

FOTOVOLTAİK SİSTEM TASARIMI

Zafer KAPLAN

Yüksek Lisans Tezi

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mart - 2012

FOTOVOLTAİK SİSTEM TASARIMI

Zafer KAPLAN

Dumlupınar Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliği Uyarınca

Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman : Yrd.Doç.Dr. Niyazi Serdar TUNABOYLU

Mart - 2012

KABUL ve ONAY SAYFASI

Zafer KAPLAN'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı FOTOVOLTAİK SİSTEM TASARIMI başlıklı bu çalışma, jürimizce Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

18/02/2012

Üye : Yrd.Doç. Dr. Bekir MUMYAKMAZ

Üye : Doç. Dr.Ahmet ÖZMEN

Üye : Yrd.Doç.Dr. N.Serdar TUNABOYLU

Fen Bilimleri Enstitüsün Yönetim Kurulu'nun/...../..... gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof.Dr.Hasan GÖÇMEZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

FOTOVOLTAİK SİSTEM TASARIMI

Zafer KAPLAN

Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, 2012

Tez Danışmanı: Yrd.Doç.Dr.N.Serdar TUNABOYLU

ÖZET

Yenilenebilir enerji kaynaklarının tüketiminin hızla arttığı günümüzde, güneş enerjisinin kolay ulaşılabilir olması ve doğada bol miktarda bulunması, güneş enerjisini, diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre bir adım öne çıkarmıştır. Özellikle fotovoltaik (PV) yöntem ile güneş enerjisinden elektrik elde etmek için gerekli teknolojik altyapının hızlı gelişimi, PV sistemlerin günlük hayatımıza entegre edilmesi sürecini de hızlandırmıştır.

Bu çalışmada, öncelikle fotovoltaik sistemlerle ilgili temel tanımlamalar yapılmış olup fotovoltaik (PV) hücrenin Matlab ortamında akım-gerilim eğrisi çizdirilmiştir. Daha sonra ise “ BP SX 170B PV “ modülünün katalog değerleri kullanılarak modellenmesi yapılmıştır. Seri direncin (R_s), PV sistemin çalışma noktası ve çalışma gücü üzerindeki etkisi gözlenmiştir. PV modülde ortam sıcaklığının ve ışıının I-V eğrisine etkisi Matlab m-file kullanılarak çizdirilmiştir. PV modüllerin sıcaklıktan olumsuz yönde etkilendiği ve sıcaklık arttıkça PV modüllerin çıkış gerilimi ve gücünün azaldığı gözlemlenmiştir. PV’ler için en uygun ortamın soğuk ve güneşli ortamlar olduğu anlaşılmıştır. PV modülün çalışma gücü Matlab kullanılarak hesaplanmış, maksimum çıkış gücünde çalıştırılması sağlanmıştır.

Üç farklı PV model simülasyonu hazırlanmış olup bu üç model arasında kıyaslama yapılmıştır. PV Modül+Batarya sisteminde elde edilen değerler değerlendirilmiş ve sistemin kararlılığı irdelenmiştir. Simülasyonlarda elde edilen veriler kullanılarak güneş pili veriminin artırılması ve akümülatörün kararlı bir yapıda çalışması için çaba harcanmıştır.

Yapılan benzetim çalışmaları sonucunda, PV sistemlerin mümkün olan en yüksek verimle işletilmeleri gerekli ve zorunlu olduğu ortaya konmuştur. Dolayısıyla değişen ortam sıcaklıkları ve güneş ışıının seviyeleri için modülün verebileceği maksimum güç noktasının belirlenmesi gerektiği ortaya çıkmıştır.

Anahtar Kelimeler: Güneş, Fotovoltaik Pil, Fotovoltaik Sistem, Matlab-Simulink

PHOTOVOLTAIC SYSTEM DESIGN

Zafer KAPLAN

Electrical and Electronics Engineering, M.S. Thesis, 2012

Thesis Supervisor: Assist. Prof. Dr. N. Serdar TUNABOYLU

SUMMARY

Usage of renewable energy sources has been rapidly increased recently and solar energy being plenty of amount in the nature with easy access is one step ahead in respect to the other renewable energy sources. Especially, rapidly growing technological infrastructure to generate electricity from solar energy via photovoltaic (PV) method also has been increased the process of integration PV systems into daily life.

In this study, basic definitions about Photovoltaic Systems were made and, the I-V curve of Photovoltaic cell (PV) was plotted at Matlab. Later, its modeling was made using the catalogue figures of “BP SX 170B PV” module. The impact of serial resistance (R_s) on the operating power of PV system was observed. In PV module, the impact of ambient temperature and radiation on the I-V curve was drawn by using Matlab m-files. It was observed that PV modules were negatively affected by the temperature, and as the temperature rose, output potential and power of PV modules decreased. It has been understood that the most suitable environment for the PVs is cold and sunny conditions. The operating and nominal output power of PV module was calculated using Matlab, and was made to operate at maximum output power.

Three different model simulations were prepared , and a comparison was made among these. The figures acquired in PV Module+Battery System were considered, and the stability of the system was studied carefully. Efforts were shown to make the batteries work steadily using the values acquired in simulations.

After the simulations and the acquired values, it was shown that PV systems should run at the maximum possible efficiency. Therefore, for the changing ambient temperature and solar radiation levels, it was also shown necessary to determine the maximum power point that the module could provide.

Keywords: Solar, Photovoltaic Cells, Photovoltaic Systems, Matlab-Simulations

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması süresince benden yardımlarını ve desteğini hiç esirgemeyen başta danışman hocam Yrd. Doç. Dr. N.Serdar TUNABOYLU' ya, Yrd. Doç. Dr. Bekir MUMYAKMAZ' a, Doç. Dr. Ahmet ÖZMEN' e, desteğini hep yanımda hissettiğim eşim Fikriye KAPLAN' a ve emeği geçen herkese teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER	3
2.1. Şebekeden Bağımsız Sistemler	3
2.1.1. Direkt bağlı sistemler	3
2.1.2. Bataryalı sistemler	3
2.1.3. Şarj kontrollü bataryalı sistemler	4
2.1.4. Batarya depolamalı ve AA ile DA yükler	4
2.2. Şebekeye Bağlantılı Sistemler	4
2.3. Karma Sistemler	5
2.4. Fotovoltaik Sistem Bileşenleri	5
2.4.1. PV hücre	6
2.4.2. PV modül	7
2.4.3. Batarya/akü	8
2.4.4. Şarj regülatörü	8
2.4.5. Evirici	9
3. PV HÜCRENİN MATLABDA AKIM-GERİLİM EĞRİSİNİN ÇİZDİRİLMESİ	10
4. BP SX 170B PV MODÜLÜNÜ MATLAB İLE MODELLEMEK	12
4.1. PV Modülün Matlab M-File Kullanılarak Modellenmesi	14
4.1.1. PV modülün akım-gerilim eğrisinin çizdirilmesi	15
4.1.2. PV modülde ortam sıcaklığının I-V eğrisine etkisi	17
4.1.3. PV modülde ışınımın I-V eğrisine etkisi	18
4.1.4. PV modülün çalışma gücünün hesaplanması	19

İÇİNDEKİLER(devam)

	<u>Sayfa</u>
4.2. PV Modülün Simulink Kullanılarak Modellenmesi	23
4.3. 4 kW Gücündeki Fotovoltaik Generatörün Simülink ile Modellenmesi	27
4.4. PV Modülün Matlab m-file ve Simulink Kullanılarak Modellenmesi	30
5. PV MODÜLLERİN MAKSİMUM ÇIKIŞ GÜCÜNDE ÇALIŞTIRILMASI	33
5.1. Maksimum Güç Noktasının Matlab/Simulink Kullanılarak Modellenmesi	35
5.2. Model Kıyaslaması	37
6. PV SİSTEM TASARIMI	40
6.1. Sistem Veriminden Yola Çıkararak PV Modül Batarya Sistemi tasarımı	40
6.1.1. PV sistem tasarımında batarya bağlantıları	45
6.1.2. PV modül bağlantıları	47
6.2. Simülinkte PV Modül Batarya Sistemi Tasarımı	48
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	60
KAYNAKLAR DİZİNİ	62
EKLER	

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Direkt bağlı sistemler	3
2.2. Bataryalı sistemler	3
2.3. Şarj kontrollü bataryalı sistemler	4
2.4. Batarya depolamalı ve AA ile DA yükler	4
2.5. Şebekeye bağlantılı sistemler	4
2.6. Hibrit sistemler	5
2.7. Açık devre gerilimi	6
2.8. Tipik bir PV diyotun I-V ve P-V eğrisi	6
2.9. Fotovoltaik hücre, modül, panel ve diziler	7
2.10. Şarj Regülatörü	9
3.1. PV diyot eşdeğer devresi	10
3.2. PV hücrenin I-V Eğrisi	11
3.3. Matlabda çizdirilen PV hücrenin I-V eğrisi	11
4.1. BP SX 170B PV modülünün resmi	12
4.2. BP SX 170B PV modülü için I-V eğrisi	13
4.3. BP SX 170 PV modülünün Matlab m-file ile çizdirilmiş I-V eğrisi	15
4.4. BP SX 170 PV modülünün Matlab m-file ile çizdirilmiş I-V eğrisi	16
4.5. BP SX 170 PV modülünün Matlab m-file ile çizdirilmiş I-V eğrisi	16
4.6. Sabit ışıınımdaki BP SX 170B PV I-V karakteristiğinin sıcaklık ile değişimi	17
4.7. BP SX 170B PV modülünün farklı sıcaklık değerleri için Matlab m-file ile çizdirilmiş I-V eğrisi	17
4.8. Silisyum güneş pilinin farklı ışıınımlar için I-V eğrisi	18
4.9. BP SX 170B PV modülünün farklı ışıınımlar için Matlab m-file ile çizdirilmiş I-V eğrisi	19
4.10. Işıınıma bağlı olarak çalışma gücünün değişimi	21
4.11. Sıcaklığa bağlı olarak çalışma gücünün değişimi	22
4.12. V_{oc} ve I_{sc} 'nin sıcaklıkla değişimi	23
4.13. Gücün sıcaklıkla değişimi	23
4.14. Simülinke akım-gerilim değerinin elde edilmesi	24
4.15. Simülinke alt sistem oluşturma	24
4.16. V_{ref} ve I_{ref} değerlerinin ışıaretlenmesi	25
4.17. Alt sistem değerlerinin girilmesi	26

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.18. Akım, gerilim ve güç değerlerinin simülinke gösterilmesi	26
4.19. Güneş pillerinin seri ve paralel bağlanması ile güneş panelinin elde edilmesi	27
4.20. Güneş panelinin simülinke modellenmiş hali	28
4.21. Güneş paneli teknik özelliklerinin modellenen sisteme girilmesi	29
4.22. Güneş panellerinden oluşan 4 KW gücündeki PV generatör	29
4.23. S-Function bloğu ile ‘modul’ m-file dosyasının ilişkilendirilmesi	30
4.24. MODUL1 bloğunun modifiye penceresinin görünümü	31
4.25. MODUL1 bloğu için blok parametreleri penceresi	31
4.26. MODUL1 bloğuna çıkışların bağlanması	31
5.1. Maksimum güç noktası	33
5.2. Çeşitli yüklerde çalışma noktası	34
5.3. Sabit sıcaklıkta farklı ışıınım şiddetlerinde bir PV modülün I-V eğrileri	35
5.4. S-Function bloğu ile ‘modmppt’ m-file dosyasının ilişkilendirilmesi	35
5.5. MPPTMODUL blok parametreleri penceresi	36
5.6. MPPTMODUL bloğuna çıkış bloklarının eklenmesi	36
5.7. Üç modelin aynı uygulamada birleştirilmesi	38
6.1. Ortalama ışıınım değerleri	40
6.2. Şebekeden bağımsız PV sistem	40
6.3. 24 V’luk sistem blok şeması	43
6.4. Akü bağlantı şekli	43
6.5. Bataryaların seri bağlantısı	45
6.6. Bataryaların paralel bağlantısı	45
6.7. Bataryaların seri-paralel bağlantısı	45
6.8. Akü modelinin elektriksel eşdeğeri	47
6.9. PV modül bağlantıları	47
6.10. PV modül seri bağlantı	48
6.11. PV modül paralel bağlantı	48
6.12. PV modül altsistemi	48
6.13. PV modül-batarya sistemi modeli	49
6.14. SOC, batarya akımı ve gerilimi değerleri	49
6.15. PV modül-batarya sistemi modeli	50

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.16. SOC, batarya akımı ve gerilimi değerleri	50
6.17. Meteorolojik data girişli PV modül-batarya sistemi modeli	51
6.18. Data Sinyali	51
6.19. Data Sinyali Kuvvetlendirmesi	52
6.20. Meteorolojik Data girişli PV modül-batarya sistemi modelinde çıkış değerleri	52
6.21. Data Sinyali	53
6.22. Meteorolojik Data girişli PV modül-batarya sistemi modelinde çıkış değerleri	53
6.23. Bataryanın blok parametreleri	53
6.24. Data Sinyali	54
6.25. PV modül-batarya sistemi modelinde çıkış değerleri	54
6.26. Data Sinyali	55
6.27. PV modül-batarya sistemi modelinde çıkış değerleri	55
6.28. PV modül-batarya sistemi modelinde çıkış değerleri	56
6.29. İzmir ili için çevre sıcaklığı ve güneş ışıınımı değerlerinin saatlik değişimi	56
6.30. PV Modül-Batarya sistemi	57
6.31. Uniform random number kaynağıyla oluşturulmuş ışıınım datası	57
6.32. Uniform random number kaynağıyla oluşturulmuş sıcaklık datası	58
6.33. SOC, batarya akımı ve batarya gerilim değerleri	58

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
4.1. BP SX 170B PV modülünün elektriksel özellikleri	13
4.2. Farklı ışınlamalar için çalışma gücü	21
4.3. Farklı sıcaklıklar için çalışma gücü	22
4.4. Farklı ışınlamalar için maksimum çalışma gücü	26
4.5. Farklı sıcaklıklar için çalışma gücü	27
5.1. Model Kıyaslaması	37
5.2. BP SX 170B PV modülünün farklı sıcaklık değerlerinde uygulama sonuçları	38
5.3. BP SX 170B PV modülünün farklı ışınlamada Simulink uygulama sonuçları	39
6.1. Türkiye için ortalama günlük güneşlenme süreleri	44
6.2. 105 Ah'lık aküde modül ve akü sayısı	44
6.3. 45 Ah'lık aküde modül ve akü sayısı	44

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
A	Fotovoltaik diyot alanı
Ah	Amper-saat
AC	Alternatif Akım
AM	Air Mass (Hava Kitlesi)
α	Akımın sıcaklık katsayısı
β	Gerilimin sıcaklık katsayısı
BJT	Çift Kutuplu Transistör (Bipolar Junction Transistor)
°C	Santigrat Derece
cm	Santimetre
ΔI	Akım Değişimi
DC	Doğru Akım
dk	Dakika
DOD	Deşarj Sınırı (Depth of Discharge)
E	Yükün günlük enerji ihtiyacı
FF	Dolum Faktörü
G	Etkin ışıınım şiddeti
G_{ref}	Referans ışıınım şiddeti
G_s	Güneşlenme Süresi
GTO	Kapıdan tıkanabilen tristör (Gate turn-off tristor)
I	Akım (Birimi Amper)
I_D	Diyot Akımı
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor (Kapıdan Yalıtımlı Bipolar Transistör)
I_L	Işık Akımı
I_M	Modül akımı
I_{max}	Maksimum Akım
I_{mpp}	Maksimum güç noktasındaki akım
I_{new}	Yeni akım değeri
I_{pil}	Güneş pili akımı
I_{PV}	Terminal Akımı
I_{ref}	Referans akım

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ(devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
I_{RP}	Paralel direnç üzerindeki akım
I_{sc}	Kısa devre akımı
I_S	Satürasyon Akımı
I-V	Akım-Gerilim
k	Boltzman Sabiti
°K	Kelvin Derece
kW	Kilowatt
q	Elektron yükü
MOSFET	Metal Oksit Yarıiletkenli Alan Etkili Transistör (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)
m^2	metrekare
m/s	metre/saniye
MPP	Maksimum güç noktası
MPPT	Maksimum güç noktası izleyici
MW	Megawatt
NOCT	Nominal şartlardaki hücre sıcaklığı (Nominal Operating Cell Temperature)
N_{PC}	Paralel hücre sayısı
N_{SC}	Seri hücre sayısı
n	İdealite faktörü
η_{bat}	Akülerin verimi
η_{kablo}	Bağlantı kabloları verimi
η_{pv}	PV verimi
η_{pv-bat}	PV modüller ile aküler arasındaki bağlantı kablolarının kayıpları
η_{sis}	Sistem Verimi
$\eta_{şarj}$	Şarj regülatörünün verimliliği
P	Güç
P_{in}	Diyot üzerine gelen ışının gücü
P_{max}	Maksimum güç
P&O	Deney ve Gözlem (Perturbation and Observation)
PV	Fotovoltaik (Güneş Panelleri)
P-V	Güç-Gerilim

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ(devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
R_L	Yük direnci
R_P	Paralel direnç
R_S	Seri direnç
SCR	Silisyum Controlled Rectifier (Silisyum kontrollü doğrultucu)
sn	Saniye
SOC	Şarj Durumu
STC	Standart Test Koşulları
T	Sıcaklık
T_c	Etkin sıcaklık değeri
T_φ	Çevre Sıcaklığı
T_h	Hücre Sıcaklığı
T_{cref}	Referans sıcaklık değeri
V	Gerilim (Birimi Volt)
V	Gerilim (Birimi Volt)
V_M	Modül Gerilimi
V_{mpp}	Maksimum güç noktasındaki gerilim
V_{new}	Yeni gerilim değeri
V_{oc}	Açık devre voltajı
V_{pil}	Güneş Pili Gerilimi
V_{ref}	Referans Gerilim
W	Watt
W/m ²	Watt/metrekare(Işınım birimi)
Wh	Watt-saat
W_p	Tepe Gücü(watt-peak)
W_{pv}	PV modül peak gücü

1. GİRİŞ

Fotovoltaik(PV) modüller, güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştürdükleri için alternatif bir elektrik üretim aracıdır. Yaygın olarak kullanılmakta olan fosil yakıtların çevreye verdikleri zararlar ve tükenme ihtimali nedeniyle diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının yanısıra fotovoltaik enerji gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır.

PV teknolojinin hızla gelişmesi, güneş enerjisi ile çalışan pek çok sistemin günlük hayatımızda yerini almasına neden olmaktadır. Güneş enerjisi ile çalışan bu sistemlerin tasarımı noktasında, güneş pilinin ve güneş panelinin eşdeğer devresini/matematiksel modelini elde etmek önemli bir konudur. Bir güneş pilinin akım-gerilim karakteristiği olarak isimlendirilen I-V karakteristiğinin yanısıra çıkış gücünü de temsil eden güç-gerilim (P-V) karakteristikleri de yapılan benzetim çalışmaları için önem taşımaktadır.

Benzetim, değişik koşullar altında gerçek sisteme ait davranışların bilgisayarda izlenmesini sağlayan bir modelleme tekniği olup, teknik ve mühendislik eğitiminde yaygın bir araç olarak kullanılmaktadır. PV sistemlerinin eğitimi, araştırılması, uygulamada daha verimli ve etkin bir şekilde kullanımının sağlanması, gerekli denetim işlemlerinin gerçekleştirilmesi vs. için sistemin benzetimine ihtiyaç duyulur. Literatürde PV sistem modellemesi ve benzetimi hususunda birçok çalışma bulunmaktadır. Bunların büyük bir bölümü paket program şeklinde olup farklı sistemler için tasarlanmışlardır.

Güneş pili ve güneş paneli modeli sayesinde, elde edilen bir yapının analizi de kolaylıkla yapılabilmektedir. Güneş pili eşdeğer modelinin elde edilmesi ile ilgili literatürde çeşitli çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalarda, eşdeğer devrelerin simülasyonu için Matlab Simulink altyapısı da kullanılmaktadır.

Simulink altyapısını kullanan böyle bir çalışmada, güneş pilinin modeli ortaya konularak, Matlab ile PV modülün simülasyonu gerçekleştirilmiştir [1]. Güneş pilinin modelinin gerçekleştirildiği bir diğer çalışmada ise [2], mevcut modelin Thevenin eşdeğer devresi elde edilerek, basit eşdeğer devre ile karşılaştırılmıştır. Bir PV pompa uygulama çalışmasında ise, PV generatörle beslenen bir pompa sisteminin tasarımında PV generatör modeli kullanılmıştır [3]. PV generatörlerin parametrelerinin tahmini için bir yöntem geliştirilen diğer bir çalışmada ise PV modülün simülasyonu gerçekleştirilmiştir [4]. PV modüllerin modellenmesi, hibrit sistem tasarımı yapan araştırmacıların da çalışmaların da yer almıştır [5,6].

Bu çalışmalarda yakıt pili-güneş pili gibi hibrit yapıların incelenmesinde, PV modül eşdeğeri kullanılmıştır. Güneş ışınımını temel alan bazı çalışmalarda ise, güneş ışınımının PV modül çıkış gücüne olan etkisi araştırılmıştır [7,8].

Bu çalışmaların dışında, PV generatörler ile beslenen sistemlerde, PV generatörün modellenmesi ile ilgili çalışmalar da mevcuttur [9,10]. Bu çalışmalarda PV dizilerin elektriksel modelleri incelenmiştir. "Fotovoltaik ünite tasarımı, elektrik enerjisi üretimi ve maliyet analizi" konusu, yüksek lisans tezi olarak hazırlanmış, paneller sabit olarak kullanılmış ve sistem tasarımı yapılmıştır[11]. "Güneş enerjisinden elektrik elde edilmesi" konusu, yüksek lisans tezi olarak hazırlanmış, paneller sabit olarak kullanılıp sistem tasarlanmıştır [12].

PV diyot matematiksel modelinde kullanılan parametreler, ışınım şiddeti ve ortam sıcaklıklarına bağlı olarak değiştiklerinden, simülasyon yapılırken bu durumlar da dikkate alınmıştır. Üretici firmalar üretmiş oldukları PV modüllerin standart test koşulları altında elde ettikleri elektriksel karakteristiklerini katalog değeri olarak göstermektedirler. Bu veriler standart test koşulları altında geçerli olup farklı durumlarda daha farklı karakteristik özellikleri ortaya çıkabilmektedir. Bu tezde giriş parametreleri olarak katalog verileri kullanılmıştır.

2. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER

Fotovoltaik sistemler, DC veya AC güç üretmek, şebekeye bağlı ya da şebekeye bağlı olmadan elektrik üretmek, farklı enerji kaynaklarıyla veya depolama bileşenleriyle bağlantı kurmak amacıyla tasarlanmaktadır.

2.1. Şebekeden Bağımsız Sistemler

2.1.1. Direkt bağlı sistemler

Direkt bağlı sistemler bağımsız fotovoltaik sistemlerin en basit çeşididir. Bu sistemde bir doğru akım yükü, fotovoltaik panele veya dizisine eksi ve artı uçları karşılıklı gelecek şekilde direkt olarak bağlanır. Elektrik depolayıcı barındırmayan bu sistem yalnız, fotovoltaik dizi tarafından üretilen gücün ve yükün aynı yerde olduğu durumlarda kullanılabilir. Bu durum şekil 2.1’de görülmektedir.



Şekil 2.1. Direkt bağlı sistemler

2.1.2. Bataryalı sistemler

Fotovoltaik dizi tarafından güç üretilir üretilmez her zaman üretilen bu gücün kullanımı söz konusu olmayabilir. Bağımsız fotovoltaik sistemlerde, akü grupları tarafından enerji depolanması genellikle gereklidir. Bu çeşit sistemlerin bazısında akü grubu şarj kontrolü kullanılmaz. Yük profilinin iyi tanımlandığı yerler ile bataryanın fotovoltaik diziye oranla daha büyük değerde olduğu yerlerde bu sistemler kullanılır. Bu, düşük şarj değerini doğurur. İlgili blok şema şekil 2.2’de görülmektedir.



Şekil 2.2. Bataryalı sistemler

2.1.3. Şarj kontrollü bataryalı sistemler

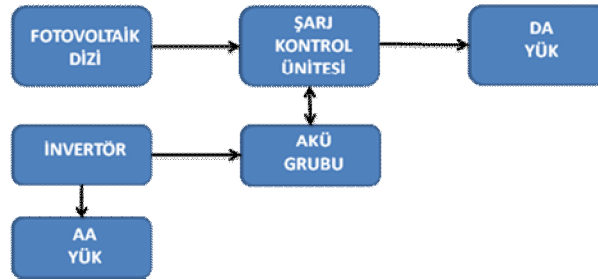
Şarj kontrollü bataryalı sistemler, yükün değişken ve iyi tanımlanamadığı durumlar ile bataryanın, yük ve fotovoltaik dizinin birbirine göre optimal veya sınırdan ölçülendirildiği durumlarda bataryayı aşırı şarj ve deşarjdan korumak için gerekli olmaktadır. Bu durum şekil 2.3’de görülmektedir.



Şekil 2.3. Şarj kontrollü bataryalı sistemler

2.1.4. Batarya depolamalı ve AA ile DA yükler

Bazı hallerde alternatif akım ve doğru akım yükler için her iki gerilim türüne de ihtiyaç duyulur. Bu durumda bir invertör gereklidir. AA ve DA yük barındıran bağımsız fotovoltaik sistemler şekil 2.4’de görülmektedir.



Şekil 2.4. Batarya depolamalı ve AA ile DA yükler

2.2. Şebekeye Bağlantılı Sistemler



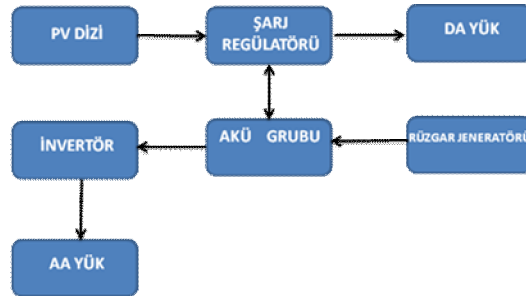
Şekil 2.5. Şebekeye bağlantılı sistemler

Bu tip sistemler, elektrik şebekesine bağlı olacak şekilde tasarlanır. Güçleri 10 kW ile onlarca MW arasında değişen PV sistemler olup, çoğunlukla yerel enerji gereksinimlerine destek olmak üzere kurulmuşlardır. Enerji ihtiyacının fazla olduğu saatlerde devreye sokularak enerji sistemi rahatlatılmakta ve aynı zamanda enerji üretilen yerden fazla uzaklarda kullanılmadığı için kayıpların asgari seviyede kalması sağlanmış olmaktadır. Bu sistemlerde örneğin bir konutun elektrik gereksinimi karşılanırken, üretilen fazla elektrik şebekeye satılır, yeterli enerjinin üretilmediği durumlarda ise şebekeden enerji alınır.

Depo elemanı kullanılmaz, şebeke enerji deposu gibi kullanılır. Üretilen enerji yük üzerinde anında kullanılır. Fazla enerji şebekeye aktarılır, eksik enerji şebekeden tamamlanır. Bu sistemlerin en önemli parçası eviricidir.

2.3. Karma Sistemler (Hibrit)

Karma (hibrit) sistemler birden fazla çeşit elektrik üreticini bir araya getirir. Fotovoltaik sistemlere ek olarak rüzgar türbinleri, biyogaz üreteçleri, su kaynaklı üreteçler, ısı üreteçler veya fosil yakıtlı üreteçleri içerebilir. Bir hibrit enerji düzeneği şeması şekil 2.6'da görülmektedir.



Şekil 2.6. Hibrit sistemler

Farklı elektrik üreteçleri farklı seviyelerde doğru akım üretebilirler. Bu farklı değerlerdeki akımlar dolun aşamasında akülere zarar verebilir veya ömrünü azaltabilir. Bunun için karma sistemlerde iyi bir akü denetimi yapmak gerekmektedir.

2.4. Fotovoltaik Sistem Bileşenleri

Genel olarak bir fotovoltaik sistem;

- Fotovoltaik hücre, modül, panel ve diziler,
- Aküler,
- DA-AC evirici,

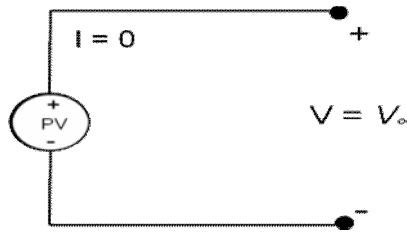
- Yük,
- Denetim (MPPT)/Şarj Regülatörü gibi birimlerden oluşmaktadır.

2.4.1. PV hücre

PV hücrelerin karakteristiklerini tanımlayan beş temel parametre vardır. Bunlar; kısa devre akımı, açık devre gerilimi, maksimum güç noktası, dolum faktörü ve verimdir.

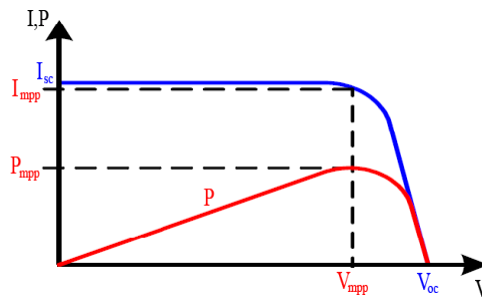
Kısa Devre Akımı; devrenin uçları arasındaki potansiyel farkı, diyot uçlarının kısa devre edilmesiyle ($V = 0$) devreden çekilen akım değeridir. I_{sc} ile gösterilir. İdeal bir diyotta kısa devre akımı diyot üzerine ışık düştüğü zaman oluşan akım değerine eşittir.

Açık devre gerilimi; şekil 2.7’de görüldüğü gibi diyot uçlarına yük bağlanmadığı anda ($I = 0$) diyot uçlarından ölçülen gerilim değeri olup V_{oc} ile ifade edilir.



Şekil 2.7. Açık devre gerilimi

Maksimum Güç Noktası; bir PV diyottan elde edilebilecek güç değeri, akım ve gerilim değerlerinin çarpımına eşittir. Maksimum güç P_{max} , $I * V$ değerinin en büyük olduğu durumda elde edilir. V_{oc} ve I_{sc} değerlerinde sistemden herhangi bir güç elde edilemez. Şekil 2.8’de tipik bir PV diyotun akım-gerilim (I-V) ve güç-gerilim (P-V) eğrisi görülmektedir. Maksimum güç noktasına aynı zamanda tepe gücü de (peak power) denir ve birimi W_p ’dir.



Şekil 2.8. Tipik bir PV diyotun I-V ve P-V eğrisi [13]

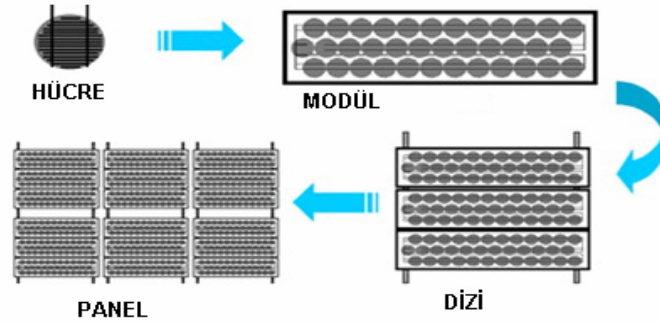
Dolum Faktörü (FF): Bağlantının kalitesinin ve diyodun seri dirençlerinin ölçümüdür. Azami gücün kısa devre akımı ile açık devre geriliminin çarpımına oranıdır. Denklem 2.1’de dolum faktörünün matematiksel eşitliği görülmektedir. PV diyotlar için dolum faktörü 0.7 ile 0.85 arasındadır.

$$FF = \frac{P_{\max}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} = V_{\max} \cdot \frac{I_{\max}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (2.1)$$

Verimlilik; Maksimum güç değeri $P_{\max}$ ’ın, PV diyot üzerine gelen ışının gücü P_{in} ’e, (total power of the incident light) olan oranı olarak tanımlanır . Denklem 2.2’de G : etkin ışınım şiddeti ve A : fotovoltaik diyotun alanıdır.

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{in}} = \frac{I_{\max} \cdot V_{\max}}{A \cdot G} \quad (2.2)$$

Güç çıkışını arttırmak maksadıyla çok sayıda güneş hücresi şekil 2.9’da görüldüğü gibi, birbirine paralel yada seri bağlanarak bir yüzey üzerine monte edilirler. Bu yapıya güneş pili veya PV modül adı verilir. Güç talebine bağlı olarak modüller, birkaç W’tan MW’lara kadar farklı sistemler oluştururlar.



Şekil 2.9. Fotovoltaik hücre, modül, panel ve diziler

2.4.2. PV modül

PV modüller, 1.5V, 3V, 6V, 12V, 24V, 48V gibi standart gerilimlerde üretilirler. 1000 W/m² ışınım, 25 °C sıcaklık, AM 1.5 Hava Kitlesi (STC) koşullarında ürettikleri güç W_p olarak etiketlerinde belirtilir. Ayrıca V_{oc} , I_{sc} , V_{mpp} ve I_{mpp} değerleri belirtilir. Çok çeşitli ölçülerde ve güçlerde üretilebilirler.

2.4.3. Batarya/akü

PV sistemlerde kullanılan bataryalardan, yüksek şarj/deşarj verimi, derin boşalma, hızlı şarj, düşük maliyet ve yüksek devir ömrü gibi özellikler beklenir. Kurşun-asit starter aküleri, ucuz olmalarına karşın derin boşalmaya izin vermedikleri ve en önemlisi düşük devir (1 devir = 1 dolma ve boşalma) dolma ömrüne (200-700 devir) sahip oldukları için PV sistemlerde kullanılmaya pek uygun değildirler. PV sistemlerde çoğunlukla devir sayısı 1500'den fazla olan stasyonier tip kurşun-asit aküler tercih edilmektedir.

Batarya kapasitesi Amper-saat (Ah) olarak belirtilir. Ah kapasitesi ne kadar büyükse batarya o kadar fazla enerji depolar. Enerji kapasitesi $Wh = Volt \times Ah$. Örneğin 12V, 45Ah'lık bir akünün enerjisi $12 \times 45 = 540 Wh$ 'dir.

Akülerle ilgili unutulmaması gereken en önemli noktalardan biri de şudur: 60 Ah'lık bir aküden 1 saat boyunca 60A çekemezsiniz ama 10 saat boyunca 6A çekilebilir. Buna göre aküden yüksek akım çekmek yerine düşük akımla uzun süreli akım çekmek esastır. Batarya gerilimi mutlaka şarj regülatörü, invertör ve PV modülleriyle uyumlu olmalıdır.

Aküler seri bağlanarak gerilim ve paralel bağlanarak akım kapasitesi artırılır. Her iki bağlantıda da enerji depolama (Wh) miktarı artar. Bataryalar paralel bağlandıklarında akımı eşit paylaşamama problemi ortaya çıkar. 4'ten fazla paralel bağlama tavsiye edilmez. İç direnç farklılıklarından ötürü yüklenme dengesizlikleri ortaya çıkar. Bundan dolayı batarya ömrü çok kısalmaktadır.

Kullanılan akü tipine göre akülerde müsaade edilen ve daha aşağıya düşmesini istemediğimiz birdeşarj sınırı (depth of discharge = DOD) değeri vardır. Genelde % yüzde olarak ifade edilir. Hiçbir Kurşun – Asit akünün tam boşalmasına müsaade edilmemelidir. Bu değer genelde 0,3–0,9 (%30 ile %90) arası değişen bir rakamdır ve seçilen akü türünün kataloğuna bakılarak bulunmaktadır.

2.4.4. Şarj regülatörü

Şarj regülatörleri güneş pilinden bataryaya olan enerji akışını düzenlerler ve bataryayı kontrollü şekilde şarj ederler. Modern regülatörler MPPT özelliği ile %30 daha fazla enerji sağlayabilirler. Bataryaya daha fazla modül bağlayabilmek için paralel bağlanabilirler.

Şarj regülatörü bataryanın şarj durumunu (doluluk durumunu) kontrol ederek, ömrünü uzatır. Solar şarj regülatörleri ile piyasada satılan akü şarj cihazları farklıdır. Birbirlerinin yerine kullanılamazlar. Akünün aşırı şarj vedeşarj olarak zarar görmesini engellemek için kullanılan

şarj regülatörleri akünün durumuna göre, ya güneş pillerinden gelen akımı veya yükün çektiği akımı keser.



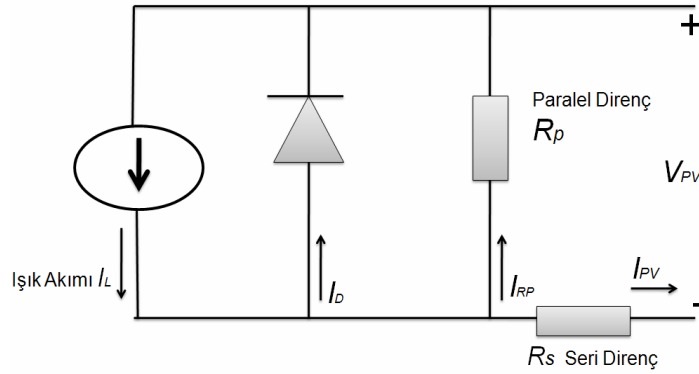
Şekil 2.10. Şarj Regülatörü

2.4.5. Evirici

Eviriciler veya invertörler, doğru gerilimden değişken gerilim dalga biçimi elde eden, çıkış frekansı ve geriliminin birbirinden bağımsız olarak ayarlanabildiği düzeneklerdir. Eviricilerin üreteceği dalganın biçimi ve frekansı, kullanılan yarı iletken elemanın karakteristiklerine, iletim ve yalıtım sürelerine bağlıdır. Yarı iletken eleman olarak güç ve frekansa göre; BJT, MOSFET, IGBT, GTO ve hızlı SCR türleri kullanılabilir [14]. İdeal eviricilerin çıkış dalga şekli sinüs biçimlidir. Ayrıca pratikte eviricilerin dalga şekilleri tam sinüs biçimli değildir ve bu yüzden harmonikler içerir [15].

3. PV HÜCRENİN MATLABDA AKIM-GERİLİM EĞRİSİNİN ÇİZDİRİLMESİ

PV diyotların davranışlarını anlamak ve karakteristiklerini incelemek için elektriksel özellikleri iyi bilinen elemanlardan oluşan bir eşdeğer devresine gerek duyulmaktadır. PV diyotlar için basit ve gelişmiş olmak üzere eşdeğer devreler literatürde yer almaktadır. PV diyotlar için yaygın olarak kullanılan eşdeğer devre modeli şekil 3.1’de görülmektedir [16].



Şekil 3.1. PV Diyot eşdeğer devresi

$$I_{PV} = I_L - I_D - I_{RP} \quad (3.1)$$

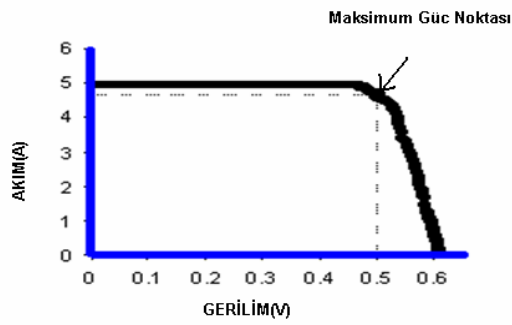
$$I_{PV} = I_L - I_D - I_{RP} = I_L - I_s \left(e^{\frac{e(V_{PV} + I_{PV} \cdot R_s)}{kT}} - 1 \right) - \frac{V_{PV} + I_{PV} \cdot R_s}{R_p} \quad (3.2)$$

$$I_{PV} = I_L - I_D - I_{RP} = I_L - I_s \left(e^{\frac{q(V_{PV} + I_{PV} \cdot R_s)}{nkT}} - 1 \right) - \frac{V_{PV} + I_{PV} \cdot R_s}{R_p} \quad (3.3)$$

Denklemler 3.1, 3.2 ve 3.3’de q = Elektron yükü ve n = idealite faktörüdür. I_L : ışık akımı, I_s : saturasyon akımı, n : idealite faktörü, R_p : paralel direnç, R_s : seri direnç olup bir güneş pili için bu beş parametre bilinirse, herhangi bir sıcaklık için akım-gerilim karakteristiği, dolayısıyla elektriksel çalışma karakteristiği elde edilir. Modern güneş pilleri için, çok hassas olmayan analizlerde R_p ve R_s ’nin etkileri ihmal edilebilir. Bu durumda denklem 3.4’deki halini alır.

$$I_{PV} = I_L - I_s \left(e^{\frac{qV_{PV}}{nkT}} - 1 \right) \quad (3.4)$$

Bir güneş pili hücresi fotovoltaik sistemlerin en temel elemanıdır. 10 cm x10 cm alanlı bir hücre 1000 W/m² ışınım ve 25 °C sıcaklıkta yaklaşık 0.6 V gerilim ve yaklaşık 3 A akım üretebilir (P=1.8W). Ancak bu değerler pek çok uygulama için yeterli değildir. Bu nedenle seri ve paralel bağlayarak gerilim ve akım değerleri, dolayısıyla güç değerleri yükseltilir.

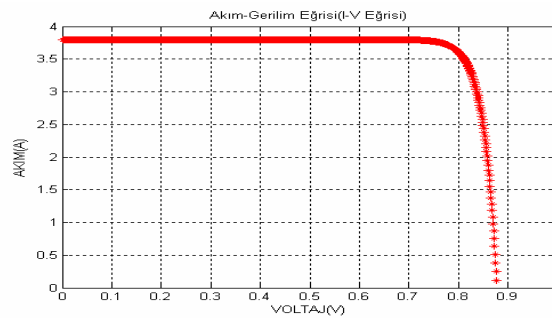


Şekil 3.2. PV Hücresinin I-V Eğrisi

Genel olarak bir PV hücresinin I-V eğrisi şekil 3.2'deki gibidir. Hesaplamalarda diyotun kompleks eşdeğerinden daha basit eşdeğer devresine indirgenmiş ve 3.4'deki denklem ortaya çıkmıştır. Denklem 3.4'e göre, bir Matlab formülasyonu yardımıyla I-V eğrisi çizdirilebilir.

Matlab kodlarıyla PV Hücresinin I-V eğrisi çizdirilirse şekil 3.3. ortaya çıkmaktadır. Bu tasarımda I_L : ışık akımı, I_s : satürasyon akımı olup, $I_L = 3.8$ A, $I_s = 1e^{-14}$ A, $n = 1$ sabit alınmıştır. $T = 303$ °K (Kelvin) (= 30 °C) olarak alınmıştır

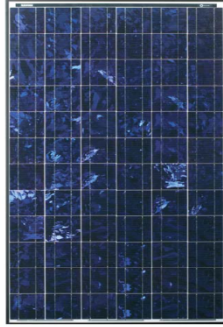
$$^{\circ}\text{C} = ^{\circ}\text{K} - 273 \text{ Santigrat-Kelvin Dönüşümü} \quad (3.5)$$



Şekil 3.3. Matlab ile çizdirilen PV Hücresinin I-V Eğrisi

4. “BP SX 170B PV” MODÜLÜNÜ MATLAB İLE MODELLEMEK

Şekil 4.1’de resmi görülen BP SX 170B PV modülü Matlab/Simulink ile modellenmek üzere seçilmiştir. Bu modülde 72 adet çok kristalli silisyum diyot birbirine seri olarak bağlanmıştır ve modül 170 W maksimum güce sahiptir. 6 x 12 parça şeklinde seri olarak bağlanmıştır. Bu PV modülünün elektriksel özellikleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

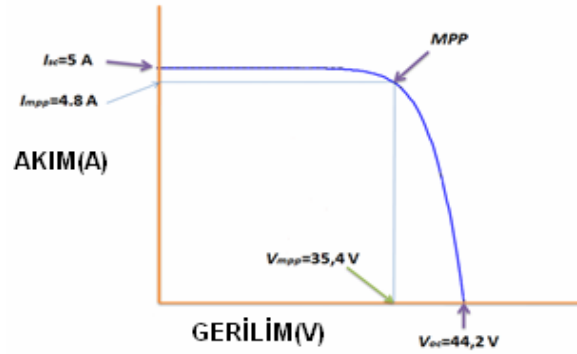


Şekil 4.1. BP SX 170B PV modülünün resmi (BP data sheet, 2011)

Üretici firmalar tarafından modül parametreleri; standart test koşullarında (Standart Test Condition, STC) verilmektedir. (STC: $1000\text{W}/\text{m}^2$ güneş ışınımı, AM (AirMass) 1.5 spektral dağılımı ve $25\text{ }^\circ\text{C}$ PV modül sıcaklığı değerleri olarak tanımlanmaktadır.) Standart test koşullarının sağlanması için, güneş ışınımının havakütle 1.5 (AM1.5) spektrumu sağlaması ve $1\text{ kW}/\text{m}^2$ güç yoğunluğunda olması yanında, modüllerin, ölçümler esnasında $25\text{ }^\circ\text{C}$ 'ta tutulması gerekir. Bu koşullardaki çıkış gücü modülün en büyük çıkış gücü (peak power) olarak nitelendirilir ve P_{max} ile gösterilir.

Çizelge 4.1. BP SX 170B PV modülünün elektriksel özellikleri (BP data sheet, 2011) [17]

Maksimum Güç (P_{max})	→	170 W
Maksimum güç noktasındaki Gerilim değeri (V_{mpp})	→	35.4 V
Maksimum güç noktasındaki Akım değeri (I_{mpp})	→	4.8 A
Açık Devre Gerilimi (V_{oc})	→	44.2V
Kısa Devre Akımı (I_{sc})	→	5.0 A
Akımın sıcaklık katsayısı (alpha)	→	$0.065 \pm 0.015 \text{ \% / } ^\circ\text{C}$
Gerilimin sıcaklık katsayısı (beta)	→	$-160 \pm 20 \text{ mV / } ^\circ\text{C}$
Gücün sıcaklık katsayısı	→	$-0.5 \pm 0.05\% / ^\circ\text{C}$



Şekil 4.2. BP SX 170B PV modülü için I-V eğrisi (1000 W / m^2 , $25 \text{ } ^\circ\text{C}$)

BP SX 170B PV modülün akım-voltaj karakteristiği katalog bilgilerine göre şekil 4.2’de görüldüğü gibi çıkarılabilir. Eğrinin gerilim eksenini kestiği değer açık devre voltajı V_{oc} , akım eksenini kestiği değer de kısa devre akımı I_{sc} değeridir.

Sistem gücü sistem akımının ve sistem geriliminin çarpımıdır. Buna göre PV modülünden elde edilebilecek maksimum güç, akım-gerilim çarpımının maksimum değerinde gerçekleşmektedir. Bu durumdaki güç P_{max} , akım I_{mpp} ve gerilim de V_{mpp} olarak sembolize edilmektedir. Şekil 4.2. incelenirse $P_{max} = (35.4) \cdot (4.8) = 169.92 \text{ W}$ olarak ortaya çıkmaktadır. Yani ürünün katalog bilgilerinde verilen 170 W ‘lık güce çok yakın bir değer olduğu

görülmektedir. İdeal olarak PV modüller her zaman maksimum güç noktasında çalıştırılabilirler. Gerçekte ise I-V eğrisi üzerindeki herhangi bir noktada çalışırlar.

4.1. PV Modülün Matlab M-File Kullanılarak Modellenmesi

PV diyotlar için yaygın olarak kullanılan eşdeğer devre modeline şekil 3.1’de değinilmişti. Şekil 3.1’de ışık akımı (I_L) fotonlar tarafından üretilen akımı göstermektedir ve sabit ışınlım ve sıcaklık altında değeri sabittir. Paralel R_p direnci sızıntı akımını temsil etmek için, seri R_s direnci ise çıkıştaki gerilim düşümünü temsil etmek için kullanılmaktadır.

Fotovoltaik dönüşümün verimliliği, R_s ’deki küçük değişimlere duyarlıdır. Ancak R_p ’deki değişimlere duyarlı değildir. R_s ’deki küçük bir artış, fotovoltaik modül çıkışını önemli ölçüde azaltır [18]. PV modülün güç çıktısı ışınlım şiddetinin ve çevre sıcaklığının birer fonksiyonudur. I_D akımı fotovoltaik diyodu oluşturan yarı iletken malzemenin p-n noktasından akan bir iç akım olup, diyodun mutlak sıcaklığı, gerilim ve yük tarafından çekilen akımın bir fonksiyonu olarak değişir.

Genel olarak PV modülünde I-V değerlerini bulmak için çeşitli matematiksel hesaplama yöntemleri geliştirilmiştir. PV modellemesinde 4.1, 4.2 ve 4.3’teki denklemler daha basit ve anlaşılır yöntem olduğu için bu çalışmada kullanılacaktır. Bu eşitliklerde V_{ref} ve I_{ref} değerleri I-V eğrisindeki referans olarak alınan değerlerdir. Sistemdeki kısa devre akımı ve açık devre voltajı, akım ve gerilimin sıcaklık katsayıları üretici firma katalog bilgilerinde yer almaktadır.

PV modülün akım değerini hesaplamak için α ve β değerleri akım ve gerilimin sıcaklık katsayıları olmak üzere yeni akım ve gerilim değeri denklem 4.1 ve 4.3’teki gibi olacaktır.

$$I_{new} = I_{ref} + \left[\alpha \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) (T_c - T_{cref}) + \left(\frac{G}{G_{ref}} - 1 \right) I_{sc} \right] \quad (4.1)$$

$$\Delta I = \left[\alpha \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) (T_c - T_{cref}) + \left(\frac{G}{G_{ref}} - 1 \right) I_{sc} \right] \quad (4.2)$$

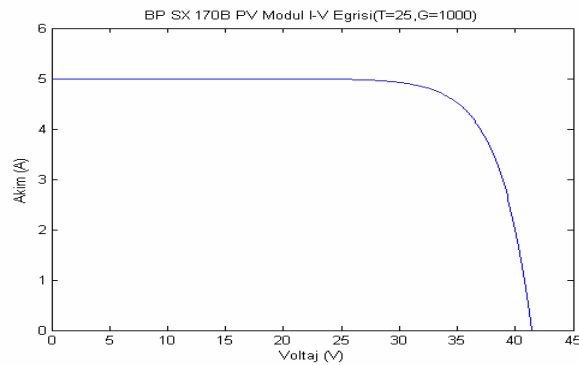
$$V_{new} = -\beta(T_c - T_{cref}) - R_s \Delta I + V_{ref} \quad (4.3)$$

4.1.1. PV modülün akım-gerilim eğrisinin çizdirilmesi

Bu bölümde PV modülün sadece Matlab m-file kullanılarak modellenmesi anlatılacaktır. Modeli oluşturmak için kullanılan Matlab m-file kodları PV modül denklemlerinden yararlanılarak yazılmıştır. Matlab kodları çalıştırıldığı zaman aşağıdaki verilerin Command Window penceresini kullanarak kullanıcıdan PV modül parametrelerini ister. Bu parametreler şunlardır:

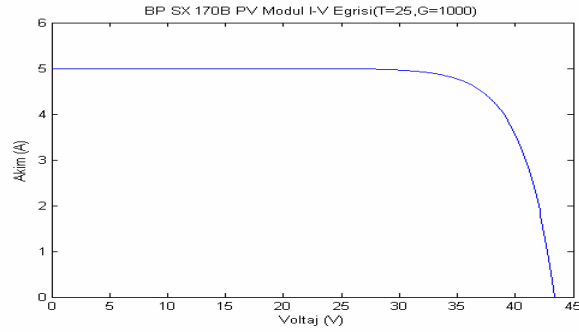
Açık devre gerilim değerini giriniz	$V_{oc} = 44.2$
Kısa devre akımını giriniz	$I_{sc} = 5$
Maksimum gerilim değerini giriniz	$V_{mp} = 35.4$
Maksimum akım değerini giriniz	$I_{mp} = 4.8$
Sıcaklık değerini giriniz	$T_c = 25$
Akımın sıcaklık katsayısını giriniz alpha	$\alpha = 0.00065$
Gerilimin sıcaklık katsayısını giriniz beta	$\beta = -0.14$
Işınım şiddetini giriniz	$G = 1000$
Seri bağlı direnç değerini giriniz	$R_s = 0.7$

Bu parametreler girildikten sonra şekil 4.3'te BP SX 170B PV modülüne ait Standart Test Koşullarında (STC: $T = 25^\circ\text{C}$, $G = 1000\text{W}/\text{m}^2$, AM 1.5) m-file kodlarıyla çizdirilmiş I-V eğrisi görülmektedir.



Şekil 4.3. BP SX 170 PV modülünün Matlab m-file ile çizdirilmiş I-V eğrisi

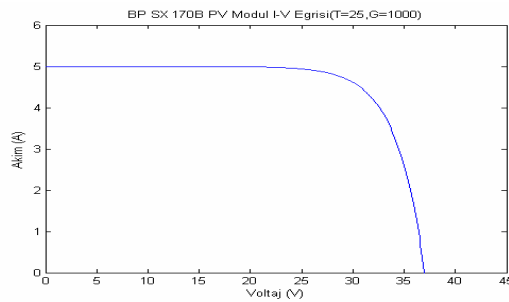
Şekil 4.3 incelendiğinde; $V_{oc} = 44.2$ olması gerekirken daha düşük seviyelerde olduğu görülmektedir. Fotovoltaik dönüşümün verimliliği, R_s 'deki küçük değişimlere duyarlıdır. R_s 'deki küçük bir artış, fotovoltaik modül çıkışını büyük ölçüde azaltır. Bu nedenle R_s direnci küçültülüp aynı değerler simülasyonda tekrarlandığında (Seri bağlı direnç değerini $R_s = 0.2 \Omega$ olarak alınır) şekil 4.4 elde edilmektedir.



Şekil 4.4. BP SX 170 PV modülünün Matlab m-file ile çizdirilmiş I-V eğrisi

Çizdirilen bu eğrinin şekil 4.2'de verilen eğri ile aynı olduğu görülmektedir. Matlab ile çizdirilen I-V eğrisinin akım (A) eksenini kestiği değer kısa devre akımı olan 5.0 A değerini, eğrinin gerilim (V) eksenini kestiği değer ise yaklaşık olarak açık devre gerilimi olan 44.2V değerini vermektedir. 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. Ya da başka bir deyişle akımın dış terminallere ulaşmaya kadar gördüğü direnç değeridir.

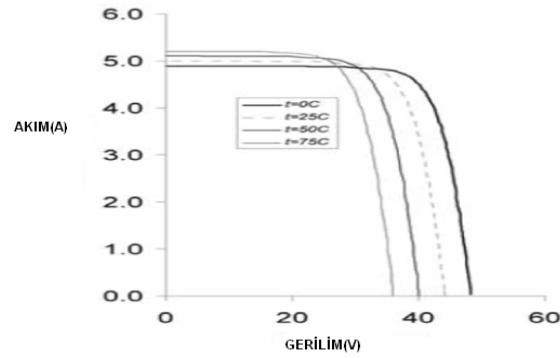
Modern güneş pillerinde, seri direnç $< 0.3 \text{ ohm}$ 'dur. R_s direncinin artması, R_p direncinin de azalması maksimum güç noktasını aşağıya çeker. Pratikte, verimli bir hücre için R_s direncinin mümkün olduğunca küçük, R_p direncinin de mümkün olduğunca büyük olması istenir. Pratikte R_s direnci $0,5 \Omega$, R_p direnci de 500Ω mertebelerindedir [19].



Şekil 4.5. BP SX 170 PV modülünün Matlab m-file ile çizdirilmiş I-V eğrisi

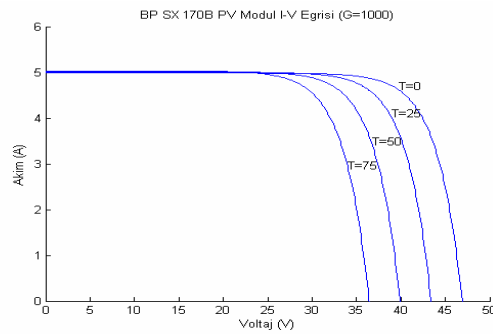
R_s değeri arttırılıp, örneğin $R_s = 1.8 \, \Omega$ gibi bir değer atandığı takdirde, eğrinin gerilim değerini kestiği nokta 40 V'ların altına kadar düştüğü şekil 4.5'de görülmektedir. Demek oluyor ki çalışma noktasını yüksekte tutmak için R_s değerini $0.5 \, \Omega$ 'un altında $0.2 \, \Omega$ civarında bir değerde tutmak ideal olarak değerlendirilmektedir.

4.1.2. PV modülde ortam sıcaklığının I-V eğrisine etkisi



Şekil 4.6. Sabit ışınlımdaki BP SX 170B PV modülünün I-V karakteristiğinin sıcaklık ile değişimi ($G = 1000 \text{ W/m}^2$) (BP data sheet, 2011)

Şekil 4.6'da PV modülün kataloğunda yer alan bir grafik görülmekte olup bu grafik sabit ışınlımdaki PV modülün I-V karakteristiğinin sıcaklık ile değişimi grafiğidir. Katalogda yer alan bu grafiğin benzetimi BP SX 170B PV modülü için yapılarak Matlabda simülasyonu çizdirilebilir. Şekil 4.7'de değişen sıcaklık değerlerine göre BP SX 170B modülünün Matlab kodlarıyla çizdirilmiş I-V eğrileri görülmektedir.



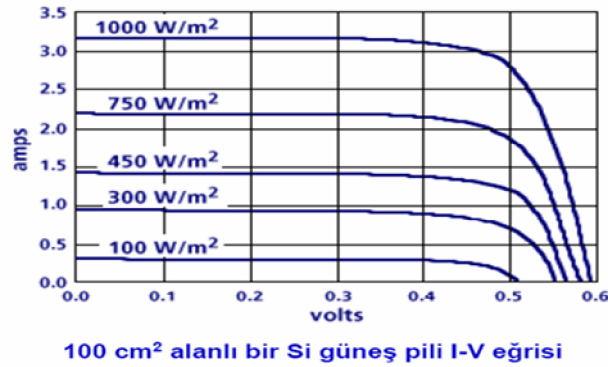
ŞEKİL 4.7. BP SX 170B PV modülünün farklı sıcaklık değerleri için Matlab m-file ile hazırlanıp çizdirilmiş I-V eğrisi

Şekil 4.7'de görüldüğü üzere, akım ekseninde bütün sıcaklık değerlerinde sanki hepsi 5.0 A üzerinde gibi bir izlenim oluşturmaktadır ama şekil üzerinde odaklama yapıldığı zaman

bu durumun öyle olmadığı anlaşılabacaktır. Sıcaklık değerleri ile değişen bu eğrilerin BP Solar firması kataloğundan alınan şekil 4.7’deki eğrilerle çok benzer olduğu görülmektedir. Yapılan benzetim sonucunda sıcaklık artışı PV modülün akımını çok düşük bir değerde arttırırken gerilimi azaltacak şekilde bir etkide bulunduğu anlaşılmıştır.

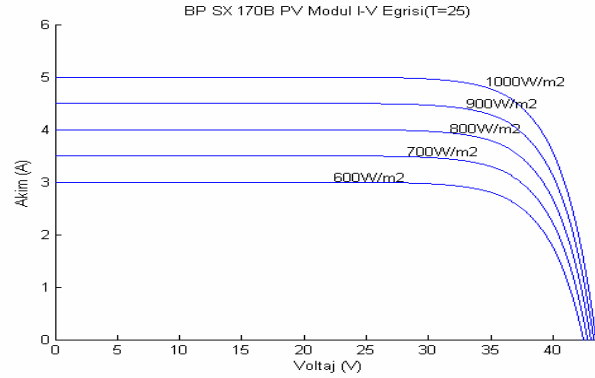
4.1.3. PV modülde ışıının I-V eğrisine etkisi

Şekil 4.8’de farklı ışıının değerleri için bir silisyum güneş pilinin akım-gerilim eğrisi görülmektedir. Burada ışıının artması güneş pilinin akımını dolayısıyla gücünü de arttırmaktadır. ışıının artması gerilim değerini çok fazla değiştirmemektedir.



ŞEKİL 4.8. Silisyum güneş pilinin farklı ışıının değerleri için I-V eğrisi [20]

Şekil 4.8’deki silisyum güneş pili için çizilen I-V eğrisinin, bu çalışmada katalog değerleri kullanılan BP SX 170B PV modeli için sistem benzetimi yapılabilir. Şekil 4.9’da değişen ışıının seviyelerine göre Matlab m-file kodlarıyla çizdirilmiş I-V eğrileri görülmektedir. Bu grafiğe göre ışıının şiddeti azaldıkça akım değeri önemli ölçüde azalırken gerilim değerinde çok büyük bir fark olmadığı anlaşılmıştır. Bu grafiğe dikkatlice bakılırsa kısa devre akımı ışıının şiddeti ile doğrusal olarak değişmekte ve açık devre gerilimi ise logaritmik olarak değişmektedir.



ŞEKİL 4.9. BP SX 170B PV modülünün farklı ışınım değerleri için Matlab m-file ile hazırlanıp çizdirilmiş I-V eğrisi

4.1.4. PV modülün çalışma gücünün hesaplanması

NOCT nominal koşullar altında çalışan bir modülün ölçülmüş hücre sıcaklığı olup test ile ölçülebilir.

Nominal koşullar:

- Işınım: 800 W/m²
- Spektral dağılım: AM 1.5
- Ortam sıcaklığı: 20 °C
- Rüzgar hızı : >1 m/s

NOCT genellikle 42 °C ile 46 °C arasındadır. NOCT herhangi bir ışınım ve hava sıcaklığında modül hücre sıcaklığını öngörmekte kullanılır.

$$T_h = T_\varphi + \frac{\text{NOCT} - 20}{0.8} \cdot G \quad (4.4)$$

Denklem 4.4'de T_h : hücre sıcaklığı, T_φ : çevre sıcaklığıdır.

Bu çalışmadaki yöntem kullanılarak bir PV modülün katalog verilerinden faydalanılarak herhangi bir ışınım ve sıcaklık değerinde üreteceği güç belirlenebilir.

STC koşullarında I_{sc0} , V_{oc0} , P_{mp0} , NOCT katalogdan alınır.

$$I_{sc} = I_{sc0} \times G / 1000 \quad (G: \text{Işınım, sıcaklık etkisi ihmal}) \quad (4.5)$$

NOCT ile T_h hesaplanır.

$$V_{oc} = V_{oc0} - 0.0023 \times N_{cell} \times (T_h - 25^\circ) \quad (4.6)$$

(Ncell: hücre sayısı, ışıınım etkisi ihmal, PV hücrenin gerilimi sıcaklıkla $-2.3\text{mV}/^\circ\text{C}$.)

Bütün çalışma koşullarında FF yaklaşık sabittir dolayısıyla STC koşulları için FF hesaplanır.

$$FF = P_{mp0} / (I_{sc0} \times V_{oc0}) \quad (4.7)$$

$$P_{mp} = I_{sc} \times V_{oc} \times FF \quad (4.8)$$

Çalışmaya konu olan modül, katalog değerleri bilinen 170 W gücündeki BP SX 170B fotovoltaiik modüldür. Bu bölümde BP SX 170B modülünün çalışma şartlarının tespiti için sistem benzetimi yapılmaktadır. Ayrıntılı katalog değerleri BP Solar firmasının web sayfasında verilmiş olup, modülün 72 seri hücreden oluştuğu belirtilmiştir.

$$I_{sc0} = 5 \text{ A}, V_{oc0} = 44.2 \text{ V}, P_{mp0} = 170 \text{ W}, \text{NOCT} = 47^\circ\text{C}$$

Modülün $G = 700 \text{ W/m}^2$ ve $T_c = 34^\circ\text{C}$ deki parametreleri hesaplanır.

$$I_{sc} = 5 \times 700/1000 = 3.5 \text{ A}$$

$$T_h = 34 + 0.7 \times (47 - 20)/0.8 = 57.63^\circ\text{C}$$

$$V_{oc}(57.63^\circ\text{C}) = 44.2 - 0.0023 \times 72 \times (57.63 - 25) = 38.8 \text{ V}$$

$$FF = 170 / (5 \times 44.2) = 0.77$$

$$P_{max}(G, T_h) = 3.5 \times 38.8 \times 0.77 = 104.5 \text{ W}$$

NOT: Modül nominal gücünün yaklaşık $(104.5/170) \%61$ 'inde çalıştığı gözlenmektedir.

Modülün $G = 700 \text{ W/m}^2$ ve $T_c = 34^\circ\text{C}$ deki parametreleri girilerek çalışma gücü ve hücre sıcaklığı hesaplanmaktadır. Bu durum farklı sıcaklık ve ışıınım değerleri için tekrarlanabilir. Bunun için Matlab kodları kullanılarak değişik sonuçlar elde edilmektedir. Matlab formülasyonu kullanılarak, sıcaklık değeri sabit tutulup ışıınım değerleriyle oynanarak

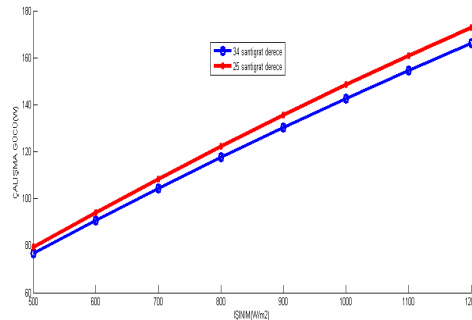
çalışma gücünün nasıl değiştiği incelenebilmektedir. Bu durumun sonuçları Çizelge 4.2’de görülmektedir.

Çizelge 4.2’ye göre; ışıının artması PV modülün çalışma gücünü yukarıya çekmiş ve dolayısıyla PV verimini de artırmıştır. Aynı çizelgede 25°C sıcaklık ve 1200 W/m² ışıında çalışma noktasının 173 W gibi bir değer çıktığı görülmektedir. Zaten BP SX 170B modelinin maksimum gücü 170 W’dır. Bu durumda, bu çalışma noktasının sisteme zarar verebileceği anlaşılmaktadır.

Çizelge 4.2. Farklı ışıınımalar için çalışma gücü

<i>T=34°C (Sabit)</i>	<i>Çalışma Gücü(W)</i>	<i>T=25°C (Sabit)</i>	<i>Çalışma Gücü(W)</i>
<i>İşınım(W/m²)</i>		<i>İşınım(W/m²)</i>	
500	76.7598	500	79.6260
600	90.8220	600	94.2614
700	104.4543	700	108.4669
800	117.6566	800	122.2425
900	130.4290	900	135.5881
1000	142.7715	1000	148.5038
1100	154.6841	1100	160.9897
1200	166.1668	1200	173.0455

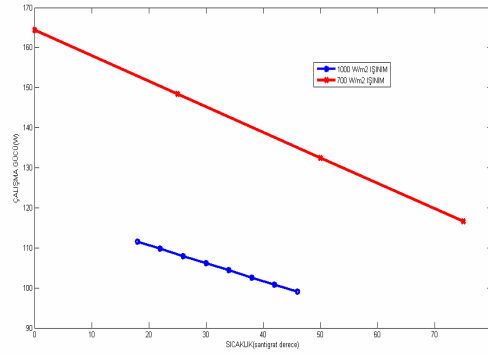
Şekil 4.10’da, sabit sıcaklık altında ışıınımaya bağlı olarak çalışma gücünün değişimi görülmektedir.



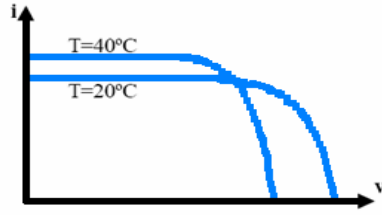
Şekil 4.10. ışıınımaya bağlı olarak çalışma gücünün değişimi

Çizelge 4.3 Farklı sıcaklıklar için çalışma gücü

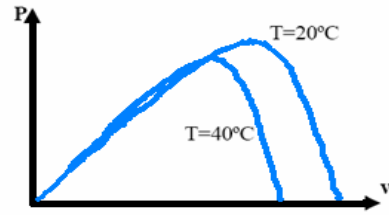
$G = 700 \text{ W/m}^2$ (sabit) Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	Çalışma Gücü (W)	$G = 1000 \text{ W/m}^2$ (Sabit) Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	Çalışma Gücü (W)
18	111.5878	0	164.4269
22	109.8044	25	148.5038
26	108.0210	50	132.5808
30	106.2377	75	116.6577
34	104.4543		
38	102.6709		
42	100.8875		
46	99.1041		

**Şekil 4.11.** Sıcaklığa bağlı olarak çalışma gücünün değişimi

Çizelge 4.3'e göre; sıcaklığın artması PV modülün çalışma gücünü aşağıya çekmiş ve dolayısıyla PV verimini de azaltmıştır. Şekil 4.11'de, sabit ışınım (1000 W/m^2) altında sıcaklığa bağlı olarak çalışma gücünün değişimi görülmektedir. Güneş panelleri çok sayıda küçük hücreden oluşur. Her hücre en basit haliyle yüzeyi büyütülmüş bir P-N jonksiyonu olduğundan, parametreleri bir diyotunki gibi sıcaklık ile değişir. Sıcaklık arttıkça V_{oc} azalır ve I_{sc} artar. V_{oc} 'deki azalma miktarı I_{sc} 'deki artış miktarından çok daha fazla olduğu için sıcaklık arttıkça panelden elde edilebilecek olan maksimum güç azalır. Bu etkiler şekil 4.12 ve şekil 4.13'te gösterilmiştir.



Şekil 4.12. V_{oc} ve I_{sc} 'nin sıcaklıkla değişimi



Şekil 4.13. Gücün sıcaklıkla değişimi

4.2. PV Modülün Simulink Kullanılarak Modellenmesi

Matlab'ın bir uzantısı olan Simulink dinamik sistemlerin benzetimi amacı ile hazırlanmış bir programdır. Simulink, bir taraftan Matlabın genel amaçlı fonksiyonlarını kullanırken bir taraftan da dinamik sistemlerin çözümünde pek çok kolaylıklar sağlamaktadır. Simulink blok diyagramları sayesinde bir sistem kurulabilir, kurulan sistemler bir laboratuvar ortamındaymış gibi incelenebilir. Simulink, sanal bir laboratuvar seti gibi çalışarak kurulan sistemlere ait analiz, tasarım ve geliştirme işlemlerinin yapılabilmesine olanak tanır. Simulink karmaşık sistemlerin tasarlanabilmesi ve benzetiminin yapılabilmesi olanağını vermektedir.

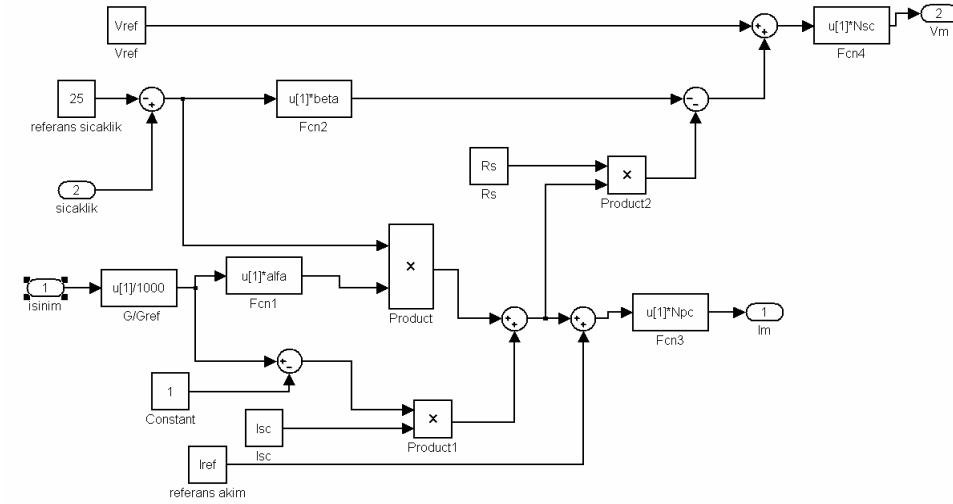
Dinamik sistemlerin modellenmesi genelde sistem elemanlarının blok diyagramlar halinde verildiği Simulink kütüphanesinden grafiksel kullanıcı arayüzü ile yapılır. Simulink, birçok matematiksel ifade blokları ve elektrik, elektronik, sinyal işleme, denetim sistemleri gibi özel alanlara kadar yayılmış birçok blok kütüphanelere sahiptir. Sürekli zamanlı ve kesikli-ayrık zamanlı sistemleri veya her ikisini de içeren karma sistemleri desteklemektedir.

Modül modelinde giriş parametreleri sıcaklık ve ışınım, çıkış parametreleri ise akım ve gerilimdir. Genel olarak PV modülünde I-V değerlerini bulmak için çeşitli matematiksel hesaplama yöntemleri geliştirilmiştir. PV modellemesinde 4.1, 4.2 ve 4.3'deki denklemler daha basit bir yöntem olduğu için bu çalışmada kullanılmıştır.

Bu eşitliklerde V_{ref} ve I_{ref} değerleri I-V eğrisindeki referans olarak alınan değerlerdir. Sistemdeki kısa devre akımı ve açık devre gerilimi, akım ve gerilimin sıcaklık katsayıları üretici firma katalog bilgilerinde yer almaktadır.

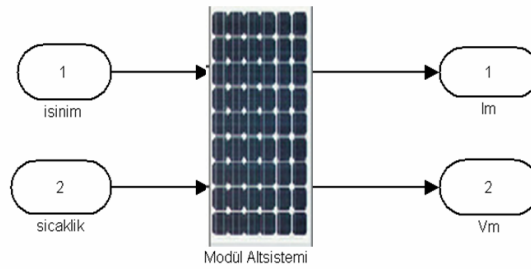
Geliştirilen modelin giriş değerleri sıcaklık ve ışınım, kullanıcı tarafından sisteme girilecek değerler; akımın sıcaklık katsayısı, gerilimin sıcaklık katsayısı, modül kısa devre akımı, seri bağlı direnç değeri, referans gerilim, referans akım, seri ve paralel bağlı hücre sayısı

olmak üzere PV modülün Matlab/Simulink ortamında geliştirilen son hali şekil 4.14’de gösterilmiştir.



Şekil 4.14. Simülinkte akım-gerilim değerinin elde edilmesi

Simulink çalışma sayfasında bir çok bloğun kullanılması durumlarında düzenli ve hızlı bir çalışma imkanı için alt sistemlerin oluşturulması gerekebilir. Şekil 4.15’de alt sistem oluşturulmuş durum görülmektedir.



Şekil 4.15. Simülinkte alt sistem oluşturma

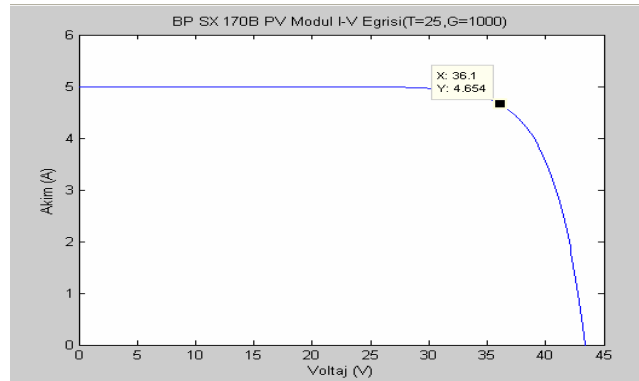
“Parametreler (parameters)” sekmesinde sistemin modellenmesinde kullanılan ve kullanıcı tarafından girilmesi istenilen parametreler belirtilir. Geliştirilen modül alt sistemi için kullanıcı tarafından girilen parametreler;

- referans gerilim,
- referans akım,
- akımın ve gerilimin sıcaklık katsayıları,

- seri bağılı direnç değeri,
- modüle paralel ve seri bağılı hücre sayısı,
- kısa devre akımıdır.

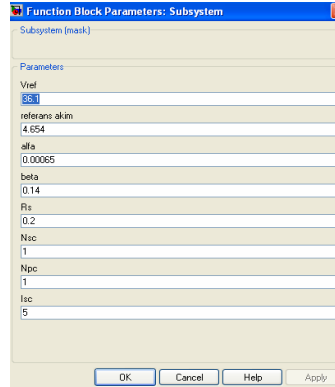
PV modül parametrelerini üretici firma katalog bilgilerine göre doldurulur. Bu işlemden sonra çalışma sayfasında ışıınım ve sıcaklık blokları silinerek yerine “constant” blokları, V_m ve I_m blokları silinerek yerine “Sinks” kütüphanesinden “display” blokları eklenir. Güç değerinin görüntülenebilmesi için modül akım ve gerilim değerleri çarpılır. Işıınım ve sıcaklık değerleri sabit olarak girildikten sonra geliştirilen modelin benzetimi yapılabilir.

Bu eşitliklerde V_{ref} ve I_{ref} değerleri I-V eğrisindeki referans olarak alınan değerlerdir. Modül hangi akım ve gerilim değerinde çalıştırılmak isteniyorsa değerler ona göre girilir. Sistemdeki kısa devre akımı ve açık devre voltajı, akım ve gerilimin sıcaklık katsayıları üretici firma katalog bilgilerinde yer almaktadır.

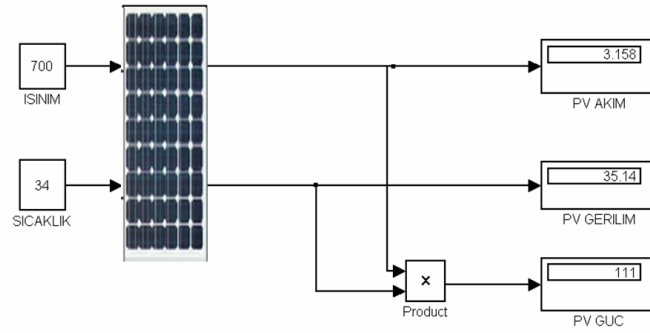


Şekil 4.16. V_{ref} ve I_{ref} değerlerinin işaretlenmesi

Bu tasarımda çalışma noktası olarak şekil 4.16'daki nokta işaretlenmiştir. ($V = 36.1$ Volt, $I = 4,654$ Amper) Alt sistem değerleri de şekil 4.17'daki gibi girilmektedir.



Şekil 4.17. Alt sistem değerlerinin girilmesi



Şekil 4.18. Akım, gerilim ve güç değerlerinin simülante gösterilmesi

Simülasyon hazır olduğu için sonuçlar daha da artırılabilir. Burada sıcaklığı sabit tutup ışıınım değerleriyle oynayarak maksimum çalışma gücünün nasıl etkilendiği görülmektedir. Değişik ışıınım ve sıcaklık değerleri için alınmış sonuçlar Çizelge 4.4.ve 4.5’de görülmektedir.

Çizelge 4.4. Farklı ışıınımlar için maksimum çalışma gücü

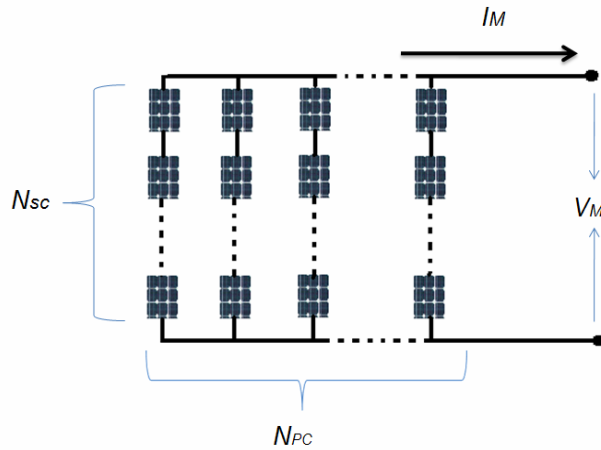
T=34°C (Sabit) Işıınım (W/m ²)	Maksimum Çalışma Gücü (W)
500	76.22
600	93.65
700	111
800	128.2
900	145.3
1000	162.3

Çizelge 4.5. Farklı sıcaklıklar için çalışma gücü

$G=700 \text{ W/m}^2$ (Sabit)	Maksimum Çalışma Gücü(W)
Sıcaklık($^{\circ}\text{C}$)	
18	117.8
22	116.1
26	114.4
30	112.7
34	111
38	109.3
42	107.6
46	105.8

4.3. 4 kW Gücündeki Fotovoltaik Generatörün Simülink ile Modellenmesi

Güneş pilleri, verimlerine bağlı olarak, güneş ışıını altında 1-1.5W arasında elektrik enerjisi üretmektedir. Tek bir diyottan elde edilen akım değeri, 2-2.5A, gerilim değeri ise 0.5-0.6V arasında olduğundan, çok sayıda güneş pili birbirine seri bağlanarak, 30-340W arasında güce sahip modüller elde edilir. Güneş panelleri, şekil 4.19'da görüldüğü gibi, N_{PC} sayıda paralel kollardan oluşur. Her bir N_{PC} kol, N_{SC} sayıda güneş pili ile seri olarak birbirlerine bağlanmıştır. Bu seri ve paralel bağlı güneş pili sayıları, PV modülleri üreten firma katalog bilgilerinden elde edilebilir[21].

**Şekil 4.19.** Güneş pillerinin seri ve paralel bağlanması ile güneş panelinin elde edilmesi

Birbirlerine seri bağlı güneş pillerinin toplam gerilim değeri, aynı akım değeri için her bir güneş pili gerilim değerinin birbirine eklenmesiyle bulunur. Birbirlerine paralel bağlı güneş pillerinin toplam akım değeri, aynı gerilim değerleri için üretilen akım değerlerinin

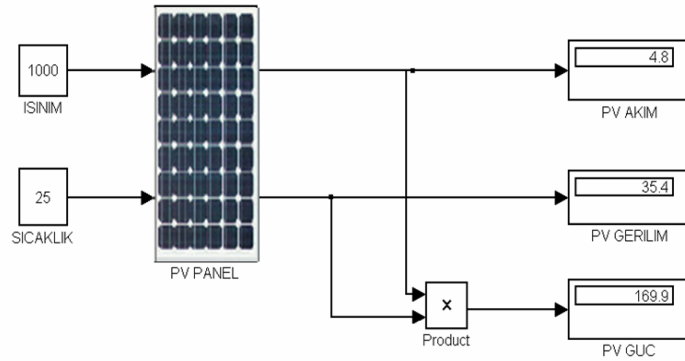
toplanmasıyla bulunur. V_{pil} bir güneş pilinin gerilimi, I_{pil} ise bir güneş pilinin akımı ve Modül uçlarına uygulanan gerilim V_M ve modül akımı I_M değerleri denklem 4.9 ve 4.10'daki gibi ifade edilebilir.

$$V_M = N_{SC} * V_{pil} \quad (4.9)$$

$$I_M = N_{PC} * I_{pil} \quad (4.10)$$

Çizelge 4.1'de teknik özellikleri verilen BP SX 170 B güneş paneli, Matlab/Simulink ile modellenmek üzere seçilmiştir. Bu modülde 72 adet çok kristalli silisyum güneş pili birbirine seri olarak bağlanmıştır ve modül 170W maksimum güce sahiptir.

Güneş panelinin teknik özellikleri bilgilerinden faydalanarak, Matlab Simulink'te güneş paneli modellenmiştir. Güneş paneli modeli oluşturulurken, denklem 4.1., 4.2. ve 4.3'teki eşitlikler kullanılmıştır. Güneş paneli modelinde, girişte sıcaklık ve güneş ışıınımı bilgisi bulunmakta, çıkışta ise panel akım ve gerilim bilgisi yer almaktadır. Simulink'te modellenen simülasyonda PV panel, alt sistem olarak modellenmiştir. 25 °C sıcaklık ve 1000 W/m² güneş ışıınımı değerlerinde PV panelin üreteceği akım, gerilim ve güç değerleri şekil 4.20'de görülmektedir.



Şekil 4.20. Güneş panelinin Simulinkte modellenmiş hali

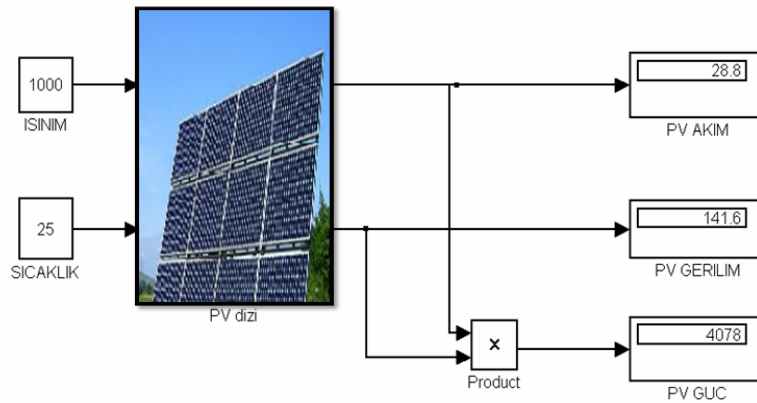
Güneş panelinin maksimum çalışma noktası (MPP noktası V_{ref} ve I_{ref}), akım ve gerilim sıcaklık katsayıları alfa ve beta, kısa devre akımı I_{sc} gibi parametreleri şekil 4.21'de görüldüğü gibi modele girilmektedir. Güneş paneli birbirine seri bağlı 12 adet güneş pilinden ve bu seri yapının birbirine paralel bağlı olduğu 6 ana koldan oluşmaktadır. Bu sebeple panel modellenirken $N_{PC}=6$ ve $N_{SC}=12$ olarak sistemde modellenmiştir.

Parameter	Value
Vref	35.4
referans akim	0.8
alfa	0.00065
beta	0.14
Rs	0.2
Nsc	12
Npc	6
Isc	5

Şekil 4.21. Güneş Paneli Teknik Özelliklerinin Modellenen Sisteme Girilmesi

Güneş panelinin modelinin çalıştırılması ile şekil 4.22'deki değerler elde edilmektedir. Burada PV panel akımı 4.8 A, PV panel gerilimi 35.4 V ve PV çıkış gücü yaklaşık 170 W olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar Çizelge 4.1'deki BP SX 170B güneş panelinin teknik özellikleri ile bire bir örtüşmektedir. Ayrıca PV panel bu çalışma koşullarında MPP noktasında çalışmış olmaktadır.

Güneş panelinin modelinin elde edilmesinden sonra, bir panel dizisinin modeli üzerine çalışılmıştır. Elde edilen PV panel bloğu kullanılarak, PV generatör modeli elde edilmiştir. Burada istenilen çıkış gücü 4 kW ve yüke aktarılmak istenilen çıkış akımı yaklaşık 29 A'dır. Bu yapı ile istenilen güç ve akım elde edilmektedir. Şekil 4.22'de modellenen PV generatör yapısı görülmektedir.



Şekil 4.22. Güneş Panellerinden Oluşan 4 kW Gücündeki PV Generatör

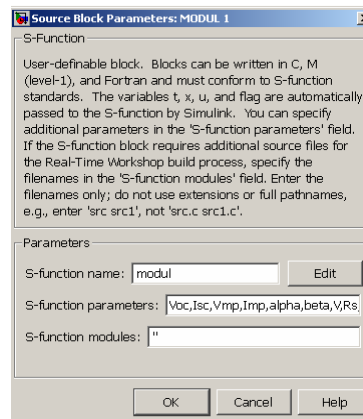
PV generatör tasarımında 10 adet modül kullanılmış olup 6 paralel kol ve her kolda 4 adet modül olacak şekilde tasarlanmıştır. PV generatör çıkışından elde edilen akım, gerilim ve güç bilgisi şekil 4.22’de görülebilmektedir. Burada PV generatör çıkış gerilimi 141.6 V ve PV generatör çıkış akımı 28.8 A’dır. PV generatör çıkış gücü ise 4078 W olarak elde edilmiştir.

PV generatör modeli, uygun sayıda PV panelin birbiri ile seri bağlanması ve bu seri kolların da uygun şekilde paralel kollar şeklinde bağlanması ile istenilen çıkış gücü ve çıkış akımı elde edilecek şekilde tasarlanmıştır. Bunu sağlamak için sadece seri ve paralel koldaki eleman sayılarının modele girilmesi yeterli olacaktır.

Yapılan çalışmada ise öncelikle güneş pilinin eşdeğer devresinden yararlanılarak Matlab Simulink ile PV panel bloğu elde edilmiş, bu yapı kullanılarak 4 kW gücünde bir PV generatör tasarlanmıştır. Geliştirilen model ile PV ile ilgili çalışmalarda, PV generatörün kolaylıkla kullanılabilmesi ve farklı özelliklerde ve güçlerde PV generatörlerin de modellenmesi amaçlanmıştır.

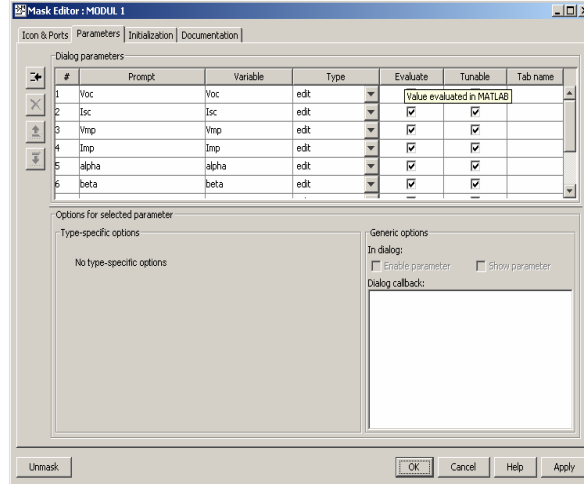
4.4. PV Modülün Matlab m-file ve Simulink Kullanılarak Modellenmesi

PV modül modeli Bölüm 4.2’de Simulink kullanılarak tasarlanmıştır. Bu bölümde ise PV modülü modellemek üzere Matlab m-file ile birlikte Simulink blokları kullanılacaktır. Bu kısımda S-function bloğu kullanılmıştır. S-Function Parametres alanına ise kullanıcı tarafından girilecek olan modül katalog parametreleri şekil 4-23’deki gibi yazılır.

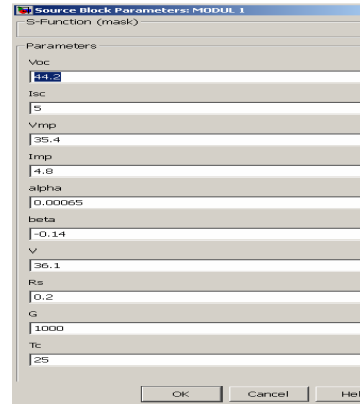


Şekil 4.23. S-Function bloğu ile ‘modul’ m-file dosyasının ilişkilendirilmesi

(Not: modul m-file dosyası Matlab dosyası içinde olması gerekir.) S-Function bloğunun modifiye edilebilmesi için “edit mask” seçeneği ile “mask editor” penceresi açılarak “parameters” sekmesi şekil 4.24’de görüldüğü gibi doldurulur.

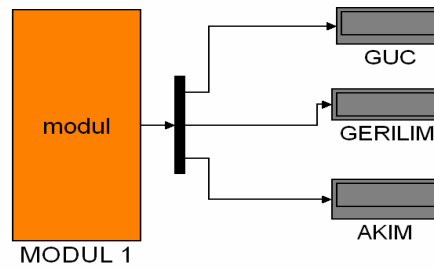


Şekil 4.24. MODUL1 bloğunun modifiye penceresinin görünümü



Şekil 4.25. MODUL1 bloğu için blok parametreleri penceresi

Bu işlemden sonra “S-Function” bloğunun parametreleri şekil 4.25’deki gibi doldurulur. Matlab m-file ve Simulink S-Function bloğu kullanılarak geliştirilen PV modül modeli benzetim için hazırdır. Sonuçları görüntüleyebilmek için şekil 4.26’da görüldüğü gibi demux bloğu S-Function bloğuna ve demux bloğuna da display blokları bağlanır.



Şekil 4.26. MODUL1 bloğuna çıkışların bağlanması

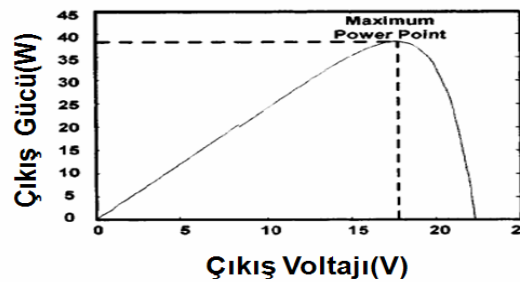
“5.2. Model Kıyaslaması” konulu çalışmada MODUL1 simülasyonundan elde edilen çıktılar Çizelge 5.1 ve 5.2’de ayrıntılı inceleneceğinden dolayı sonuçlara bir daha bu kısımda yer verilmemiştir.

5. PV MODÜLLERİN MAKSİMUM ÇIKIŞ GÜCÜNDE ÇALIŞTIRILMASI

PV modüller; sıcaklık, ışıınım ve yük gerilimi (genellikle beslenen akü gerilimi) gibi çevresel koşullarla çok fazla değişiklik gösteren, doğrusal olmayan bir karaktere sahiptirler. Bu değişkenlere bağlı olarak sağladıkları güç değeri de değişiklik göstermektedir. Bu durum PV modüllerden en yüksek verimde yararlanabilmeyi engellemektedir[22].

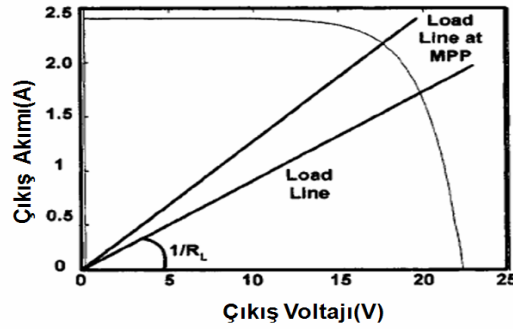
Normalde PV sistemlerde yüke ulaştırılan gerilim ve akım değerleri maksimum güce karşılık gelen akım ve gerilim değerlerinin altında seyreder. PV modülünün çalışma verimini artırmak için, Akım-Gerilim (I-V) eğrisinde en yüksek gücü sağlayabilecek koşullara getirilmesi gerekmektedir. Bu da modül için maksimum güç noktasının (MPP) bulunmasıyla gerçekleşir. Bu sayede modüllerden elde edilen güç, koşullara göre, %10-30 arttırılabilir. Ayrıca PV modül maliyetinin PV sistem içindeki payının %60 olduğu düşünülürse ekonomik açıdan bu kritik noktanın (MPP) saptanması oldukça önemlidir [23].

Maksimum güç noktasının bulunması ile gereksinim duyulan güç minimum sayıda PV modül kullanılarak temin edilebilir. Bir güneş pilinden elde edilebilecek elektriksel güç, öncelikle, gelen güneş enerjisi ve hücre sıcaklığına bağlıdır. Örneğin, gelen güneş enerjisi arttıkça, veya sıcaklık azaldıkça, üretilen güç artar. Ancak güneş pili tarafından üretilen bu gücün değeri çalışma noktasına da bağlıdır. Örneğin modül açık devre iken güç eldesi olmaz. Keza modül kısa devre iken de aynı şekilde güç elde edilemez. Bu iki nokta arasında öyle bir çalışma noktası vardır ki, o noktada güneş pili maksimum güç üretmektedir. Bu çalışma noktasına, maksimum güç noktası (MPP, maximum power point) adı verilir. Şekil 5.1’de tipik bir güneş pili modülünün gücü modül gerilimine bağlı olarak çizilmiş ve maksimum güç noktası işaretlenmiştir. Görüldüğü gibi bu eğri açık devrede sıfırdan başlayıp, MPP noktasında en büyük değerine ulaşmakta ve kısa devrede tekrar sıfır değerine inmektedir.



Şekil 5.1. Maksimum güç noktası

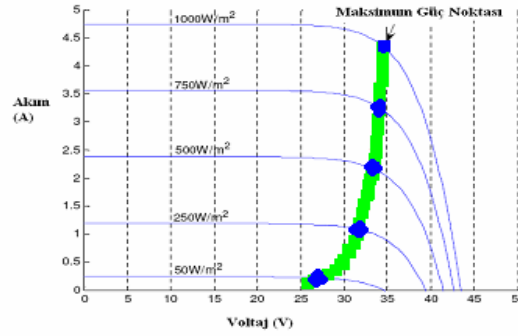
Şekil 5.2’de, modülü MPP noktasında çalıştıracak yük doğrusu da belirtilmiştir. Görüldüğü gibi R_L yükü ile güneş pili maksimum güç noktasında çalışmamakta, daha az bir güç üretmektedir. Oysa ki MPP noktası biraz daha küçük bir R_L değeri gerektirmektedir. Bir güneş pilinin maksimum güç noktasında çalıştırmak, ancak uygun bir yük direnci ile mümkündür. Bunun için R_L yük direncini değiştirmemiz gerekir. Ancak bu her zaman mümkün değildir. Örneğin batarya, lamba, dc motor vs. yüklerde bu durum sorun yaratır. Dolayısıyla güneş pili ile yük arasında bir empedans dönüştürücü devreye ihtiyaç vardır. Bir DC/DC dönüştürücü bu sorunu çözebilir. Bir DC-DC dönüştürücünün işlevi; PV kaynağının, yükün çalışma geriliminden bağımsız olarak maximum güç geriliminde çalışmasını, dolayısıyla PV’den yüke maximum güç transfer etmesini sağlamaktır.



Şekil 5.2. Çeşitli yüklerde çalışma noktası [24]

MPP noktasını bir kez ayarlamak yeterli değildir ve her ışıınım veya sıcaklık değişiminde yeniden MPP noktasını yakalamak gereklidir. Bu yüzden MPP noktasını izlemek için birçok yöntem önerilmiştir. Bunlardan bazıları ışıınım ve sıcaklık ölçümü gerektirirken, bazıları ise sadece güneş pilinin akımını ve gerilimini kullanarak çalışmaktadırlar.

Şekil 5.3’te sabit bir sıcaklık değeri için (25 °C) farklı ışıınım şiddetlerinde bir PV modülün I-V eğrileri görülmektedir. Buna göre ışıınım şiddeti azaldıkça akım değeri önemli ölçüde azalırken gerilim değerinde çok büyük bir fark olmamaktadır. Maksimum güç noktaları, akım değerleri birbirinden çok farklı fakat gerilim değerleri birbirine çok yakın olan değerlerde gerçekleşmektedir. Bu durum akım değerinin ışıınım şiddeti ile doğru orantılı olarak, gerilim değerinin ise ışıınım şiddeti ile logaritmik olarak değişmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.3. Sabit bir sıcaklıkta farklı ışınım şiddetlerinde bir PV modülün I-V eğrileri

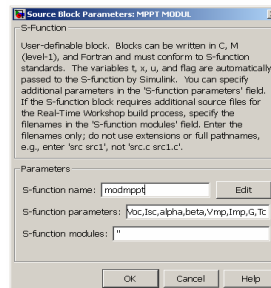
Batarya şarj uygulamalarında, gerilim batarya tarafından sabit tutulduğundan sadece akım kontrolü yapılabilir. Dolayısıyla batarya akımını maksimum yapan çalışma noktası MPP noktası olacaktır.

MPPT cihazları PV ile batarya arasına yerleştirilen yüksek frekanslı DC-DC dönüştürücülerdir. Ayrıca MPPT devreler, PV tarafından üretilen çıkış gücünün bir parçasını da tüketirler.

5.1. Maksimum Güç Noktasının Matlab/Simulink Kullanılarak Modellenmesi

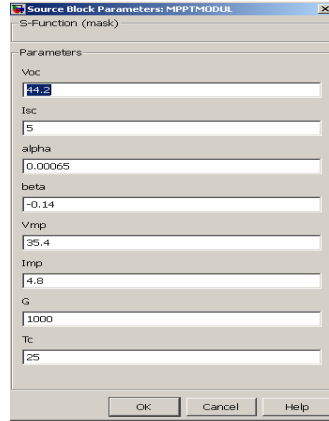
Matlab programında PV modülün üreteceği maksimum güç noktasını bulan bir m-file dosyası hazırlanmıştır. Dosya “modmppt” ismi ile kaydedilmiştir. Matlab kodlarıyla değişen sıcaklık ve ışınım seviyelerine göre PV modülden elde edilebilecek maksimum güç P_{max} ve bu maksimum güç noktasındaki modül akım ve gerilim değerleri hesaplanmıştır.

Simulinkte boş bir çalışma sayfası açılarak S-Function bloğu eklenir. S-Function bloğunun modmppt m-file ile ilişkilendirilmesi için S-Function parametres penceresi şekil 5.4’de görüldüğü gibi hazırlanır. Aynı pencereye blok parametreleri de girilir.



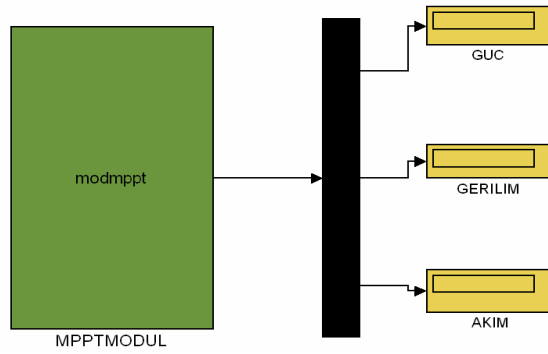
Şekil 5.4. S-Function bloğu ile ‘modmppt’ m-file dosyasının ilişkilendirilmesi

S-Function bloğu modifiye edildikten sonra bloğa çift tıklandığı zaman şekil 5.5’deki blok parametreleri penceresi ekrana gelir. Bu uygulamada BP SX 170B PV modülüne ait değerler girilmiştir.



Şekil 5.5. MPPTMODUL blok parametreleri penceresi

S-Function bloğunun çıkışları maksimum güç, maksimum güç noktasındaki modül akım ve gerilim değerleri olduğundan dolayı çalışma sayfasına demux bloğu eklenir ve demux bloğunun çıkış uçlarının sayısı 3 olarak girilir. Çıkışları izlemek için display blokları eklenir. Şekil 5.6’da görülen model benzetim için hazırdır.



Şekil 5.6. MPPTMODUL bloğuna çıkış bloklarının eklenmesi

PV modül maksimum güç noktası, MPPT P&O algoritması ve bu algoritmayı Matlab/Simulink programı ile gerçekleştirir.

P&O algoritmasında, PV modülün çıkış gücü sürekli olarak PV eğrisinde izlenir. Her bir algoritma döngüsünde eğer güç artıyor ise gerilim değiştirme yöntemi (artırma ya da azaltma) aynı yönde devam ettirilir. Bunun aksi ise gerilim değiştirme yönü ters çevrilir. P&O algoritması uygulamadaki basitliği nedeniyle pratikte en çok kullanılan yaklaşımdır [25].

5.2. Model Kıyaslaması

Üretici firma kataloğunda Standart Test Koşullarında BP SX 170B modülüne ait verilen çıkış değerleri ile geliştirilen MPPT modeline ait çıkış değerleri Çizelge 5.1’de verilmiştir. Çizelge 5.1 den de görüldüğü gibi maksimum güç değeri MPPT modelinde 0.7 W daha fazladır. Bu durumda geliştirilen MPPT modelinin yaklaşık % 0.4 farkla aynı sonucu verdiği görülmüştür.

Çizelge 5.1. Model Kıyaslaması

(STC) BP SOLAR KATALOG VERİLERİ		MODUL 1	MPPT
Pmax	170	171,2	171.7
Vm	35,4	36,1	36.9
Im	4,8	4,742	4.654

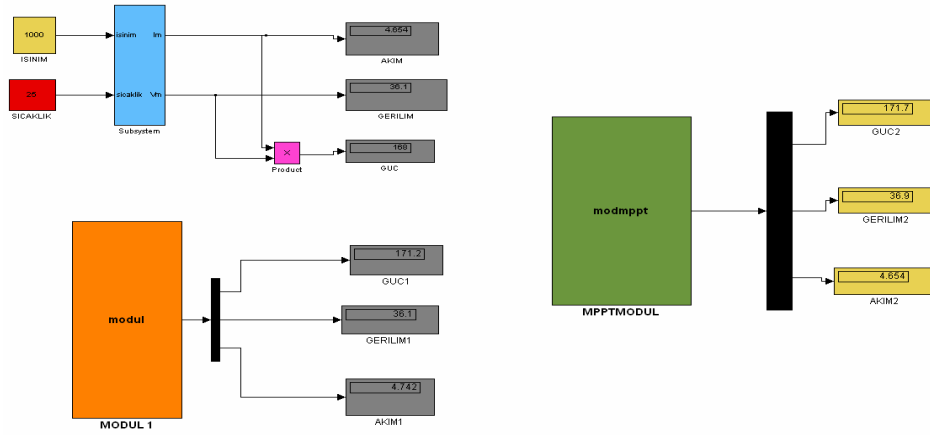
Bu kısımda üç modelin kıyaslamasını yapacağız. Bu üç model:

1. model : Kısım 4.2’de hazırlan PV Modülün Simulink Kullanılarak Modellenmesi (pvmodel1.mdl)

2. model : Kısım 4.3’de PV Modülünün Matlab m-file ve Simulink Kullanılarak Modellenmesi (modul1.mdl)

3. model : Kısım 5.1’de Maksimum Güç Noktasının Matlab/Simulink Kullanılarak Modellenmesi (mpptmodul.mdl)

Üç modele ait sonuçları birarada görebilmek için şekil 5.7’deki gibi bu üç modele ait blok diyagramları bir araya getirilmiştir.(ucmodel.mdl)



Şekil 5.7. Üç modelin aynı uygulamada birleştirilmesi

Çizelge 5.2. BP SX 170B PV modülünün farklı sıcaklıklarda Simulink uygulama sonuçları

$G = 1000 \text{ W/m}^2$ (Sabit)									
Simülente yapılmış model Pvmodel1				MODUL1			MPPTMODUL		
Sıcaklık	Im	Vm	Pm	Im	Vm	Pm	Im	Vm	Pm
25	4.654	36.1	168	4.742	36.1	171.2	4.654	36.9	171.7
30	4.657	35.4	164.9	4.745	35.4	168	4.657	36.2	168.6
35	4.66	34.7	161.7	4.748	34.7	164.8	4.647	35.6	165.4
40	4.664	34	158.6	4.751	34	161.5	4.651	34.89	162.3

Çizelge 5.2’de sabit bir ışınlım seviyesinde değişen sıcaklık değerlerine göre, geliştirilen pvmodel1, MODUL1 ve MPPTMODUL alt sistemlerine ait çıkış akım, gerilim ve güç değerleri görülmektedir.

Geliştirilen pvmodel1, MODUL1 modellerinin çıkış gerilim değerlerinin aynı olduğu, çıkış akım değerleri arasında fark olduğu görülmüştür. Bu fark pvmodel1 modelinde I_{ref} olarak isimlendirilen referans akımın PV modül I-V eğrisinde seçilen bir noktaya karşılık gelen akım değeri olmasından MODUL1 modelinde ise bu değerin matematiksel ifadelerle hesaplanmasından kaynaklanmaktadır. Modül çıkış gücü de çıkış akım ve gerilim değerlerinin çarpımı olduğu için, modül akımları arasındaki farktan dolayı değişim göstermektedir.

Çizelge 5.3. BP SX 170B PV modülünün farklı ışınlımlardaki Simulink uygulama sonuçları

$T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Sabit)									
Simülinkte yapılmış model Pvmodell				MODUL1			MPPTMODUL		
Işınım	V_m	I_m	P_{max}	V_m	I_m	P_{max}	V_m	I_m	P_{max}
500	36.6	2.154	78.84	36.6	2.242	82.04	36.75	2.327	85.53
600	36.5	2.654	96.87	36.5	2.742	100.1	36.9	2.793	103
700	36.4	3.154	114.8	36.4	3.242	118	36.95	3.26	120.5
800	36.3	3.654	132.6	36.3	3.742	135.3	37	3.722	137.7
900	36.2	4.154	150.4	36.2	4.242	153.5	36.95	4.19	154.8
1000	36.1	4.654	168	36.1	4.742	171.2	36.9	4.654	171.7

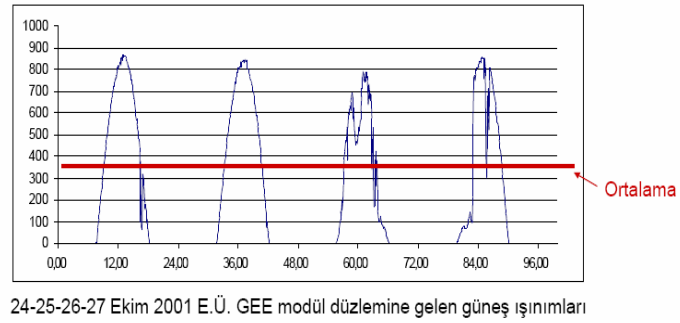
Çizelge 5.3'te sabit sıcaklıkta değişen ışınlım seviyelerine göre, geliştirilen pvmodell, MODUL1 ve MPPTMODUL alt sistemlerine ait çıkış akım, gerilim ve güç değerleri görülmektedir. pvmodell, MODUL1 modellerinin çıkış gerilim değeri aynıdır.

Normalde PV modüller P-V eğrisinde herhangi bir noktada çalışırlar. Geliştirilen pvmodell, MODUL1 modelleri buna uygun olarak tasarlanmıştır. MPPTMODUL modeli çıkışları ise ışınlım ve sıcaklık değerlerine bağlı olarak PV modülden elde edilebilecek maksimum güç, bu maksimum güç değerindeki çıkış akım ve gerilim değerleridir. Bu yüzden MPPTMODUL modelinden elde edilen çıkış gücü pvmodell ve MODUL1modelinden elde edilen çıkış gücü değerlerine göre daha yüksek olduğu görülmüştür.

6. PV SİSTEM TASARIMI

6.1. Sistem Veriminden Yola Çıkararak PV Modül Batarya Sistemi Tasarımı

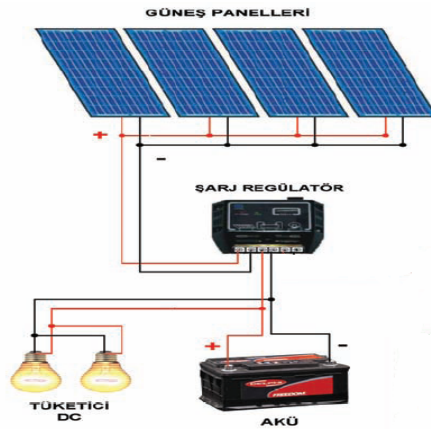
Güneş enerjisi kesikli ve süreksizdir. Bu haliyle sisteme kesintisiz enerji vermek mümkün olamaz. Ancak enerji depolama ile bu kesintiler dengelenebilir ve kesintisiz enerji elde edilebilir.



Şekil 6.1.Ortalama ışınlam değerleri [26]

Bu kısımda şekil 6.2’deki gibi bir “Şarj kontrollü bataryalı sistem” tasarımı üzerinde çalışılacaktır. Sistemde ne kadar güce ihtiyaç duyulduğundan yola çıkılır ve sistem verimini kullanarak kaç tane akü ve modül kullanılacağı bulunur.

Şarj kontrollü bataryalı sistem, yükün değişken ve iyi tanımlanamadığı durumlar ile bataryanın, yük ve fotovoltaiik dizinin birbirine göre optimal veya sınırda ölçülendirildiği durumlarda bataryayı aşırı şarj ve deşarjdan korumada kullanılan bir sistemdir.



Şekil 6.2.Şebekeden bağımsız PV sistem

$$W_{pv} = (E / G_s) / \eta_{sis} \quad (6.1)$$

Denklem 6.1, şebekeden bağımsız bir sistem tasarımındaki güç hesaplamasında kullanılır. Bu denklem şebekeden bağımsız kurulacak bir sistemin gücünün (W_p =Watt-peak) hesaplanmasında kullanılır. Buradan yola çıkarak PV modül miktarında hesaplanabilir.

W_{pv} : Kullanılacak PV modüllerin peak gücünü(W_p) gösterir.

E : Beslenecek yükün günlük enerji ihtiyacını (W_h veya W_s) tanımlar.

G_s : Güneşlenme süresidir. PV modüllerinin ortalama en yüksek güneş ışınlarını alacağı zamanı (saat) yere ve güneş ışınlarının gelişi ile mevsimlere bağlı olarak değişir.

η_{sis} : Kurulacak sistemin verimini belirtir. Bu genelde %60-%70 alınır. η_{sis} değerinin %100 olması beklenemez. Sistemi kurarken kullanılan malzeme, PV'lerin teknolojisi, verimliliği ve çevre şartları sistemin verimini etkileyen etkenlerdir. Bu değeri de denklem 6.2'deki gibi hesaplayabiliriz.

$$\eta_{sis} = \eta_{pv} * \eta_{pv-bat} * \eta_{sarj} * \eta_{bat} * \eta_{kablo} \quad (6.2)$$

Burada;

η_{pv} : PV modüllerin her zaman MPP noktasında çalışması mümkün olmayabilir. Yaklaşık %20 kayıpların kaçınılmaz olduğu dikkate alınmalıdır. Dolayısıyla 0.8'lik bir kayıp faktörü dikkate alınmalıdır. ($\eta_{pv} = 0.8$)

η_{pv-bat} : PV modüller ile aküler (batarya) arasındaki bağlantı kablolarının kayıplarıdır. %2 civarındır. ($\eta_{pv-bat} = 0.98$)

η_{sarj} : Şarj regülatörünün verimliliği ($\eta_{sarj} = 0.98$ alınabilir.)

η_{bat} : Akülerin Ah verimi 10% kayıp alınabilir. ($\eta_{bat} = 0.9$ kabul edilebilir)

η_{kablo} : Aküler ile yük arasındaki kabloların kayıpları 2% alınabilir. Dolayısı ile bu faktör 0.98 olarak alınabilir .

$$\eta_{sis} = (0.8) \times (0.98) \times (0.98) \times (0.9) \times (0.98) = 0.68$$

Böylece $\eta_{sis} = 0.68$ olarak alınabilir.

Modelde kullanılacak yükün günlük enerji ihtiyacı = 1000 Ws olsun. ($E = 1000$ Ws)

Güneşlenme süresi 6 saat alınmaktadır. ($G_s = 6$ saat)

$W_{pv} = (E / G_s) / \eta_{sis}$ olduğu denklem 6.1’de belirtilmişti.

Sistemin PV gücü = $W_{pv} = (E / G_s) / \eta_{sis} = (1000\text{Ws}/6\text{s})/0.68 = 245.1 = 246$ olarak alınabilir.

Bu tasarımda katalog değerleri verilen BP SX 170B modeli kullanıldığı düşünülerek akü/modül sayısı bulunmaktadır.

170 Wp modül kullanılırsa = PV modül sayısı= $246/170 = 1.44 = 2$ modül

(DC) Sistem gerilimi = 24 V olarak alınmaktadır.

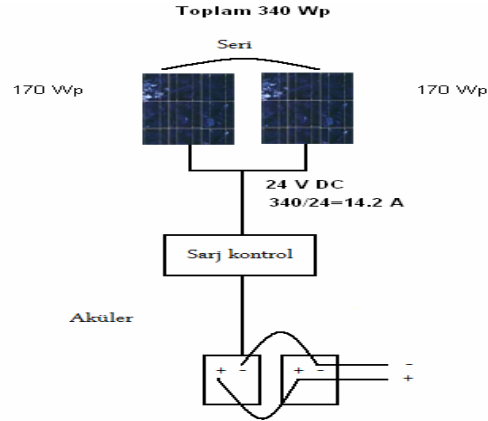
Eğer 3 günlük depolama isteniyorsa gerekli akü miktarı: (Akünün birimi = Ah)

3 günlük enerji ihtiyacı = 3×1000 Ws = 3000Ws

Akü miktarı= $3000\text{Ws}/24$ V = 125 Ah

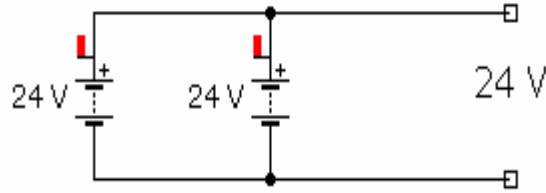
105 Ah’lık Akü kullanılırsa : 125 Ah/ 105 Ah = 1.2 = 2 Akü

- Sistem verimi= $\eta_{sis} = 0.68$.
- Yükün günlük enerji ihtiyacı=1000 Ws ($E=1000$ Ws)
- Güneşlenme süresi= 6 saat ($G_s = 6$ saat)
- 170Wp lik PV(BPSX 170B) modül kullanılması durumunda.
- 3 günlük depolama isteniyorsa.
- 105 Ah’lık akü kullanılırsa şekil 6.3’deki tasarım yapılabilir.



Şekil 6.3. 24 V'luk Sistem Blok Şeması

24 V'luk sistem için 24 V akü kullanılırsa şekil 6.4'deki gibi bağlanacaktır.



Şekil 6.4. Akü bağlantı şekli

Sistem için gerekli olan malzemeler: PV 2X170 Wp, akü 2X105X24 V, şarj kontrol 15A, bağlantı kutuları, modül ayakları ve kablolardır.

Sistemi oluştururken dikkat edilecek diğer bir husus da güneş panellerinin ne kadar süreyle en yüksek güneş enerjisi alacağıdır. Çizelge 6.1'deki veriler ülkemizde bir gün boyunca olan güneşlenme süresinin (saat) aylara göre dağılımını göstermektedir. Güneşlenme süresi tasarımda 6 saat olarak alınmıştır. Çizelge 6.1'e bakılırsa bu değer doğrulanmaktadır.

Çizelge 6.1. Türkiye için ortalama günlük güneşlenme süreleri [27]

Yıllar	Oca	Şub	Mar	Nis	May	Haz	Tem	Ağu	Eyl	Eki	Kas	Ara	Yıllık
2003	5.3	5.2	6.1	7.6	10.7	12.0	12.5	11.6	10.1	8.3	6.7	4.4	8.4
2004	4.0	5.0	7.3	9.2	10.4	11.8	12.5	11.2	10.4	8.3	5.8	4.8	8.4
2005	4.3	5.7	7.8	8.5	10.6	12.2	11.5	11.0	10.1	8.6	6.2	4.3	8.4
2006	4.6	4.2	6.5	7.9	10.9	11.4	11.6	10.8	9.8	7.3	7.0	5.7	8.2
2007	5.8	5.0	7.6	8.7	8.4	11.6	11.4	10.7	10.0	8.2	6.3	5.6	8.3
ORT	4.8	5.0	7.0	8.4	10.2	11.8	11.9	11.1	10.1	8.2	6.4	5.0	8.3

Matlab formülasyonu yardımıyla herhangi bir PV sistem tasarımı yapılabilir veya sisteme kaç adet modül ve kaç adet akü gerekeceği kabaca hesaplanır. Bu tasarım yardımıyla çok fazla sonuç elde edilebilir.

Çizelge 6.2. 105 Ah'lik aküde modül ve akü sayısı

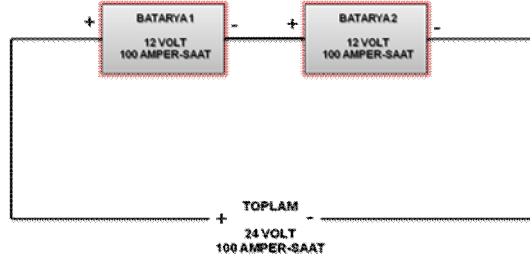
Güneşlenme süresi (saat)	Modül sayısı	Akü (105 Ah) sayısı
1	9	2
2	5	2
3	3	2
4	3	2
5	2	2
6	2	2

Çizelge 6.3. 45 Ah'lik aküde modül ve akü sayısı

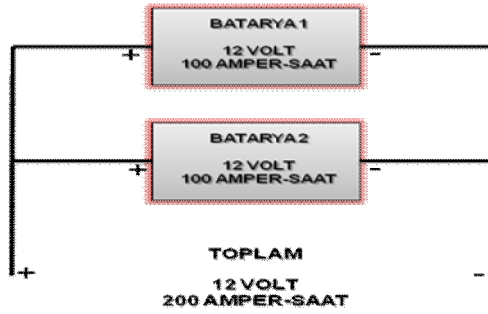
Güneşlenme süresi (saat)	Modül sayısı	Akü (45 Ah) sayısı
1	9	3
2	5	3
3	3	3
4	3	3
5	2	3
6	2	3

Çizelge 6.2. ve 6.3 incelenirse, 45 Ah'lik akü kullanılsaydı akü sayısı 2'den 3'e çıkacaktı. Bu hesaplamalar yaklaşık hesaplamalardır. Sadece sistem hakkında kabaca değerler verir, bir saptama yapmamızı sağlar.

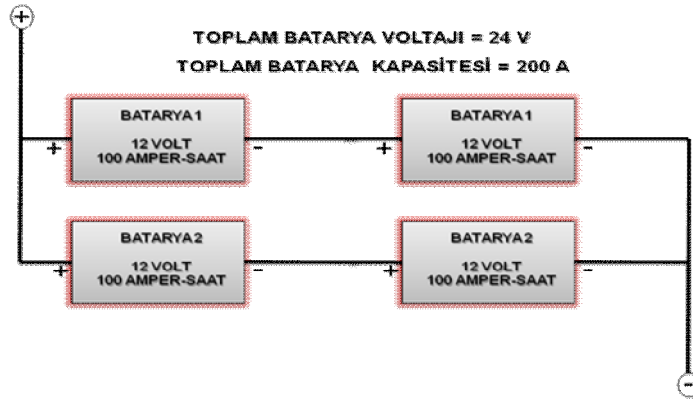
6.1.1. PV sistem tasarımında batarya bağlantıları



Şekil 6.5. Bataryaların seri bağlantısı



Şekil 6.6. Bataryaların paralel bağlantısı



Şekil 6.7. Bataryaların seri-paralel bağlantısı [28]

Şekil 6.5. ve 6.6.'da görüldüğü üzere, bataryalar seri bağlanarak gerilim, paralel bağlanarak Ah kapasitesi artırılır. Her iki bağlantıda da enerji depolama (Wh) miktarı artar. Bataryalar paralel bağlandıklarında akımı eşit paylaşamama problemi ortaya çıkar. 4'ten fazla paralel bağlama tavsiye edilmez. Aksi halde batarya ömrü çok kısılabilir.

PV sisteme uygun olarak tasarlanan batarya modeli özellikle gece veya düşük ışıyım seviyesi altında sisteme bağılı yükün çalıştırılabilmesi için gereklidir [29]. Geceleyin veya bulutlu ortamlarda aküden çalışır. Akü depolama ihtiyacı sistemdeki cihazlara göre hesaplanır. PV Modül güç değeri Wp (peak Watt) ile gösterilir.

Depth of discharge DOD: Bataryaya zarar vermeden yapılabilecek en fazla deşarj miktarı yüzdesidir.

Lifecycle: Bataryanın ömrü boyunca yapabileceğı şarj/deşarj sayısı (DOD arttıkça lifecycle azalır)

Bataryalarla ilgili önemli özellikler ise; fiyat, hacimsel ve kütsel enerji yoğunluğu, gerilim, şarj rejimleri, verim ve kapasite kullanımıdır. Deşarj şiddetine göre akü kapasitesi değışir. Bu yüzden üreticiler 10 saatlik deşarj süresinde elde edilen kapasiteyi nominal kapasite olarak kullanırlar. Her zaman düşük akımla şarj/deşarj avantaj sağlar. Batarya gerilimi mutlaka şarj regülatörü, invertör ve PV modüllerle uyumlu olmalıdır.

Maksimum Kapasite: Aküde depolanabilecek maksimum yük miktarına ya da batarya deşarj olmaya başladığı anda aküde bulunan yük miktarına denir. Şarj Durumu (SOC, State of Charge): Mevcut yük miktarı ile maksimum yük miktarının oranıdır.

$$SOC = q / q_{max} \quad (6.3)$$

SOC değeri $0 \leq SOC \leq 1$ 'dir.

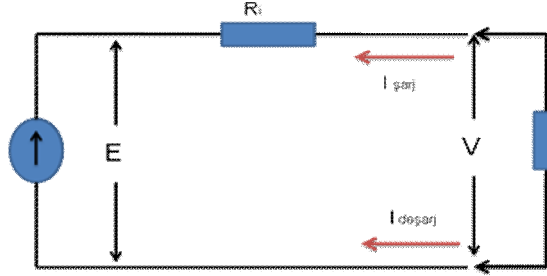
Eğer SOC=1 ise batarya tam dolu, SOC=0 ise batarya boştur.

Şarj-deşarj rejimi: Akü için verilen parametreler akünün şarj veya deşarj durumunda akım ile maksimum kapasite arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Zamana bağılı olarak ifade edilen bu ilişkiye örnek verilirse aküden 30 saat boyunca 5A akım çekilirse deşarj rejimi 150 Ah (Amper-saat) olacaktır.

Akünün verimliliğı akünün şarj-deşarj rejimine bağılıdır. Eğer bataryadan kısa süre içerisinde yüksek miktarda akım çekilirse bataryanın boşalma süresi azalacaktır. Eğer aküden daha düşük miktarda akım çekilirse aynı zaman diliminde bataryanın boşalma süresi uzayacaktır. En çok kullanılan batarya tipi kurşun asit (lead-acid) bataryadır. Primer bataryalar şarj edilemez. Şarj edilebilir olanlara sekonder bataryalar denir.

Starter aküler veya otomobil bataryaları PV uygulamaları için ihtiyaç duyduğu derin boşalma işlevini yapmadıkları için uygun değildir. Derin boşalma yapabilen Deep Cycle

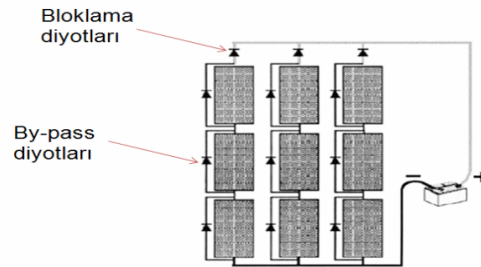
bataryalar PV sistemler için iyi bir seçimdir ve %80 oranında deşarj olabilirler. Şekil 6.8’de akü modelinin elektriksel eşdeğeri görülmektedir.



Şekil 6.8. Akü modelinin elektriksel eşdeğeri

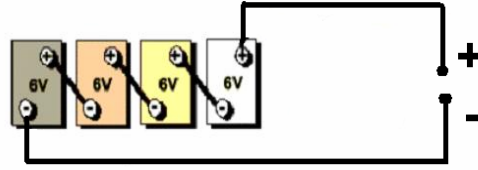
6.1.2. PV modül bağlantıları

Bir hücrenin üzerine gölge düştüğü zaman o hücrenin gerilimi hemen düşer. Seri bağlı olduklarından dolayı çıkış gerilimi de düşer. Bunu önlemek için ikili, üçlü gruplar halinde hücreler bypass diyotlar ile desteklenir. Şekil 6.9’da görüldüğü gibi, Bypass diyotları kısmi gölgelenme durumlarında PV modülün zarar görmesini engellerler. Bloklama diyotları ise modüllerde güç üretilmediği durumlarda bataryanın PV üzerinden boşalmasını engellemek amacıyla konulmaktadır.



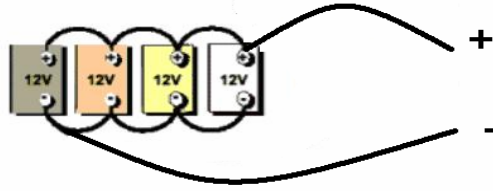
Şekil 6.9. PV modül bağlantıları

Modüllerin seri bağlantı durumu şekil 6.10’da gösterilmiştir. Burada her pilin kapasitesi; 100 A, 6V DC ve toplam çıkış akımı 100 A, toplam çıkış gerilimi 24 V DC olur.



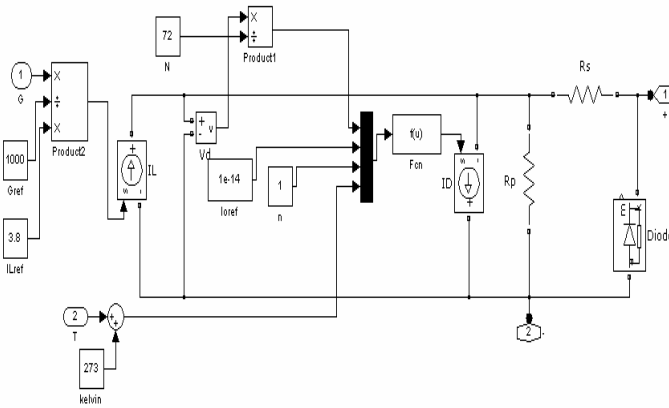
Şekil 6.10. PV modül seri bağlantı

Modüllerin paralel bağlantı durumu şekil 6.11’de gösterilmiştir. Burada her pilin kapasitesi; 100 A, 12V DC, toplam çıkış akımı 400 A ve toplam çıkış gerilimi 12 V DC elde edilir.



Şekil 6.11. PV modül paralel bağlantı

6.2. Simülinkte PV Modül Batarya Sistemi Tasarımı



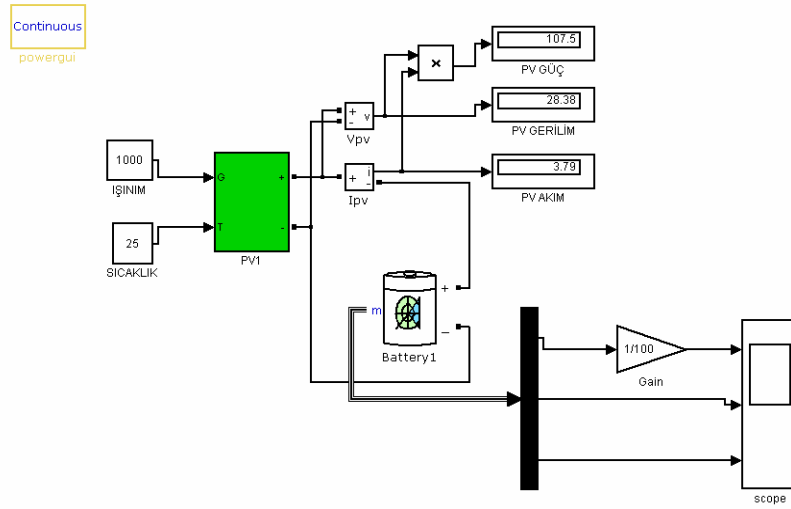
Şekil 6.12. PV modül altsistem

Simülinkte tasarlanan PV modülün alt sistem şeması şekil 6.12’de görülmektedir. Burada kullanılan değerler ;

I_L = ışık akımı= 3.8 A; , I_S = satürasyon akımı = $1e^{-14}$ A olup sabit alınmıştır.

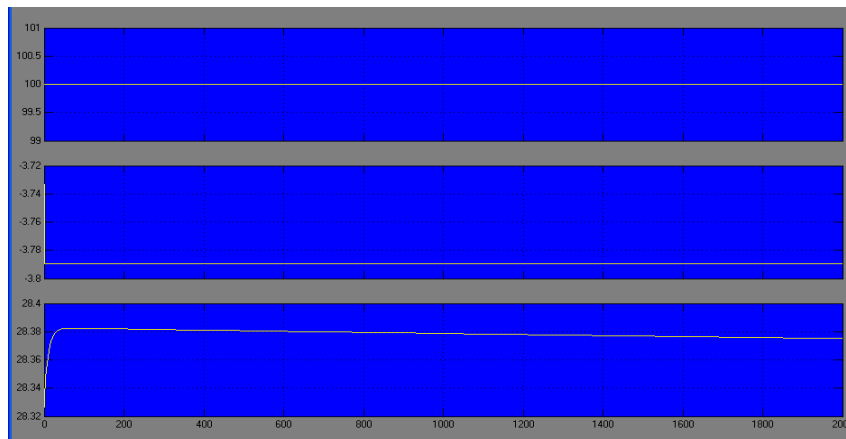
$n(\text{idealite faktörü}) = 1$ ve modül 72 hücreden oluşmuştur.

Çalışmanın önceki kısımlarında PV hücre, PV modül ve PV dizi tasarlanarak, bunların girişlerine güneş ışıınımı ve sıcaklık değerleri vererek çıkıştaki akım, gerilim ve güç değerleri gözlemlenmişti. Bu kısımda ise öncelikli olarak sabit ışıınım ve sabit sıcaklık değerleri yerine daha çok opsiyona sahip datalar kullanılmaya çalışılacak olup böylece gerçek çalışma şartlarına daha yakın veriler sağlanacaktır. Ayrıca şekil 6.13’de gösterildiği gibi, tasarımı yapılan modül bataryayı besleyerek bir generatör gibi kullanılacaktır.



Şekil 6.13. PV modül-batarya sistemi modeli (modell1.mdl)

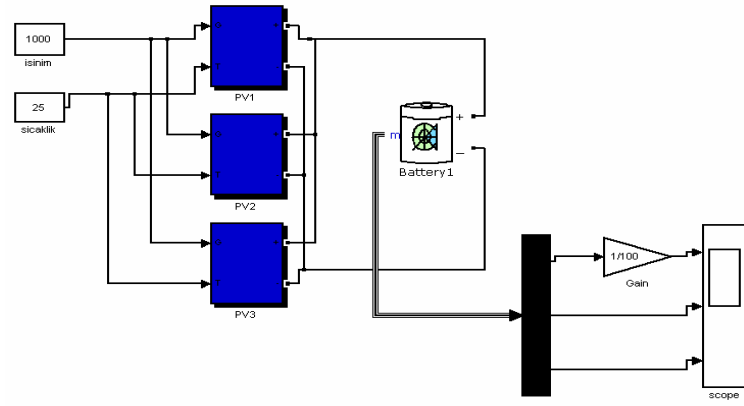
Tek PV modülden oluşan sistemdeki SOC, batarya akımı ve gerilimi değerleri şekil 6.14’de görülmektedir.



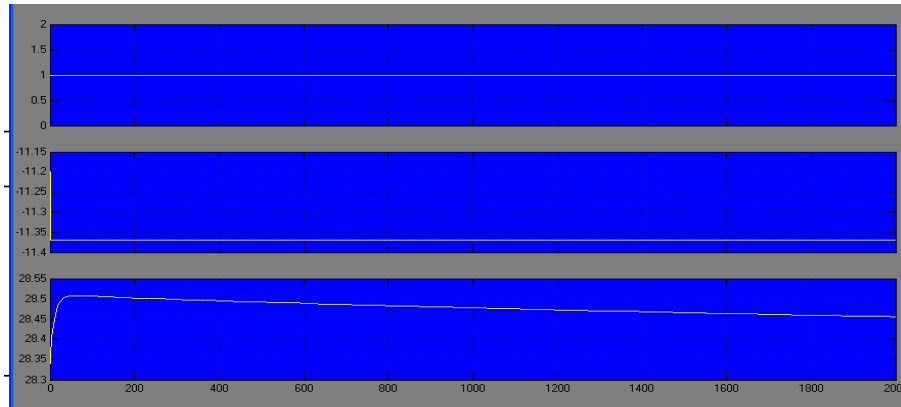
Şekil 6.14. SOC, batarya akımı ve gerilimi değerleri

Şekil 6.14'deki simülasyondaki en üstteki grafik SOC yani dolum faktörünü, ortadaki grafik batarya akımını, en alttaki değer batarya gerilimini temsil etmektedir. Burada akünün dolu olduğunu gösteren SOC değeri 0-1 değer aralığındadır fakat batarya çıkışı sonuçları yüzdesel olarak göstermektedir. SOC değerini 0-1 arasında gösterebilmek için şekil 6.13'deki 1/100 kazancını ekleyerek tam olarak 1 değerinin görülmesi sağlanmıştır.

Şekil 6.15'de görüldüğü üzere, modüllerin sayısı artırılır yani bir dizi meydana getirilir. Bataryanın çıkışında gözlenen SOC, batarya akımı ve gerilim değerleri tekrardan gözlemlenir.



Şekil 6.15. PV modül-batarya sistemi modeli (model2.mdl)

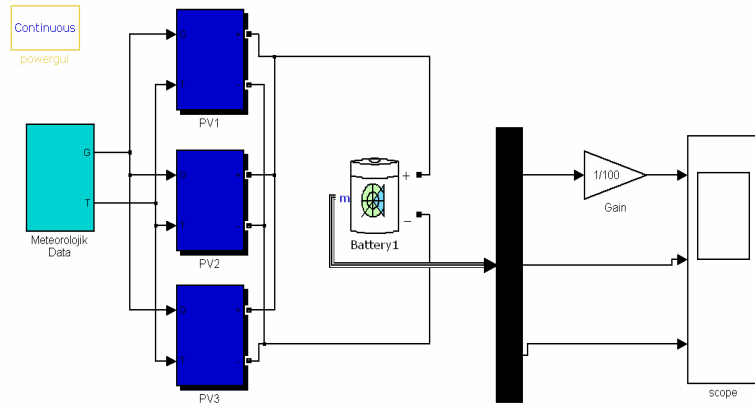


Şekil 6.16. SOC, batarya akımı ve gerilimi değerleri

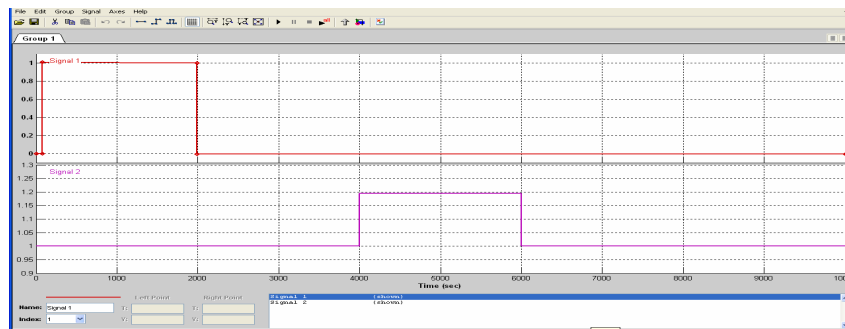
Şekil 6.16'daki sonuçlar incelendiği zaman, dolum oranı ve gerilim değerlerinin değişmediği, akım değerinin üç katına çıktığı görülmektedir. Modül akımı paralel hücre sayısına bağlı olduğu için paralel modül sayısı üç katına çıktığı için akımın da üç katına çıkması zaten beklenen bir durumdur. Şekil 6.16'da görüldüğü gibi batarya daima dolu gözükmemekte ve dolum

oranını korumaktadır. Bunun sebebi daima ışıınım ve sıcaklığın varlığı. Aslında buradaki en önemli unsur güneş ışıınımıdır. Işıınımın bazı zaman dilimlerinde olduğu (gündüz) ve olmadığı (gece) bir sinyal oluşturabilirse bataryanın boşalması sağlanabilir. Bunun test edilmesi gerekmektedir.

Bunun için öncelikle bir meteorolojik data bloğu oluşturup içine “signal builder” konulmaktadır. “Signal builder” bloğu sayesinde ışıınım ve sıcaklık verisi oluşturulacaktır. Simülasyon oluşturulduktan sonraki hali şekil 6.17’de görölmektedir. Burada giriş verileri geliştirilerek sabit ışıınım ve sabit sıcaklık değeri yerine meteorolojik veriler konulmuştur.



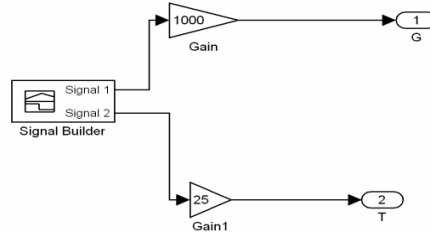
Şekil 6.17. Meteorolojik Data girişli PV modül-batarya sistemi modeli (model3.mdl)



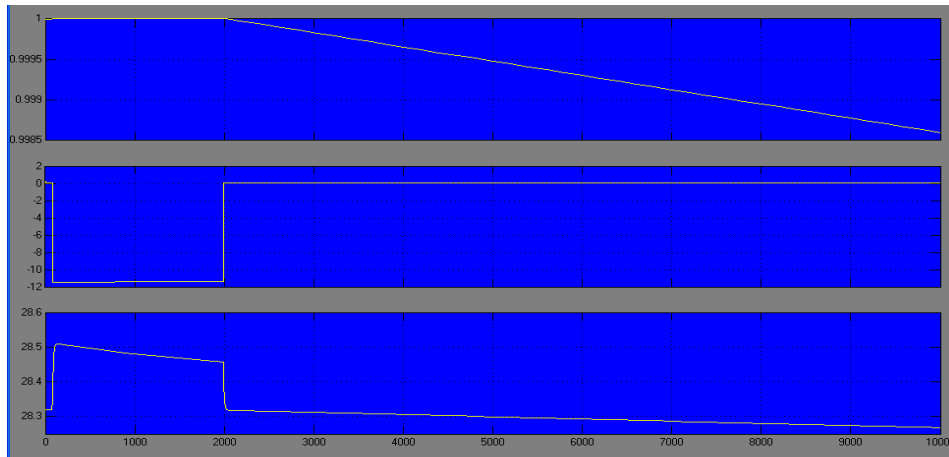
Şekil 6.18. Data Sinyali

Şekil 6.18’de data işareti görölmektedir. Burada birinci data ışıınım olup şekil 6.19’da göröldüğü üzere 1000 kat kuvvetlendirilmiştir. İkinci data ise sıcaklık olup 25 kat kuvvetlendirilmiştir. Böylece bazı yerlerde ışıınımın olmaması yani gece/karanlık durumu

sağlanacaktır. Genel olarak simülasyonun ve kullanılan datanın zaman olarak uzunluğu 10000 saniye yani yaklaşık 3 saat olarak alınmıştır.



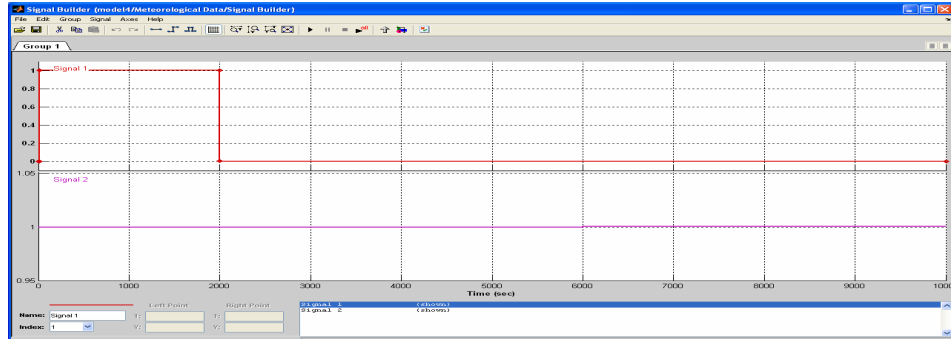
Şekil 6.19. Data Sinyali Kuvvetlendirmesi



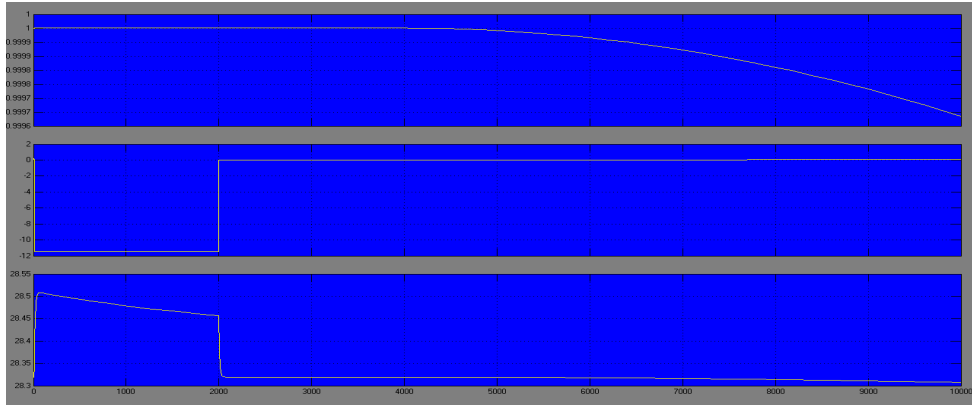
Şekil 6.20. Meteorolojik Data girişli PV modül-batarya sistemi modelinde çıkış değerleri

Şekil 6.20'deki sonuçlar incelendiği takdirde; batarya başlangıçta %100 dolu olmasına rağmen ışıınının sıfıra düştüğü 2000 saniyeden itibaren boşalmaya başladığı görülmektedir.

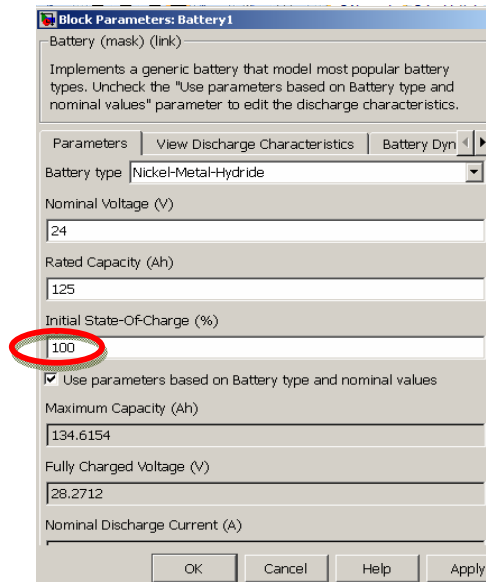
Eğer data sinyalinde şekil 6.21'de olduğu gibi sıcaklığı sabit tutup, belli bir süre ışık altında daha sonra ışık kesilirse şekil 6.22'deki grafik oluşur. Bu tasarımda batarya başlangıçta %100 dolu vaziyettedir.



Şekil 6.21. Data Sinyali

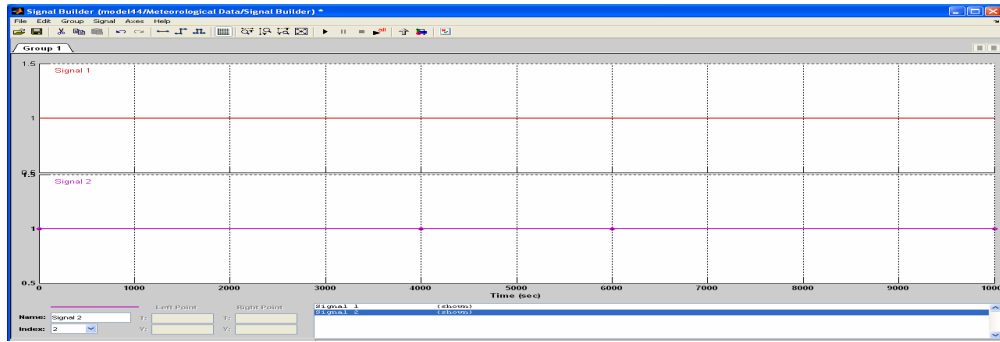


Şekil 6.22. Meteorolojik Data girişli PV modül-batarya sistemi çıkış değerleri (model4.mdl)



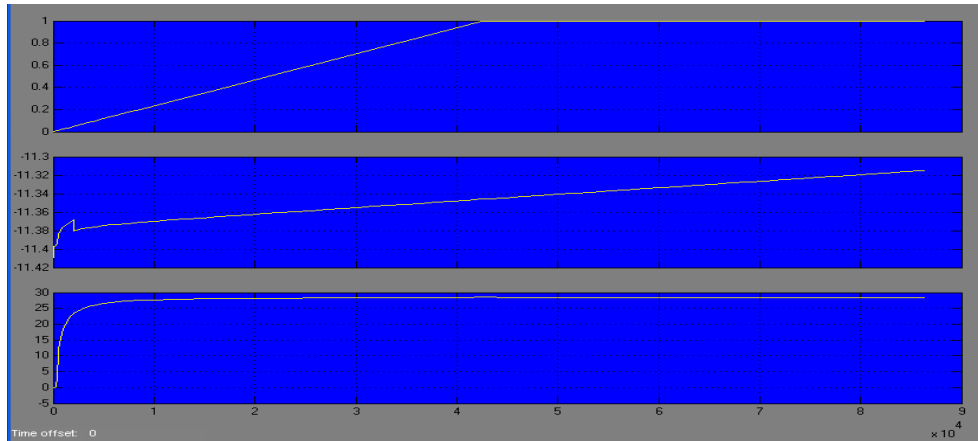
Şekil 6.23. Bataryanın blok parametreleri

Buraya kadar olan değerlendirmelerde dikkat edilirse hep bataryanın başlangıç şarj durumu şekil 6.23’de görüldüğü gibi %100 alınmıştır. Bataryanın başlangıç değeri %0 alınırsa yani batarya başlangıçta boş olarak düşünülürse daha enteresan sonuçlar ortaya çıkacağı değerlendirilmiştir. Bundan sonraki çalışmalarda batarya başlangıçta boş olarak alınmıştır.



Şekil 6.24. Data Sinyali

Meteorolojik data şekil 6.24’deki gibi sıcaklık sabit 25 °C ve Işınım 1000 W/m²’de sabit tutulursa şekil 6.25’den görüldüğü gibi batarya yaklaşık 45000 sn’de şarj olmaktadır. (45000 sn = 750 dk = 12.5 saat)



Şekil 6.25. PV modül-batarya sistemi modelinde çıkış değerleri (model44.mdl)

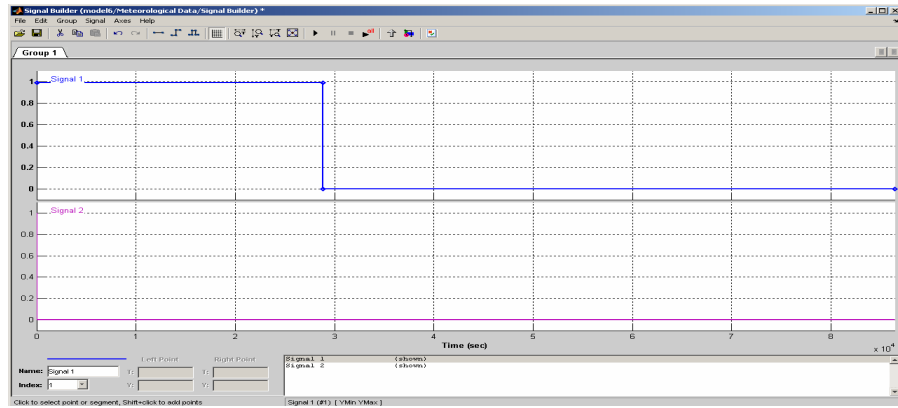
Bir gün 24 saatten oluştuğuna göre, öyle bir meteorolojik data oluşturulmalı ki bu günde 8 saat günışığı olsun ve 16 saatinde günışığı olmasın ve batarya başlangıçta boş olsun.

$$8 \text{ saat} = 480 \text{ dk} = 28800 \text{ sn}$$

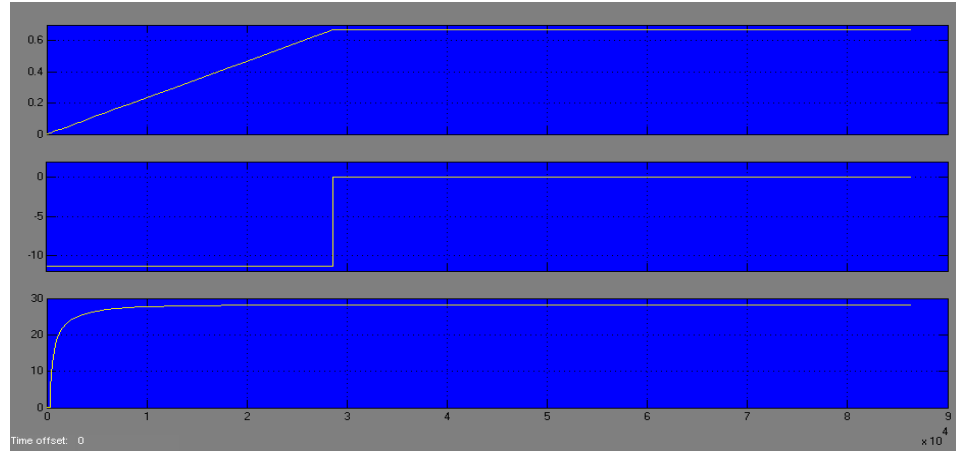
$$16 \text{ saat} = 960 \text{ dk} = 57600 \text{ sn}$$

$$1 \text{ gün} = 24 \text{ saat} = 1440 \text{ dk} = 86400 \text{ sn}$$

Yani batarya 8 saatte depoladığı enerjiyi 16 saat sisteme yetirebilecek mi? Bu durum tasarımda test edilmektedir. Yani datanın boyu 86400 sn olacak, 28800 sn günışığı olacak geri kalan zaman diliminde ise depoladığı enerjiyi kullanacaktır. Işınım ve sıcaklık verileri bu değerlere uygun olarak şekil 6.26'daki ayarlanır ve simülasyon çalıştırılırsa şekil 6.27'deki sonuçlar ortaya çıkacaktır.

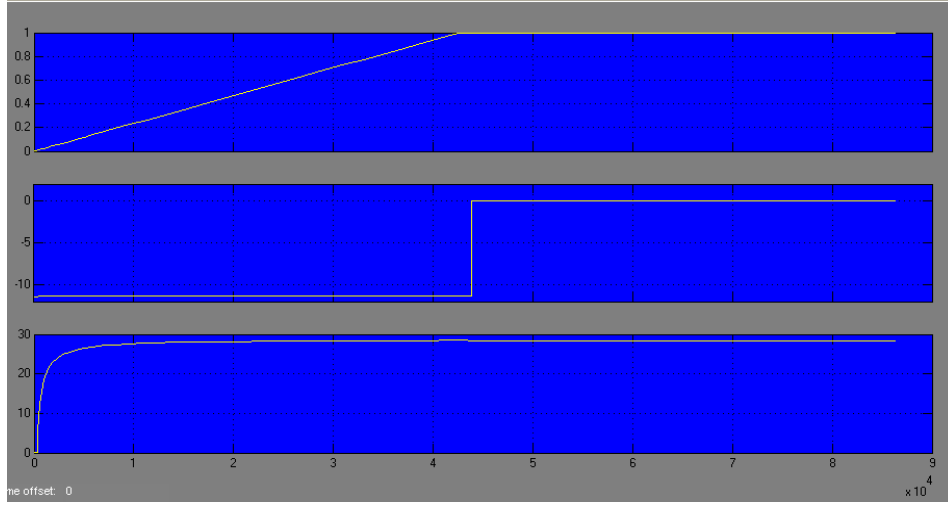


Şekil 6.26. Data Sinyali



Şekil 6.27. PV modül-batarya sistemi modelinde çıkış değerleri(model6.mdl)

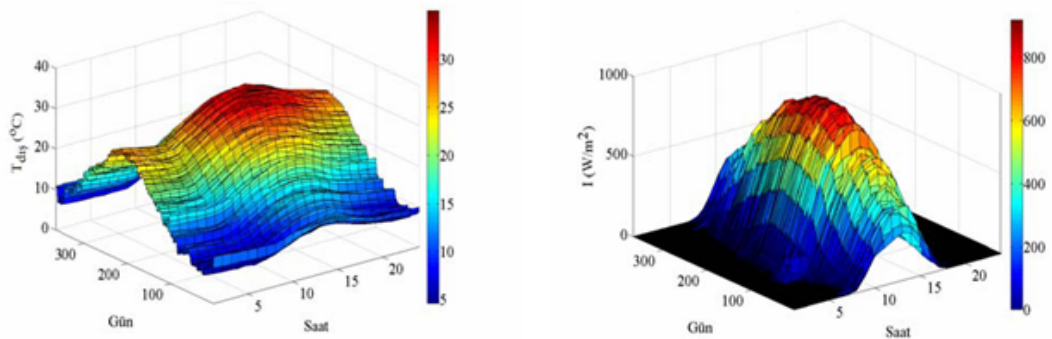
Bataryanın tam olarak şarj olmadığı ve yaklaşık %70 gibi bir doluluk oranını yakaladığı şekil 6.27'de görülmektedir. Bataryanın tam olarak şarj olmasını sağlamak için günışığı süresinin arttırılması gerekiyor. Günışığı süresi sinyalde 12 saate çıkarılırsa şekil 6.28'deki sonuçlar elde edilecektir.



Şekil 6.28. PV modül-batarya sistemi modelinde çıkış değerleri(model66.mdl)

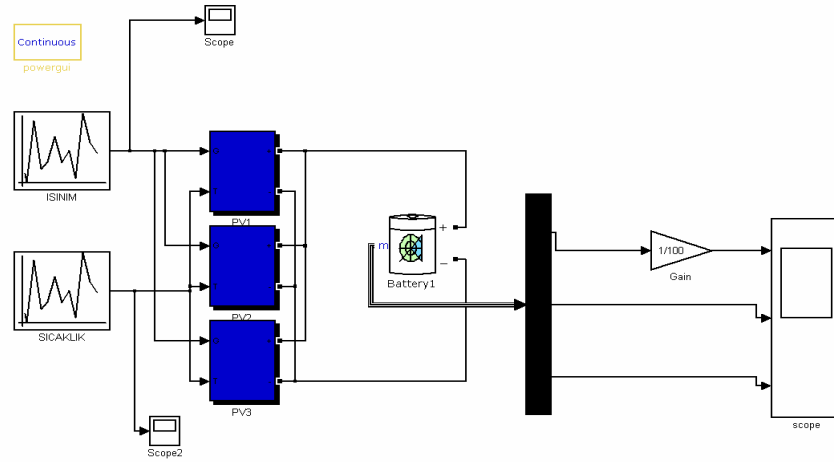
Şekil 6.28’de olduğu gibi sistem kararlı bir hale ulaşmıştır. Bu sistemde 3 adet modül ve 1 adet batarya kullanılmış ve ortamın 12 saat günışığı aldığı düşünülmüştür. Bu veriler sadece varsayımdan ibaret olup simülasyonu test etmek amacıyla üretilmiştir.

Çalışmanın buraya kadar olan kısmında ışıınım ve sıcaklık datası olarak kısıtlı datalar kullanılmıştı. Bunlar gece ve gündüz farkını ortaya koyan iki farklı sıcaklık tipi veya iki farklı ışıınım tipi idi. Bundan sonra daha çeşitli datalar üzerinde çalışmanın daha net sonuçlar ortaya çıkaracağı değerlendirilmektedir. Bu yüzden bu çalışmaya örnek olacak datalardan faydalanmamız gerekecek. Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü’nden İzmir ili için temin edilen 1997–2008 yılları arasındaki çevre sıcaklığı ve güneş ışıınımı datalarının yıl boyunca saatlik ortalamalarının değişimi şekil 6.29’da verilmiştir.

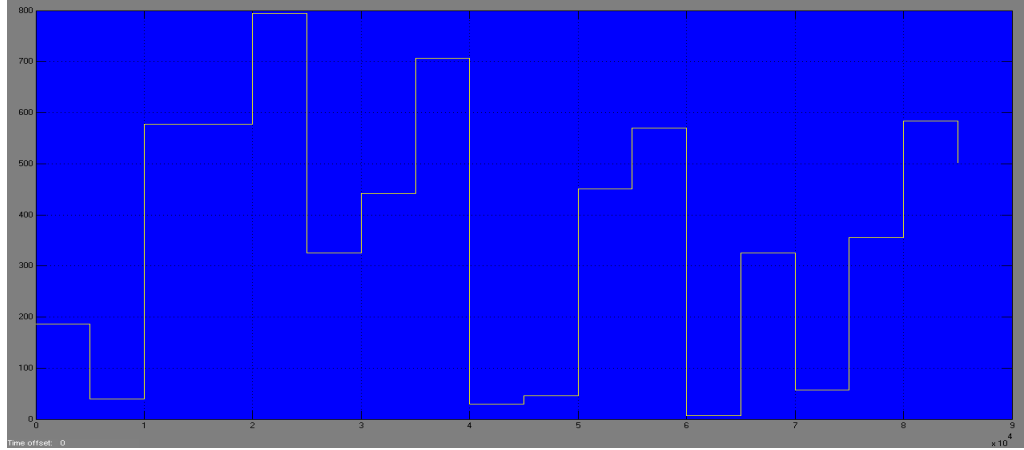


Şekil 6.29. İzmir İli İçin Çevre Sıcaklığı ve Güneş Işıınımı Değerlerinin Saatlik Değişimi [30]

Matlab simülasyonunda “Uniform random number” kaynağı ışıınım ve sıcaklık datası üretmek için kullanılacaktır. Burada ışıınım parametresi $0\text{-}850\text{ W/m}^2$ arasında, sıcaklık parametresi ise 0°C ile 40°C arasında alınmış ve bu değerlere arasında salınım yapması sağlanmıştır.



Şekil 6.30. PV Modül-Batarya sistemi (model7.mdl)



Şekil 6.31. Uniform random number kaynağıyla oluşturulmuş ışıınım datası

Ortaya çıkan akım grafiği incelenirse, ışıma paralel yönde bir sonuç ortaya çıktığı görölmektedir. Sonuçta meydana gelen akım değerin in ışıma büyük oranda bağı olduğu düşünöldüğu takdirde bu sonucun normal olduğu değ erlendirilmektedir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında öncelikli olarak fotovoltaik sistem tasarımı konusundaki teorik bilgilere yer verilmiş olup bu konudaki temel gereksinimler ortaya çıkarılmıştır. Daha önceden bu konuda yapılan çalışmalarda hangi araştırmaların yapıldığı izah edilmiştir. Ardından bir PV hücrenin akım-gerilim eğrisi Matlabda çizdirilerek PV hücrenin temel karakteristiği incelenmiştir. BP SX170 B modülü Matlabda modellenmiş ve davranışları ortaya konmuştur.

Bu modellemede ortaya çıkan değerlerden anlaşıldığı üzere; PV modülleri sıcaklıktan olumsuz yönde etkilendiği ortaya çıkmıştır. Sıcaklık arttıkça PV diyotların çıkış gerilimi ve gücü azalmaktadır. Işınım şiddeti ise PV diyotların temel enerji kaynağını oluşturmaktadır. Yapılan benzetim uygulamalarıyla da sıcaklık ve ışıınım değerlerinin akım, gerilim ve güç ile olan ilişkileri incelenmiştir. PV diyotlar için en uygun ortamın soğuk ve güneşli ortamlar olduğu anlaşılmıştır. Sistemin giriş değerleri olan ışıınım ve sıcaklık modellenmiştir. Kullanıcı bu değerleri kendi verilerine göre değiştirebilmektedir.

PV modülleri sıcaklıktan olumsuz yönde etkilendiği ve yüksek sıcaklıklarda sistem verimini azaltıcı yönde bir etkide bulunduğu ortaya konmuş olup bu olumsuz etkiyi ortadan kaldırmak için su veya başka bir sıvıyla soğutulan modüllerin kullanılması uygun olacaktır. Bu modüller, bir güneş termal sistemi ile birleştirilmiş bir güneş modülü sistemi olabilir. Bu sistemde PV sıcaklığı güneş kolektörlerinde mevcut akışkan dolaşımı ile yapılan soğutma aracılığıyla düşürülmektedir. Bu sisteme hibrid güneş hücresi/termal toplayıcı (PV/T) denilmektedir. Burada fotovoltaik modülün altına bütünleşmiş su veya hava kanalları ile modül soğutulur. Su kanalları ile bütünleşik panellerde bulunan su, pompa yardımı ile sirkülasyonu yapılır. Böylece sistem verimi artırılmış olur.

Diğer bir simülasyonda ise 4 kW gücünde bir PV generatör tasarlanmıştır. Güneş pilinin eşdeğer devresinden yola çıkarak panel elde edilmiş ve bu paneller uygun sayıda seri-paralel bağlanarak istenilen akım, gerilim ve güç değerine sahip panel dizisi elde edilmiştir.

PV sistemlerin mümkün olan en yüksek verimle işletilmeleri gerekli ve çoğu durumda zorunludur. Dolayısıyla değişen ortam sıcaklıkları ve güneş ışıınım seviyeleri için modülün verebileceği maksimum güç noktasının belirlenmesi gerekir. Yapılan benzetim sonucunda sıcaklık ve ışıınım seviyelerine bağlı olarak maksimum çıkış gücü ve bu noktadaki akım ve gerilim değerleri elde edilmiştir. Bu değerler üretici firma katalog değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Sistem veriminden yola çıkılarak PV modül+batarya tasarımı yapılmış olup sistemde gereksinim duyulacak eleman sayıları ve ölçütleri kabaca hesaplanmıştır.

Bu çalışmalarda güneş modülünün sabit açıda olduğu kabul edilmiş olup değerler ona göre kullanılmıştır. Fakat güneş modülünün hareketli ve güneşi takip edebilir olması daha yüksek verim elde edilmesini sağlayacağı aşîkardır. Sonraki çalışmalarda PV Modül + batarya grubuna yük eklenerek çalışma devam ettirilmesi uygun olacaktır.

Maksimum sistem verimliliği için önemli koşullardan biri, panel maksimum güç koşullarını sağlayan akım ve gerilim datalarının, yük I-V karakteristik eğrisi ile çakışması gerekmektedir. Bu nedenle bir sistem tasarımının en önemli unsurlardan biri uygulamadaki yük profilinin bilinmesidir.

Kullanılan matematiksel modeller sayesinde, farklı sıcaklık ve güneş ışıınımı değerlerinde çalışma gücü hesaplanmış olup PV modülün performansı analiz edilmiştir. Bu simülasyonlara benzer şekilde gerçek bir sistem kurulması halinde nasıl tepki vereceği ortaya konmuştur. Geliştirilen bu simülasyonlarla birlikte farklı özelliklerde ve farklı güçlerde PV modüllerin modellenebilmesi sağlanmıştır.

Son olarak, PV modül+batarya sistemi Matlab simülasyonunda gerçekleştirilmiştir. Burada gün içindeki farklı ışıınım ve sıcaklık değerlerine yakın simüle değerler oluşturulmaya çalışılmış ve bu sayede daha net ve gerçekçi sonuçlar ortaya konulmuştur.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- [1] Shen, C., He, Y., Liu, Y., Tao, W., 2008, Modelling and simulation of solar radiation data processing with Simulink, Simulation Modelling Practice and Theory, 721-735 p.
- [2] Chatterjee, A., and Keyhani, A., 2011, Thevenin's Equivalent of Photovoltaic Source Models for MPPT and Power Grid Studies, IEEE Power & Energy Society General Meeting, 1-8 p.
- [3] Arrouf, M., Ghabrour S., 2007, Modelling and simulation of a pumping system fed by photovoltaic generator within the Matlab/Simulink programming environment, Desalination , 23-30 p.
- [4] Carrero, C., Ramírez, D., Rodríguez, J., Platero, C.A., 2011, Accurate and fast convergence method for parameter estimation of PV generators based on three main points of the I-V curve, Renewable Energy, 1-6 p.
- [5] Da Silva, R.M., Fernandes, J.L.M., 2010, Hybrid (PV/T) solar systems simulation with Simulink/Matlab, Solar Energy, 1985-1996 p.
- [6] Uzunoğlu, M., Onar, O.C., Alam, M.S., 2009, Modeling, control and simulation of a PV/FC/UC based hybrid power generation system for stand-alone applications, Renewable Energy, 509-520 p.
- [7] Tsai, H., 2010, Insolation-oriented model of photovoltaic module using Matlab/Simulink, Solar Energy, 1318-1326 p.
- [8] Pon Vengatesh, R., Edward Rajan, S., 2011, Investigation of cloudless solar radiation with PV module employing Matlab-Simulink, Solar Energy, 1-8 p.
- [9] Tan, Y. T., Kirschen, D. S., and Jenkins, N., 2004, A model of PV generation suitable for stability analysis, IEEE Trans. Energy Convers., Vol. 19, No. 4, 748-755 p.
- [10] Villalva, M. G., Gazoli, J. R., and Filho, E. R., 2009, Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays, IEEE Trans. Power Electron., Vol. 24, No. 5, 1198-1208 p.
- [11] Diken, Ö., 2000, "Fotovoltaik Ünite Tasarımı, Elektrik Enerjisi Üretimi ve Maliyet Analizi", Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 17-22 s.
- [12] Çetinkaya, H. B., 2001, "Güneş Enerjisinden Elektrik Enerjisi Elde Edilmesi", Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 10-15s.
- [13] S.C.TEK, 2008, Güneş Paneli Simülatörü, Elektrik Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi IV. Proje Yarışması, 64s.
- [14] Bodur, H., 1999. Yarı iletken Güç Dönüştürücüler ve Güç Elektronik Endüstriyel Uygulamaları, Kaynak Elektrik Dergisi, Sayı:126, 106-119s.

KAYNAKLAR DİZİNİ(devam)

- [15] Rashid, M.,1993. Power Electronics Circuits, Devices And Applications, Prentice Hall, New Jersey, 702p.
- [16] Kılıç I.M., 2007, Fotovoltaik Sistem Eğitimi İçin bir Simulink Araç Kutusu Tasarım ve Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, 156s.
- [17] BP data sheet, 2011, ilgili aktif web sayfası 18 Şubat 2012 itibariyle <http://www.wholesalesolar.com/pdf.folder/module%20pdf%20folder/ bpsx170b.pdf>
- [18] Patel, M. R., 1998. Wind and Solar Power Systems, CRC Press, USA, 351s.
- [19] Nelson J., 2003, “The Physics of Solar Cells”, Imperial College Press, 56-88 s.
- [20] Boztepe M., 2007, Silisyum güneş pilinin farklı ışıma değerleri için I-V eğrisi.
- [21] G.Bayrak,M.Cebeci, 3.6 kW Gücündeki Fotovoltaik Generatörün Matlab Simulink ile Modellenmesi, 9s.
- [22] Hohm D. P., Ropp M.E., 2002. Comparative Study of Maximum Power Point.
- [23] Bloss H., 2000, Analytical and Exerimental Investigation of Photovoltaic Pumping Systems, Doctoral Thesis, University of Oldenburg.
- [24] Boztepe M., 2003, Güneş Pillerinin Maksimum Güç Noktasında Çalıştırılması,7s.
- [25] N. Onat, S. Ersöz, 2009, PV Sistemlerde Maksimum Güç Noktası İzleyici Algoritmalarının Karşılaştırılması, V. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu,7s.
- [26] Boztepe M., 2005, PV Sistemler Ders Notu, ,23s.
- [27] Beyit O., Dervişoğulları., Güneş Pilleri ve Güneş Enerji Sistemleri, 10s.
- [28] Dunlop J.P, 1997, Batteries and Charge Control in Stand-Alone Photovoltaic System Fundamentals and Application, 70p.
- [29] Hansen A. D., Sorensen,P., Hansen, L. H., Binder, H., 2000, Models for a Stand Alone System, Riso National Laboratory, Denmark, 77p.
- [30] Özgören, K. Erdoğan, A. Kahraman, Özgür Solmaz, 2011, X. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, “Model Bir Konutun Soğutma Yükünün Dinamik Hesaplanması: İzmir Örneği”