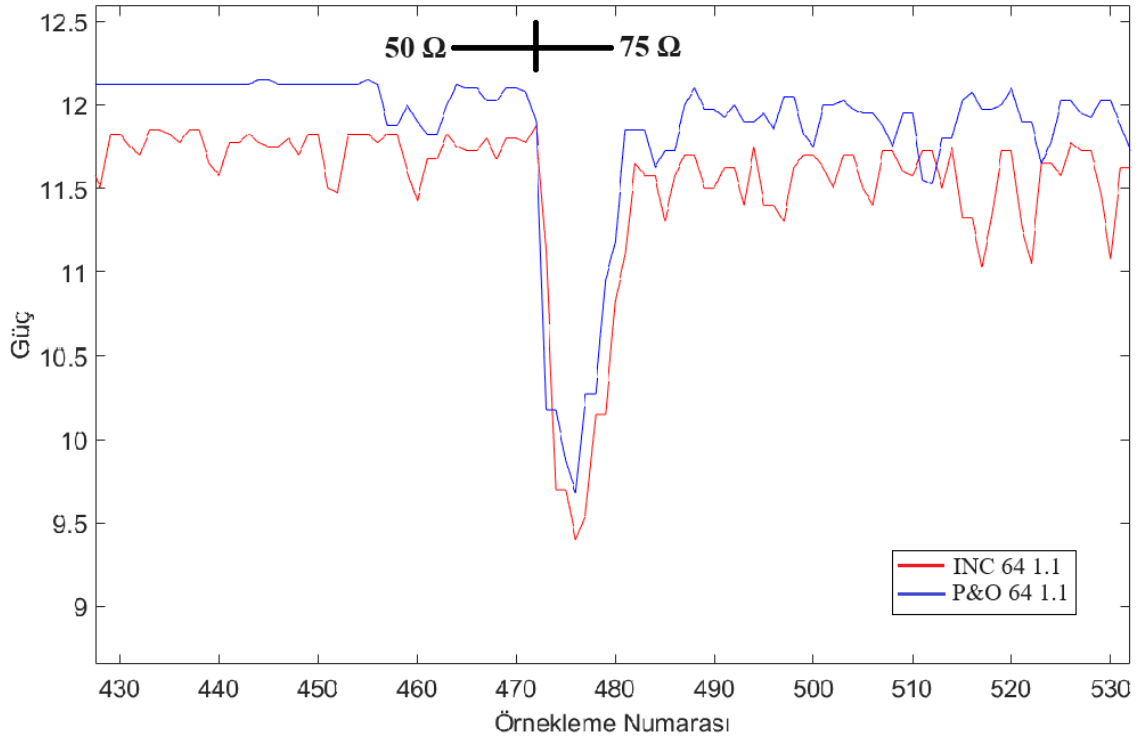


Şekil 4.28. Dönüşüm süresi 2.116 ve 64, 128, 256 ortalama alma sayıları için INC algoritmasına göre 50 Ω'dan 75 Ω'a olan değişim grafiği

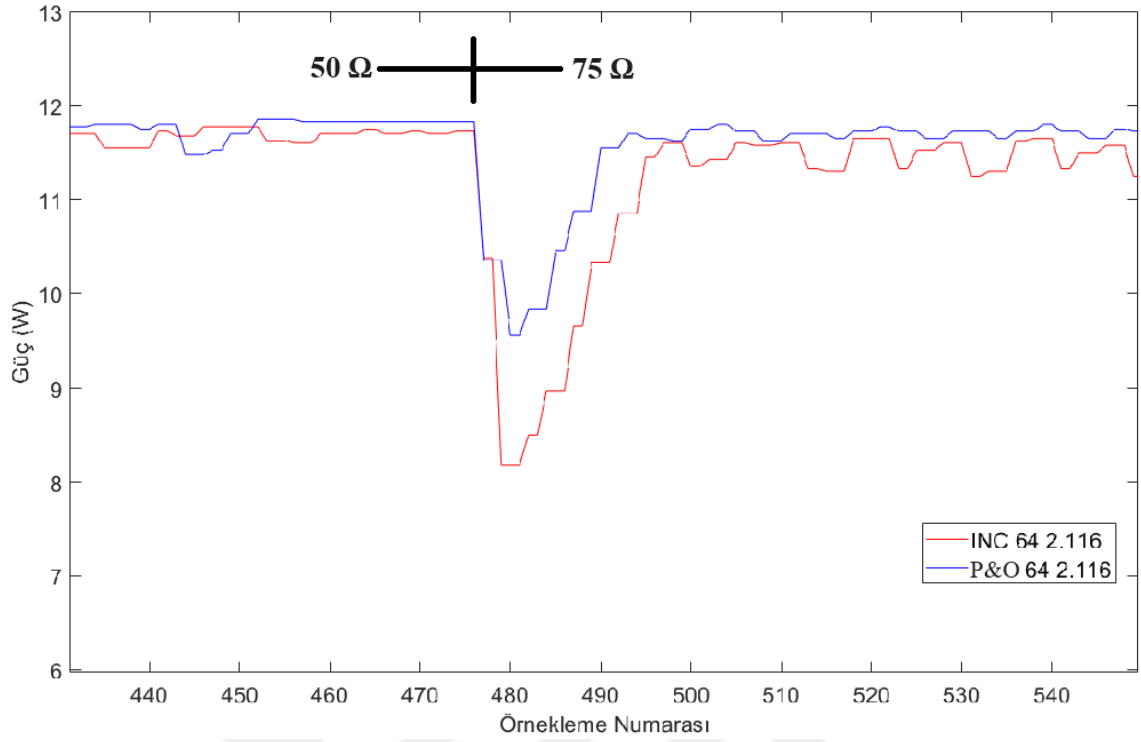
Şekil 4.27’de verilen grafiğe göre devre çıkışındaki direnç değişiminin başladığı andan itibaren tekrar MPP’yi yakalama süreleri 64 için 1.7952 sn, 128 için 4.0057 sn ve 256 için 7.6847 sn olarak gerçekleşmiştir. Minimum noktadaki güç değerleri ise 64 için 9.55 W, 128 için 9.5 W, 256 için 8.9 W olmuştur.

Şekil 4.28’deki grafiğe göre MPP’ye ulaşmak için geçen süreler 64 için 2.0139 sn, 128 için 3.3804 sn ve 256 için 6.6409 sn olmuştur. Minimum noktadaki güç değerleri ise 64 için 8.175 W, 128 için 9.85 W, 256 için 9.8 W olarak gerçekleşmiştir.

Sistem davranışının maksimum güç noktası zorlamalı olarak elde edildiği noktada test edilebilmesi için $R_L=50 \Omega$ ’da maksimum noktada çalışan sistemin dengesi $R_L=75 \Omega$ yapılarak bozulmuş ve tekrar maksimum güç noktasına erişmesi esnasında ölçümler tekrarlanmıştır. 64 ortalama alma sayısında Şekil 4.29’da 1,1 ms ve Şekil 4.30’da 2,116 ms için her iki algoritma türüne göre elde edilen veriler grafik halinde gösterilmiştir.



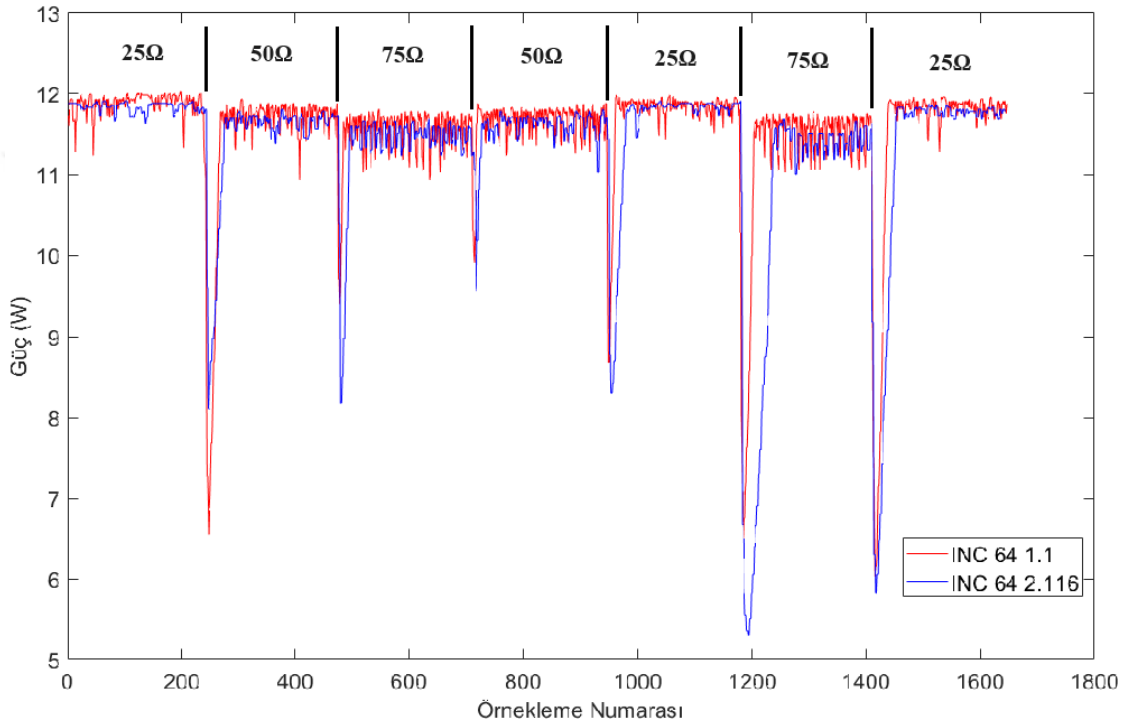
Şekil 4.29. INC ve P&O algoritması 64 ortalama alma sayısı ve 1.1 ms dönüşüm süresi için 50Ω ’dan 75Ω ’a olan güç değişimi



Şekil 4.30. INC ve P&O algoritması 64 ortalama alma sayısı ve 2.116 ms dönüşüm süresi için 50 Ω 'dan 75 Ω 'a olan güç değişimi

Şekil 4.29'da verilen grafiğe göre tekrar MPP'yi yakalama süreleri P&O ve INC algoritmalarına göre sırasıyla 1.1624 sn ve 1.0644 sn olarak elde edilmiştir. Bu sürelerle göre 50 Ω 'dan 75 Ω 'a olan direnç değişiminde INC algoritmasına göre sistem 0.098 sn daha önce MPP'ye ulaşmıştır. Şekil 4.30'da verilen grafikte ise P&O algoritmasında 1.7952 sn, INC algoritmasında 2.0139 sn ile devre MPP'ye ulaşmaktadır. Bu sürelerle göre 0.2187 saniye fark ile P&O algoritmasında sistem daha önce maksimum noktaya ulaşmıştır. Her iki grafiğe göre INC algoritmasında P_{min} değerleri 1.1 ms için 9.4 W, 2.116 ms için 8.175 W olmuştur. P&O algoritmasında ise P_{min} değerleri 1.1 ms için 9.675 W, 2.116 ms için 9.55 W olarak elde edilmiştir. Bu verilere göre algoritmalar arasındaki minimum noktadaki güç farkları 1.1 ms için 1.5 W, 2.116 ms için 0.15 W olmuştur. Bu durumda P&O algoritmasına ait P_{min} değerleri her iki dönüşüm süresinde de 50 Ω 'dan 75 Ω 'a olan direnç değişiminde daha büyük bir değerde elde edilmiştir.

Şekil 4.31’de INC algoritmasına göre 64 ortalama alma sayısında 1.1 ms ve 2.116 ms dönüştürme süreleri için elde edilen güç grafikleri verilmiştir. Bu şekilde 1.1 ms için kırmızı renkli sinyal, 2.116 ms için mavi renkli sinyal kullanılmıştır. İki dönüştürme süresi için bütün yük değişimleri bu grafik üzerinde görülmektedir. Deney başlangıçlarında kaydedilen fotovoltaiik panel sıcaklığı ise 1.1ms için 80 °C, 2.116 ms için 83.3 °C değerlerindedir.



Şekil 4.31. INC algoritması uygulama devresinden alınan verilere göre 64 ortalama alma sayısı, 1.1 ms ve 2.116 ms dönüştürme süreleri için güce ait grafikler

Tablo 4.5’te 64 ortalama alma sayısı için 1.1 ms ve 2.116 ms dönüştürme sürelerinde INC algoritmasına göre sırasıyla devre çıkışındaki direnç değerleri için maksimum güç noktasındayken elde edilen ortalama güç değerleri verilmiştir.

Tablo 4.5. Ortalama alma sayısı 64 iken 1.1 ms ve 2.116 ms için direnç değerlerine göre INC algoritması için MPP’deki ortalama güç (W) değerleri

Dönüşü Süresi	25 Ω	50 Ω	75 Ω	50 Ω	25 Ω	75 Ω	25 Ω
1.1 ms	11.8664	11.7229	11.5717	11.6835	11.8389	11.5498	11.820
2.116 ms	11.8294	11.6520	11.4768	11.6244	11.8259	11.4204	11.775

Tablo 4.5'e göre her iki dönüştürme süresi için en büyük ortalama güç değeri (P_{ort}) deney başlangıcında çıkış direnci 25Ω iken 1.1 ms için 11.8664 W, 2.116 ms için 11.8294 W değerlerinde elde edilmiştir. En küçük P_{ort} değeri ise 25Ω 'dan 75Ω 'a yapılan değişimden sonraki 75Ω 'luk çıkış direncinde 1.1 ms için 11.5498 W, 2.116 ms için 11.4204 W olarak elde edilmiştir. İki dönüştürme süresi için devrenin çıkışındaki direnç değerinin her artışında P_{ort} değerinin azaldığı, her azalışında ise P_{ort} değerinin arttığı görülmektedir.

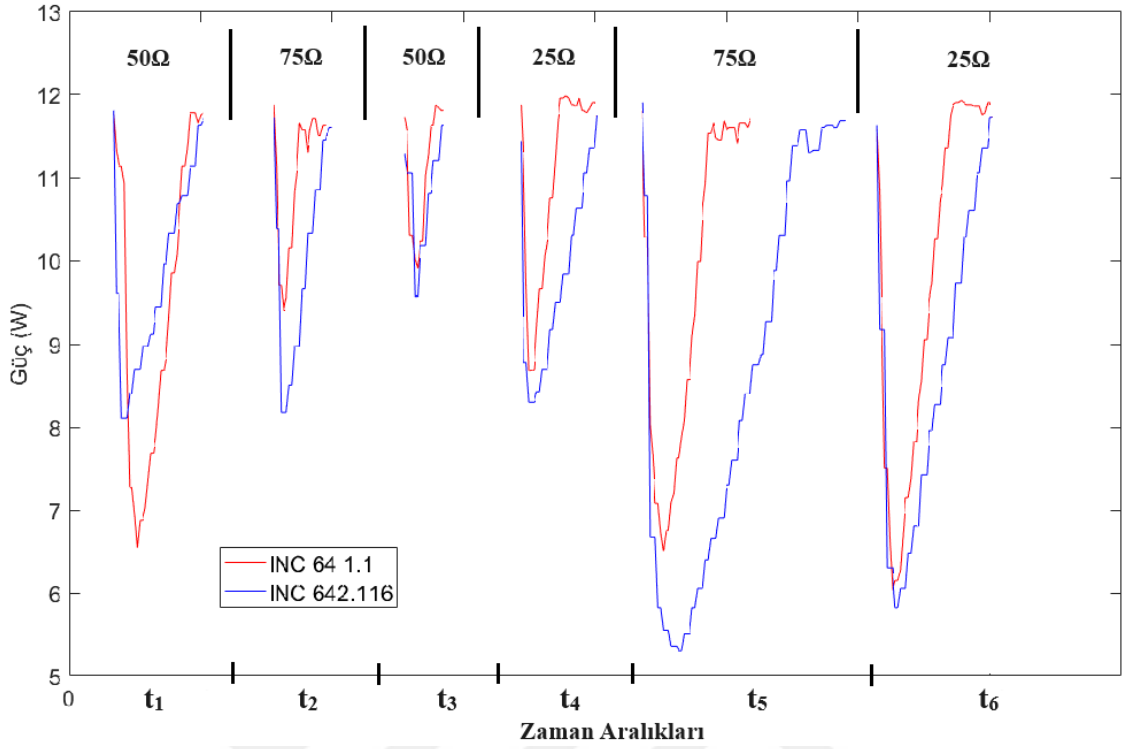
Tablo 4.6'da 64 ortalama alma sayısı için 1.1 ms ve 2.116 ms dönüştürme sürelerinde INC algoritmasına göre sırasıyla devre çıkışındaki her bir direnç değeri için MPP'de elde edilen güç dalgalanmaları yüzdesi verilmiştir. Bu güç dalgalanmaları ise her bir çıkış direnci değeri için devre MPP'de dengede iken bu noktada elde edilen en büyük güç değeri ile en küçük güç değeri arasındaki farkın o bölgedeki P_{ort} değerine bölünmesiyle elde edilmiştir.

Tablo 4.6. INC algoritmasında ortalama alma sayısı 64 iken 1.1 ms ve 2.116 ms için direnç değerlerine göre MPP'deki dalgalanma yüzdeleri

Dönüşü Süresi	25 Ω	50 Ω	75 Ω	50 Ω	25 Ω	75 Ω	25 Ω
1.1 ms	6.74	8.53	7.56	5.56	4.64	6.49	5.71
2.116 ms	2.32	3.64	3.92	6.66	3.80	5.91	1.48

Tablo 4.6 dönüştürme süresinin dalgalanma faktörü (%R) üzerindeki etkisini göstermektedir. Buna göre dönüştürme süresinin artması dalgalanma faktörünün genellikle azalması şeklinde olmuştur. Bu çizelgeye göre en büyük %R değeri 1.1 ms için 50 Ω 'da 8.53, 2.116 ms için 6.66 ile yine 50 Ω değerinde olmuştur. Ancak bu değerler iki dönüştürme süresi için farklı zaman dilimindeki 50 Ω değerinde elde edilmiştir. En küçük %R ise yine farklı zaman dilimlerindeki 25 Ω direnç değerindeyken 1.1 ms için 4.64, 2.116 ms için 1.48 olarak gerçekleşmiştir.

Şekil 4.32 devre INC algoritmasında iken 1.1 ms ve 2.116 ms için 64 ortalama alma sayısında direnç değerinin değiştirildiği andan tekrar maksimum güç noktasına ulaşana kadar olan sinyal değişim grafiklerini göstermektedir.



Şekil 4.32. INC algoritması uygulama devresinden alınan verilere göre 64 ortalama alma sayısı 1.1 ms ve 2.116 ms dönüştürme süreleri için direnç değişim anlarında güce ait grafikler

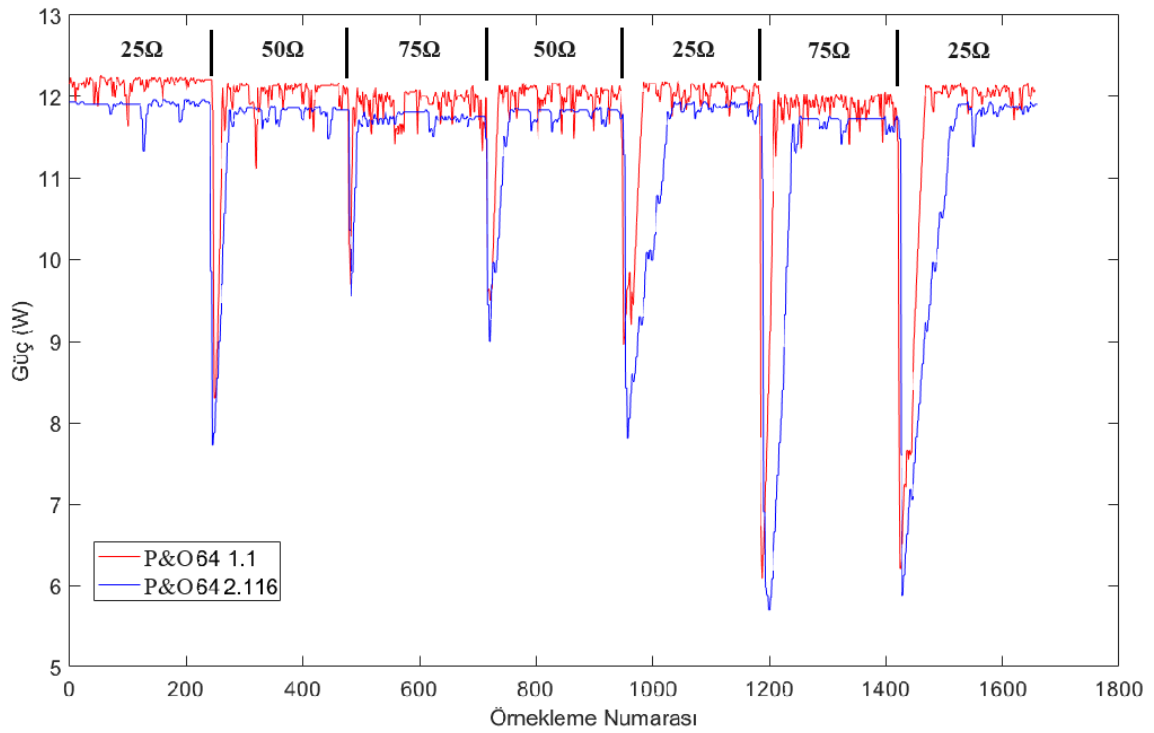
Şekil 4.32’de verilen grafiklere göre 1.1 ms dönüştürme süresine ait kırmızı renkli sinyalin 2.116 ms dönüştürme süresine ait mavi renkli sinyale göre daha kısa sürede MPP’ye ulaştığı anlaşılmaktadır. Tablo 4.7’de bu değişim süreleri verilmiştir. P_{min} değerleri ise çıkış direncinin 50 Ω yapıldığı ilk değişim hariç diğer bütün direnç değişimlerinde 2.116 ms için daha küçük olduğu görülmektedir.

Tablo 4.7. INC algoritması için 64 ortalama alma sayısında dönüşüm sürelerine göre MPP’ye ulaşma zamanları (sn)

Dönüşü Süresi	50 Ω	75 Ω	50 Ω	25 Ω	75 Ω	25 Ω
1.1 ms	2.6610	1.0644	1.1709	1.5967	2.6610	2.9805
2.116 ms	3.3918	2.0139	1.4839	3.0738	6.0417	4.5577

Tablo 4.7’de verilen veriler incelendiğinde 1.1 ms dönüşüm süresinde maksimum güç noktasını yakalama zamanının 2.116 ms dönüştürme süresine göre daha kısa zaman aldığı görülmektedir.

Şekil 4.33 ortalama alma sayısı 64 iken P&O algoritmasına göre 1.1 ms ve 2.116 ms dönüştürme süreleri için elde edilen güç grafiklerini göstermektedir. Bu şekilde 1.1 ms için kırmızı renkli sinyal, 2.116 ms için mavi renkli sinyal kullanılmıştır. İki dönüştürme süresi için devrenin aldığı çıkış direnci değerleri bu grafik üzerinde belirtilmiştir. Deney başlangıçlarında kaydedilen fotovoltaik panel sıcaklığı ise 1.1ms için 73.2 °C, 2.116 ms için 79 °C değerlerindedir.



Şekil 4.33. P&O algoritmasında uygulama devresinden alınan verilere göre 64 ortalama alma sayısı 1.1 ms ve 2.116 ms dönüştürme süreleri için güce ait grafikler

Tablo 4.8’de 64 ortalama alma sayısı için 1.1 ms ve 2.116 ms dönüştürme sürelerinde P&O algoritmasına göre sırasıyla devre çıkışındaki direnç değerleri için MPP’de iken elde edilen ortalama güç değerleri verilmiştir.

Tablo 4.8. Ortalama alma sayısı 64 iken 1.1 ms ve 2.116 ms için direnç değerlerine göre P&O algoritması için MPP’deki ortalama güç (W) değerleri

Dönüşü Süresi	25 Ω	50 Ω	75 Ω	50 Ω	25 Ω	75 Ω	25 Ω
1.1 ms	12.148	12.024	11.906	11.993	12.048	11.862	12.024
2.116 ms	11.886	11.796	11.726	11.775	11.854	11.668	11.815

Tablo 4.8'e göre her iki dönüştürme süresi için en büyük P_{ort} değeri deney başlangıcında çıkış direnci 25Ω iken 1.1 ms için 12.148 W , 2.116 ms için 11.886 W olarak elde edilmiştir. En küçük P_{ort} değeri ise 25Ω 'dan 75Ω 'a yapılan değişimden sonraki 75Ω 'luk çıkış direncinde 1.1 ms için 11.862 W , 2.116 ms için 11.668 W olarak elde edilmiştir. İki dönüştürme süresi için yük direnci değerinin her artışında P_{ort} değerinin azaldığı, her azalışında ise P_{ort} değerinin arttığı görülmektedir.

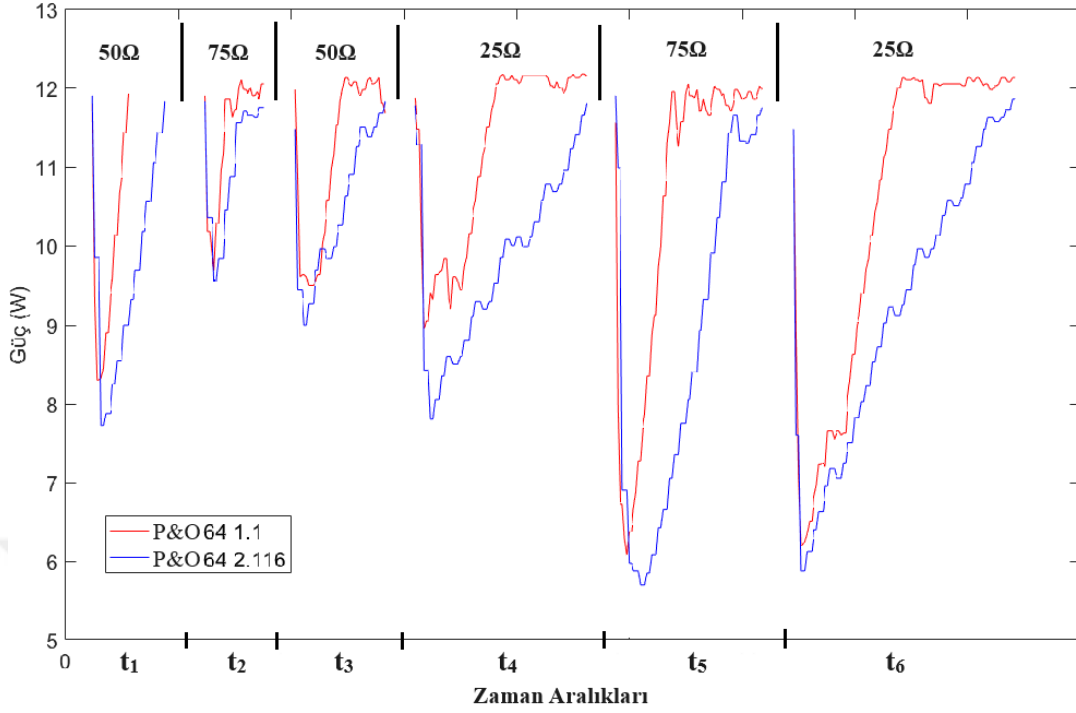
Tablo 4.9'da 64 ortalama alma sayısı için 1.1 ms ve 2.116 ms dönüştürme sürelerinde P&O algoritmasına göre sırasıyla devre çıkışındaki her bir direnç değeri için MPP'de elde edilen %R değerleri verilmiştir.

Tablo 4.9. P&O algoritmasında ortalama alma sayısı 64 iken 1.1 ms ve 2.116 ms için direnç değerlerine göre MPP'deki dalgalanma yüzdeleri

Dönüşü Süresi	25Ω	50Ω	75Ω	50Ω	25Ω	75Ω	25Ω
1.1 ms	5.14	8.73	6.50	5.62	3.52	6.74	3.74
2.116 ms	5.25	3.39	2.77	2.33	2.31	3.85	4.65

Tablo 4.9'a göre dönüştürme süresinin artması dalgalanma faktörünün genellikle azalması şeklinde olmuştur. Bu çizelgeye göre en büyük %R değeri 1.1 ms için 50Ω 'da 8.73 , 2.116 ms için 5.25 ile 25Ω değerinde olmuştur. En küçük %R ise yine 25Ω direnç değerindeyken 1.1 ms için 3.52 , 2.116 ms için 2.31 olarak gerçekleşmiştir. Ancak deney çıkışındaki direnç değerleri farklı zaman aralıklarında aynı değeri aldığı anda dalgalanma faktörü birbirine yakın değerler alabilmektedir. Örnek olarak Tablo 4.9'da farklı zamanlardaki 25Ω 'luk direnç değerlerinde elde edilen 3 farklı %R değeri 1.1 ms için 5.14 , 3.52 , 3.74 ve 2.116 ms için 5.25 , 2.31 , 4.65 olmuştur.

Şekil 4.34 devre P&O algoritmasında iken 1.1 ms ve 2.116 ms için 64 ortalama alma sayısında yük değerinin değiştirildiği andan tekrar maksimum güç noktasına ulaşana kadar olan sinyal değişim grafiklerini göstermektedir.



Şekil 4.34. P&O algoritması uygulama devresinden alınan verilere göre 64 ortalama alma sayısı, 1.1 ms ve 2.116 ms dönüştürme süreleri için direnç değişim anlarında güce ait grafikler

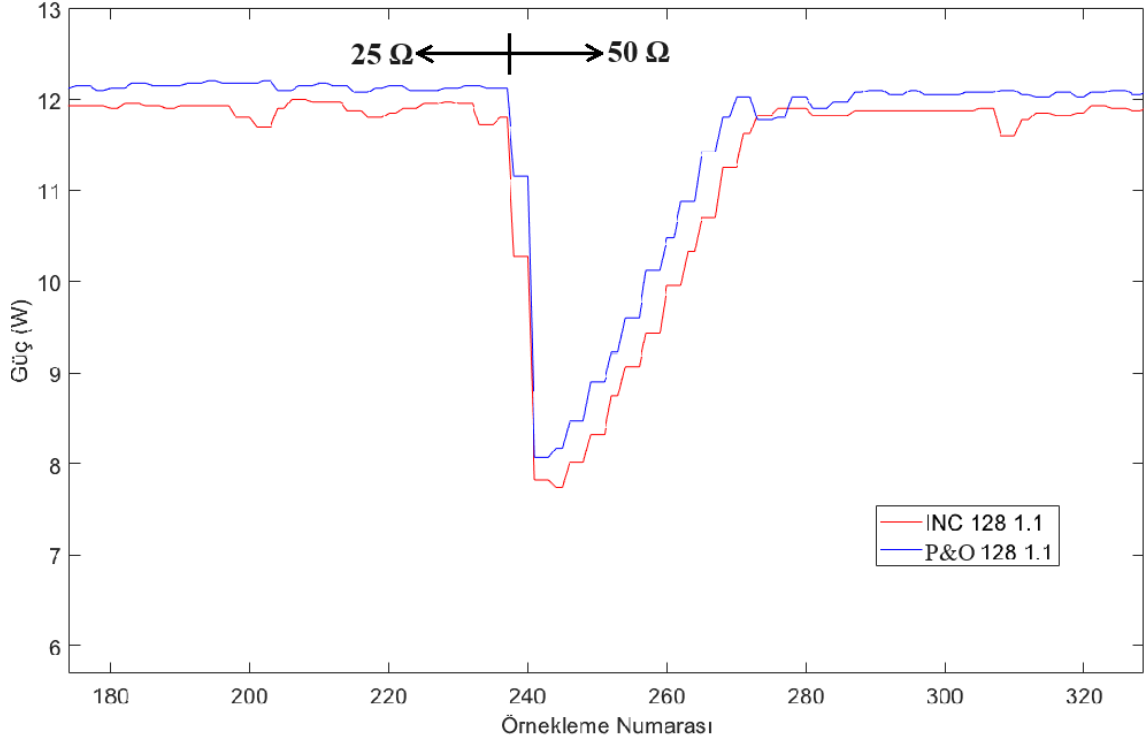
Bu grafikte yatay eksenle verilen zaman aralıklarına göre 1.1 ms dönüştürme süresine ait kırmızı renkli sinyalin 2.116 ms dönüştürme süresine ait mavi renkli sinyale göre daha kısa sürede MPP'ye ulaştığı anlaşılmaktadır. Tablo 4.10'da bu değişim anında geçen süreler verilmiştir. P_{min} değerleri bütün direnç değişimlerinde 2.116 ms için daha küçük olduğu görülmektedir.

Tablo 4.10. P&O algoritması için 64 ortalama alma sayısında dönüşüm sürelerine göre MPP'ye ulaşma zamanları (sn)

Dönüşü Süresi	50 Ω	75 Ω	50 Ω	25 Ω	75 Ω	25 Ω
1.1 ms	2.3248	1.1624	2.3248	3.6986	2.6418	4.9667
2.116 ms	3.3792	1.7952	4.2241	7.4977	5.2800	10.4546

Tablo 4.10'da verilen veriler incelendiğinde 1.1 ms dönüşüm süresinde maksimum güç noktasını yakalama zamanının 2.116 ms dönüştürme süresine göre daha küçük olduğu görülmektedir. Buna göre en uzun süreler 1.1 ms için 4.9667 sn, 2.116 ms için 10.4546 sn değerlerinde 50 Ω 'luk direnç azalışında olmuştur.

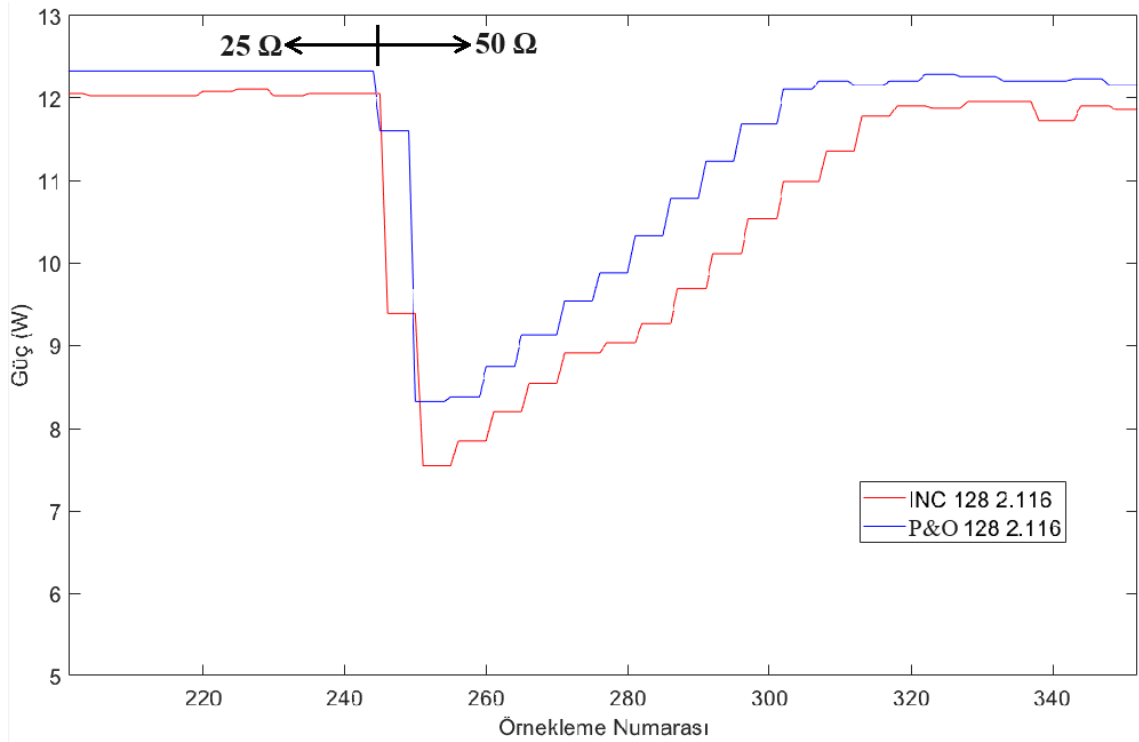
Yük direnci değeri 25Ω 'dan 50Ω 'a çıkartıldığında 128 ortalama alma sayısı ve 1.1 ms dönüşüm süresine göre P&O ve INC algoritmalarını karşılaştırmak için Şekil 4.35'te verilen grafik çizdirilmiştir.



Şekil 4.35. INC ve P&O algoritması 128 ortalama alma sayısı ve 1.1 ms dönüşüm süresi için 25Ω 'dan 50Ω 'a olan güç değişimi

Şekil 4.35'te verilen P&O algoritmasına göre çizdirilen mavi renkli sinyalin MPP'yi yakalama süresi 3.4842 sn, INC algoritmasında ait kırmızı renkli sinyalde ise 3.8239 sn olmuştur. Böylece P&O algoritması INC algoritmasına göre 0.3377 sn önce MPP'ye ulaşmıştır. Minimum noktadaki güç değerleri ise P&O için 8.075 W, INC için 7.75 W olup iki algoritma arasındaki P_{min} farkı ise 0.325 W değerinde olmuştur.

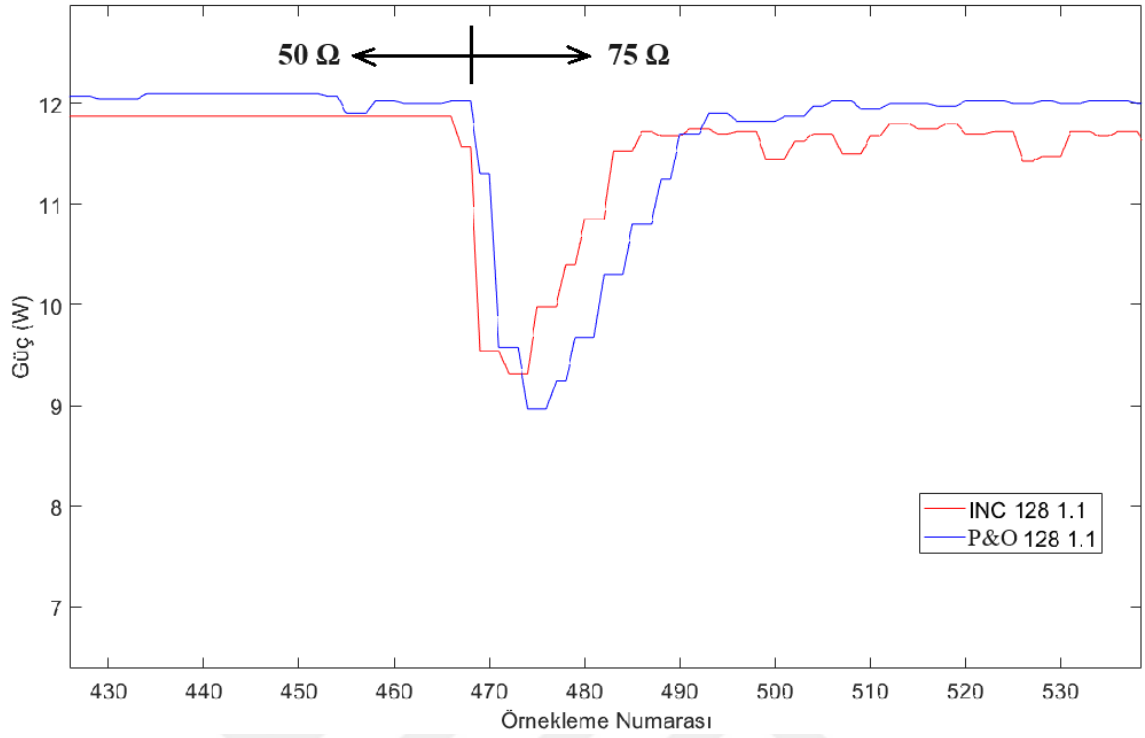
Yük direnci değeri 25Ω 'dan 50Ω 'a çıkartıldığında 128 ortalama alma sayısı ve 2.116 ms dönüşüm süresine göre P&O ve INC algoritmalarını karşılaştırmak için Şekil 4.36'da verilen grafik çizdirilmiştir.



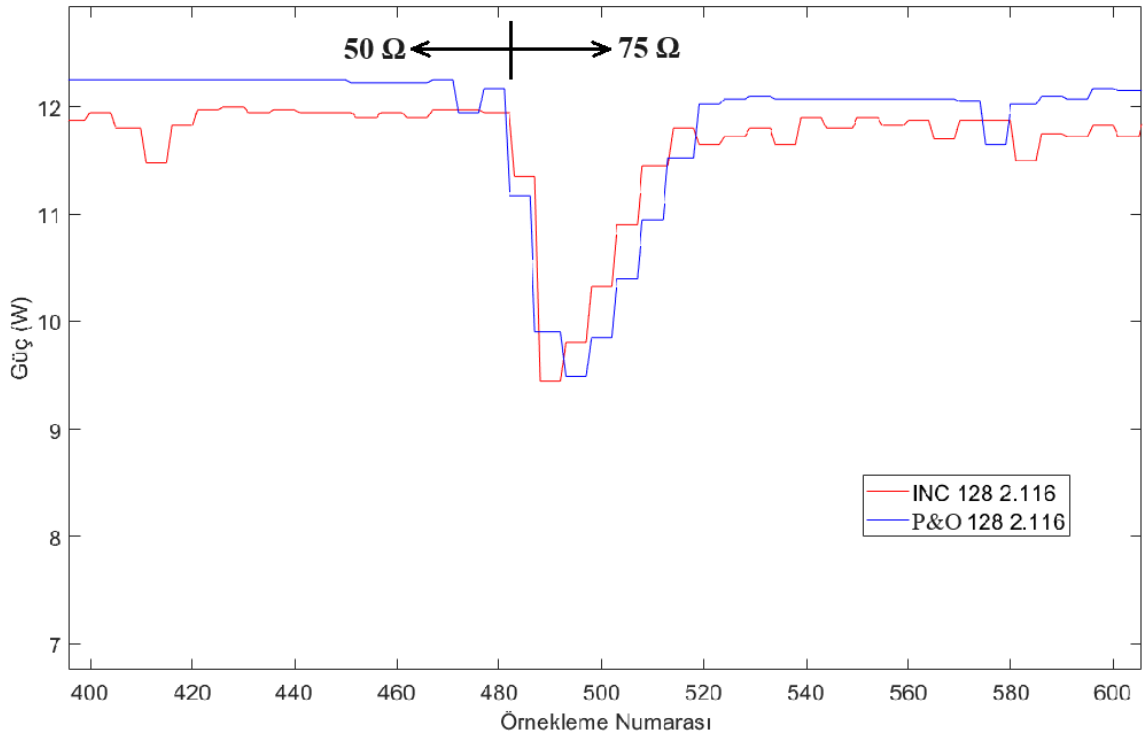
Şekil 4.36. INC ve P&O algoritması 128 ortalama alma sayısı ve 2.116 ms dönüşüm süresi için 25Ω 'dan 50Ω 'a olan güç değişimi

Şekil 4.36'da verilen grafiğe göre MPP'yi yakalama süreleri P&O ve INC algoritmalarına göre sırasıyla 6.1139 sn ve 7.7116 sn olarak elde edilmiştir. Bu sürelerle göre 25Ω 'dan 50Ω 'a olan direnç değişiminde P&O algoritması INC algoritmasına göre 1.5977 sn daha önce MPP'ye ulaşmıştır. P_{min} değerleri ise P&O algoritmasında 8.375 W, INC algoritmasında 7.55 W değerlerini almıştır. Elde edilen bu verilere göre her iki algoritma arasındaki minimum noktalardaki güç farkları 0.775 W olarak gerçekleşmiştir.

Maksimum güç noktasında devam eden sistemin dengesi 50Ω 'dan 75Ω değerine bozulduğunda Şekil 4.37'da 1.1 ms için, Şekil 30'da ise 2.116 ms için 128 ortalama alma sayısına göre P&O ve INC algoritmaları için çizdirilen grafikler verilmiştir.



Şekil 4.37. INC ve P&O algoritması 128 ortalama alma sayısı ve 1.1 ms dönüşüm süresi için 50 Ω'dan 75 Ω' olan güç değişimi



Şekil 4.38. INC ve P&O algoritması 128 ortalama alma sayısı ve 2.116 ms dönüşüm süresi için 50 Ω'dan 75 Ω' a olan güç değişimi

Şekil 4.37’de verilen grafiğe göre tekrar MPP’yi yakalama süreleri P&O algoritmasında 2,6396 sn ve INC algoritmasında 1.5933 sn olarak elde edilmiştir. Bu sürelerle göre 50 Ω ’dan 75 Ω ’a olan direnç değişiminde INC algoritmasına göre sistem 1.0463 saniye süreyle daha önce MPP’ye ulaşmıştır. Şekil 4.38’de verilen grafikte ise P&O algoritmasında 4.0057 sn, INC algoritmasında 3.3804 sn ile devre MPP’ye ulaşmaktadır. Bu sürelerle göre 0.6253 saniye fark ile INC algoritmasında sistem daha önce maksimum noktaya ulaşmıştır. Her iki grafiğe göre INC algoritmasında P_{min} değerleri 1.1 ms için 9,325 W, 2.116 ms için 9,45W olmuştur. P&O algoritmasında ise P_{min} değerleri 1.1 ms için 8,975 W, 2.116 ms için 9,5 W olarak elde edilmiştir. Bu verilere göre 50 Ω ’dan 75 Ω ’a olan direnç değişiminde her iki algoritma arasındaki minimum noktalardaki güç farkları 1.1 ms için 0.45 W 2.116 ms için 0.05 W olarak gerçekleşmiştir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu bölümde yapılan bütün deneylere ait elde edilen veriler çizelgeler halinde verilip dönüşüm süresinin ve ortalama alma sayısının ulaşılan sonuçlara göre MPPT'ye olan etkileri belirtilmiştir. Tablo 5.1-2-3-4'te algoritma türüne, ortalama alma sayısına ve dönüştürme sürelerine göre direnç değişim anlarında MPP'ye ulaşırken devrenin minimumda ulaştığı güç değerleri verilmiştir.

Tablo 5.1. P&O algoritmasında 1.1 ms için çıkış direnci değerleri ve ortalama alma sayılarına göre P_{min} (W) değerleri

Ortalama sayısı	50 Ω	75 Ω	50 Ω	25 Ω	75 Ω	25 Ω
64	8.3	9.675	9.5	8.95	6.075	6.200
128	8.075	8.975	9.725	8	5.825	6.325
256	7.65	9.425	9.425	7.7	5.375	6.15

Tablo 5.2. P&O algoritmasında 2.116 ms için çıkış direnci değerleri ve ortalama alma sayılarına göre P_{min} (W) değerleri

Ortalama sayısı	50 Ω	75 Ω	50 Ω	25 Ω	75 Ω	25 Ω
64	7.725	9.55	9	7.8	5.7	5.875
128	8.375	9.5	9.8	8.1	5.375	5.6
256	7.475	8.9	9.10	7.925	5.525	5.650

Tablo 5.3. INC algoritmasında 1.1 ms için çıkış direnci değerleri ve ortalama alma sayılarına göre P_{min} (W) değerleri

Ortalama sayısı	50 Ω	75 Ω	50 Ω	25 Ω	75 Ω	25 Ω
64	6.55	9.4	9.9	8.7	6.5	6.15
128	7.75	9.325	8.975	8.15	5.7	5.575
256	7.825	8.55	9.15	7.95	5.525	5.35

Tablo 5.4. INC algoritmasında 2.116 ms için çıkış direnci değerleri ve ortalama alma sayılarına göre P_{min} (W) değerleri

Ortalama sayısı	50 Ω	75 Ω	50 Ω	25 Ω	75 Ω	25 Ω
64	8.1	8.175	9.575	8.3	5.3	5.825
128	7.55	9.45	9.85	7.1	5.6	5.525
256	7.725	9.425	9.80	7.90	4.80	5.05

Tablo 5.1-2-3-4'e göre devrenin çıkışındaki direnç değerinde her 25 Ω 'luk artış sağlandığında P_{min} değerlerinin bütün deneylerde arttığı görülmektedir. Direnç değerinin her 50 Ω 'luk artışında ise P_{min} değeri bütün deneylerde azalmıştır. Ortalama alma sayısının, dönüştürme süresinin ve algoritma türünün P_{min} değerine bir etkisi olduğu sonucuna ulaşılamamıştır. Dolaysı ile P_{min} değerini yük direncinin aldığı değerler etkilemektedir.

Tablo 5.5-6-7-8'de ortalama alma sayısına, dönüştürme süresine ve algoritma türüne göre devrenin çıkışındaki direnç değişimlerinde MPP'ye ulaşma süreleri verilmiştir.

Tablo 5.5. P&O algoritmasında 1.1 ms için çıkış direnci değerleri ve ortalama alma sayılarına göre MPP'ye ulaşma süreleri (sn)

Ortalama sayısı	50 Ω	75 Ω	50 Ω	25 Ω	75 Ω	25 Ω
64	2.325	1.162	2.325	3.699	2.642	4.967
128	3.484	2.640	2.640	9.186	5.807	13.937
256	8.012	3.479	8.539	20.031	10.859	22.350

Tablo 5.6. P&O algoritmasında 2.116 ms için çıkış direnci değerleri ve ortalama alma sayılarına göre MPP'ye ulaşma süreleri (sn)

Ortalama sayısı	50 Ω	75 Ω	50 Ω	25 Ω	75 Ω	25 Ω
64	3.379	1.795	4.224	7.498	5.280	10.455
128	6.114	4.006	6.009	15.917	9.909	21.926
256	14.317	7.685	12.106	22.949	19.791	48.108

Tablo 5.7. INC algoritmasında 1.1 ms için çıkış direnci değerleri ve ortalama alma sayılarına göre MPP'ye ulaşma süreleri (sn)

Ortalama sayısı	50 Ω	75 Ω	50 Ω	25 Ω	75 Ω	25 Ω
64	2.661	1.064	1.171	1.597	2.661	2.981
128	3.824	1.593	2.656	2.974	6.055	4.992
256	7.503	4.121	3.698	7.397	11.412	11.941

Tablo 5.8. INC algoritmasında 2.116 ms için çıkış direnci değerleri ve ortalama alma sayılarına göre MPP'ye ulaşma süreleri (sn)

Ortalama sayısı	50 Ω	75 Ω	50 Ω	25 Ω	75 Ω	25 Ω
64	3.392	2.014	1.484	3.074	6.042	4.558
128	7.712	3.380	3.380	7.817	10.986	10.564
256	14.231	6.641	6.641	12.122	24.245	21.923

Tablo 5.5-6-7-8'de verilen sürelere göre ortalama alma sayısının her artışında bütün çıkış direnci değerlerinde tüm deneyler için MPP'ye ulaşma sürelerinin arttığı görülmektedir. Yapılan bütün deneylerde 25 Ω 'luk artışlarda 50 Ω 'a ulaşmak için geçen sürelerin 75 Ω 'a ulaşmak için geçen sürelerden daha uzun olduğu görülmektedir. INC algoritmasındaki tüm deneylerde çıkış direnci 50 Ω artırılarak 75 Ω yapıldığında 25 Ω 'luk değişimlere göre daha uzun süreler elde edilmiştir. P&O algoritmasında çıkış direnci 50 Ω 'luk artış ile 75 Ω yapıldığında aynı dönüştürme sürelerine göre karşılaştırıldığında deneyler için geçen süreler INC algoritmasına göre daha kısa olmuştur. Yük değeri 50 Ω 'dan 25 Ω 'a düşürüldüğünde 25 Ω 'luk değişimlerde P&O algoritmasında en uzun süreler elde edilmiş olup bu direnç değişiminde geçen süreler INC algoritmasına göre daha uzun sürmüştür. Elde edilen verilere göre ortalama alma sayısının ve dönüştürme süresinin artması devrenin MPP'ye ulaşma süresini arttırmaktadır. Devre çıkışında aynı direnç değerlerinde deneyler iki algoritma türüne göre ayrı ayrı yapıldığında MPP'ye ulaşma sürelerinin direnç değişimi aynı yönlü ve aynı miktarda iken farklılık gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. Tablo 5.9-10-11-12'de ise devrenin çıkışına bağlı direnç değerlerine göre MPP'de elde edilen ortalama güç değerleri verilmiştir.

Tablo 5.9. P&O algoritmasında 1.1 ms için çıkış direnci değerleri ve ortalama alma sayılarına göre ortalama güç (W) değerleri

Ortalama sayısı	25 Ω	50 Ω	75 Ω	50 Ω	25 Ω	75 Ω	25 Ω
64	12.1484	12.0243	11.9063	11.9937	12.0484	11.8628	12.0242
128	12.1404	12.0300	11.9500	12.0083	12.0510	11.8737	11.9958
256	12.1386	11.9814	11.9077	11.9883	12.0843	11.8992	12.0785

Tablo 5.10. P&O algoritmasında 2.116 ms için çıkış direnci değerleri ve ortalama alma sayılarına göre ortalama güç (W) değerleri

Ortalama sayısı	25 Ω	50 Ω	75 Ω	50 Ω	25 Ω	75 Ω	25 Ω
64	11.8868	11.7962	11.7263	11.7756	11.8545	11.6680	11.8157
128	12.295	12.2220	12.0633	12.1508	12.0935	12.0200	12.1362
256	12.1388	12.0077	11.9524	12.0272	12.0386	11.8559	12.0193

Tablo 5.11. INC algoritmasında 1.1 ms için çıkış direnci değerleri ve ortalama alma sayılarına göre ortalama güç (W) değerleri

Ortalama sayısı	25 Ω	50 Ω	75 Ω	50 Ω	25 Ω	75 Ω	25 Ω
64	11.8664	11.7229	11.5717	11.6835	11.8389	11.5498	11.8200
128	11.8913	11.8190	11.6674	11.7849	11.8789	11.6177	11.8616
256	11.9082	11.7785	11.6399	11.7229	11.8790	11.6485	11.8782

Tablo 5.12. INC algoritmasında 2.116 ms için çıkış direnci değerleri ve ortalama alma sayılarına göre ortalama güç (W) değerleri

Ortalama sayısı	25 Ω	50 Ω	75 Ω	50 Ω	25 Ω	75 Ω	25 Ω
64	11.8294	11.6520	11.4768	11.6244	11.8259	11.4204	11.7751
128	11.9867	11.8714	11.7299	11.8313	12.0052	11.7175	11.8851
256	11.8958	11.7089	11.6318	11.7172	11.8715	11.5980	11.8448

Tablo 5.9-10-11-12'deki verilere göre devrenin çıkışına bağlı direnç değeri arttıkça ortalama güç değerleri azalmıştır. Ayrıca ortalama alma sayılarına göre karşılaştırma yapıldığında 64 ortalama alma sayısında elde edilen P_{ort} değerlerinin 128 ve 256 ortalama alma sayısına göre genellikle daha düşük olduğu görülmektedir. Ortalama alma sayısı 128 yapıldığında bu değer 64 ortalama alma sayısına göre daha büyük olduğu görülmektedir. Ortalama alma sayısı 256 yapıldığında ise ortalama güç değerlerinin 128 ortalama alma sayısına göre düştüğü görülmektedir. Yapılan tüm deneylerde ise MPP'deki ortalama güç değerleri 128 ortalama alma sayısında daha büyük değerlerde elde edilmiştir.

Tablo 5.13-14-15-16'da ortalama alma sayıları ve dönüştürme süreleri için dalgalanma faktörü değerleri iki algoritma türüne göre çıkış direnci değerlerine bağlı olarak elde edilen değerleri verilmiştir.

Tablo 5.13. P&O algoritmasında 1.1 ms için çıkış direnci değerleri ve ortalama alma sayılarına göre dalgalanma faktörü değerleri

Ortalama sayısı	50 Ω	75 Ω	50 Ω	25 Ω	75 Ω	25 Ω
64	5.145	8.732	6.509	5.628	3.527	6.744
128	4.530	3.948	2.929	2.498	2.282	4.422
256	1.236	2.713	3.779	2.085	1.034	2.941

Tablo 5.14. P&O algoritmasında 2.116 ms için çıkış direnci değerleri ve ortalama alma sayılarına göre dalgalanma faktörü değerleri

Ortalama sayısı	50 Ω	75 Ω	50 Ω	25 Ω	75 Ω	25 Ω
64	5.258	3.391	2.772	2.335	2.320	3.857
128	2.847	2.455	4.352	3.292	5.168	0.624
256	3.089	0.416	2.092	0.208	2.700	1.476

Tablo 5.15. INC algoritmasında 1.1 ms için çıkış direnci değerleri ve ortalama alma sayılarına göre MPP'ye ulaşma süreleri (sn)

Ortalama sayısı	50 Ω	75 Ω	50 Ω	25 Ω	75 Ω	25 Ω
64	6.742	8.530	7.562	5.563	4.646	6.494
128	2.943	4.230	4.285	5.516	2.315	4.949
256	5.039	4.245	7.088	5.545	2.315	4.292

Tablo 5.16. INC algoritmasında 2.116 ms için çıkış direnci değerleri ve ortalama alma sayılarına göre MPP'ye ulaşma süreleri (sn)

Ortalama sayısı	50 Ω	75 Ω	50 Ω	25 Ω	75 Ω	25 Ω
64	2.325	3.647	3.921	6.667	3.805	5.910
128	5.214	4.422	4.689	4.859	1.458	6.187
256	1.681	5.338	4.299	3.627	0.842	3.449

Ortalama alma sayısı ve dönüştürme süresinin artması devrede yazılımın her bir döngüsünden elde edilen ardışık akım ve gerilimin aynı değerde kalma sıklığını artırmaktadır. Bu ise MPP algoritmalarındaki akış diyagramına göre görev döngüsündeki değişimi azaltarak MPP'de güçteki değişim sıklığını düşürüp daha sabit değerlerde seyretmesini sağlamaktadır. Tablo 5.13-14-15-16'da dalgalanma faktörü her bir algoritma türü aynı dönüştürme sürelerinde kendi içerisinde değerlendirildiğinde ortalama alma sayısı artırıldığında P&O algoritmasında azaldığı sonucuna ulaşılmaktadır.

Tablo 5.17 INC ve P&O algoritma türlerine göre her bir ortalama alma sayısında 1.1 ms ve 2.116 ms'lik dönüştürme süreleri için aynı deneylerdeki tüm yük direnci değişimlerinde toplamda elde edilen MPP'ye ulaşma sürelerini ve bu sürelerin algoritma türlerine göre aralarındaki farkları göstermektedir.

Tablo 5.17. Yapılan 12 ayrı deney için toplamda elde edilen süreler ve algoritma türleri arasında oluşan süre farkları (sn)

Ortalama Alma Sayısı	64		128		256	
Dönüştürme Süresi	1.1 ms	2.116ms	1.1 ms	2.116ms	1.1 ms	2.116ms
P&O	17.1191	32.6308	37.6934	63.88	73.2700	124.9552
INC	12.1345	20.5628	22.0939	43.8398	46.0716	85.8019
P&O -INC	4.9846	12.0680	15.5995	20.0402	27.1984	39.1533

Tablo 5.17'ye göre her bir ortalama alma sayısı için 2.116 ms'lik dönüştürme süresine göre MPP'ye ulaşma sürelerinin 1.1 ms'lik dönüştürme süresinden daha büyük olduğu görülmektedir. Ortalama alma sayısı artırıldığında ise aynı dönüştürme sürelerinde MPP'ye ulaşma süreleri de atmaktadır. Algoritma türlerine göre iki ayrı dönüştürme süresinde ve üç ayrı ortalama alma sayısında toplamda elde edilen tüm sürelerin P&O algoritmasında daha büyük olmuştur. İki algoritma türü arasındaki MPP'ye ulaşma süreleri arasındaki en büyük fark ise 256 ortalama alma sayısında ve 2.116 ms dönüştürme süresinde 39.1533 sn olarak, en küçük fark ise 64 ortalama alma sayısında ve 1.1 ms dönüştürme süresinde 4.9846 sn olarak gerçekleşmiştir. Algoritma türlerine göre aynı dönüştürme süreleri kendi içerisinde değerlendirildiğinde ortalama alma sayısı arttıkça oluşan süre farklarının da artması şeklinde olmuştur.

Kaynaklar

- Anonim, 2013. RHRP15120. Fairchild Semiconductor Corporation, USA.
- Anonim, 2000. IRFP260N. International Rectifier, USA.
- Anonim, 2011. INA226 High-Side or Low-Side Measurement, Bi-Directional Current and Power Monitor with I²C Compatible Interface. Texas Instruments Incorporated, USA.
- Anonim, 2009. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi Kyoto Protokolü. Resmi Gazete, Ankara, 27227.
- Anonim, 2024. Thermoelectric Generators (TEGs). Kanada, <https://www.globalte.com/> - (23.06.2024).
- Aslan T. & Yılmaz, E., (2018). Bulanık Mantık Yöntemi İle Belirsizlik Şartlarında Faaliyet-Hacim Kar Analizi. Journal of Business Research Turk, 10(2), 534-553. DOI: 10.20491/isarder.2018.443
- Ay, S. & Arserim, M. A., (2019). Maksimum Güç Noktası İzleyicisinde Kullanılan Artan İletkenlik Algoritmasının FPGA Tabanlı Gerçeklenmesi. DÜMF Mühendislik Dergisi, 10(1), 113-120. DOI: 10.24012/dumf.527564
- Aykara, A., (2016). Oksit Tabanlı Termoelektrik Malzemelerin Yoğunluk Fonksiyonel Teorisi ile İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bijukumar, B., Kaushik Raam, A. G., Ganesan, S. I. & Nagamani, C., (2018). A Linear Extrapolation-Based MPPT Algorithm for Thermoelectric Generators Under Dynamically Varying Temperature Conditions. IEEE Transactions on Energy Conversion, 33(4) TEC-00472. doi: 10.1109/TEC.2018.2830796
- Badak, U. & Yıldız, A. B., (2021). Maksimum Güç Noktası İzleyici Algoritmalarının Verim, Salınım Miktarı ve Yakınsama Süresi Açısından Karşılaştırılması. European Journal of Science and Technology, 21, 463-472. DOI: 10.31590/ejosat.822975
- Demirel, H., Demirtaş, M. & Çetinbaş, İ. (2013). Akıllı Algoritmalar Kullanarak Güneş Enerji Dönüşüm Sistemleri Uygulamaları. Conference Paper <https://www.researchgate.net/publication/291350070>
- Elzalik, M., Rezk, H., Shehata, E.G., Thomas, J. & Mostafa R., (2018). Thermoelectric Power Generation System Simulation and Experimental Investigation, Twentieth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Cairo University, Egypt. DOI: 10.1109/MEPCON.2018.8635251
- Elzalik, M., Rezk, H., Shehata, E. G., Thomas, J. & Mostafa, R., (2019). INC-MPPT Algorithm for Maximizing Energy Conversion Efficiency of Thermoelectric Generating System. Engineering Research Journal, 162, 34 – 49. DOI: 10.21608/erj.2019.139807
- Elzalik, M., Rezk, H., Shehata, E.G., Thomas J. & Mostafa R., (2020). Electrical Performance Analysis of Thermoelectric Generating System with INC-MPPT Algorithm. Journal of Science, 33(1), 74-88. DOI: 10.35378/gujs.552480

- Gökkuş, G. & Kulaksız, A. A. (2021). Değişen Çevresel Koşullar İçin Üç MGNT Algoritmasının Deneysel Doğrulaması ve Karşılaştırmalı Analizi. *European Journal of Science and Technology Special Issue*, 30, 17-34. DOI: 10.31590/ejosat.1005041
- Günay, Ö., Yavuz, A. H., Ahiska, R. & Calisal, K. E., (2020). Smart thermoelectric waste heat generator: Design, simulation and cost analysis. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 37, 100623. doi.org/10.1016/j.seta.2019.100623
- Jaziri, N., Boughamoura, A., Müller, J., Mezghani, B., Tounsi, F. & Ismail, M., (2020). A comprehensive review of Thermoelectric Generators: Technologies and common applications. *Energy Reports*, 6, (2020), 264–287. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.12.011>
- Kapukaya, O. & Güneş, M., (2019). Adaptif Parçacık Sürü Optimizasyonu (APSO) ve Karınca Kolonisi Algoritması (KKA) Kullanarak Öz Ayarlamalı PID Kontrolör Tasarımı. *Kahramanmaraş Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences*, 22(4), 257-270. DOI: 10.17780/ksujes.655044
- Katche, M. L., Makokha, A. B., Zachary, S. O. & Adaramola, M. S., (2023). A Comprehensive Review of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Techniques Used in Solar PV Systems. *Energies*, 16, 2206. <https://doi.org/10.3390/en16052206>
- Kayabaşı, R. & Atik, K., (2018). Jeotermal Enerji Kullanılarak Termoelektrik Jeneratör İle Elektrik Enerjisi Üretimi. *1st International Symposium on Recent Advances in Vocational Sciences*. 2, 266-270.
- Li, Z., Li, W. & Chen, Z. (2017). Performance Analysis of Thermoelectric Based Automotive Waste Heat Recovery System with Nanofluid Coolant. *Energies*, 10, 1489. doi:10.3390/en10101489
- Lüy, L., Türk, F. & Metin, N. A., (2021). Fotovoltaik Sistemlerde Maksimum Güç Noktası Takibi İçin Değiştir – Gözle, Artan İletkenlik ve Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritmalarının Karşılaştırılması. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 13(3), 202-214. <https://dx.doi.org/10.29137/umagd.997229>
- Mamur, H., Çoban, Y., (2020). Detailed modeling of a thermoelectric generator for maximum power point tracking. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 28, 124– 139 doi:10.3906/elk-1907-166
- Marroquin, R., Lezama, J., Martinez, J. C., Hernandez, H. R., Hoyo, J. A., Camas, J. L., Escobar, E. N., Conde, J. E., Ponce, M. & Santos, I., (2022). Design of an MPPT Technique for the Indirect Measurement of the Open-Circuit Voltage Applied to Thermoelectric Generators. *Energies*, 15, 3833. <https://doi.org/10.3390/en15103833>
- Sattar, M. & Yeo, W.H. (2022). Recent Advances in Materials for Wearable Thermoelectric Generators and Biosensing Devices. *Materials*, 15, 4315. doi.org/10.3390/ma15124315
- Shahat, A. & Bhuiyan, S. R., (2021). Thermoelectric Generator Performances and Efficiency Analysis Integrated with MPPT Techniques. *International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation*, 978-1-7281-5681-1/20/\$31.00 DOI: 10.1109/SeFet48154.2021.9375713
- Thankakan, R. & Samuel Nadar, E. R., (2021). ANFIS-Based MPPTController of the Thermoelectric Energy Harvesting Systemfor DCMicro-grid Applications.

- Arabian Journal for Science and Engineering, 46,1137–1154.
<https://doi.org/10.1007/s13369-020-04942-4>
- Tohidi, F., Halagh, S. G. & Chitsaz, A., (2022). Thermoelectric Generators: A comprehensive review of characteristics and applications. Applied Thermal Engineering Volume 201, Part A. 117793
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117793>
- Ünsağ A., (2010). Kriyojenik Isı Değiştiricisinde Termoelektrik Jeneratör Uygulaması ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- Üstüner, M.A., Mamur, H. & Taşkın, S., (2022). Modeling and validation of the thermoelectric generator with considering the change of the Seebeck effect and internal resistance. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 30, 2688– 2706. doi:10.55730/1300-0632.3963
- Vina, R. R. & Alagao, F. B., (2018). Field Test of Thermoelectric Generator Using Parabolic Trough Solar Concentrator for Power Generation. Engineering International Conference, 1941, 1-10. doi.org/10.1063/1.5028104
- Yahya, K., (2018). Termoelektrik Generatörler için Değişken Koşullar Altında Etkin Maksimum Güç Noktası İzleyicisinin Geliştirilmesi. Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Yahya, K. & Alomari, O., (2020). A new maximum power point tracking algorithm based on power differentials method for thermoelectric generators. Int J Energy Research, 45, 7476–7486. DOI: 10.1002/er.6329
- Yavuz, A. H., (2019). Design of energy recovery systems: thermoelectric combi boiler generator and power analysis. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 27, 2938 – 2946. doi:10.3906/elk-1801-202
- Yavuz, A. H. (2020). Solar thermoelectric generator assisted irrigation water pump: Design, simulation and economic analysis. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 41(June), 100786. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100786>
- Zhang, D., Song, L., Wang, L., Li, X., Chang, X. & Wu, P., (2022). A Systematic Review and Analysis of MPPT Techniques for TEG Systems Under Nonuniform Temperature Distribution. Frontiers in Energy Research, 10, 942347. doi: 10.3389/fenrg.2022.942347
- Zhao J., Xu W., Kuang Z., Long R., (2021). Segmental material design in thermoelectric devices to boost heat-to-electricity performance Energy Conversion and Management Volume 247, 114754
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114754>
- Zoui, M. A., Bentouba, S., Stocholm, J. G. & Bourouis, M., (2020a). A Review on Thermoelectric Generators: Progress and Applications. Energies, 13, 3606. doi:10.3390/en13143606 www.mdpi.com/journal/energies
- Zoui, M. A., Bentouba, S. & Bourouis, M., (2020b). The Potential of Solar Thermoelectric Generator STEG for Implantation in the Adrar Region. Algerian Journal of Renewable Energy and Sustainable Development. 2(1), 17-27. doi: 10.46657/ajresd.2020.2.1.3
- Xing, Y., Tang, K., Wang, J., Hu, K., Xiao, Y., Lyu, J., Li, J., Liu, Y., Zhou, P., Yan, Y. & Dongwang, Y., (2023). High-Performance Wearable Bi2Te3-Based Thermoelectric Generator. Applied Science, 13, 5971. doi.org/10.3390/app13105971