

**FOTOVOLTAİK SİSTEM ANALİZİ  
VE  
LABVIEW TABANLI MPPT SİMÜLASYONU**

**HİKMET KANGAL**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OCAK 2008  
ANKARA**

Hikmet Kangel tarafından hazırlanan FOTOVOLTAİK SİSTEM ANALİZİ ve LABVIEW TABANLI MPPT SİMÜLASYONU adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Müzeyyen SARITAŞ .....  
Tez Danışmanı, Elektrik Elektronik Müh. AD.

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. İrfan KARAGÖZ .....  
Elektrik Elektronik Mühendisliği AD., G.Ü.

Prof. Dr. Müzeyyen SARITAŞ .....  
Elektrik Elektronik Mühendisliği AD., G.Ü.

Prof. Dr. N. Fatma GÜLER .....  
Elektronik Bilgisayar Eğitimi AD., G.Ü.

Tarih : 28/01/2008

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nermin ERTAN .....  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Hikmet Kangal

**FOTOVOLTAİK SİSTEM ANALİZİ**  
ve  
**LABVIEW TABANLI MPPT SİMÜLASYONU**  
(Yüksek Lisans Tezi)

**Hikmet KANGAL**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**Ocak 2008**

**ÖZET**

Bu çalışmada; Değişim ve Gözlem (P&O) algoritması ile Artımlı Geçiş (IncCond) algoritması metotları ve bu metotların kombinasyonu, farklı sıcaklık ve ışık şiddetindeki fotovoltaik (FV) panel güç üretiminin verimini arttırmak için kullanılmıştır. Maksimum güç noktası optimizasyonunu sağlayan diğer metotlar çalışmanın kapsamı dışında tutulmuştur.

P&O metodu, MPPT sistemleri için en çok kullanılan metotlardan biridir. Dizinin çıkış gücünü kontrol ederek kendi çalışma gerilimindeki artma veya azalma miktarını karşılaştırır. Bu metot maksimum güç noktasını belirlerken yavaştır ve ani değişen hava şartlarında doğru neticeler vermekte başarısızdır. IncCond metodu ise, her iterasyonda gerçekleşen değişimlerin oranını arttıran farklı bir durum girerek, P&O metodunda görülen söz konusu eksiklikleri giderir. Bu iki tekniğin teorik bilgileri tezde verilmiş ve simülasyonları gerçekleştirilmiştir. İki tekniğin birleştirilmesi daha iyi sonuçlar verebilmektedir. Simülasyonda elde edilen sonuçlar literatürle karşılaştırılmış ve doğruluğu ispatlanmıştır.

Bu farklı metotları kullanarak, sıcaklık ve ışık şiddeti parametreleri ile  $R_S$  değerleri simüle edilerek, FV dizinin tepkileri incelenmiştir. Buna göre; sıcaklık artışında akım ve geriliminin olumsuz yönde etkilendiği, ışık şiddeti artışında ise, sıcaklığın tersine, bu değerlerin olumlu etkilenerek arttığı görülmüştür.  $R_S$  direncindeki artışın da maksimum güç noktasını aşağıya çektiği gözlenmiştir. Yapılan çalışmada,  $R_{SH}$  değerinin etkileri göz ardı edilmiştir.

Kullanılan uygulama yazılımı, Labview, bu çalışmada da büyük kolaylıklar sağlamış ve çalışmanın güvenilirliğini ve sonucunu olumlu yönde etkilemiştir. MPPT sistemlerinin analizi için gerekli bilgilerin toplanması, analizi ve uygulama ortamına aktarılması da büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle veri toplama ve analiz (DAQ) sistemleri incelenmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda, gerçek zamanlı uygulamalar için uygun donanım olarak, NI FieldPoint endüstriyel kontrol sistemleri tavsiye edilmiştir.

**Bilim Kodu** : 905.1.035

**Anahtar Kelimeler** : FV, MPPT, P&O, IncCond, Labview

**Sayfa Adedi** : 118

**Tez Yöneticisi** : Prof. Dr. Müzeyyen SARITAŞ

**PHOTOVOLTAIC SYSTEM ANALYSIS  
AND  
LABVIEW BASED MPPT SIMULATION  
(M. Sc. Thesis)**

**Hikmet KANGAL**

**GAZI UNIVERSITY  
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY  
January 2008**

**ABSTRACT**

**In this study, Perturbation and Observation (P&O) Algorithm and the Incremental Conductance (IncCond) Algorithm methods and combination of these algorithms has been used to improve the efficiency of solar panel photovoltaic (PV) power generation system at different temperatures and at different insolation conditions. Other efficient methods of tracking the maximum power point (MPPT) beyond the scope of the study will not be discussed.**

**The P&O method is one of the most widely used system in MPPT. It checks for output power of the array and compares its increase or decrease to the direction of perturbation of the operating voltage of the array itself. P&O technique is slow in finding the maximum power point, and consequently it can fail to produce accurate results in rapidly changing conditions. The IncCond technique removes some of these drawbacks of the P&O algorithm by introducing another condition which in turn increases the rate at which the perturbations are performed. The theoretical background of these two techniques is given in the thesis and simulations have been done. Combining the**

two techniques might yield better results. The results of the simulation have been compared with literature and proven its accuracy.

Using these different methods, PV array response has been analyzed by simulating temperature and insolation parameters and  $R_S$  value. Accordingly; it has been seen that the current and the voltage were affected negatively at temperature increase, and on the contrary, they were affected positively with insolation increase. It has also been seen that, the increase of the  $R_S$  resistance pulled down the MPP. In this study, the affects of the  $R_{SH}$  have been ignored.

The application software, Labview, provided effortless in this study and affected the results and the credibility in a positive meaning. Acquiring, analyzing and transferring to the simulation environment of the necessary datum for MPPT system analyzing carry big importance too. Because of that, Data Acquisition and Analyzing (DAQ) Systems were surveyed. In the sight of the datum that have been obtained, NI FieldPoint industrial control systems were advised by appropriate hardware in real-time applications.

**Science Code** : 905.1.035  
**Key Words** : PV, MPPT, P&O, IncCond, Labview  
**Page Number** : 118  
**Adviser** : Prof. Dr. Müzeyyen SARITAS

## TEŞEKKÜR

Çalıőmalarımnda değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, hiçbir konuda yardımını esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Müzeyyen SARITAŞ' a, çalıőtıęım kurum ve kuruluşlarda teknik bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan mesai arkadaşlarıma, varlığıyla en büyük destekçim olan değerli eőim Figen' e ve emeği geçen herkese teşekkür ederim.



## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT .....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xii
RESİMLERİN LİSTESİ .....	xiii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xviii
1. GİRİŞ .....	1
2. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER.....	3
2.1. Giriş .....	3
2.2. Fotovoltaik Enerji .....	4
2.2.1. Güneş ışınımı.....	4
2.2.2. Güneş hücreleri ve yapım teknikleri.....	5
2.2.3. Akım oluşumu .....	13
2.3. Fotovoltaik Sistem Tasarımı .....	17
2.3.1. FV pil (panel) ve eşdeğer devresi .....	20
2.3.2. Regülatör (DC/DC converter) .....	22
2.3.3. Inverter ve şarj kontrolörü .....	22
2.3.4. Akü .....	23
2.4. FV Sistemlerin Kullanım Alanları .....	26
2.5. Türkiye ve Dünyada FV Enerji.....	27
2.6. Maksimum Güç Noktası Takibi (MPPT).....	29

	<b>Sayfa</b>
2.6.1. I-V ve P-V karakteristikleri .....	30
2.6.2. FV panelin maksimum güç noktasında çalıştırılması.....	34
2.6.3. $P_{max-ref}$ belirleme yöntemleri .....	35
2.6.4. MPPT' ye etki eden parametreler .....	46
3. VERİ TOPLAMA (DATA ACQUISITION) ve ANALİZ SİSTEMLERİ .....	56
3.1. Giriş .....	56
3.2. DAQ Sistem Mimarisi .....	56
3.2.1. PC .....	58
3.2.2. Sensörler .....	59
3.2.3. Sinyaller.....	60
3.2.4. Sinyal koşullama.....	64
3.2.5. DAQ donanımı .....	65
3.2.6. Yazılım (LabVIEW).....	72
3.3. NI FieldPoint.....	79
3.3.1. Kontrol ara yüzü .....	80
3.3.2. FP-2000 akıllı ethernet kontrol ara yüzü .....	81
3.3.3. I/O modülleri .....	82
3.3.4. FP-TB-1 terminal tabanı.....	85
3.3.5. Bağlantı elemanları ve DC kaynak.....	86
4. SİMÜLASYON .....	87
4.1. MPPT Simülasyonu .....	87
4.2. Simülasyon Sonuçları .....	102
4.2.1. Sıcaklık .....	102
4.2.2. Işık şiddeti.....	106

	<b>Sayfa</b>
4.2.3. $R_S$ direnci .....	110
5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	114
KAYNAKLAR .....	115
ÖZGEÇMİŞ .....	118

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 2.1. Akülerin enerji ve güç yoğunlukları .....	24
Çizelge 2.2. Türkiye yenilenebilir enerji gelişimi.....	28
Çizelge 2.3 MPPT sistemleri tablosu.....	36
Çizelge 2.4. P&O metodu değişim tablosu .....	39
Çizelge 2.5. P&O ve IncCond metotları verim karşılaştırma tablosu.....	46
Çizelge 4.1. Sıcaklık simülasyonu ile $I_m, V_m, P_m$ değerleri tablosu.....	103
Çizelge 4.2. Işık şiddeti simülasyonu ile I,V,P değerleri tablosu .....	107
Çizelge 4.3. $R_s$ simülasyonu ile I,V,P değerleri tablosu .....	111

**RESİMLERİN LİSTESİ**

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 3.1. Sinyal koşullama donanım opsiyonları.....	64
Resim 3.2. NI FieldPoint.....	80
Resim 3.3. NI FP-2000 akıllı ethernet kontrol arayüzü.....	81
Resim 3.4. NI FP-AI-102 8 kanallı analog giriş modülü.....	83
Resim 3.5. NI FP-RTD-122 8 kanallı, 3 teli RTD modül.....	83
Resim 3.6. Terminal taban bağlantıları.....	86
Resim 3.7. PS-4: 24 V <sub>DC</sub> , 15 W, 90-264 V <sub>AC</sub> , DIN rail montajı.....	86

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1. Standart Solar Spektrum .....	4
Şekil 2.2. Yarı-iletken çalışma prensibi .....	5
Şekil 2.3. Güneş hücresi yapımında kullanılan malzemelerin karakteristikleri.....	7
Şekil 2.4. İnce film yarı-iletken malzemelerin verim-band gap grafiği.....	11
Şekil 2.5. n <sup>+</sup> -p-p <sup>+</sup> hücre yapısı.....	13
Şekil 2.6. FV hücre enerji band diyagramı .....	14
Şekil 2.7. P-N eklemünde akım oluşumu.....	14
Şekil 2.8. Pillerin seri-paralel bağlanmasıyla oluşturulan FV panel.....	16
Şekil 2.9. FV pilin doğrudan doğruya ayarlanabilen bir yüke bağlanması.....	16
Şekil 2.10. FV pilin I-V karakteristiğinin yüklerle değişimi.....	17
Şekil 2.11. Genel bir FV sistem .....	19
Şekil 2.12. 15 kW/gün FV sistem maliyet dağılımı .....	19
Şekil 2.13. FV pil statik eşdeğer devresi.....	21
Şekil 2.14. FV pil dinamik eşdeğer devresi .....	22
Şekil 2.15. MPPT' nin FV sisteme entegrasyonu .....	24
Şekil 2.16. MPPT devresi ( $V_{Panel} < V_{Akü}$ ).....	25
Şekil 2.17. MPPT devresi ( $V_{Panel} > V_{Akü}$ veya $V_{Panel} < V_{Akü}$ ).....	26
Şekil 2.18. Ankara güneş enerji potansiyeli, güneşlenme süresi ve ışınım değerleri	29
Şekil 2.19. FV güneş pili paneli MPP denetim blok diyagramı.....	34
Şekil 2.20. MPPT Kontrol Sistemleri .....	38
Şekil 2.21. P&O metodu algoritmasının maksimum güç noktasından ıraksaması ....	40
Şekil 2.22. Değişim ve Gözlem (Perturbation & Observation) Metodu algoritması.	41
Şekil 2.23. Artımlı İletkenlik algoritması güç-gerilim eğrisi.....	42

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.24. Artımlı Geçiş (Incremental Conductance) Metodu algoritması.....	44
Şekil 2.25. Uygulanan karma metot blok diyagramı.....	45
Şekil 2.26. Buck Converter .....	48
Şekil 2.27. Buck Converter analizi (anahtar kapalı) .....	48
Şekil 2.28. Buck Converter analizi (anahtar açık) .....	49
Şekil 2.29. Boost Converter .....	50
Şekil 2.30. FV güneş pilinin akım ve geriliminin sıcaklıkla değişimi.....	51
Şekil 2.31. FV güneş pilinin güç ve geriliminin sıcaklıkla değişimi .....	51
Şekil 2.32. FV güneş pilinin akım ve geriliminin ışık şiddetiyle değişimi .....	52
Şekil 2.33. FV güneş pilinin güç ve geriliminin ışık şiddetiyle değişimi .....	53
Şekil 3.1. DAQ sistem mimarisi .....	57
Şekil 3.2. Sensörler, sinyaller ve sinyal koşullama tipleri .....	60
Şekil 3.3. Sinyal tipleri.....	61
Şekil 3.4. Analog sinyalin karakteristikleri.....	62
Şekil 3.5. Dijital sinyalin karakteristikleri .....	63
Şekil 3.6. TTL sinyali .....	63
Şekil 3.7. 3 Bit ile dijitalleştirilmiş sinüs dalgası.....	67
Şekil 3.8. DAQ cihazın bağlı doğruluğu.....	69
Şekil 3.9. NI-DAQmx yazılımı .....	73
Şekil 3.10. LabVIEW kontrol yelpazesi .....	76
Şekil 3.11. Akım ölçümü için kullanılan FieldPoint sistemi .....	83
Şekil 3.12. 2-telli RTD ölçümü.....	84
Şekil 3.13. Sıcaklık ölçümü için kullanılan FieldPoint sistemi .....	85
Şekil 3.14. RTD ve Termistor için karşılaştırmalı sıcaklık-direnç eğrileri.....	85

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.1. MPPT.vi ön paneli .....	88
Şekil 4.2. MPPT.vi ön panel açıklama diyagramı.....	89
Şekil 4.3. MPPT Simülatörü blok diyagramı .....	92
Şekil 4.4. FV.vi blok diyagramı .....	94
Şekil 4.5. FV.vi akış şeması .....	95
Şekil 4.6. Effect.vi blok diyagramı .....	96
Şekil 4.7. Effect.vi akış şeması .....	97
Şekil 4.8. Simulator.vi blok diyagramı .....	98
Şekil 4.9. Warning.vi blok diyagramı .....	98
Şekil 4.10. Report.vi akış şeması .....	99
Şekil 4.11. Report.vi blok diyagramı .....	100
Şekil 4.12. Örnek Report.vi raporu .....	101
Şekil 4.13. Sıcaklık simülasyonu ile akım-gerilim değişimi.....	102
Şekil 4.14. Sıcaklık simülasyonu ile güç-gerilim değişimi.....	103
Şekil 4.15. Sıcaklık simülasyonu ile elde edilen akım-sıcaklık eğrileri .....	104
Şekil 4.16. Sıcaklık simülasyonu ile elde edilen gerilim-sıcaklık eğrileri.....	104
Şekil 4.17. Sıcaklık simülasyonu ile elde edilen güç-sıcaklık eğrileri.....	105
Şekil 4.18. Sıcaklık simülasyonu ile elde edilen FF-sıcaklık eğrisi.....	105
Şekil 4.19. Işık şiddeti simülasyonu ile akım-gerilim değişimi .....	106
Şekil 4.20. Işık şiddeti simülasyonu ile güç-gerilim değişimi .....	106
Şekil 4.21. Işık şiddeti simülasyonu ile elde edilen akım-ışık şiddeti eğrileri.....	108
Şekil 4.22. Işık şiddeti simülasyonu ile elde edilen gerilim-ışık şiddeti eğrileri .....	108
Şekil 4.23. Işık şiddeti simülasyonu ile elde edilen güç-ışık şiddeti eğrileri.....	109
Şekil 4.24. Işık şiddeti simülasyonu ile elde edilen FF-ışık şiddeti eğrileri .....	109



<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.25. $R_s$ direnci simülasyonu ile akım-gerilim değişimi.....	110
Şekil 4.26. $R_s$ direnci simülasyonu ile güç-gerilim değişimi .....	110
Şekil 4.27. $R_s$ simülasyonu ile elde edilen akım-ışık şiddeti eğrileri.....	112
Şekil 4.28. $R_s$ simülasyonu ile elde edilen gerilim-ışık şiddeti eğrileri .....	112
Şekil 4.29. $R_s$ simülasyonu ile elde edilen güç-ışık şiddeti eğrileri .....	113
Şekil 4.30. $R_s$ simülasyonu ile elde edilen FF-ışık şiddeti eğrileri .....	113

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
<b>A</b>	Amper
<b>cm</b>	Santimetre
<b>Cu</b>	Bakır
<b>e<sup>-</sup></b>	Elektron
<b>eV</b>	Elektrovolt
<b>GaAs</b>	Gallium Arsenide
<b>Hz</b>	Hertz
<b>KWh</b>	Kilowattsaat
<b>m<sup>3</sup></b>	Metreküp
<b>m<sup>2</sup></b>	Metrekare
<b>Ni</b>	Nikel
<b>nm</b>	Nanometre
<b>P</b>	Güç
<b>Pb</b>	Kurşun
<b>Pt</b>	Platinyum
<b>S</b>	Sample
<b>Si</b>	Silisyum
<b>V</b>	Volt
<b>W</b>	Watt
<b>Ω</b>	Ohm
<b>μ</b>	Mikro
<b>°C</b>	Santigrad derece

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
<b>ADC</b>	Analog Digital Converter
<b>DAQ</b>	Data Acquisition (Veri Toplama)
<b>DDE</b>	Dynamic Data Exchange
<b>DIO</b>	Digital Input Output
<b>DLL</b>	Dinamik Link Library
<b>DMA</b>	Direct Memory Access
<b>DNL</b>	Derivative nonlinearity
<b>DSP</b>	Digital Signal Processing
<b>DSP</b>	Datalogging and Supervisory Control Module
<b>FV</b>	Fotovoltaik
<b>G</b>	Grafiksel
<b>GPIB</b>	General Purpose Interface Bus
<b>I</b>	Akım
<b>IEEE</b>	International Electric Electronic Engineering
<b>I/O</b>	Input/Output
<b>LabVIEW</b>	Laboratory VI Engineering Workbench
<b>LED</b>	Light Emitting Diyode
<b>LSB</b>	Least Significant Bit
<b>MAX</b>	Measurement & Automation Explorer
<b>MPP</b>	Maksimum Power Point
<b>MPPT</b>	Maksimum Power Point Tracking
<b>N</b>	Negatif
<b>NC</b>	Normalde kapalı terminal
<b>NI</b>	National Instruments
<b>NO</b>	Normalde açık terminal
<b>OC</b>	Open Circuit
<b>OPC</b>	OLE for Process Control
<b>P</b>	Pozitif
<b>PCI</b>	Peripheral Component Interconnect
<b>PEM</b>	Polimer elektrolit yakıt pili

**Kısaltmalar****Açıklama**

<b>PLC</b>	Programmable Logic Controller
<b>PS</b>	Power Supply
<b>PXI</b>	PCI Extensions for Instrumentation
<b>RMS</b>	Root Mean Square
<b>RTSI</b>	Real-Time Synchronization Interface
<b>SC</b>	Short Circuit
<b>SHS</b>	Solar Home System
<b>SSP</b>	Standard Service Program
<b>TCP/IP</b>	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
<b>TTL</b>	Tranzistor-Tranzistor Logic
<b>USB</b>	Universal Serial Bus
<b>VI</b>	Virtual Instruments
<b>VISA</b>	Virtual Instrument Software Architecture

## 1. GİRİŞ

Enerji, tüm bilimsel gelişmelerin ve teknolojinin kilit konulardan bir tanesidir. Gittikçe artan ihtiyaç, bu konuya olan duyarlılığın artmasına ve yapılan çalışmaların daha özenli bir hale gelmesine neden olmuştur. Daha sorunsuz ve çevreye zararsız kullanılabilen temiz veya diğer adıyla yenilenebilir enerji üretimi ise enerji konusunun zirvesinde yer almaktadır. Temiz enerji üretimi, akademik çevrelerde hızla artan bir oranda rağbet görmektedir.

Enerjinin üretilmesi kadar kontrolü de hayati önem taşır. Bu noktada etkili bir yazılım kullanma ihtiyacı doğmaktadır. LabVIEW, veri toplama, kontrolü, analizi ve sunumunda tüm dünya tarafından kullanılan, yaygın tekst tabanlı dillerin aksine, G programlama dili tabanlı bir grafiksel program geliştirme ortamıdır. İhtiyaçlara son derece hızlı ve pratik çözümler sunabilmesiyle ünlenmiş bu yazılım ortamı sayesinde, yapılan çalışmalar, daha etkili, verimli ve görsel olarak zengin hale gelebilmektedir.

Çalışmanın 2. Bölümünde, fotovoltaik (FV) enerji konusu işlenmiş, sistemler ve bileşenleri hakkında ayrıntılı bilgi verilmiş ve teknolojisi derinlemesine açıklanmıştır. Daha sonra, FV teknolojide verim artırmaya yönelik MPPT çalışmaları açıklanmıştır. MPPT sistemlerin yapısı, kullandığı yöntem ve algoritmalar ele alınarak ileriki bölümlerde açıklanacak olan simülasyon için uygun bir alt yapı oluşturulmuştur.

Çalışmanın 3. bölümünü veri toplama ve analiz (DAQ) sistemleri oluşturmaktadır. Genel bir DAQ sisteminin bileşenleri ayrıntılarıyla ele alınmıştır. Her ne tür sistem kullanılırsa kullanılsın, uygun veri toplama ve analizinde DAQ sistemleri kullanılmalıdır. Bu amaçla, DAQ ve MPPT sistemleri ayrı düşünülmemiş ve bir bütün olarak ele alınmıştır.

FV sistemi simule ederek güç optimizasyonu sağlayabilecek ve gerçek uygulamalarda DAQ donanımını sürmek için kullanılacak uygun bir yazılım olan

Labview uygulama yazılımı da bu bölümde anlatılmıştır. LabVIEW sayesinde; çalışmanın verimi, güvenilirliği, hızı ve görselliği açısından büyük avantajlar sağlanmıştır.

4. Bölümde ise MPPT kullanan FV sistemlerin tasarımında ve kullanımında büyük kolaylık sağlaması hedeflenen bir MPPT simülatörü bilgisayar ortamında tasarlanmıştır. Tüm sistemin kontrolü, bu yazılım üzerinden yapıldığından, önce yazılım tanıtılmış, sonra gerçekleştirilen yazılımın kodları ve kullanımı hakkında bilgiler verilmiştir. Simülasyon sonuçları karşılaştırmalı olarak incelenmiş kullanılan metotlar hakkında yorumlar yapılmıştır.

5. Bölümde, sonuçlar ve ileriye yönelik çalışmalar özetlenmiştir. FV sistemlerin analizi ve güç optimizasyonu çalışmaları açıklanmış ve yapılan çalışmanın önemi vurgulanmıştır.

## 2. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER

### 2.1. Giriş

Günümüzde enerji konusu, toplumsal ve endüstriyel konular arasında şüphesiz en önemli yerlerden birine sahiptir. Artan enerji ihtiyacı ve tüketim ile azalan üretim koşulları, bu konudaki gelişmelerin nispeten daha hızlı ilerlemesini gerekli kılmakta ve üretilen enerjinin verimi ve kontrolü de en az üretimi kadar önemli olmaktadır.

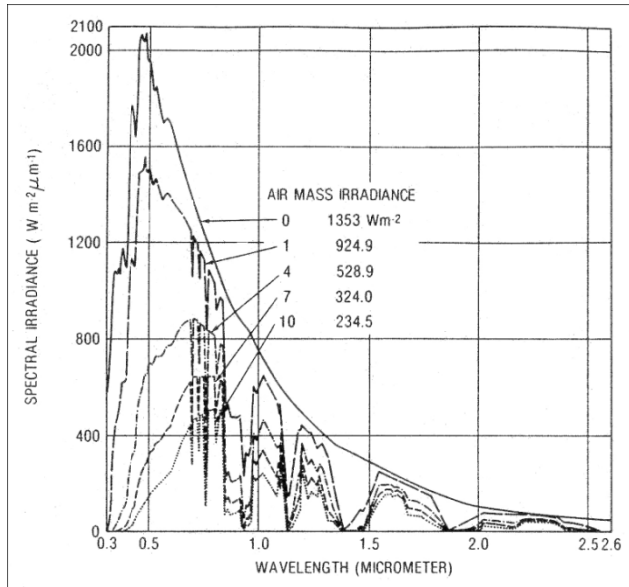
Günümüz enerji teknolojilerine bakıldığında en çok gelecek vadeden şüphesiz temiz enerjidir. Güneş, rüzgar, hidrojen, jeotermal, biokütle ve biyogaz gibi temiz enerji kaynaklarının en büyük avantajları, yenilenebilir yani tükenmez olmaları ve çevreye zararlı yabancı unsurlar bulundurmamalarıdır. Buna karşılık yenilenebilir enerjinin dezavantajları da vardır. Coğrafi olarak her yerde bol bulunmazlar; ayrıca yoğun enerji formları olmamaları nedeniyle büyük miktarlarda elde etmek için büyük sahalara ihtiyaç vardır. Temiz enerjinin en önemli türü fotovoltaik (FV) enerjidir.

Günümüzde gelişmekte olan ülkelerin elektrik üretim kapasitesi 600 000 MW' dır. İstatistikler göz önüne alındığında bu rakam önümüzdeki 30-40 yıl içerisinde 5 000 000 MW' a ulaşması beklenmektedir. Her yıl dünya enerji tüketiminin 15 000 katına eşit ve dünyanın bilinen kömür, gaz ve petrol rezervlerinin 100 katından fazla miktarda enerji güneşten dünyaya ulaşmaktadır. Bu rakam Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerin enerji ihtiyacının 5-10 katına eşittir. Rakamlardan da anlaşılacağı gibi, dünyaya ulaşan FV enerjinin yalnızca bir yıl verimli kullanılması bile tüm dünya enerji ihtiyacını binlerce yıl karşılayabilecek düzeydedir. Bu durum FV enerjinin önemini anlaşılmasını ve yapılan yatırımlarla FV teknolojinin gelişimini sağlamıştır [Anderson ve Ahmed, 1995].

## 2.2. Fotovoltaik Enerji

### 2.2.1. Güneş ışınımı

FV enerjinin kaynağını Güneş oluşturmaktadır. Güneş, çekirdeğinde yer alan Hidrojen' in Helyum' a dönüşmesiyle oluşan füzyon sürecinden elde ettiği enerjiyi fotonlar aracılığıyla dünyaya kadar iletmektedir. Bu enerji, atmosferde ve dünya üzerinde farklı değerlerde olmaktadır. Güneşin ışınımı değerlendirilirken, atmosfer dışında seçilen bir nokta referans olarak kabul edilir ve AM0 (Air-Mass 0 veya Hava-Kütle 0) olarak adlandırılır. AM0 değeri, yapılan ölçümler sonucunda  $1,357 \text{ kW/m}^2$  olarak bulunmuştur. Ancak Güneş ışınları atmosferden geçerek yeryüzüne ulaşmaya kadar fiziksel engellerden dolayı zayıflar ve yaklaşık olarak enerjisinin % 30' unu kaybeder. Bu sebeple FV sistemler için yapılan ölçümlerde AM0 değeri yerine AM1,5 değeri normal koşul olarak kabul edilir [Partain, 1995]. Ayrıca  $1 \text{ kW/m}^2$  güneş ışığı seviyesi ve  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  ortam sıcaklığı standart koşul olarak kabul edilmektedir. Günümüzde üretici firmalar tarafından yapılan testler bu ortam koşulları referans alınarak yapılır. Şekil 2.1 farklı AM değerleri için ışık şiddeti-dalga boyu değişimlerini göstermektedir.



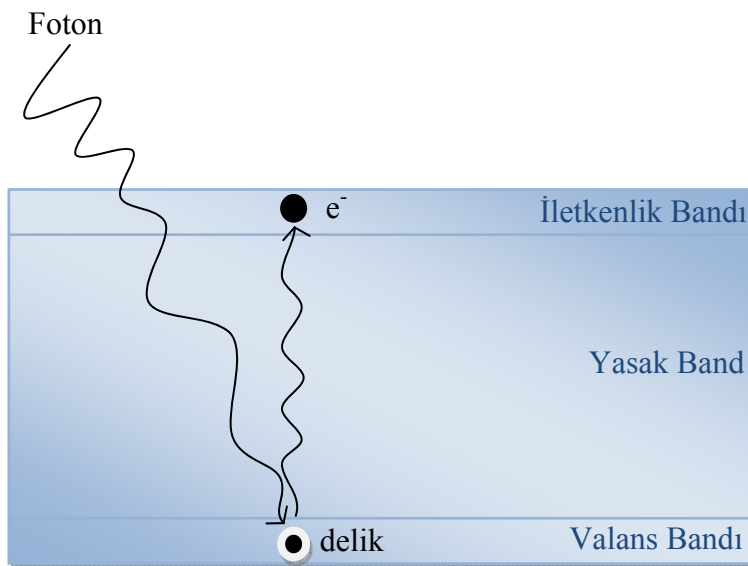
Şekil 2.1. Standart Solar Spektrum



Güneş ışığı, farklı enerji seviyelerinde ve dalga boylarında olan fotonlardan oluşur. Güneş ışınlarının büyük bölümü 1 eV altında bir enerjiye veya 1240 nm dalga boyundan büyük dalga boyuna sahiptir. Ancak Güneşin bu enerji spektrumunun tamamı FV hücre tarafından kullanılamaz. FV hücre yapı malzemesi olarak kullanılan yarı-iletkenin yasak enerji bandından daha fazla enerjiye sahip fotonlar ( $E > E_G$ ), buradaki elektronları iletkenlik bandına çıkarabilirler. Dolayısıyla Güneş enerji spektrumunun yalnızca belirli bir kısmı FV hücrelerde enerji çevrimine katılabilir [Temiz Enerji Vakfı, 2001].

### 2.2.2. Güneş hücreleri ve yapım teknikleri

FV enerjinin temelini oluşturan güneş hücreleri yarı-iletken malzemeden elde edilirler. Yarı iletken malzeme yapısında farklı enerji seviyeleri bulunmaktadır. Değerlik elektronlarının bulunduğu enerji bandına “değerlik bandı” denir. Elektronların bulunduğu “iletkenlik bandı” ile değerlik bandı arasında “yasak band” denen bölge bulunmaktadır. Yasak enerji bandının büyüklüğü aynı zamanda malzemenin iletkenliğinin de ölçüsüdür. Örneğin, yasak enerji bandı 2,5 eV’ dan büyük olan malzemeler yalıtkan olarak nitelendirilirler. Şekil 2.2’ de yarı-iletken malzemelerin yapısı ve çalışma prensibi gösterilmiştir.

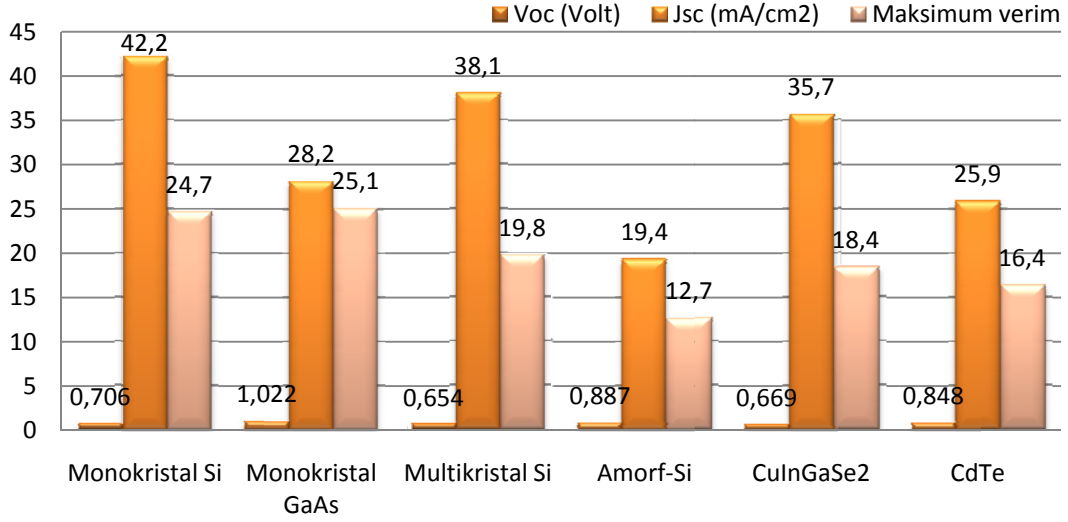


Şekil 2.2. Yarı-iletken çalışma prensibi

Daha önce de bahsedildiği gibi, güneş spektrumundaki fotonların enerjisi, yarı-iletken malzemenin yasak enerji bandından büyük ise ( $E > E_G$ ) değerlik bandındaki değerlik elektronlarını iletim bandına taşıyabilir. Doğada element halinde bulunan yapılardan Güneş enerji spektrumuna uygun olan Silisyum (1,1 eV) ve Germanyum (0,6 eV) bulunmaktadır. FV hücre yapımında kullanılan diğer yapılar, elementlerin farklı teknikler kullanılarak bileştirilmeleriyle elde edilirler. Örneğin GaAs (Galyum Arsenid) bileşiği 1,43 eV yasak enerji bandına sahiptir.

Hücrenin FV güç çevrim verimi, gelen ışık spektrumu ve  $E_g$  (Band Gap) parametrelerinin bir fonksiyonudur. Eğer gelen ışık sabitse, verim yalnızca  $E_g$ ' ye bağlı olmaktadır. O halde FV hücrelerde, yasak enerji bandı çok düşük olan yarı-iletken malzemeler seçilerek tüm spektrumu kapsamak mümkündür. Ancak malzemenin band seviyesi azaldıkça  $V_{oc}$  değeri de azalmaktadır. Tam tersi durumda da ( $E_g$  çok büyük) elde edilen fotoakım çok küçük olmaktadır. Bu durum çok küçük ve çok büyük Band Gap' a sahip malzemelerin FV çevrim için uygun olmadığını gösterir. Sonuçta elde edilen veriler, bir FV hücrenin güneş spektrumundan maksimum düzeyde foton soğurarak yüksek verimde çalışabilmesi için 1,4 eV band genişliğine sahip olması gerektiğini göstermektedir [Nelson, 2004].

Güneş pili yapımında kullanılan belirli yarı-iletken malzemeler vardır. Şekil 2.3 güneş hücresi yapımında kullanılan başlıca malzemelerin fiziksel ve elektriksel özellikleri ile verim değerlerini göstermektedir. Görüldüğü gibi günümüzde üretilen yarı-iletken malzeme verimlilikleri % 20' ler seviyelerindedir [Nelson, 2004]. Ancak son yıllarda yapılan bilimsel çalışmalar sayesinde, FV hücre teknolojisinde oldukça önemli ilerlemeler kaydedilmiş ve verim artırmaya yönelik yeni tekniklerin bulunmasıyla FV hücre verimleri oldukça artırılmıştır. Bu tekniklerin en önemlilerinden biri IBSC (intermediate band solar cell) teknolojisidir. IBSC, ek fotoakım elde etmek için IB (intermediate band) yapılar kullanan malzemelerdir. Yapılan çalışmalarda, üç band modelde farklı geçişlerin enerji aralığındaki örtüşümün (overlap) farklı değerlerine bağlı olarak verimleri incelenmiş ve örtüşümün olmadığı durumlarda (0 eV) maksimum verim teorik hesaplamalarda % 63,2 olarak bulunmuştur [Navruz ve Sarıtaş, 2007].



Şekil 2.3. Güneş hücresi yapımında kullanılan malzemelerin karakteristikleri

FV hücre yapımında kullanılan bazı teknikler ve malzemeler aşağıda açıklanmıştır.

- Kristal Büyütme (Crystal Growth)
  - i. Czochralski Metodu (CZ)
  - ii. Floating-Zone Metodu (FZ)
- Eklem Oluşturma (Junction Formation)
  - i. Difüzyon
  - ii. İyon Ekme (Ion Implantation)
  - iii. Epitaksiyel Büyüme
- Yansıtmasız Kaplama (Antireflection (AR) Coating)
- Ön Kontak Oluşturma
- Arka Kontak Oluşturma

CZ yöntemi oldukça geniş bir ticari kullanım alanı bulmuştur. Bu yöntemde, Monokristal Silisyum' un çok küçük boyutlardaki parçaları kullanılır. Bu parçaların yüzeyi, erimiş Silisyum ile temas ettirilir ve eriyik içinden yavaşça geri çekilir. Eğer sıcaklık ve geri çekilme oranı doğru ayarlanabilirse, bu işlem sonucunda 15 cm çap ve 1 m uzunluğa sahip Monokristal Silisyum elde edilebilir. Bu işlem oksidasyonu engellemek için inert atmosfer şartlarında gerçekleştirilmelidir. Böylece Silisyum

miktarı artırılmış olur. CZ yönteminin en önemli dezavantajı, içinde erimiş Silisyum bulunan potanın kirliliğe neden olmasıdır. Bu nedenle CZ yöntemi boyunca uygulanan safhalarda saflaştırma işlemi de yapılır [Sarıtış, 1988].

FZ yönteminde, Multikristal Silisyum külçe, kelepçeler yardımıyla her iki uçta da dikey olarak tutturulur. Çekirdek kristal, külçenin bir ucuna yerleştirilir ve eriyik bölge bu uçtan başlar. Eriyik bölgenin çubuk boyunca ilerlemesiyle, kristal büyüme, katı-sıvı hal bölgesinde gerçekleşmiş olur. Eriyik bölgenin taşıyıcının duvarlarıyla temas etmek zorunda olmaması nedeniyle, kirlenme olayı da büyük ölçüde giderilmiş olur. Tüm bu işlemler vakumlu ortamda gerçekleştirilebilir. Sonunda silindirik yapıdaki külçe elmas testereyle 0,25 nm kalınlıklarda kesilir. FZ malzemeler, CZ malzemelere göre genellikle daha yüksek yoğunluğa ve daha düşük oksijen oranına sahiptir [Sarıtış, 1988].

Eklem oluşturma aşamalarının en kritiği difüzyon aşamasıdır. Yüksek verim için, yüksek yüzey konsantrasyonlu çok sığ ve yüzeysel eklemler (yaklaşık 0.3  $\mu\text{m}$ ) kullanılması gerekir.  $\text{P}_2\text{O}_5$  ve  $\text{POCl}_3$  N-P yapı elde etmek için kullanılmaktadır. P-N yapılar için de en çok kullanılan difüzyon kaynakları  $\text{BCL}_3$  ve  $\text{BBr}_3$ ' dür. Daha pratiğe yönelik uygulamalarda B ve P katkılı  $\text{SiO}_2$  kullanılır. Bu yöntemle elde edilmiş FV hücrelerin verimleri teorikte % 24, pratikte % 10-14 civarında olmaktadır [Sarıtış, 1988].

İyon ekme yöntemi Silisyum FV hücreler için geliştirilmiştir. Bu yöntem sayesinde, çok sığ ve yüzeysel eklemler ( $< 0.2 \mu\text{m}$ ), çok yüksek yüzey konsantrasyonuna sahip olsa bile gerçekleştirilebilir. Ancak oldukça maliyetli olmasının yanında, enerjik iyon türleri, ekilmiş bölgede hasara neden olurlar. Yüksek sıcaklıkta yapılan tavlama işlemi ile bu durum giderilebilir. Yinede, çok yüksek  $I_{sc}$  ( $> 40 \text{ mA/cm}^2$ ) elde edilmesine karşı,  $V_{oc}$  değeri düşüktür [Sarıtış, 1988].

Tek kristal yüzey üzerindeki yönlü tek kristal tabakanın büyütülmesi, Epitaksiyel büyüme veya Epitaksi olarak adlandırılır. Sıvı ve buhar faz olarak işlem yapılır. Ağır şekilde katkılanmış Silisyum yapı üzerinde, ince ve hafif katkılanmış Silisyum

tabaka büyütülmesiyle yapılan FV hücrelerde epitaksiyel arka yüzey, verimi arttıran alan olarak kullanılır. Ayrıca dikey çok eklemlili yapılarda da kullanım alanı vardır. Bu yöntem kullanılarak N ve P bölgesi kalınlıkları istenildiği gibi ayarlanabilmektedir [Sarıtaş, 1988].

AR kaplama, Silisyum yüzeyden yansıyan ışığın büyük kısmını azaltarak çevrime katkı yapar. Tek tabakalı AR kaplamalar, yansıyan ışığı % 10, çift tabakalı ise % 3 seviyelerinde azaltabilir. Yapılan farklı tür AR kaplamalardan,  $TiO$ ,  $TiO_2$  ve  $Ta_2O_5$  gibi yüksek band gap enerjisine sahip malzemeler kullanmak ve difüzyon aşaması boyunca Silisyum üzerindeki  $SiO_2$  tabakasının kalınlığının optimize edilmesi, en çok kullanılan AR kaplama yöntemleridir. Malzeme üzerine AR kaplama, buharlaşma, püskürtme, anotlama, kimyasal buhar ve bükme teknikleriyle yapılabilir [Sarıtaş, 1988].

Ön kontak şeritlerinin oluşturulmasında, metal ve alaşımların büyük çoğunluğu kullanılabilir. Bunun için, şeritlerin yüksek elektriksel iletkenlikli, düşük kontak dirençli ve malzeme yüzeyine iyi tutunabilen özellikte olmaları gerekir. Üç tabakalı (Ti-Pd-Ag) yapılar, N-P Silisyum FV hücreler için iyi kontak direncine sahiptir ve uzay uygulamalarında kullanılır. Ag ve Au kontaklar malzemeye tutunma özelliklerinin zayıflığından dolayı geniş kullanım alanına sahip değildir [Sarıtaş, 1988].

Arka kontak şeritlerinin oluşturulmasında ise Kaplama Metodu kullanılır. Malzemeyle uyumlu ve düşük maliyetlidir. Ancak Ni, Au, Ag, Ti, Pd ve Al kullanımı kadar güvenilir değildir.

Burada açıklanan yöntemler dışında kalan farklı metotlar da vardır. Ancak, açıklanan bu yöntemler, tüm dünyada FV hücre yapımında kullanılmış, doğrulukları ispatlanmış ve en çok tercih edilen yöntemlerdir.

### Monokristal Silisyum

FV hücre yapımında en çok kullanılan malzemedir. Veriminin yüksek olması nedeniyle FV çalışmaların merkezini oluşturur. Doğada Kuartz içinde % 90 saflıkta bulunmaktadır. Yüksek maliyetli tekniklerle % 99 saflıkta Multikristal Silisyum elde edilebilmektedir. Elde edilen Multikristal Silisyum eritilip elmas testereyle kesilir. Bu kesme işlemi sırasında % 20 kayıp olmaktadır. Zaten yüksek maliyetli olan malzeme ve hücre yapımında bu kadar yüksek kayıp olmasından dolayı kesme işlemi yerine farklı teknikler kullanan yöntemler geliştirilmiştir. Şekillendirilmiş şerit (shaped ribbon) veya Dentiritik Ağ yöntemi uygulamada kullanılmaktadır. Dentiritik Ağ yönteminde dentiritik çekirdekler çok düşük hızlarda, erimiş Silisyum içinden geçirilir. Böylece ince yapılı tek kristalli tabakalar üzerine Silisyum atomları eklenir ve tabakalar büyümüş olur. Daha sonra 200 µ kalınlığında dilimlere ayrılarak kullanılır. Laboratuvar şartlarında % 24,7 pratik uygulamalarda ise % 15' in üzerinde verime sahiptir [Temiz Enerji Vakfı, 2001].

Monokristal Silisyum kristalinin büyütülmesi için en çok kullanılan yöntemler, CZ (Czochralski), FZ (Float Zone) ve Bridgman yöntemleridir. Bridgman işleminde nispeten saf yarı-iletken sıvı taşıyan potanın sonuna yerleştirilmiş, yönlendirilmiş besleme kristali vardır. Bölgenin sıcaklığı, katının donma sıcaklığının altında bir değere soğutulur ve kristal bu bölgeden yavaşça geçirilir. Kullanılan tüm yöntemlerde cm/saat mertebelerinde üretim olmaktadır [Hu ve White, 1983].

### Monokristal GaAs

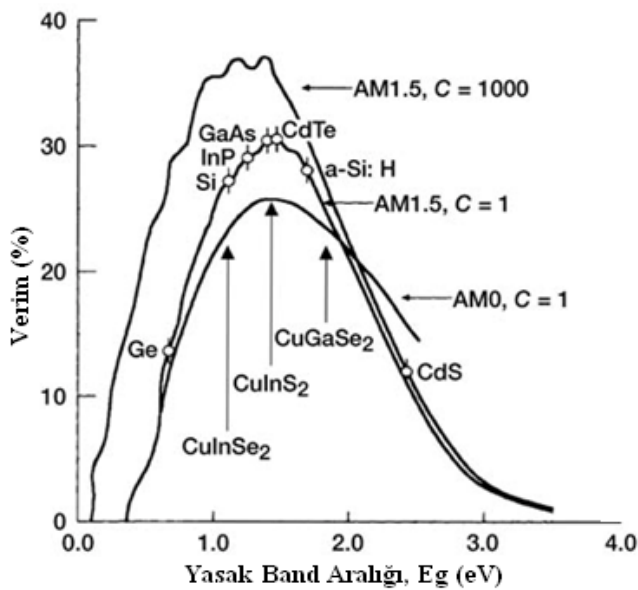
GaAs, Silisyum' dan sonra en çok kullanılan yarı-iletken malzemedir. Bu malzemeyle laboratuvar şartlarında % 25,1 ve % 28 (optik yoğunlaştırıcılı) verim elde edilmektedir. Farklı yarı-iletkenlerle birlikte oluşturulan çok eklemli GaAs hücrelerde % 30 civarında verim elde edilmiştir. GaAs güneş pilleri uzay uygulamalarında ve optik yoğunlaştırıcılı sistemlerde kullanılmaktadır.

## Multikristal Silisyum

Multikristal yapı kullanmanın en büyük dezavantajı, çok kristalli yapılarda malzemenin damarları arasında var olan süreksizliğin iletkenlik kalitesini düşürmesidir. Dolayısıyla verimi Monokristal Silisyuma göre düşüktür. Ancak yapım maliyetinin düşüklüğünden dolayı tercih edilmektedir. Multikristal Silisyum yapımında Dökme yöntemi yaygındır. Bu yöntemde erimiş Silisyum kalıplarda soğutulularak bloklar halinde kesilir. Laboratuvar şartlarında % 19,8 pratik uygulamalarda ise % 14 verime sahiptir [Temiz Enerji Vakfı, 2001].

## İnce Film

Genellikle çok kristalli yapıdadır. Yapısı itibariyle geniş yüzeylere kolay uygulanabilmektedir. Amorf Silisyum, CdTe (Kadmiyum Tellür), CuInSe<sub>2</sub> (Bakır İndiyum Diselenid) başlıca ince film güneş hücresi malzemeleridir. Şekil 2.4' de ince film FV malzemelerin 300 °K sıcaklık ve AM0 solar spektrumunda ve yeryüzünde AM1,5 solar spektrumunda ölçülen verim-yasak band aralığı grafiği görülmektedir [Aloysius, 2007].



Şekil 2.4. İnce film yarı-iletken malzemelerin verim-band gap grafiği

### **Amorf Silisyum**

Amorf Silisyum, soğurma katsayısının çok büyük olmasından dolayı 250 °C civarında yüzey sıcaklığına sahip malzemelere kaplanabilmektedir. Amorf yapıda Silisyum atomları gelişigüzel dizildiğinden iletkenliği düşüktür. Ancak yapısına Hidrojen katılarak FV çevrime uygun hale getirilebilir. Amorf Silisyum yapımına en uygun teknoloji Işımalı Boşaltım (Glow discharge) yöntemidir. SiH<sub>4</sub> (Silane gazı) ve Hidrojen karışımı, yüksek frekanslarda elektron çifti arasından geçirilerek elektron işaretleri değiştirilir. Böylece SiH<sub>4</sub> parçalanarak SiH<sub>3</sub> radikali oluşur. Oluşan radikal elektron ile birleşerek kararlı hale gelir. Hidrojenin yüzeyden ayrılmasıyla geriye Silisyum kalır. Böylece yüzey Silisyum kaplanmış olur. Amorf Silisyum yapılarda verim yüksek ama kararsızdır. Kararlı verimi % 7 civarındadır. Bu sebeple büyük güç sistemlerinde tercih edilmez. Daha çok küçük elektronik cihazlarda güç kaynağı olarak kullanılır. Amorf Silisyum, binaların cam kaplı yüzeylerinde, dış koruyucu ve aynı zamanda enerji üretici olarak da kullanılmaktadır [Temiz Enerji Vakfı, 2001].

### **Kadmiyum Tellur (CdTe)**

FV hücre yapımında kullanılan bileşik yapılı malzemelerden biri de Kadmiyum Tellür' dür. Yasak enerji bandı 1,5 eV' tur. Genellikle 2,4 eV band seviyesine sahip olan Kadmiyum Sülfür (CdS) ile eklem diyot oluşturarak kullanılır. Başlıca CdTe ince film büyütme teknolojileri, CSS (Close Space Sublimation-Yakın Mesafeden Buharlaştırma) ve Elektrodepozisyon yöntemleridir. CSS yönteminde sıcaklık farkları çok az olan film yüzeyi ve kaynak birbirine çok yakın tutularak süblimasyonla malzemenin büyümesi sağlanır. Elektrodepozisyon yönteminde ise Cd ve Te iyonlarını taşıyan elektrolitten akım geçirilerek CdTe' nin katotta toplanması sağlanır. Bu yöntemle elde edilen hücrelerde 92 W/m<sup>2</sup> güç üretilmiştir [Temiz Enerji Vakfı, 2001].

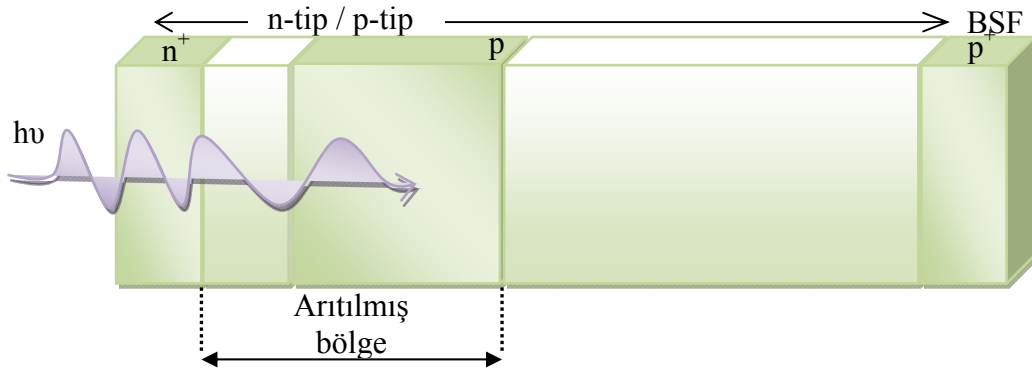


## Bakır İndiyum Diselenid (CuInSe<sub>2</sub>)

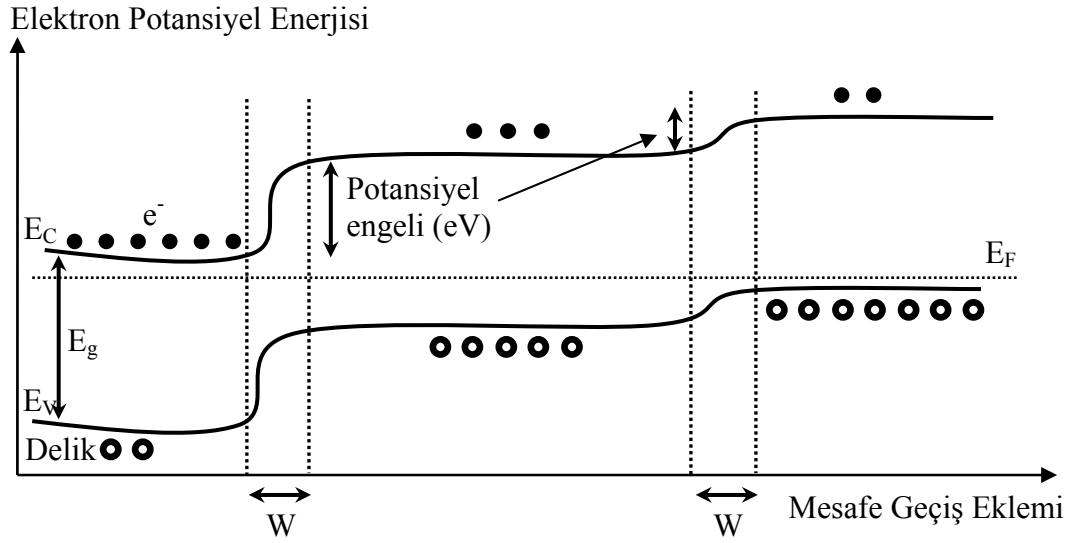
Ga ile katkılanarak verimi artırılabilir. Ancak yarı-iletkeni oluşturan malzeme sayısı arttıkça, teknoloji ve denetimi zorlaşmaktadır. Vakumda Eşzamanlı Buharlaştırma yönteminde Molibden, arka kontak cam üzerine püskürtülür. Arka kontak yerleştirilir. Cu, İr ve Se tabakaları eşzamanlı olarak buharlaştırılarak büyütülür. Cds tabakası ise kimyasal banyo yöntemiyle büyütülür. Büyütülen tabakalar kesilir. ZnO tabakası ön kontak olarak kesilir ve birleştirme işlemi gerçekleştirilir. Ayrıca, CuIr (Bakır İridyum) ince film alaşımının Selenyum' la tepkimeye sokulmasını içeren Selenizasyon yöntemi de uygulanmaktadır.

### 2.2.3. Akım oluşumu

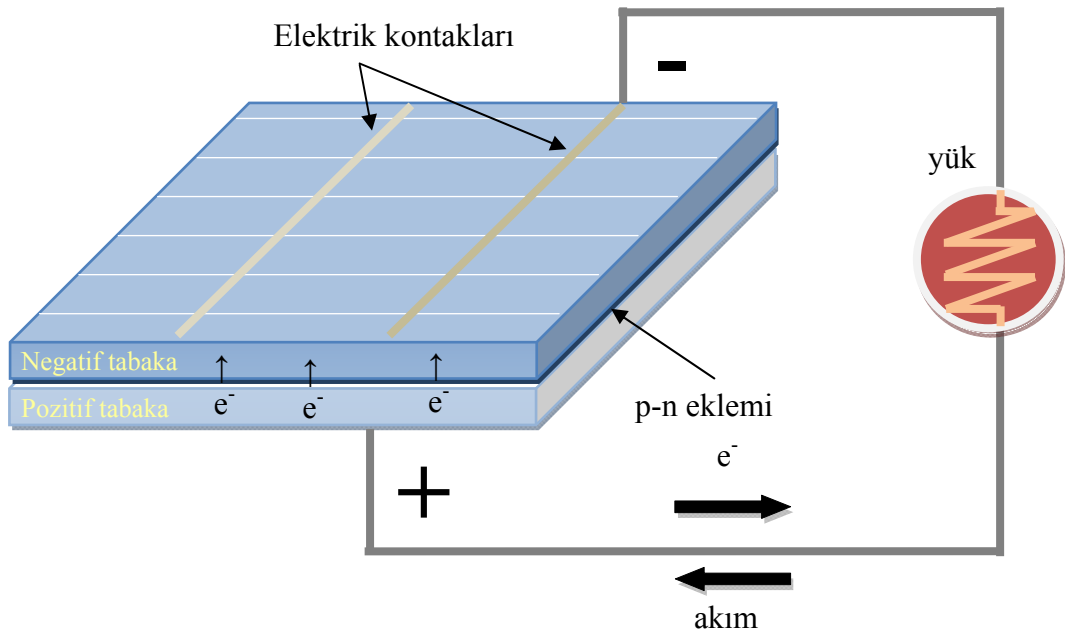
Şekil 2.5' de  $n^+ - p - p^+$  FV hücre yapısı görülmektedir. Yarı-iletken malzemeye ulaşan foton enerjisi ( $h\nu$ ), kullanılan malzemenin yasak band enerjisinden ( $E_g$ ) büyükse; P bölgesindeki azınlık elektron sayısında ve n bölgesindeki azınlık boşluk sayısında bir artış meydana gelir. Bu azınlık taşıyıcılar P-N eklemindeki elektrik alanla birbirlerinden ayrılarak yükten akım geçirirler. Bu arada P-N eklemindeki potansiyel engelinde de düşme olur. Potansiyel engelindeki düşme miktarı kadar da P-N eklemi bir gerilim üretilir. Böyle bir yapı Şekil 2.7' de gösterilmiştir. Şekil 2.6' de ise bir FV hücrenin enerji band diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 2.5.  $n^+ - p - p^+$  hücre yapısı



Şekil 2.6. FV hücre enerji band diyagramı



Şekil 2.7. P-N ekleminde akım oluşumu

Elektronun, yeterli enerjiye ( $h\nu$ ) sahip fotonla bir üst banda geçmesiyle, değerlik bandında kalan pozitif yapı “boşluk” olarak adlandırılır. Böylece bir elektron-delik çifti elde edilmiş olur. Ancak değerlik bandından ayrılan elektronlar geri dönme eğilimindedirler. Elektronların bir üst enerji seviyesinde kalma sürelerine “ömür süresi” denir. FV sistemlerde kullanılan yarı-iletken malzemede elektron ve

boşlukların ömür süresinin uzun olması istenir. Saf yarı-iletken malzeme içine uygun maddeler eklenerek elektriksel özellikleri değiştirilebilir. Örneğin Silisyum atomunu milyonda bir oranda Fosfor' la katkılırsak Silisyum atomunun son yörüngesindeki 4 elektronla Fosfor atomunun 4 elektronu kovalent bağ oluşturur. Fosfor atomunun boşta kalan bir elektronu, yarı-iletken malzemeye uygulanacak az miktarda enerjiyle (ısı veya ışık) iletkenlik bandına geçebilir. Bu yapıya N tipi yarı-iletken denir. N tipi yarı-iletkende çoğunluk taşıyıcıları elektronlardır. Aynı şekilde Silisyum atomu Boron ile katkılanırsa, bir bağ boşta kalır ve çok az miktarda enerjiyle kovalent bağ oluşturabilir. Bu yapı da P tipi yarı-iletken olarak adlandırılır ve çoğunluk taşıyıcılarını boşluklar oluşturur. Böylece elektriksel özelliği değiştirilmiş iki yapının birleşiminden bir P-N eklem oluşur. Foton enerjisiyle, kopan elektronların bir üst enerji bandında, boşlukların da bir alt enerji bandında daha uzun süre kalması sağlanarak, FV çevrime uygun bir yapı elde edilmiş olur. Sonuçta elde edilen P-N eklem yapısı üzerine metal kontaklar eklenir ve bu kontaklar bir iletkenle birbirlerine bağlanırsa, oluşan elektron hareketi N tipten P tipe doğru olur ve bu hareket ters yönde bir elektrik akımı meydana getirir [Partain, 1995].

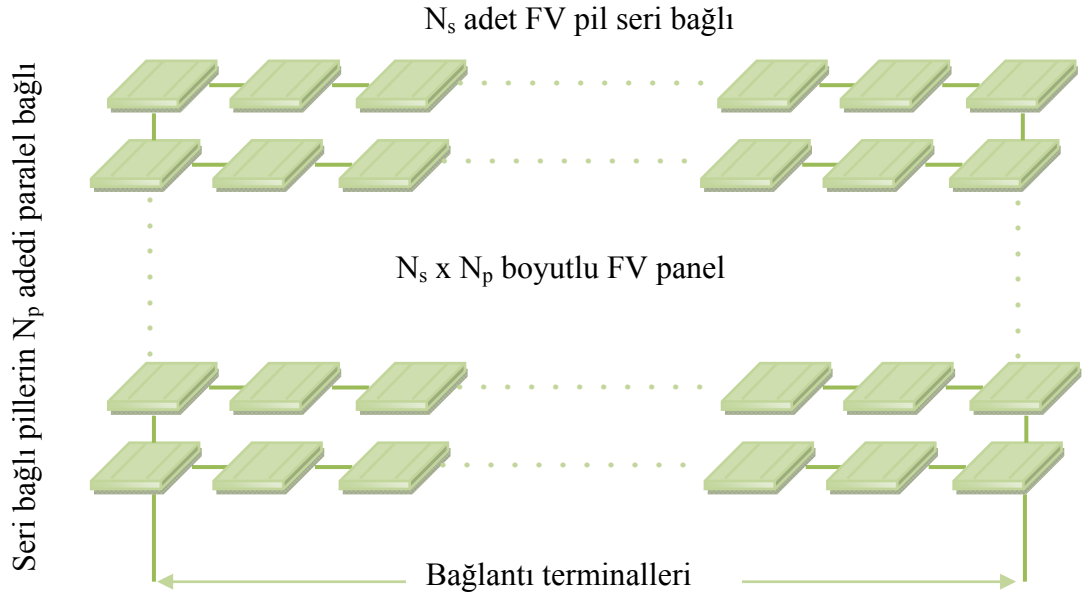
Ancak tek bir P-N eklemi, 0,7 V - 10 mA seviyesinde akım üretmektedir. FV panel oluşturulurken, gerekli çıkış gerilimini elde etmek için yeterli sayıda ( $N_s$ ) pil seri bağlanırken, gerekli akımı elde edebilmek için de pillerin seri bağlanmasıyla meydana gelen yeterli sayıda ( $N_p$ ) kol paralel bağlanır. Dolayısıyla, Şekil 2.9' da verilen FV panel ve bağlantı devresi ile yapılan ölçümler, bu FV panelin akım ve gerilimini verir. Eğer panelin akımı  $I_{PANEL}$ , gerilimi de  $V_{PANEL}$  ile gösterilirse, paneli oluşturan her bir FV hücrenin akım, gerilim ve gücü sırasıyla aşağıdaki bağıntılar kullanılarak belirlenebilir.

$$I_{PİL} = \frac{I_{PANEL}}{N_p} \quad (2.1)$$

$$V_{PİL} = \frac{V_{PANEL}}{N_s} \quad (2.2)$$

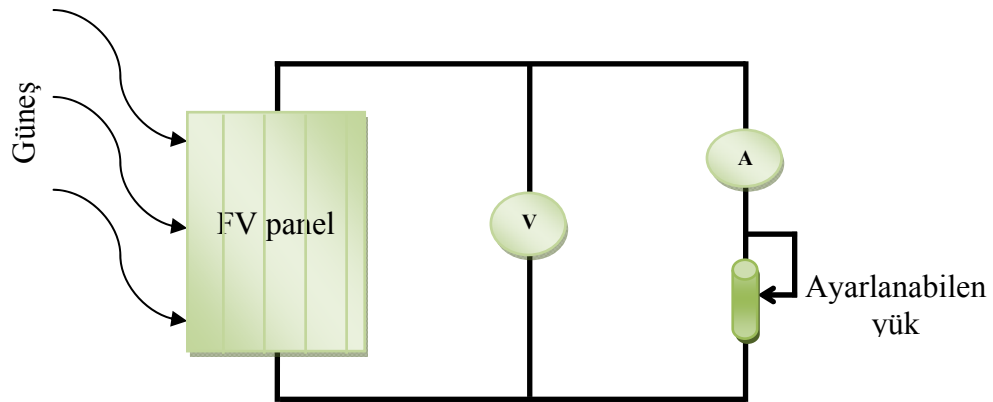
$$P_{PANEL} = V_{PANEL} \cdot I_{PANEL} \quad (2.3)$$

$$P_{PİL} = V_{PİL} \cdot I_{PİL} = \frac{V_{PANEL}}{N_S} \cdot \frac{I_{PANEL}}{N_P} = \frac{P_{PANEL}}{N_S \cdot N_P} \quad (2.4)$$



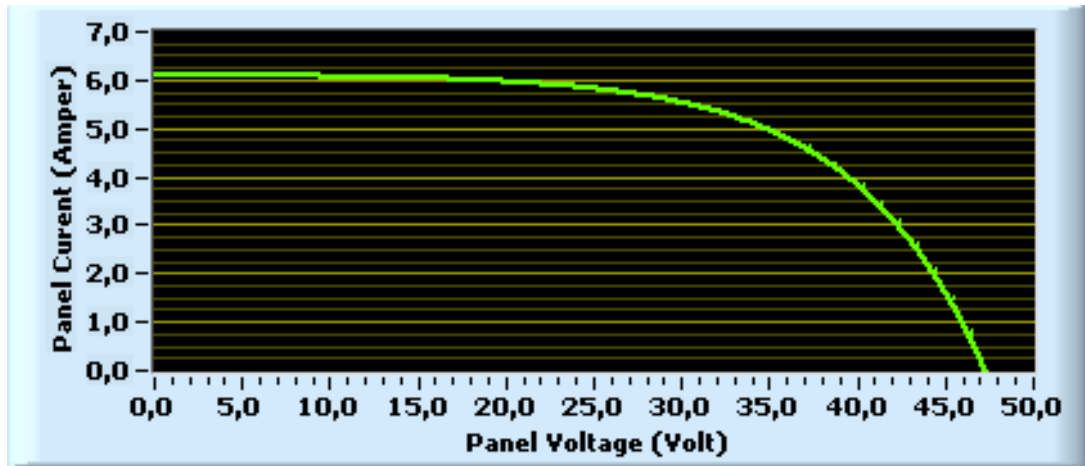
Şekil 2.8. Pillerin seri-paralel bağlanmasıyla oluşturulan FV panel

Bir FV pilin burada bahsedilen elektriksel özelliklerini belirlemek için, pilin akım ve geriliminin yükten nasıl etkilendiğini gözlemek gerekir. Bu amaçla Şekil 2.9’ da verilen devre kullanılabilir.



Şekil 2.9. FV pilin doğrudan doğruya ayarlanabilen bir yüke bağlanması

Bu şekilde, FV panel, seri bağı bir ampermetre üzerinden ayarlanabilen bir yüke doğrudan bağlanır. Günün belirli bir saatinde, gün ışığı ve ortam sıcaklığındaki değişmelerin ihmal edilebilecek kadar az olduğu kabul edilir. Yük, açık konumdan uçlarının kısa devre olduğu konuma kadar ayarlanırken, ampermetre ve voltmetredeki değerler her yük kademesi için kaydedilip grafik olarak çizilirse, Şekil 2.10' da verilen akım-gerilim (I-V) karakteristiği elde edilir.



Şekil 2.10. FV pilin I-V karakteristiğinin yükle değişimi

### 2.3. Fotovoltaik Sistem Tasarımı

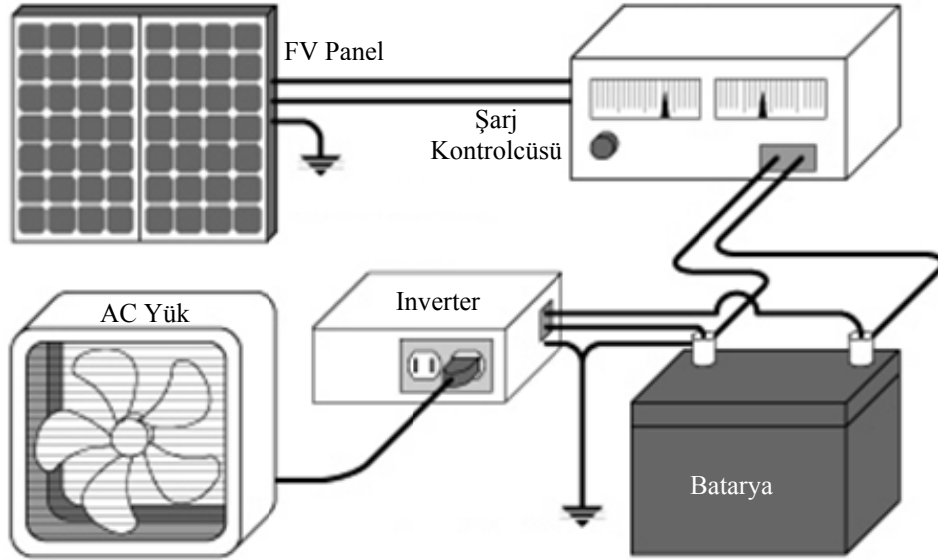
FV sistemler; temiz, yenilenebilir, dinamik aksamı olmadığı için düşük bakım maliyeti olan modüler enerji üretim sistemleridir. Özellikle elektriğin ulaşmadığı dağ evleri, sulama alanları, baz istasyonları gibi yerlere kurulan FV sistemler, yeni bir enerji nakil hattı çekilmesi, trafo yerleştirilmesi gibi zahmetli ve masraflı oluşumları ortadan kaldırmaktadır. Yapılan hesaplamalar, aylık 8 KWh' den daha küçük kapasiteli bir yer için 65 metrelik güç hattı çekmektense, bağımsız bir FV sistem kurmanın daha uygun maliyetli olduğunu göstermektedir. Bu tablo, FV teknolojisindeki gelişmeler sayesinde her geçen yıl daha da iyiye gitmektedir. Ancak, maliyet ve üretilen elektriğin depolanmasındaki zorluklar, FV sistem kullanımını sınırlandıran en önemli parametrelerdir.

Elektrik ihtiyacının karşılanmasında, FV sistem kullanmanın pek çok avantajı vardır. Öncelikle, yalnızca bir kereye mahsus olan kurulum maliyeti vardır. Diğer sistemlerde olduğu gibi periyodik bakım ve masraflar olmadığından maliyeti düşüktür. Son derece güvenilir sistemlerdir. Hafif olmaları kurulum ve değişiklik durumlarında avantaj sağlar. Kaynağının güneş olmasından dolayı hemen her yerde kullanılabilirler. Sistemi oluşturan parçalar kolaylıkla bulunabilen ve maliyeti az olan parçalardır. Bu sebeple kurulu sistemi büyütme veya küçültme çok kolaydır. Hareketli parçalarının olmaması sebebiyle aşınma, kırılma, yıpranma gibi bakım ve maliyet gerektiren fiziksel olaylar görülmez. FV sistemlerde kullanılan aküler oldukça ilerlemiş ve yerleşik bir teknolojiye sahiptir. Sistem güç kesintileri veya gerilim dalgalanmalarından etkilenmez [Rosenberg, 1992].

Yukarıda sayılan avantajlarının yanında FV sistem kullanmanın getirdiği bazı dezavantajlar da vardır. Öncelikle, ilk kurulum maliyeti oldukça yüksektir. Geceleri üretim yapılamaz. Benzer şekilde kapalı, bulutlu, yağmurlu günlerde performans kaybı olmaktadır. Bunu engellemek için sisteme ek anahtarlama ve koruma devrelerine ihtiyaç vardır. Bu da maliyeti artırmaktadır. Sistem parçaları genelde bakım gerektirmese de yapısı gereği akünün periyodik olarak kontrol edilmesi gerekmektedir. Ayrıca kimyasal çevrim elemanı olduğundan sınırlı kullanım ömürleri vardır. Paneller DC güç ürettiğinden pratik kullanım için inverter'ler kullanılmalıdır. FV paneller dış etkiyle kolayca zarar görebilecek yapıdadırlar. Gerilim hatlarıyla kıyaslandığında daha sınırlı kullanım ömürleri vardır. Her ne kadar temiz enerji olsa da, FV sistemi oluşturan parçaların -özellikle hücre- yapımı sırasında kullanılan ileri kimyasal süreçler çevre için son derece tehlikelidir [Rosenberg, 1992].

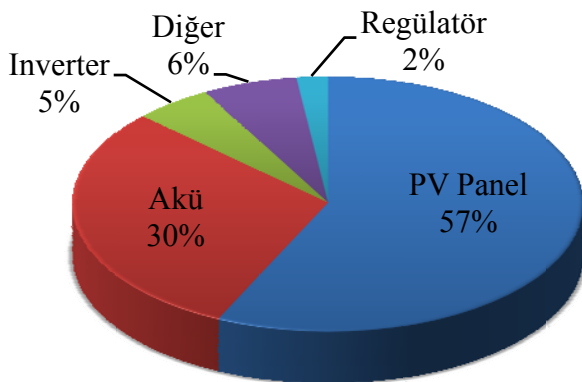
Şekil 2.11' de genel bir FV enerji dönüşüm sistemi görülmektedir. Bu ve buna benzer pek çok blok yapı gösterilebilir. Genel olarak panel, converter, inverter, akü ve yükten oluşan donanım elemanları, bir FV sistemde bulunması gereken temel elemanlardır. Panel üzerine gelen güneş ışığının şiddeti, gün içerisinde sürekli değişmektedir. Panel çıkışına bağlı DC/DC converter güneş ışığıyla değişen panel çıkış gerilim değerini istenilen değerde sabitleyerek, ya doğrudan DC bir yükü, ya da

bir inverter üzerinden AC bir yükü besler. AC ve DC yük, panel tarafından şarj edilen bir akü grubu üzerinden de beslenebilir.



Şekil 2.11. Genel bir FV sistem

Şekil 2.12, 15 kW/gün' lük bir FV sistemin toplam maliyet dağılımını göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, PV sistemlerin maliyetini artıran en önemli parametreler panel ve aküdür. FV pil teknolojisinin hızla ilerlemesi ve sistem maliyetlerin azalması, günümüzde FV sistem tasarımını olumlu etkilese de, sistem parametrelerinin kendi içinde oluşturdukları maliyet payları aynı kalmaktadır [Enslin, 1997].



Şekil 2.12. 15 kW/gün FV sistem maliyet dağılımı

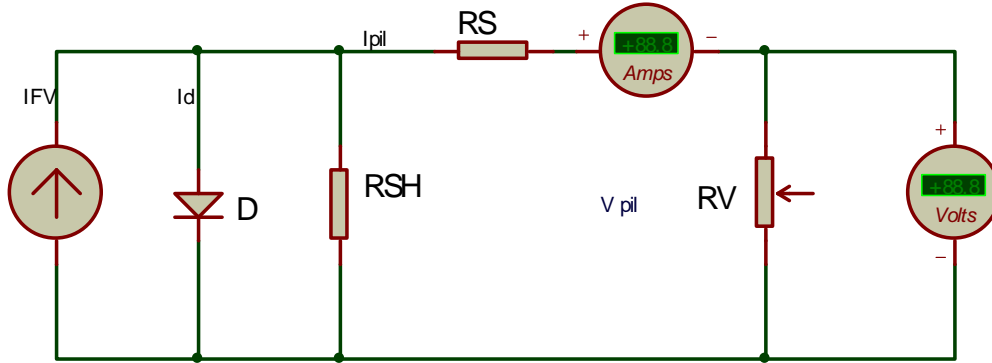
### 2.3.1. FV pil (panel) ve eşdeğer devresi

FV hücrelerden elde edilen enerji oldukça az olduğundan hücreler seri veya paralel bağlanırlar. Böylece modülleri, modüller de bir araya gelerek panelleri oluştururlar. Büyük miktarlarda enerji elde etmek için paneller bir araya getirilerek FV dizisi oluşturulur. Bu şekilde oluşturulmuş bir güneş hücresi dizisinin kullanılmasının en basit yolu diziyi doğrudan aküye bağlamaktır. Eğer dizi voltajını akü voltajından daha yüksek seviyeye getirecek yeterli sayıda seri bağlı hücre varsa, dizi güç üretecek ve aküleri dolduracaktır. Diziyi pillere bağlama metodu basit, ekonomik ve güvenilirdir. Ancak sistem anlamında bazı durumlara dikkat edilmesi gerekir. Bir güneş hücresi, p-n ekleminden (junction) oluşmuş ve yüzeyi özel olarak işlenmiş bir diyottur. Eğer hücreye hiç güneş ışığı gelmezse, hücre tamamen akımın aküden dışa doğru serbestçe akmasına izin veren ve diğer yönde akmasını engelleyen bir diyot gibi davranacaktır. Güneş hücresinin akımı ters yönde oluşturduğuna ve bu yüzden hücrenin akımı diyot gibi serbest olarak geçireceğine dikkat etmek gerekir. Tasarım açısından bakılacak olursak bu durumun iki sonucu vardır. Birincisi, eğer güneş hücresi aküyü şarj ediyorsa devreye bir anahtar eklenmelidir. Hücrelerin gün ışığı gelmediği zaman akülerin boşalmasını önlemek için kullanılan bu anahtar-örneğin geceleri- açık tutulmalıdır. İkincisi ise bir hücre düzeneğindeki herhangi bir hücrenin gölgede kalması bu hücrenin akım üretememesine ve diğer hücrelerin akımını engelleyecek şekilde diyot gibi davranmasına neden olacaktır. Bu durumda sisteme “by-pass” diyotları eklenmelidir.

FV panellerin verimini etkileyen en önemli faktörler, ışık şiddeti ve panel sıcaklığıdır. Bu iki parametre yüke aktarılan gücü doğrudan etkilediğinden önemle üzerinde durulmalı ve hesaba katılmalıdır. Yapılan çalışmalarda, aşırı ısınan panellerin sistem verimini azalttığı ve her 10 °C’ lik artışta performansın % 1 düştüğü görülmektedir. Panellerin yüzey kirliliği de panele ulaşan güneş ışığı şiddetini azalttığından, % 3,5 oranında performans kaybına neden olmaktadır. Sıcaklık ve güneş ışığı şiddeti parametreleri ile ilgili ayrıntılı bilgi ileriki bölümlerde verilmiştir.



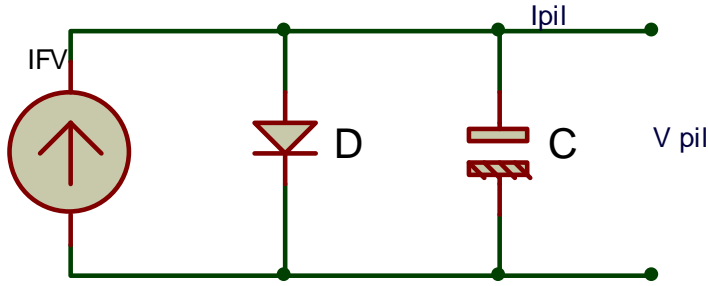
FV piller, birim alan başına belirli bir akım ve gerilim üretirler. Eşdeğer devresi Şekil 2.13’ de verilen FV pilde, yükten geçen akım şiddeti ve yükün uçlarındaki gerilim değerleri ölçülebilir. Ayarlanabilir bir dirençle ( $R_V$ ), gerilim ve akım açık devreden kısa devreye kadar değiştirilerek gerilim akım şiddeti eğrileri elde edilebilir.



Şekil 2.13. FV pil statik eşdeğer devresi

Burada gösterilen  $R_S$ , ön yüzeyden kontaklara doğru akan akıma, hücre malzemesinin gösterdiği iç direnci temsil etmektedir. Özellikle yoğunlaştırılmış ışık altındaki yüksek akımlarda problem teşkil etmektedir.  $R_{SH}$  ise farklı polariteye sahip kontaklar arasındaki kaçak akımın etkisini temsil eder.  $R_S$  direncinin artması,  $R_{SH}$  direncinin de azalması maksimum güç noktasını aşağıya çeker. Pratikte, verimli bir hücre için  $R_S$  direncinin mümkün olduğunca küçük,  $R_{SH}$  direncinin de mümkün olduğunca büyük olması istenir. Pratikte  $R_S$  direnci  $0,5 \Omega$ ,  $R_{SH}$  direnci de  $500 \Omega$  mertebelerindedir [Nelson, 2004].

Literatürde nadir de olsa dinamik modellere rastlamak mümkündür. Şekil 2.14’ de gösterildiği gibi, dinamik modellemede kondansatör kullanıldığından, işlemler statik modellemeye göre daha karmaşık bir hal almaktadır. Ancak her iki modelde de elde edilen sonuçlar arasındaki fark kabul edilebilir boyutta olduğundan, nispeten daha basit olan statik pil modeli tercih edilmektedir. Bu çalışmada da statik modelleme baz alınmış ve işlemler bu modele göre yapılmıştır.



Şekil 2.14. FV pil dinamik eşdeğer devresi

### 2.3.2. Regülatör (DC/DC converter)

Regülatörler, istenilen düzeyde çıkış gücü almak ve akülere bu gücü iletmek için kullanılan elektriksel devrelerdir. Regülatörler FV sistemlerde, akülerin gün içinde aşırı yüklenmesini engeller. FV sistemlerde kullanılan regülatörler genellikle  $12 V_{DC}$  ile çalışır. Ters kutuplama ve ters yönlü sızma akımı koruması bulunur. Ayrıca sıcaklık sensörü, düşük gerilim alarmı gibi ek güvenlik devreleri bulundurlar.

FV sistemlerde seri ve paralel (şönt) regülatör olmak üzere, tercih edilen iki tip regülatör vardır. Seri regülatörlerde; FV modül ve aküler arasında seri bağlanan transistör veya röle kullanır. Paralel regülatör, aküler tamamen dolduğunda akımı şöntleyerek akülere doğru akmasını engeller.

Regülatörlerin akülerle birlikte kullanıldığı unutulmamalıdır. Sistem tasarlanırken bu iki elemanın uyumu kontrol edilmelidir. Uyumsuz regülatörler kısa zamanda akülere ve dolayısıyla sisteme zarar verebilirler.

### 2.3.3. Inverter ve şarj kontrolörü

FV hücreler doğru akım üretirler. Stereo parçalar ve hesap makineleri dışında doğru akımla çalışan ekipman yok denecek kadar azdır. Bu durumda günlük kullanım için çıkışın alternatif akıma dönüştürülmesi gereklidir. Bu nedenle inverter vazgeçilmez FV sistem elemanıdır. Tristör ve yardımcı devre elemanlarının kullanıldığı yarı denetimli ve IGBT ve MOSFET' in kullanıldığı tam denetimli inverterler vardır.

Tam denetimli inverterler akım ve gerilim denetimli olarak sınıflandırılırlar. FV Diziler DC gerilim kaynağı gibi davrandığından bu sistemlerde gerilim denetimli inverterler kullanılır.

FV Şarj Kontrol Üniteleri, panellerden gelen akımla, akülerdeki gerilim değerlerini sürekli kontrol ederek akülerin her zaman optimum dolulukta kalmasını sağlayıp, fazla enerjinin akülere zarar vermesini önler ve böylece sistem performansını arttırarak akünün tam şarjda kalmasını sağlarlar. Akü dolunca şarjı keser ve akülerin uzun ömürlü olmasını sağlarlar. Böylece regülasyonun olmaması durumunda bataryaların aşırı ısınma yüzünden tahrip olması önlenmiş olur.

Genel olarak 1-5 Watt'lık küçük kapasiteli panellerde şarj kontrol ünitelerine ihtiyaç duyulmaz. Genel olarak FV panel 1 günde, batarya kapasitesinin 1/60 veya daha azını harcıyorsa şarj kontrol ünitelerine gerek yoktur.

Şarj kontrol ünitelerinin çoğu PWM (Pulse Width Modulation) kullanırlar. Şarj kontrol ünitesinden gelen sabit çıkış yerine bataryaya çok hızlı kısa şarj darbeleri (on/off şeklinde) gönderir. Şarj kontrol ünitesi, sürekli olarak bataryanın şarj durumunu, gelen darbelerin gönderilme hızını ve darbelerin genişliğini kontrol eder. Şarj kontrol ünitesi darbeler arasında şarj durumunu denetler.

#### **2.3.4. Akü**

Aküler birim hücrelerden oluşur ve bu hücreler elektrik enerjisine dönüşebilen kimyasal enerji içerirler. FV sistemler için enerji saklamada iki parametre önemlidir. Enerjiyi saklarken çok enerji saklamalı ve geriye verirken de olabildiğince az kayıpla sakladığı enerjiyi geri verebilmelidir. Buna malzemenin enerji saklama yoğunluğu denir. Bu anlamda FV panellerde kullanılmaya uygun tek akü tipi, Kurşun Asit aküdür. Akü üzerinden geçirilen akım ile,  $PbSO_4$  (Kurşun Sülfat) üzerinde enerji depolanır. İçerisinde Pb (Kurşun),  $PbO_2$  (Kurşundioksit) ve  $H_2SO_4$  (Sülfürik asit) karışımı vardır. Minimum enerji saklama yoğunluğuna sahiptirler. Ancak Kurşun-asit akülerde kullanılan Kurşun, hem ağır hem de pahalı bir malzemedir. Bu sebeple

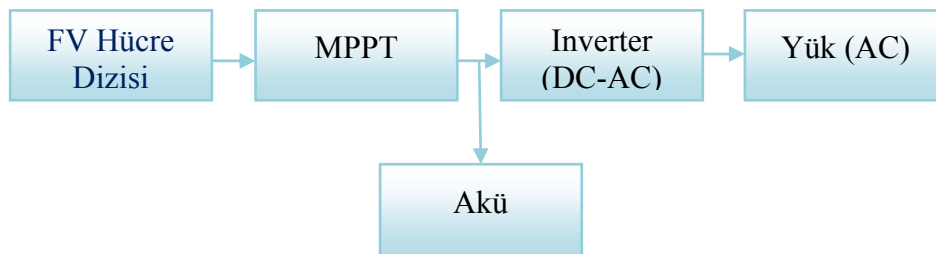
günümüz FV sistemlerinde, enerji saklama için neredeyse tek kaynak olan Kurşun-asit aküler yerine, hafif ve pahalı olmayan malzemeler kullanan aküler geliştirilmeye çalışılmaktadır. Diğer aküler arasında yüksek sıcaklıkta çalışabilen tek akü Sodyum Sülfür (Beta) aküdür. 300-350 °C çalışma sıcaklığına sahip olmasından dolayı Beta akülerle ilgili çok fazla çalışma yapılmaktadır [Hu ve White, 1983].

Çizelge 2.1' de, farklı akülerin enerji yoğunlukları, boyutları ve maliyetleri özetlenmiştir.

Çizelge 2.1. Akülerin enerji ve güç yoğunlukları

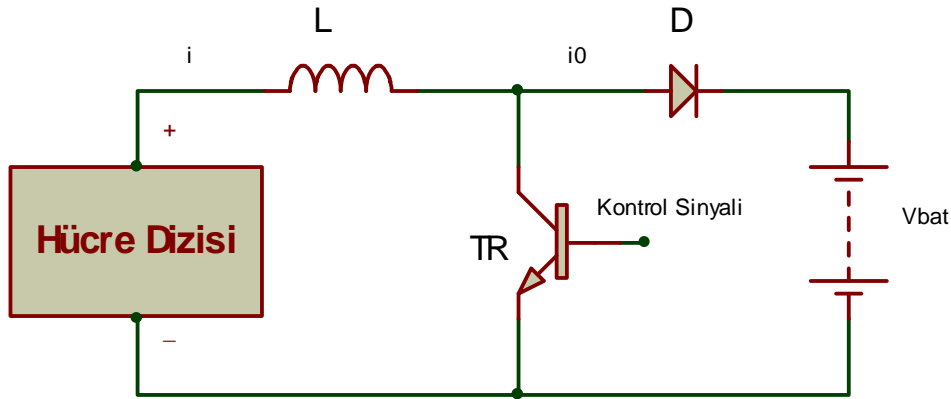
Akü Cinsi	Hücre Enerji Yoğunluğu Watt-Saat/Kg	Akü Boyutu kWsaat	Aktif Malzeme Maliyeti \$/kWsaat
<i>Kurşun Asit</i>	25	>100	8,5
<i>Sodyum Sülfür (Beta)</i>	150	100	0,5
<i>Çinko-Klor</i>	100	50	0,85
<i>Çinko-Brom</i>	90	80	1,7
<i>Demir Redox</i>	85	20	1,0

FV sistemlerde MPPT tasarlanırken, optimizasyonu sağlanan güç yalnızca yükte kullanılmaz. Sistemdeki aküler de MPPT çıkışındaki bu güç ile şarj edilirler. Akü şarj girişi ile FV panelin çıkış gücü arasındaki güç farkını ortadan kaldırmak için de MPPT devreleri kullanılır. Bu devrelerin FV sistem içindeki yerleri Şekil 2.15' de gösterilmiştir [Femia, 2004].



Şekil 2.15. MPPT' nin FV sisteme entegrasyonu

Şekil 2.16' da, panel çalışma geriliminin, akü geriliminin altında olduğu durumlarda kullanılabilecek bir MPPT devresi görülmektedir. Transistörün  $T_{ON}/T_{OFF}$  oranı değiştirilerek panel,  $V_B$ ' nin altında herhangi bir gerilimde çalıştırılabilir. Burada transistör anahtarlama modunda çalışır. Transistör "on" konumunda iken diyod ters kutuplanır. Panel akımı, L endüktansı ve transistör üzerinden akar. Bu periyod boyunca akım ve dolayısıyla depolanan enerji artar. Transistör "off" konumuna geldiğinde panel akımı, L endüktansı, D diyodu ve akü üzerinden akar. Bu periyod boyunca da  $V - V_{bat}$  arasındaki fark,  $i_L$  akımını azaltır [Hu ve White, 1983].



Şekil 2.16. MPPT devresi ( $V_{Panel} < V_{Akü}$ )

Şüphesiz burada amaç, ortalama panel akımını Maksimum Güç Noktasına göre ayarlamaktır. Normalde bir periyod boyunca  $P_{out} = P_{Aküye}$  aktarılan olmalıdır. Ama sistemde kayıpların da olduğu hesaba katılmalıdır.

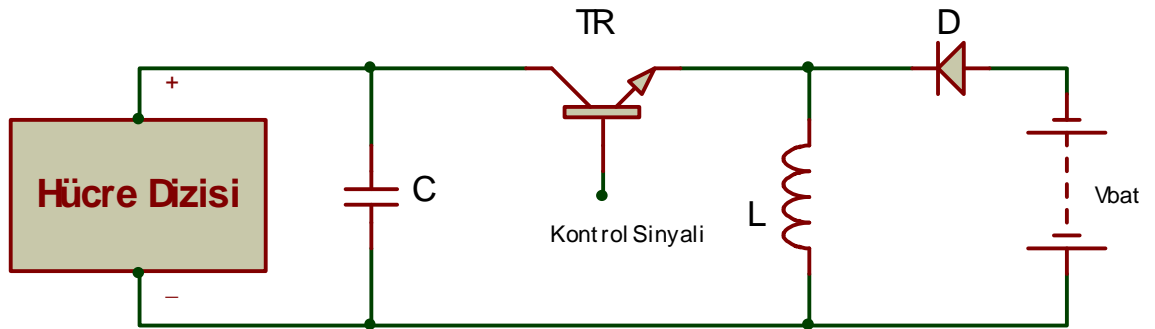
$$V \cdot I \cdot (T_{ON} + T_{OFF}) = V_B \cdot I \cdot T_{OFF} \quad (2.5)$$

$$V = \frac{T_{OFF}}{T_{ON} + T_{OFF}} \cdot V_B \quad (2.6)$$

Böylece panel, akü geriliminin altında herhangi bir değerde çalıştırılabilir. Bunun için  $T_{ON}/T_{OFF}$  oranını ayarlamak yeterlidir. Burada kullanılan transistörler 100 Amper akım ve 500 V gerilimde kullanılabilir. Daha yüksek güç kapasitesi için Tristör veya SCR kullanılmalıdır.

Şekil 2.17' deki devre ise panelin,  $V_B$ ' nin altında ve üstünde çalışmasına izin verir. Kullanılan C kondansatörü, yüksek değerdedir ve panel akım ve geriliminin, maksimum güç noktasında bozulmadan sabitlenmesi için eklenir.

Şekilden de görülebileceği gibi, burada da transistör anahtarlama modunda çalışmaktadır. Transistör “off” konumunda iken batarya devreden ayırır ve panel akımı, C kondansatörü üzerinden akarak onu doldurur. Transistör “off” konumuna getirildiğinde C kondansatörü panel akımını destekleyecek ve toplam akım transistör ve L üzerinden bataryayı dolduracaktır. Denklem 2.17' de görüldüğü gibi, Şekil 2.17' de verilen devre, transistörün girişini kontrol ederek akü geriliminin panel geriliminden yüksek veya düşük olduğu durumlarda kullanılabilir.



Şekil 2.17. MPPT devresi ( $V_{Panel} > V_{Akü}$  veya  $V_{Panel} < V_{Akü}$ )

$$V = \frac{T_{OFF}}{T_{ON}} \cdot V_B \quad (2.7)$$

#### 2.4. FV Sistemlerin Kullanım Alanları

Günümüzde FV enerji, kısıtlamasız hemen her alanda kendine yer edinmiş durumdadır. İnşaat, tıp, iletişim, tarım, aydınlatma, trafik gibi farklı alanlarda kullanılabilir. Bireysel olarak konutlarda kullanımı yaygınlaşmıştır. Büyük gökdelenlerde, iş merkezlerinde, sitelerde kullanılabilirliği sayesinde, nispeten yüksek sistem maliyeti olmasına rağmen talep görmeye devam etmektedir. Yarı-iletken Polimer çalışmalarının ilerlemesiyle verimi yüksek, maliyeti düşük FV

sistemler gerçekleştirilebilecektir. Polimerle kaplı bir bina, üretimi yerinde yaptığından, barajlara ve pahalı nakil hatlarına ihtiyaç duymadan kendi enerjisini üretebilecektir [Anderson, 1995].

Esnek bir şekilde tasarlanmış PV sistemler, içme suyu ve sulama için suyun pompalanması; telekomünikasyon araçları, lamba, televizyon, video aletleri gibi evsel aletlerin elektrik enerjisi ile beslenmesi ve kırsal alandaki sağlık kliniklerinde aşı maddesi taşıyan hareketli soğutucular gibi farklı mekanlarda da gittikçe büyüyen bir pazar alanı bulmaktadır. Alternatif kullanım için oldukça uygun olan FV sistemler geleceğin enerji sistemleri olarak görülmektedir.

## **2.5. Türkiye ve Dünyada FV Enerji**

Son yıllarda fosil yakıt rezervlerinin tükenebilirliğinin ve kullanımının çevreye telafi edilemez zararlar verdiği anlaşılmaya sebebiyle, temiz enerjiye olan ilgi ve ihtiyaç tüm dünyada artma eğilimindedir. Bu durum FV sektöründe de farklı değildir. Başta Amerika Birleşik Devletleri, Japonya, Almanya ve Hollanda olmak üzere, pek çok ülke, bu eğilimi fark etmiş ve ülke çapında çalışmalar yapmışlardır. Bu ülkeler, halkı teşvik etmek amacıyla sistem maliyetlerinin büyük kısmını üstlenerek teknolojinin gelişimine destek olmaktadır.

Avrupa Birliği ülkeleri, dünyadaki en büyük FV enerji büyüme oranına sahiptir. 1990-2002 Yılları arasında % 29 (1990:17 GWh-2002:361 GWh) oranında FV enerji artışı göstermiştir. Avrupa Birliği ülkeleri içinde ise % 54,7 (1990:1 GWh-2002:188 GWh) ile Almanya başı çekmektedir. Hollanda 2020 yılına kadar 500 000 adet güneş enerjili evin yapımını destekleyeceğini açıklamıştır. Japonya' nın 2010 yılı hedefi 4600 MW olarak açıklanmıştır. Tüm bu yatırımlar, temiz enerjinin, dünya üzerindeki toplam gücün % 4' üne ulaşmasını sağlayacaktır [IEA, 2004].

Türkiye ise, coğrafi konumu nedeniyle sahip olduğu güneş enerjisi potansiyeli açısından birçok ülkeye göre oldukça şanslı durumdadır. Ancak teknik ve hukuki sorunlardan dolayı gelişme kaydedilememiştir. FV sistemi oluşturan ekipmanların

yurtiçi üretiminin olmaması ve ithal malların yurtiçi piyasada pahalıya satılması sektörün ilerlemesini yavaşlatmaktadır. Çizelge 2.2, Türkiye’ de yenilenebilir enerjinin yıllara göre dağılımını göstermektedir [IEA, 2004].

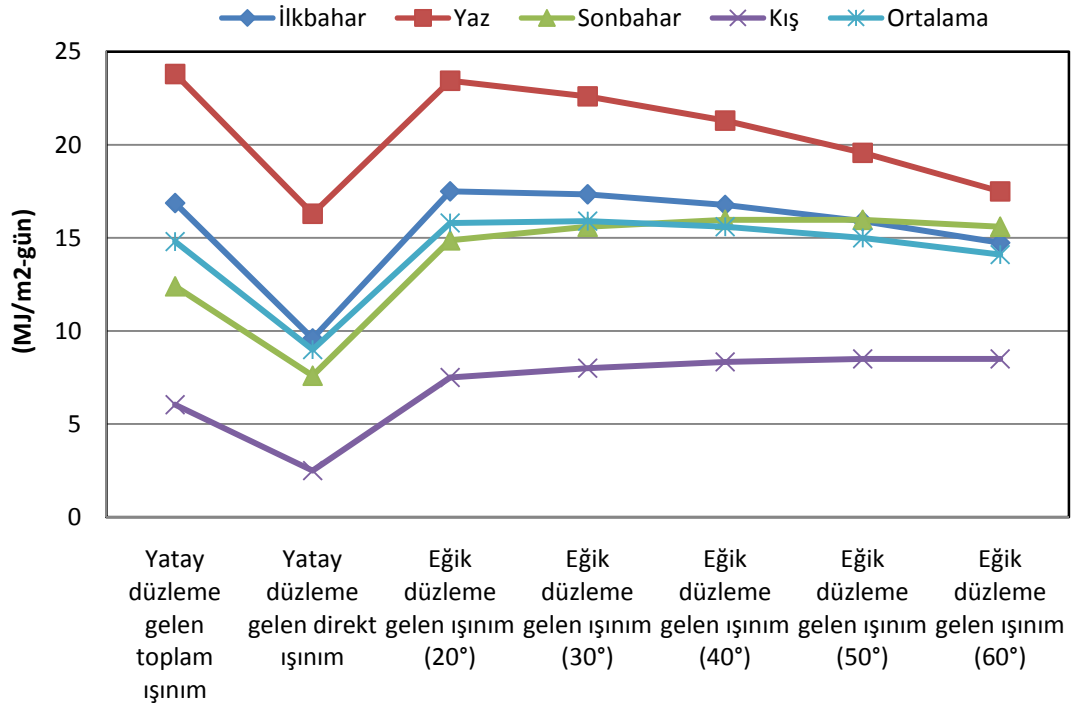
Çizelge 2.2. Türkiye yenilenebilir enerji gelişimi

	1990	1995	2000	2001	2002	2003	90-02 (%)
Nüfus (Milyon)	56,2	61,65	67,46	68,61	69,67	70,21	1,8
Toplam Elektrik Enerjisi Üretimi (TWs)	57,5	86,2	124,9	122,7	129,4	140,3	7,0
Yenilenebilir Enerji Üretimi (TWs)	23,23	35,85	31,15	24,30	33,97	35,53	3,2
Yenilenebilir Enerji/ Toplam Elektrik Enerjisi Üretimi	40,4	41,16	24,9	19,8	26,2	25,3	-3,5
Toplam yenilenebilir enerji üretim kapasitesi (MW)	6782	9895	11307	11805	12378	...	5,1

Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü (DMİ) verilerine dayanarak Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİE) tarafından yapılan çalışmalara göre, Türkiye’ nin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2640 saat (günlük toplam 7,2 saat), ortalama toplam ışıyım şiddeti 1311 kWh/m<sup>2</sup>-yıl (günlük toplam 3,6 kWh/m<sup>2</sup>)’ dir [Renewables Information, 2004].

Şekil 2.18’ de ise farklı mevsimlerde Ankara iline ait yatay ve eğik düzleme gelen ışıyım değerleri görülmektedir [ISISAN, 2003]. Elde edilen değerler, Dünya üzerindeki pek çok ülkede yapılan ölçümlerle kıyaslandığında, Türkiye’ nin nispeten güneyinde olmayan ve az güneş alan Ankara gibi şehirlerinde bile yeterli FV enerji kapasitesi olduğunu göstermektedir. Bu durum Türkiye’ de FV sistem çalışmalarına önem verilmesi gerektiğinin bir kanıtı olmaktadır.





Şekil 2.18. Ankara güneş enerji potansiyeli, güneşlenme süresi ve ışınım değerleri

## 2.6. Maksimum Güç Noktası Takibi (MPPT)

FV sistemlerin uygulamalarında, üç tip elektronik kontrol ünitesi kullanılmaktadır: Maksimum Güç Noktası Takipçileri (MPPT), Sabit Voltaj Takipçileri (CVT) ve Lineer Akım Güçlendiricileri (LCB).

Maksimum güç noktası takibi ile panel takibi (panel tracking) birbirine çok karıştırılan ama temelden farklı olaylardır. Panel takibi mekanik bir sistemdir. MPPT, mekanik bir takip sistemi değildir. Akım ve gerilim optimizasyonu sağlayarak, panelin ürettiği gücün maksimizasyonunu sağlayan, elektrikselsel çalışma noktası değişken olan ve yüke göre maksimum güç üretebilen tamamıyla elektronik bir sistemdir. Panel takibinde, maksimum güneş ışığı için güneşi takip ederek çıkış maksimizasyonu sağlanırken, MPPT' de, var olan ışığı kullanarak güç noktası maksimize edilmektedir.

MPPT' nin çalışma mantığının anlaşılması için öncelikle geleneksel şarj kontrol ünitelerinin anlaşılması gerekmektedir. Klasik bir kontrolcü boş bataryayı şarj ederken, modülleri direkt olarak bataryaya bağlar. Bu işlem modülleri batarya geriliminde çalışmaya zorlar. Modülü direkt olarak bataryaya bağlamaktan ziyade, daha verimli olan MPPT sistemler, maksimum güç üretebileceği gerilim değerini hesaplar. 20-80 kHz yüksek frekansta çalışan DC/DC Güç Converter' i olarak çalışırlar. FV panel çıkışındaki DC gerilimi alarak yüksek frekans AC' ye çevirir ve daha sonra istenen DC değerine çevirirler. Yüksek frekans aralığı sayesinde, çok yüksek verimli çeviriciler, küçük boyutlu elemanlarla tasarlanabilmektedir. Bu durum da fiziksel bir avantaj olarak karşımıza çıkmaktadır.

### **2.6.1. I-V ve P-V karakteristikleri**

FV güneş pillerinden oluşan bir panelin, farklı ışık ve sıcaklık seviyeleri için elde edilen I-V ve P-V karakteristiklerinden maksimum güç noktaları elde edilebilmektedir. Bu bölümde bir FV sistemin maksimum güç noktasında çalıştırılabilmesi için gerekli yöntemler anlatılmış ve verim arttırmaya yönelik bu metotlardan elde edilen bir metot dördüncü bölümde simülasyon ortamına aktarılarak ispatı yapılmıştır.

FV piller için kullanılan ve ayrıntılı bilgi içeren iki önemli parametre, I-V ve P-V karakteristikleridir. Pillerin seri veya paralel olarak bağlanmaları sonucunda elde edilen panellerin I-V ve P-V karakteristikleri, ışık şiddetine ve çalışma sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir. FV sistemler maliyeti pahalı, verimi nispeten düşük sistemler olduğundan bu iki parametreye özellikle dikkat edilmeli ve verime olan etkileri dikkatle incelenmelidir.

FV panelin maksimum güçte çalıştırılabilmesi için panelin değişen ışık seviyesi ve çalışma sıcaklıklarına karşılık düşen maksimum gücünün belirlenmesi, çalışma gücünün bu maksimum güç seviyesinde tutulması gerekir. Denetleyiciler veya uygun yazılımlar kullanılarak, panelin maksimum çıkış gücü izlenebilir ve panel bu güçte çalıştırılabilir. Ancak izlenebilmeleri için, bu maksimum güç noktalarının değişik

ışık seviyeleri ve sıcaklıklara karşılık düşen değerlerinin bilinmesi gerekir. Bu maksimum güç noktalarının belirlenmesi, ya daha önceden ya da o anda denetim sırasında yapılabilir.

Bahsedilen parametrelerin çıkış gücü üzerindeki olumsuz etkileri farklı teknikler kullanılarak giderilebilmektedir. Genellikle kullanılan yöntemler; güneş takip sistemleri ve yansıtıcılar kullanarak ışık şiddetini maksimum seviyesine getirerek kontrol altına almaktır. Ayrıca farklı fiziksel teknikler kullanılarak, panel sıcaklığı, kirlilik düzeyi gibi çıkış gerilimini doğrudan etkileyen faktörlerin kontrolü de mümkündür.

Yöntem olarak bir FV panelde maksimum güç noktasının belirlenmesi, panelin çıkış gücünün maksimuma getirilmesiyle mümkündür. Bu da, çalışma gücü  $P_Q$  ile referans olarak belirlenen maksimum güç  $P_{\max\text{-ref}}$  arasındaki farkın, denetleyiciler kullanarak minimize edilmesi veya sıfıra indirgenmesiyle mümkündür.  $P_{\max\text{-ref}}$  değeri farklı çalışma sıcaklığı ve ışık şiddeti seviyelerine bağlı olarak ya önceden belirlenmeli ya da hesaplama ve ölçüm sırasında anlık olarak hesaplanarak bulunmalıdır [Altaş, 1998].

İleriki bölümlerde  $P_{\max\text{-ref}}$  değerinin bulunması için kullanılan bazı yöntemler açıklanmıştır.

FV sistemler ve MPPT üzerine, farklı araştırmacılar tarafından önerilen farklı modeller vardır. Bu modellerden en yaygını, 1972 yılında Loferski tarafından önerilmiştir. Aşağıda, Şekil 2.13' deki statik modele göre Loferski tarafından önerilen 5 parametrelili ( $I_{FV}$ ,  $I_0$ ,  $R_S$ ,  $R_{SH}$ ,  $V_T$ ) bağıntı verilmiştir [Fıratoglu ve Yeşilata, 2003].

$$I_{pil} = I_{FV} - I_D - I_{SH} = I_{FV} - I_0 \cdot \left( e^{\frac{q}{k \cdot T_{pil}}(V_{pil} + R_S \cdot I_{pil})} - 1 \right) - \frac{V_{pil} + R_S \cdot I_{pil}}{R_{SH}} \quad (2.8)$$

$I_{pil}$ : Yüke aktarılan FV pil çıkış akımı [Amper]

$I_{FV}$ : Sıcaklık ve güneş ışığı parametrelerinin etkisindeki panel akımı [Amper]

$I_D$ : Diyod akımı [Amper]

$I_{SH}$ :  $R_{SH}$  üzerinden akan akım [Amper]

$I_0$ : Ters doyum akımı [Amper]

$V_{pil}$ : FV pil çıkış gerilimi [Volt]

$k$ : Boltzmann sabiti ( $1,380622 \times 10^{-23}$  Joule/°Kelvin)

$q$ : Elektron yükü ( $1,6021917 \times 10^{-19}$  Colomb)

$R_S$ : Seri direnç eşdeğeri [ $\Omega$ ] ( $< 0,5 \Omega$  olmalıdır)

$R_{SH}$ : Paralel direnç eşdeğeri [ $\Omega$ ] ( $> 500 \Omega$  olmalıdır)

İleriki yıllarda, FV panellerin katalog bilgileri, söz konusu 5 parametreyi karşılamaya yetmediğinden ve  $R_{SH} \gg R_S$  olduğundan, Townsend, Eckstein ve Al-İbrahim tarafından denklemin son kısmı ihmal edilmiş ve 4 parametrelili ( $I_{FV}$ ,  $I_0$ ,  $R_S$ ,  $V_T$ ) model geliştirilmiştir. Bu modele göre oluşturulan yeni bağıntı Denklem 2.9' da gösterilmiştir.

$$I_{pil} = I_{FV} - I_D - I_{SH} = I_{FV} - I_0 \left( e^{\frac{q}{k \cdot T_{pil}} (V_{pil} + R_S \cdot I_{pil})} - 1 \right) \quad (2.9)$$

FV sistemlerde I-V karakteristiği belirlenirken akım yerine gerilim denklemi üzerinden gitmek kolaylık sağlamaktadır. Aşağıdaki denklem, akım denkleminde  $V_{pil}$  gerilim değerinin çekilmesiyle elde edilmiştir.

$$V_{pil} = \frac{A \cdot k \cdot T_{pil}}{q} \cdot \ln \left( \frac{I_{FV} + I_0 - I_{pil}}{I_0} \right) - R_S \cdot I_{pil} \quad (2.10)$$

Denklemden,  $V_T = (k \cdot T) / q$  değeri oda sıcaklığında (300 °K) 26 mV olarak alınır. Verilen A katsayısı, modellemenin, pratikte elde edilen I-V karakteristiğine uygun sonuç vermesi için belirlenen “Eğri Uydurma Faktörü” dür. Deneme yanılma yoluyla veya farklı algoritmalarla hesaplanabilmektedir.

Denklemlerde geçen  $I_0$  akımı; sıcaklıkla artar, malzeme kalitesiyle de azalır.  $I_0$  akımının değeri Denklem 2.11 ile hesaplanabilir. Buradan, her 10 °C' lik sıcaklık artışında,  $I_0$  akımının 2 katına çıktığı görülmektedir.

$$I_{02} = I_{01} \cdot 2^{\frac{\Delta T}{10}} \quad (2.11)$$

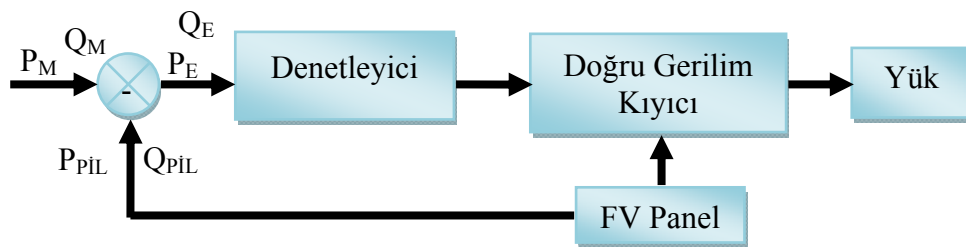
FV sistemlerin I-V karakteristiği, Denklem 2.10 kullanılarak belirlenebilir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, söz konusu denklemin sabit sıcaklık ve güneş ışığı altında kullanılabilmesidir. Verilen  $V_{pil}$  denklemi sıcaklık ve güneş ışığının değişmediği kabul edilerek yapılan modellemelerde kullanılabilir bir denklemdir. Oysa FV sistemler kullanım alanları itibariyle sürekli değişen çevre koşullarına maruz kalırlar. Özellikle, belirtilen iki parametre, FV panelin çıkış gücü üzerinde ihmal edilemeyecek seviyelerde değişime neden olur. Bu sebeple sistem üzerinde modelleme yaparken sıcaklık ve güneş ışığının etkileri de hesaba katılmalıdır.

İleriki bölümlerde açıklanacağı gibi, bir FV pil ya da panelinin  $P_m$  değeri, üzerine gelen ışık şiddeti seviyesi ve çalışma sıcaklığına bağlı olarak değişir. Dolayısıyla kurulan ve işletilen bir FV panelden daha verimli bir şekilde faydalanmak için, o panelin çıkış gücünün mümkün olan maksimum değerinde çalıştırılması gerekir. Çalışma sıcaklığı ya da ışık şiddeti değiştikçe, bu karakteristiklerin biçimleri aynı kalacak şekilde akım, gerilim ve dolayısıyla güç değerleri de değişir.

FV sistemlerde çıkışa bağlı yük, genellikle sabit bir güce ihtiyaç duymaktadır. Kullanılan FV panellerin ürettiği çıkış gücünün gerekenden fazla olması durumunda yükü artırarak veya fazla gücü depolayarak çözüm üretilebilir. Ters durumda ise gerekli ek güç, aküler yardımıyla karşılanabilir veya yükte indirimle gidilebilir. Sonuç olarak, her iki durumda da çıkışın maksimumda tutulması ihtiyacı vardır. Ancak yükün her zaman sabit olacağını düşünmek yanlış olur. Elektriksel bir sistemde değişken yük göz ardı edilmemesi gereken bir parametredir. FV sistemlerde de yük üzerindeki değişimlerin giderilmesi için DC-DC Converter yapıları kullanılmaktadır.

### 2.6.2. FV panelin maksimum güç noktasında çalıştırılması

FV güneş paneli, daha önce de belirtildiği gibi, üretebildiği maksimum gücü çıkışından alınacak şekilde tasarlanarak, maliyeti azaltılıp, çalışma verimi yüksek tutulur. Bir FV pili maksimum güç noktasında çalıştırabilmek için, bu maksimum gücün belirlenerek referans alınması gerekir. Bir sonraki bölümde, FV güneş pilinin maksimum güç noktası ile ilişkili değerleri olan, FV güneş pilinin maksimum gücü  $P_m$ , maksimum gücüne karşılık gelen akımı  $I_m$  ve gerilimi  $V_m$ ' nin değişen sıcaklık ve ışık seviyeleri için nasıl belirlenebileceği ayrıntılı biçimde verilmektedir. Değişen sıcaklık ve ışık seviyeleri için her an belirlenen maksimum güç noktası değerleri, FV pilin o andaki çalışma gücü  $P_Q$ , çalışma akımı  $I_Q$  ve çalışma gerilimi  $V_Q$  ile karşılaştırılarak denetleyiciler tarafından kompanze edilecek olan maksimum güç noktası hata işaretleri elde edilir. Böyle bir denetim sisteminin blok diyagramı Şekil 2.19' da görülmektedir. Burada, o andaki  $P_m$ , yine o andaki  $P_Q$  çalışma gücü ile karşılaştırmakta ve aradaki fark bir doğru gerilim kısıyıcısının iletim periyotlarının belirlenmesi amacıyla denetleyici tarafından kullanılmaktadır. Eğer  $P_m$  ile  $P_Q$  birbirlerine eşit değilse, denetim sistemi kısıyıcının iletim periyodunu azaltıp artırarak aradaki farkı minimuma indirir. Böyle bir sistemde, kısıyıcının iletim periyodunu ayarlamak suretiyle yüke uygulanan gerilimin genliği, dolayısıyla yükün FV pil panelinden çektiği akım ayarlanmış olur. Yük akımı ile FV panelin akımı aynı olduğundan, uygulanan gerilimin ayarlanmasıyla yük akımı, FV panelin maksimum gücüne karşılık gelen akım değerinde kalmaya zorlanır. FV panelinin  $P_Q$  çalışma gücü, panelin çalışma akımı  $I_Q$  ile bu akıma karşılık gelen çıkış geriliminin çarpılması sonucu belirlenip,  $P_m$  ile kıyaslanır [Altaş, 1998].



Şekil 2.19. FV güneş pili paneli MPP denetim blok diyagramı

FV güneş pilinin maksimum güç noktası değerlerini izlemek için kullanılan denetim sistemlerinde genellikle maksimum güç noktası değerlerine karşılık gelen  $P_m$ ,  $I_m$  ve  $V_m$  referans giriş olarak alınır. Ancak bu değerler sürekli olarak sıcaklık ve ışık seviyelerine bağlı olarak değiştikleri için, sistemi doğrusallıktan uzaklaştırıp denetim işlemini güçleştirir. Bu durum, bulanık mantık tabanlı denetim için bir problem teşkil etmezken, özellikle klasik denetim sistemlerinde kararsızlığa yol açar. Bu sebeptendir ki, MPPT sistemleri inceleyen ve kullananlar, bulanık mantık uygulamalarını da kullanarak sistemin doğruluğunu ve güvenilirliğini artırır.

### 2.6.3. $P_{\max\text{-ref}}$ belirleme yöntemleri

FV sistemlerde, panellerin maksimum güç noktası değerinin belirlenebilmesi için kullanılan yöntemler farklı olmakla beraber, kullandıkları temel mantık aynıdır. Farklı sıcaklık ve ışık şiddeti değerleri için, önceden hesaplanmış veya ölçülmüş olan maksimum güç noktası değerlerinin bulunduğu çizelge veya tablolar kullanılarak bir FV pil modeli oluşturularak  $P_{\max\text{-ref}}$  değerleri bulunabileceği gibi, sıcaklık ve ışık şiddeti değerlerine bakılmaksızın maksimum güç noktasını bulmayı amaçlayan algoritmalar da kullanılabilir.

Çizelge 2.3' de, günümüzde kullanılan MPPT metotları gösterilmiştir. Bu metotlardan bazıları FV sistem uygulamalarında sıklıkla kullanılırken, bazıları sadece deneysel amaçlı kullanılmaktadır [Esrām ve Chapman, 2007].

Bu çalışmada, Çizelge 2.3' de ilk iki sırada özellikleri verilen P&O ve IncCond metotları incelenmiş ve karma bir metot simülasyon ortamına aktarılmıştır.

Çizelge 2.3 MPPT sistemleri tablosu

MPPT Teknikleri	FV Diziye Bağımlılık	Doğru MPPT	Analog Dijital	Periyodik Ayar	Yakınsama Hızı	Uyarlama Karmaşıklığı	Parametreler
<b>P&amp;O</b>	-	+	D/A	-	Değişken	Düşük	Gerilim, akım
<b>IncCond</b>	-	+	Dijital	-	Değişken	Orta	Gerilim, akım
<b>Fractional Voc</b>	+	-	D/A	+	Orta	Düşük	Gerilim
<b>Fractional Isc</b>	+	-	D/A	+	Orta	Orta	Akım
<b>Fuzzy Logic</b>	+	+	Dijital	+	Hızlı	Yüksek	Değişken
<b>Neural Network</b>	+	+	Dijital	+	Hızlı	Yüksek	Değişken
<b>RCC</b>	-	+	Analog	-	Hızlı	Düşük	Gerilim, akım
<b>Current Sweep</b>	+	+	Dijital	+	Yavaş	Yüksek	Gerilim, akım
<b>DC Link Capacitor Droop Control</b>	-	-	D/A	-	Orta	Düşük	Gerilim
<b>Load I or V Maximization</b>	-	-	Analog	-	Hızlı	Düşük	Gerilim, akım
<b>dP/dV or dP/dI Feedback Control</b>	-	+	Dijital	-	Hızlı	Orta	Gerilim, akım
<b>Array Reconfiguration</b>	+	-	Dijital	+	Yavaş	Yüksek	Gerilim, akım
<b>Linear current Control</b>	+	-	Dijital	+	Hızlı	Orta	Işık
<b>I<sub>MPP</sub> &amp; V<sub>MPP</sub> Computation</b>	+	+	Dijital	+	N/A	Orta	Işık, Sıcaklık
<b>State-based MPPT</b>	+	+	D/A	+	Hızlı	Yüksek	Gerilim, akım
<b>OCC MPPT</b>	+	-	D/A	+	Hızlı	Orta	Akım
<b>BFV</b>	+	-	D/A	+	N/A	Düşük	-
<b>LRCM</b>	+	-	Dijital	+	N/A	Yüksek	Gerilim, akım
<b>Slide Control</b>	-	+	Dijital	-	Hızlı	Orta	Gerilim, akım

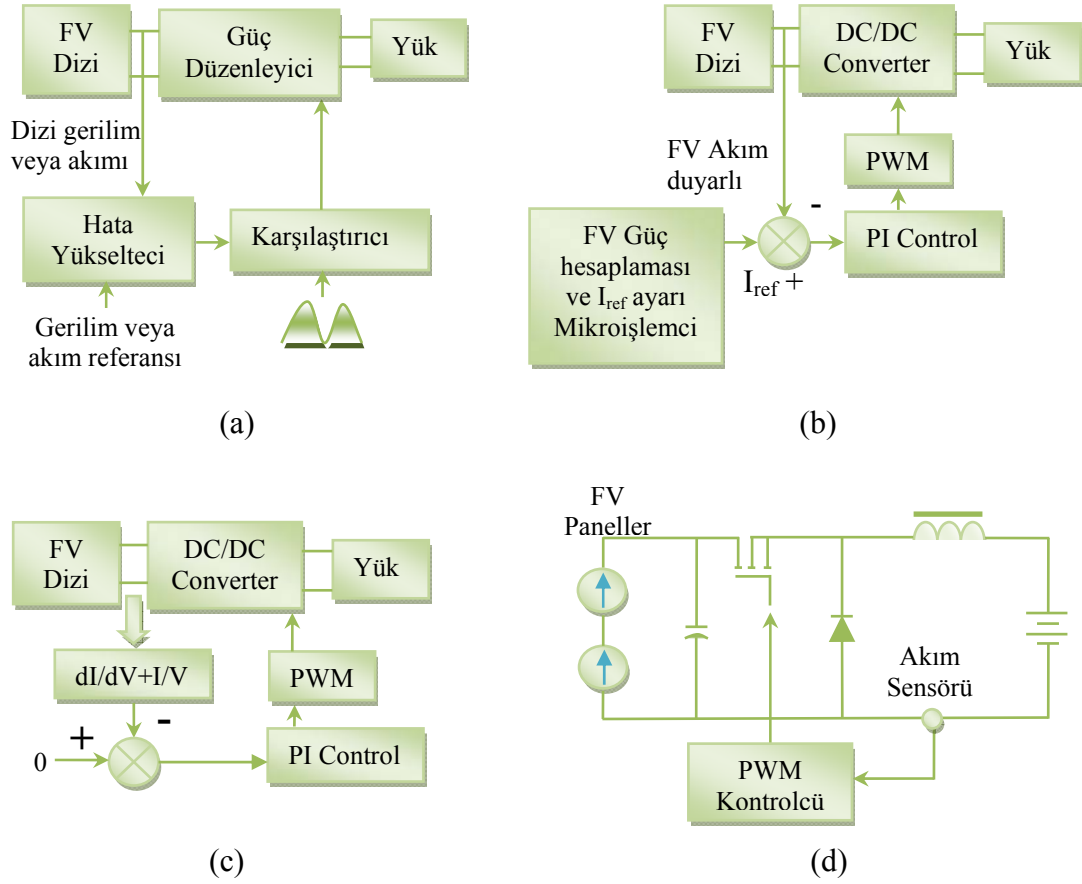


Şekil 2.20' de MPPT sistemler için önerilen ve en çok kullanılan kontrol sistemlerinden bazıları gösterilmiştir. Şekil 2.20.a, en basit kontrol metodu olan sabit gerilim veya akım referanslı MPPT kontrol sistemidir. Bu metot, panel gerilimini düzenleyip sabit bir gerilimle karşılaştırarak diziyi maksimum güç noktası civarında tutmaktadır. Algoritma, ışık şiddeti ve sıcaklık değerlerini hesaba katmamakta ve sabit referans gerilim değerinin, gerçek maksimum güç noktası için yeterli bir yaklaşım olduğunu varsaymaktadır. FV panele ışık şiddeti ve sıcaklığın etkilerini ihmal etmesine rağmen, özellikle düşük ışık şiddeti altında hem P&O hem de IncCond metotlarından daha verimli olmaktadır [Yu, 2002].

Şekil 2.20.b, akım referanslı MPPT kontrol sistemidir. Mikroişlemci ile kontrol edilen referans akım değeri, FV panel akımıyla toplanır. Kontrol mekanizmasıyla (PI önerilmektedir) PWM (Pulse Width Modulation-Darbe Genişlik Modülasyonu) işlemi gerçekleştirilir ve Converter üzerinden ayarlama yapılır.

Şekil 2.20.c, Artımlı Geçiş (Incremental Conductance-IncCond) Metodu kontrol diyagramını göstermektedir. Bu metodun ayrıntıları ileriki bölümlerde verilmiştir.

Şekil 2.20.d ise, ileri beslemeli (Feed-Forward) MPPT kontrol sistemi blok diyagramını göstermektedir. 55 Watt gücünde iki panelin kullanıldığı sistemde, akım sensöründen gelen bilgi ile PWM yapılarak, FET üzerinden akım kontrolü sağlanmaktadır [Koutroulis, 2001].



Şekil 2.20. MPPT Kontrol Sistemleri

- a. Sabit akım veya gerilim referanslı MPPT, b. Akım referanslı MPPT, c. Artımlı geçiş kontrol metodu, d. İleri beslemeli MPPT.

### Değişim ve Gözlem (Perturbation & Observation-P&O) Metodu

MPPT metot ve algoritmaları ile ilgili yapılan araştırma ve çalışmaların çoğu P&O Metodu ile ilgili olmaktadır. Bu çalışmada da, bu metot ayrıntılarıyla incelenmiş ve Labview ortamına aktarılan simülasyonun gövdesini oluşturmuştur.

Bu yöntemde; sıcaklık ve güneş ışığı seviyelerinin arka arkaya ölçülen iki değeri arasındaki farka göre hesaplanan güç değerleri karşılaştırılmaktadır. Ölçüm sonucu belirlenen fark, kabul edilebilir bir değerden fazla olursa, FV pilin I-V karakteristiğini temsil eden karakteristik model denklemi simule edilerek, yeni sıcaklık ve ışık şiddeti seviyeleri için yeni bir  $P_m$  noktası hesaplanır.

Yaklaşık 0 değerinden başlanarak,  $P_m$  elde edilene kadar FV pilin akım değeri azar azar artırılır. Artırma işlemi sırasında, pilin gücü sürekli hesaplanarak bir önceki değerlerle karşılaştırılır. Güç değeri bir önceki ölçülen değerden küçük olduğu zaman işlem sonlandırılır ve bir önceki adımda hesaplanan güç değeri o andaki sıcaklık ve güneş ışını seviyelerine ilişkin yeni  $P_m$  olur. Normal olarak bu değere karşılık gelen  $I_m$  ve  $V_m$  değerleri de yeni akım ve gerilim değerleri olacaktır. Bu değerler elde edilince, sıcaklık ve güneş ışını parametreleri  $T_x$  ve  $S_x$ , yeni döngünün başlangıç değerleri  $T_{x0}$  ve  $S_{x0}$  olarak atanır [Femia, 2004].

FV sistemlerin P-V veya P-I karakteristiklerinden de anlaşılacağı gibi; gerilimdeki artma (azalma), maksimum güç noktasının solunda güçte de bir artma (azalma), sağında ise güçte bir azalma (artma) meydana getirmektedir. Sonuç olarak, eğer güçte bir artış varsa, maksimum güç noktasına ulaşmak için, bir sonraki güç değeri tutulmalı, eğer güçte bir azalma varsa, değişim tersine çevrilmelidir. Bu durum Çizelge 2.4' de görülmektedir.

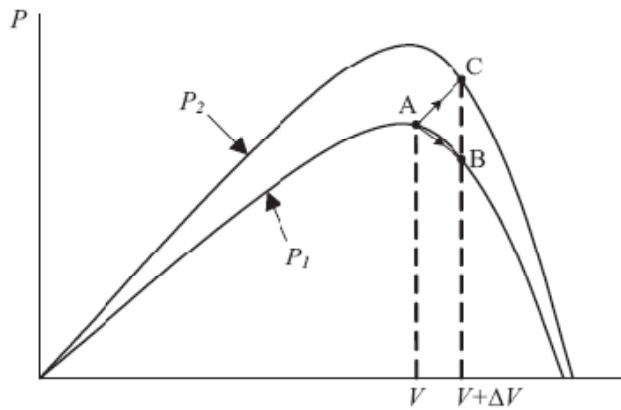
Çizelge 2.4. P&O metodu değişim tablosu

P(t)	Güçteki değişim	P(t+1)
+	+	+
+	-	-
-	+	-
-	-	+

Buradan da anlaşılacağı gibi algoritma, sürekli olarak sıcaklık ve güneş ışığı parametrelerini takip etmek zorundadır. Sisteme etki eden sıcaklık ve ışık şiddeti sıklıkla değişiyorsa, maksimum güç noktası algoritmasının neden olduğu gecikme artarak sistemin kararlılığını olumsuz yönde etkiler ve maksimum güç noktasının bulunmasında hata oluşur. Bu durum Şekil 2.21' de gösterilmiştir. Sistem, A çalışma noktasında iken atmosferik şartların sabit olduğu kabul edilirse, panel gerilimindeki değişim miktarı  $\Delta V$ , çalışma noktasını B' ye getirecek ve bu değişim, güçteki azalma sebebiyle terslenecektir. Buna rağmen, ışık şiddetindeki artış, güç eğrisini tek bir örnekleme periyodu içinde  $P_1$ ' den  $P_2$ ' ye getirirse, çalışma noktası A' dan C' ye

kayar. Bu durum güç değerindeki artışı temsil eder ve değişim aynı tutulur. Sonuç olarak çalışma noktası, maksimum güç noktasından iraksar ve eğer ışık şiddeti artmaya devam ederse iraksamaya da devam eder. Bu durumu engellemek için farklı teknik ve yaklaşımlar önerilmektedir [Esrām ve Chapman, 2007]. Işık şiddetinde ani değişimler olması durumunda bile, iraksamayı engellemek için önerilen tekniklerin başında; karar vermeden önce gerçek güç noktasını, önceki 2 noktayla karşılaştırma işlemi yapan “3 Noktalı Ağırlık Tekniği” gelir. Bu işlem basitçe, yüksek örnekleme oranı kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir [Femia, 2004].

Bu metotta genellikle akım ve gerilim olmak üzere 2 farklı sensör gerekmesine rağmen, kullanılan güç çeviricinin özelliğine bağlı olarak yalnızca gerilim sensörü de kullanılabilir. Simülasyon ortamına aktarılan bu çalışmada da yalnızca gerilim değeri simüle edilerek gerekli hesaplamalar yapılmıştır.

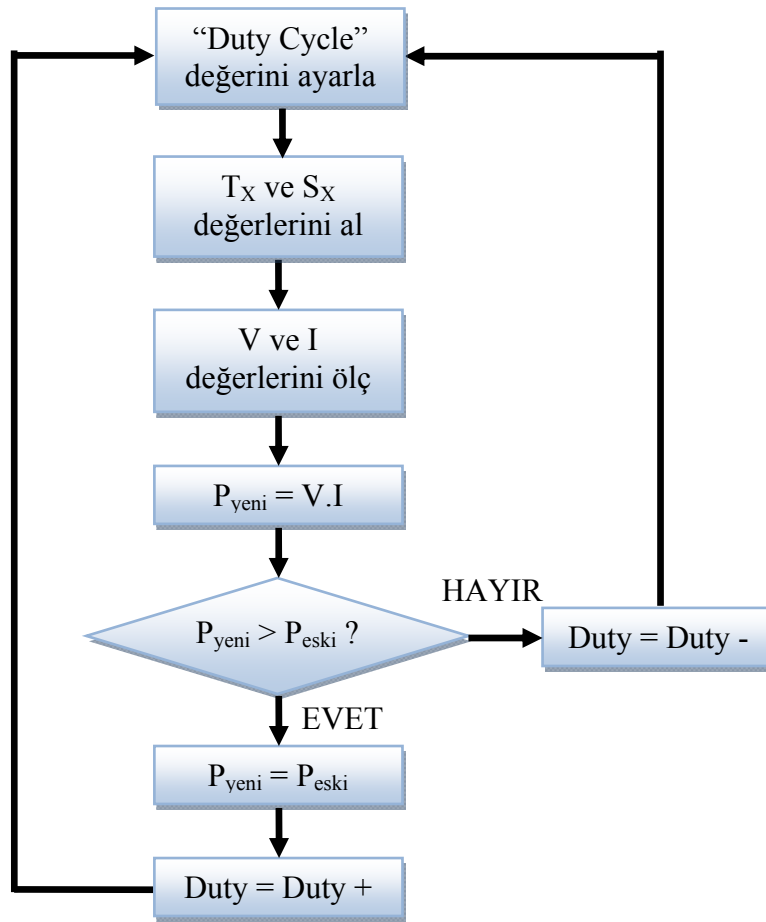


Şekil 2.21. P&O metodu algoritmasının maksimum güç noktasından iraksaması

Algoritmanın yapısı gereği, özellikle sabit veya yavaş değişen atmosfer şartlarında maksimum güç noktasına ulaşılması durumunda bile bir osilasyon olmakta ve algoritma bu durumda bile maksimum güç noktasına ulaşmaya çalışmaktadır. Bu durum, sistem üzerinde belirli güç kayıplarına sebep olur. Bu problem, algoritmanın geçmiş döngülerdeki verileri kontrol etmesiyle giderilebilir. Bu durumda maksimum güç noktasına ulaşırsa, algoritmanın değişim kısmı atlanır. Güç kaybını önlemenin diğer bir yolu da değişim aralığını azaltmaktır. Bu durumda da algoritmanın maksimum güç noktasını bulma hızı yavaşlayacaktır [Esrām ve Chapman, 2007].

Ancak, genellikle FV sistemlerde, söz konusu parametrelerde meydana gelen değişimler, sistemin ve kullanılan bilgisayarın elektriksel değişimlerinden çok daha yavaş olduğundan, kullanımı güvenli bir algoritmadır. Diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında daha basit bir yapıya sahip olması ve algoritma için gereken parametrelerin az olması da kullanılabilirliğini artırmaktadır [Yu, 2002].

Değişim ve Gözlem (Perturbation & Observation) Metodu algoritmasının blok şeması Şekil 2.22' de gösterilmiştir [Jiang, 2005].



Şekil 2.22. Değişim ve Gözlem (Perturbation & Observation) Metodu algoritması

### Artımsal İletkenlik (Incremental Conductance-IncCond) Metodu

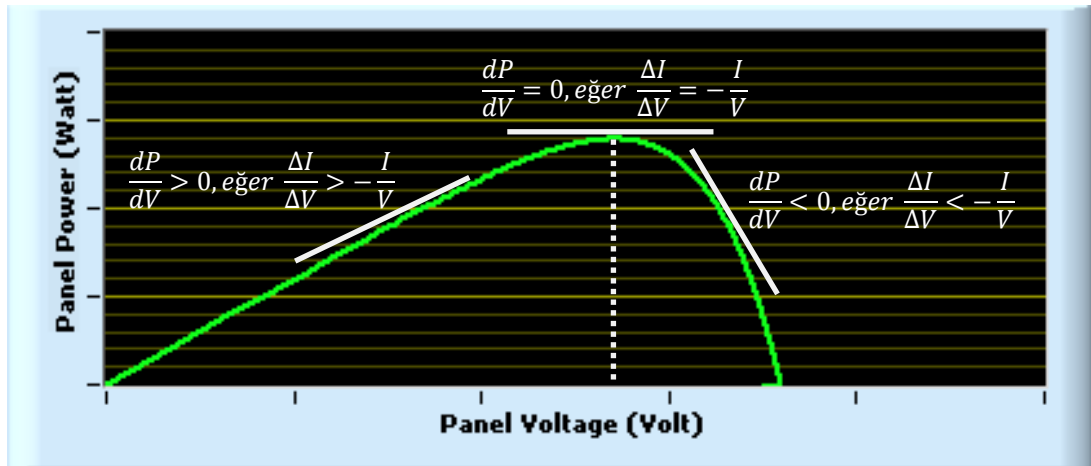
Bu yöntemde, P&O metodunun tersine, panel terminal gerilimi, daima  $V_m$  değerine göre değiştirilmektedir. Verimi daha yüksektir. Çünkü kullanılan algoritma, FV panel karakteristiklerinden bağımsız olmaktadır. Bir kez maksimum güç noktasına ulaştığında osilasyon yapmadığından, P&O metodunda olduğu gibi güç kayıpları da olmamaktadır. Hızlı değişen atmosferik koşullar altında da daha iyi verime sahip olması, IncCond metodunun daha geniş kullanım alanı bulmasını sağlamaktadır.

Şekil 2.23' de görüldüğü gibi; maksimum güç noktasının solunda gerilime bağlı olarak güç artmaktadır. Maksimum güç noktasının sağında ise, gerilime bağlı olarak güç değeri azalmaktadır. Bu durum matematiksel modelleme ile gösterilebilir [Esrām ve Chapman, 2007].

$$P = V \cdot I \quad (2.12)$$

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(I \cdot V)}{dV} = I + V \cdot \frac{dI}{dV} \cong I + V \cdot \frac{\Delta I}{\Delta V} = 0 \quad (2.13)$$

Bu durumda, artımsal iletkenlik, ifadenin sonundaki  $\Delta I/\Delta V$  değeridir.



Şekil 2.23. Artımsal İletkenlik algoritması güç-gerilim eğrisi

Genellikle kaynaktaki çıkış gerilimi pozitifdir. Denklem 2.13, I/V oranı artımsal iletkenlik değerinden büyük olduğunda, çalışma geriliminin maksimum güç noktasının altında olduğunu göstermektedir. Dikkat edilecek olursa bu ifadenin tersi de doğrudur. Dolayısıyla bu algorithmada yapılmaya çalışılan, I/V oranının, artımlı iletkenlik değerine eşit olduğu çalışma gerilimi değerini yakalamaktır. Bu durum aşağıdaki denklemlerde gösterilmiştir [Yusof, 2004].

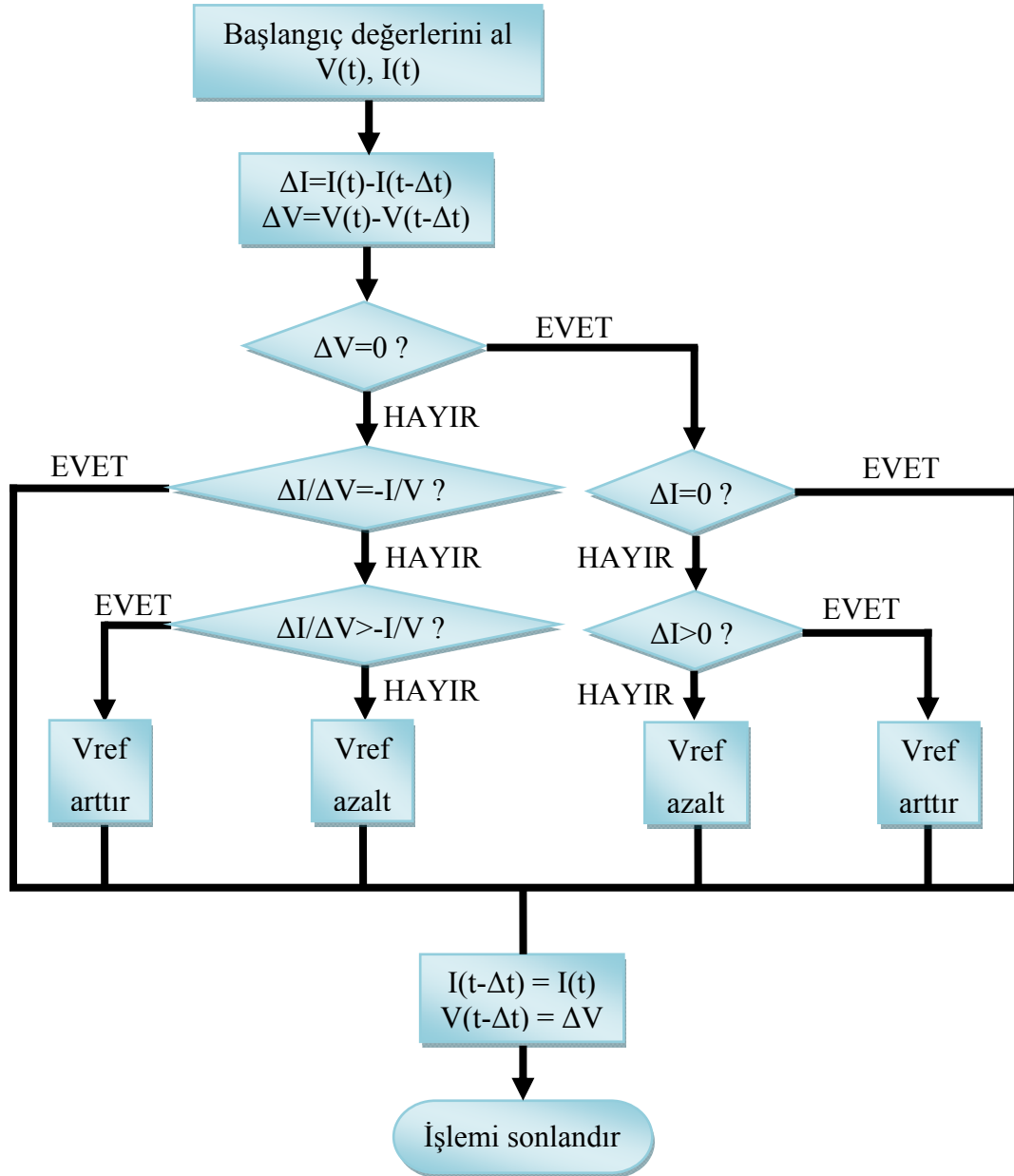
$$\frac{dP}{dV} > 0, \text{ eğer } \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V}, \quad MPP' \text{ nin solunda} \quad (2.14. a)$$

$$\frac{dP}{dV} = 0, \text{ eğer } \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V}, \quad MPP' \text{ de} \quad (2.14. b)$$

$$\frac{dP}{dV} < 0, \text{ eğer } \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V}, \quad MPP' \text{ nin sağında} \quad (2.14. c)$$

Böylece, anlık (sabit) iletkenlik (I/V) ile artımsal iletkenlik değeri ( $\Delta I/\Delta V$ ) karşılaştırılarak MPPT işlemi gerçekleştirilir. Şekil 2.24' de belirtilen  $V_{ref}$  değeri, FV dizinin çalışmaya zorlandığı referans gerilimi temsil etmektedir. Maksimum güç noktasında,  $V_{ref}$  değeri  $V_m$ ' a eşittir. Maksimum güç noktasına bir kez ulaşıldığında - eğer akım değerinde bir değişim olmazsa ve maksimum güç noktası değişmemişse- FV dizinin çalışma noktası korunur. Algoritma, yeni maksimum güç noktasını bulmak için  $V_{ref}$  değerini artırır veya azaltır. Buradaki değişim miktarı, MPPT' nin hızını belirlemektedir. Hızlı MPPT nispeten daha büyük artışlarla elde edilebilmektedir. Atmosferik şartlara bağlı olarak akım değerinde meydana gelen bir değişimde, tüm süreç yeniden başlar. Ancak sistem tam olarak maksimum güç noktasına ulaşamayabilir ve bunun yerine tepe noktasına yakın osilasyon yaparak kayba neden olur. Bu durumu engellemek için 2 aşamalı teknikler önerilmektedir. İlk aşamada çalışma noktası, maksimum güç noktasına olabildiğince yaklaştırılır. İkinci aşamada ise IncCond metodu kullanılarak MPPT işlemi tam olarak gerçekleştirilir. Bu 2 aşamalı çözüm, çoklu yerel maksimum durumlarında da yüksek verimli çözüm sağlamaktadır [Esrar ve Chapman, 2007].

Şekil 2.24' de IncCond metodu algoritması görülmektedir.

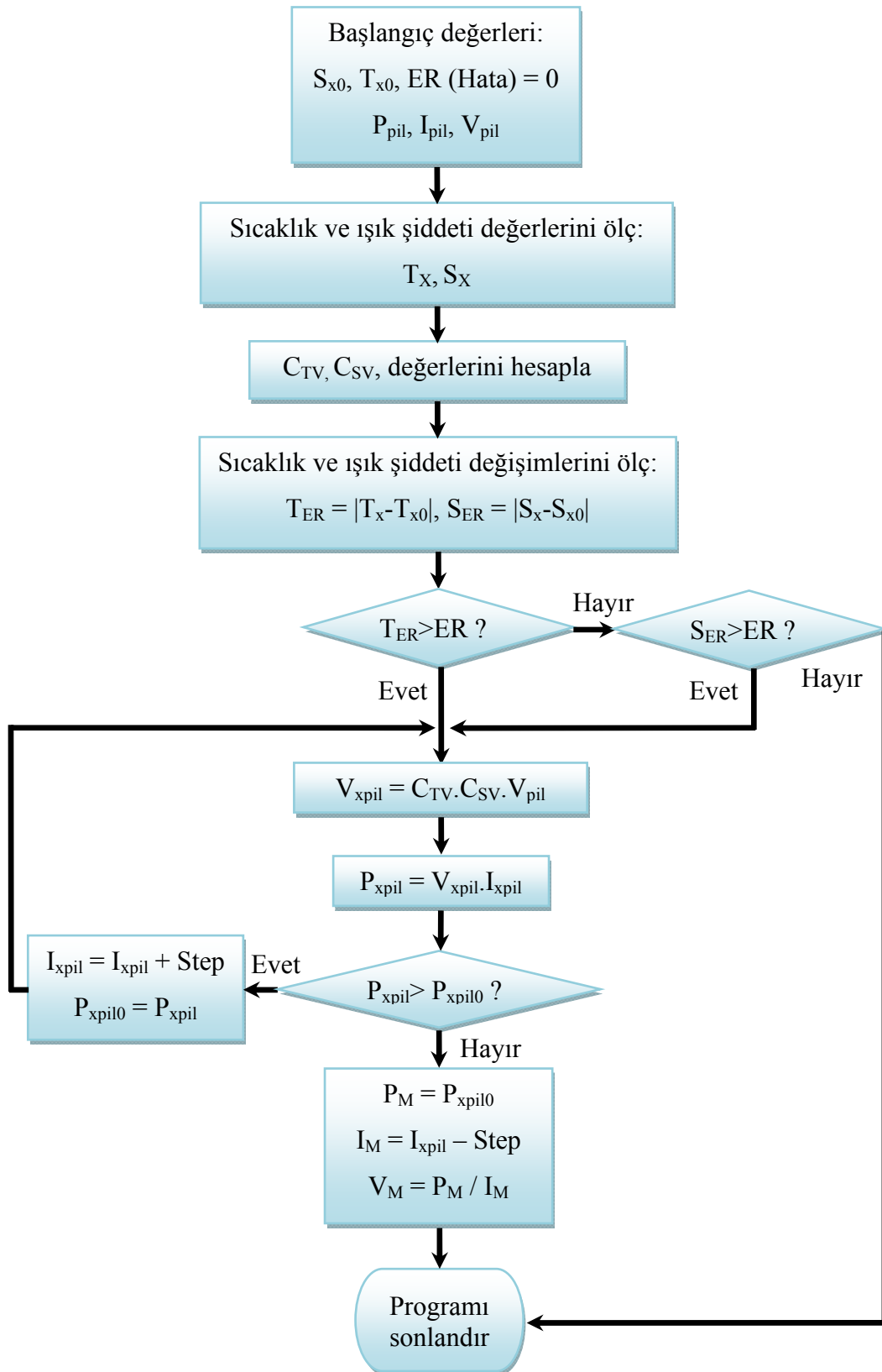


Şekil 2.24. Artımlı Geçiş (Incremental Conductance) Metodu algoritması

IncCond metodunun en belirgin dezavantajı, özellikle de P&O metoduyla kıyaslandığında, oldukça karmaşık donanım ve yazılım gerektirmesidir. Bu nedenle en iyi sonuçları elde etmek için, IncCond metodu, P&O metodu ile birlikte kullanılmaktadır [Jamaledine, 2007].

Şekil 2.25, P&O ve IncCond metodlarından uyarlanan algoritmanın akış diyagramını göstermektedir.





Şekil 2.25. Uygulanan karma metot blok diyagramı

Bu çalışmada kullanılan P&O ve IncCond metotlarına ait, farklı atmosfer şartlarında elde edilmiş verim değerleri Çizelge 2.5’ de gösterilmiştir [Hohm ve Ropp, 2003].

Çizelge 2.5. P&O ve IncCond metotları verim karşılaştırma tablosu

Atmosferik Şartlar	<u>P&amp;O</u>		<u>IncCond</u>	
	Gün	$\eta$	Gün	$\eta$
Açık	20	98,7	17	98,7
Parçalı Bulutlu	14	96,5	11	97,0
Bulutlu	9	98,1	11	96,7
<b>Toplam</b>	<b>43</b>	<b>97,8</b>	<b>39</b>	<b>97,4</b>

#### 2.6.4. MPPT’ ye etki eden parametreler

##### Yükün etkisi

Güç kaynaklarının maksimum güç verebilmeleri için önemli bir nokta, yükle uyum sağlamak zorunda olmalarıdır. FV sistemlerin pratik uygulamalarında da, panelin ürettiği güç ile yükün ihtiyaç duyduğu güç arasında bir uyumsuzluk vardır. Bu uyumsuzluk önceki bölümlerde de belirtildiği gibi akülerle aşılabacağı gibi, panellerle yük arasında eklenecek devrelerle de giderilebilir. Yük uyumunu sağlayabilecek söz konusu devreler DC-DC Converter devreleridir. FV hücreler tarafından üretilen enerjinin harcanacağı yükler de aynı şekilde dikkatli hazırlanmalıdır.

FV sistemlerde MPPT tasarımı yapılırken, Buck ve Boost Converter üzerinden gitmek iyi bir çözümdür. Buck Converter genelde düşük, Boost Converter ise daha yüksek çıkış gerilimlerinde kullanılmaktadır. Yükün durumunun bilindiği durumlarda Buck veya Boost Converter arasında seçim yapılabilir. Ancak bu da tasarım açısından uygun olmayacaktır. Çünkü FV sisteme bağlı olan yük her zaman aynı değerde kalmayabilir veya farklı zamanlarda farklı yükler sisteme dahil edilebilir. Böylece çıkış gerilimi yükün ihtiyacıyla karşılaştırıldığında düşük seviyede kalırken, yükün değişmesiyle gerilimde artış meydana gelebilir. Tam tersi de ihtimal dahilindedir. Bu sebeple, yük uyumu sağlanırken sistemin ihtiyacına göre

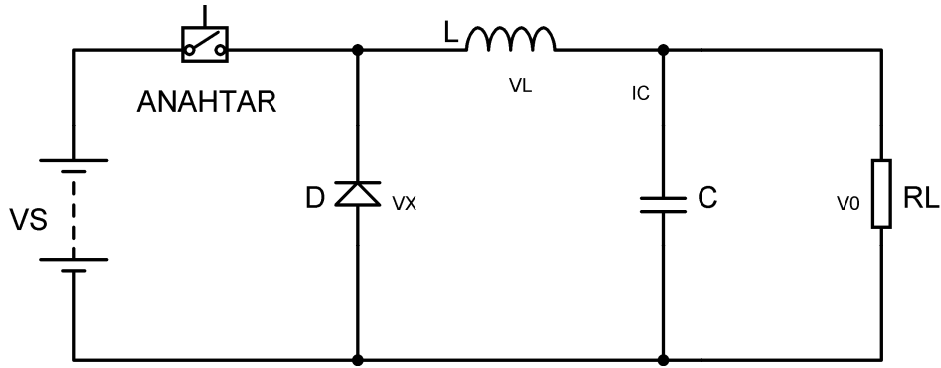
çözüm üretmek gerekir. FV sisteme bağlı yük, daima sabitse yük seviyesine göre uygun Converter seçilerek çözüme gidilebilir. Bu duruma örnek olarak FV enerjisiyle çalışan trafik ışıkları verilebilir. Sistem yalnızca tek bir sabit yükü beslediğinden, uygun Converter ile uygun çıkış gücü elde etmek yeterli olacaktır. Ancak yükün sürekli değiştiği, sisteme yeni yükler eklendiği veya çıkarıldığı durumlarda, sabit Converter seçimi çözüm olamayacaktır. Bu durumda belli kısım yükler sisteme dahilken çıkış gücü fazla olduğu halde, yüklerin bir kısmı sistemden çıktığında, çıkış gücü miktarı yetersiz olabilir. Buradan da anlaşılacağı gibi, çıkış gücünü bazen artırmak bazen de azaltmak gerekecektir. Bu durumlarda da Buck-Boost Converter yapıları tercih edilmelidir.

Pratikte Buck Converter' in verimi daha yüksektir. Pratik uygulamalarında akım bazen giriş portuna akmamaktadır. Boost Converter ise verimi nispeten düşük olmasına rağmen sabit akım üretebilmektedir. Böylece sürekli akım modunda daha yüksek uyum gösterebilir.

### **Buck converter**

Alçaltıcı veya Step-Down Converter olarak da adlandırılır. Şekil 2.26' da Buck Converter devresi verilmiştir.

Devrede gösterilen tüm elemanlar kısa tepki süreli ve kaliteli yapıda olmalıdır. Örneğin anahtar yapısı için genellikle yüksek hızlı transistörler kullanılır. Transistörün denetimi için kullanılan devre, PWM (Pulse Width Modulation-Darbe Genişlik Modülasyonu) mantığıyla çalışan ve devrenin asıl maliyetini oluşturan kısımdır. Pratik uygulamalarda mikroişlemci tabanlı (TL49X ve TL59X serileri) denetim kontrolcülerini kullanılır. D diyodu da transistör gibi kısa tepkime süresine sahip olmalıdır ve Yol verme (Free Wheeling) Diyodu olarak adlandırılır. L-C yapısı kapasitif süzgeçtir. Genelde Tantalyum yapısına sahiptir.

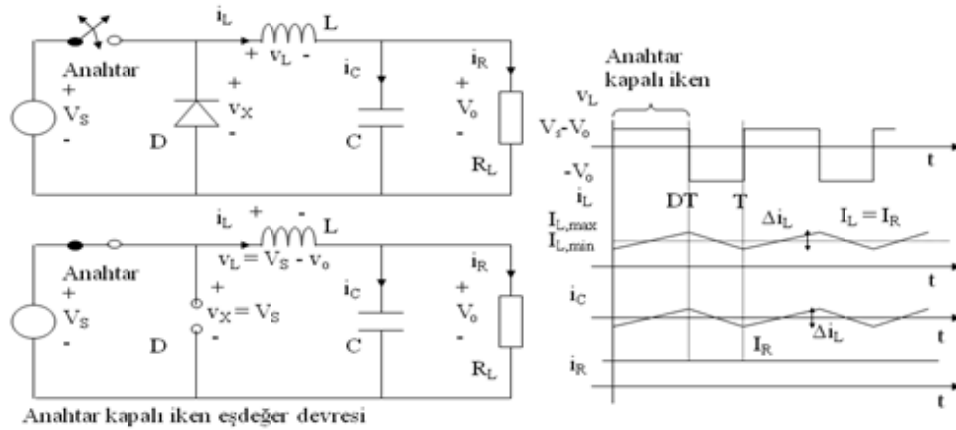


Şekil 2.26. Buck Converter

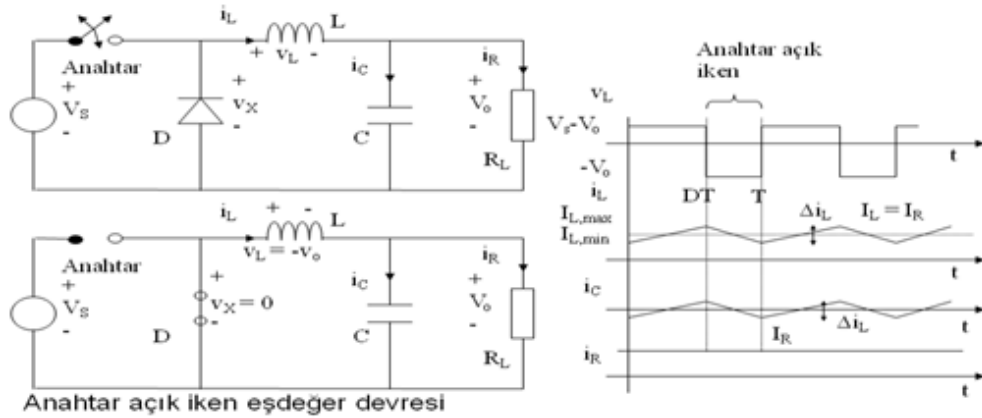
Çalışma prensibi basittir. Kirchoff' un gerilimler yasasından Denklem 2.15 yazılabilir.

$$V_0 = V_X - V_L = V_X - L \cdot \frac{dI_L(t)}{dt} \quad (2.15)$$

Denklemden de görüldüğü gibi Endüktif bir geri düşümü olmaktadır. Anahtar “on” konumunda iken  $V_X$  devreye uygulanır.  $I_L$  değeri lineer olarak artarak tepe eğerine ulaşır. Bu durumda C kondansatörü ile L endüktansı  $I_L$  ile beslenir. Anahtar “off” konumunda iken de Lenz Kanununa göre  $V_L$  değeri  $180^\circ$  faz kaybeder.  $I_L$ ,  $I_0$  değerinin altına düşer ve yükü besleyemeyecek duruma gelir. C kondansatörü bu durumda  $I_L$  akımını besleyerek  $V_0$  çıkışının düşmesini engeller. Böylece regülasyon işlemi gerçekleştirilmiş olur.



Şekil 2.27. Buck Converter analizi (anahtar kapalı)



Şekil 2.28. Buck Converter analizi (anahtar açık)

FV sistemlerde, yükün durumuna göre kullanılan Converter devrelerinde C ve L değerlerinin hesaplanarak belirli değerlerde olması gerekir. Bu sayede  $V_o$  çıkış gerilimi istenilen değere ayarlanabilir. Denklem 2.16 ve Denklem 2.17, Buck Converter devresinde kullanılan C ve L değerlerinin bulunmasında kullanılır.

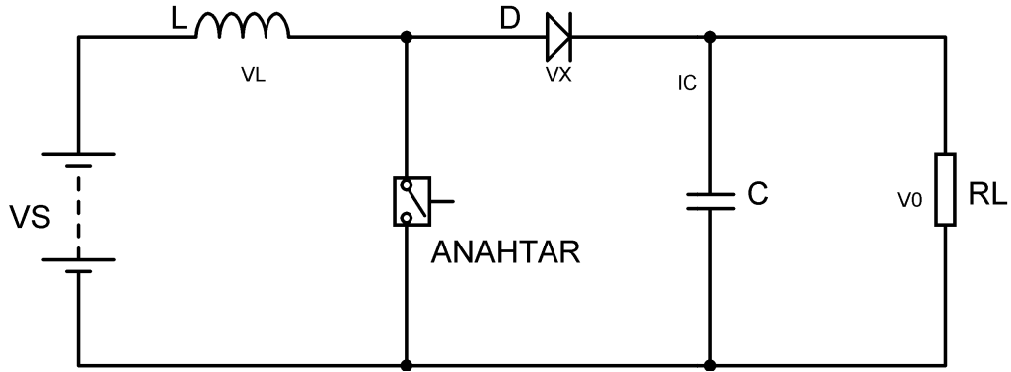
$$L = \frac{V_o \cdot (V_{in} - V_o)}{0,4 \cdot I_o \cdot V_{in} \cdot f} \quad (2.16)$$

$$C = \frac{V_o \cdot (V_{in} - V_o)}{8 \cdot f^2 \cdot V_{in} \cdot L \cdot \Delta V_{0p-p}} = \frac{\Delta I_L}{\Delta V_{0p-p} \cdot f} = \frac{0,4 \cdot I_o}{\Delta V_{0p-p} \cdot f} \quad (2.17)$$

### Boost converter

Yükseltici veya Step-Up Converter olarak da adlandırılır. Şekil 2.29' da Boost Converter devresi görülmektedir.

Devre Buck Converter devresinin tersi işlem yapar. Anahtarlama devresi (genelde transistör) "on" konumuna geldiğinde akım, L ve anahtar üzerinden geçer ve L enerji yüklenir. D diyodu kesimdedir ve C kondansatörü yükü takviye eder. Anahtarlama devresi "off" konumuna geldiğinde ise, yine Lenz Kanununa göre Endüktif gerilim değeri ( $V_{end} + V_L$ )  $V_o$  çıkış gerilimine yansır. Yani diyod iletme geçer. Bu durumda da akım yolu; L, D, C ve yük olur.



Şekil 2.29. Boost Converter

Kirchoff' un gerilimler yasasından Denklem 2.18 yazılabilir.

$$V_x + V_L - V_D - V_0 = 0 \quad (2.18)$$

$V_D$  gerilimi ihmal edilecek olursa  $V_0$  çıkış gerilim değeri;

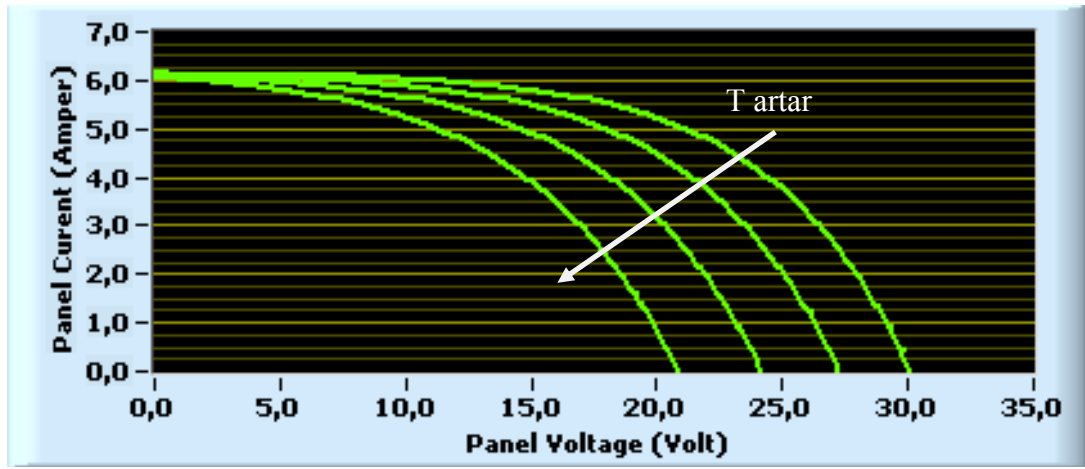
$$V_0 = V_x + V_L \quad (2.19)$$

bulunur. Denklemden de görüleceği gibi devrede gerilim artışı gerçekleşir.

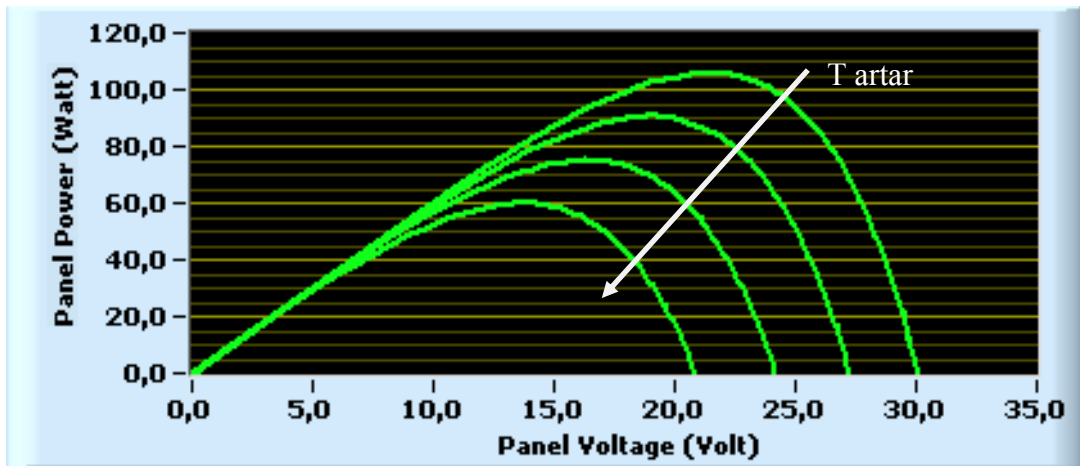
### Sıcaklığının etkisi

Çalışma sıcaklığındaki değişimlerin, I-V ve P-V karakteristikleri nasıl etkiledikleri Şekil 2.30 ve Şekil 2.31' de gösterilmiştir. Şekillerden de görüleceği gibi, çalışma sıcaklığının artması FV pilin çıkış gerilimini olumsuz yönde etkilemektedir. Sıcaklığın artmasından akım da etkilenmektedir. Ancak sıcaklıktaki değişimin asıl etkisi pilin çıkış gerilimi üzerinde görülmektedir. Güneş enerjisinin termik uygulamalarının aksine, FV piller için soğuk ortamlar daha uygundur. Benzer etki, Şekil 2.31' deki FV pilin çıkış gücünde de görülmektedir. Gerilimdeki azalma doğrudan doğruya güce yansıdığından, çalışma sıcaklığındaki artış çıkış gücünü de olumsuz yönde etkiler. Bunun diğer bir nedeni de, sıcaklığın pil kayıplarını artırmasıdır. Sıcaklık arttıkça, P-N eklemesindeki potansiyel engeli azalacak ve yarı-

iletkende termal olarak oluşan elektron ve boşluk sayısı artacağından kaçak akım da artacaktır. Bu kayıplar pilde ısıya dönüştürülerek harcanır [Sarıtaş, 1993]. Bu nedenle FV piller modellenirken, eşdeğer devrelerine seri-paralel dirençler eklenir. Eğer pil modelindeki seri direnç değeri yüksekse bu dirençte meydana gelen gerilim düşümü de yüksek olur ve pil çıkış gerilimi azalır. Pil çıkış akımındaki azalma ise, pil modelinde paralel bir dirençle temsil edilir.



Şekil 2.30. FV güneş pilinin akım ve geriliminin sıcaklıkla değişimi



Şekil 2.31. FV güneş pilinin güç ve geriliminin sıcaklıkla değişimi

FV sistemlere modelleme yapılırken, sıcaklık faktörünün etkisinin belirlenebilmesi için öncelikle,  $T_a$  referans ortam sıcaklığı ve  $T_x$  de değişken ortam sıcaklığı olmak üzere,  $C_{TV}$  ve  $C_{TI}$  parametreleri belirlenir.  $C_{TV}$  parametresi, sıcaklığın gerilim değeri

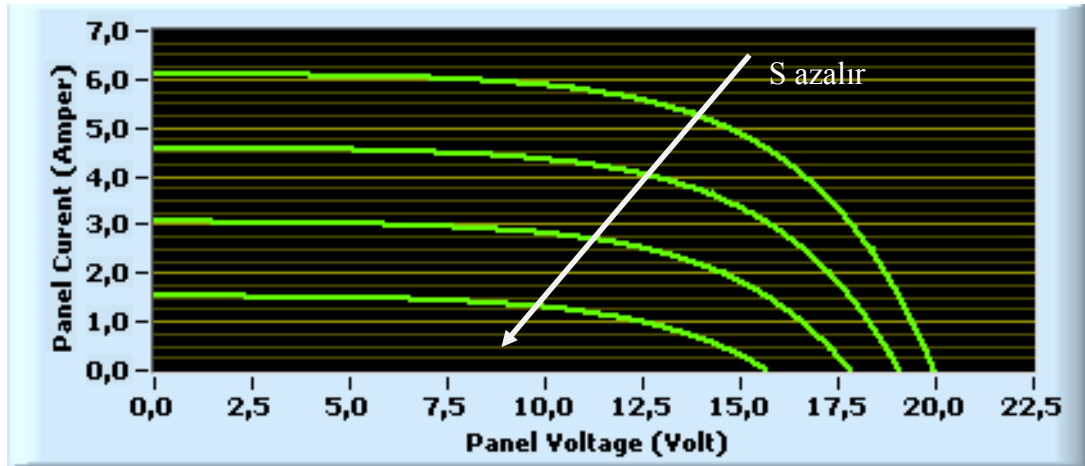
üzerindeki etkisini,  $C_{TI}$  ise sıcaklığın akım değeri üzerindeki etkisini gösterir. Burada kullanılan  $\beta_T$  değeri, genel olarak 0,004 ile 0,006,  $\gamma_T$  değeri de 0,02 ile 0,1 arasında değişen değerler alır. Belirlenen parametreler daha sonra yeni akım ve gerilim değerlerinin belirlenmesinde kullanılacaktır. Denklemlerde verilen  $S_{pil}$  değeri, güneş ışığı seviyesini gösterir.

$$C_{TV} = 1 + \beta_T \cdot (T_a - T_X) \quad (2.20)$$

$$C_{TI} = 1 + \frac{\gamma_T}{S_{pil}} \cdot (T_X - T_a) \quad (2.21)$$

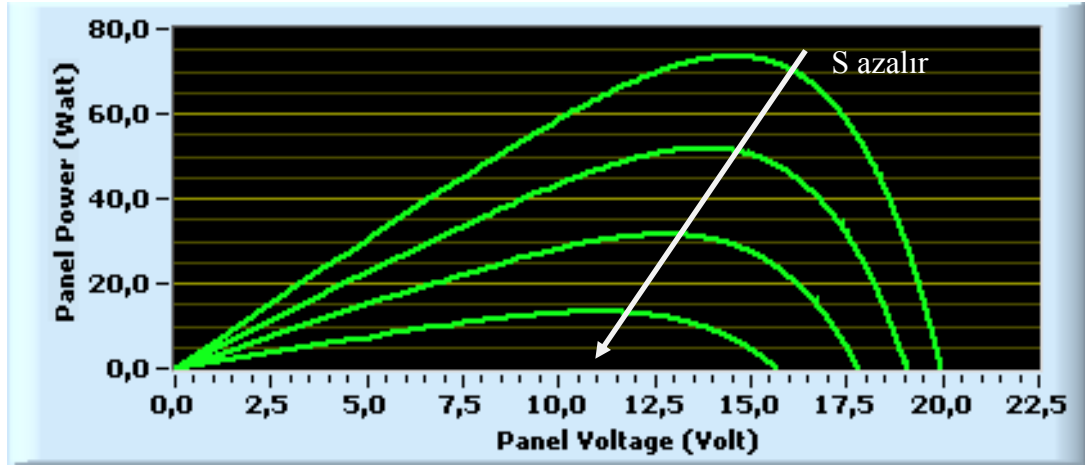
#### Işık şiddetinin etkisi

Işık şiddetindeki değişimlerin I-V ve P-V karakteristikleri üzerindeki etkileri ise Şekil 2.32 ve Şekil 2.33' de verilmiştir.



Şekil 2.32. FV güneş pilinin akım ve geriliminin ışık şiddetiyle değişimi





Şekil 2.33. FV güneş pilinin güç ve geriliminin ışık şiddetiyle değişimi

Güneş ışığı şiddetinde meydana gelen artışlar, FV panelin çıkış akımını olumlu yönde etkilemektedir. Işık şiddetinin akımda meydana getirdiği bu artış, sıcaklığın meydana getirdiği artışa göre oldukça yüksektir. Işık şiddetindeki artış, hem pil çıkış akımında hem de pil çıkış geriliminde bir artışa neden olmaktadır. Ancak gerilimdeki artış, akımdaki artışa göre daha düşüktür. Işık şiddeti arttıkça FV pilin çıkış gücü de artmaktadır. Güçteki bu artışın kaynağı, anlaşılacağı gibi hem akımdaki hem de gerilimdeki artıştan kaynaklanmaktadır.

Benzer şekilde, FV sistem modellemesinde güneş ışığı şiddetinin etkisinin belirlenebilmesi için öncelikle,  $S_{pil}$  güneş ışığı seviyesi ve  $S_X$  de değişken güneş ışığı seviyesi olmak üzere,  $C_{SV}$  ve  $C_{SI}$  parametreleri belirlenir.  $C_{SV}$  parametresi, ışık şiddetinin gerilim değeri üzerindeki etkisini,  $C_{SI}$  ise ışık şiddetinin akım değeri üzerindeki etkisini gösterir. Burada da, kullanılan  $\beta_T$  değeri genel olarak 0,004 ile 0,006,  $\alpha_S$  değeri de 0,3 ile 0,4 °C cm<sup>2</sup>/mW arasında değişen değerler alır.  $\alpha_S$  değeri güneş ışığının sıcaklık etkisini göstermektedir.

$$C_{SV} = 1 + \beta_T \cdot \alpha_S \cdot (S_X - S_{pil}) \quad (2.22)$$

$$C_{SI} = 1 + \frac{1}{S_{pil}} \cdot (S_X - S_{pil}) \quad (2.23)$$

$$\alpha_S = \frac{\Delta T_{pil}}{S_X - S_{pil}} = \frac{T_{pil} - T_a}{S_X - S_{pil}} \quad (2.24)$$

Sonuç olarak, sıcaklık ve güneş ışık şiddeti için belirlenen yukarıdaki düzeltme katsayıları kullanılarak, FV pilin yeni I ve V değerleri belirlenebilir ve FV sistem için çok daha güvenilir bir modelleme yapılmış olur.

$$V_{Xpil} = C_{TV} \cdot C_{SV} \cdot V_{pil} \quad (2.25)$$

$$I_{Xpil} = C_{TI} \cdot C_{SI} \cdot I_{FV} \quad (2.26)$$

Sıcaklık ve güneş ışık şiddeti parametrelerinin etkileri hesaba katılarak belirlenen bu denklemlerde kullanılan  $V_{pil}$  ve  $I_{FV}$  değerleri, referans olarak belirlenen sıcaklık ve güneş ışık şiddetindeki gerilim ve akım değerlerini temsil etmektedir.

Sonuç olarak; FV pillerin performansı, yüksek ışık şiddeti ve düşük sıcaklıkta daha iyidir denebilir. FV güneş pillerinin karakteristikleri incelendiğinde, akım-gerilim ya da güç-gerilim ilişkilerinin klasik doğru akım kaynaklarının karakteristiklerine benzemediği görülür. FV pillerin bu karakteristikleri doğrusallıktan oldukça uzaktır. Öyle ki,  $P_m$ ,  $I_m$  ve  $V_m$  değerlerinde değil, akım-gerilim karakteristiğinin kırılma noktası civarındadır. Karakteristiklerin gösterdiği sonuçlara göre ışık şiddeti, FV pillerin temel enerji kaynağını oluşturmaktadır. Dolayısıyla soğuk ve güneşli ortamlar FV güneş pilleri için en uygun ortamlardır.

### FV pil yapısının etkileri

#### **Katkı konsantrasyonunun etkisi**

Yüzey katkı konsantrasyonu ( $n_n$ ),  $10^{17}$ - $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  arasında değişirse verim % 18,7 olmaktadır.  $V_{oc}$  değeri, rekombinasyona bağlı olarak baz katkı konsantrasyonu ( $p_p$ ) ile artar ve  $3 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  değerinden sonra azalmaya başlar. Optimum değer  $J_0$ ,  $J_{sc}$ , CF ve  $\eta$  değerine de bağlıdır.

### **Ön ve arka yüzeylerde kaybolma hızlarının etkisi**

Ön ve arka yüzeylerde elektron ve boşlukların  $S_F$  ve  $S_B$  olarak gösterilen kaybolma hızları,  $100 \text{ cm}^2/\text{sn}$ ' den küçük ise ön ve arka yüzeylerin etkisi olmayıp verim % 25 civarında olmaktadır. FV yarı-iletkenlerde ön yüzey etkisi, arka yüzey etkisinden fazla olup arka yüzey etkisini yok etmek için  $n^+/p/p^+$  yapılar uygun görülmektedir [Saritaş, 1993].

### **Pil boyutlarının etkisi**

Kaçak akım değeri baz kalınlığından bağımsız olduğu halde eklem derinliği ( $X_j$ ) ile artarak pil verimini düşürmektedir. Maksimum verim olan % 21,5 için optimum eklem derinliği  $0,5 \mu\text{m}$ , optimum baz kalınlığı ( $B'$ ) ise  $450 \mu\text{m}$ ' dir [Saritaş, 1993].

### **Işık geçirgenliği ve yansımaya katsayısının etkisi**

FV çevrim için, fotonların yüzeyden geçiş katsayısı (T) mümkün olduğunca büyük olmalıdır. Geçirgenlik yüksek olduğunda ise çoklu yansıtmanın etkisi kaybolmaktadır. Yapılan çalışmalarda azınlık taşıyıcıların ortalama yolu ( $55 \mu\text{m}$ ), baz kalınlığı ( $B'$ ) ise  $450 \mu\text{m}$ ' den düşük olduğunda, çoklu yansıtma etkisi kaybolmakta ancak ortalama yol baz kalınlığına yakın olduğunda çoklu yansıtma etkisi gözlenebilmektedir.

### **Atmosfer şartlarının etkisi**

Değişik atmosfer şartlarında, FV pilin yüzeyine gelen enerji miktarları farklıdır. AM0 şartlarında fotoakım yoğunluğu daha fazla olmaktadır. Bunun yanında, AM0 için güneş fotonlarının toplam enerjisi, AM1 ve AM2' den fazla olduğundan giriş gücü artar ve verim azalır. Yapılan çalışmalar; AM0 için % 19,7, AM1 için % 21,4 ve AM2 için de % 22,1 verim elde edildiğini göstermiştir [Saritaş, 1993].

### **3. VERİ TOPLAMA (DATA ACQUISITION) ve ANALİZ SİSTEMLERİ**

#### **3.1. Giriş**

Herhangi bir sistemle ilgili ayrıntılı bilgi edinmek için öncelikle bilginin uygun formlarda toplanması, daha sonra istenilen bilginin türüne göre analizinin yapılması gerekir. FV sistemler için de bu durum farklı değildir. Öncelikle istenen veri (data) fiziksel ortamdan toplanır. Analiz ortamında rahat çalışabilmesi için, veri üzerinde koşullama işlemleri yapılır. Çeviriciler yardımıyla veri dijital formata çevrilir ve bilgisayara aktarılır. Uygulama yazılımı kullanılarak gerekli analizler yapılır.

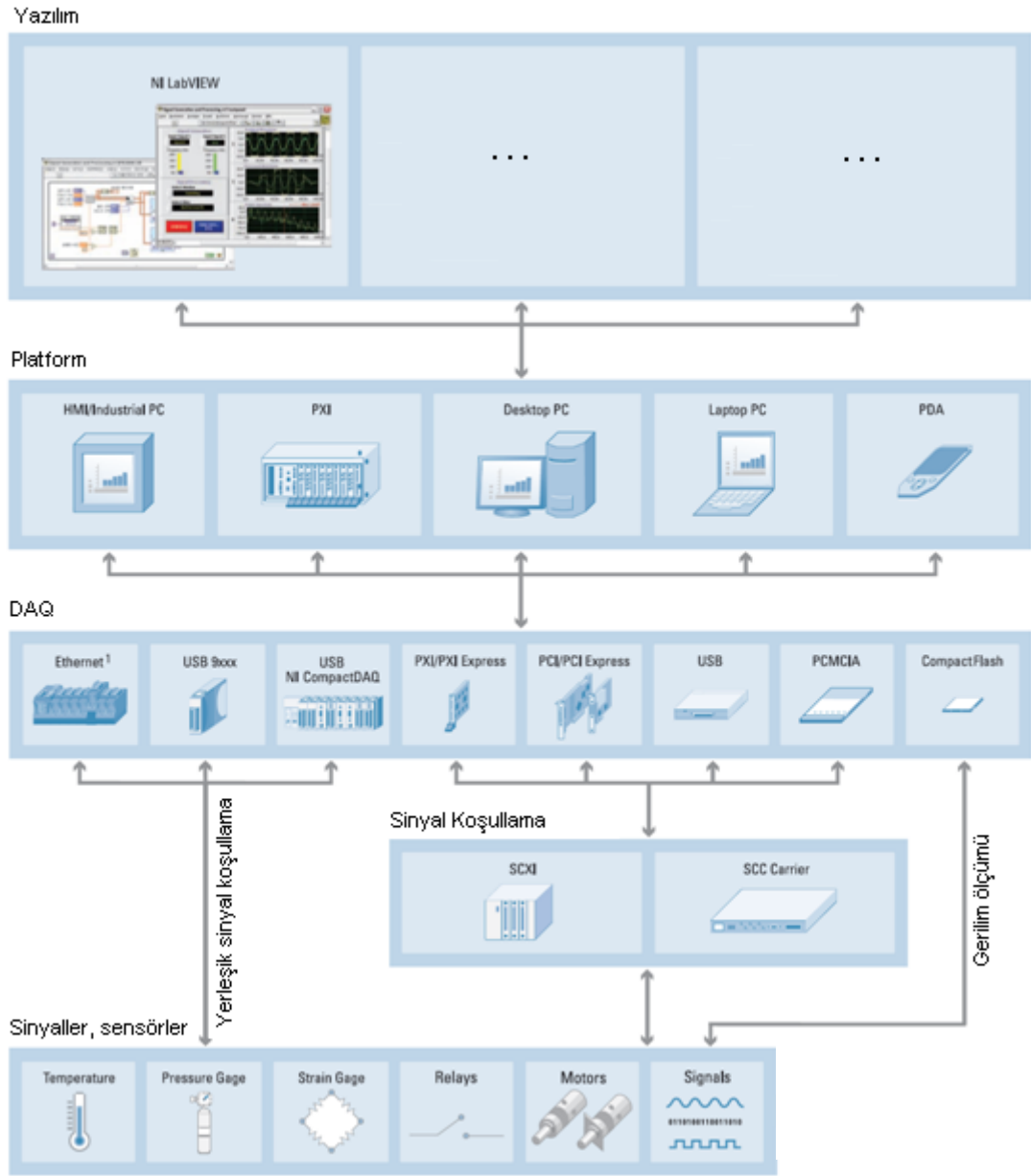
Veri toplama (Data Acquisition-DAQ) sistemleri, bilgisayar teknolojilerinin çeşitliliğinden dolayı çok geniş bir esnekliğe sahiptirler. Deneyler, ölçümler ve otomasyon uygulamalarının veri toplama sistemlerinde tercih edilen veri yolları arasında; VME, GPIB, PXI, Compact PCI, PCMCIA, USB, Firewire, paralel ve seri port sayılabilir. Bu uygulamaların az bir kısmı plug-in cihazlar kullanırken, bir kısmı da DAQ donanımı ile birlikte kullanılmaktadır.

Aşağıda veri toplama ve analizi konusu ayrıntılarıyla incelenmiş ve bir FV sistem üzerinde nasıl kullanılacağı konusunda bilgiler verilmiştir.

#### **3.2. DAQ Sistem Mimarisi**

Bir DAQ sisteminin 6 temel bileşeni vardır;

- PC
- Dönüştürücü ve sensörler
- Sinyaller
- Sinyal koşullama
- Veri toplama donanımı
- Sürücü ve uygulama yazılımı.



Şekil 3.1. DAQ sistem mimarisi

### 3.2.1. PC

DAQ sistemi için kullanılan bilgisayar, veri toplama ve analizi konusunu en çok etkileyen parametrelerden biridir. Bilgisayar teknolojisinin sürekli gelişimiyle, DAQ sistemi de kendi payına düşen gelişimi göstermektedir. Bunların başlıcaları; gelişmiş real-time işlemler, karmaşık video grafikleri ile görüntü işleme ve daha yüksek kesintisiz işlem yeteneğidir. Bugünün teknolojisinde Pentium gibi işlemciler, yüksek performans bus mimarisıyla birlikte çalışmaktadır. PCI bus ve USB port, bugünün desktop dünyasındaki standart ekipmanlardır ve 132 Mbyte/s a kadar teorik veri transfer hızına sahiptirler. PCMCIA, USB ve FireWire gibi External ve portable PC bus' lar ise 40 Mbytes/s transfer oranı ile PC tabanlı DAQ sistemlere daha esnek bir alternatif sunar.

Bilgisayarın veri transfer yeteneği, DAQ sisteminin performansını önemli ölçüde etkiler. 20 Yıl önce, bilgisayarlar yaklaşık 5 MHz' de haberleşiyorlardı. Oysa bugünlerde bu rakam oldukça yukarılara çekilmiş durumdadır. Bilgisayar hızları artınca DAQ sistem hızları da artış göstermektedir.

Günümüz bilgisayarları, programlanmış I/O ve kesintili veri transferine uyumludur. DMA (Direct Memory Access) transferleri, veriyi sistem hafızasına doğrudan transfer etmek için atanmış donanımlar kullanır. Bu yolu kullanarak işlemci, veriyi gönderip almak için kullanılmamış olur ve böylece daha karmaşık işlemler için yeterli miktarda boş işlemci gücü kalmış olur.

Donanım ile bilgisayar arasında bir ara yüz olarak görev yapan NI sürücü yazılımı NI-DAQ ile DMA rutinleri, transfer verilerini PC bus ile optimize eder. Böylece veri transfer kapasitesi olabildiğince hızlandırılır. DMA veya kesintili transferden faydalanmak için DAQ cihazı bu transfer tiplerine uyumlu olmalıdır. Örneğin; PCI ve FireWire cihazlar hem DMA hem de kesinti tabanlı transferi desteklerler. PCMCIA ve USB cihazlar ise yalnız kesme tabanlı transfer kullanır. Transfer işlemi boyunca ne kadar işleme ihtiyaç duyulacağına bağlı olarak DAQ cihazından

bilgisayar hafızasına transfer edilen veri oranı, veri transfer mekanizmasından etkilenebilir.

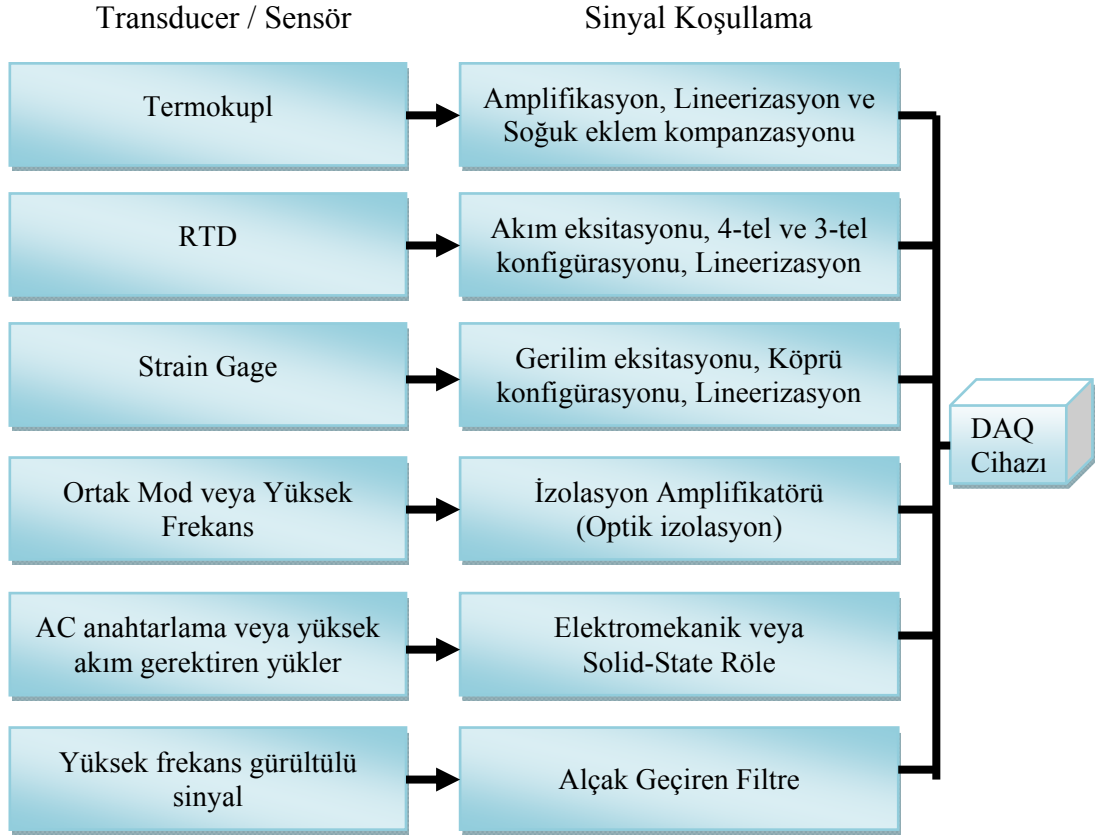
Büyük miktarlarda verinin gerçek zamanlı olarak depolanması için sınırlayıcı faktör genellikle hard drive' dır. Hard drive erişim zamanı ve parçalaması önemli biçimde verinin toplanabildiği ve diske kaydedilebildiği maksimum orana indirgenebilir. Yüksek frekans sinyallerle veri toplaması gereken sistemler için, bilgisayara yüksek hızlı hard drive seçilmelidir ve veriyi depolamak için yeterli miktarda bitişik disk alanı bulunmalıdır. Bunlara ek olarak, veri toplama için bir hard drive atanmalı ve işletim sistemi (OS) ayrı bir diskte çalıştırılmalıdır.

### **3.2.2. Sensörler**

Veri toplama, ölçülecek fiziksel büyüklükle başlar. Sensörlerin görevi fiziksel veriyi ölçülebilir bir sinyale dönüştürmektir. Elektrik ölçme sistemleri için bir sensör, belirli bir fiziksel olaya cevap olarak kullanılabilen elektriksel bir çıkış işareti üretir. Sensör seçimindeki önemli unsurlar; hassasiyet, değişim aralığı, fiziksel özellikler, frekans cevabı, çıkış formatı, çıkış empedansı, gürültü, doğruluk ve hata, ayar, çevre ve fiyat olarak sayılabilir.

Örneğin termokupl, RTD (Resistance Temperature Detectors), termistör ve IC sensörler, sıcaklık değerini ADC' nin ölçebileceği analog sinyale dönüştürürler. Strain gage, akış ve basınç sensörleri gibi güç, akış miktarı ve basınç ölçen diğer sensörler de vardır. Her koşulda sensörler fiziksel parametreleriyle orantılı bir elektrik sinyali üretirler.

Sensör tarafından üretilen elektriksel sinyaller, DAQ cihazının giriş skalası için optimize edilmelidir. Bu işlem ilerde bahsedilmiş olan sinyal koşullama elemanları ile yapılır. Sinyal koşullama elemanları, düşük seviye sinyalleri yükseltir ve bu sinyalleri izole edip filtreleyerek daha verimli ve hassas ölçüm yapılmasını sağlar.



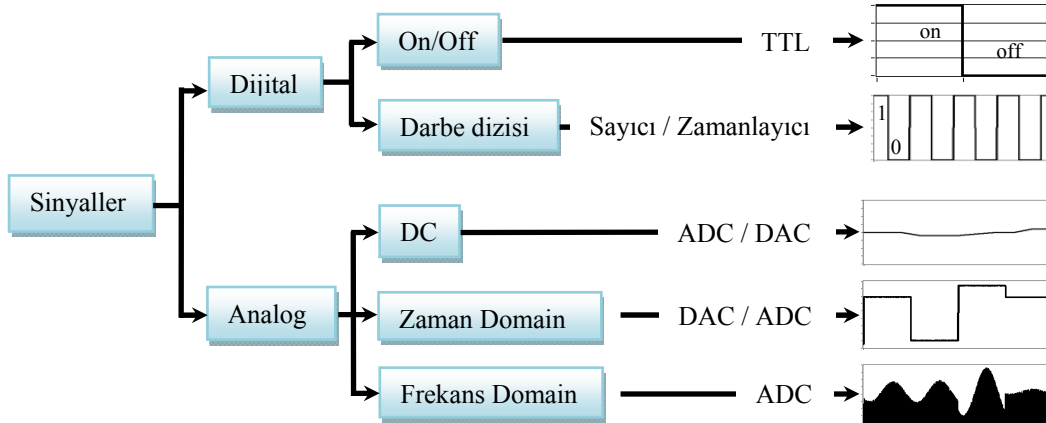
Şekil 3.2. Sensörler, sinyaller ve sinyal koşullama tipleri

### 3.2.3. Sinyaller

Uygun sensörler, fiziksel büyüklüğü ölçülebilir sinyallere dönüştürürler. Bununla beraber, farklı sinyaller farklı yollarla ölçüm yapılmasını gerektirir. Bu sebeple, farklı sinyal tiplerini ve aralarındaki ilişkiyi tam olarak anlamak önemlidir. Sinyaller genel olarak analog ve dijital olmak üzere 2 gruba ayrılır.

Analog sinyaller, gerilim gibi zamana göre değişken değer alabilen sinyallerdir. Dijital sinyaller ise, hız gibi zamana göre her değeri alamaz. Bunun yerine on-off, gibi 2 farklı durumu gösterirler. Şekil 3.3' de sinyal tipleri görülmektedir.





Şekil 3.3. Sinyal tipleri

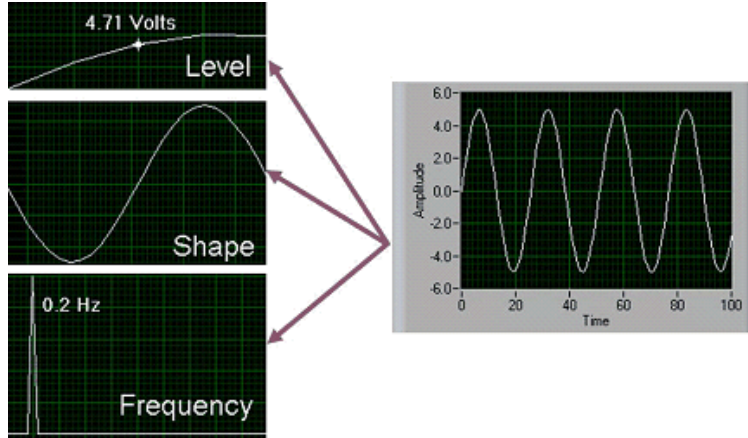
### Analog sinyaller

Analog sinyal zamana bağlı herhangi bir değer alabilir. Gerilim, sıcaklık, basınç, ses ve yük analog sinyallerdir. Analog sinyalin 3 önemli karakteristiği; seviye, şekil ve frekanstır (bkz. Şekil 3.4).

*Seviye:* Analog sinyaller herhangi bir değer alabilirler. Sinyalin seviyesi ölçülen analog sinyal hakkında hayati bilgiler verir. Bir ışık kaynağının yoğunluğu, bir odanın sıcaklığı, kapalı bir ortamın basıncı, sinyal seviyesinin önemini göstermektedir.

*Şekil:* Bazı sinyaller şekillerine göre sinüs, kare, testere ve üçgen şeklinde isimlendirilirler. Analog sinyalin şekli, en az seviyesi kadar önemlidir. Çünkü analog sinyalin şeklini belirleyerek; tepe değeri, DC değeri ve eğim gibi, sinyallerin farklı analizleri yapılabilir.

*Frekans:* Tüm analog sinyaller frekanslarına göre sınıflandırılabilirler. Seviye ve şekilden farklı olarak frekans değeri direkt olarak ölçülemez. Öncelikle sinyal, frekans bilgilerini tanımlamak için yazılımlar kullanarak analiz edilmelidir. Bu analizler genellikle Fourier Algoritması kullanılarak yapılmaktadır.



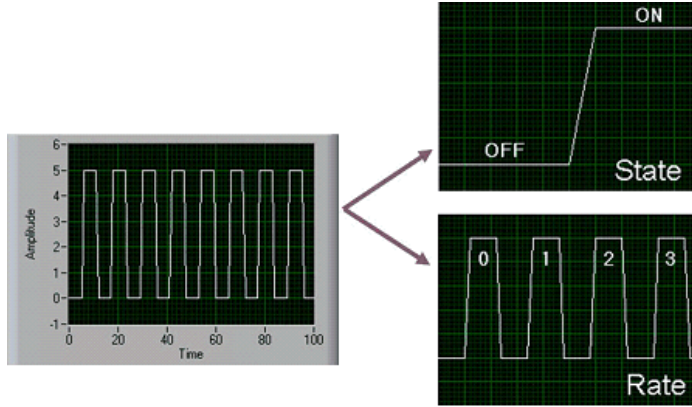
Şekil 3.4. Analog sinyalin karakteristikleri

Frekans, sinyal bilgisinin en önemli parametresi olduğundan, doğruluk ve veri toplama hızını da göz önünde bulundurmamak gerekmektedir. Sinyalin frekansının doğruluğu için gereken veri toplama hızı, sinyalin şeklinin tanımlanması için gerekli hızdan düşük olmasına rağmen, analog sinyal uygun ve yeterli bilgi alacak kadar hızlı olmalıdır. Bu hızı belirleyen koşul “Nyquist Örnekleme Teoremi” olarak bilinir. Buna göre işaret içindeki en yüksek frekanslı bileşenin en az iki katı frekansta örnekleme yapılmalıdır. Örnekleme frekansının yarısına karşılık gelen frekans değerine Nyquist frekansı denir. Konuşma analizi, iletişim, deprem analizi gibi örnekler en çok bilinen frekans uygulamalarıdır.

### Dijital sinyaller

Dijital sinyaller zamana karşı herhangi bir değer almaz, onun yerine yüksek ve alçak olmak üzere 2 farklı olasılık kabul ederler. Ortak olarak transistor-transistor logic (TTL) olarak çalışırlar. TTL; seviye 0-0,8 V arasındaysa düşük, 2-5 V arasındaysa yüksek olarak belirlenir.

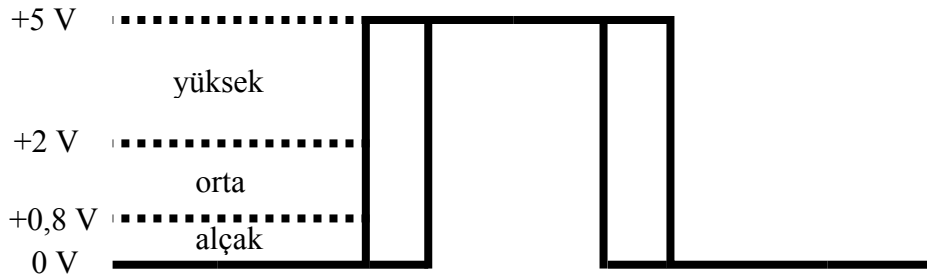
Bir dijital sinyalden edinilebilecek önemli bilgiler Şekil 3.5’ de gösterildiği gibi durum ve orandır.



Şekil 3.5. Dijital sinyalin karakteristikleri

*Durum:* Dijital sinyalin durumu genellikle, on/off veya yüksek/alçak gibi sinyalin seviyesini gösterir. Anahtar konumunun ekrana aktarılması, dijital sinyalin durumunu bilmenin önemini gösteren genel bir uygulamadır. Günümüz elektroniğindeki uygulamaların çoğu, dijital sinyal durum bilgisine dayalı çalışmaktadır.

*Oran:* Dijital sinyalin durumunun zamana karşı nasıl değiştiğini tanımlar. Bu duruma uygun bir örnek olarak motorun dönüş hızı verilebilir. Frekanstan farklı olarak dijital sinyalin oranı, sinyalin bir kısmının ne kadar sıklıkla ölçüldüğünü gösterir. Dijital sinyali tanımlamak için genellikle yazılım ve algoritmalar gerekmez.



Şekil 3.6. TTL sinyali

### 3.2.4. Sinyal koşullama

Bazen sensörlerden gelen verinin doğrudan ölçülmesi zor veya tehlikeli olabilir. Yüksek gerilim, aşırı düşük veya yüksek veri veya gürültü gibi olumsuz faktörlerin olduğu yerlerde sinyal koşullama ile duyarlılık artırılarak, sensörlerin güvenliği ve doğru çalışmaları sağlanmış olur. Başlıca sinyal koşullama opsiyonları Resim 3.1’ de gösterilmiştir.

Modüler sinyal koşullama sistemleri



NI CompactDAQ



SCXI



SCC



Compact FieldPoint

Entegre sinyal koşullama cihazları



PXI Instruments



SC Series



USB-9200 Series

Resim 3.1. Sinyal koşullama donanım opsiyonları

Sinyal koşullama işlemi, işaret üzerinde gerçekleştirilen bazı işlemlerle yapılır. Bu işlemler, işaretin türüne, durumuna ve kaynağın işaret ihtiyacına göre belirlenir. Aşağıda en çok kullanılan sinyal koşullama işlemleri verilmiştir.

- Yükseltme; En çok kullanılan koşullama tipidir. En yüksek doğruluk için, sinyal yükseltilmelidir. Örneğin, alçak seviyeli termokupl sinyalleri, çözünürlüğün artırılması ve gürültünün azaltılması için yükseltilirler. Bu sebeple, koşullanmış sinyalin maksimum voltaj aralığı, ADC' nin maksimum giriş değerine eşittir.
- İzolasyon; Bir diğer sinyal koşullama uygulaması da sensör sinyalini PC' den izole etmektir. Aksi halde sistem yüksek gerilime maruz kalabilir ve PC zarar görebilir.
- Filtreleme; Amaç, istenmeyen sinyalleri asıl işarettten uzaklaştırmaktır.
- Tetikleme; Sinyal koşullama ayrıca strain gauge, termistor ve RTD gibi bazı sensörler için tetikleme de üretir.
- Lineerizasyon; Termokupl gibi bazı sensörler ölçüm sırasında doğrusal olmayan tepki verirler. Bu durumun engellenmesi için Lineerizasyon işlemi yapılır.

### 3.2.5. DAQ donanımı

DAQ donanımları PC ile dış dünya arasında bir ara yüz görevi görmektedir. Gelen analog sinyalleri bilgisayarın anlayabileceği dijital sinyallere çevirirler. En çok kullanılan yöntem, bilgisayarın içine veri toplama kartı (DAQ Board) koymaktır.

Veri toplama işlemi, test ve ölçümün ilk aşamasıdır. Sıcaklık, basınç, kuvvet, ivme, gerilme gibi, gerçek hayattaki fiziksel büyüklüklerin ölçülmesi ve incelenmesi için, öncelikle bu analog işaretlerin sayısallaştırılması (analog to digital conversion - ADC) gerekir. Bu işlemin günümüzde en kolay, etkin ve esnek şekli bilgisayar ortamında yapılmaktadır.

Veri toplama donanımları, birlikte çalıştıkları bilgisayarın işletim sistemine ve veri toplamanın yönetildiği uygulama yazılımına, sürücü yazılımları ile tanıtılırlar.

Test, ölçüm ve otomasyon uygulamaları birbirinde çok farklı yapılarda olabilir. Bazı uygulamalarda tüm sinyallerin aynı anda toplanması (Eşzamanlı Veri Toplama-Simultaneous Data Acquisition) gerekirken, bazılarında sinyal kaynakları birbirinden çok farklı noktalarda sahaya yayılmış olabilir (dağıtılmış veri toplama sistemleri). Çok işlevli kartların (Multifunction Data Acquisition) kullanılmasını gerektiren pek çok uygulamada ise farklı tipte analog ve dijital sinyaller toplanırken, kontrol amaçlı çıkış sinyallerinin üretilmesi gerekmektedir.

Yapılan uygulamaya bağlı olarak, farklı PC tabanlı DAQ türleri vardır. Bunlar; Analog Giriş/Çıkış ve Dijital Giriş/Çıkış olarak sınıflandırılabilir.

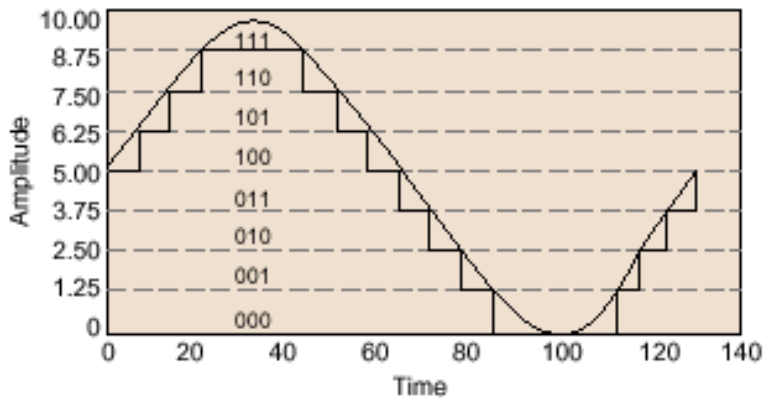
### Analog giriş

*Kanal Sayısı:* Analog giriş kanal sayısı, her iki giriş tipine sahip cihazlar için hem tek uçlu (single-ended) hem de fark uçlular (differential input) için tanımlanmıştır. Tek uçlu girişler, ortak bir topraklama noktasına göre referanslandırılmıştır. Bu girişler genellikle giriş sinyalinin yüksek seviye olduğu durumlarda (1V' dan büyük) kullanılır. Sinyal kaynağından analog giriş donanımına yönlendirir ve tüm giriş sinyalleri ortak topraklama referansı kullanırlar. Eğer sinyaller bu kriterlere uymuyorsa fark giriş kullanılmalıdır.

*Örnekleme Hızı:* Bu parametre, çevirme işleminin ne kadar sıklıkla yapılacağını gösterir. Hızlı örnekleme, belirli bir zaman diliminde daha çok veri toplanması anlamına gelir ve sonuçta orijinal sinyale daha yakın bir sinyal elde edilmiş olur. Eğer gelen işaret, DAC' dan daha hızlı bir şekilde değişiyorsa, ölçülen veriler hata ile tamamlanır. Bu da, yavaş örneklenmiş bir verinin frekansının değişebileceği anlamına gelir. İşaretin bu şekilde bozulmasına "Aliasing" denir. Aliasing problemini engellemek için daha önce belirtilen Nyquist teoremine göre hareket edilir.

*Kararlılık (Resolution):* ADC' nin analog sinyali belirlemek için kullandığı bit sayısına kararlılık (çözünürlük) denir. Kararlılığın yüksek olması, daha çok miktarda bölünme ve sonuçta, daha algılanabilir küçük gerilim değişimleri sağlamaktadır.

Şekil 3.7, ideal bir 3 bit ADC' nin elde ettiği sinüs dalga ve dalganın uyumlu dijital imajını göstermektedir. 3 Bit ADC, analog aralığı  $2^3$  veya 8 aralığa böler. Her bölüm 000 ile 111 arasında bir binary (ikili) kod ile temsil edilir. Ancak dijital gösterim, orijinal analog sinyalin iyi bir gösterimi değildir. Çünkü çevirme işlemi sırasında bilgide kayıp olmaktadır. Kararlılığın 16 bite yükseltilmesiyle, ADC kod sayısı 8' den 65536' ya çıkmasına rağmen, eğer analog devrenin geri kalanı iyi tasarlanmış olursa, dijital gösterimin doğruluğu son derece artırılmış olur.



Şekil 3.7. 3 Bit ile dijitalleştirilmiş sinüs dalgası

*Giriş Aralığı:* Giriş aralığı, ADC' nin ölçebildiği minimum ve maksimum gerilim seviyelerini gösterir. Bazı Multifunction DAQ cihazları, giriş aralığının seçilebilmesine olanak sağlar. Böylece cihaz farklı gerilim seviyelerine uygun halde kullanılabilir. Bu esneklik sayesinde kullanıcı, ADC ile uygun ölçüm kararlılığının avantajından faydalanabilir.

*Kod Genişliği:* DAQ kartında bulunan giriş aralığı, çözünürlük katsayısı ve kazanç değeri, ölçülebilecek en düşük seviyeli gerilim değişim değerini belirler. Gerilimdeki bu değişimler, dijital değer en son anlamlı bitini (LSB) gösterir ve kod genişliği olarak adlandırılır. İdeal kod genişliği; gerilim aralığının, kazancın 2 üzeri bit sayısı ile çarpımına bölünmesiyle bulunur. Örneğin, NI 16-bit Multifunction DAQ cihazlarından biri (NI-6052E) 0-10 Volt veya -10+10 Volt aralıklarında seçilebilir aralığa ve 1, 2, 5, 10, 20, 50 veya 100 kazançla sahiptir. 100' lük kazançla göre ve 0 - 10V arası voltaj aralığı için ideal kod genişliği;

$$10 \text{ V}/(100 \times 2^{16}) = 1,5 \mu\text{V}$$

olarak bulunur. Yani bir bitin sayısallaştırılmış değerdeki çözünürlüğü  $1,5\mu\text{V}$  tur.

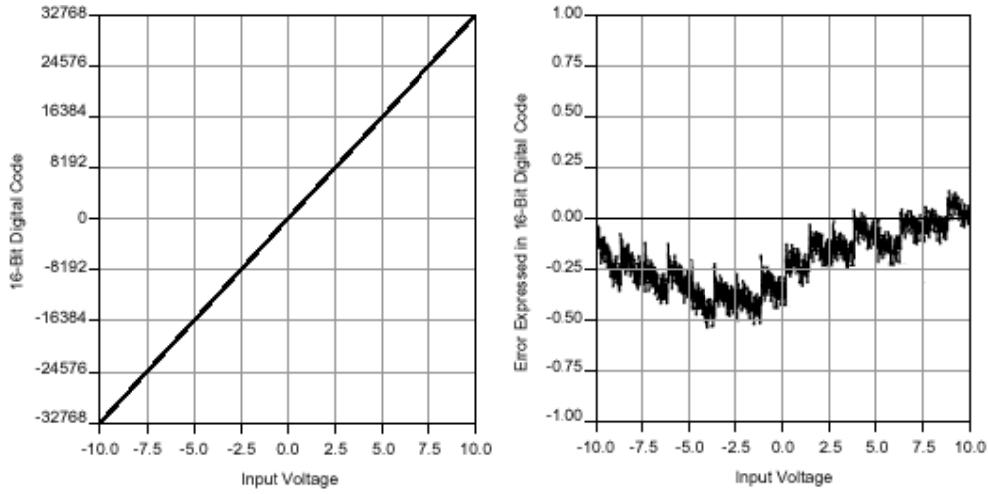
Her ne kadar, tanımlanan DAQ cihazı 16 bit çözünürlüklü ADC' ye sahip olsa ve 100 kS/s örnekleme oranına sahip olsa da, 16 kanalın tümüyle örnekleme yapılamaz ve 16 bitlik doğruluk elde edilemez. Örneğin, günümüzde 16 bit ADC' lar 12 bitten daha az kullanılabilir veri elde edebilmektedir. Bu anlamda, kullanıcının tasarım yaparken dikkat etmesi gerekmektedir.

*DNL (Türevsel nonlinearity):* İdealde DAQ' a uygulanan gerilim arttıkça ADC' nin çıkışındaki sayısal kodlarında doğrusal bir şekilde artması gerekir. DNL, merdivene benzer. Mükemmel DNL' i olan bir kartta her basamak ideal yükseklikte ve genişliktedir. Kötü bir DNL' e sahip bir kartta veya kayıp kodlarda basamaklardan, bazıları daha uzun bazıları daha geniştir. DNL özelliğinin kötü olması kartın doğruluğunu azaltan bir özelliktir.

*Bağıl Doğruluk:* Bağıl doğruluk, ideal DAQ cihazı transfer fonksiyonunun en kötü durum sapmasının LSB ölçümüdür. Bağıl doğruluk; DAQ cihazı üzerinde gerilimin sayısallaştırılması, gerilimin artırılması ve cihazın giriş aralığı kapsanana kadar adımların tekrar edilmesidir. Sayısallaştırılmış noktalar çizildiğinde sonuç açıkça doğrusal olur. Bununla birlikte güncel doğru değerinin sayısallaştırılmış değerden çıkarılması ve bu noktaların çizilmesi Şekil 3.8' de gösterilmiştir. İşte bu sıfır değerinden maksimum sapma, cihazın bağıl doğruluğudur.

Bir DAQ cihazı için sürücü yazılımı, ADC' nin binary kod değerini, bir sabitle çoğullayarak gerilime çevirir. İyi bir nispi doğruluk DAQ cihazı için oldukça önemlidir. Çünkü ADC' nin binary kodunun gerilime çevrilmesi hassastır. İyi bir bağıl doğruluk elde etmek için ADC' nin ve onu çevreleyen analog devrenin iyi tasarlanması gerekir.





Şekil 3.8. DAQ cihazın bağıl doğruluğu

*Yerleşme (Settling) Zamanı:* Tipik bir DAQ kartında işaret, multiplexer tarafından seçilir. ADC' ye gönderilmeden önce kuvvetlendirilir. Kuvvetlendirici, multiplexer kanallar arasında anahtarlanırken çıkışı takip etmeli ve yerleşme zamanı da kısa olmalıdır. Eğer bu zaman büyürse gerilimden ADC bir önceki kanalın değeriyle o anki kanalın değeri arasında geçiş bölgesinde kalır. Genellikle yüksek hız ve yüksek kazançlı örnekleme yapılıyorsa, kuvvetlendiricinin yerleşme zamanı da büyük olacaktır. Kötü yerleşme zamanı büyük bir problemdir. Çünkü doğru olmama miktarı genellikle kazanç ve örnekleme oranına göre değişir. Bu durumda, multiplexerin girdi sinyalleri arasında anahtarlama sonucunda oluşabilecek büyük voltaj farklarının takibinde zorlanır. Kazanç yükseldikçe ve kanallar arası anahtarlama zamanı azaldıkça, enstrümantasyon kuvvetlendiricisinin yerleşememe ihtimali artar. Taranan sinyal kaynaklarının empedanslarının 1 k $\Omega$ ' dan düşük olması tavsiye edilir. Eğer bu mümkün değilse, her kanal için bağımsız “buffering” veya amplifikasyon sağlayan bir sistem kullanılmalıdır.

*Gürültü:* Sistem tasarımında en çok karşılaşılan olumsuzluk, gürültü diye tanımlanan elektromanyetik ve elektrostatik girişim dalgalarıdır. Sayısal değerler üzerinde olması gereken değerlerden farklı her değer gürültü olarak tanımlanır. Gürültü hemen hemen her yerden sisteme eklenir. Teorik olarak gürültüsüz bir ortam yoktur.

Gürültü kaynakları 4 ana kategoride toplanır. Bunlar; Şehir şebeke frekansının 50 Hz' lik titreşimleri gibi rastgele dalgalı gürültü kaynakları, motor, kontaktör ve RF vericilerinden oluşan insan yapısı gürültü kaynakları, güneş gibi ışık kaynağı ve floresan ile aydınlatma gibi doğal gürültü kaynakları ve diğer kaynaklar (Çevre sıcaklığı, nem, toz, şok, çevresel titreşim, akustik basınç korozyon etkisi) olarak sayılabilir.

Bu faktörlerin telafi edilmesi konusunda en yaygın ve en güvenli yollar topraklama, ekranlama ve doğru kablolama işlemlerinin yapılmasıdır.

Enstrümantasyon sistemlerinde topraklamanın önemi oldukça fazladır. Sistemin sağlıklı çalışması iyi bir topraklama ile doğrudan ilgilidir. Topraklanmamış sistemler çok şiddetli empedans ve yalıtım bozulmalarına yol açarlar. Diğer yandan iyi topraklanmamış bir sistemde iletilen veya alınan sinyaller üzerinde çevresel ya da bazı iç faktörler sebebiyle enerji indüklenmesi, gerilim ve işaret bozulmaları şeklinde etkiler oluşabilir. Bu etkiler ekranlama diye adlandırılan bir teknikle elimine edilebilirler. Bir DAQ sisteminin ekranlaması, genelde sistemin metal bir kafes içine alınmasıyla Faraday kafesi kuralının uygulanması ve iletişim hatlarında izolasyonla hat arasına yerleştirilen bir kafes örgüyle kaplanmasıyla gerçekleştirilmektedir. Çok kolay ve yaygın kullanılan bu iki yöntem dışında; şebeke kompanzasyonu, koruyucu gerilim uygulaması, şebeke filtresi, kesintisiz güç kaynaklarında AC/DC/AC çevirimi ile besleme ve sistemin fiziksel olarak özenli ve enerji sistemlerinden uzağa yerleştirilmesi gibi uygulamalar da dış etkenlerden kaynaklanan gürültüyü önleyebilir.

Diğer yandan sinyallerin verimli aktarımı için iletişim hatlarına mutlaka gerekli özen gösterilmelidir. Doğru kablolama, bu konuda sistemin uzun süreli sağlıklı işleyişi açısından önemli bir yere sahiptir. Tasarlanan sistemin kurulumu ve özelliği itibarıyla iletişim hatlarının Bakır tel ya da Fiber optik esaslı kablolama yapılacağına karar verilmeli ve yapısal değişiklikler önceden tasarlanmalıdır.

### Analog çıkış

Analog çıkış devreleri genellikle DAQ sistemlere bir uyarı sağlamak için gereklidir. DAQ için kullanılan ve üretilen çıkış sinyalinin kalitesini gösteren özellikler; yerleşme zamanı, yükselme hızı ve çözünürlük olarak sayılabilir.

*Yerleşme Zamanı:* Çıkış kararlılığa geçene kadar geçen süredir (bkz. Analog Giriş).

*Yükselme Hızı (Slew Rate):* Çıkış değerinin zamana bağlı olarak alabileceği en büyük değişim miktarını belirler. DAC' ın çıkış sinyali üzerinde üretebildiği maksimum değişim oranı da denilebilir. Yerleşme zamanı ve yükselme hızı, DAC' ın çıkış sinyal seviyesini ne kadar çabuk değiştirdiğini tanımlamak için birlikte kullanılırlar. Böylece, küçük yerleşme zamanlı ve büyük yükselme hızına sahip DAC, yüksek frekanslı sinyalleri üretebilir.

Örnek olarak, ses sinyallerinin üretilmesi ve ısıtıcı kontrolü verilebilir. DAC, ses aralığını yakalayabilmek için, yüksek frekanslı sinyalleri üretebilmeli ve küçük yerleşme zamanı ve büyük yükselme hızına sahip olmalıdır. Tam tersine, ısıtıcı kontrolünde kullanılan gerilim kaynağı uygulamalarında ise, hızlı bir DAC' a ihtiyaç yoktur. Çünkü ısıtıcı, gerilim değişimlerine hızlı bir şekilde cevap veremez.

*Çıkış Çözünürlüğü:* Giriş çözünürlüğüne benzer. Analog çıkışı oluşturan dijital kod üzerindeki bit sayısıdır. Yüksek miktarlarda bit, her bir gerilim çıkış artışının büyüklüğünü düşürür. Böylece sinyallerin daha düzgün değişimi sağlanmış olur.

### Dijital giriş/çıkış (DIO)

DIO ara yüzleri sıklıkla PC DAQ sistemleri üzerinden işlemleri kontrol etmek, test modelleri üretmek ve çevresel donanımlarla iletişim kurmak için kullanılır. Her durumda da gösterilebilecek önemli parametreler; kullanılabilir durumdaki dijital hat sayısı, bu hatlar üzerindeki dijital veri hızı ve hatların sürücü kapasitesi olarak sayılabilir. Eğer dijital hatlar ısıtıcı, motor, ışık açma/kapama gibi olayların

kontrolünde kullanılırsa, genellikle yüksek veri oranı gerekmez. Bunun nedeni donanımın çok hızlı yanıt verememesidir. Dijital hat sayısı, şüphesiz kontrol edilecek işlem sayısı ile uyuşmalıdır. Tüm bu işlemlerde, cihazları açıp kapatabilmek için gerekli akım miktarı, cihazdan gelen uygun sürücü akımından az olmalıdır. DIO, endüstriyel uygulamalarda, yüksek hızlı el sıkışma (handshaking) veya basit iletişim metotlarında da kullanılabilir.

Düzgün bir sinyal koşullama elemanı ile, DAQ cihazına gelen veya giden düşük akımlı TTL sinyalleri, yüksek gerilim veya akım sinyallerini monitör/kontrol etmek veya bir röleyi sürmek için kullanılabilir. Örneğin, akım ve gerilim, büyük ölçekli bir vanayı  $2\text{ A } 100\text{ V}_{AC}$  de açıp kapamak için gerekebilir.

### 3.2.6. Yazılım (LabVIEW)

Yazılım, PC ve DAQ donanımı arasında veri toplama, analiz ve monitörleme ilişkisi kurar. Yazılım olmadan DAQ donanımı tam anlamıyla etkin olamaz. Yazılım; sürücü yazılımı ve uygulama yazılımı olmak üzere 2 kısımdan oluşmaktadır.

Sürücü yazılımı, DAQ donanımını direkt programlayabilen yazılım katmanlarından oluşur. Donanım programının düşük seviyeli ve karmaşık detaylarını gizler, kullanıcıya kolay anlaşılır bir ara yüz bilgisi sunar. DAQ donanımının, bilgisayarların ve yazılımın gittikçe karmaşıklaşan özellikleri, iyi bir sürücü yazılımının önemini vurgulamaktadır. İyi seçilmiş bir sürücü yazılımı, DAQ uygulamalarını geliştirmek için gerekli olan zamanın estetik kullanımını ve performansını arttırmayı sağlar. DAQ sürücüsünün tüm özellikleri, kullanıcıya tasarım ve geliştirme için gerekli olan hayati zamanı kazandırır. Şekil 3.9, simülasyon işleminde kullanılan Labview yazılımının üreticisi NI (National Instruments) firmasının NI-DAQmx sürücü yazılımını göstermektedir [Measurement and Automation 07 Catalog, 2007].



Şekil 3.9. NI-DAQmx yazılımı

DAQ donanımını programlamanın diğer bir yolu da uygulama yazılımı kullanmaktır. Uygulama yazılımının avantajı, sürücü yazılımına analiz ve sunum özellikleri kazandırmaktır. Bununla birlikte uygulama yazılımları, DAQ cihazlarının kontrolü için sürücü yazılımlarını da kullandıklarından, yukarıda sayılan tüm özelliklerin de iyi bilinmesi gerekmektedir. Uygulama yazılımları enstrüman kontrolünde de (GPIB, RS232 ve VXI) kullanılabilir.

Veri toplama, analiz etme ve sonuçları gösterme işlemleri, yapılması gereken standart prosedürlerdir. Tüm bu işlemler fiziksel ortamda gerçekleştirilerek veya PC üzerinde sanal enstrümanlar yardımıyla yapılabilmektedir. Bu iki sistem arasındaki en önemli fark esnekliktir. Sanal enstrümanlar kullanıcı tarafından tanımlanırlar. Bu yaklaşımın kullanıcıya verdiği esnekliğin bütün özellikleri üretici tarafından belirlenmiştir. Dolayısıyla da sabit olan cihazlar (voltmetre, osiloskop, sıcaklık ve basınçölçerler...) bu esnekliği asla sağlayamazlar. Bu cihazlar bir kez, çoğu zaman da büyük paralar ödenerek satın alınır ve ekonomik olabilmesi için belirli bir süre kullanılmak zorundadır. Bu süre içine performansta bir artış, yeni bir işlevi yerine getirebilme gibi beklentiler de olamaz. Oysa PC tabanlı olduğu için sanal enstrümantasyon, PC' ler için geliştirilen her türlü teknolojiye anında yararlanabilmektedir. Sanal enstrümantasyon durmaksızın gelişen bilgisayar

teknolojisi tarafından desteklenmekte ve performansı sürekli olarak artmaktadır. Bu teknolojinin yararları ve gelişme potansiyeli kullanıcıların gün geçtikçe artan bir hızla geleneksel yaklaşımlar yerine sanal enstrümantasyonu tercih etmelerine yol açmaktadır. Sanal enstrümantasyon çözümlerini seçen kullanıcılar kuruluş, sistem geliştirme ve bakım masraflarını azaltırken, ürün kalitelerini ve pazar paylarını artırmaktadırlar. Bu çalışmada kullanılan simülasyon yazılımı da belirtilen avantajları kullanıcıya sunabilen bir sanal enstrümandır.

Simülasyonda kullanılan LabVIEW yazılımı, NI firmasına aittir. Bir Amerikan firması olan NI, 20 yıldan uzun bir süredir, endüstri standartlarında test, ölçüm ve endüstriyel otomasyon uygulamalarına donanım ve yazılım üretmektedir. Merkezi Austin, Texas' ta bulunan NI' nin 3600 çalışanı vardır ve yaklaşık 40 ülkede doğrudan operasyon birimi vardır. NI, Fortune dergisi tarafından Amerika' da bulunan en iyi 100 şirket arasında gösterilmiştir.

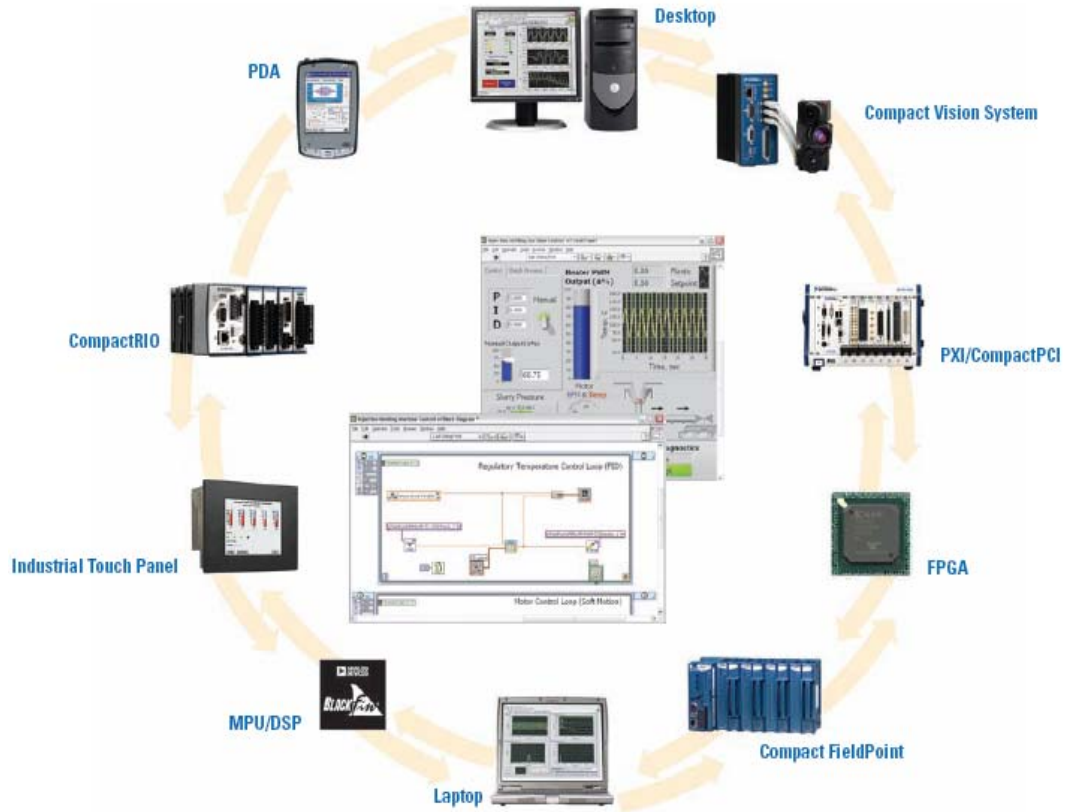
LabVIEW, veri toplama ve kontrolünde, bilimsel araştırmada, işlem takibinde, otomasyonda, test ve ölçümde, veri analizi ve veri sunumunda kullanılan, grafik (G) programlama dili tabanlı bir grafiksel program geliştirme ortamıdır. LabVIEW, 1980' lerin başında ilk ortaya çıkışından bu yana, çok sayıda mühendis, bilim adamı ve teknisyen tarafından kullanılmıştır. LabVIEW, karmaşıklıktan, zorluktan uzak güçlü bir programlama dilinin esnekliğini sağlar. Dünya çapında yapılan bağımsız araştırmalarda, PC tabanlı ölçüm sistemleri için en popüler programlama ortamlarının LabVIEW, C ve C++ olduğu görülmüştür [Jamal, 1999]. LabVIEW, C programlama dillerinin esnekliğini ve kapsamlı işlevselliğini sağlarken, kullanıcılara C' ye göre 5 ile 10 kat daha fazla verimlilik de sunar. NI, üçüncü partilerin LabVIEW ile bağlantılabilirliğini de sağlayan açık bir platform sunmakta ve yüzlerce kamera, hareket tablaları, TEDS-uyumlu sensör ve aktivatörler, OPC uyumlu endüstriyel aygıtlar ve 4000 üzerinde GBIP, VXI, PXI, PCI, seri, ethernet ve USB kontrollü ölçüm aygıtı için sürücü desteği sağlamaktadır. LabVIEW; Windows, Macintosh ve Linux işletim sistemlerinde kullanılabilir [Bishop, 2006].

Labview'ın merkezinde, yapılandırılmış bir veri akış diyagramlaması yatar. Üzerindeki veri akış diyagramları çok iyi anlaşılır. Bu durum C/C++ ve BASIC' de farklıdır. Bu yazılım dilleri, paralelliğe ulaşabilmek için işletim sistemi fonksiyonlarına kadar kütüphane çağırma fonksiyonlarına güvenmek zorundadırlar. Sonuç olarak compiler, kodun paylaşılan bölümlerini korumayı garanti etmez, aksine onu paralel program oluşturulması yönünde oldukça zorlaştırır. Bu problemler Labview' da yoktur. Yeni kullanıcılar bile kolaylıkla iyi seviyede uygulama tasarlayabilirler.

Labview' da editör, direkt kullanıma yönelik detaylı kullanıcı arabirimleri oluşturabilmek için zengin işlem kümelerine sahiptir. Her bir modülün veya başka bir deyişle her bir VI' ın kullanıcı arabirimine sahip olması demek her bir adımda etkileşimli test etmenin herhangi bir kod yazmadan oldukça basit olması demektir. Anlamlı test yapılmadan bitirilen küçük uygulama alt kümeleri Labview' da diğer geleneksel programlama dillerine nazaran daha küçüktür ve bu da iterasyonların daha hızlı olması anlamına gelir. Kendi sınıfında kanıtlanmış ve rakipsiz hıza sahiptir.

LabVIEW kullanarak; veri akışı, test, ölçüm ve kontrol uygulamaları için gerekli hızı sağlayan 32 bit derlenmiş uygulamalar oluşturulabilir. Ayrıca DLL' lere benzer yapıda bölünmüş kütüphaneler ve yalnız çalışan uygulamalar da oluşturulabilir. Çünkü LabVIEW gerçek bir 32 bit derleyicidir.

Şekil 3.10, Labview kullanılarak kontrol edilebilen cihazları göstermektedir [Measurement and Automation 07 Catalog, 2007].



Şekil 3.10. LabVIEW kontrol yelpazesi

Aşağıda, Labview programının ayrıntıları farklı başlıklar halinde açıklanmıştır.

**Ön Panel:** VI' ların ön paneline kontrol paletinden seçilebilen sayısal göstergeler, ölçekler, metreler, termometreler, LED' ler, çizelgeler, grafikler ve daha fazlası yerleştirilebilir. Kullanıcı tasarımını tamamladığında, çalışan VI, bir anahtar tıklarak, bir sürgüyü oynatarak, grafiğe zoom yaparak veya klavyeden bir değer girerek, kısacası seçilebilir bir tetikleme yapılarak, ön panelden kontrol edilebilmektedir. Ön panel, programın kullanıldığı, kullanıcının görebildiği ara yüzü ifade eder ve blok diyagramda programlanan yazılımın kullanıcı kısmını gösterir.

**Blok Diyagram:** VI programlanırken, bilinen programlarda karşılaşılan detaylarla uğraşmadan, blok diyagram oluşturulabilir. Bu blokların içeriği basit aritmetik fonksiyonlardan, ileri veri toplama ve analiz işlemlerine, network ve dosya I/O işlemlerine kadar çeşitlilik göstermektedir. Kullanıcı blok diyagramda işlem



yaparken fonksiyonun karşılığı anında ön panelden takip edilebilir. G (graphical) programa dillerinin avantajları günümüzde çok daha iyi anlaşılmıştır. Text tabanlı dillere göre çok daha pratik, zevkli, kullanıcı dostu ve hızlı tasarlanabilen yapısı sayesinde G tabanlı diller en çok kullanılan ve tercih edilen programlama dilleridir.

*Veri akışı (Dataflow):* LabVIEW’ da kullanılan ve G adı verilen patentli veri akışı programlama modeli, kullanıcıyı metin tabanlı dillerin lineer mimarisinden kurtarır. Çünkü LabVIEW’ deki işletim sırası, ardı ardına metin satırları şeklinde değil, bloklar arası veri akışı şeklindedir ve aynı anda çalışan diyagramlar oluşturmak mümkündür. LabVIEW, ayrı yollardan farklı işler görebilen bir sisteme (Multitasking and Multithreaded System) sahiptir. Program çalışırken “Highlight” butonu kullanılarak; verilerin o an nerede olduğu, hangi işlemde geçtiği, hangi değer veya değerler ürettiği, hata olup olmadığı, döngüler ve diziler takip edilebilir. Sadece bu özelliği kullanarak programcının bulamayacağı hata neredeyse yoktur.

*Modülerite ve Hiyerarşi:* LabVIEW VI’ larının tasarımı modülerdir. Bu sayede VI’ lar kendi başlarına çalışabilir veya başka bir VI’ ın parçası olarak kullanılabilir. Böylece değişen ihtiyaçlarına göre yeniden düzenleyebileceği, başka VI’ larla birleştirebileceği veya birbirleriyle değiştirebileceği VI’ lar ve subVI’ lar hiyerarşisi oluşturabilir. Bu durum kullanıcı açısından oldukça ciddi avantajlar sağlar. Öncelikle; belirli enstrümanlar için uzun ve zahmetli bir şekilde hazırlanmış büyük bir programın her seferinde yeniden yazılmasına gerek yoktur. Yalnızca aynı programda değil farklı programlarda da aynı içerikli VI’ lar kullanılabilir. Açık kaynak kodları, forumlar, içerdiği örnekler ve NI’ ın kendi kod paylaşım bölümü sayesinde, modüler yapının avantajları kullanılabilir.

*Grafiksel Derleyici (Compiler):* Pek çok uygulamada işletim hızı kritiktir. LabVIEW, derlenmiş C programlarıyla mukayese edilebilir işletim hızına sahip derleyicisi olan tek grafiksel programlama sistemidir. İçinde hazır bulunan “Profil” ile kodun kritik zamanlı bölümlerini analiz edilip optimize edilebilir. Sonuç olarak, grafiksel programlama ile işletim hızından fedakarlık etmeden verimlilik artırılabilir.

*Enstrüman Kontrolü:* LabVIEW; VISA, GPIB, VXI ve bir seri VI kütüphanesi enstrümantasyon kontrolünde NI endüstri standardı araç sürücü yazılımını kullanır. NI' in IEEE 488.2 ara yüz kartına bağlı herhangi bir GPIB enstrümanı kontrol edilebilir. VXI enstrümanları VISA (Virtual Instrument Software Architecture) ile kolaylıkla programlanır.

“LabVIEW Enstrüman Sihirbazı” ile GPIB, VXI, seri ve bilgisayar tabanlı enstrümanlar da dahil olmak üzere, bilgisayara bağlı olan herhangi bir enstrüman anında bulunur. Sihirbaz uygun enstrüman sürücülerini yükler ve enstrümanla birkaç dakika içinde iletişim kurmaya yardımcı olur. LabVIEW, Instrument Driver Network' ten ücretsiz elde edebilecek 600' den fazla enstrüman sürücüsüne sahiptir.

*Veri Toplama ve Analizi:* DAQ VI kütüphanesi, NI' nin bütün plug-in ve uzak veri (remote data) toplama ürünlerini kullanan veri toplama ve dağıtma fonksiyonlarına sahiptir. Plug-in kartlar yüksek hız ve kontrol uygulamaları için idealdir. Düşük maliyetleri, kanal başına düşen maliyeti hissedilir oranda düşürür. LabVIEW, PLC, data logger, single-loop controller gibi endüstriyel IO araçları için de sürücüye sahiptir. Veri toplama projelerine hızlı ve kolay bağlanabilmek için LabVIEW DAQ Çözüm Sihirbazı ve DAQ Kanal Sihirbazı, kullanıcıyı kanalları konfigüre etmekten, tamamlanmış çözümler oluşturmaya kadar adım adım götürür.

LabVIEW, sadece o iş için yapılmış analiz paketleriyle rekabet edebilen, etkili ve geniş analiz kütüphanelerine sahiptir. Bu kütüphaneler, istatistikler, değerlendirmeler, lineer cebir, sinyal oluşturma algoritmaları, zaman ve frekans aralığı algoritmaları ve dijital filtreler ile tamamlanmıştır.

*İletişim:* LabVIEW, diğer uygulamalarla bağlantı kurmak için çok sayıda VI kütüphanesine sahiptir. CodeLink kullanılarak LabWindows/CVI içinde geliştirilen C kütüphanelerine kolaylıkla ulaşılabilir. TCP/IP networkleme VI' ları uzak uygulamalarla bağlantı kurmada kullanılabilir. “Internet Developers Toolkit”, kullanıcı işlemlerine e-mail ve web yeteneklerini ekler. Uzak otomasyon VI' ları ile diğer makinelere dağıtılmış VI' ların işletimleri kontrol edilebilir. ActiveX

otomasyonu veya dinamik veri değişimi (DDE: Dynamic Data Exchange) ile uygulama diğer Windows tabanlı uygulamalarla entegre edilebilir. UNIX platformunda isimlendirilen kanallar yolu ile işlemler arası veri geçişi de sağlanabilmektedir.

Endüstriyel uygulamalar için kullanılan günümüzün en yetkin yazılımlarından olan Labview, hali hazırda piyasada var olan neredeyse tüm donanımlarla uyum içinde çalışabilmektedir. Günümüz donanım üreticileri, Labview' ın bu popülaritesini koşulsuz kabul etmiş durumdadırlar. Ancak, yazılımın sorunsuz çalışabilmesi, yama programlarının (Add-on Toolkit) uyumu ve donanım kontrolü (GPIB) gibi uygulamalarda kullanıcı NI ürünlerini kullanmak durumundadır.

Bu bölümde NI firmasına ait olan ve MPPT ölçüm ve analizinde kullanılacak FieldPoint grubuna ait bir donanım opsiyonu verilmiştir.

### 3.3. NI FieldPoint

FieldPoint, endüstriyel görüntüleme ve kontrol uygulamaları için ekonomik çözümler sunan, modüler bir dağıtık I/O sistemidir. Çeşitli analog ve dijital I/O modülleri, bağlantı terminalleri, network modülleri ve üst seviye yazılım araçları içerir.

FieldPoint I/O değerleri, diğer dağıtık I/O sistemleriyle karşılaştırıldığında oldukça geniş skalada çözümler sunar. MPPT ölçümünde kullanılacak olan ekipmanların gerilim değerleriyle uyumlu olan FieldPoint voltaj skalası aşağıda gösterilmiştir;

0 $\pm$ 10V giriş	: Güvenli mod.
$\pm$ 10V Giriş $\pm$ 40V Gerilimaşımı	: Güvenli mod.
$\pm$ 40V Gerilimaşımı 250V	: Güvenli ama ürüne hasar verebilir.
250V 2300V İzolasyon	: Geçici olarak güvenli ama devam etmesi sakıncalı.
2300V İzolasyon ve üstü	: Güvensiz.



Resim 3.2. NI FieldPoint

FieldPoint sistemleri diğer DAQ sistemleriyle karşılaştırıldığında kolay yükleme ve bakım özelliklerine sahiptir. Sistemler kendi kendini konfigüre etme yetenekleriyle kullanıcı dostu kullanım sunarlar. FV sistemler dış ortam koşullarına bağlı çalıştıklarından sıcaklık parametresi ayrı bir önem taşımaktadır. Bu nedenle, kullanılacak sistem sıcak ve soğuk havalarda sorunsuz çalışabilmelidir.  $-40 +70\text{ }^{\circ}\text{C}$  çalışma sıcaklığı ile FieldPoint bu hususta da gereksinimleri fazlasıyla karşılamaktadır. Programlanabilir güç durumları sayesinde uygun opsiyon seçilebilir. Ölçümler için kullanılan modüller 2, 8 veya 16 kanallı olabilir. Ayrıca ethernet ve wireless opsiyonları ile daha kompleks ve sofistike uygulamalar için seçenek çeşitliliği sunmaktadır [Measurement and Automation 07 Catalog, 2007].

### 3.3.1. Kontrol ara yüzü

LabVIEW Real-Time gömülü kontrolcüler; kontrol, ölçüm ve sinyal işleme için idealdir. RS-232 ve RS-485 seri port içerir. Gömülü program işlemleri için onboard DRAM hafızası vardır.

NI FP-20xx kontrolcülerıyla Labview üzerinden hızlı bir şekilde kontrol ve ölçüm sistemleri tasarlanabilir. Labview' ın tüm akıllı ve gelişmiş kontrolleri, analiz ve kontrol özellikleri, endüstriyel ortamlar için küçük modüler bir paket halinde

kullanılabilir. Genellikle, veri toplama, analog işlem, ayrık kontrol sistemleri, PID kontrol döngüleri, vana ve motor kullanımları, ölçüm alınması gerçek zamanlı analiz ve simülasyon, log tutma, seri, ethernet veya telefon ağı üzerinden haberleşme gibi mühendislik uygulamalarında FP-20xx kontrolcileri kullanılır. Sistem yerleştirildiğinde, kontrolcü diğer cFP-20xx veya FP-20xx akıllı kontrolcülerle, network arayüzleriyle haberleşebilir. Ayrıca, FP-20xx kontrolcileri, I/O ölçümlerini otomatik olarak, üzerinde FieldPoint Explorer, LabVIEW, LabVIEW Datalogging and Supervisory Control Module, LabWindows/CVI, Lookout veya kullanıcının seçeceği OPC (OLE for Process Control) uygulama yazılımları gibi programların koştuğu Windows tabanlı bilgisayarlarla rahatlıkla haberleşebilir. Hatta PLC için uygun prosedürleri de vardır.

### 3.3.2. FP-2000 akıllı ethernet kontrol ara yüzü

16 MB onboard DRAM hafızasına sahiptir. PC tabanlı dağıtılmış I/O uygulamalar için stand-alone gömülü real-time kontrolcü veya ethernet ara yüzü olarak 1 adet RS232 seri port içerir. Uzak bağlantı kullanıcı arayüzü ile gömülü web ve dosya serverları vardır. 32 MB kalıcı hafızaya sahiptir.



Resim 3.3. NI FP-2000 akıllı ethernet kontrol arayüzü

### 3.3.3. I/O modülleri

Analog ve dijital I/O modülleri FieldPoint içerisinde bir arada kullanılabilir. Değiştirilebilir ve kendi kendini konfigüre edebilir yapıdadır. Modüller, 8 ve 16 kanallı olup her kanalı ayrı ayrı ayarlanabilir. Sensör ve dış ortamlara direk bağlanabilme özelliği kullanım süresini azaltmaktadır. Programlanabilir güç açma konumu sayesinde yazılım üzerinde gerekli hallerde sisteme güç verilebilir ve bu sayede sistem ömrü uzatılmış olur. Tüm sistemde olduğu gibi modüllerde  $-40 +70$  °C çalışma sıcaklığı bulunmaktadır. Bu sayede, panel sıcaklığı parametresinin MPPT üzerindeki etkileri endüstriyel standartlara göre oldukça iyi bir skalada incelenebilecektir.

FieldPoint, endüstriyel sensör ve kontrol uygulamalarında oldukça iyi analog ve dijital I/O çeşitliliğine sahiptir. Analog I/O için, kendi içerisinde bulunan sinyal koşullama sayesinde, direk olarak yüksek gerilim, miliamper ve milivolt seviyelerinde düşük akım ve düşük gerilim sinyalleri, termokupl' lar, RTD' ler veya Strain Gage gibi köprü devreleri bağlanabilir. Dijital I/O için, alçak ve yüksek gerilim dalgalanmaları için ve yine alçak ve yüksek AC gerilim kaynakları için hazır sinyal koşullayıcılar bulunur. Tüm modüller; 2 telli akım döngüleri bağlamak veya sensörleri beslemek için güç dağıtım köprüleri barındırır. Modüller, girişle backplane arasında  $2300 V_{rms}$  geçici aşırıgerilim koruması vardır. Kolay kurulum için, FieldPoint analog giriş modülleri, HotPnP (plug and play) işlemi ve konfigürasyon yazılımını otomatik tanıma özelliğine sahiptir. Yazılım geliştirme işlemi ise oldukça kolaydır. Çünkü autoscaling ile binary çevrim yapmadan, sistemden modüllere veri gönderip modüllerden veri alınabilir.

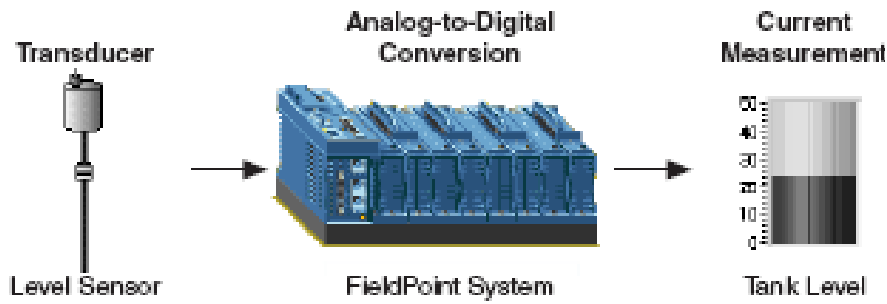
#### FP-AI-102, analog giriş modülü

MPPT için en önemli verileri oluşturan; panel akım ve gerilimi, inverter giriş ve çıkışları gibi veriler, yüksek gerilim olmaları sebebiyle FP-AI-102 Analog Giriş Modülü ile ölçülebilir. 12-Bit çözünürlüğe sahiptir.  $-40 +70$  °C çalışma sıcaklığı standarttır. Her kanalı yazılımla konfigüre edilebilir 6 gerilim aralığı mevcuttur.

$\pm 120$  V maksimum skalaya sahip olması sebebiyle söz konusu ölçümler rahatlıkla yapılabilir. Resim 3.4, AI-102 analog giriş modülünü göstermektedir.



Resim 3.4. NI FP-AI-102 8 kanallı analog giriş modülü



Şekil 3.11. Akım ölçümü için kullanılan FieldPoint sistemi

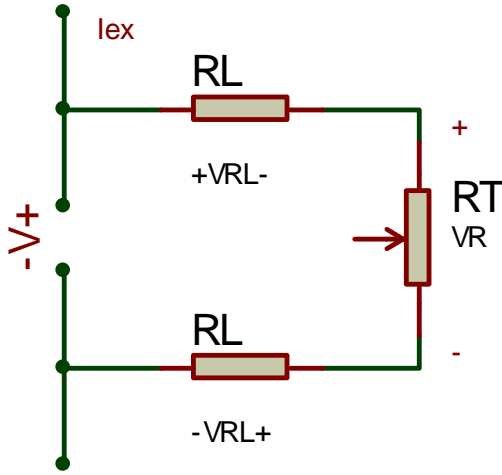
#### FP-RTD-122, 3-telli RTD modülü



Resim 3.5. NI FP-RTD-122 8 kanallı, 3 telli RTD modül

RTD, endüstride sıcaklık ölçümü için sıklıkla kullanılan bir algılayıcıdır. Sıcaklık ile direnç değeri değişir. Saf metallerin elektrik dirençlerinin, sıcaklık ile doğrusal

değişimi prensibine göre çalışan dönüştürücülerdir. Genellikle Nikel (Ni) ve Bakır (Cu) içerir, fakat Platinyum (Pt) çok daha fazla bilinir ve kullanılır. Geniş çalışma sıcaklık aralığı olması, doğruluğu ve kararlılığı Platinyum' un daha fazla seçilmesinde en belirleyici faktörlerdendir. Akım RTD üzerinden geçirilerek, DAQ' ın ölçebileceği gerilim değerlerini üretmesi sağlanır. Genelde düşük dirençlidirler (100 Ohm) ve düşük aralıklı değişim gösterirler (0,4 Ohm/°C' den az). Bu yüzden tel konfigürasyonu yapılmalıdır. Şekil 3.12' de 2-telli RTD görülmektedir. Daha iyi ve güvenilir ölçümler için 4-telli RTD daha iyi bir çözümdür.



Şekil 3.12. 2-telli RTD ölçümü

Maliyeti azaltmak için RTD' ler 3-telli olarak da bulunabilir. 3-telli RTD Wheatstone Köprüsü konfigürasyonda en verimli olarak çalışan çeşididir.

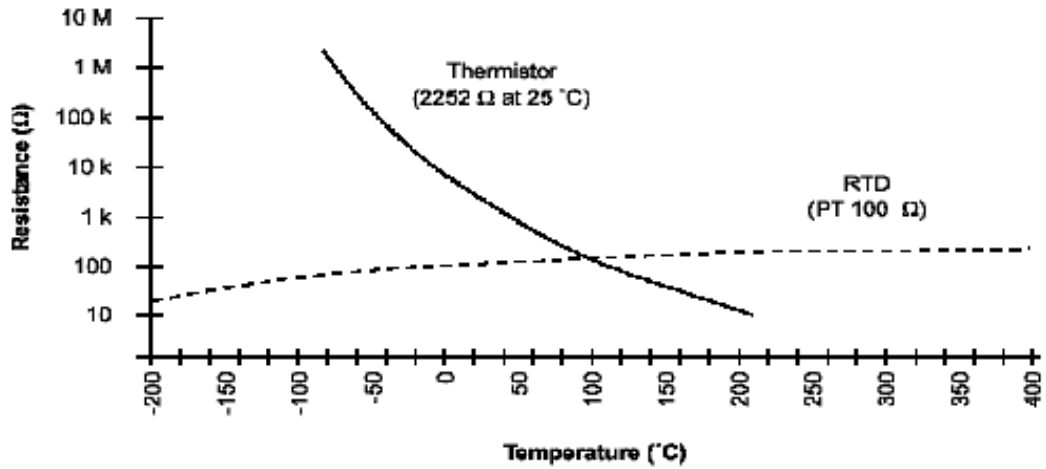
Bu çalışmada, RTD' nin değişik sıcaklık değerlerine vereceği cevabın görülmesi ve hesaplanabilmesi yapılarak panel sıcaklığının, üretilen enerjinin verimine etkisi simule edilerek araştırılmıştır.





Şekil 3.13. Sıcaklık ölçümü için kullanılan FieldPoint sistemi

Bu tip çalışmalarda sıcaklık ölçümü için RTD kullanılmasının farklı nedenleri vardır. Bunların başında düşük maliyet, yeterli hassasiyet, kolay temin ve bakım sayılabilir. Şekil 3.14 RTD ve termistör arasındaki farklılıkları ortaya koymaktadır.



Şekil 3.14. RTD ve Termistör için karşılaştırmalı sıcaklık-direnç eğrileri

### 3.3.4. FP-TB-1 terminal tabanı

FP-TB-1 Terminal Tabanı, I/O modülleri için bağlantı yuvasıdır. Her modül için ayrı bir terminal tabanı gerekmektedir. Terminal Tabanı, sorunlu kurulum için makaslama dizaynına sahiptir. Böylece sistemi korur ve kayıpları önler. İletişim ve modül gücü için local bus kullanır. Resim 3.6, TB-1 terminal tabanı ve modül bağlantılarını göstermektedir.



Resim 3.6. Terminal taban bağlantıları

### 3.3.5. Bağlantı elemanları ve DC kaynak

PS-1: 20 V<sub>DC</sub>, 16 W, 120 V<sub>AC</sub>, PS-2: 24 V<sub>DC</sub>, 19 W, 100-240 V<sub>AC</sub>, PS-4: 24 V<sub>DC</sub>, 15 W, 90-264 V<sub>AC</sub>, PS-3: 13.8 V<sub>DC</sub>, 55 W, 90-264 V<sub>AC</sub> olmak üzere 4 güç kaynağı seçeneği vardır. Sert çalışma koşulları için güçlü endüstriyel kaplamaya sahiptir. Bus genişletici, seri ve ethernet kablosu bulunur. İlerde genişletilmesi muhtemel çalışma ve projelere uygundur.



Resim 3.7. PS-4: 24 V<sub>DC</sub>, 15 W, 90-264 V<sub>AC</sub>, DIN rail montajı

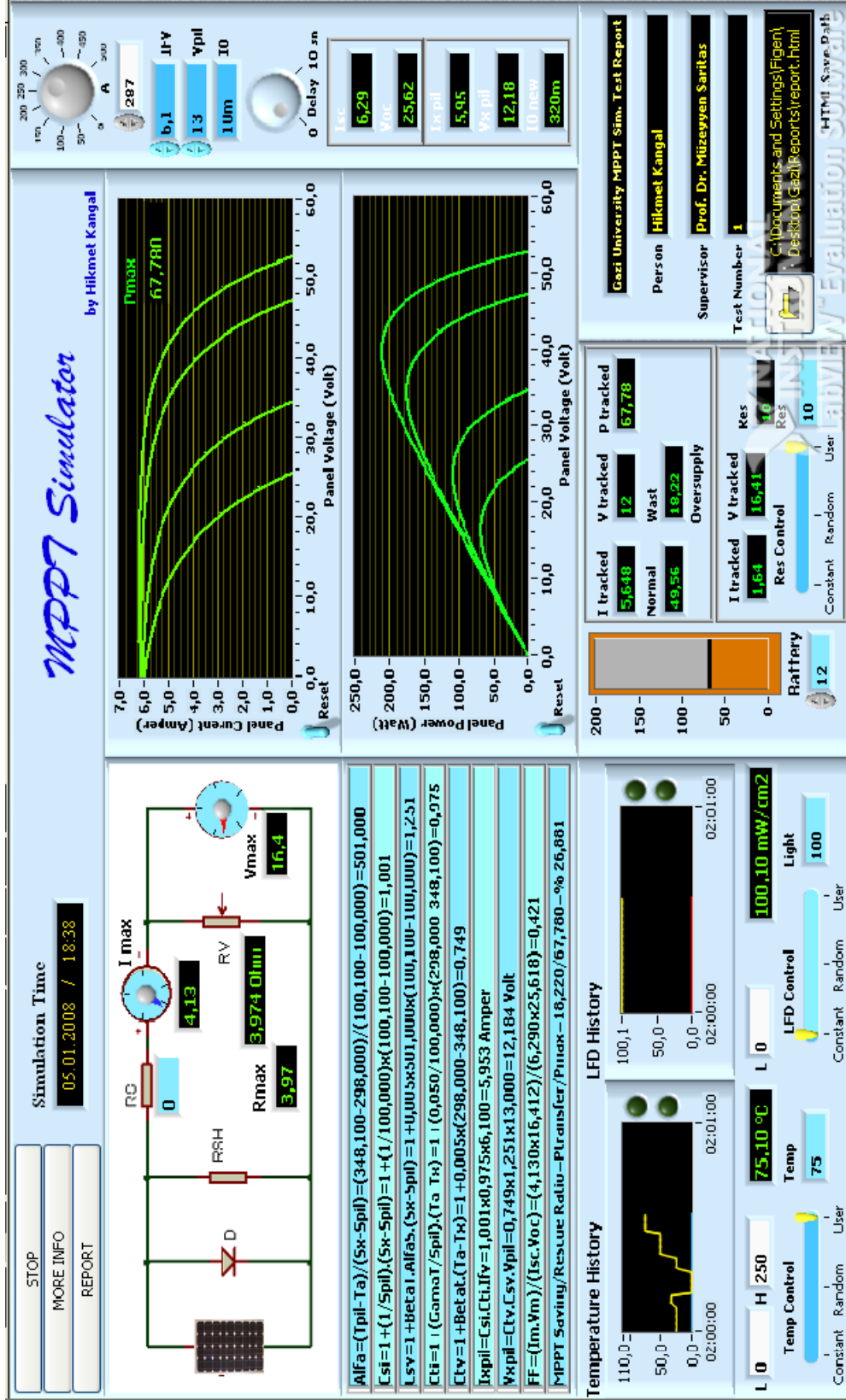
FieldPoint I/O modüllerinin tümü 4 güç kaynağından da beslenebilir veya 2 veya daha fazla güç kaynağı bank izolasyonu için kullanılabilir.

## 4. SİMÜLASYON

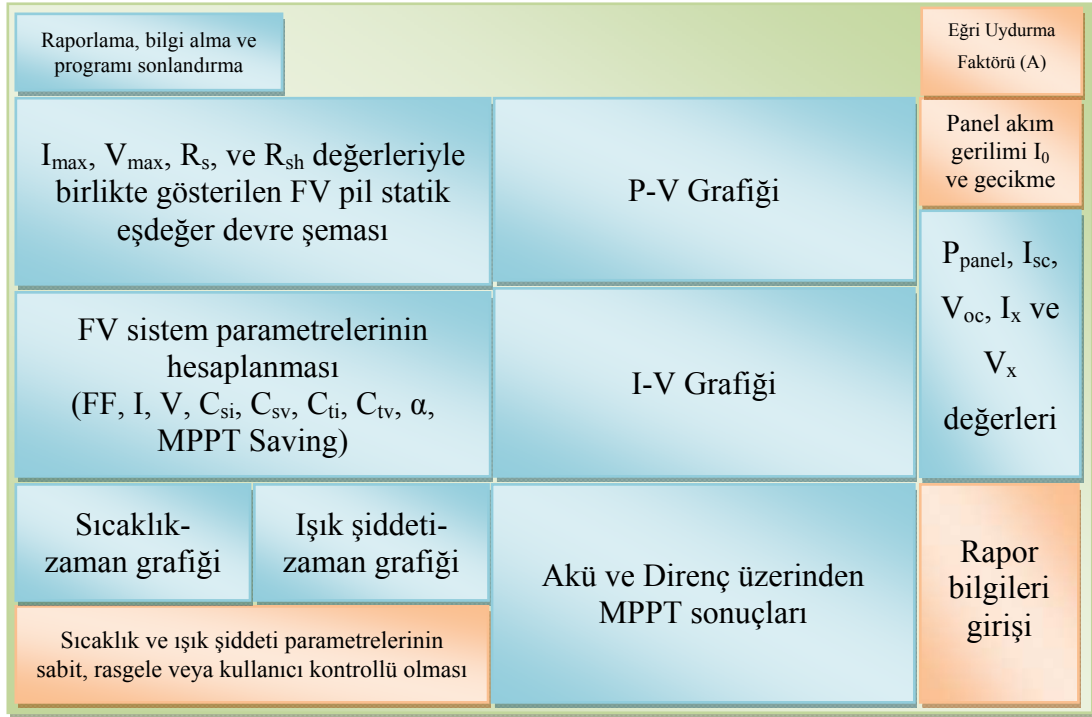
### 4.1. MPPT Simülasyonu

Şekil 4.1, FV pil analizinde kullanılan MPPT Simülatörünün ön panelini göstermektedir. Program, kullanıcının rahat kullanması ve anlaması için olabildiğince basit tasarlanmıştır. Şekil 4.2 ise MPPT.vi ön panelinin açıklama diyagramıdır. Diyagramda kırmızı ile gösterilen kısımlar kullanıcı tarafından girilmesi gereken bilgileri gösterir. Bu kısımlara girilen bilgiler, program tarafından referans olarak kabul edilir ve simülasyon işleminde direk olarak kullanılır. Diyagram üzerinde mavi ile gösterilen kısımlar ise, programın hesapladığı veya simule ettiği bilgileri göstermektedir. Kırmızı bölgelere girilen bilgiler mavi bölgelerde sonuçlandırılır.

Kullanıcı, programı çalıştırmadan önce veya çalıştırdıktan sonra parametre girme işlemini yapabilir. Ana değerler olan sıcaklık, ışık şiddeti,  $I_{FV}$ ,  $V_{pil}$ , Delay,  $R_s$  ve A değerlerinin girilmesiyle simülasyon işlemi eksiksiz başlamış olur. Sol üst kısımda bulunan “RUN” butonu çalıştırıldığında program simülasyon işlemine başlamaktadır. İlk analiz yapılırken kullanıcı, ekran üzerinden; akım, gerilim, güç, sıcaklık ve ışık şiddeti seviyesi, I-V ve P-V karakteristikleri, MPPT sonucu verim artış miktarları ve ara hesaplamaları gerçek zamanlı olarak alabilmektedir. Programın veriyi alma ve analiz etme sıklığı kullanıcıya bırakılmıştır. Böylece istenilen anda program yavaşlatılarak verinin takibi daha iyi yapılabilecektir. Bu işlem “Delay” butonu ile gerçekleştirilir. Girilen değer arka planda çalışan algoritmanın frekansını değiştirerek MPPT optimizasyonu sağlamaktadır. Tüm bu işlemler için kullanılan modelleme ve algoritmalar 2. bölümde açıklanmıştır.



Şekil 4.1. MPPT.vi ön paneli



Şekil 4.2. MPPT.vi ön panel açıklama diyagramı

Program çalışırken kullanıcı herhangi bir anda genel bilgi almak isterse, sol üst kısımda bulunan “MORE INFO...” butonuna basarak yapılan işlem ve kullanılan teknikler hakkında daha ayrıntılı bilgi alabilmektedir. Böylece konuda yeterli bilgisi olmayan kullanıcıların da programı daha rahat kullanması ve daha iyi kavrayabilmesi amaçlanmıştır. “MORE INFO...” kısmına gömülen bilgiler; akış diyagramları, formülasyonlar ve temel teorilerden oluşmaktadır.

Programın sol alt kısmında bulunan “Temperature History” ve “Light History” kısmı, analiz sırasında sıcaklık ve ışık şiddeti parametrelerinin takibi için kullanılmaktadır. Sıcaklık ve ışık şiddetinin simülasyona dahil edilmesi için kullanıcıya üç farklı seçenek sunulmuştur. Kullanıcı “Temp Control” ve “LFD Control” değişkenlerini kullanarak, “Constant”, “Random” veya “User” seçeneklerinden birini seçebilir. “Constant” seçeneği, sıcaklık ve ışık şiddeti parametreleri için sabit olarak tanımlanan değerleri gösterir. Bu değerler; standart koşul olarak kabul edilen, sıcaklık için 25 °C ve ışık şiddeti için de 1000 mW/cm<sup>2</sup> olarak belirlenmiştir. “Random” seçeneği ise, Şekil 4.8 ile gösterilen Simulator.vi programı ile simülasyon

işlemini gerçekleştirir. Girilen değerlere göre akım ve gerilim değerlerinin, rastgele sıcaklık ve ışık şiddeti değişimlerine nasıl tepki verdiği buradan takip edilebilmektedir. “User” seçeneği ise söz konusu parametrelerin kullanıcı tarafından girilebilmesine imkan tanır. Kontrollerin yanındaki küçük pencerelere girilen değerler direk olarak simülasyona katılmaktadır. Böylece kullanıcı, istediği çevre koşullarını oluşturabilir ve panelin tepkisi ile MPPT kazanımını görebilir.

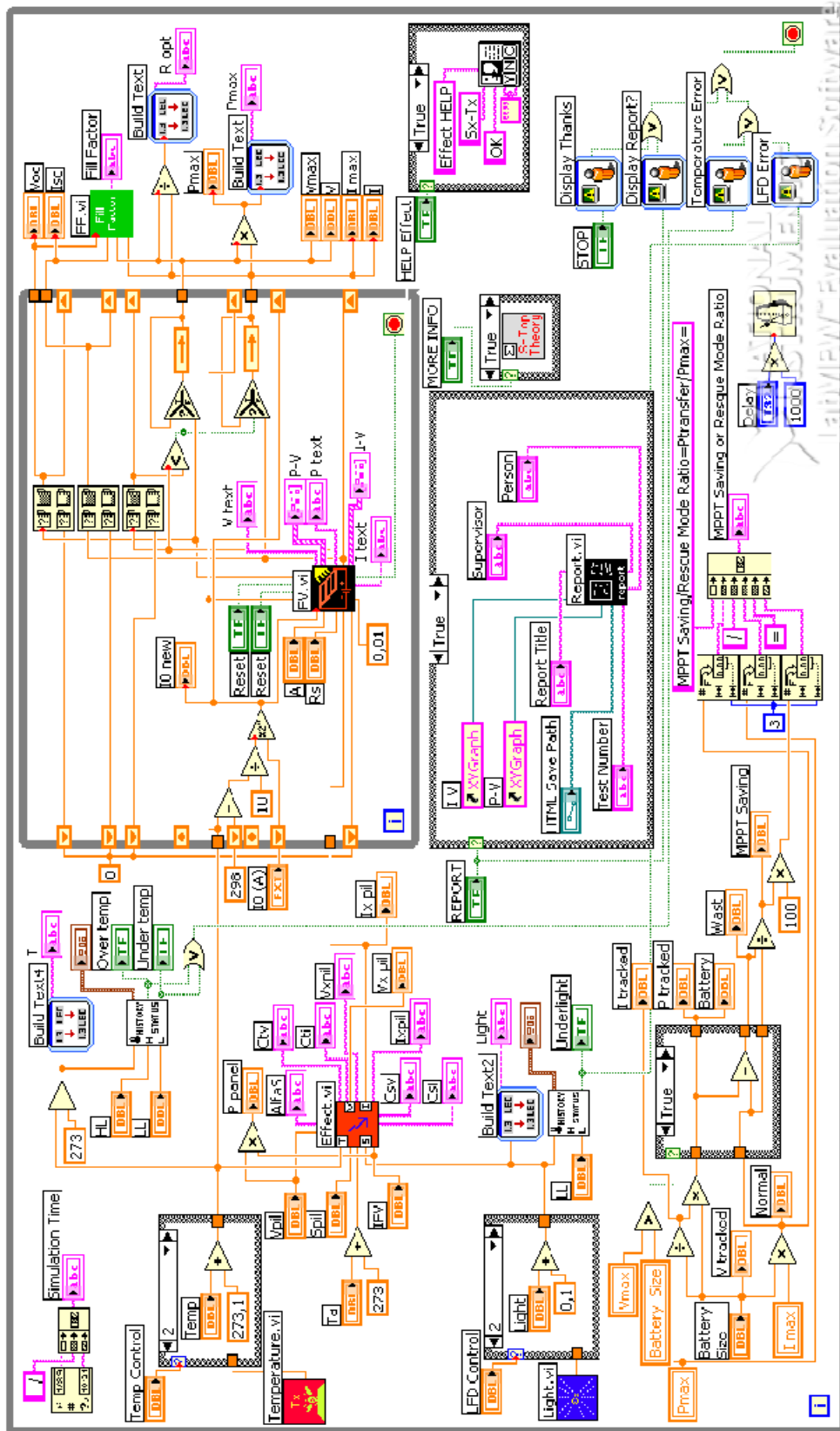
Burada sıcaklık parametresi güvenlik açısından ayrı bir önem taşımaktadır. Çünkü sıcaklığın aşırı yükselmesi veya aşırı düşmesi durumunda, kullanılan donanım zarar görebilmektedir. Programda, bu tür durumlara bir önlem olması açısından etkili bir alarm mekanizması geliştirmiştir. Kullanıcı tarafından belirlenebilen alt ve üst limit sıcaklık değerleri sayesinde, kullanılan ortama daha iyi uyum sağlayabilen bir yazılım geliştirilmiş olur. Örneğin bahar aylarında güney kesimlerde yapılan ölçüm sonuçlarıyla kuzeyin soğuk kesimlerinde yapılan ölçüm ve analiz sonuçları farklı olacaktır. Bu sebeple güneyin sıcak kesimlerindeki kullanıcı, sıcaklık üst limit değerini artırarak programın sık sık alarm vererek işlemin kesilmesini engelleyebilecektir. Ayrıca, kullanıcı tarafından belirlenen limit değerlere,  $\pm 5$  °C yaklaşımları halinde grafikler üzerinde bulunan sarı led’ ler yanacak ve kullanıcıya koşulların tehlike sınırına yaklaştığını haber verecektir. Limitlerin aşılması halinde ise, program bir uyarı mesajı vererek programı sonlandırır. Program, real-time uygulamalarda, alarm durumunda gücü keserek sistemi kurtarabilir.

Ön panelde bulunan statik eşdeğer devre şeması üzerinde;  $R_s$ ,  $R_{sh}$ ,  $I_{max}$  ve  $V_{max}$  değerleri gösterilir. Böylece daha görsel ve anlaşılması kolay bir tasarım amaçlanmıştır.

Sağ kısımda bulunan I-V ve P-V grafikleri, panel parametrelerine göre çizilmiştir. Simülasyonun farklı değer ve parametreler için yapılması durumunda, grafik ekran üzerinde oluşabilecek karmaşıklığı gidermek amacıyla, her iki grafiğe de “Reset” butonları eklenmiştir. Burada amaç, farklı ölçümler arasında programı sonlandırmaya gerek kalmadan işleme devam edilebilmesidir.

Simülasyon işleminin her adımı, elde edilen veriler ile yapılan işlemler, analiz ve hesaplamaların hepsi, MPPT işleminin alt birimlerini oluşturmaktadır. Yapılan simülasyonda, birincisi akü diğeri ise yük üzerinden olmak üzere 2 tür MPPT işlemi gerçekleştirilmiştir. Tüm bu işlemlerden elde edilecek sonuç, sağ alt kısımda kullanıcıya aktarılır. Bu bölümde; MPPT işlemi sonucunda elde edilen akım, gerilim ve güç değerleri ile işlemin sisteme kazandırdığı veya sisteme aşırı yüklenmesi muhtemel olan güç miktarı gösterilir. Bu gücün, sistemde bulunan bir bataryayı doldurması da bu kısımda simule edilmiştir. Batarya boyutu, kullanıcı tarafından bu bölümde seçilir. MPPT işlemi, seçilen batarya boyutlarına bağlı olarak farklılık gösterir.

Şekil 4.3' de MPPT Simülatörünün genel blok diyagramı verilmiştir. Blok diyagram tasarlanırken, Bölüm 2.6.4' de açıklanan algoritmalar kullanılmıştır. Programın ana omurgası Değişim ve Gözlem Metodu' dur. Bu metoda göre önce sıcaklık ve ışık şiddeti değerleri simule edilmiş, ardından da bu parametrelerin aldığı değerlere göre akım, gerilim ve güç değerleri hesaplanmıştır. Ancak, ikinci bölümde açıklanan dezavantajları sebebiyle Değişim ve Gözlem Metodu üzerinde, bu dezavantajları giderecek bazı değişiklikler yapılmıştır. Artımlı Geçiş Metodunun MPPT sonlandırmasındaki avantajlı yönleri bu metoda eklenerek, daha verimli çalışan bir algoritma gerçekleştirilmiştir. Böylece maksimum güç noktası civarında gerçekleştirilecek osilasyonlar engellenmiş ve maksimum güç noktasına, programın daha az işlem yaparak daha çabuk ulaşması sağlanmıştır.



Şekil 4.3. MPPT Simulätörü blok diyagramı

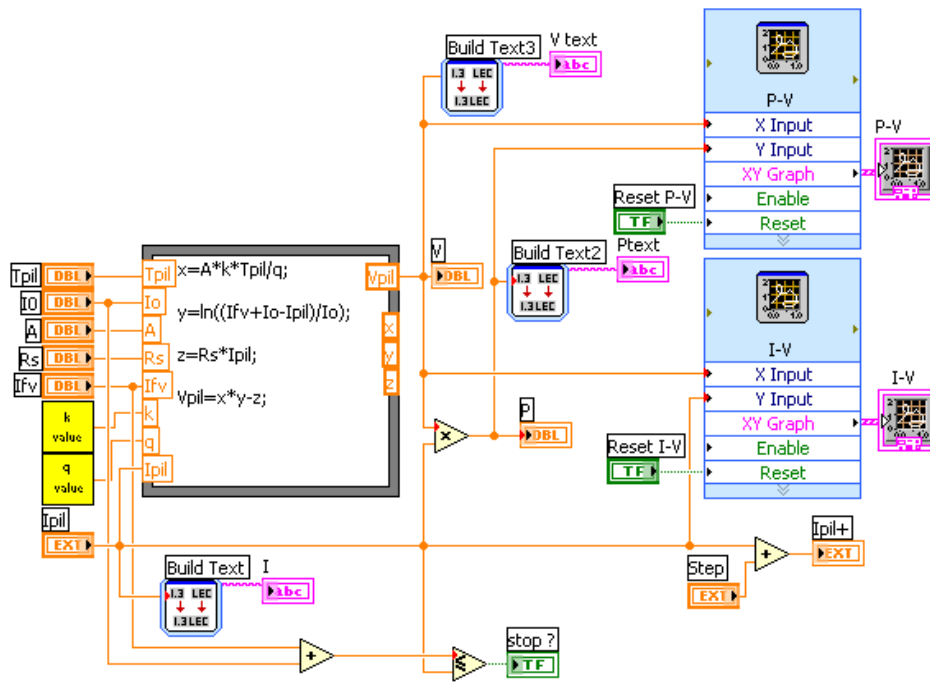


Program belli aralıklarla sıcaklık ve ışık şiddetini simüle etmektedir. Simüle ettiği her sıcaklık ve ışık şiddeti değeri için yeni akım ve gerilim değerlerini hesaplar. Hesapladığı akım değerini, aynı döngü içinde iterasyonun son değeri olarak atar. Sıfırdan başlayarak akım değerini kullanıcının belirlediği aralıklarla (step) artırmaya başlar. Akımın artan her yeni değeri için bir gerilim değeri bulur. X-Y düzleminde bu akım-gerilim değerlerine karşılık gelen yeri işaretler. Aynı döngü içerisinde, akım değeri yine artırılır ve yeni bir gerilim değeri bulunur. Program bu iki eksenini tekrar çakıştırarak işaretler. Her iterasyonda artan akım değeri, sıcaklık ve ışık şiddeti değerlerine göre elde edilen akım değerine ulaştığında son bir döngüye girer ve bir gerilim değeri bulur. Son iterasyonda elde edilen bu değer, FV panelin  $V_{OC}$  değeridir. Program bu kısımda Değişim ve Gözlem Metodundan farklılaşmaktadır. Elde edilen gerilim değeri sıfırın altına düştüğü an döngü sonlandırılır ve bir önceki iterasyonda elde edilen değerler, o ondaki sıcaklık ve ışık şiddeti değerlerine göre hesaplanan  $V_{OC}$  değeri olur. Döngüyü sonlandırmak için akımın değerini kullanmak programın sonlandırılmasında sorun çıkarmaktadır. Bu durum, step aralığının seçiminde hassas davranmayı gerektirir. Bu sebeple döngü sonlandırma işlemi gerilimin negatif olduğu an yapılmaktadır. Buraya kadar olan kısım, tek bir sıcaklık ve ışık şiddeti değeri için elde edilen akım-gerilim ve güç-gerilim grafiklerini elde etmek için yapılmıştır. Ancak sürekli elde edilen değerler için grafiklerin yenilenmesi gerekir. Bu nedenle, sıcaklık ve ışık şiddeti değerleri değiştiğinde tüm bu döngü yenilenmektedir.

Döngüler arasında elde edilen akım ve gerilim değerleri,  $V_{OC}$ ,  $I_{SC}$ ,  $I_M$  ve  $V_M$  değerlerini hesaplamak için karşılaştırma birimlerine aktarılır. Her döngü sırasında elde edilen değerler, sürekli bir önceki iterasyonla kıyaslanarak maksimum değerler bulunur (bkz Şekil 2.25, Şekil 2.27).

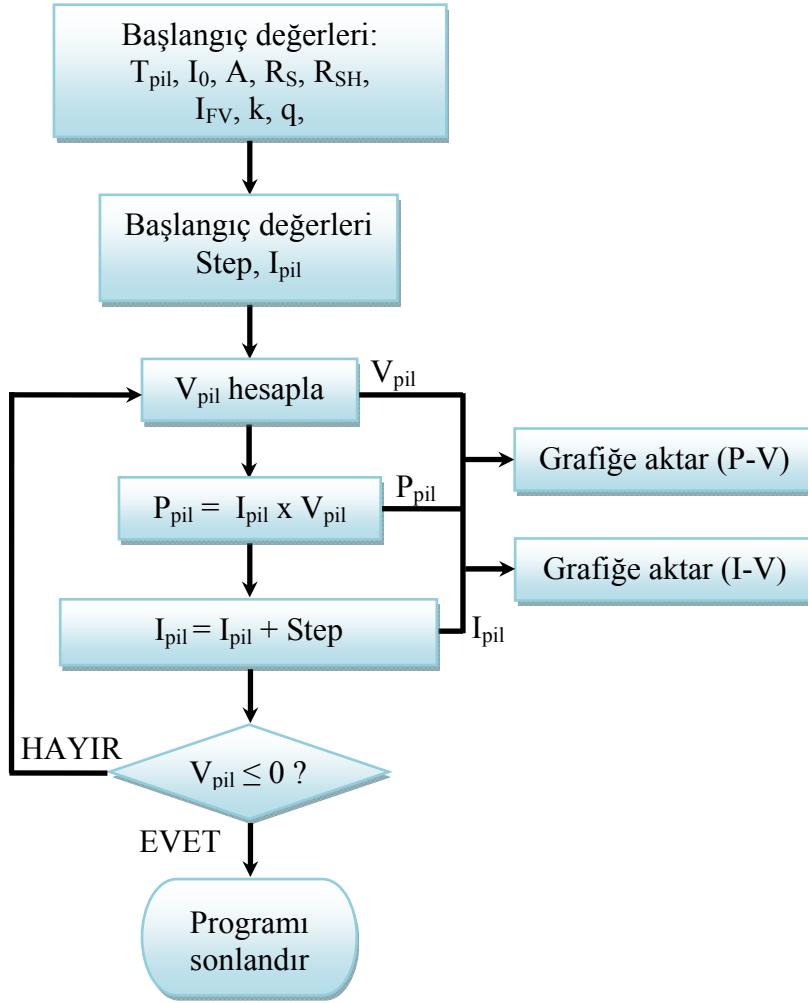
Şekil 4.4, ana programda çalışan bir subvi (alt program) olan FV.vi blok diyagramını göstermektedir. FV denklem (bkz. Denklem 2.11), bu program içinde hesaplanır. Formula.vi, girişine uygulanan  $T_{pil}$ ,  $I_0$ ,  $A$ ,  $R_S$ ,  $I_{FV}$ ,  $k$ ,  $q$  ve  $I_{pil}$  değerlerini kullanarak  $V_{pil}$  değerini hesaplar. Burada sayılan değerlerden,  $T_{pil}$  değeri, ana program üzerindeki Simulator.vi (bkz. Şekil 4.8) ile simüle edilir. Işık şiddetinin sıcaklık üzerindeki etkisi de önce Simulator.vi, sonra Effect.vi (bkz. Şekil 4.5) ile

hesaplanarak buraya aktarılır.  $I_{pil}$  değeri ise programın ana döngüsünü oluşturan asıl parametredir. Sıcaklık ve ışık şiddeti etkileri hesaba katılarak bulunan her yeni akım değeri, burada formül yardımıyla gerilim değerinin hesaplanması için kullanılır. Belirtilen diğer parametreler ( $I_0$ ,  $A$ ,  $R_s$ ,  $I_{FV}$ ,  $k$ ,  $q$ ) kullanıcı tarafından girilmesi gereken parametrelerdir. Yalnız  $I_0$  değeri, ilk iterasyonda kullanıcı tarafından tanımlanmakta, daha sonraki iterasyonlarda sıcaklığa bağlı olarak program tarafından hesaplanmaktadır (bkz. Denklem 2.9). Hesaplanan akım ve gerilim değerlerinin çarpımı ile güç değeri elde edilir. Sonuçta, her bir iterasyonda elde edilen değerler grafik ortamına aktarılır. Şekilden de görüldüğü gibi sonlandırma işlemi,  $I_{FV} + I_0$  değerinin  $I_{pil}$  değerinin altına düşmesiyle gerçekleştirilir.



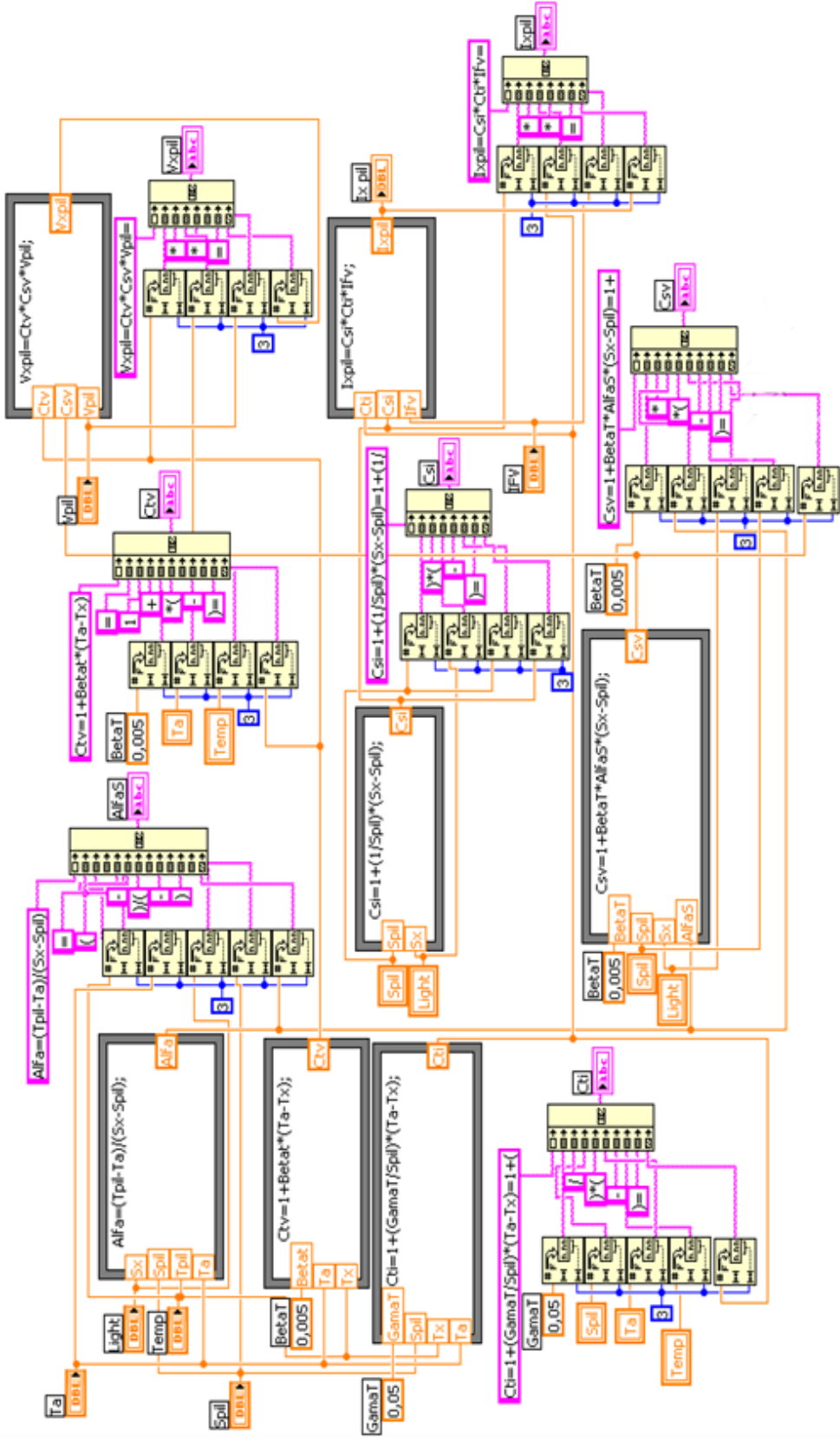
Şekil 4.4. FV.vi blok diyagramı

Şekil 4.5, FV parametrelerinin hesaplanması ve grafik ortama aktarılması için kullanılan FV.vi akış diyagramını göstermektedir.



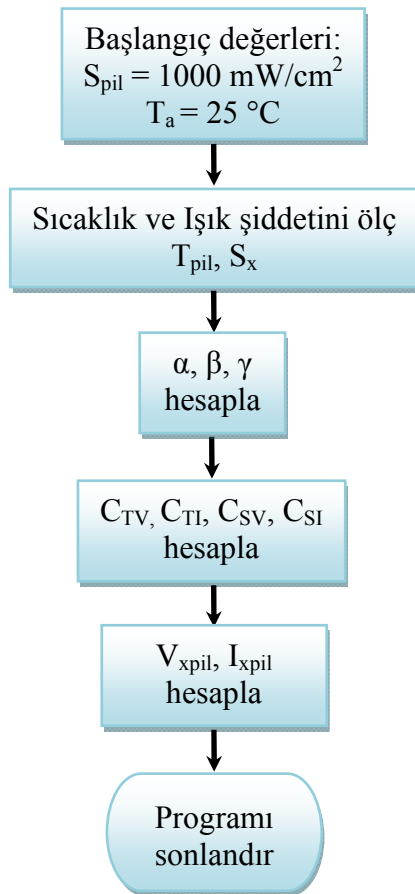
Şekil 4.5. FV.vi akış şeması

Şekil 4.6, sıcaklık ve ışık şiddeti parametrelerinin, akım ve gerilim üzerindeki etkilerini hesaplamak için kullanılan Effect.vi programının blok diyagramını göstermektedir. Bu program, formüllerin (bkz. Denklem 2.15, 2.16, 2.17, 2.18, 2.19, 2.20, 2.21) hesaplandığı yapılar ile bunların ana program ön paneli üzerinde adım adım takip edilmesini sağlayan yapılardan oluşur. Hesaplanan değerler ile yeni akım ve gerilim değerleri ( $V_{xpil}$ ,  $I_{xpil}$ ) burada bulunur. Elde edilen değerler, FV.vi programına aktarılarak yeni değerlere göre grafik ortamına aktarılmış olur.



Şekil 4.6. Effect.vi blok diyagramı

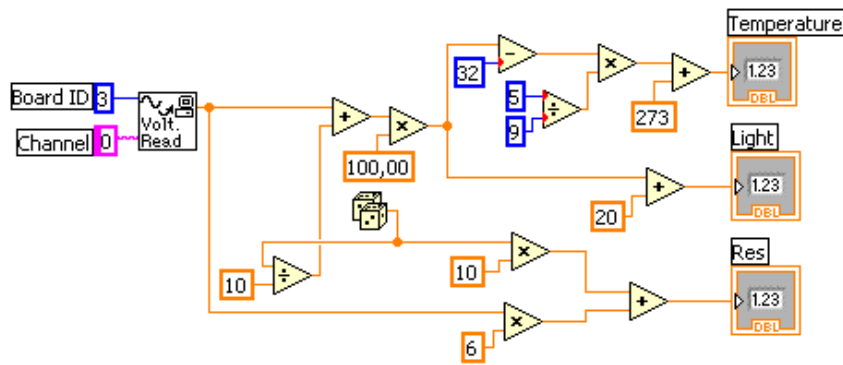
Ön panelde bulunan ve formüllerle hesaplamaların yapıldığı bu kısım, kullanıcının, yapılan işlemleri görsel olarak takip edebilmesini sağlar. Sıcaklık ve ışık şiddetinin hesaplanmasında kullanılan  $\alpha$ ,  $C_{si}$ ,  $C_{sv}$ ,  $C_{ti}$  ve  $C_{tv}$  parametreleri, bu parametrelerin etki etmesi sonucunda elde edilen  $I_{xpil}$  ve  $V_{xpil}$  değerleri, FF (Fill Factor-Dolum Faktörü) değeri ve yapılan işlemler sonucunda MPPT işleminin sisteme getirdiği kazanımlar da “MPPT Saving/ Rescue Ratio” kısmında kullanıcıya sunulmaktadır. Tüm işlemler gerçek zamanlı olarak gerçekleşir. Her yeni değer, döngü ve iterasyon sonrasında formüller üzerindeki hesaplamalar değişmekte ve kullanıcıya aktarılmaktadır. Böylece, program üzerindeki grafiklerle ilgili daha ayrıntılı bilgiler kullanıcıya sunulmaktadır.



Şekil 4.7. Effect.vi akış şeması

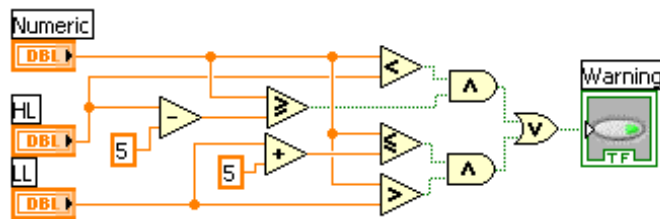
Şekil 4.8, sıcaklık, ışık şiddeti ve yükün simule edildiği Simulator.vi alt programının blok diyagramını göstermektedir. Labview kütüphaneleri içinde hazır bulunan Demo

Voltage Read.vi programı sayesinde, PC board sıcaklığı ölçülüp simülasyon ortamına aktarılmaktadır. Yapılan matematiksel işlemler; ana programa, sıcaklık biriminin °C, ışık şiddeti biriminin mW/cm<sup>2</sup> ve yük biriminin de ohm biriminden uygun değerler olarak verilmesini sağlamak için yapılmıştır. Demo Voltage Read.vi programı, işlemi periyodik olarak gerçekleştirir. Bu nedenle belli aralıklarda elde edilen simülasyon sonuçları aynı olur. Bu durumu engellemek için, Random fonksiyonu uygun yerlere ilave edilerek simülasyonun kendini tekrarlamaması ve dolayısıyla gerçeğe daha uygun olması sağlanır.



Şekil 4.8. Simulator.vi blok diyagramı

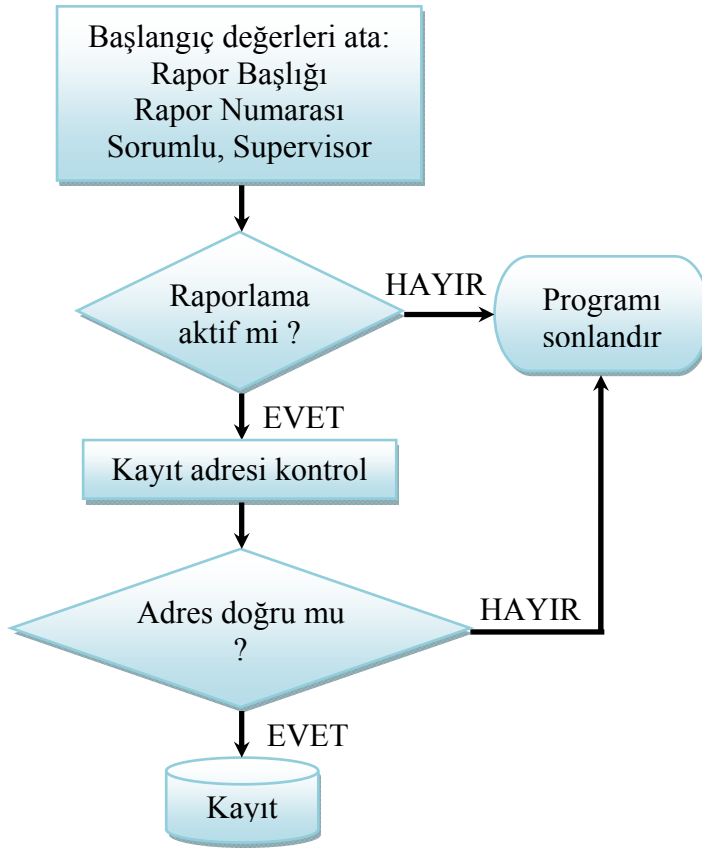
Şekil 4.9, sıcaklık ve ışık şiddeti için kullanıcı tarafından belirlenen limit değerlerine, simülasyon değerlerinin yaklaşması ile uyarı veren Warning.vi programının blok diyagramını göstermektedir. Hem sıcaklık hem de ışık şiddeti için belirlenen uyarı sınırı  $\pm 5$  birimdir.



Şekil 4.9. Warning.vi blok diyagramı

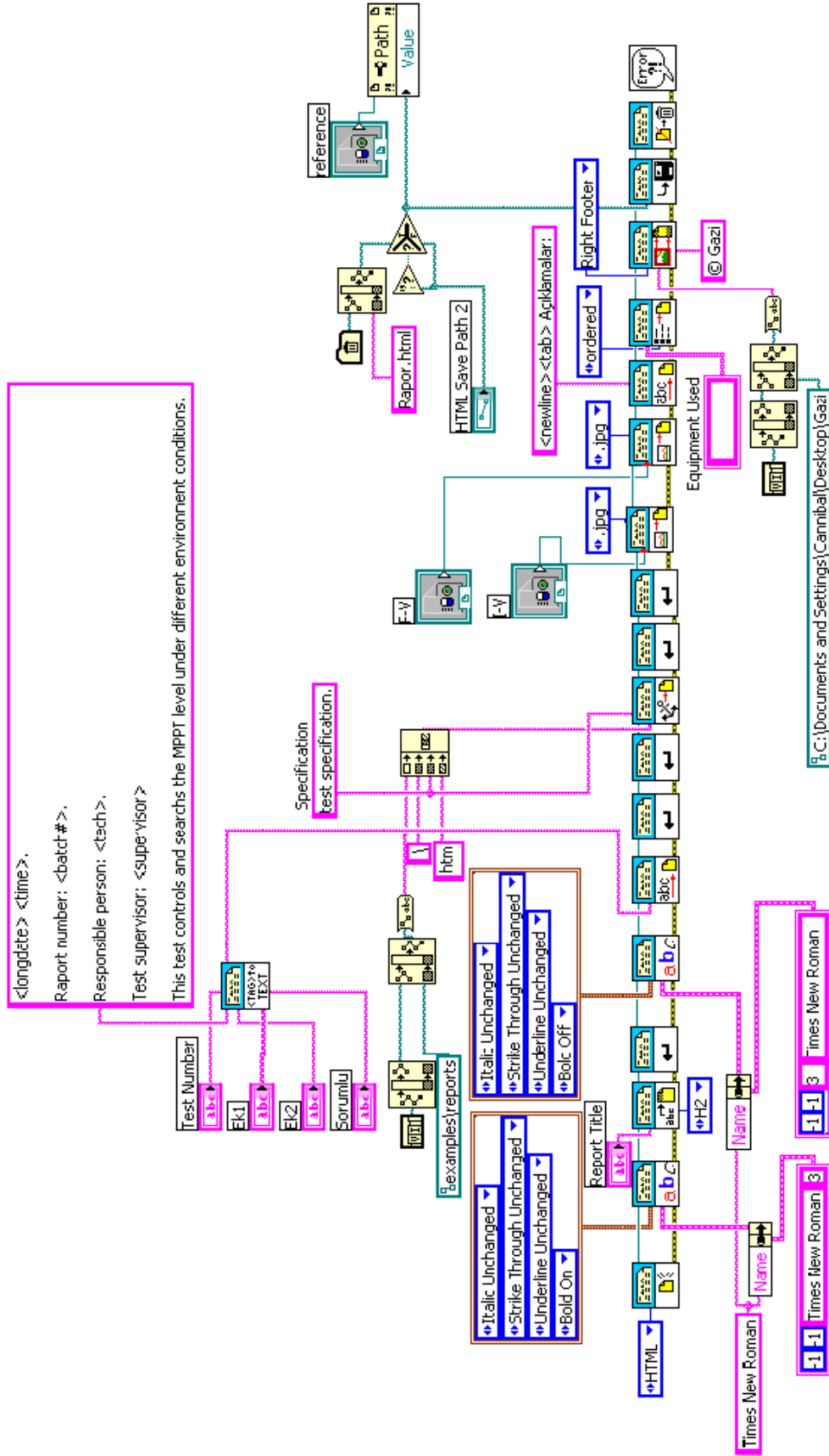
Şekil 4.10, Report.vi programının akış diyagramını göstermektedir. Program, kısaca simülasyonu yapılan sistemin; akım, gerilim, güç, maksimum güç noktası, sıcaklık,

ışık şiddeti, zaman, kazanç, verim gibi teknik bilgilerinin, veri kaybının engellenmesi amacıyla veya daha sonra kullanmak üzere disk üzerinde kayıt altına alınması işlemini gerçekleştirir. Kullanıcı, ana program ön paneli üzerindeki isim, supervisor, test number gibi gerekli bilgileri girdikten sonra “Report” butonuna bastığında, o an simülatör üzerinde koştan tüm bilgileri kayıt altına alır. Simülasyon işlemi devam ederken veya işlemin tamamlanmasından sonra, kullanıcı, kayıt altına aldığı tüm bilgileri Explorer programı aracılığıyla görebilir.



Şekil 4.10. Report.vi akış şeması

Şekil 4.11, Report.vi programının blok diyagramını göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi program, kullanıcının isteklerine uygun raporlar hazırlanabilmesi için esnek yapıda tutulmuştur.

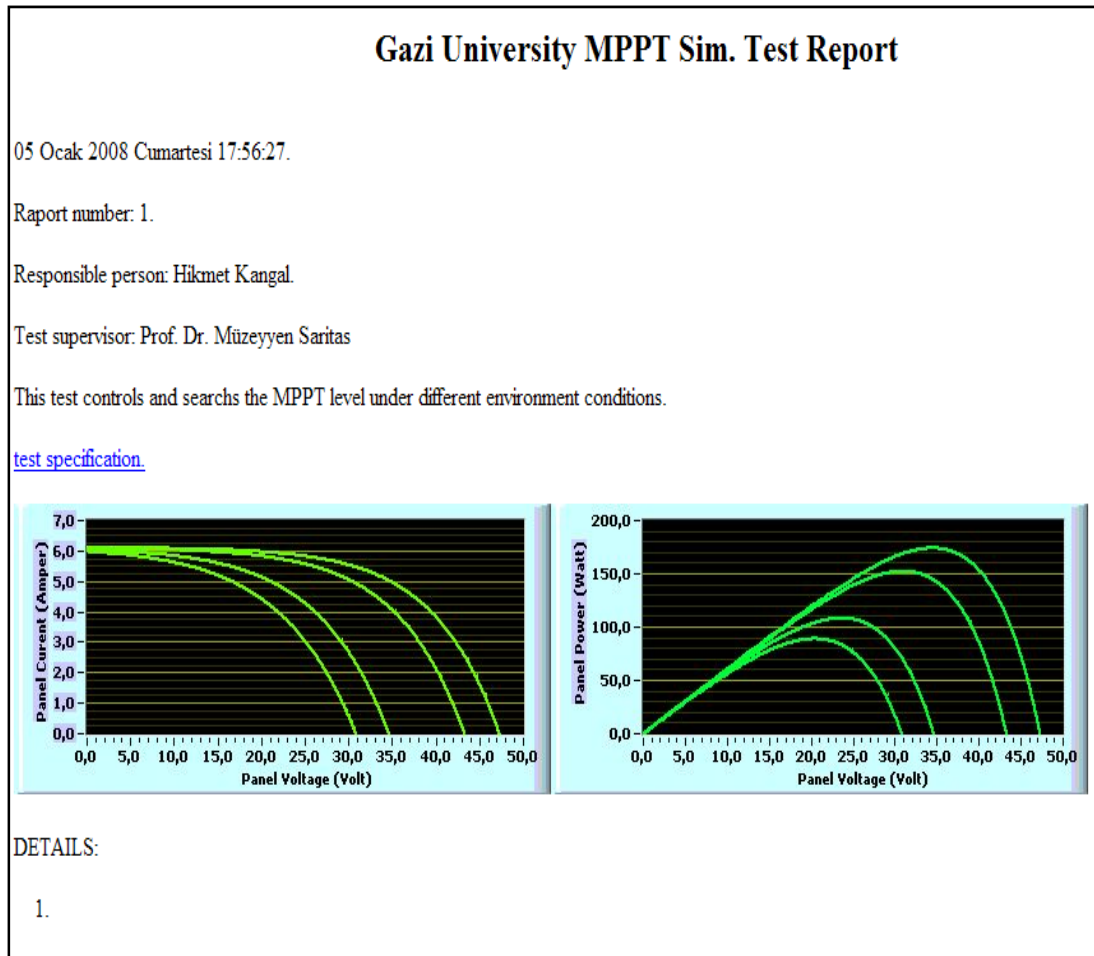


Şekil 4.11. Report.vi blok diyagramı



Şekil 4.12 ise örnek bir rapor çıktısını göstermektedir. Raporlama işleminden önce girilen kişisel bilgiler sayesinde, programın yalnızca belirli yerlerde, belirli kişiler tarafından kullanılması ve belirli işlemlerin raporlanmasının engellenerek daha endüstriyel bir anlam kazandırılması hedeflenmiştir.

Test raporu, kullanıcının, FV sistemle ilgili olabildiğince fazla bilgi almasını amaçlamıştır. Simülasyonun yapıldığı tarih, ön panelden girilen bilgiler (isim, kullanıcı, test numarası...), I-V ve P-V grafikleri, akım, gerilim, güç ve yük değerleri ile MPPT işlemi sonucunda sistemin kazanımı gibi bilgiler rapor üzerine aktarılmıştır. Ayrıca, raporun alt kısmına da gerekli açıklamaların kullanıcı tarafından girilebilmesini sağlayan “DETAILS” bölümü bulunur.

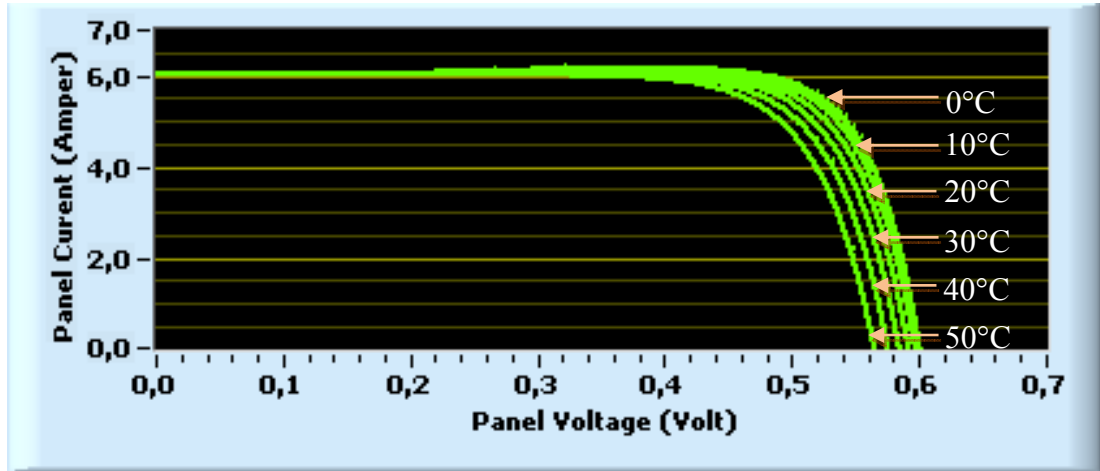


Şekil 4.12. Örnek Report.vi raporu

## 4.2. Simülasyon Sonuçları

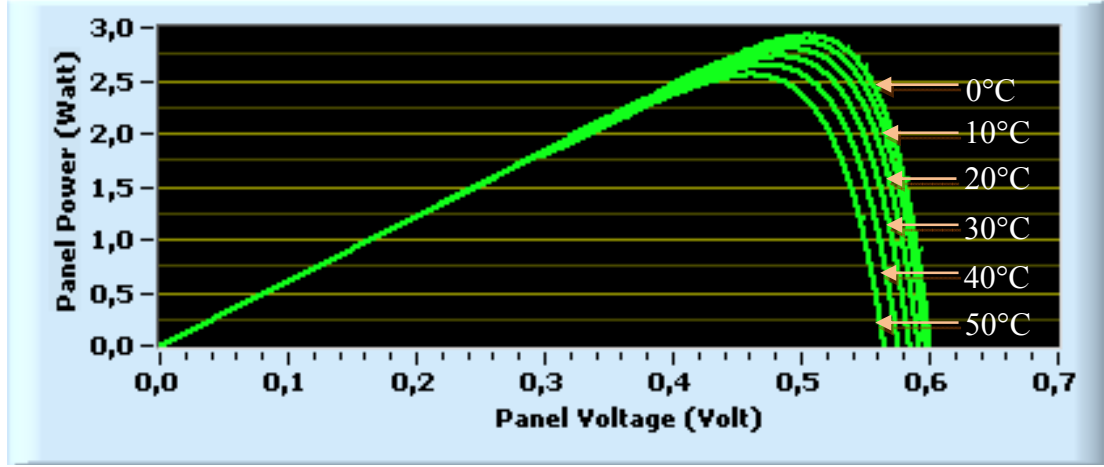
### 4.2.1. Sıcaklık

Şekil 4.13' de sıcaklık parametresinin, FV pilin çıkış gerilimi ve akımını olumsuz yönde etkilediği görülmektedir. Bunun nedeni; sıcaklığın artmasıyla eklem üzerindeki potansiyel engelin azalması ve ışıkla azalacak olan değer düşmüş olmasıdır. Ayrıca sıcaklık artışına bağlı olarak, kaçak akımın artması ve bu akımın ısıya dönüşmesi de potansiyel engelini azaltmaktadır. Kaçak akım ve ışık akımı toplam akımı vermektedir. Kaçak akımın küçük olması, toplam akıma önemli bir etki sağlamamaktadır. Sıcaklığın gerilim üzerindeki etkisi, akıma göre daha büyüktür.



Şekil 4.13. Sıcaklık simülasyonu ile akım-gerilim değişimi

Şekil 4.14' de, FV pilin çıkış gücü-akım eğrisinin sıcaklıkla değişimi görülmektedir. Şekilde, panel gücünün iki ayrı noktada sıfıra eşit olduğu görülmektedir. Şeklin en solunda, panel gerilimi sıfır olduğunda güç sıfır olmakta; diğer sıfır güç noktası ise, panel geriliminin maksimum olduğu açık devre konumunda oluşmaktadır. Bu eğrilerde, gücün maksimum olduğu noktalarda ( $P_m$ ) ise, panel gerilimi  $V_m$  ve akımı  $I_m$  değerlerini almaktadır. Şekilde, sıcaklık artışı, sadece panel gerilimini değil, maksimum güç noktasını da etkilemiş ve aşağıya çekmiştir. Toplam 50 °C' lik bir sıcaklık artışı  $V_{oc}$ ' de 10 V,  $P_m$ ' de 40 W' lık bir düşüşe neden olmuştur.



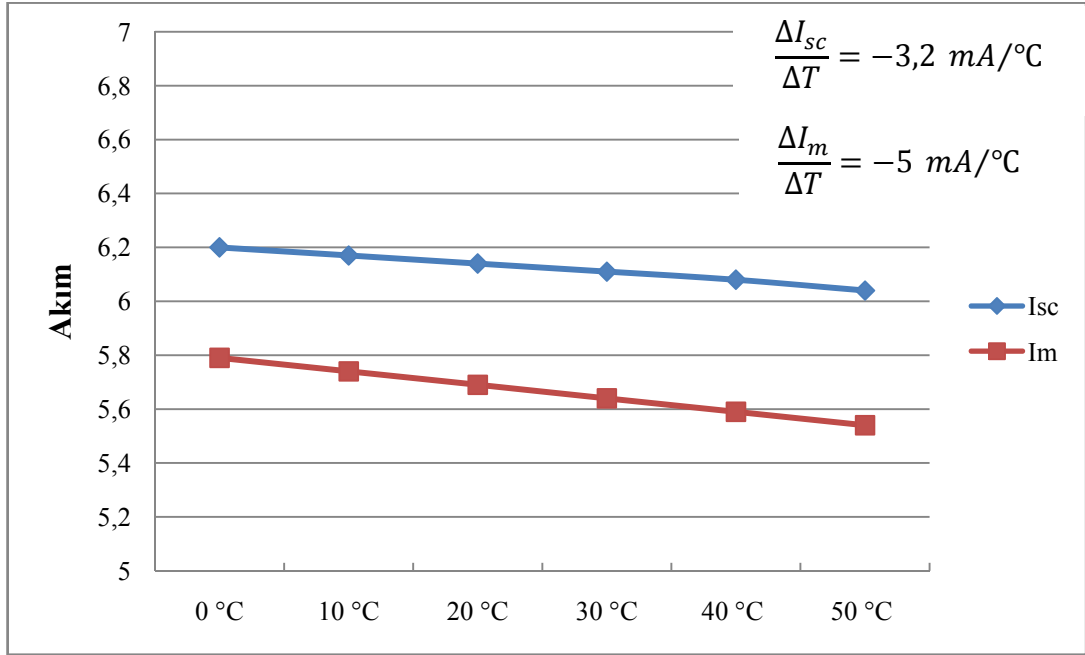
Şekil 4.14. Sıcaklık simülasyonu ile güç-gerilim değişimi

Çizelge 4.1' de ölçülen değerler için;  $I_{FV}=6,1$  A,  $V_{pil}=15$  V,  $I_0=1$   $\mu$ A,  $R_s=0$   $\Omega$ ,  $S=100$   $mW/cm^2$ ,  $A=1,5$  alınmıştır.

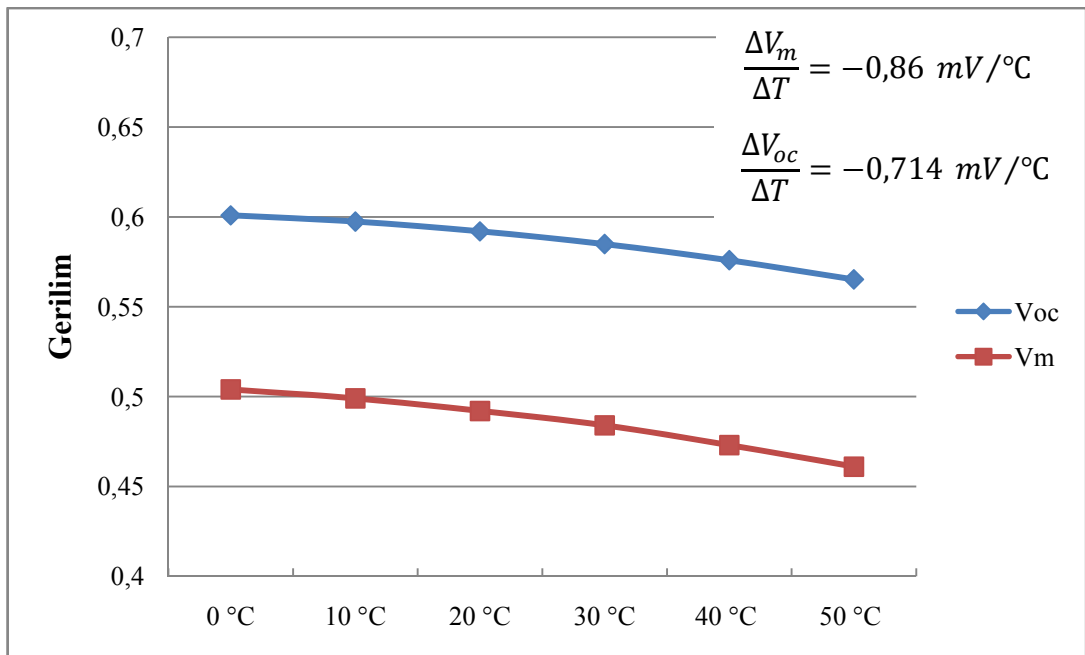
Çizelge 4.1. Sıcaklık simülasyonu ile  $I_m$ ,  $V_m$ ,  $P_m$  değerleri tablosu

Sıcaklık (°C)	$I_m$ (Amper)	$V_m$ (Volt)	$P_m$ (Watt)	$I_{sc}$ (Amper)	$V_{oc}$ (Volt)	FF
0	5,79	0,504	2,921	6,2	0,6009	0,784
10	5,74	0,499	2,866	6,17	0,5974	0,778
20	5,69	0,492	2,802	6,14	0,592	0,771
30	5,64	0,484	2,728	6,11	0,5849	0,763
40	5,59	0,473	2,646	6,08	0,5759	0,756
50	5,54	0,461	2,555	6,04	0,5652	0,748

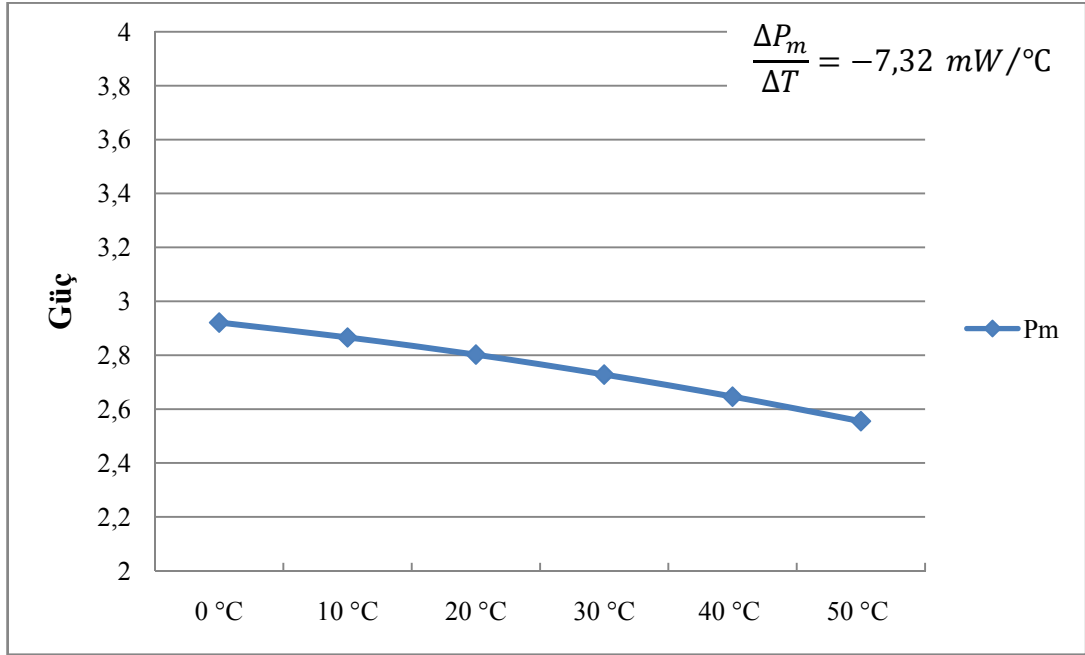
Maksimum akım, gerilim ve güç değerleri sıcaklıkla azalırken,  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  ve dolayısıyla FF değerlerinin de bu azalmalara bağlı olarak azalması, sırasıyla Şekil 4.15, 4.16, 4.17 ve 4.18' de verilmiştir.



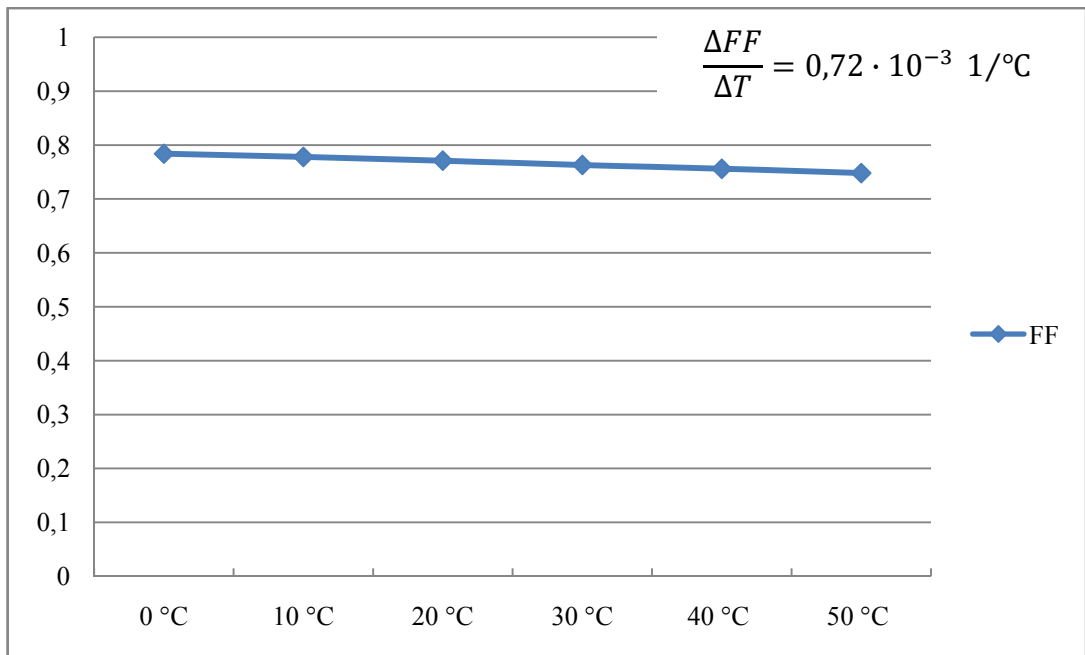
Şekil 4.15. Sıcaklık simülasyonu ile elde edilen akım-sıcaklık eğrileri



Şekil 4.16. Sıcaklık simülasyonu ile elde edilen gerilim-sıcaklık eğrileri



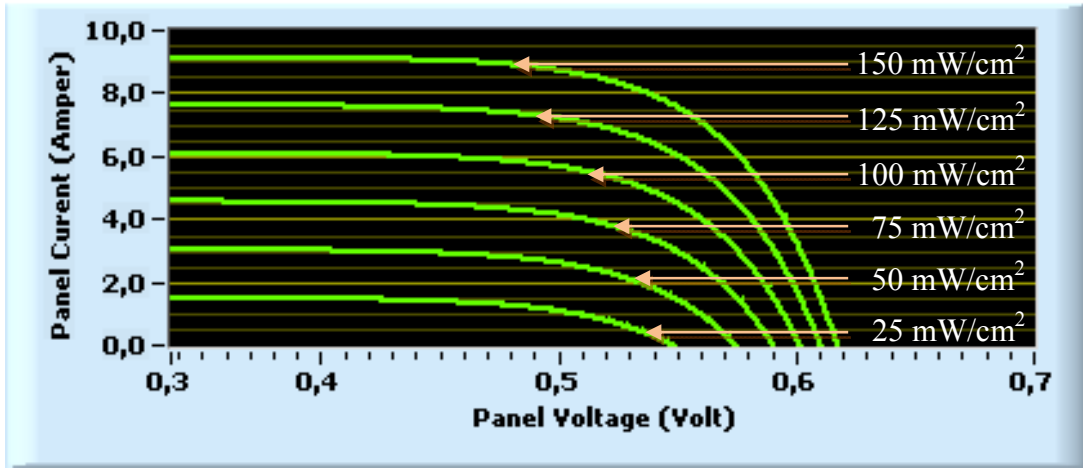
Şekil 4.17. Sıcaklık simülasyonu ile elde edilen güç-sıcaklık eğrileri



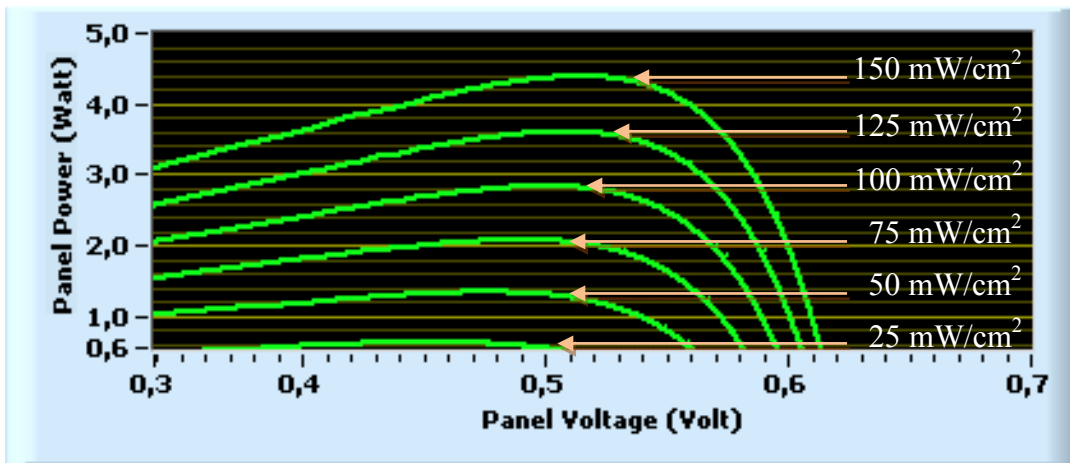
Şekil 4.18. Sıcaklık simülasyonu ile elde edilen FF-sıcaklık eğrisi

#### 4.2.2. Işık şiddeti

FV panellerin verimini etkileyen en önemli parametre ışık şiddetidir. Sıcaklık değişimine göre, akım ve gerilim değerlerini çok daha fazla etkilemektedir. Ancak sıcaklık etkisinin tersine, ışık şiddetindeki artışlar verimi olumlu yönde etkilemektedir (bkz. Bölüm 2.6.5.). Şekil 4.19 ve Şekil 4.20, 25 mW/cm<sup>2</sup> aralıklarla simüle edilmiş ışık şiddeti değişimlerine göre elde edilen I-V ve P-V grafiklerini göstermektedir.



Şekil 4.19. Işık şiddeti simülasyonu ile akım-gerilim değişimi

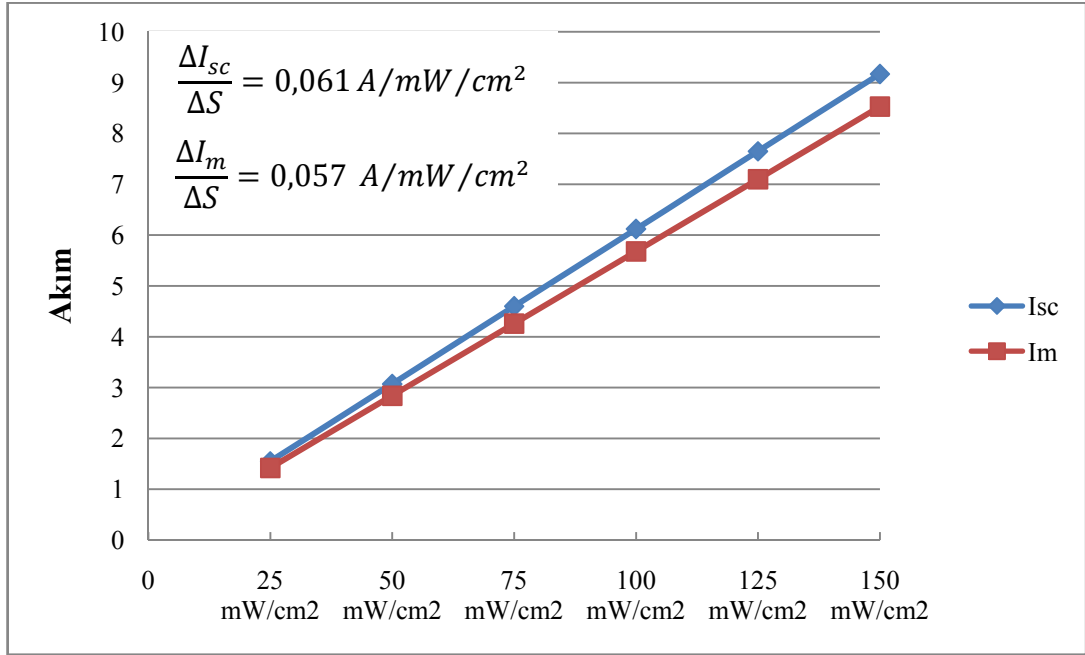


Şekil 4.20. Işık şiddeti simülasyonu ile güç-gerilim değişimi

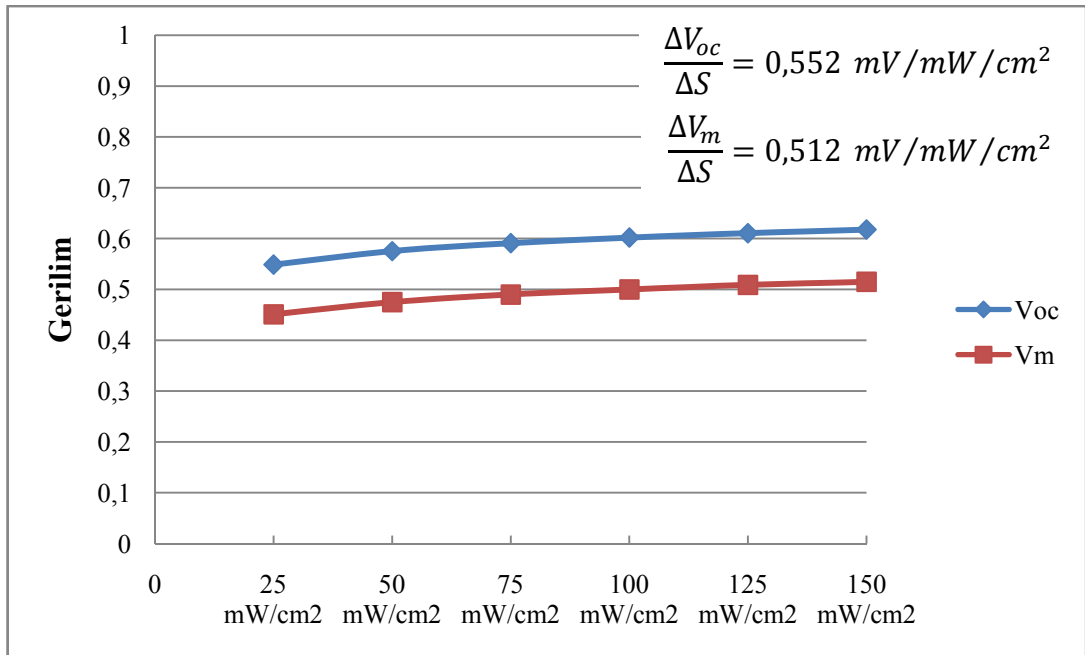
Çizelge 4.2' de ölçülen değerler için de, sıcaklık ölçümünde alınan değerler alınmıştır. Sabit sıcaklık değeri ise 25°C' dir. Çizelge 4.2' de görüldüğü gibi, her 25 mW/cm<sup>2</sup>' lik ışık şiddeti artışında I<sub>m</sub> akımının değeri yaklaşık 1,4 A artmaktadır. V<sub>m</sub> değeri de ışık şiddetiyle artmakta ancak asıl artış akımda görülmektedir. P<sub>m</sub> değeri her iki parametrenin çarpımıyla elde edildiğinden o da artmaktadır. Şekil 4.21, Şekil 4.22, Şekil 4.23 ve Şekil 4.24' de görüldüğü gibi, ışık şiddetindeki artış, sıcaklığın tersine maksimum akım ve gerilim değerleri arttırdığı gibi, I<sub>SC</sub>, V<sub>OC</sub> ve FF değerlerini de arttırmıştır.

Çizelge 4.2. Işık şiddeti simülasyonu ile I,V,P değerleri tablosu

Işık Şiddeti (mW/cm <sup>2</sup> )	I <sub>m</sub> (Amper)	V <sub>m</sub> (Volt)	P <sub>m</sub> (Watt)	I <sub>sc</sub> (Amper)	V <sub>oc</sub> (Volt)	FF
25	1,42	0,451	0,64	1,55	0,5487	0,753
50	2,84	0,475	1,349	3,07	0,5754	0,764
75	4,26	0,49	2,086	4,6	0,591	0,767
100	5,68	0,5	2,842	6,12	0,602	0,771
125	7,1	0,509	3,611	7,65	0,6106	0,773
150	8,53	0,515	4,392	9,17	0,6177	0,775

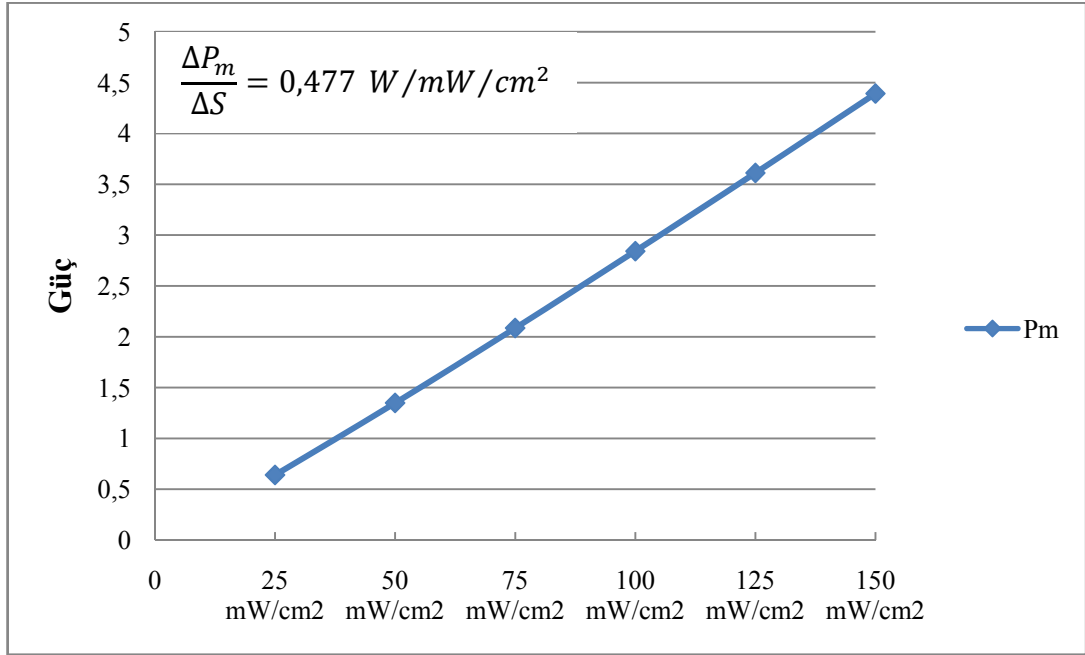


Şekil 4.21. Işık şiddeti simülasyonu ile elde edilen akım-ışık şiddeti eğrileri

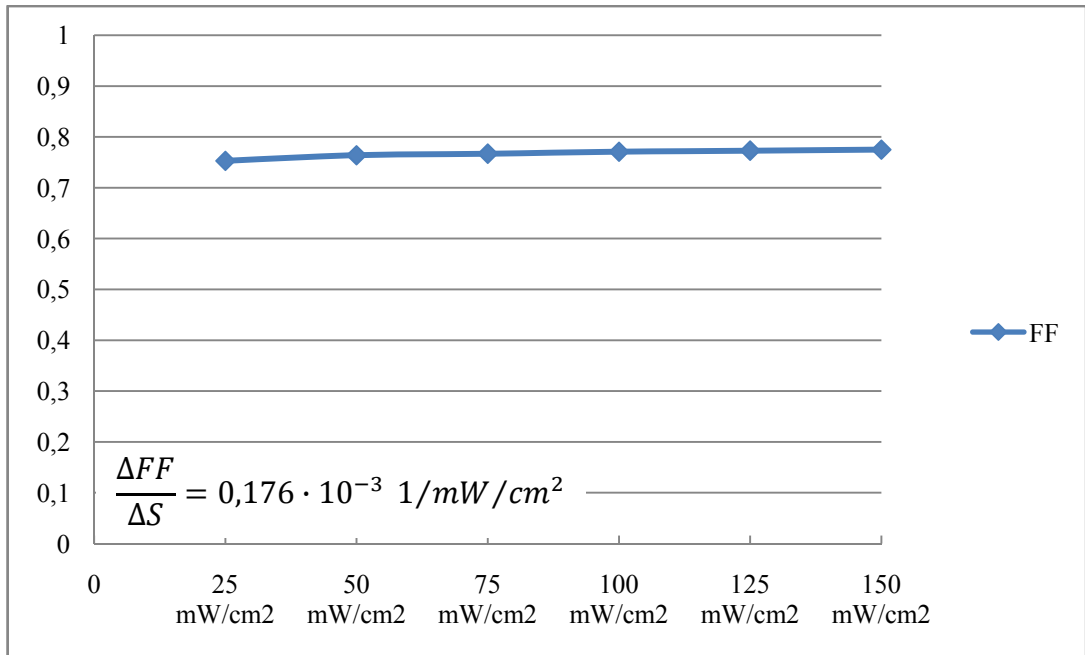


Şekil 4.22. Işık şiddeti simülasyonu ile elde edilen gerilim-ışık şiddeti eğrileri





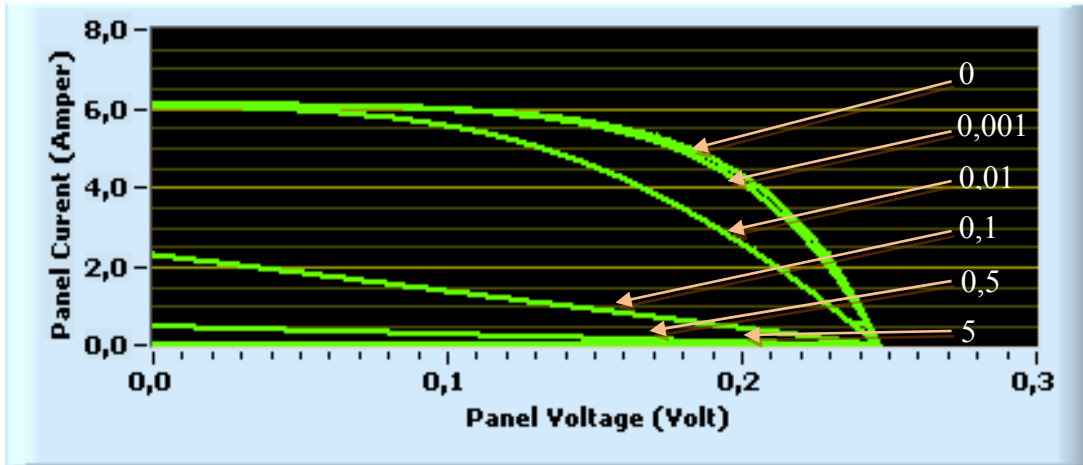
Şekil 4.23. Işık şiddeti simülasyonu ile elde edilen güç-ışık şiddeti eğrileri



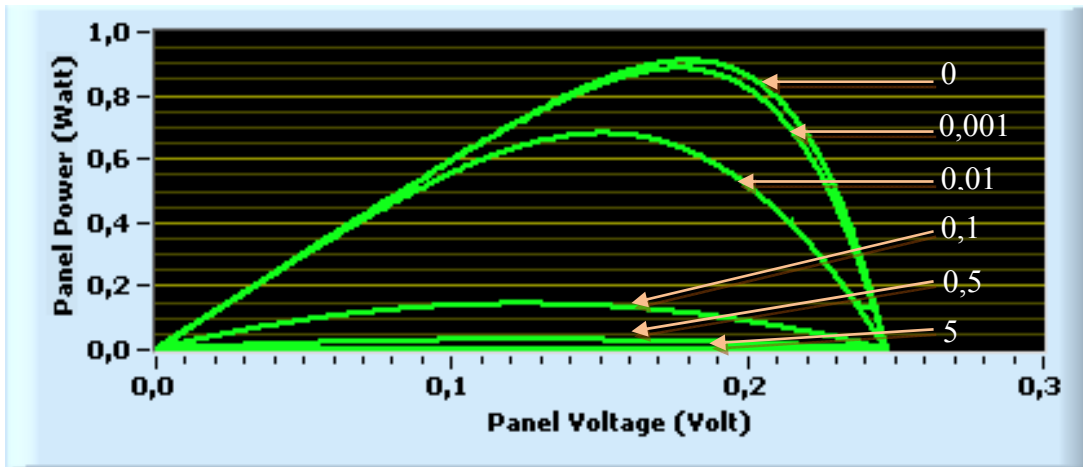
Şekil 4.24. Işık şiddeti simülasyonu ile elde edilen FF-ışık şiddeti eğrileri

### 4.2.3. $R_s$ direnci

FV panelin yapıldığı malzemeden kaynaklanan iç direnci temsil eder.  $N^+P-P^+$  bölgelerinin ve kontakların omik dirençlerinden kaynaklanmaktadır. Işık şiddetinin fazla olduğu durumlarda, akım miktarı arttığında sistem veriminin düşmesine neden olmaktadır. Değerinin  $0,5 \Omega$ ' dan küçük olması istenir. Panel malzemesinin akıma daha fazla direnç göstermesi maksimum güç noktasını aşağıya çekecektir. Şekil 4.25 ve Şekil 4.26' da,  $R_s$  direncinin farklı değerleri için elde edilen güç-gerilim ve akım-gerilim eğrileri verilmiştir. Görüldüğü gibi küçük aralıklarla arttırılan  $R_s$  direncine karşılık akım, gerilim ve özellikle de güç değerlerinde azalma olmaktadır.



Şekil 4.25.  $R_s$  direnci simülasyonu ile akım-gerilim değişimi



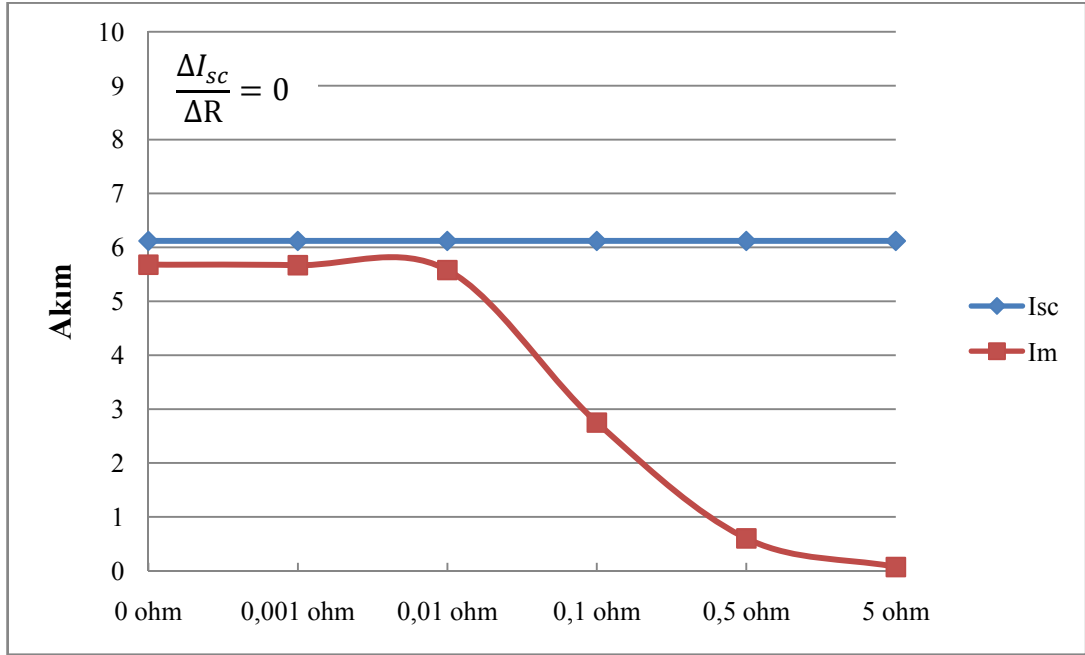
Şekil 4.26.  $R_s$  direnci simülasyonu ile güç-gerilim değişimi

Çizelge 4.3' de ölçülen değerler için de sıcaklık ve ışık şiddeti ölçümünde alınan değerler alınmıştır. Sıcaklık ve ışık şiddeti seviyeleri için standart koşullar ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ,  $S=100\text{mW/cm}^2$ ) kabul edilmiştir. Çizelgede görüldüğü gibi,  $R_s$  direncinin değerindeki artışlar, maksimum güç noktasını aşağıya çeker. Çok önemli bir değişiklik olmadıkça, diğer parametreler etkilenmemektedir. Çizelgede görüldüğü gibi, açık devre geriliminde bir değişiklik olmadığı, maksimum güç noktasındaki akım ve gerilimlerde değişim olduğu gözlenmiştir. Özellikle maksimum güç noktasındaki değişimin,  $R_s$  artışından çok fazla etkilendiği görülmüştür.

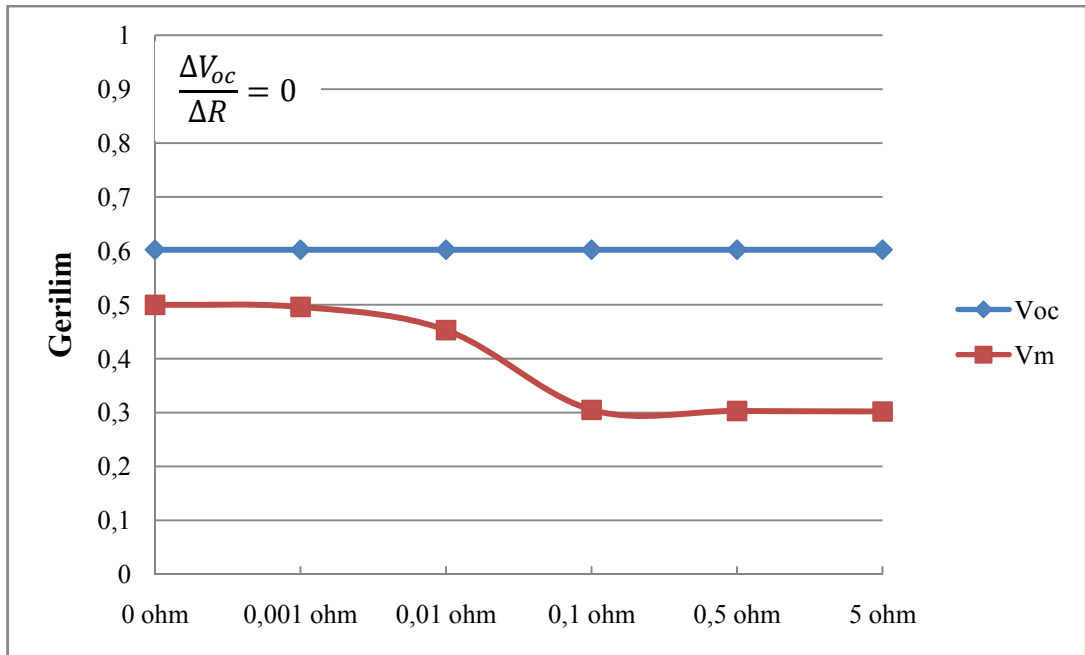
Çizelge 4.3.  $R_s$  simülasyonu ile I,V,P değerleri tablosu

$R_s$ ( $\Omega$ )	$I_m$ (Amper)	$V_m$ (Volt)	$P_m$ (Watt)	$I_{sc}$ (Amper)	$V_{oc}$ (Volt)	FF
0	5,68	0,5	2,842	6,12	0,602	0,771
0,001	5,67	0,496	2,810	6,12	0,602	0,763
0,01	5,58	0,453	2,525	6,12	0,602	0,685
0,1	2,75	0,305	0,839	6,12	0,602	0,228
0,5	0,6	0,303	0,182	6,12	0,602	0,049
5	0,07	0,302	0,021	6,12	0,602	0,006

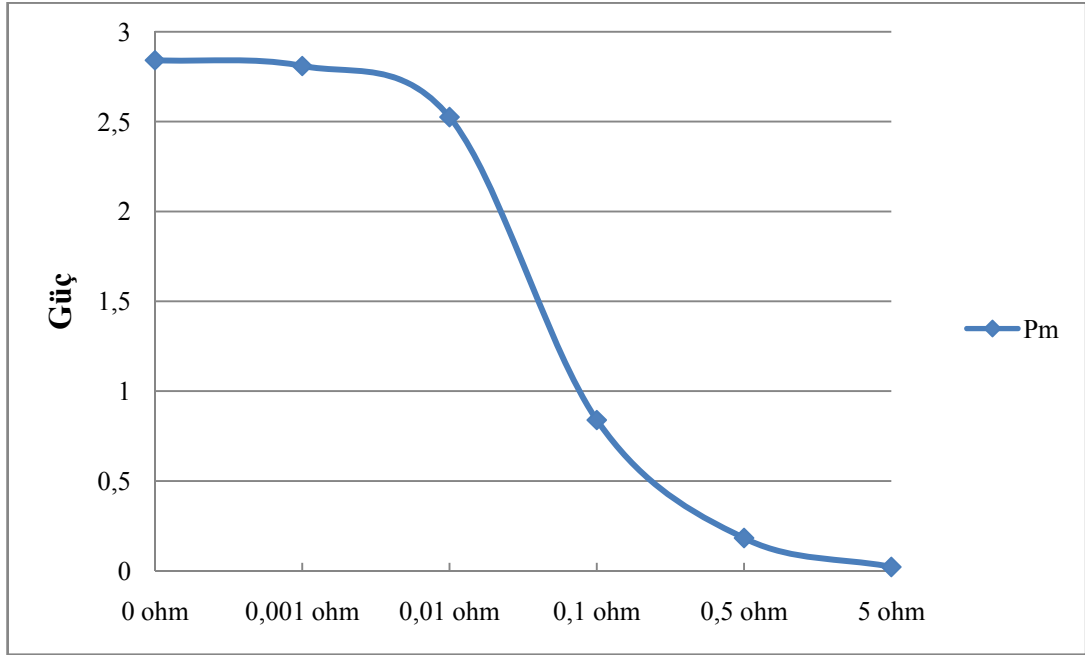
Maksimum akım, gerilim ve güç değerleri  $R_s$  değeriyle azalırken,  $I_{sc}$  ve  $V_{oc}$  değerlerinin etkilenmemesi ve FF değerlerinin de bu azalmalara bağlı olarak azalması, sırasıyla Şekil 4.27, 4.28, 4.29 ve 4.30' da verilmiştir.



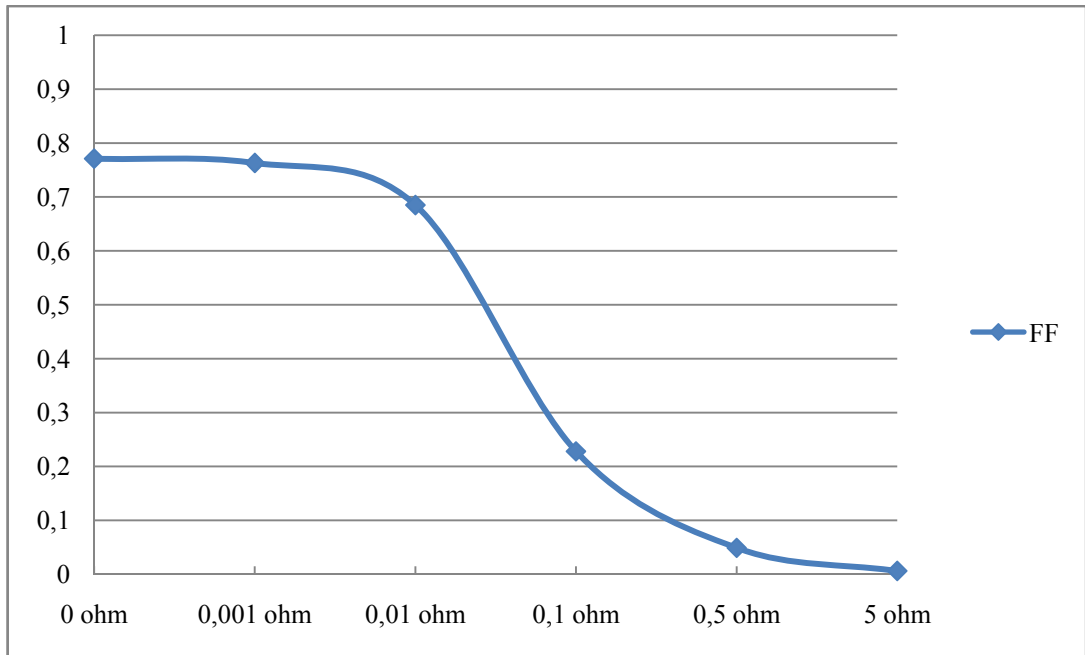
Şekil 4.27.  $R_s$  simülasyonu ile elde edilen akım-ışık şiddeti eğrileri



Şekil 4.28.  $R_s$  simülasyonu ile elde edilen gerilim-ışık şiddeti eğrileri



Şekil 4.29.  $R_s$  simülasyonu ile elde edilen güç-ışık şiddeti eğrileri



Şekil 4.30.  $R_s$  simülasyonu ile elde edilen FF-ışık şiddeti eğrileri

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

FV güç sistemlerinde elde edilen maksimum güç, ortam sıcaklığı ve ışık şiddetine çok bağlı olduğundan, sistemin optimizasyonunda büyük önem taşımaktadır. Bu yöndeki çalışmaların ve teknolojinin hızla ilerlemesiyle birlikte, geçmişte zor gerçekleştirilen ve maliyeti yüksek olan optimizasyon sistemleri, günümüzde kolaylıkla uygulanabilmektedir.

Bu sistemlerin en uygunu MPPT sistemlerdir. Farklı teknik ve yöntemler kullanan MPPT sistemleri, panele ulaşan gücün tamamına yakın bir oranını kullanılabilir duruma getirir. Ancak her bir yöntemin kullandığı algoritmanın olumsuz yönleri de vardır. Bu çalışmada, günümüzde MPPT sistemler için en çok tercih edilen, “Değişim ve Gözlem” ve “Artımlı Geçiş” algoritmaları kullanılmıştır. Her iki algoritmanın da olumlu yönlerinden faydalanmak için karma bir yöntem geliştirilmiş ve Labview ortamında sonuçların tatmin edici olduğu gözlenmiştir. Bu durum, MPPT sistemlerin, gelişime açık olduğunu ve farklı sistemler üzerinde farklı yaklaşımların denenerek geliştirilebileceğini göstermektedir.

Ayrıca, değişik ışık şiddeti, sıcaklık ve  $R_s$  değerleri için yukarıda belirtilen iki algoritma kullanılarak, maksimum güç noktası elde edilmiş ve bu maksimum güç noktasındaki  $V_{OC}$ ,  $I_{SC}$ ,  $\eta$  ve FF değerleri incelenmiştir.

Labview programı kullanılarak simülasyonu yapılan bu çalışma, gerçek uygulama ortamına aktarılabilir. Bu amaçla NI FieldPoint sistemleri tezde ayrıntılarıyla incelenmiş ve gelecekteki uygulamalar için tavsiye edilmiştir.

## KAYNAKLAR

1. “Güneş Enerjisi Tesisatı”, ISISAN Çalışmaları no 325: 121 (2003).
2. “Güneş-Elektrik Dönüşümleri, Fotovoltaik Güneş Gözeleri ve Güç Sistemleri”, *Temiz Enerji Vakfı*, 9-13, 22-28, 34-56 (2001).
3. “Measurement and Automation 07 Catalog”, *National Instruments*, 132-243, 352-373 (2007).
4. “Renewables Information (2004 Edition)”, *IEA Statistics*, 14: 180-182 (2004).
5. ALTAŞ İ.H., “Fotovoltaik Güneş Pilleri : Eşdeğer Devre Modelleri ve Güneş ışığı ile Sıcaklığın Etkileri”, *Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e*, 46: 86-91 (1998).
6. ALTAŞ İ.H., “Fotovoltaik Güneş Pilleri : Maksimum Çıkış Gücünde İşletilmeleri”, *Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e*, 54: 76-83 (1998).
7. ALTAŞ İ.H., “Fotovoltaik Güneş Pilleri: Yapısal Özellikleri ve Karakteristikleri”, *Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e*, 47: 66-71 (1998).
8. Anderson D., Ahmed K., “The case for Solar Energy Investments”, *World Bank Technical paper*, 279:1-2 (1995).
9. Bishop R.H., “LabVIEW 7 Express Student Edition”, *Prentice Hall*, New Jersey, 139-174, 175-236, 287-324 (2006).
10. Enslin J. H. R, Wolf M. S., Snyman D. B., Swiegers W., “Integrated Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Converter”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 44 (6): 769-773 (1997).
11. Ertuğrul N., “Simulation of Electrical Machines and Systems”, Labview for electric circuits, machines, drives, and laboratories, *Prentice Hall*, New Jersey, 277-335 (2002).
12. ESRAM T., Chapman P. L., “Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques”, *IEEE Energy Conversion*, 22(2): 439-449 (2007).
13. Femia N., Petrone G., Spagnuolo G., Vitelli M., “Optimizing Sampling Rate of P&O MPPT Technique”, *35’ th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*: 1945-1949 (2004).
14. Fıratoğlu Z. A., Yeşilata B., “Maksimum Güç Noktası İzleyicili Fotovoltaik Sistemlerin Optimum Dizayn ve Çalışma Koşullarının Araştırılması”, *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 5(1): 147-158 (2003).

15. Hohm D. P., Ropp M. E., "Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms", *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 11:47-62 (2003).
16. Hu C., White R.M., "Solar Cells from basic to Advanced Systems", *Mc Graw-Hill Book Co.*, University of California, Berkeley, 182-185 (1983).
17. Internet : NASA, Aloysius F.H., "Chemical Fabrication Used to Produce Thin-Film Materials for High Power-to-Weight-Ratio Space Photovoltaic Arrays" <http://www.grc.nasa.gov/WWW/RT1999/5000/5410hepp.html> (2007).
18. Internet : Neebel D.J., Blandino J.R., Lawrence D.J., "Photovoltaic (Solar) Cell Characterization", *College of Integrated Science and Technology*, 4-8 <http://sine.ni.com/devzone/cda/epd/p/id/1187> (2007).
19. Internet : NI "FieldPoint" <http://www.ni.com/fieldpoint> (2007).
20. Jamal R., Pichlik H., "Control and Simulation in G – An Integrated Environment for Dynamic Systems", Labview Applications and Solutions, *Prentice Hall*, New Jersey, 379-404 (1999).
21. Jamaledine A. S. M., Khan H. S. A., Rashid M. F. A., "Qualitative Comparison of Maximum Power Point Tracking Methods for Solar Panels", *AISPC*: 1-4 (2007).
22. Jiang J. A., Huang T. L., Hsiao Y.T., Chen C.H., "Maximum Power Tracking for Photovoltaic Power Systems", *Tamkang Journal of Science and Engineering*, 8(2): 147-153 (2005).
23. Koutroulis E., Kalaitzakis K., Voulgaris N. C., "Development of a Microcontroller-Based, Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Control System", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 16(1): 46-54 (2001).
24. Navruz T.S., Saritaş M., "Efficiency variation of the intermediate band solar cell due to the overlap between absorption coefficients", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 12(1): 1-2 (2007).
25. Nelson J., "The Physics of Solar Cells", *Imperial College Press*, 56-88 (2003).
26. Partain L.D., "Solar Cells and Their Applications", *A Wiley-Interscience Publication*, Edward L. Ginzton Research Center, Palo Alto, California, 7-8, 30-38, 55-75 (1995).
27. Rosenberg P., "The Alternative Energy Handbook", *The Fairmont Press*, 43-70 (1993).



28. Sarıtaş M., “N<sup>+</sup>/P ve N<sup>+</sup>/P/P<sup>+</sup> Silikon Fotovoltaj pil yapılarında kısadevre fotoakım yoğunluğu ve açıkdevre fotovoltaj değerlerinin optimizasyonu”, *Elektrik Mühendisliği 5. Ulusal Kongresi*, 518-524 (1993).
29. Sarıtaş M., “Review paper on solar cell technology”, *TÜBİTAK*, Marmara Scientific and Industrial Research Institute, 98-101 (1988).
30. Sarıtaş M., Gökpınar H., “Silikon güneş pillerinde verim optimizasyonu”, *Elektrik Mühendisliği 3. Ulusal Kongresi*, 46-49 (1989).
31. Sokoloff L., “About Data Acquisition”, Applications in Labview, *Prentice Hall*, New Jersey, 229-250 (2004).
32. Şahin H., “Bilgisayar destekli tasarım Proteus ISIS & ARES”, *Altaş Yayıncılık*, İstanbul, 67-100, 161-176 (2005).
33. Yusof Y., Sayuti S. H., Latif M. A., Wanik M. Z. C., “Modeling and Simulation of Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic System”, *National Power & Energy Conference*: 88-93 (2004).
34. Yu G. J., Jung Y. S., Choi J. Y., Choy I., Song J. H., Kim G. S., “A novel two-mode MPPT control algorithm based on comparative study of existing algorithms”, *IEEE*: 1531-1534 (2002).

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KANGAL, Hikmet  
Uyruğu : T.C.  
Doğum tarihi ve yeri : 10.12.1980 / Sivas  
Medeni hali : Evli  
Telefon : 0 (505) 563 48 50  
e-mail : hkmtkngl@hotmail.com

### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	K.T.Ü / El. El. Müh. Bölümü	2004
Lise	Sivas Lisesi / Fen Bilimleri	1998

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2007	Savunma Sanayii Müsteşarlığı	Savunma Sanayi Uzman Yrd.
2006	Makine ve Kimya Endüstrisi K.	Endüstriyel Yazılım Mühendisi

### Yabancı Dil

İngilizce

### Hobiler

Müzik, Bilgisayar, Basketbol, Satranç.