

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DA ÇEVİRİCİ TEMELLİ FOTOVOLTAİK ELEKTRİK  
ÜRETİM SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ VE  
SİMÜLASYONU**

Elektrik Mühendisi Aslıhan KUMBASAR

**FBE Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Makineleri ve Güç Elektronik Programında  
Hazırlanan**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. M. Salih TACİ**

**İSTANBUL, 2010**

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ .....	v
KISALTMA LİSTESİ.....	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ .....	ix
ÖNSÖZ .....	x
ÖZET .....	xi
ABSTRACT .....	xii
1. GİRİŞ .....	1
2. YENİLENEBİLİR ENERJİ .....	3
2.1 Giriş .....	3
2.2 Güneş Enerjisi .....	4
2.2.1 Güneşten Dünyaya Gelen Enerji .....	5
2.2.1.1 Direkt Işınım .....	8
2.2.1.2 Yayılmış Işınım .....	8
2.2.1.3 Yansıtılmış Işınım.....	8
2.3 Türkiye’de Güneş Enerjisi .....	9
2.4 Güneş Enerjisi Kullanım Alanları .....	12
2.4.1 Su Pompalama Sistemleri .....	12
2.4.2 Haberleşme Sistemleri .....	12
2.4.3 Katodik Koruma .....	13
2.4.4 Aydınlatma Sistemleri .....	13
2.4.5 Binaya Entegre Sistemler.....	13
3. GÜNEŞ PİLLERİ .....	15
3.1 Giriş .....	15
3.2 Güneş Pillerinin Tarihsel Gelişimi .....	15
3.3 Güneş Pillerinin Yapısı ve Çalışma Prensibi .....	16
3.3.1 Güneş Pillerinin Elektriksel Modelleri .....	17
3.3.2 Güneş Pillerinin Karakteristikleri .....	20
3.3.3 Güneş Pillerinin Bağlanması .....	25
3.4 Güneş Pillerindeki Kayıplar .....	29
3.4.1 Elektriksel Kayıplar .....	29
3.4.2 Işıksal Kayıplar.....	29
3.4.3 Ara Yüzey Kayıpları .....	29
3.4.4 Açık Devre Gerilim Kayıpları .....	30
3.4.5 Direnç Kayıpları .....	30

3.4.6	Verim Kaybı .....	30
3.5	Güneş Pili Türleri .....	31
3.5.1	Kristal Silisyum Güneş Pilleri .....	31
3.5.2	Tek Kristal Silisyum Güneş Pilleri .....	31
3.5.3	Yarı Kristal Silisyum Güneş Pilleri .....	32
3.5.4	Şerit Silisyum Güneş Pilleri .....	32
3.5.5	Çok Kristalli Silisyum Güneş Pilleri .....	32
3.5.6	İnce Film Güneş Pilleri .....	32
3.5.7	Amorf Silisyum Güneş Pilleri .....	33
3.5.8	Bakır İndiyum Diselenid Güneş Pilleri .....	34
3.5.9	Kadmiyum Tellür İnce Film Güneş Pilleri .....	34
3.5.10	Galyum Arsenit Güneş Pilleri .....	35
3.5.11	Güneş Pili Güç Verimliliklerinin Karşılaştırılması .....	35
4.	<b>GÜNEŞ PİLİ SİSTEMLERİ</b> .....	37
4.1	Giriş .....	37
4.2	Şebekeden Bağımsız Güneş Pili Sistemleri .....	37
4.3	Şebekeye Bağlı Güneş Pili Sistemleri .....	38
4.4	Güneş Pili Sistem Bileşenleri .....	39
4.4.1	Güneş Panelleri .....	39
4.4.2	Aküler .....	39
4.4.3	Şarj Regülatörleri .....	42
4.4.3.1	Paralel Regülatör .....	42
4.4.3.2	Seri Regülatör .....	43
4.4.4	İnverterler .....	44
4.5	Güneş Pili Sistemlerinin Avantaj ve Dezavantajları .....	46
5.	<b>MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI TAKİP EDİCİLER</b> .....	48
5.1	Giriş .....	48
5.2	Düşürücü (Buck) DC-DC Dönüştürücü .....	50
5.3	Yükseltici (Boost) DC-DC Dönüştürücü .....	52
5.4	Düşürücü-Yükseltici DC-DC Dönüştürücü .....	54
5.5	Cuk DC-DC Dönüştürücü .....	56
5.6	Sepic DC-DC Dönüştürücü .....	58
5.7	Geri Dönüştürücü DC-DC Dönüştürücü .....	60
5.8	DC DC Dönüştürücülerin Karşılaştırılması .....	62
5.9	Maksimum Güç Noktası Takip Teknikleri ve Karşılaştırılmaları .....	64
5.9.1	Dolaylı Kontrol Tekniği .....	64
5.9.1.1	Sabit Gerilim Metodu .....	64
5.9.1.2	Sabit Akım Metodu .....	65
5.9.2	Doğrudan Kontrol Tekniği .....	66
5.9.2.1	Değiştir Gözle Metodu .....	66
5.9.2.2	Artan İletkenlik Metodu .....	66
5.9.2.3	Bulanık Mantık Metodu .....	67
5.9.2.4	Dinamik Bozulma Metodu .....	68
5.9.3	MPPT Tekniklerinin Karşılaştırılması .....	69
5.10	Maksimum Güç Noktası Takip Edici Pspice Simulasyonu .....	71
6.	<b>SONUÇLAR ve ÖNERİLER</b> .....	78
	<b>KAYNAKLAR</b> .....	79

ÖZGEÇMİŞ.....	82
---------------	----

## SİMGE LİSTESİ

$a$	Transformatör dönüştürme oranı
$C$	Kondansatör
$D$	Bağıl iletim süresi
$E_{eo}$	Güneş sabiti
$E_g$	Yasak enerji aralığı
$f_g$	Güneş sabiti düzeltme faktörü
$g$	Gün sayısı
$I$	Akım
$I_D$	Diyot akımı
$I_ç$	Çıkış akımı
$I_g$	Giriş akımı
$I_{mpp}$	Maksimum güç noktası akımı
$I_{ph}$	Foton akımı
$I_s$	Diyot ters doyum akımı
$I_{sc}$	Kısa devre akımı
$i_p$	Primer sargı akımı
$i_s$	Sekonder sargı akımı
$L$	Endüktans
$L_p$	Primer endüktans
$L_s$	Sekonder endüktans
$m$	Diyot ideal faktörü
$R$	Direnç
$r_0$	Yıllık ortalama uzaklık
$r_g$	Dünya güneş arası uzaklık
$R_p$	Paralel direnç
$R_s$	Seri direnç
$R_r$	Rezonans devresi yüklü bobin direnci
$t$	Zaman
$V$	Gerilim
$V_{cc}$	$\pm 15$ V kaynak gerilimleri
$V_k$	Kontrol sinyali gerilimi
$V_{max}$	Maksimum akım
$V_{min}$	Maksimum gerilim
$V_{mpp}$	Maksimum güç noktası gerilimi
$V_{oc}$	Açık devre gerilimi
$V_T$	Isıya bağlı gerilim
$P_{max}$	Maksimum güç
$P_{min}$	Minimum güç
$P_o$	Kısa devre gücü
$U_ç$	Çıkış gerilimi
$U_g$	Giriş gerilimi

## **KISALTIMA LİSTESİ**

AC	Alternatif Akım
AM	Hava Kütlesi (Air Mass)
CdTe	Kadmiyum Tellür
DC	Doğru Akım
DMİ	Devlet Meteoroloji İşleri
EİE	Elektrik İşleri Etüt İdaresi
FF	Dolum Faktörü
MPPT	Maksimum Güç Noktası Takip Edici
PSPICE	Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis
PV	Photovoltaic
PWM	Darbe Genişlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation)
SEPIC	Single-Ended Primary Inductor Converter

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Tükenebilirliğine göre enerji kaynakları .....	3
Şekil 2.2	Güneş ile dünya arasındaki ilişki (Şenpınar, 2005) .....	5
Şekil 2.3	Yeryüzüne ulaşan güneş ışınimleri .....	6
Şekil 2.4	Güneşten atmosfere gelen enerjinin aylara göre değişimi (Batman, 2001) .....	6
Şekil 2.5	Yeryüzü yıllık ışınım dağılımı .....	7
Şekil 2.6	Türkiye yıllık ışınım dağılımı .....	11
Şekil 2.7	Güneş pili su pompalama sistemi .....	12
Şekil 2.8	Güneş pili yol aydınlatma sistemi .....	13
Şekil 2.9	(a) Çatı örtüsü olarak kullanılan ince film güneş panelleri, (b) Energyepark West, Sathens, Avusturya binasındaki cephe giydirme güneş paneli uygulaması .....	14
Şekil 3.1	Fotovoltaik gruplar .....	15
Şekil 3.2	P-n jonksiyonunun oluşması .....	17
Şekil 3.3	Güneş pili basitleştirilmiş elektriksel eşdeğer modeli .....	18
Şekil 3.4	Güneş pili tek diyotlu elektriksel eşdeğer modeli .....	18
Şekil 3.5	Güneş pili pspice eşdeğer modeli (Nema vd., 2009) .....	19
Şekil 3.6	Güneş pilinin ışınımına bağlı (a) I-V karakteristiği ve (b) P-V karakteristiği ....	21
Şekil 3.7	Farklı sıcaklık değerleri için güneş pili pspice modeli (Nema vd., 2009) .....	21
Şekil 3.8	Güneş pilinin sıcaklığa bağlı (a) I-V karakteristiği ve (b) P-V karakteristiği ..	22
Şekil 3.9	Güneş pilinin $R_s$ 'ye bağlı (a) pspice modeli, (b) I-V karakteristiği ve (c) P-V karakteristiği .....	23
Şekil 3.10	Güneş pilinin $R_p$ 'ye bağlı (a) pspice modeli, (b) I-V karakteristiği ve (c) P-V karakteristiği .....	25
Şekil 3.11	Güneş pillerinin seri bağlantı (a) pspice modeli, (b) I-V karakteristiği .....	26
Şekil 3.12	Güneş pillerinin paralel bağlantı (a) pspice modeli, (b) I-V karakteristiği .....	27
Şekil 3.13	By-pass diyotlarının kullanımı (Lindgren, 2002) .....	28
Şekil 3.14	Bloklama diyotlarının kullanımı (Tanrıöven, 2009) .....	28
Şekil 3.15	Tek kristal silisyum güneş pili .....	31
Şekil 3.16	Çok kristal silisyum güneş pili .....	32
Şekil 3.17	İnce film güneş pili .....	33
Şekil 3.18	Amorf silisyum güneş pili .....	33
Şekil 3.19	Bakır indiyum diselenid güneş pili .....	34
Şekil 3.20	Kadmiyum tellür güneş pili .....	34
Şekil 3.21	Galyum arsenit güneş pili .....	35
Şekil 4.1	Şebekeden bağımsız güneş pili sistemi blok şeması .....	37
Şekil 4.2	Şebekeye bağlı (grid interactive) güneş pili sistemi blok şeması .....	38
Şekil 4.3	Güneş paneli .....	39
Şekil 4.4	Akü elektrik eşdeğer devresi .....	40
Şekil 4.5	Seri bağlı aküler .....	41
Şekil 4.6	Paralel bağlı aküler .....	41
Şekil 4.7	Paralel Regülatör .....	42
Şekil 4.8	Paralel Regülatör (a) pspice modeli, (b) akü gerilimi (Mansoor, 2008) .....	43
Şekil 4.9	Seri regülatör .....	44
Şekil 4.10	Sinüsoidal PWM dalga çıkış biçimi .....	45
Şekil 4.11	DC PWM dalga çıkış biçimi .....	46
Şekil 5.1	PV panelin farklı ışınım altlarında I-V karakteristiği ve maksimum güç noktaları .....	48
Şekil 5.2	Mppt ve mppt olmadan üretilen enerjinin karşılaştırılması (Özdemir, 2007) ..	49
Şekil 5.3	MPPT blok diyagramı .....	49
Şekil 5.4	Düşürücü dönüştürücü devre şeması .....	50

Şekil 5.5	Düşürücü dönüştürücü (a) pspice modeli, (b) temel dalga şekilleri .....	51
Şekil 5.6	Yükseltici dönüştürücü devre şeması.....	52
Şekil 5.7	Yükseltici dönüştürücü (a) pspice modeli, (b) temel dalga şekilleri .....	53
Şekil 5.8	Düşürücü yükseltici dönüştürücü devre şeması.....	54
Şekil 5.9	Düşürücü yükseltici dönüştürücü (a) pspice modeli, (b) temel dalga şekilleri .....	55
Şekil 5.10	Cuk dönüştürücü devre şeması .....	56
Şekil 5.11	Cuk dönüştürücü (a) pspice modeli, (b) temel dalga şekilleri.....	57
Şekil 5.12	Sepic dönüştürücü devre şeması.....	58
Şekil 5.13	Sepic dönüştürücü (a) pspice modeli, (b) temel dalga şekilleri.....	59
Şekil 5.14	Geri dönüşlü dönüştürücü devre şeması.....	60
Şekil 5.15	Geri dönüşlü dönüştürücü (a) pspice modeli, (b) temel dalga şekilleri .....	61
Şekil 5.16	Sabit gerilim metodu akış diyagramı (Özdemir, 2007).....	65
Şekil 5.17	Artan iletkenli metodu çalışma eğrisi .....	67
Şekil 5.18	Hata fonksiyonu ve hata fonksiyonun değişimi.....	68
Şekil 5.19	Dinamik bozulma metoduna ait akış diyagramı .....	69
Şekil 5.20	Akım geri beslemeli MPPT devresi.....	72
Şekil 5.21	Akım geri beslemeli MPPT devresi (a) güç karakteristiği, (b) güç iletimine ait verim.....	73
Şekil 5.22	İki kademeli MPPT .....	74
Şekil 5.23	Farklı giriş gerilim değerlerinde 1.kademede MPPT karakteristiği (a) $V_{pv}=21,6V$ , $V_{mppt}= 17,3V$ , (b) $V_{pv}=18V$ , $V_{mppt}= 17,3V$ ve (c) $V_{pv}=16V$ , $V_{mppt}= 15,6V$ .....	76
Şekil 5.24	2.kademede MPPT karakteristiği $V_{pv}=17,3V$ , $V_{mppt}= 12V$ .....	77



## ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1	Türkiye'nin yıllık yenilenebilir enerji potansiyeli .....	4
Çizelge 2.2	Çeşitli gökyüzü durumları için toplam ışıınım ve bu toplam ışıınımda yayılmış ışıınım oranları (Batman, 2001).....	8
Çizelge 2.3	Çeşitli yüzeylerin yansıtıcılık değerleri (Aydınöz, 1996) .....	9
Çizelge 2.4	Türkiye'nin aylık ortalama güneş enerjisi potansiyeli .....	10
Çizelge 2.5	Türkiye'nin toplam güneş enerjisi potansiyelinin bölgelere göre dağılımı.....	11
Çizelge 2.6	Güneş pili sistemlerinin yapıda kullanım şekilleri.....	14
Çizelge 3.1	Güneş pili verimlilikleri (Karamanav, 2007) .....	36
Çizelge 3.2	Güneş pili yapımında kullanılan maddelerin dünya rezervleri ve üretimi (Karamanav, 2007).....	36
Çizelge 5.1	DC DC dönüştürücülere ait özellikler (Özdemir, 2007) .....	62
Çizelge 5.2	Sharp NE-80EJEA güneş modülünün elektriksel karakteristikleri.....	63
Çizelge 5.3	DC DC dönüştürücülerin verimlerinin karşılaştırılması .....	63
Çizelge 5.4	Bulanık mantık kurallar tablosu (Esrām ve Chapman, 2007) .....	68
Çizelge 5.5	MPPT metotlarının verimlerinin karşılaştırılması .....	70
Çizelge 5.6	MPPT metotlarının temel özellikleri.....	70
Çizelge 5.7	Isofton I-75S/12 güneş modülünün elektriksel karakteristikleri.....	72

## ÖNSÖZ

“DA Çevirici Temelli Fotovoltaik Elektrik Üretim Sistemlerinin İncelenmesi ve Simülasyonu” başlıklı yüksek lisans tez çalışmamı teorik olarak tamamlamış bulunmaktayım.

Tez çalışmalarım boyunca beni yönlendiren ve her türlü yardımı, desteği, güleryüzü esirgemeyen tez danışmanım ve hocam Yrd. Doç Dr. M.Salih TACİ'ye öncelikle yürekten teşekkürlerimi sunarım.

İyi bir eğitim görmem için her türlü özveriye gösteren, her zaman maddi ve manevi yönden desteklerini esirgemeyen aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın her aşamasında fikir ve destekleriyle katkıda bulunan, emekleri geçen hocalarıma, Yrd. Doç Dr. İsmail AKSOY, Arş. Gör. Evren İŞLER, arkadaşlarım Nihal KAYA, M. Nur GÜRCAN, Samet İNANÇ ve tüm arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

## ÖZET

Günümüzde gerek fosil kökenli enerji kaynaklarının her geçen gün azalması gerekse bu yakıtların çevre üzerindeki olumsuz etkileri, alternatif enerji kaynaklarına ilgiyi arttırmıştır. Enerji üretimi için kullanılan alternatif enerji kaynaklarından biri de güneş enerjisidir. Güneş enerjisinin diğer enerji türlerine alternatif olarak gösterilmesinin sebepleri çevreyi kirletmemesi, her yerde kullanılabilmesi ve bakım maliyetinin çok az olmasıdır.

Bu çalışmada, güneş pilinin yapısı, çalışma prensibi, türleri, sistemleri ve kullanım alanları incelenmiş ve farklı çalışma koşulları altında güneş pilinin elektronik benzetimi yapılmıştır. Güneş pillerinden elde edilen gücün maksimum noktada tutulmasını sağlayan maksimum güç noktası takip ediciler incelenmiş ve elektronik benzetimi yapılmıştır.

Güneş pili sistemlerinin en önemli dezavantajı ilk kurulum maliyetinin çok yüksek olması ve enerji dönüşüm veriminin düşük olmasıdır. Gelişen teknolojiyle birlikte güneş pili veriminin artacağı ve maliyetinin düşeceği beklenmektedir.

**Anahtar Kelimeler :** Güneş pilleri, mppt, PSPICE.

## **ABSTRACT**

Degradation of fossil based energy source and their negative affects on environment has increased the researchs on alternative energy sources. One of those alternative sources is solar energy. What makes solar energy an alternative to other sources is that it is environment friendly, applicable almost in every area and has a very low maintenance cost.

In this study, structure of solar cells, operational principles, its types, its systems, application areas has been investigated, including simulation of solar cells under different conditions. In addition, maximum power point trackers, which keep the generated power at maximum level, has been investigated and simulated.

The most important disadvantage of solar cell systems is very high installation cost and low energy conversion efficiency. With the developing technology, it is expected that efficiency of solar cells will increase, and installation costs will be down.

**Keywords :** Solar cell, mppt, PSPICE.

## 1. GİRİŞ

Enerji uygarlığın vazgeçilmez bir unsurudur. Sanayi devrimiyle dünya üzerinde gelişmekte olan ülkelerin enerji ihtiyaçları artmıştır. Elektrik enerjisi ihtiyacını karşılamak için ilk önce fosil yakıtlar kullanılmaya başlanmıştır. Fosil yakıtlar içerisinde en çok kullanılan ise petroldür. Yapılan araştırmalara göre fosil yakıt rezervleri bugünkü oranda tüketilmeye devam edilirse yakın bir gelecekte tükenmeye başlayacaktır. Gerek fosil yakıt rezervlerinin sınırlı oluşu gerekse çevreye verdiği zararlardan ötürü alternatif enerji kaynaklarına yönelim gün geçtikçe artmaktadır. Günümüzde fosil yakıtların yerini alacak yenilenebilir enerji kaynaklarının başlıcaları jeotermal enerji, güneş enerjisi ve rüzgar enerjisidir.

Alternatif enerji kaynaklarından güneş enerjisi sonsuz ve yaygın bir kaynak olması, çevre kirliliğine sebep olmaması ve doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülebilmesi gibi özellikleri nedeniyle hızla yaygınlaşmaktadır.

Bu çalışmada güneş pillerinin çalışma prensibi incelenmiş, farklı çalışma koşullarında güneş pili elektronik benzetimi yapılmış ve karakteristikleri incelenmiştir. Güneş pili sistemleri ve sistem bileşenleri olan panel, akü, sarj regülatörü ve inverter incelenmiştir. Güneş pili sistemleri avantaj ve dezavantajlarından bahsedilmiştir. Güneş pili sistemlerinin verimini artıran maksimum güç noktası takip ediciler incelenmiştir. Maksimum güç noktası takip edicilerde kullanılan çeşitli DC-DC dönüştürücüler anlatılmış ve elektronik benzetimleri yapılmıştır. Maksimum güç noktası takip edicilerin kontrol teknikleri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır.

Birinci bölümde, enerjinin öneminden, kullanılan enerji kaynaklarından ve bu araştırma da incelenen güneş enerjisinden bahsedilmiştir.

İkinci bölümde, enerji kaynakları sınıflandırılmış, dünyaya gelen güneş enerjisi hakkında bilgi verilmiş, Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyelinden ve güneş enerjisi kullanım alanlarından bahsedilmiştir.

Üçüncü bölümde, güneş pilinin tarihsel gelişimi, temel çalışma prensibi, elektriksel modeli, kayıpları ve türlerinden bahsedilmiştir. Farklı ortam koşulları altında güneş pilinin PSPICE programı ile simülasyonu yapılmıştır.

Dördüncü bölümde, güneş pili sistemleri ve sistem bileşenleri anlatılmıştır.

Beşinci bölümde, maksimum güç noktası takip ediciler incelenmiş, yapısında bulunan DC-DC

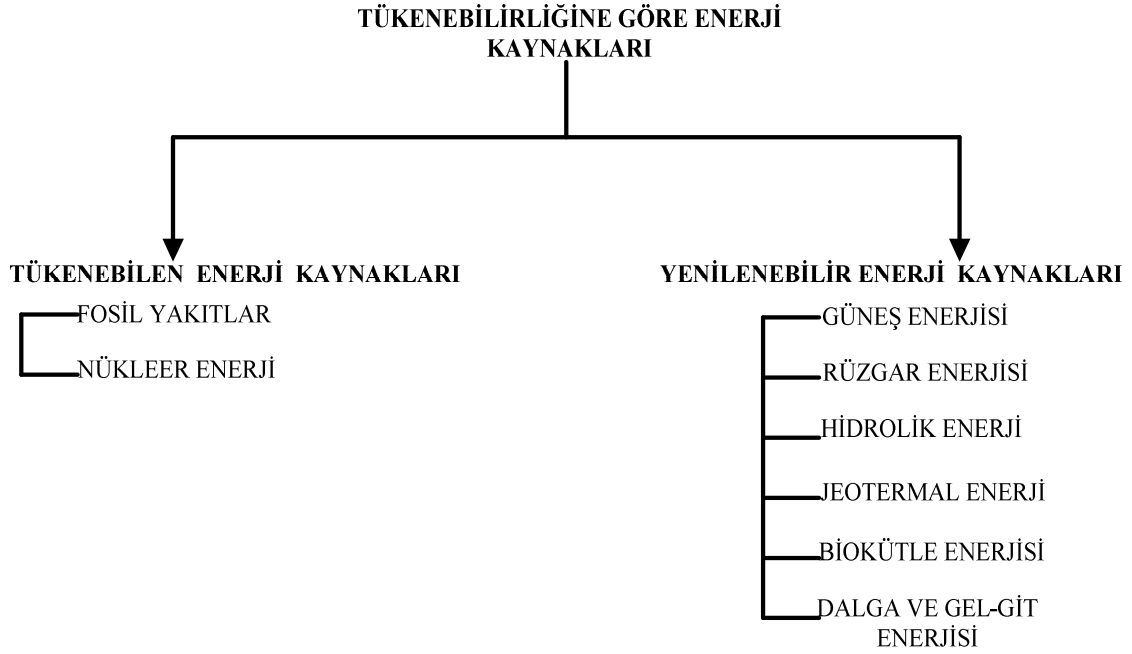
dönüştürücüler anlatılmış ve PSPICE programı ile simülasyonu yapılmıştır. Maksimum güç noktası takip edici teknikleri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır.

Altıncı bölümde ise, sonuç kısmından bahsedilmiştir.

## 2. YENİLENEBİLİR ENERJİ

### 2.1 Giriş

Enerji üretim ve tüketim değerleri günümüzde ülkelerin kalkınmışlığını gösteren bir ölçü haline gelmiştir. Teknolojik gelişmelerle birlikte ülkelerin enerji ihtiyacı gün geçtikçe artış göstermektedir. Dünyadaki enerji tüketiminin büyük çoğunluğu fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Enerji kaynakları, tükenebilirliğine göre, tükenen enerji kaynakları ve yenilenebilir enerji kaynakları olarak ikiye ayrılır (Şekil 2.1). Tükenen enerji kaynakları, fosil kaynaklar (doğalgaz, kömür, petrol, v.s.) ve nükleer enerji, yenilenebilir enerji kaynakları ise rüzgar enerjisi, güneş enerjisi, jeotermal enerji, dalga ve gel-git enerjisi, biokütle enerjisi, hidrolik enerji kaynaklarıdır.



Şekil 2.1 Tükenebilirliğine göre enerji kaynakları

Yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi, ülkelerdeki potansiyellere göre değişir. Gelgit enerjisinden, gel-git olayının sık yaşandığı Fransa, ABD, Kanada ve Avustralya gibi ülkelerde yararlanılırken, jeotermal enerji uygulamaları, Yeni Zelanda, ABD, Japonya ve Rusya'da bulunmaktadır.

Türkiye, yenilenebilir enerji kaynaklarının potansiyeli bakımından zengin bir ülkedir. Özellikle jeotermal enerjide dünya potansiyelinin %8'ine sahiptir (Özgöçmen, 2007). Hidrolik

enerji açısından da büyük bir potansiyeli vardır. Türkiye rüzgar enerjisi bakımından kötü sayılmasada dünya rüzgar enerjisi kuşağının dışında kalmaktadır. Ülkemiz coğrafi konumu nedeniyle yılın dört mevsimi güneş enerjisi almaktadır. Çizelge 2.1’de Türkiye’nin yenilenebilir enerji çeşitleri ve yıllık yenilenebilir enerji potansiyelleri görülmektedir (Özgöçmen, 2007).

Çizelge 2.1 Türkiye’nin yıllık yenilenebilir enerji potansiyeli

Yenilenebilir Enerji Türü		Kullanım Enerji Türü	Doğal Potansiyel	Teknik Potansiyel	Ekonomik Potansiyel
Güneş Enerjisi		Elektrik Enerjisi (milyarkWh)	977000	6105	305
		Isı (MTEP)	80000	500	25
Hidrolik Enerji		Elektrik Enerjisi (milyarkWh)	430	215	124.5
Jeotermal Enerji		Elektrik Enerjisi (milyarkWh)	-	-	1.4
		Isı (MTEP)	31500	7500	2843
		Yakıt Modern (MTEP)	90	40	25
Rüzgar Enerjisi	Direkt Rüzgar Enerjisi Denizsel	Elektrik Enerjisi (milyarkWh)	-	180	-
	Deniz Dalga Enerjisi	Milyar kWh	150	18	-
	Direkt Rüzgar Enerjisi Karasal	Elektrik Enerjisi (milyarkWh)	400	110	50

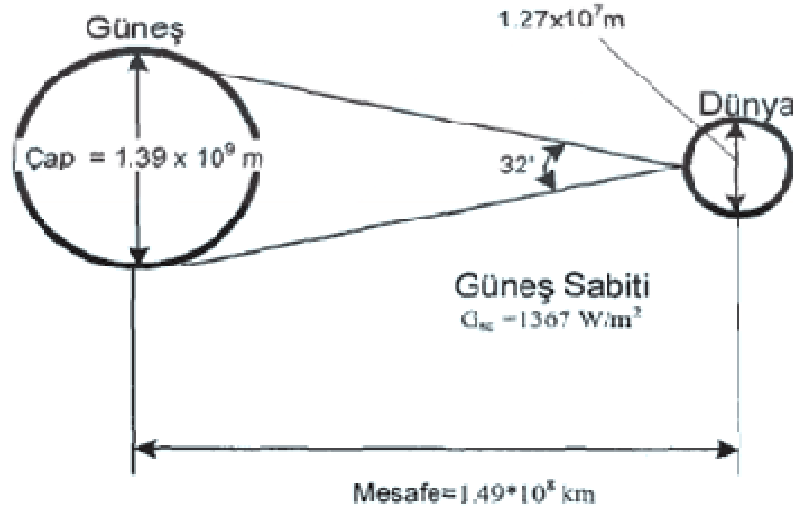
## 2.2 Güneş Enerjisi

Güneş,  $2.10^{27}$  ton kütle ve  $7.10^5$  km yarıçapa sahip samanyolu galaksisi içinde yer alan orta



büyükte bir yıldızdır. Güneşin kütlesi, dünyanın kütlesinin 330000 katından büyüktür. Güneşten çıkan enerji miktarı  $3,8.10^{20}$  MW civarındadır. Dünya ile güneş arasındaki bazı büyüklükler ve mesafe Şekil 2.2’de görülmektedir. Güneşin etkili yüzey sıcaklığı yaklaşık  $5800$  °K’dir. Güneşin merkezi bölgelerinde sıcaklığın  $8.10^6$  ile  $40.10^6$  °K arasında değiştiği tahmin edilmektedir (Cheremisinoﬀ ve Dickinson, 1980).

Güneş enerjisi en önemli yenilenebilir enerji kaynağıdır. Güneşten füzyon yoluyla elde edilen enerji, güneş ışığı ya da güneş enerjisi olarak adlandırılan elektromanyetik ışıma olarak dünyaya iletilir. Güneşten gelen ışımlar farklı dalga boylarına sahiptir. Ultraviyole, infrared, gama ve görünür ışınlar bu ışımların bir kısmını oluşturur. Dünya atmosferinin dış yüzeyine gelen güneş enerjisinin şiddeti, güneş sabiti olarak kabul edilip  $1367$  W/m<sup>2</sup>’dir.

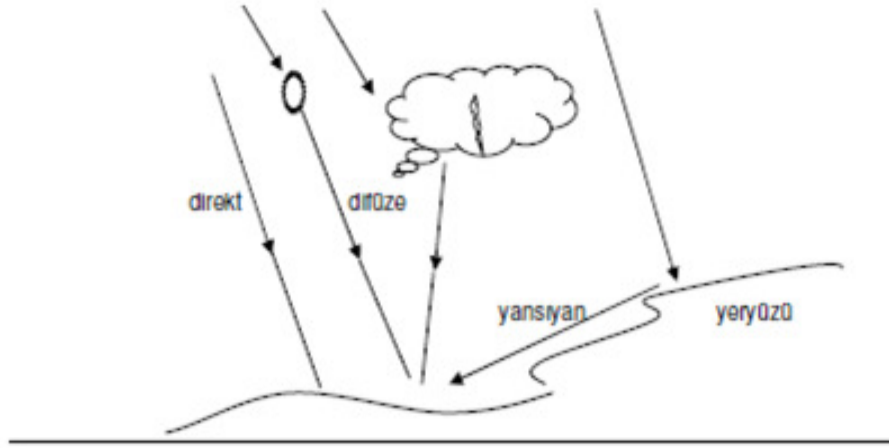


Şekil 2.2 Güneş ile dünya arasındaki ilişki (Şenpınar, 2005)

Güneş enerjisinin dünyaya gelen küçük bir bölümü bile, insanlığın mevcut enerji tüketiminden kat ve kat fazladır. Güneş enerjisinden yararlanma konusundaki çalışmalar 1970’lerden sonra hızlanmış, güneş enerjisi sistemleri teknolojik olarak ilerleme ve maliyet bakımından düşüş göstermiş, temiz bir enerji kaynağı olarak kendini kabul ettirmiştir.

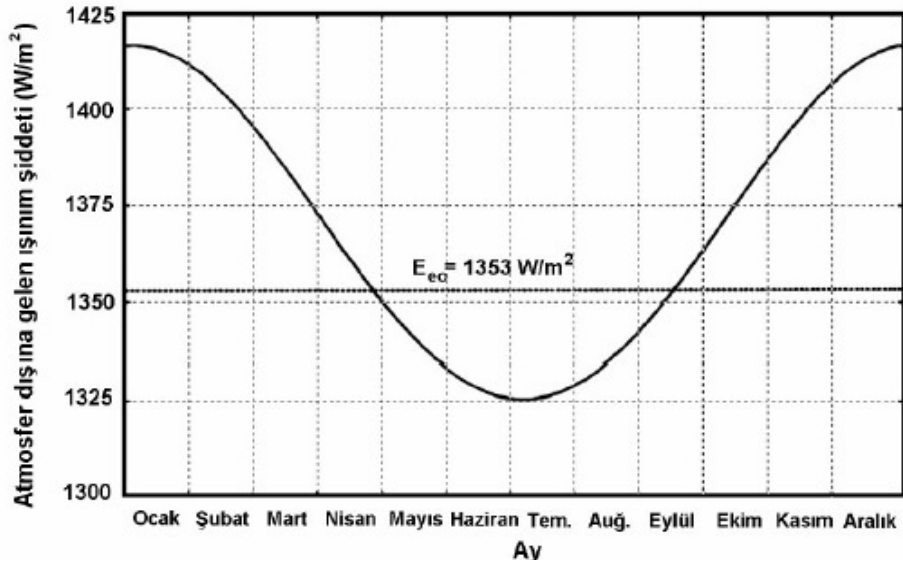
### 2.2.1 Güneşten Dünyaya Gelen Enerji

Dünya atmosferinin dış yüzeyine gelen güneş enerjisinin şiddeti sabit kabul edilip  $1367$  W/m<sup>2</sup>’dir. Yeryüzüne ulaşan miktar ise en fazla  $1000$  W/m<sup>2</sup>’dir. Güneşten gelen ışımlar yeryüzüne (Şekil 2.3), ya doğrudan ışıma ya yayılmış (difüzyon) ışıma ya da yansıtılmış ışıma ile ulaşır.



Şekil 2.3 Yeryüzüne ulaşan güneş ışınimleri

Güneşten yeryüzüne gelen ışınım şiddeti, gün içinde geliş açısına bağlı olarak değişir. Bu şiddet öğlen vaktinde güneş ışınlarının atmosfer içinde izlediği yolun en kısa değerde olması nedeniyle en yüksek değerdedir. Dünya güneş etrafında eliptik bir yörünge çizer. Bunun sonucunda dünya güneş arasındaki mesafenin en az olduğu 3 ocakta atmosfere gelen enerji en yüksek değerini, en uzak olduğu 4 temmuzda atmosfere gelen enerji en düşük değerini alır (DIN 5034, 1993). Güneşten gelen enerjinin aylara göre değişimi Şekil 2.4’de görülmektedir.



Şekil 2.4 Güneşten atmosfere gelen enerjinin aylara göre değişimi (Batman, 2001)

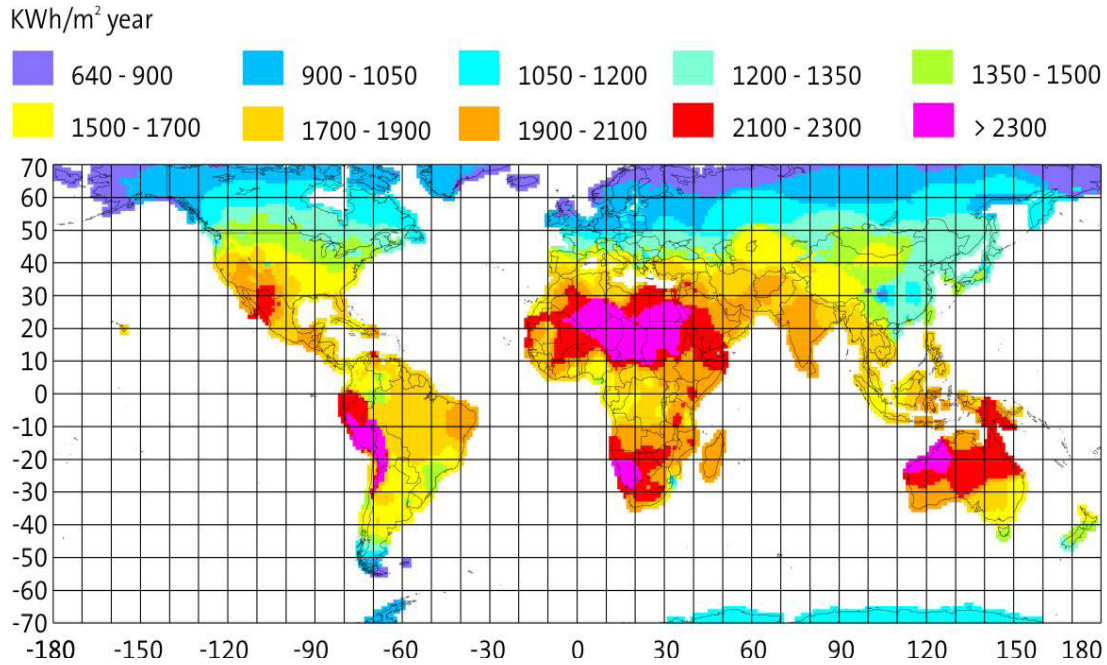
Atmosfer dışında birim alana tüm dalga boylarında bir anda gelen güneş ışınımı miktarı güneş sabiti olarak tanımlanır ve  $E_{eo}$  ile gösterilir. Bu tanımdan yola çıkarak, dünya güneş arası uzaklık  $r_g$  ve yıllık ortalama uzaklık  $r_o$  olmak üzere:

$$E_g = \frac{r_o^2}{r_g^2} E_{eo} = f_g \cdot E_{eo} \quad (2.1)$$

yazılabilir. Burada  $f_g$  güneş sabiti düzeltme faktörü adını alır ve  $g$  ise 1 ocaktan itibaren belirlenen güne kadar gün sayısı olmak

$$f_g = 1 + 0.033 \cdot \cos\left(360 - \frac{g}{365}\right) \quad (2.2)$$

şeklinde hesaplanabilir (Kılıç, 1982). Şekil 2.5'de yeryüzünün yıllık ışınım dağılımı görülmektedir.



Şekil 2.5 Yeryüzü yıllık ışınım dağılımı

Güneşten dünya atmosferinin dışına gelen enerjinin en az %3'ü atmosfer tarafından yutulmakta veya saçılmaktadır. Bulutsuz açık bir günde yere dik olarak gelen güneş enerjisi en fazla 1000 W/m<sup>2</sup>'dir (Ertürk, 1997).

### 2.2.1.1 Direkt Işınım

Güneş ışığı dünyanın yüzeyine dağılmadan ve hiçbir engelle takılmadan ulaşırsa buna direkt veya doğrudan ışınım denir. Dalga boyu 0.3-3 mikron arasındadır.

### 2.2.1.2 Yayılmış Işınım

Güneşten alınan ışınımın atmosfer tabakasından geçip dağıtıldıktan sonra yönünün değişmesi sonucundaki ışınım yayılmış ışınım denir. Güneş ışınımının bir kısmı, atmosfer içine girdikten sonra yeryüzüne ulaşmaya kadar, atmosferi oluşturan bileşenlerden ozon ve su buharı tarafından, belirli dalga uzunluklarında yutulur. Hava içerisindeki moleküller, toz ve su buharı tarafından saçılır. Işınımın yutulan ve saçılan kısmı yayılmış ışınımı oluşturur. Çizelge 2.2'de çeşitli gökyüzü durumları için toplam ışınım ve bu toplam ışınımında yayılmış ışınım oranları görülmektedir.

Çizelge 2.2 Çeşitli gökyüzü durumları için toplam ışınım ve bu toplam ışınımında yayılmış ışınım oranları (Batman, 2001)

	Açık gökyüzü	Puslu gökyüzü	Tam kapalı gökyüzü
Toplam ışınım (W/m <sup>2</sup> )	600-1000	200-400	50-150
Yayılmış ışınım (%)	10-20	20-80	80-100

### 2.2.1.3 Yansıtılmış Işınım

Direkt ve yayılmış ışınım şeklinde gelen güneş ışınlarının parlak yüzeylerden yansması şeklinde oluşan ışınım yansıtılmış ışınım denir. Yansımanın olduğu yüzeyin pürüzsüzlüğü ve maddenin cinsi yansıyan ışınımın şiddetini ve dağılımını belirler. Yansıtılmış ışınım ile yayılmış ışınım arasındaki fark, yayılmış ışınım atmosferdeki temel gazlardan, yansıtılmış ışınım yeryüzündeki toprak, kar gibi cisimlerden yansıyarak meydana gelir. Çizelge 2.3'de çeşitli yüzeylerin yansıtıcılık değerleri görülmektedir.

Çizelge 2.3 Çeşitli yüzeylerin yansıtıcılık değerleri (Aydınöz, 1996)

Yüzey cinsi	Yansıtıcılık değeri ( % )
Taze kar	75
Su yüzeyi	7
Toprak	14
Asfalt kaplı zemin	10
Beton kaplı zemin	22
Kuru çim	20
Yeşil taze çim	26
Koyu bina yüzeyi	27
Açık bina yüzeyi	60

### 2.3 Türkiye’de Güneş Enerjisi

Türkiye yenilenebilir enerji kaynakları açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Devlet Meteoroloji İşlerinin 1966-1982 yılları ölçülen güneşlenme süresi ve ışınım şiddeti verilerinden yararlanarak EİE tarafından yapılan çalışmaya göre Türkiye’nin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2640 saat (günlük toplam 7.2 saat) ve ortalama toplam ışınım şiddeti 1311 kWh/m<sup>2</sup>-yıl (günlük toplam 3,6 kWh/m<sup>2</sup>) olarak tespit edilmiştir. Aylara göre Türkiye güneş enerjisi potansiyeli ve güneşlenme süresi değerleri Çizelge 2.4’de verilmiştir (EİE, 2007).

Çizelge 2.4 Türkiye'nin aylık ortalama güneş enerjisi potansiyeli

Aylar	Aylık toplam güneş enerjisi		Güneşlenme süresi (Saat/ay)
	Kcal/cm <sup>2</sup> -ay	kWh/m <sup>2</sup> -ay	
Ocak	4,45	51,75	103
Şubat	5,44	63,27	115
Mart	8,31	96,65	165
Nisan	10,51	122,23	197
Mayıs	13,23	153,86	273
Haziran	14,51	168,75	325
Temmuz	15,08	175,38	365
Ağustos	13,62	158,40	343
Eylül	10,60	123,28	280
Ekim	7,73	89,90	214
Kasım	5,23	60,82	157
Aralık	4,03	46,87	103
Toplam	112,74	1311	2640
Ortalama	308 cal/cm <sup>2</sup> -gün	3,6 kWh/m <sup>2</sup> -gün	7,2 saat/gün

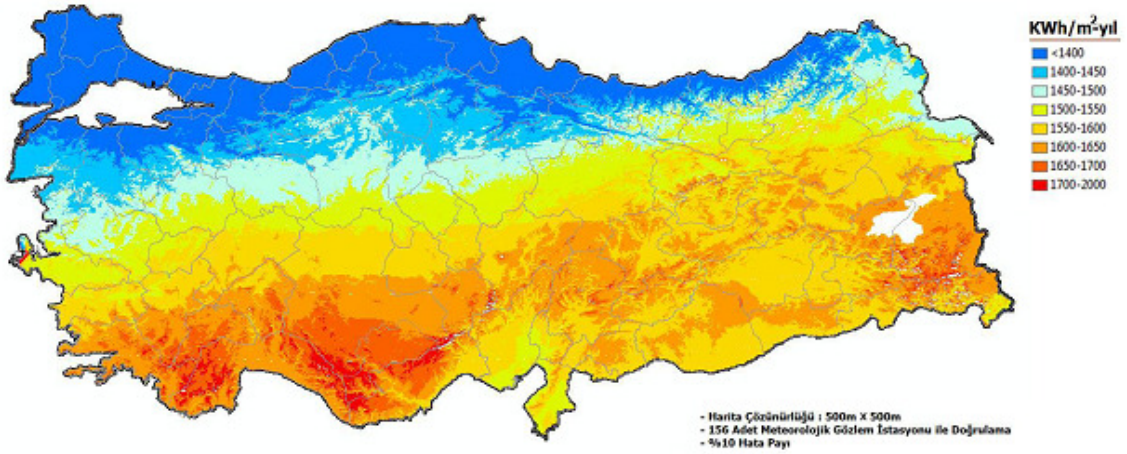
Güneydoğu Anadolu Bölgesi Türkiye'nin en fazla güneş alan bölgesidir. Güneş enerjisi potansiyeli ve güneşlenme süresi değerlerinin bölgelere göre dağılımı Çizelge 2.5'de verilmiştir (EİE, 2007). Ancak, bu değerlerin Türkiye'nin gerçek potansiyelinden daha az olduğu, daha sonra yapılan çalışmalar ile anlaşılmıştır. Bu durumun nedenleri arasında, öncelikle DMİ'nin güneş enerjisi ölçümlerini, enerji amaçlı değil tarımsal klimatoloji amaçlı ölçmüş olması, kullanılan cihazların hassasiyetinin düşük olması ve zamanla istasyonların şehir içinde kalması yer almaktadır. EİE ve DMİ'nin devam etmekte olan araştırmaları sonucunda gerçek potansiyelin daha fazla çıkması beklenmektedir.

Çizelge 2.5 Türkiye'nin toplam güneş enerjisi potansiyelinin bölgelere göre dağılımı

Bölge	Toplam güneş enerjisi kWh/m <sup>2</sup> -yıl	Güneşlenme süresi (Saat/yıl)
Güneydoğu Anadolu	1460	2993
Akdeniz	1390	2956
Doğu Anadolu	1365	2664
İç Anadolu	1314	2628
Ege	1304	2738
Marmara	1168	2409
Karadeniz	1120	1971

Türkiye'nin yıllık ışınım dağılımı Şekil 2.6'da görülmektedir. Haritadan anlaşılacağı üzere güney bölgelerimizin güneş alma açısı kuzey bölgelerimize göre daha fazladır.

### TÜRKİYE GÜNEŞ ENERJİSİ POTANSİYELİ ATLASI (GEPA)



Şekil 2.6 Türkiye yıllık ışınım dağılımı

## 2.4 Güneş Enerjisi Kullanım Alanları

Günümüzde dünyanın her yerinde kullanılan güneş pili sistemlerine örnek olarak hesap makineleri, deniz fenerleri, uyarı ve sinyalizasyon sistemleri, bina iç ve dış aydınlatması, uzay çalışmaları, haberleşme sistemleri, su pompaları, orman gözetleme kuleleri ve küçük tip el aletleri verilebilir.

### 2.4.1 Su Pompalama Sistemleri

Genel olarak güneş pili pompaları dizel pompalarla karşılaştırıldığında, küçük yerlere su sağlamada 3kW, sulamada ise 1kW civarında güç gerektiren uygulamalarda güneş pili ile çalışan pompaların daha ekonomik olduğu bilinmektedir (Markvart, 1994).

Şekil 2.7'de küçük ölçekli zirai sulamada kullanılabilecek su pompalama sistemi görülmektedir. Sistemde 616 Wp gücünde güneş pili, inverter ve dalgıç pompa bulunmaktadır. Atatürk Orman Çiftliğinde kurularak 2 yıl işletilmiş olan bu sistem bir kuyudan 7 m derinliğe daldırılan dalgıç pompa yardımıyla yılda yaklaşık 11000 m<sup>3</sup> su pompalamıştır. Bu sistem şebekeden uzak yerlerde dizel motor pompalarıyla ekonomik olarak rekabet edebilmektedir (EİE, 2010)



Şekil 2.7 Güneş pili su pompalama sistemi

### 2.4.2 Haberleşme Sistemleri

Güneş pili sistemlerinin yaygın olarak kullanıldığı bir alandır. Bu sistemlerde kullanılan güç kapasiteye göre birkaç watt ile birkaç kilowatt arasında değişebilmektedir. Haberleşme donanımı için güneş pili sistemleri çok idealdir. Çünkü güneş pilleriyle şarj edilmiş aküler DC gerilim sağlayıp değişen yükleri kolayca karşılayabilmektedir (Ural, 2007).



Haberleşme uygulamalarında, her 5 kWh günlük kullanım için şebekeden 1 km uzaklıkta bir bölgede güneş pili sistemlerin uygulanması makul olacaktır ( Al-Ismaily ve Probert, 1998 ).

#### 2.4.3 Katodik Koruma

Petrol boru hatlarına korozyon büyük zararlar vermektedir. Korozyonu önlemede özellikle güneş pili sistemleri kullanılmaktadır. Bunun nedenlerinden biri boru hatlarının yerleşime uzak bölgelerden geçmesi ve bu alanlara enerji iletiminin zorluğudur. Bir başka neden de katodik koruma tekniğinin DC gerilim kaynağı gerektirmesidir.

#### 2.4.4 Aydınlatma Sistemleri

Gün boyunca güneş enerjisinden üretilen elektrik ile akü şarj edilerek, geceleri armatür çalıştırılmaktadır. Şekil 2.8’de güneş pili sistemiyle çalışan yol aydınlatması görülmektedir.



Şekil 2.8 Güneş pili yol aydınlatma sistemi

#### 2.4.5 Binaya Entegre Sistemler

Günümüzde, güneş pili sistemleri yapıların çatı ve cephelerinde özel yapı bileşenleri olarak kullanılabilirler. Çizelge 2.6’da güneş pili sistemlerinin yapılardaki kullanım şekilleri görülmektedir (Altın, 2004).

Çizelge 2.6 Güneş pili sistemlerinin yapıda kullanım şekilleri

Çatıda	Cephede	Farklı Yapı Bölümlerinde
Çatı örtüsü üzerine ek bir strüktür ile	Kaplama malzemesi olarak (duvar önüne)	Giriş sacağı, parapet olarak
Çatı örtüsü olarak (Shingle gibi)	Giydirme cephe şeklinde	Güneş kırıcı olarak

Güneş panellerinin elektriği maksimum verimlilikte üretebilmesi için güneş ışınlarını dik alması gerekmektedir. Bunun için panellerin eğim açısı önemlidir. Genellikle bulunan enlemin derecesi bu eğim için en uygun açıdır. Örneğin İstanbul'un enlem derecesi  $41^\circ$ 'dir. Dolayısıyla İstanbul için en uygun eğim açısı yaklaşık olarak  $41^\circ$  olarak alınabilir. Bunun yanı sıra yönlenme açısı da önemlidir. Kuzey yarımküre için panellerin güneye yönlendirilmesi gerekmektedir ki verim mümkün olduğunca yüksek olsun (Altın, 2004). Şekil 2.9'da çatı örtüsü olarak kullanılan ince film güneş panelleri (Türe, 2008) ve Energyepark West Satheins, Avusturya binasındaki cephe giydirme güneş paneli uygulaması görülmektedir.



(a)



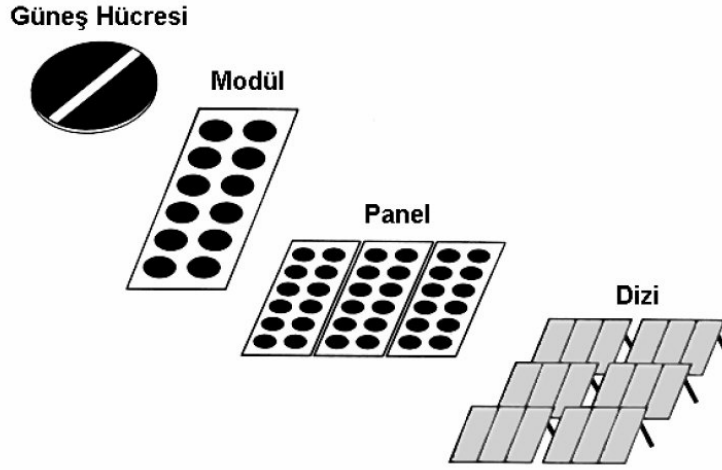
(b)

Şekil 2.9 (a) Çatı örtüsü olarak kullanılan ince film güneş panelleri, (b) Energyepark West, Satheins, Avusturya binasındaki cephe giydirme güneş paneli uygulaması

### 3. GÜNEŞ PİLLERİ

#### 3.1 Giriş

Güneş pilleri, yüzeylerine gelen güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarı iletken maddelerdir. Yüzeyleri dikdörtgen, daire, kare şeklinde olan güneş pillerinin alanları  $100 \text{ cm}^2$  civarında, kalınlıkları ise 0,2-0,4 mm arasındadır. Güneş pilleri fotovoltaiik ilkeye dayalı olarak çalışırlar, yani üzerlerine ışık düştüğü zaman uçlarında elektrik gerilimi oluşur. Güç çıkışını artırmak için çok sayıda güneş pili birbirine paralel ya da seri bağlanarak bir yüzey üzerine monte edilir. Güneş pilinde hareketli parçalar olmadığından teorik ömürleri sonsuzdur. Yüksek miktarlarda güç üretmek için güneş hücreleri Şekil 3.1'de gösterildiği gibi belirli gruplar halinde toplanırlar (Batman, 2001).



Şekil 3.1 Fotovoltaiik gruplar

#### 3.2 Güneş Pillerinin Tarihsel Gelişimi

İlk kez 1839 yılında Becquerel, elektrolit içerisine daldırılmış elektrotlar arasındaki gerilimin, elektrolit üzerine düşen ışığa bağımlı olduğunu gözlemleyerek fotovoltaiik olayını bulmuştur. Katılarda benzer olay ilk olarak selenyum kristalleri üzerinde 1876 yılında G.W. Adams ve R.A. Day tarafından gerçekleştirilmiştir. Daha sonraki yıllarda çalışmalar bakır oksit ve selenyuma dayalı foto diyotların, yaygın olarak fotoğrafçılık alanında ışık metrelerinde kullanılmasını beraberinde getirmiştir. 1914 yılında fotovoltaiik diyotların verimliliği %1 değerine ulaşmış ise de gerçek anlamda güneş enerjisini %6 verimlilikle elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaiik diyotlar ilk kez 1954 yılında Chapin, Fuller ve Pearson tarafından

silikon kristali üzerine gerçekleştirilmiştir. Fotovoltaik güç sistemleri için dönüm noktası olarak kabul edilen bu tarihi izleyen yıllarda araştırmalar ve ilk tasarımlar uzay araçlarında kullanılacak güç sistemleri için yapılmıştır.

1973 yılındaki petrol krizi ile güneş pillerine yönelik araştırma ve geliştirme çabalarına daha fazla önem verilmiştir. Güneş enerjisini elektrik enerjisine çevirmenin, basit, çevre dostu olan fotovoltaik sistemlerin araştırılması ve geliştirilmesi, maliyetinin düşürülerek yaygınlaştırılması misyonu uzun yıllar üniversitelerin yüklendiği ve yürüttüğü bir görev olmuş ve bu yüzden kamuoyunda hep laboratuarda kalan bir çalışma olarak kalmıştır. Ancak son yirmi yılda dünya genelinde çevre konusunda duyarlılığın artmasına bağlı olarak kamuoyundan gelen baskı, çok uluslu şirketleri fosile dayalı olmayan yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları konusunda çalışmalar yapmaya zorlamışlardır. Büyük şirketlerin devreye girmesiyle güneş pilleri konusundaki teknolojik gelişmeler ve güç sistemlerine artan talep ve buna bağlı olarak büyüyen üretim kapasitesi, maliyetlerin hızla düşmesini de beraberinde getirmiştir. Alışıla gelmiş elektrik enerjisi üretim yöntemleriyle karşılaştırıldığında çok pahalı olarak değerlendirilen fotovoltaik güç sistemleri, yakın gelecekte güç üretimine katkı sağlayabilecek sistemler olarak değerlendirilmektedir (EİE, 2007)

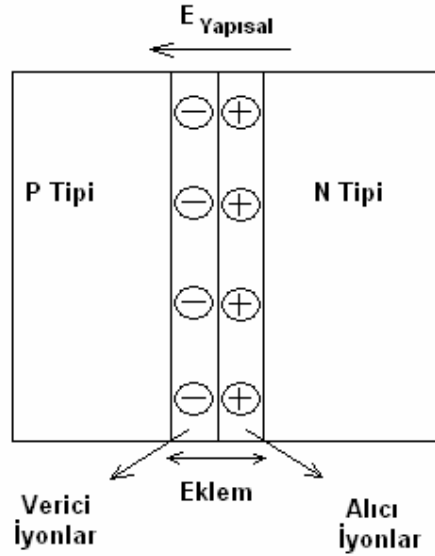
### 3.3 Güneş Pillerinin Yapısı ve Çalışma Prensibi

Diyot, transistor gibi güneş pilleri de yarı iletken maddelerden yapılırlar. İyi bilinen diyot denklemi, gölgeli güneş pilinin çalışmasıyla tanımlanır. Güneş pili yapımında genelde silisyum, galyum arsenik, kadmiyum tellür gibi yarı iletkenlik özelliğine sahip maddeler kullanılır.

Yarı iletken maddelerin güneş pili olarak kullanılabilmesi için n ya da p tipi katkılanmaları gerekir. Katkılama, saf yarı iletken eriyik içerisine istenilen katkı maddelerinin kontrollü olarak eklenmesiyle yapılır. Yarı iletkenin n ya da p tipi olması katkı maddesine bağlıdır. Silisyum ve germanyum gibi atomlara, son yörüngesindeki atom sayısı 3 olan başka atom katkılanırsa p tipi yarı iletken, son yörüngesindeki atom sayısı 5 olan başka atom katkılanırsa n tipi yarı iletken elde edilir.

N tipi yarı iletkende elektronlar, p tipi yarı iletkende boşluklar çoğunluk taşıyıcısıdır. Her iki madde de bir araya gelmeden önce elektriksel bakımdan nötrdür. P-n jonksiyon bölgesi oluştuğu zaman n tipindeki çoğunluk taşıyıcısı olan elektronlar, p tipine doğru, akım oluştururlar. Bu olay yük dengesi oluşuncaya kadar devam eder (Şekil 3.2). Jonksiyon

bölgesinde p bölgesi tarafında negatif, n bölgesi tarafında pozitif yük birikir. Bu bölgede oluşan elektrik alana yapısal elektrik alan denir.

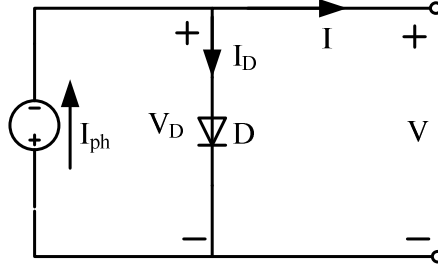


Şekil 3.2 P-n jonksiyonunun oluşması

Yarı iletkenler yasak enerji aralığı tarafından ayrılan iki enerji bandından oluşur (Markvart, 1994). Bu bantlara valans ve iletkenlik bantları adı verilir. Yarı iletkenlerde valans bandı tamamen dolu ve iletkenlik bandı tamamen boştur. Bundan dolayı iletken halde bulunmazlar. Enerjisi yeterli bir foton p-n jonksiyonuna düşürüldüğü zaman, enerjisini valans bandındaki bir elektrona vererek, elektronun iletkenlik bandına çıkmasını sağlar. Böylece, elektron-boşluk çifti oluşur. Bu çiftler, jonksiyondaki elektrik alan tarafından birbirinden ayrılır ve güneş pilinin uçlarında yararlı bir güç çıkışı oluştururlar. Bu döngü ışık olduğu sürece devam eder.

### 3.3.1 Güneş Pillerinin Elektriksel Modelleri

Güneş pillerinin basitleştirilmiş elektriksel eşdeğer modeli Şekil 3.3'de görülmektedir. Bu eşdeğer model, akım kaynağı ve buna paralel bağlı bir ideal diyottan oluşur. Burada foton akımı, akım kaynağı olarak sembolize edilmiştir ve güneş ışınımıyla doğru orantılıdır (Araujo vd., 2001). Güneş pilinin gövdesi yarı iletken madde olduğu için diyotla modellenmiştir.



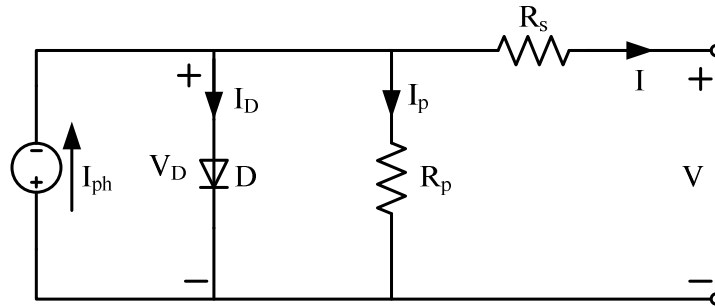
Şekil 3.3 Güneş pili basitleştirilmiş elektriksel eşdeğer modeli

Basitleştirilmiş elektriksel eşdeğer model, Kirchoff'un -bir düğüm noktasına gelen ve giden akımların toplamı sıfıra eşittir- akım yasası ile çözümlenirse,

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_s \cdot \left( e^{\frac{V}{m \cdot V_T}} - 1 \right) \quad (3.1)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifade de,  $I$  çıkış akımını,  $V$  çıkış gerilimini,  $I_{ph}$  foton akımını,  $I_D$  diyot akımını,  $I_s$  diyot ters doyum akımını,  $m$  diyot ideal faktörünü,  $V_T$  ısıya bağlı gerilimi ifade etmektedir.  $V_T$ , 25°C standart sıcaklıkta 25,7 mV değerini almaktadır (Omole, 2006).

Gerçek güneş pilinde, kaçak akımlar ve gerilim düşümleri meydana gelmektedir. Bu kayıplar basitleştirilmiş modelde gösterilemediğinden tek diyotlu model geliştirilmiştir. Şekil 3.4'te görülen tek diyotlu modelde, güneş pilinde meydana gelen kaçak akımlar  $R_p$ , gerilim düşümleri  $R_s$  ile temsil edilmektedir.



Şekil 3.4 Güneş pili tek diyotlu elektriksel eşdeğer modeli

Kirchoff akım yasası ile devre çözümlenirse,

$$I_{ph} - I_D - I_p - I = 0 \quad (3.2)$$

$$I_p = \frac{V_D}{R_p} = \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (3.3)$$

$$I_{ph} - I_s \cdot \left( e^{\frac{V + I \cdot R_s}{m \cdot V_T}} - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} - I = 0 \quad (3.4)$$

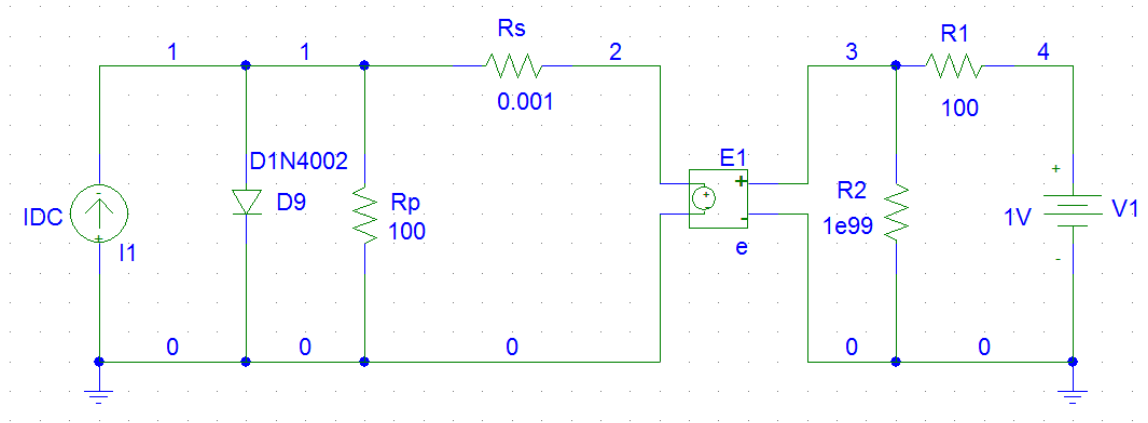
ifadesi elde edilir. Burada gerilim değeri sıfıra eşit alınır ve  $R_s$  direnci ihmal edilirse,

$$I_{sc} = I_{ph} \quad (3.5)$$

kısa devre akımı elde edilir. Hücrede açık devre koşulları uygulanarak çıkış akımı ve  $R_s$  direncide sıfır kabul edilirse

$$V_{oc} = V_T \times \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \approx V_T \times \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s}\right) \quad (3.6)$$

açık devre gerilimi elde edilir. Yukarıdaki ifadelerden kısa devre akımının doğrudan ışınımla orantılı olduğu ve açık devre geriliminin ışınımın logaritmik bir fonksiyon şeklinde değişim gösterdiği anlaşılmaktadır. Şekil 3.5'te güneş pilinin pspice eşdeğer modeli görülmektedir.



Şekil 3.5 Güneş pili pspice eşdeğer modeli (Nema vd., 2009)

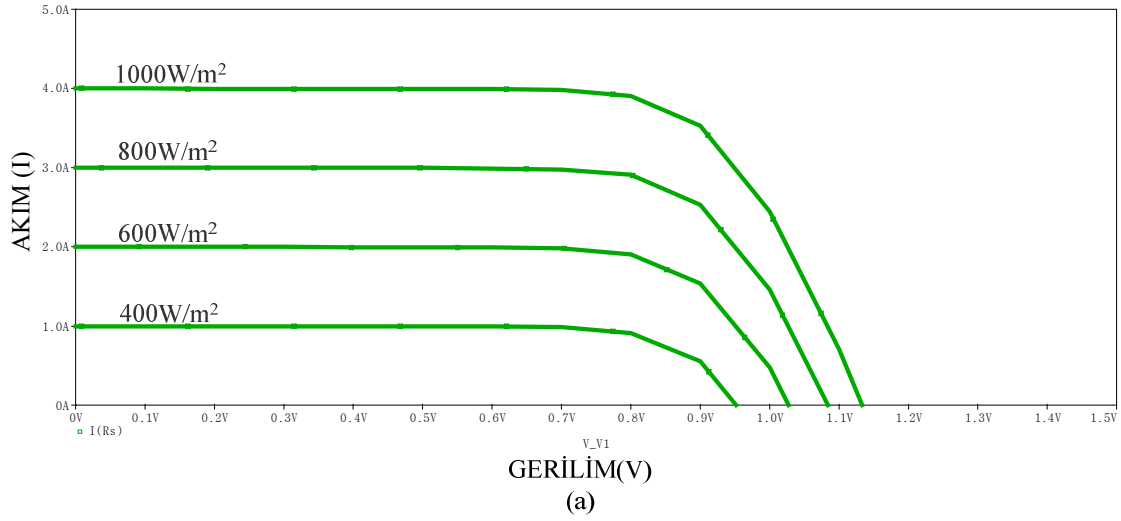
Herhangi bir andaki pil akımıyla pil gerilimi çarpılarak pil gücü belirlenir. Güneş pilinin maksimum gücü üretecek şekilde çalışması istenir. Güneş pillinin I-V karakteristiği üstünde maksimum gücü ürettiği bir nokta vardır. Maksimum güç noktasındaki gerilim  $V_{mpp}$  ve akım  $I_{mpp}$  ile gösterilirse maksimum güç,

$$P_{\max} = I_{mpp} \times V_{mpp} = FF \times I_{sc} \times V_{oc} \quad (3.7)$$

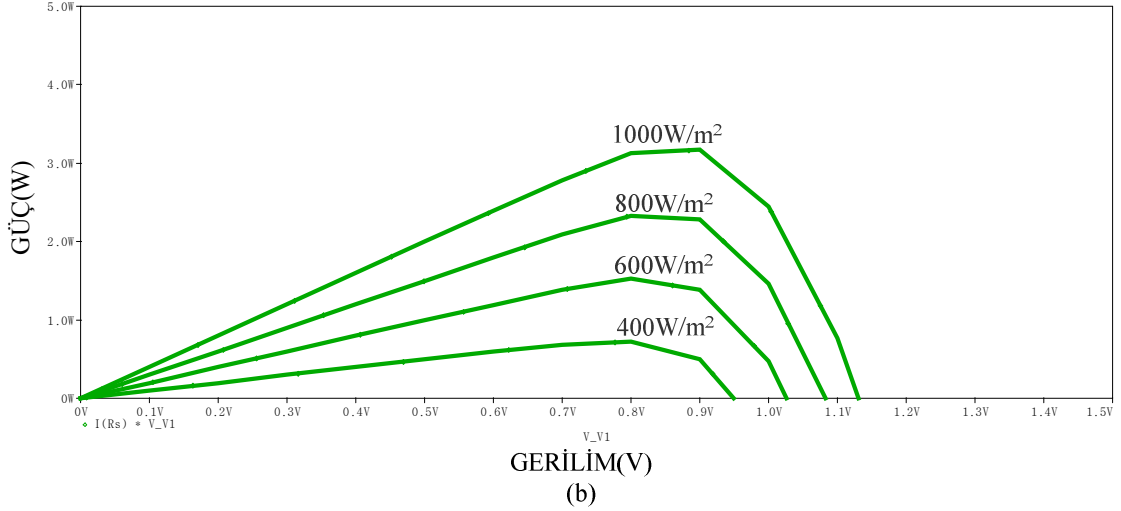
olarak elde edilir. FF dolum faktörüdür ve birime sahip değildir. Bu faktör  $P_{\max}$  ile  $I_{sc}V_{oc}$  arasındaki orandır (Castaner ve Silvestre, 2002). Dolum faktörü güneş piline gelen maksimum gücün ne kadarının  $I_{sc}V_{oc}$  için harcandığı ile ilgilidir. Küçük olan iç dirençlerde daha büyük dolum faktörü elde edilir (Nizam, 2004).

### 3.3.2 Güneş Pilinin Karakteristikleri

Güneş pilinin çeşitli karakteristikleri pspice kullanılarak modellenmiştir. Güneş pillerinin elektrik karakteristiğini etkileyen iki önemli faktör ışınım şiddeti ve sıcaklıktır. Şekil 3.6'da sabit sıcaklıkta güneş pilinin ışınımına bağlı I-V ve P-V karakteristikleri görülmektedir. Işınım şiddetindeki artış-azalış, pilin çıkış akımıyla doğru orantılı, gerilimiyle logaritmik olarak değişme göstermektedir. Akımdaki artış gerilimdekine oranla daha büyüktür. Ayrıca ışınım şiddeti arttıkça çıkış gücünde arttığı anlaşılmaktadır.

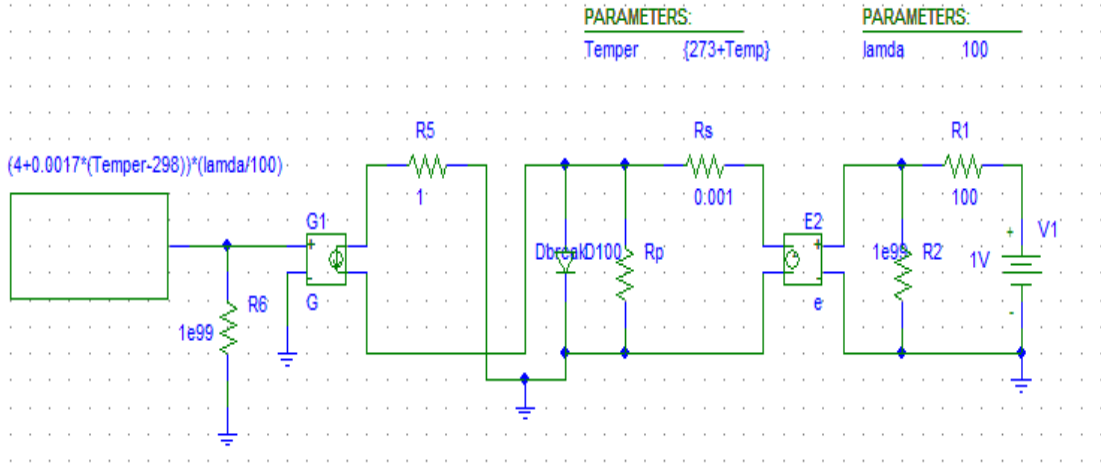




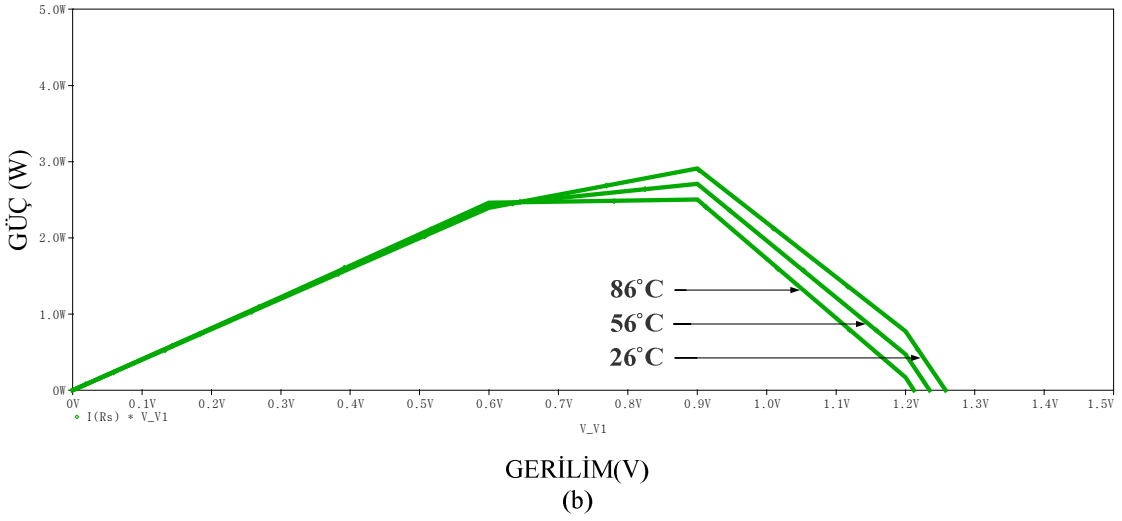
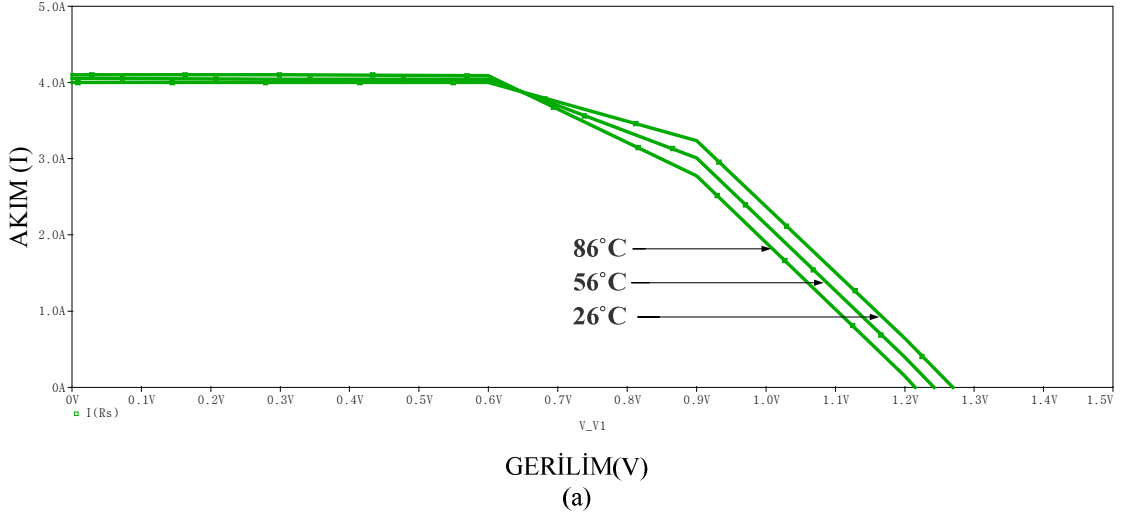


Şekil 3.6 Güneş pilinin ışınımına bağlı (a) I-V karakteristiği ve (b) P-V karakteristiği

Şekil 3.7’de farklı sıcaklık değerleri için güneş pili pspice modeli ve Şekil 3.8’de sabit ışınımında I-V ve P-V karakteristikleri görülmektedir. Çalışma sıcaklığı yükseldikçe çıkış geriliminde azalma olmaktadır. Çünkü sıcaklık artığında, yarı iletken maddedeki elektron-boşluk hareket kabiliyeti önemli ölçüde azalmaktadır. Bu yüzden çıkış gerilimi de azalmaktadır. Sıcaklığın artmasından akımda etkilenmektedir. Ancak asıl etki gerilimde meydana gelmektedir. Benzer etki çıkış gücünde de görülmektedir.



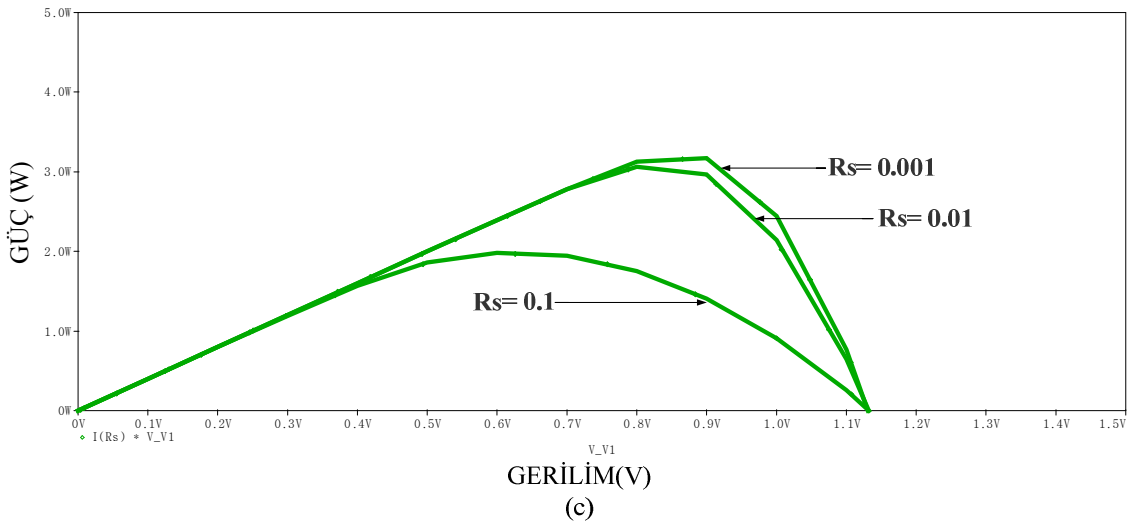
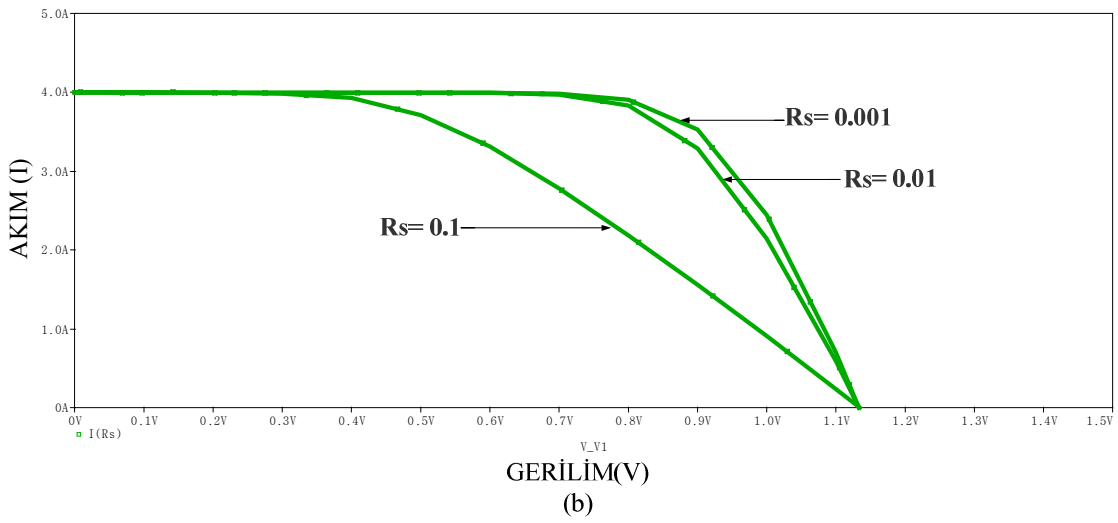
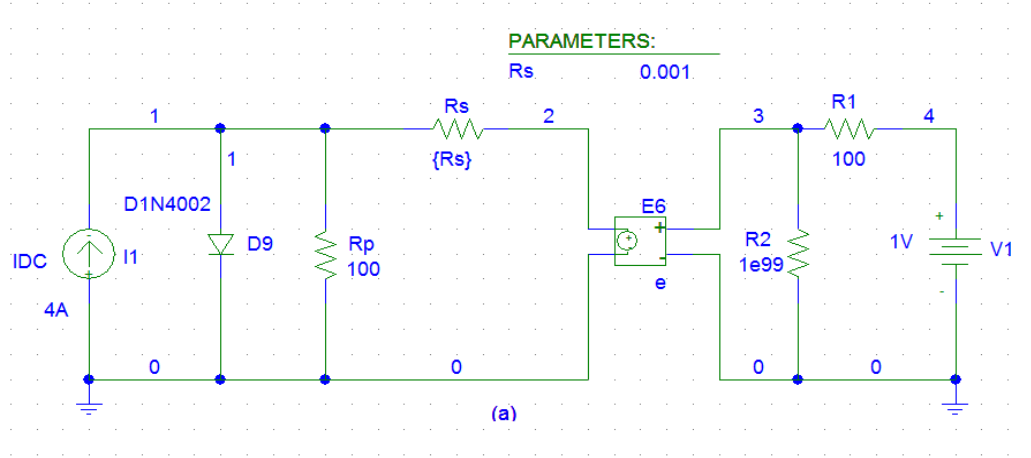
Şekil 3.7 Farklı sıcaklık değerleri için güneş pili pspice modeli (Nema vd., 2009)



Şekil 3.8 Güneş pilinin sıcaklığa bağlı (a) I-V karakteristiği ve (b) P-V karakteristiği

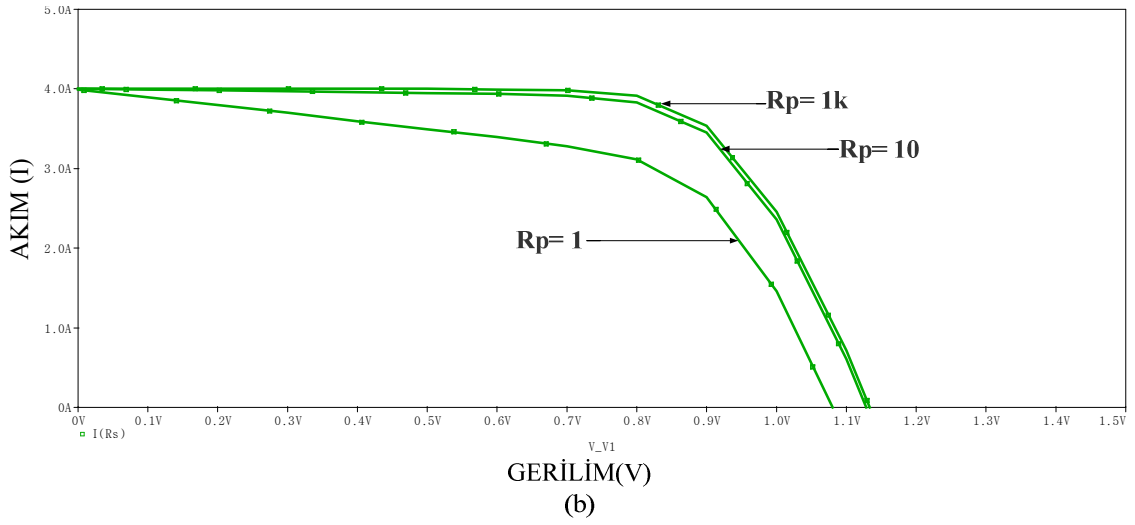
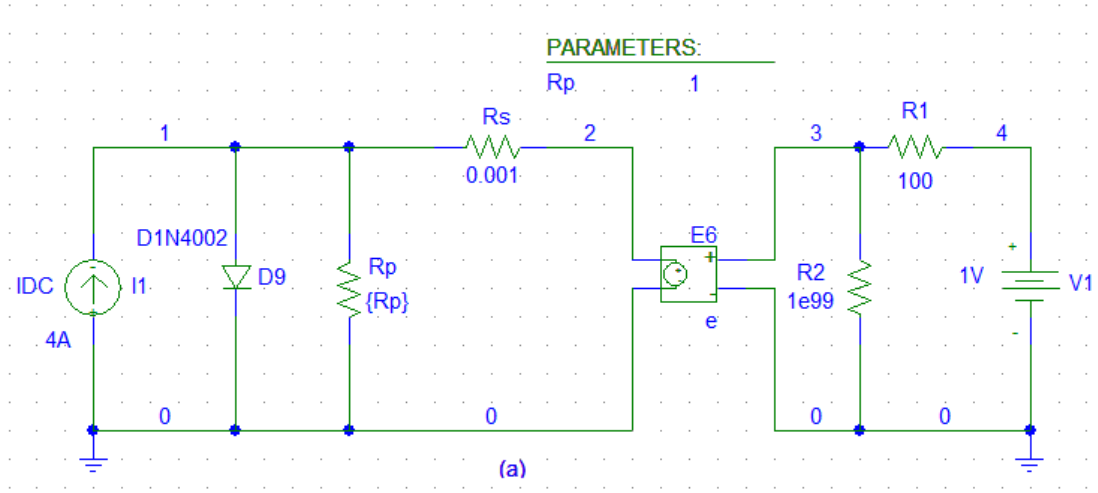
Sonuç olarak karakteristikler incelendiğinde güneş pilinin yüksek ışınım şiddeti ve düşük ortam sıcaklığında daha verimli çalışabileceği anlaşılmaktadır.

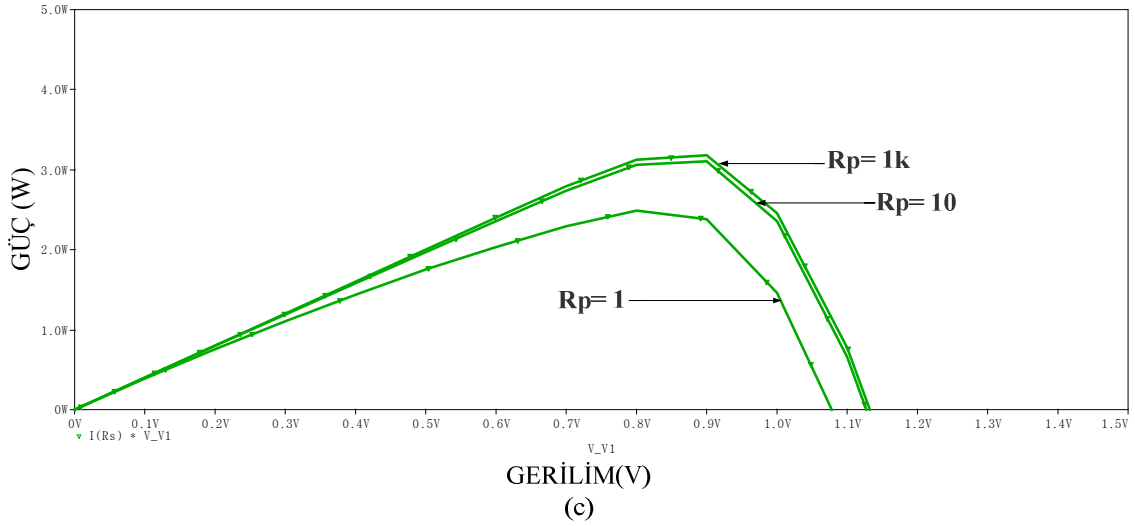
Şekil 3.9'de seri direncin farklı değerleri için güneş pilinin pspice modeli, I-V karakteristiği ve P-V karakteristiği görülmektedir. Güneş pilinde seri direnç değeri çıkış gücünü ve dolun faktörünü doğrudan etkilemektedir. Seri direnç arttıkça çıkış gücünün azaldığı görülmektedir.



Şekil 3.9 Güneş pilinin  $R_s$ 'ye bağlı (a) pspice modeli, (b) I-V karakteristiği ve (c) P-V karakteristiği

Şekil 3.10'da paralel direncin farklı değerleri için güneş pilinin pspice modeli, I-V karakteristiği ve P-V karakteristiği görülmektedir. Güneş pilinde paralel direnç değeri açık devre gerilimini doğrudan etkilemektedir. İdeal bir devrede paralel direnç sonsuz kabul edilir.

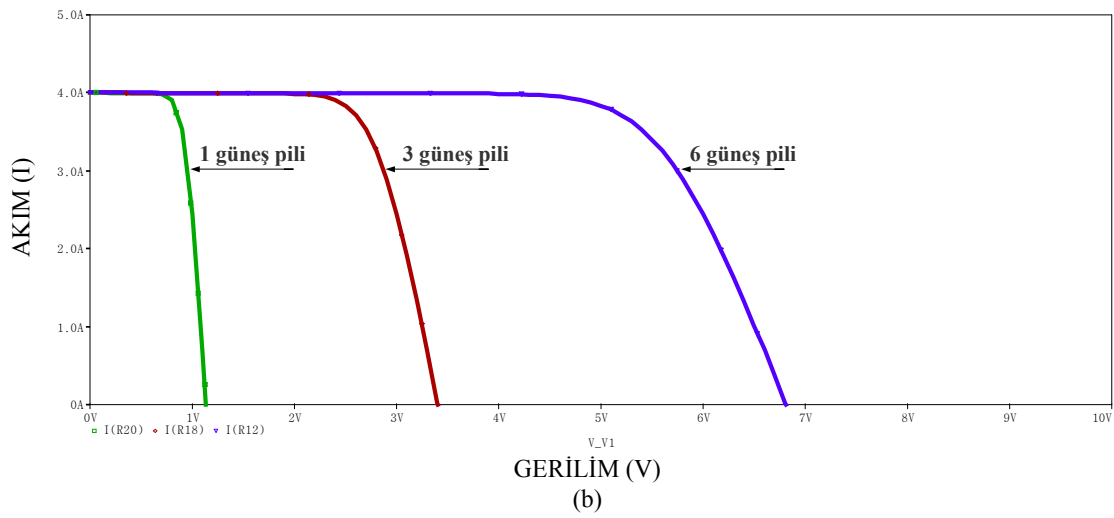
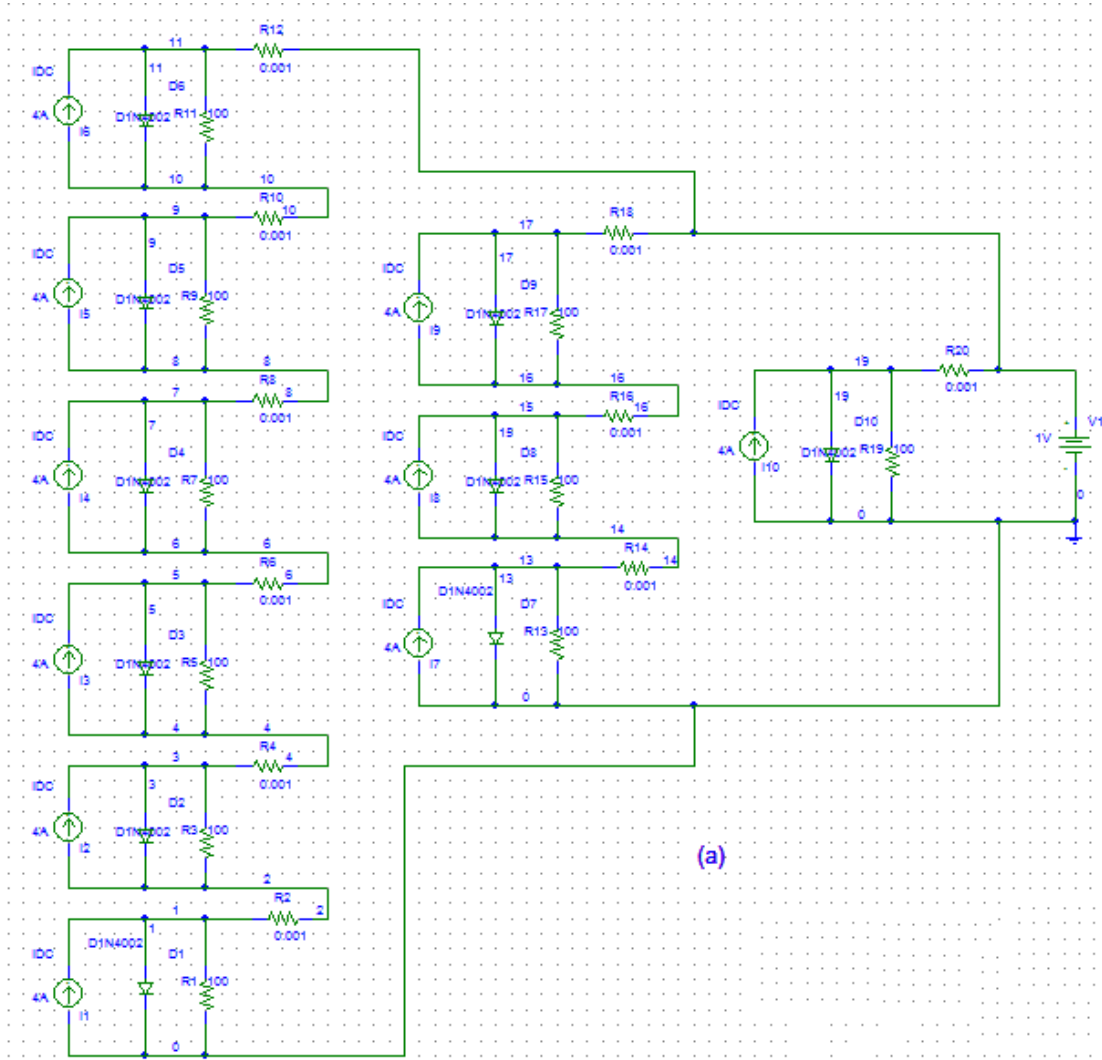




Şekil 3.10 Güneş pilinin  $R_p$ 'ye bağlı (a) pspice modeli, (b) I-V karakteristiği ve (c) P-V karakteristiği

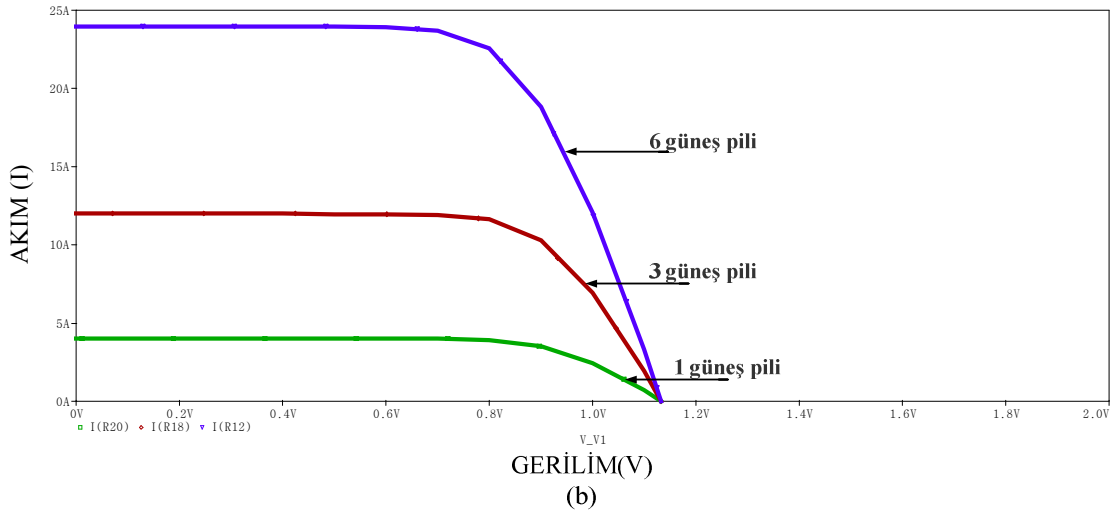
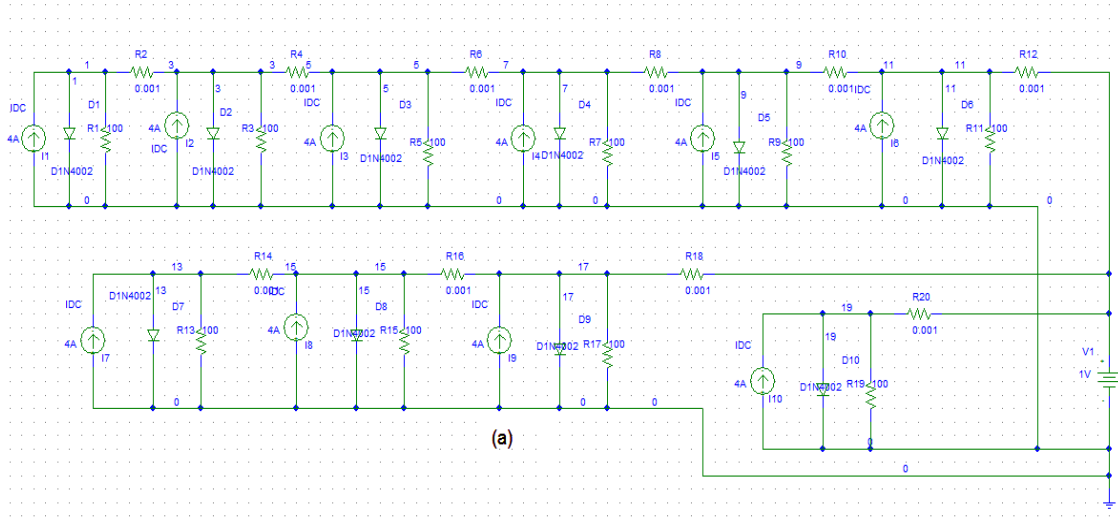
### 3.3.3 Güneş Pillerinin Bağlanması

Güneş pilleri güç çıkışını artırmak için birbirine paralel ya da seri olarak bağlanır. Bu yapıya güneş pili modülü denir. Tipik bir silisyum güneş pili, 0.5 volt kadar elektrik üretebilir. Güneş pilleri daha yüksek gerilim vermesi için seri, daha yüksek akım vermesi için paralel olarak bağlanırlar. Genellikle, 30-36 adet güneş pili, 15-17 voltluk bir çıkış gücü vermek için birlikte bağlanabilir, ki bu voltaj değeri de, 12 voltluk bir aküyü şarj etmek için yeterlidir. Modüllerin birbirine bağlanması ile paneller oluşur. Her modül, paralel veya seri bağlanabilmesine olanak sağlayacak bağlantı kutusuyla birlikte dizayn edilmektedir (Partain, 1995). Şekil 3.11'de güneş pillerinin seri bağlantı pspice modeli ve I-V karakteristiği görülmektedir.



Şekil 3.11 Güneş pillerinin seri bağlantı (a) pspice modeli, (b) I-V karakteristiği

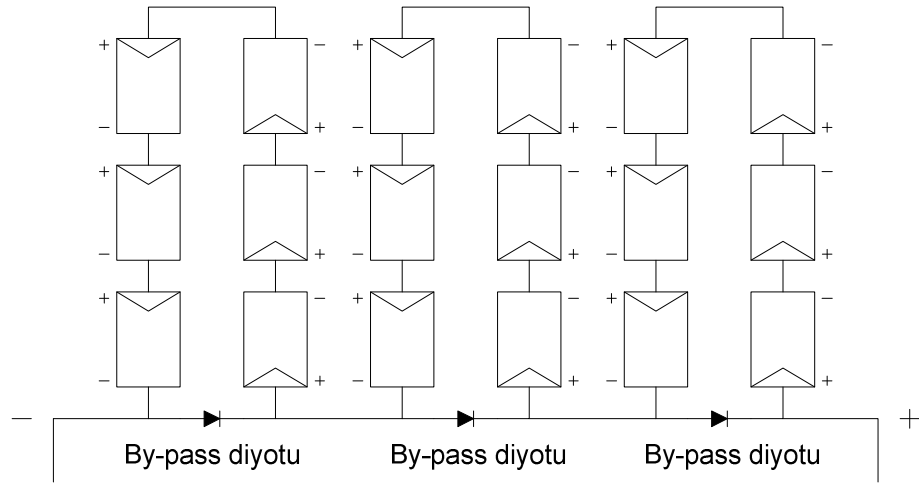
Şekil 3.11’de güneş pillerinin seri bağlanarak çıkış gerilimlerinin arttığı görülmektedir. Şekil 3.12’de güneş pillerinin paralel bağlantı pspice modeli ve I-V karakteristiği görülmektedir.



Şekil 3.12 Güneş pillerinin paralel bağlantı (a) pspice modeli, (b) I-V karakteristiği

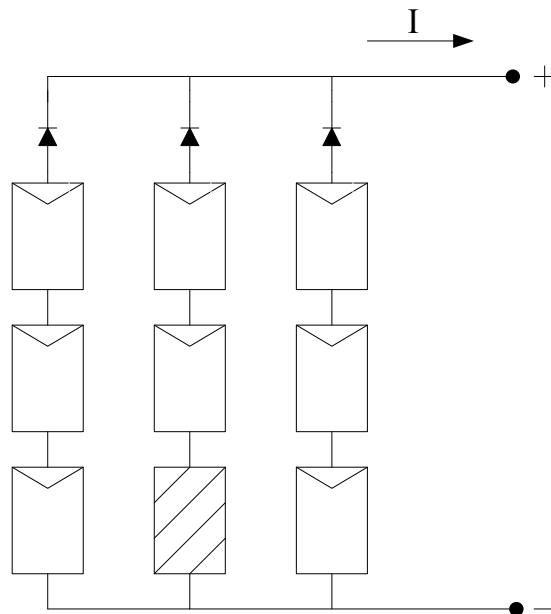
Şekil 3.12’de güneş pillerinin paralel bağlanarak çıkış akımlarının arttığı görülmektedir.

Pratikte güneş modüllerindeki bütün hücreler aynı güneş ışınımını almadıklarında yani gölgelendiklerinde güneş modülü çıkış geriliminde ciddi miktarlarda azalma olur. Bu uyumsuzluk kayıpları by-pass diyotları tarafından azaltılmaktadır. By-pass diyotları, gölgelenme sonucu oluşan noktasal ısınmalar (hot spot) yüzünden modülün zarar görmesini engellemektedirler. Bu diyotlar, modüllere paralel olarak bağlanırlar ve gölge etkisi altında aktif hale gelirler (Şekil 3.13).



Şekil 3.13 By-pass diyotlarının kullanımı (Lindgren, 2002)

Güneş pili sistemlerinde, geceleri ya da güneşin olmadığı zamanlarda akımın modüllere bağlı bir bataryadan tekrar modüllere dönmesini engellemek amacıyla bloklama diyotları kullanılır. Çünkü modüller karanlıkta sızıntı akımları çok yüksek olan bir diyot gibi davranarak gece boyunca aküleri boşaltırlar. Bloklama diyotları, bu istenmeyen yöndeki akımın akışını engellemek için devreye seri olarak iletim yönünde bağlanırlar (Şekil 3.14). Bununla birlikte bloklama diyotları güneş pili sistemlerinde 0.5-0.7 V arasında gerilim düşümü meydana getirmektedirler.



Şekil 3.14 Bloklama diyotlarının kullanımı (Tanrıöven, 2009)



### 3.4 Güneş Pillerindeki Kayıplar

Güneş pilleri, kayıpları yüzünden daha düşük verimle çalışmaktadır. Güneş pillerinde ilk çalışma anından başlayarak görülen kayıplar aşağıdaki gibidir:

- Elektriksel kayıplar,
- Işıksal kayıplar,
- Ara yüzey kayıpları.

#### 3.4.1 Elektriksel Kayıplar

Akım ve gerilim kayıplarından oluşmaktadır. Toplanıp çoğunluk taşıyıcılarına çevrilemeyen azınlık taşıyıcıları, akım kayıplarını belirler. Gerilim kayıpları, açık devre geriliminin beklenen değerinin altına bir düşüş olarak tanımlanmaktadır. Seri ve paralel direnç kayıpları ile zayıf diyot karakteristikleri, elde edilecek akım gerilim değerlerini küçültmektedir (Özgöçmen, 2007).

#### 3.4.2 Işıksal Kayıplar

Güneş pillerinde üretilen akım değeri, üretilen azınlık taşıyıcıları ve soğurulan güneş ışığı fotonlarının sayısı ile belirlenir. Işıksal kayıplar (JL) değerinde azalmalara yol açmaktadır. Bu kayıplar, her tabakada gerçekleşen yansıma kayıpları ile ara yüzeylerde görülen dış soğurulma kayıpları olarak iki kısımda incelenmektedir (Özgöçmen, 2007).

#### 3.4.3 Ara Yüzey Kayıpları

Güneş pillerinde üretilen azınlık taşıyıcılarının kaybı pek çok yolla gerçekleşebilir. Hacim içinde yeniden birleşme kayıpları, uyarılan taşıyıcıların sonlu ömürlerinden kaynaklanır. Bu nedenle ortaya çıkan akım kaybı, yayılım uzaklıklarıyla soğurucu kalınlığı arasındaki orana bağlıdır. Soğurucu kalınlığının aynı zamanda soğurmaya en iyi hale getirmek üzere seçilmesi gerektiğinden, ışıksal ve elektriksel gereksinimler arasında bir uzlaşma sağlanmalıdır. İyi tasarlanmış güneş pillerinde hacim içi yeniden birleşme kayıpları %5 ile %20 arasında değişir. Yüzey yeniden birleşmesi, bir malzemedeki her kesitin yeni elektronik koşullar yaratmasından kaynaklanmaktadır. Işınım ile üretilen ve yüzeye doğru yayınıma uğrayan taşıyıcılar, yüzey etkilerini önleyici özel önlemler alınmadığı ya da taşıyıcıların yüzeye ulaşmaları engellendiği zaman, yüzeyde yitirilirler. Yüzeyde bir oksit tabakanın oluşturulması, genellikle, yüzey koşullarının etkisini ve bundan dolayı da taşıyıcı kaybını

azaltır. Yüzey yakınlarına uygulanan homojen olmayan bir katıştırma işlemi, bir iç elektrik alanı oluşumuna yol açarak, azınlık taşıyıcıların yüzeyden uzaklaştırılmasına ve akım kayıplarının azaltılmasına neden olur. Yüzeydeki bu yeniden birleşme kaybı en iyileştirilmiş güneş pillerinde %0-5 arasında değişim göstermektedir (Özgöçmen, 2007).

Kristal sınırları iç yüzeyler gibi davranabildiğinden, serbest bir yüzey ölçüsünde azınlık taşıyıcı kaybına neden olabilirler. Kristal sınırlarında pürüzler çok daha etkin olduğundan yapılacak bir katıştırma işlemi azınlık taşıyıcılarını uzaklaştıracak ve akım kayıplarını önlemede başarılı olacaktır (Özgöçmen, 2007).

#### **3.4.4 Açık Devre Gerilim Kayıpları**

Homojen eklemler, heterojen eklemler ve schottky açık devre gerilimi ya hacim içi yeniden birleşme ömrü, ya da ara yüzey yeniden birleşme hızları ile denetlenir. Açık devre gerilimini kontrol eden ve etkileyen ek parametreler bant aralığı ve eklemin n ve p taraflarının katıştırılma seviyeleridir. Açık devre gerilim kayıpları %4 ile %50 arasında değişir (Özgöçmen, 2007).

#### **3.4.5 Direnç Kayıpları**

Seri direnç ve paralel iletkenlik güneş pillerinde arzu edilmeyen özelliklerdir. Paralel direnç değeri açık -devre gerilimi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. İdeal bir güneş pilinde paralel direnç sonsuza yakın olmalıdır. Bakır Sülfür/Kadmiyum Sülfür güneş pillerinde alın ızgara, Kadmiyum Sülfür tabakasına kısmi kontak yaparak paralel bir iletkenlik oluşturur. Güneş pillerinde paralel iletkenlik ve seri direnç kayıpları %0-%10 mertebesindedir (Özgöçmen, 2007).

#### **3.4.6 Verim Kaybı**

Güneş pillerinde maliyetin düşürülebilmesi, pil ömrünün uzun olması ile mümkündür. Günümüzde güneş pillerinin ömrüne ilişkin belirsizlikler vardır. Ancak genellikle, 20 yıllık bir süre için güneş pili veriminde %10 ile %20 arası düşüşler tasarımcı ve imalatçıların hedefi olmaktadır. Güneş pillerinin çıkış gücündeki azalmanın kolayca anlaşılabilen birkaç nedeni vardır. Pilin dış yüzeyinde, güneş ışınımının gelişini engelleyen toz ve pisliklerin birikmesi bu nedenler arasındadır (Özgöçmen, 2007).

### 3.5 Güneş Pili Türleri

Güneş pili teknolojisi, kullanılan maddeler ve yapım türleri açısından çok çeşitlidir. Güneş pili yapımı için şu anda kullanılmakta olan bir ondan fazla maddenin yanı sıra, yüzlerce maddenin de üzerinde çalışılmaktadır.

#### 3.5.1 Kristal Silisyum Güneş Pilleri

Silisyum yarı iletken özellikleri tipik olarak gösteren ve güneş pili yapımında en çok kullanılan maddedir ve uzun yıllarda bu konumunu koruyacak gibi görünmektedir. Fotovoltaik özellikleri daha üstün olan başka maddeler de olmakla birlikte, silisyum hem teknolojisinin üstünlüğü nedeniyle hem de ekonomik nedenlerle tercih edilmektedir.

#### 3.5.2 Tek Kristal Silisyum Güneş Pilleri

İlk ticari güneş pillerinde, CHROZALSKİ kristal çekme tekniği ile büyütülen tek kristal yapılı silisyum kullanılmıştır (Şekil 3.15). Güneş pili endüstrisinde hala en çok kullanılan yöntem olan bu teknikte öncelikle ark fırınlarında silisyum oksit çeşitli kimyasal ve termal reaksiyonlardan geçirilerek saf silisyum elde edilir. Daha sonra silisyum eriyiğe çekirdek denen tek kristal yapılı bir silisyum parçası batırılır. Bu çekirdek eriyikten çıkarıldığında soğuyan silisyum eriyik, çekirdeğin üzerine külçe şeklinde yığılmış olur. Bu silisyum külçe olmaz bir keski ile dilimlere ayrılır. Bu, iki aşamada olur. Önce külçe dikdörtgen bloklar şeklinde kesilir. Daha sonra bu bloklar dilimlere ayrılarak pil şeklinde işlenir. Verimleri %15 civarındadır. Yapım sırasında malzeme kaybının çok fazla olması bu pillerin dezavantajıdır.



Şekil 3.15 Tek kristal silisyum güneş pili

### 3.5.3 Yarı Kristal Silisyum Güneş Pilleri

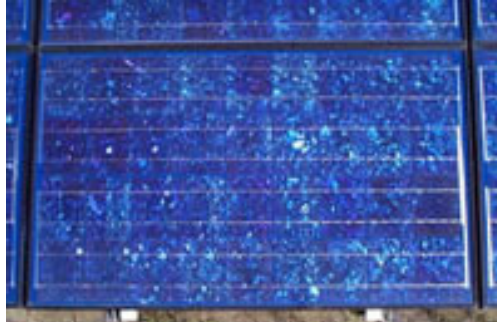
Sıvı silisyumun soğutulmasıyla elde edilen kümelenmiş küçük silisyum kristallerinden oluşur. Bu pillerin verimleri %14 civarında olup, kümelenmiş silisyum taneciklerinin sınırlarındaki kayıplara bağlıdır.

### 3.5.4 Şerit Silisyum Güneş Pilleri

Bu piller, malzeme kaybının azaltılması amacıyla levha halinde silisyum tabakalarından yapılırlar. Çeşitli yöntemlerle elde edilen bu piller, halen geliştirme aşamasındadır. Verimleri laboratuvar şartlarında %13-14 arasındadır.

### 3.5.5 Çok Kristalli Silisyum Güneş Pilleri

Silisyumlu güneş pillerinin üretimindeki enerji ve maliyet tutarını azaltmak için tek kristalli silisyumdan daha düşük kalitede malzeme üretmeye ve kullanmaya yönelik teknikler geliştirilmiştir. Biçme işlemi kaldırılıp doğrudan levha şeklinde çok kristalli silisyum elde edilmiştir (Şekil 3.16). Çok kristalli pillerin üretimi tek kristallilere göre daha ucuz ve kolaydır. Ama verimleri %10 civarında olup tek kristallilere göre daha düşüktür.

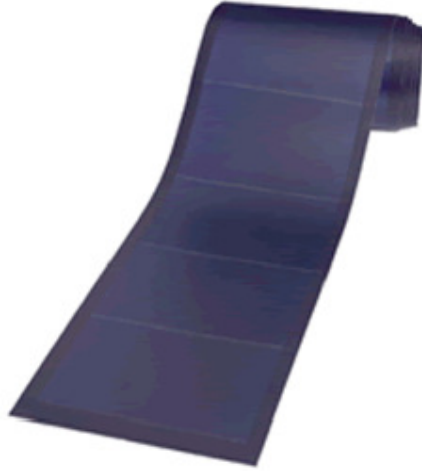


Şekil 3.16 Çok kristal silisyum güneş pili

### 3.5.6 İnce Film Güneş Pilleri

Bu teknikte, absorban özelliği daha iyi olan maddeler kullanılarak daha az kalınlıkta (tek kristalin 1-500'ü kalınlığında) güneş pilleri yapılır. Örneğin amorf silisyum güneş pillerinin absorpsiyon katsayısı kristal silisyum güneş pillerinin katsayısından daha fazladır. Dalga boyu katsayısı 0.7 mikrondan küçük bir bölgedeki güneş radyasyonu 1 mikron kalınlığında amorf silisyum ile absorblanabilirken, kristal silisyumda ise aynı radyasyonu absorblamak için 500 mikron kalınlıkta malzeme kullanılması gerekmektedir. Bu yüzden amorf yapılı güneş

pillerinde daha az malzeme kullanılır ve montaj kolaylığı nedeniyle bir avantaj sağlar.



Şekil 3.17 İnce film güneş pili

### 3.5.7 Amorf Silisyum Güneş Pilleri

Amorf silisyum güneş pilleri (a-Si), ince film güneş pili teknolojisinin en önde gelen örneğidir (Şekil 3.18). İlk yapılan a-Si piller Schottky bariyer yapısında iken, daha sonraları p-i-n yapıları geliştirilmiştir. P-i-n yapısındaki pillerin fabrikasyonu kalay oksitle kaplı iletken bir yüzeyin üzerine çöktürme yöntemi ile yapılır, bu yüzeyin arkası daha sonra metalle kaplanır. Verimleri %5-8 arasındadır. Ancak bu piller, kısa zamanda bozunuma uğrayarak çıkışları azalır.



Şekil 3.18 Amorf silisyum güneş pili

### 3.5.8 Bakır İndiyum Diselenid Güneş Pilleri

Periyodik tablonun birinci, üçüncü ve altıncı grupta yer alan elementlerin üç ya da daha fazlasının bir araya gelmesi ile oluşan bu bileşikte, yarı-iletkenlerin soğurma katsayıları oldukça yüksek olup, yasak enerji aralıkları güneşin spektrumu ile uyuşacak bir şekilde ideal biçimde ayarlanabilir. Bakır indiyum ve selenyumdan yapılan üçlü bileşik yarı-iletkenle başlayan bu grup (CIS) güneş pilleri olarak anılır (Şekil 3.19). Laboratuardaki pillerin verimliliği %18'e kadar ulaşırken, 900 cm<sup>2</sup> yüzey alana sahip modüllerin verimlilikleri %15 civarındadır.



Şekil 3.19 Bakır indiyum diselenid güneş pili

### 3.5.9 Kadmiyum Tellür İnce Film Güneş Pilleri

Periyodik tablonun ikinci grubunda bulunan Kadmiyum elementi ile altıncı grubunda bulunan tellür elementinin bir araya gelmesiyle oluşan (II-VI birleşik yarı-iletkeni kadmiyum tellür) CdTe'nin, oda sıcaklığında yasak enerji aralığı  $E_g=1,5$  eV değeri ile güneş spektrumundan maksimum dönüşümü elde etmek için gerekli olan değere oldukça yakındır. Yüksek soğurma katsayısı yanında, ince film büyütme teknolojisi ile kolayca üretime olanak tanınması, geniş yüzey alanlı güneş pili üretiminde CdTe birleşik yarı iletkeninin öne çıkmasını sağlamıştır.



Şekil 3.20 Kadmiyum tellür güneş pili

Kadmiyum Tellür modülleri basit ve ucuz galvanize işlemlerine yakın bir şekilde üretilmektedir (Şekil 3.20). Amorf-silikonda meydana gelen başlangıç performans düşüklükleri olmadan Kadmiyum tellürün modül verimliliğinin %10'u aşması istenmektedir. Bu modüller Kadmiyum ve yüksek zehirli madde içerdiklerinden üretimleri boyunca sıkı güvenlik önlemleri alınması gerekmektedir. BP şirketine bağlı BP Solar 2002'de Kadmiyum tellür üretimlerini durdurmuştur. Diğer Japon firma Matsushita'da 2002'de Kadmiyum tellür üretimini durdurmuştur. Fakat Amerika'da hala Kadmiyum tellür üretimi mevcuttur.

### 3.5.10 Galyum Arsenit Güneş Pilleri

Bu güne kadar elde edilen en yüksek verime (%24) galyum arsenitten (GaAs) yapılan piller ile ulaşılmıştır (EİE, 1992). Bu madde ile çeşitli türde piller elde edilmekle birlikte, pahalı olduğu için pek yaygın olmayan yoğunlaştırılmış fotovoltaiik üreteçlerle sınırlıdır (Şekil 3.21). Radyasyon zararına karşı çok dirençlidir ve bu sebeple de uzay çalışmalarında sıklıkla tercih edilir. Önemli bir üstünlükleri de verimlerinin sıcaklıkla fazla etkilenmemesidir.



Şekil 3.21 Galyum arsenit güneş pili

### 3.5.11 Güneş Pili Güç Verimliliklerinin Karşılaştırılması

Güneş pillerinin sürekli gelişmelerine bağlı olarak verimliliklerinin özetlendiği çizgilerin geçerlilik süreleri oldukça kısa olmaktadır. Ancak, karşılaştırılmalı bir kaynak olması amacı ile Fraunhofer Enstitüsü tarafından yapılan en yüksek verimlilikleri gösteren özet Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 Güneş pili verimlilikleri (Karamanav, 2007)

Güneş Pili Cinsi	Alan (cm <sup>2</sup> )	Verimlilik (%)	Üretilen Birim
Tek Kristalli Silisyum	4	24	UNSW, Sydney Avustralya
Çok Kristalli Silisyum	21,2	17,4	ISE, Freiburg, Almanya
Amorf Silisyum	1	14,7	United Solar
Cu/In, Ga)Se <sub>2</sub>	0,4	17,7	NREL, USA
CdTe/CdS		15,8	USA
GaAS Tek Kristal	1	23,9	K.Univ, Nijmegen Hollanda

Güneş pili yapımında kullanılan malzemenin rezerv durumları da oldukça önemli değişkenler olarak karşımıza çıkmaktadır. Silisyum, doğada en çok bulunan element olması nedeni ile rezerv konusunda geleceğe yönelik bir sorun bulunmamaktadır. Diğer seçenek malzemeleri oluşturan elementlerin rezerv durumları dünyadaki yıllık üretim ve 500MW güç üretimi için gerekli miktar Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2 Güneş pili yapımında kullanılan maddelerin dünya rezervleri ve üretimi (Karamanav, 2007)

Element	Dünya Rezervleri	Dünya Yıllık Üretimi	500MW Güç İçin Gereken Miktar (Ton)
CD	970000	20000	25
Te	39000	404	28
In	5700	180	25
Se	130000	2000	60
Ga	1000000	35	5



## 4. GÜNEŞ PİLİ SİSTEMLERİ

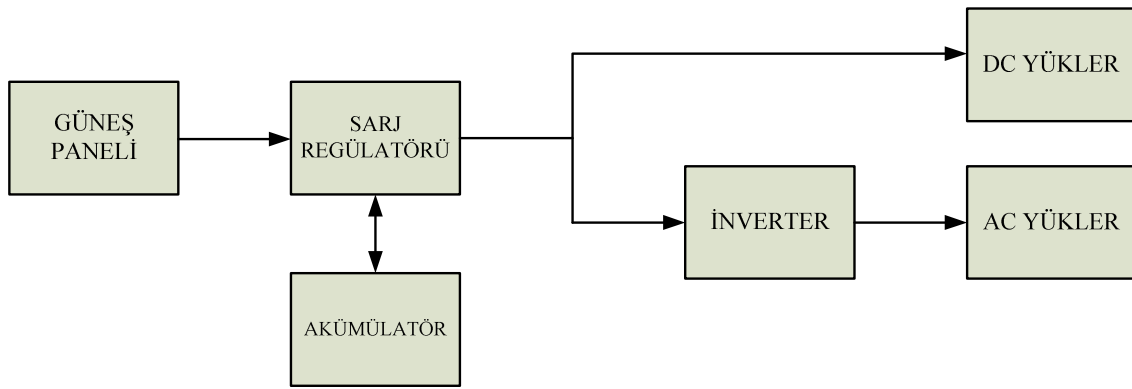
### 4.1 Giriş

Güneş pilleri elektriği güneş enerjisinden doğrudan üretmeleriyle birlikte, bu enerjinin daha kullanışlı olması için uygun şekilde kontrol edilmeli, depo edilmeli, dönüştürülmeli ve belirli bir düzende dağıtımı yapılmalıdır. Bunu oluşturan yapıya, güneş pili sistemi denilmektedir. Güneş pili sistemleri, şebekeden bağımsız ve şebekeye bağlı olmak üzere iki ana gruba ayrılır.

### 4.2 Şebekeden Bağımsız Güneş Pili Sistemleri

Bu tür güneş pili sistemleri genellikle yerleşimden uzak olan bölgelerde enerji ihtiyacını karşılayan sistemlerdir. Bu sistemler birkaç watt'tan birkaç yüz kW'lara kadar değişebilen güçlerde ve çok çeşitli türlerde yüklerin enerji talebini karşılayabilmektedirler (Okyay, 2006).

Şekil 4.1'de, şebekeden bağımsız güneş pili sisteminin blok şeması görülmektedir. Bu sistemlerde yeterli sayıda güneş paneli, enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Güneşin yetersiz olduğu zamanlarda ya da özellikle gece süresince kullanılmak üzere genellikle sistemde akümülatör bulundurulmaktadır. Güneş panelleri gün boyunca elektrik enerjisi üreterek bunu akümülatörde depolar, yüke gerekli olan enerji akümülatörden alınmaktadır. Akünün, aşırı şarj ve deşarj olarak zarar görmesini engellemek için şarj regülatörü kullanılmaktadır. Şarj regülatörü akünün durumuna göre, ya güneş pillerinden gelen akımı ya da yükün çektiği akımı kesmektedir. Şebeke uyumlu alternatif akımın gerekli olduğu uygulamalarda, sisteme bir inverter eklenerek akümülatördeki d.c. gerilim 220V 50 Hz' lik sinüs dalgasına dönüştürülmektedir. Bazı sistemlerde, güneş pillerinin maksimum güç noktasında çalışmasını sağlayan maksimum güç noktası izleyici cihazı bulunmaktadır.



Şekil 4.1 Şebekeden bağımsız güneş pili sistemi blok şeması

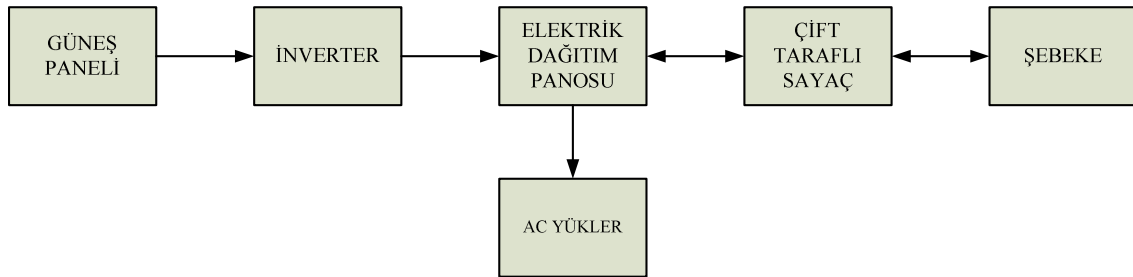
Sistem içerisinde sürekli enerji talebi istendiği takdirde, şebekeden bağımsız güneş pili sistemleri diğer enerji kaynaklarıyla birlikte kullanılabilir. Birden fazla enerji kaynağının birlikte bulunduğu bu sistemler, hibrid sistemler olarak adlandırılmaktadır. Genellikle güneş pili sistemleri, dizel jeneratör veya rüzgar enerjisi sistemleriyle iyi bir hibrid sistem oluşturmaktadırlar. Bu sistemlerde güneş pili sisteminin enerji talebini karşılayamadığı durumlarda yedek sistem otomatik olarak devreye girerek ihtiyacı karşılamaya yardımcı olmaktadır. Yardımcı sistemler güneş pili sisteminin güvenilirliğini artırırken bağımsızlığını azaltmaktadırlar.

### 4.3 Şebekeye Bağlı Güneş Pili Sistemleri

Güneş pili sistemiyle şebeke enerji sisteminin beraber kullanıldığı sistemlerdir. Şebeke bağlantılı güneş pili sistemlerinin gücü, birkaç kW'tan birkaç MW'lara kadar değişebilmektedir. Bu tür sistemler, iki ana gruba ayrılır (Okyay, 2006).

İlk tür sistem, temelde bir yerleşim biriminin elektrik ihtiyacını karşılamaktadır. Bu sistemlerde, üretilen fazla enerji elektrik şebekesine satılmaktadır. Yeterli enerjinin üretilmediği durumlarda şebekeden enerji satın alınmaktadır. Böyle bir sistemde enerjinin depo edilmesi gerekmemekte, yalnızca güneş pili tarafından üretilen enerji doğru akım olduğu için inverter yardımıyla alternatif akıma dönüştürülmesi ve şebeke uyumlu olması gerekmektedir. Bu türe grid interactive güneş pili sistemi denilmektedir (Şekil 4.2).

İkinci tür şebekeye bağlı güneş pili sistemleri kendi başına elektrik üretip, bunu şebekeye satan büyük güç üretim merkezleri şeklindedir. Bunların büyüklüğü 600-700 kW' tan MW' lara kadar değişir (Okyay, 2006). Bu tür sistemlere de grid back up güneş pili sistemi denilmektedir.



Şekil 4.2 Şebekeye bağlı (grid interactive) güneş pili sistemi blok şeması

#### 4.4 Güneş Pili Sistem Bileşenleri

Güneş pili sistemlerinde kullanılan elektronik devre elemanları, elde edilen enerjinin tüketiciye aktarılmasını sağlamaktadırlar.

##### 4.4.1 Güneş Panelleri

Güneş ışınlarını elektrik enerjisine çeviren, güneş pili sisteminin ana elemanıdır. Paneller daha yüksek gerilim verebilmesi için seri, daha yüksek akım çıkışı için paralel olarak bağlanırlar. Panellerin seri bağlantılarında by-pass diyotu, paralel bağlantılarında bloklama diyotu kullanılır. By-pass diyotunun görevi çalışma sırasında bozulan panellerin kısa devre olarak üzerlerinden akım geçilmesini sağlamaktır (Partian, 1995). Bloklama diyotunun görevi de çalışma sırasında bozulan panellerin bloklanarak diğer panellerin enerjisini absorbe etmelerini engellemektir. Şekil 4.3'te güneş paneli görülmektedir.



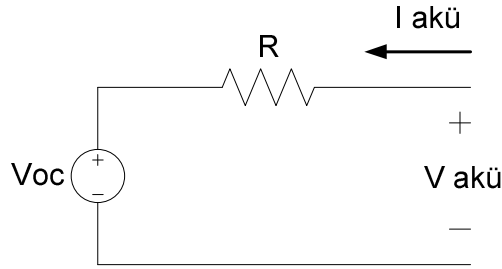
Şekil 4.3 Güneş paneli

##### 4.4.2 Aküler

Güneş pili sistemlerinde üretilen enerji, gece veya havanın kapalı olduğu yağışlı, bulutlu günlerde kullanılabilmesi için kimyasal enerjiye dönüştürülerek akülerde depolanır. Ayrıca pillerde üretilen güç yetersiz ise aradaki fark akülerden karşılanabilir. Depolanan enerjinin günün her saati ve her hava koşulunda kullanılmasına karşılık, güneş pilleri harcanan enerjiyi, ancak gün ışığında kısıtlı bir zaman aralığında yerine koymaya çalışmaktadırlar (Dell ve Rand, 2001).

Akünün kapasitesi kaç saat boyunca ne kadar akım çekilebileceğini belirten amper-saat (Ah) cinsinden ölçülmektedir. Güneş pili sistemlerinde, kurşun asit ve nikel kadmiyum tip aküler yaygın olarak kullanılmaktadır. Nikel kadmiyum aküler daha uzun ömürlü ama daha masraflıdır. Kurşun asit aküler ise kullanım kolaylığı ve fiyat açısından avantajlı olduğundan güneş pili sistemlerinde daha yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

Akünün elektrik eşdeğer devresi bir direnç ve bir sabit güç kaynağı ile Şekil 4.4'te görülmektedir (Nizam, 2004).



Şekil 4.4 Akü elektrik eşdeğer devresi

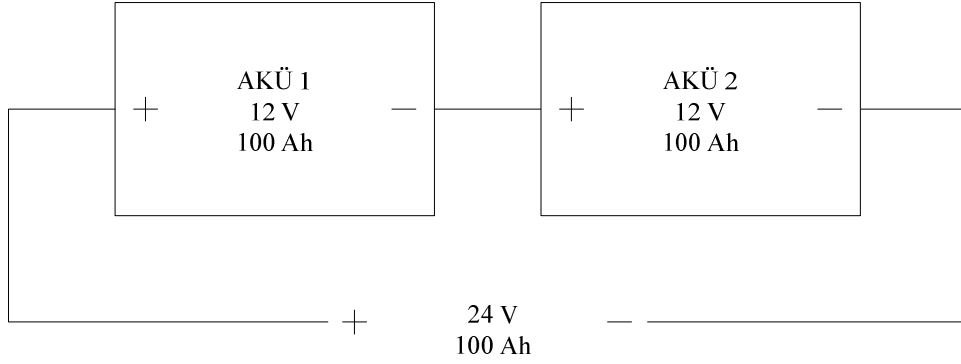
Deşarj süresi boyunca akü gerilimi, açık devre geriliminden iç direnç yüzünden kaybedilen gücün çıkarılmasıyla (4.1) bulunur.

$$V_{aku} = V_{oc} - R_{ic} \times I_{aku} \quad (4.1)$$

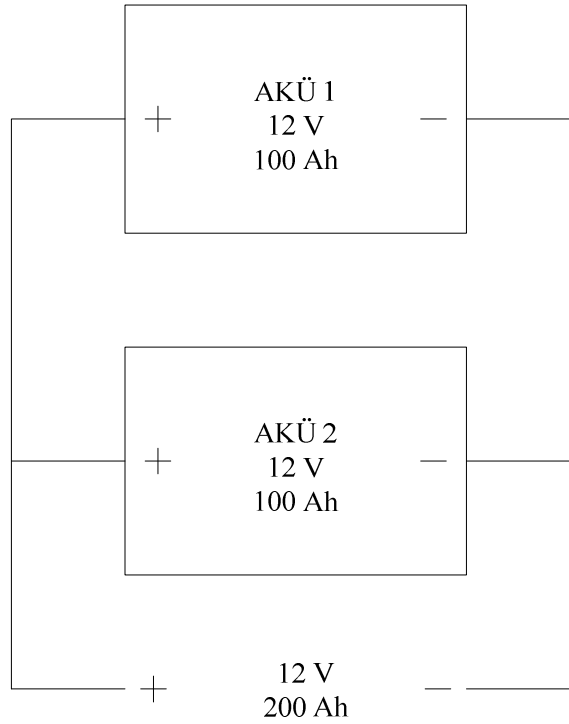
$R_{iç}$ , deşarj süresince sürekli değişen farklı dirençlerin toplamından oluşmaktadır. Bunlar bağlantı noktaları dirençleri, kullanılan elektrolitin direnci, kalan akü kapasitesiyle değişen yüzey direnci gibi dirençlerdir (Nizam, 2004). Uygulanan şarj geriliminin artırılması şarj süresini azaltmakla birlikte iç kayıpların artmasına neden olmaktadır. Bu da akü ömrünü azaltmaktadır.

Kurşun asit akülerin şarjında üç adımdan oluşan bir yöntem kullanılmaktadır. Bunlar, katı madde şarjı, emme şarjı ve tetikleme şarjıdır. Katı madde şarjında bütün akım aküye verilir ve akü tam dolmuş oranının %80-90'ına ulaştığında emme şarjına geçilir. Bu sırada akım, akünün çok fazla ısınıp zarar görmemesi için sınırlandırılır ve tam şarj geriliminden biraz daha fazla gerilim aküye uygulanır. Akünün tam olarak dolmasına kadar devam eder. Tetikleme şarjında ise, şarj gerilimi akü geriliminden çok az büyük tutulur. Bu şarjın amacı akülerin boşalmasını engelleyerek kullanım ömürlerinin uzatılmasıdır (Dell ve Rand, 2001).

Aküler aşırı şarj ve deşarjdan korunmalıdırlar. Aşırı şarj akünün ısınmasına, sıvı kaybına ve kullanım ömrünün azalmasına yol açmaktadır. Ayrıca akünün ömrünü arttırmak için uzun süreli düşük şarj seviyesinde tutulmaması gerekmektedir. Ortam sıcaklığı da akü verimini etkileyen faktörlerdendir. Ortam sıcaklığının her 10°C artışı akü ömrünü yarı yarıya azaltmaktadır. Şekil 4.5'te akülerin seri bağlanarak gerilim, Şekil 4.6'da da paralel bağlanarak akım kapasitelerinin arttırıldığı görülmektedir (Dunlop, 1997).



Şekil 4.5 Seri bağlı aküler



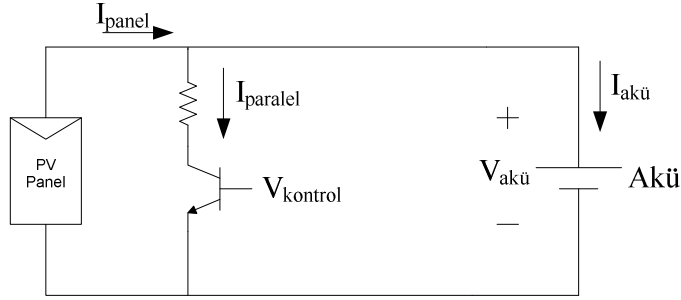
Şekil 4.6 Paralel bağlı aküler

### 4.4.3 Şarj Regülatörleri

Şarj regülatörünün görevi akünün aşırı şarj ve deşarj olmasını engellemektir. Şarj regülatörünün kontrol yöntemi, akü şarjının etkisini ve sistemin beslemesi gereken yüklerin ihtiyaçlarını karşılamalıdır. Gelişmiş regülatörlerle yapılacak sıcaklık kompanzasyonlarıyla akülerin maksimum kapasitede ve uzun ömürlü olarak kullanılması sağlanmış olur (Castaner ve Silvestre, 2002). Şarj regülatörleri, paralel ve seri regülatörler olmak üzere ikiye ayrılırlar.

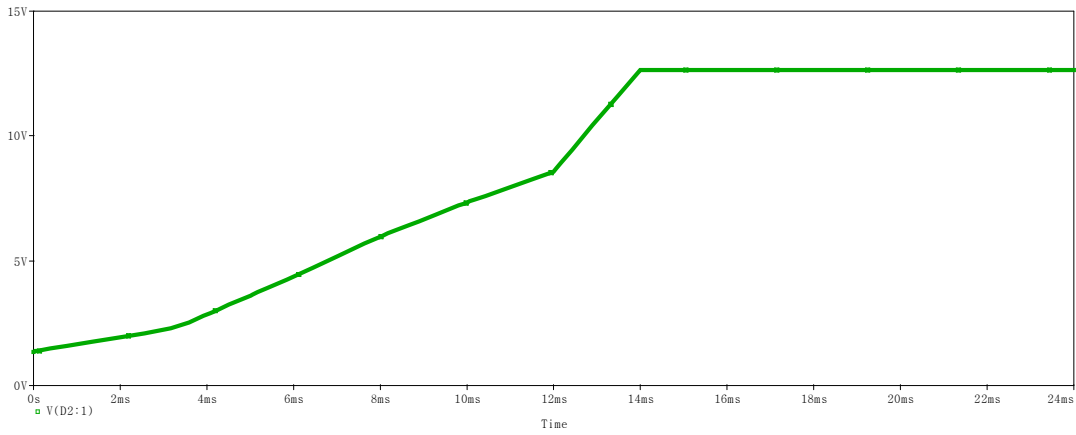
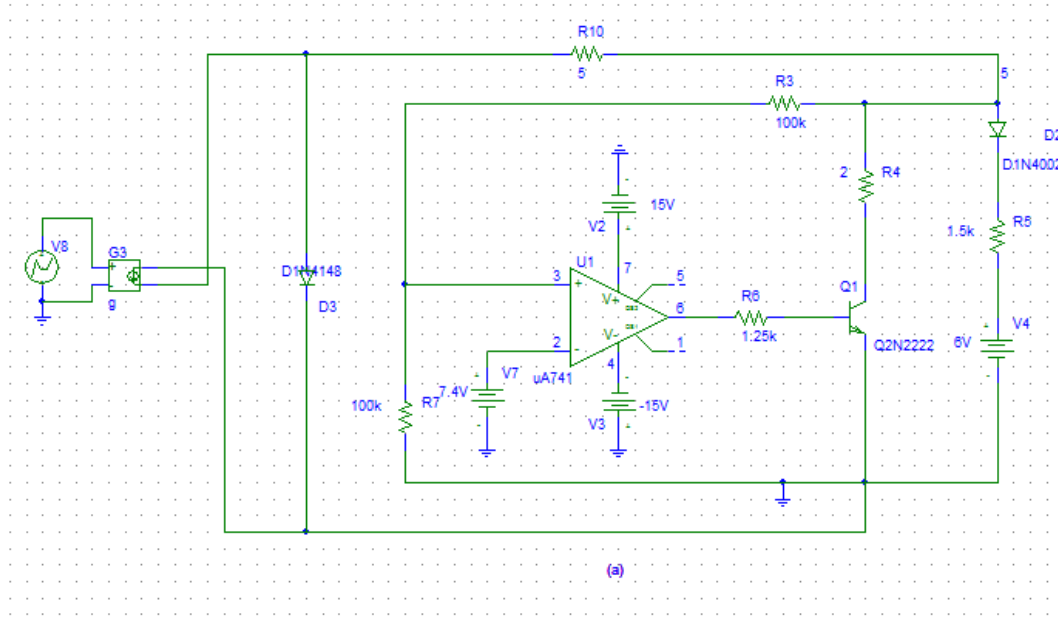
#### 4.4.3.1 Paralel Regülatör

Paralel regülatörler güneş panellerine paralel bağlanırlar ve görevleri akülerin aşırı şarj olmasını engellemektir. Akü geriliminden gelen sinyaller burada giriş sinyali olarak kullanılır. Aküler set edilen fazla şarj durumuna ulaştığında akımın yönlendirilmesi için gerekli olan paralel kol aktif hale gelir. Şekil 4.7’de paralel regülatör devresi görülmektedir (Castaner ve Silvestre, 2002).



Şekil 4.7 Paralel Regülatör

Kontrol gerilimi set edilen aşırı şarj geriliminden az olduğu sürece transistör kapalı durumda olmakta ve aküler şarj olmaya devam etmektedir. Kontrol gerilimi set edilen değere ulaştığında transistör üzerinden akım geçmeye başlar ve akü gerilimiyle akü akımı sınırlandırılmış olur. Paralel regülatörlerde direnç ve transistör kayıpları bulunmaktadır (Castaner ve Silvestre, 2002).



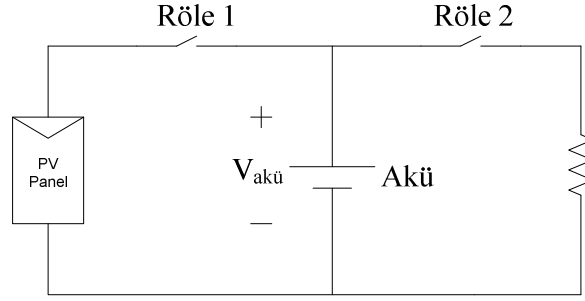
Şekil 4.8 Paralel Regülatör (a) pspice modeli, (b) akü gerilimi (Mansoor, 2008)

Şekil 4.8’de paralel regülatörün pspice modeli ve akü gerilim dalga şekilleri görülmektedir. Devrede akü gerilim kaynağı ve ona seri bağlı direnç şeklinde modellenmiştir. Güneş pilinden gelen gerilim, gerilim bölücünden geçer ve referans gerilimi ile karşılaştırılır. Eğer gerilim referans değerin altındaysa transistör iletime girmez ve akü şarj olmaya devam eder. Güneş pili referans gerilimden daha büyük gerilim ürettiğinde karşılaştırıcı pozitif sinyal üretir ve paralel kol aktif hale gelir (Mansoor, 2008).

#### 4.4.3.2 Seri Regülatör

Şarj regülasyonunda yaygın olarak kullanılan metottur. Akülerin gerekli kapasite ve verimde

çalışmaları için  $V_{\min}$  ve  $V_{\max}$  gerilim aralığına sahip olmaları gerekmektedir. Şayet akülere bu gerilim aralıkları dışında bir gerilim uygulanırsa, akülerin bozulmalarına neden olacaktır. Seri şarj regülatörlerinin görevi akülerin bu gerilim aralığında çalışmalarını sağlamaktır. Regülatör, aküler  $V_{\min}$ 'e ulaştığında aküleri yükten ayırır. Çıkış geriliminin yetersiz olduğu durumlarda, aküler yeterli şarj edilmişse yük devresine akülerin bağlanmasını sağlar. Şekil 4.9'de seri regülatör devresi görülmektedir (Castaner ve Silvestre, 2002).



Şekil 4.9 Seri regülatör

Seri regülatör, aküler tam şarjlı duruma geldiğinde aküler ile güneş panellerini birbirinden ayırır. Başka bir deyişle akü gerilimi  $V_{\max}$  olduğunda panel bağlantısını aküler belli bir değerde deşarj oluncaya kadar kesmektedir. Seri regülatör, elektromekanik tip anahtarlar ya da röleler kullanılarak oluşturulabilmektedir. Regülatördeki kayıp sadece rölelerde ve regülatör devresinde meydana gelmektedir. Paralel devre kayıplarına göre seri devre kayıpları daha küçüktür (Castaner ve Silvestre, 2002).

#### 4.4.4 İnverterler

İnverterin fonksiyonu, bir dc giriş gerilimini; simetrik, istenilen genlikte ve frekansta bir ac gerilime dönüştürmektir. Çıkışta elde edilen gerilim ve frekans değerleri sabit veya değişken olabilir. Değişken bir çıkış gerilimi, değişken bir dc giriş gerilimi kullanılarak, inverter kazancının sabit tutulması ile elde edilebilir. Diğer bir yol olarak, eğer dc giriş gerilimi sabit ve ayarlanamaz ise, değişken bir çıkış gerilimi inverter kazancını değiştirerek elde edilebilir ki, bu genelde inverterin darbe genişlik modülasyonu yani PWM (Pulse Width Modulation) kontrolüyle sağlanır. İnverter kazancı ise, ac çıkış geriliminin dc giriş gerilimine oranıdır (Mohan vd., 1989).

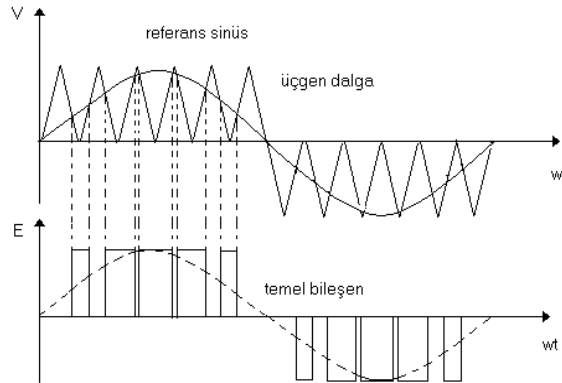
Güneş panellerinden elde edilen dc gerilim inverter yardımıyla ac gerilime dönüştürülür. İnverterler, çıkış gücü ve çıkış dalga şekline göre sınıflandırılırlar. Ayrıca güneş pili



sistemlerinde inverter seçimi, sistemin şebekeden bağımsız ya da şebekeye bağlı olmasına göre değişiklik gösterir. İnverterleri çıkış dalga şekillerine göre üçe ayrılabilir:

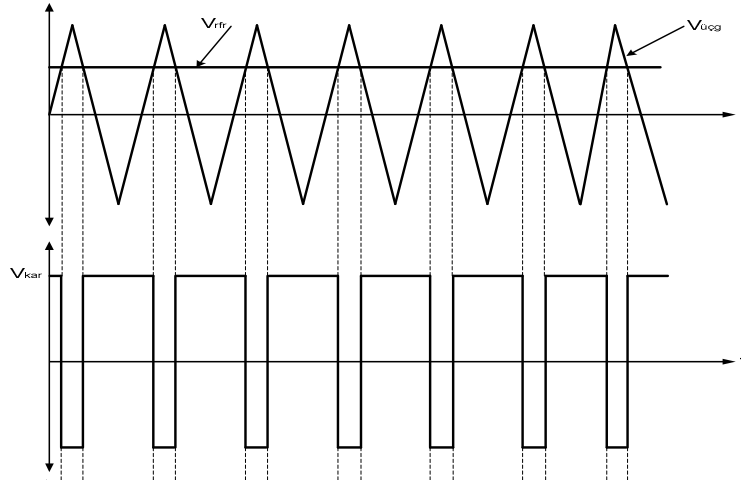
- **Kare Dalga İnverterler:** İnverterler arasında en ucuz olanıdır fakat uygulama alanı sınırlıdır. Toplam harmonik bozulmaları %40'dan fazla ve verimleri %70-95 arasındadır.
- **Değiştirilmiş Sinüs Dalga İnverterler:** Bu inverterler rezonans devrelerini kullanarak sinus dalga formuna daha yakın bir inverter çıkışı meydana getirirler. Toplam harmonik bozulmaları %5 ve verimleri %70-80 arasındadır.
- **PWM İnverterler:** PWM de amaç ana kare dalga da darbeler oluşturmak ve bu darbelerin genişliğini değiştirmek suretiyle çıkış ana dalgasının temel bileşenini değiştirmektir. Çıkış frekansının kontrolü için inverterdeki elemanların faz değiştirme zamanlarının değiştirilmesi yeterli olacaktır. (Wang vd., 1996). Maliyet olarak en pahalı uygulama olup verimi %90-97 arasında ve harmonik bozulmaları %3'ün altındadır. İnverter sistemlerinde darbe genişlik modülasyonu, sinüsoidal PWM ve DC PWM olarak ikiye ayrılır.

Şekil 4.10'da gösterilen sinüsoidal PWM tekniği, inverterlerde yarı iletken anahtarlama elemanlarının tetikleme anlarını belirlemek ve eş zamanlamayı sağlayabilmek için kullanılan yöntemlerden biridir. Genel olarak PWM sinyalleri, yüksek frekanslı bir üçgen taşıyıcı gerilim ile düşük frekanslı genliği ayarlanabilen bir sinüsoidal kontrol gerilimi karşılaştırılarak elde edilir. Bu iki gerilimin çalışma noktaları, anahtarlama elemanlarının tetikleme anlarını belirler. İnverterin çıkış gerilimini azaltmak veya yükseltmek için referans sinüsün genliği azaltılır veya yükseltilir. Üçgen gerilimin frekansı ise inverterin anahtarlama frekansını belirler.



Şekil 4.10 Sinüsoidal PWM dalga çıkış biçimi

DC PWM yönteminde prensip olarak bir üçgen ya da testere dişi gerilim ile bir DC gerilim karşılaştırılarak inverterlerde yarı iletken anahtarların kontrol sinyalleri oluşturulur. Kontrol gerilimi işareti gerçek çıkış gerilimiyle istenen çıkış gerilimi arasındaki farkın (hatanın) kuvvetlendirilmesiyle elde edilir. İnverterin çıkış gerilimini ayarlamak için referans DC gerilimin genliği azaltılır veya yükseltilir. Üçgen ya da testere dişi gerilimin frekansı ise inverterin anahtarlama frekansını belirler. Şekil 4.11’de görüldüğü gibi bu iki gerilimin çalışma noktaları, anahtarlama elemanlarının tetikleme anlarını belirler.



Şekil 4.11 DC PWM dalga çıkış biçimi

#### 4.5 Güneş Pili Sistemlerinin Avantaj ve Dezavantajları

Güneş pilleriyle elektrik üretiminin avantaj ve dezavantajlarından bazıları aşağıda sıralanmıştır. Avantajları:

- Sessiz ve temizdirler, çevre kirlenmesine sebep olmazlar.
- Herhangi bir fosil yakıt veya bağlantı gerektirmeden elektrik üretebilir.
- Yakıtları güneş olduğu için her yerde ücretsiz temin edilebilir. Taşıma ve depolama gibi sorunları yoktur.
- Sistemde kullanılan hareketli parçalar çok az olduğundan çok az bakım gerektirirler.
- Kurulumu çabuk ve kolaydır. Modüler sistemler oldukları için güç çıkışı kolaylıkla artırılabilir.

- En sık kullanılan hammaddesi olan silisyum doğada en bol bulunan maddelerdendir ve seri üretime uygundur.
- Teorik olarak çok uzun olsa da pratikte 25-30 ömürleri vardır.
- Enerji kaynağı ile kullanım noktası arasında çok kısa mesafeler olduğu için oluşabilecek kayıplar yok denecek kadar azdır.
- Güçlü rüzgarlar, kum fırtınaları, nem, ısı, kar ve buz gibi doğa olaylarına karşı dayanıklıdır.
- Elektrik şebekesinden bağımsız çalışabilecekleri gibi inverter ve trafo gruplarıyla enterkonnekte sisteme enerji verebilirler (Boes, 1981).

#### Dezavantajları:

- İlk yatırım maliyeti yüksektir.
- Akşam saatlerinde enerji üretilmediği için elektrik üretimi kesintilidir. Bu yüzden üretilen enerjinin akü ile depolanması gerekmektedir.
- Dönüşüm verimleri düşüktür. Ayrıca yüzeylerini toz gibi maddelerin kaplamasıyla verim daha da düşebilmektedir.
- Büyük güçler üretilebilmesi için geniş alanlara ihtiyaç vardır.
- Güneşlenme yönünden zengin bölgeler için uygundur. Fakat fazla güneş ışını alan bölgelerde pil sıcaklığının artmasıyla verimin düştüğü bilinmektedir.
- Gelişmekte olan bir teknoloji olduğu için yedek parça temini istenilen düzeyde değildir (Ural, 2007).

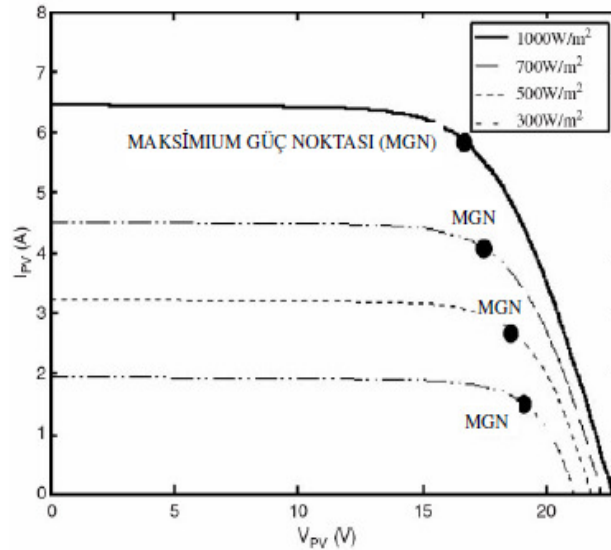
## 5. MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI TAKİP EDİCİLER

### 5.1 Giriş

Güneş pili sistemlerinde minimum seviyede güç kaybına neden olan ve maksimum enerji aktarımı yapacak şekilde çalışmasını sağlayan yapılara maksimum güç noktası takip ediciler (MPPT) denir.

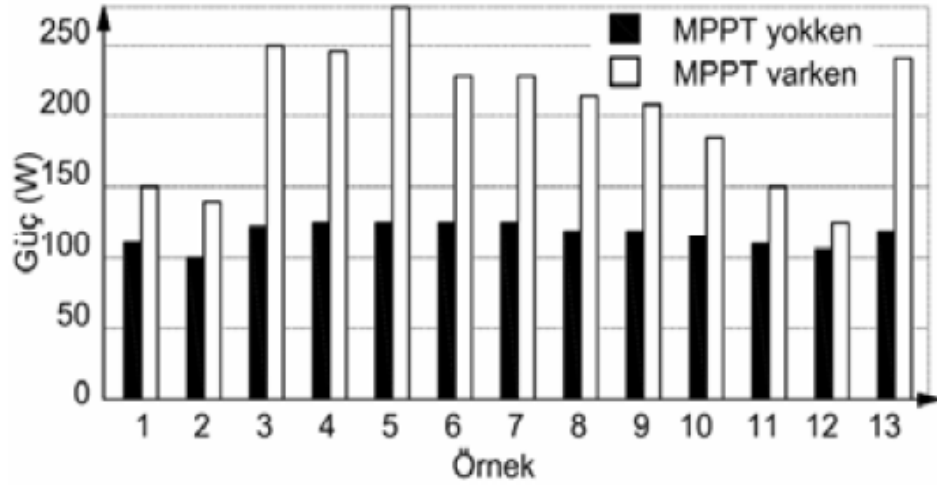
Güneş pili sistemlerinde çalışma şekli ikiye ayrılır. Birinci çalışma şekli, güneş pili sisteminin direk yüke bağlı olmasıdır. İkinci çalışma şekli ise, güneş ışınımının olmadığı durumlarda sistemde enerji sürekliliği sağlamak için enerjinin akülerde depo edilmesidir. Güneş pili sistemi, direk yüke bağlı olduğu durumda yük geriliminde, enerjinin akülerde depolandığı durumda ise akü geriliminde çalışmaya zorlanır ve güneş panellerinden maksimum güç transferi yapılamaz. Güneş panellerinden maksimum güç transferinin yapılabilmesi için, kontrol edilebilir DC-DC dönüştürücü içeren maksimum güç noktası takip ediciler kullanılır.

Maksimum güç noktası takip edici sistemlerinin temel amacı, güneş panelinden elde edilebilecek maksimum gücün yüke veya depolama sistemine aktarılmasıdır. Bir güneş paneline ait maksimum güç noktası, güneşten gelen ışınım, ortam sıcaklığı, panel yaşlanması vb. şartlara bağlı olduğundan bu nokta değişkendir. Şekil 5.1’de örnek bir güneş panelinin farklı ışınımlar altında I-V karakteristiği üzerinde maksimum güç noktaları gösterilmiştir (Salas vd. 2006).



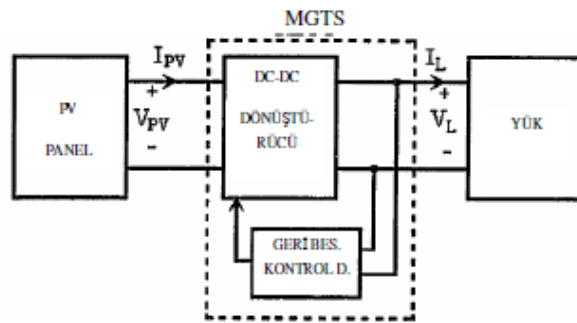
Şekil 5.1 PV panelin farklı ışınımlar altında I-V karakteristiği ve maksimum güç noktaları

Maksimum güç noktası takip ediciler, güneş panellerinden her zaman maksimum güç aktarımını yapmaları nedeniyle ihtiyaç duyulan aynı enerji miktarı için kullanılacak olan güneş panellerinin sayısının azalmasına yol açarak maliyetlerin de azalmasını sağlamaktadırlar. MPPT sayesinde elde edilen enerji kontrolsüz olarak alınan enerjiye oranla %45'ler civarında artırılabilir (Reis, 2002).



Şekil 5.2 Mppt ve mppt olmadan üretilen enerjinin karşılaştırılması (Özdemir, 2007)

MPPT yapısında DC-DC dönüştürücü bulundurmakta ve güneş paneli ile yük arasında görev yapmaktadır (Salameh, 1988). Şekil 5.3'te DC-DC dönüştürücülü bir MPPT'ye ait blok diyagramı gösterilmiştir (Batcheller, 1993).



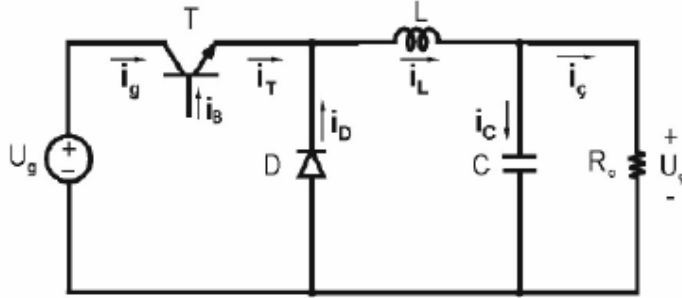
Şekil 5.3 MPPT blok diyagramı

MPPT işlemi sayesinde elde edilen enerji kontrolsüz olarak alınan enerjiye oranla %45'ler civarında artırılabilir. Maksimum güç takip sistemlerinde birçok DC-DC dönüştürücü

kullanılmaktadır. MPPT de kullanılan dönüştürücülere izleyen alt başlıklarda değinilmiştir.

## 5.2 Düşürücü (Buck) DC-DC Dönüştürücü

Düşürücü dönüştürücüler, giriş geriliminden daha düşük seviyede bir ortalama çıkış gerilimi üreten dönüştürücülerdir. Şekil 5.4'de düşürücü dönüştürücünün genel devre şeması görülmektedir (Bodur, 2005).



Şekil 5.4 Düşürücü dönüştürücü devre şeması

Güneş pili sistemlerinde bu dönüştürücüler kullanıldığı zaman  $U_g$  giriş gerilimi, güneş paneli gerilimi olmaktadır. Dönüştürücünün çalışması temel olarak, güç anahtarı iletimde iken güneş panelinden alınan enerji hem çıkışı besler hem de akım yolu üstünde bulunan endüktansta enerji depolanmasını sağlar. Anahtarın kesime girmesiyle diyot iletime geçerek endüktansta biriken enerjiyle yükü beslemeye devam eder. Böylece yükte enerji sürekliliği sağlanmış olur. Düşürücü dönüştürücülerde, sıfır ile giriş gerilimi arasında kontrol edilebilen bir DC çıkış gerilimi elde edilir. D bağlı iletim süresi olmak üzere çıkış gerilimi,

$$U_c = DU_g \quad (5.1)$$

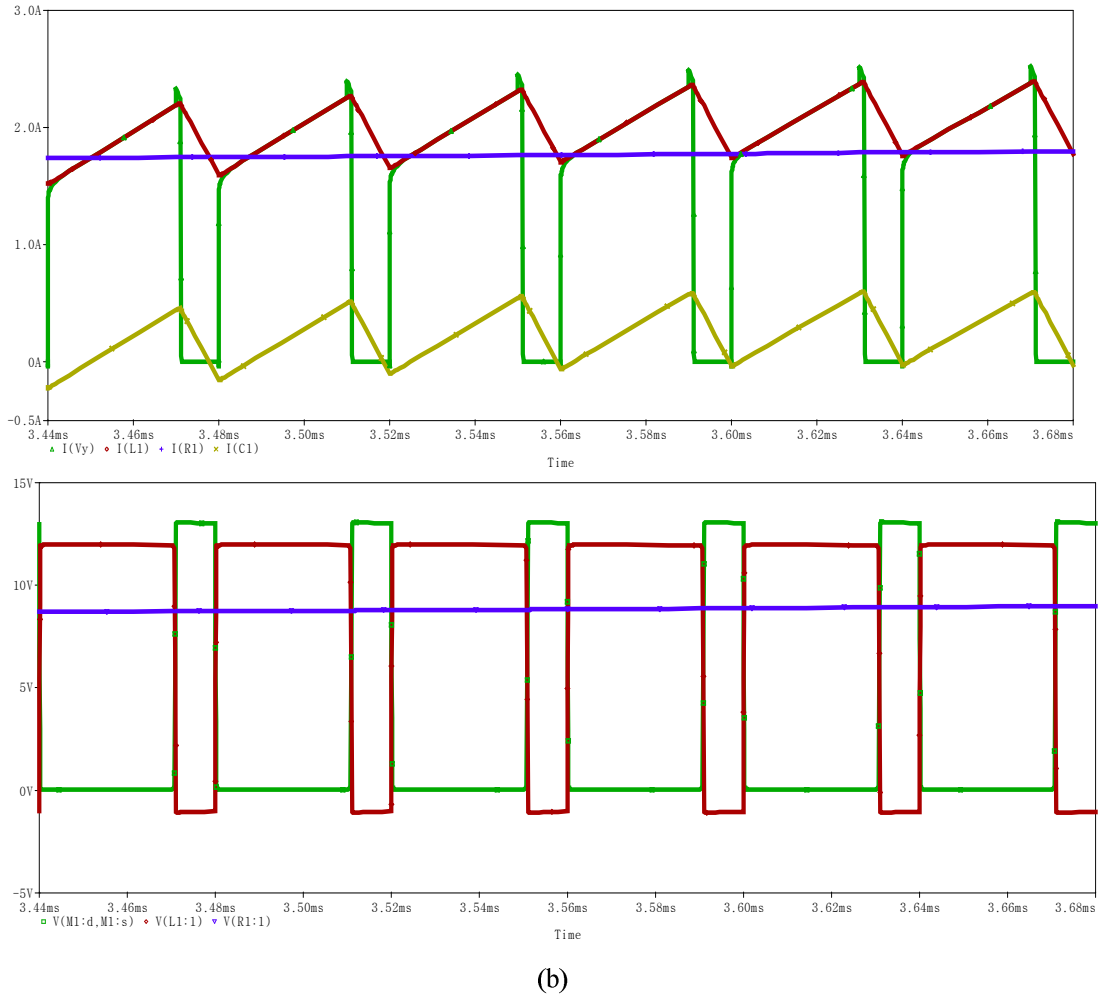
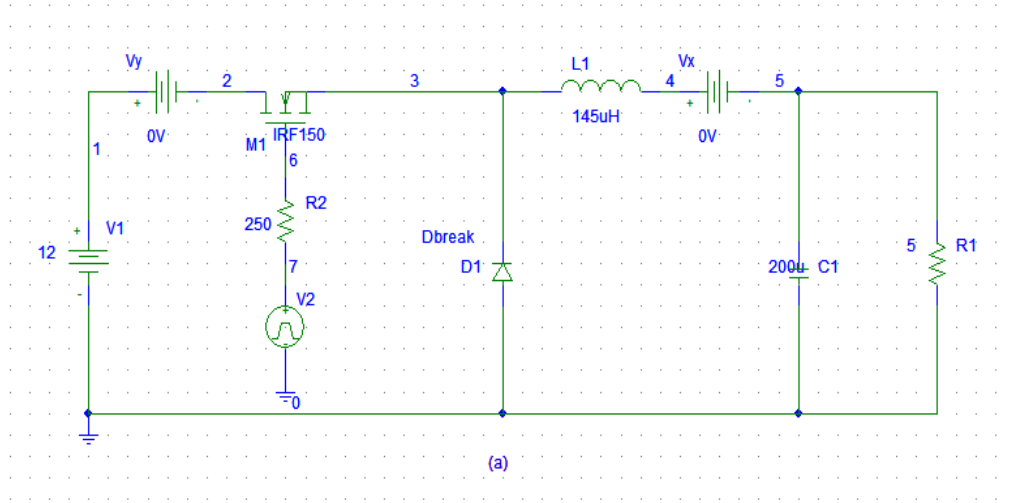
ile giriş akımı ise,

$$I_g = DI_c \quad (5.2)$$

ile ifade edilir. İdeal ve kayıpsız bir dönüştürücüde,

$$P_{pv} = P_c \quad (5.3)$$

olur. Şekil 5.2'de düşürücü dönüştürücünün pspice modeli ve temel dalga şekilleri görülmektedir.



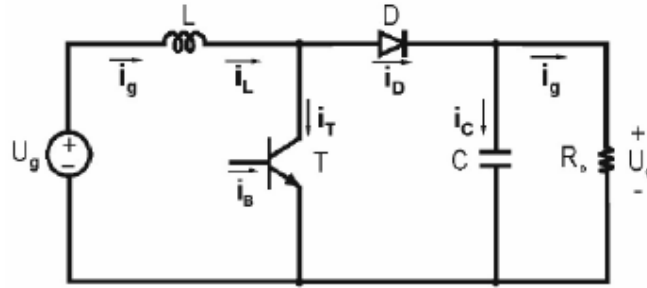
Şekil 5.5 Düşürücü dönüştürücü (a) pspice modeli, (b) temel dalga şekilleri

Sürekli akım modunda çalışan düşürücü dönüştürücüde, ortalama endüktans akımı ortalama

çıkış akımına eşittir (Şekil 5.5). Çünkü sürekli akım modunda ortalama kondansatör akımı sıfırdır. Giriş gerilim kaynağından çekilen akım çok dalgalı olup, çıkış akımındaki dalgalanma çok düşük değerdedir (Şekil 5.5). Bu dönüştürücülerde, güç anahtarının kesimde olduğu aralıkta endüktansta biriken enerji yükü aktarıldığı için çıkış gerilimindeki dalgalanma çok küçüktür (Şekil 5.5).

### 5.3 Yükseltici (Boost) DC-DC Dönüştürücü

Yükseltici dönüştürücüler, giriş geriliminden daha yüksek seviyede çıkış gerilimi üreten dönüştürücülerdir. Şekil 5.6’te yükseltici dönüştürücünün genel devre şeması görülmektedir (Bodur, 2005).



Şekil 5.6 Yükseltici dönüştürücü devre şeması

Güneş pili sistemlerinde bu dönüştürücüler kullanıldığı zaman  $U_g$  giriş gerilimi, güneş paneli gerilimi olmaktadır. Dönüştürücünün çalışması temel olarak, güç anahtarı iletimde iken güneş paneli sadece endüktansa ilave bir enerji enjekte eder. Bu sırada diyot ters kutuplanır ve yalnızca kondansatör yükü besler. Anahtarın kesime girmesiyle, diyot iletime girer ve hem giriş gerilimi çıkışı besler hem de endüktansta biriken enerji çıkışa aktarılır. Yükseltici dönüştürücülerde, giriş gerilimi ile belirlenen bir maksimum gerilim arasında kontrol edilebilen bir DC çıkış gerilimi elde edilir. Yükseltici dönüştürücüde sabit kabul ettiğimiz çıkış gerilimi,

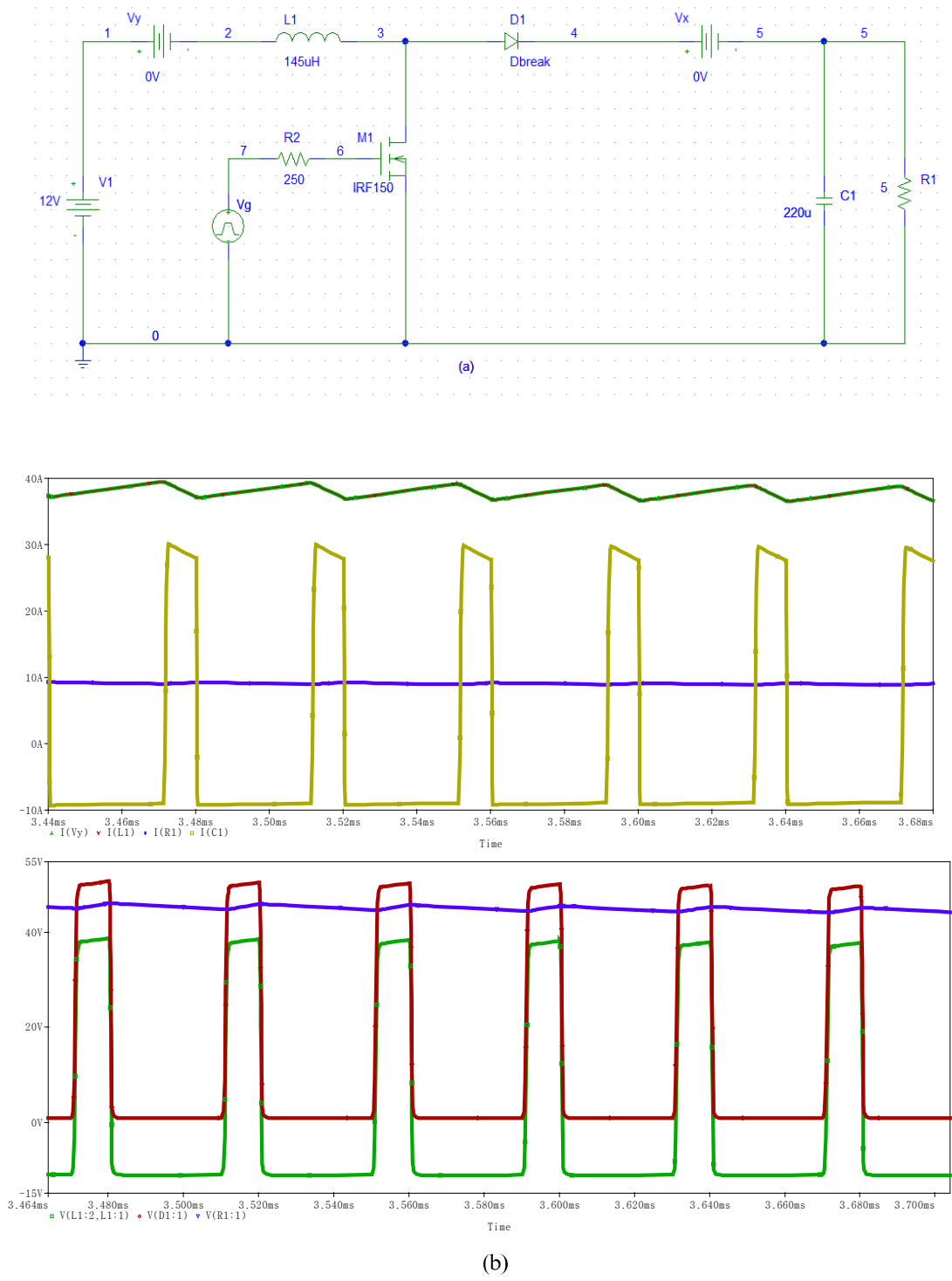
$$U_c = \frac{1}{1-D} U_g \quad (5.4)$$

ile giriş akımı ise,

$$I_g = \frac{1}{1-D} I_c \quad (5.5)$$



ile ifade edilir. Şekil 5.7’te yükseltici dönüştürücünün pspice modeli ve temel dalga şekilleri görülmektedir.

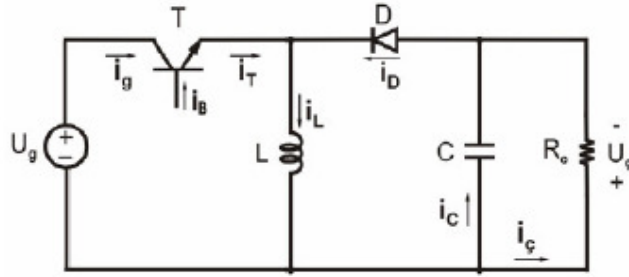


Şekil 5.7 Yükseltici dönüştürücü (a) pspice modeli, (b) temel dalga şekilleri

Sürekli akım modunda çalışan bu yükseltici dönüştürücüde, endüktans girişe seri bağlı olduğu için giriş akımındaki dalgalanma çok küçüktür ve endüktans akımı giriş akımına eşittir (Şekil 5.7). Çıkış gerilimi, güç anahtarı iletimde iken yalnızca kondansatör enerjisiyle sağlandığından, gerilimde dalgalanmalar meydana gelir. Çıkış filtresindeki paralel kapasitenin çıkış gerilimini sabit tutacak şekilde çok büyük olduğu kabul edilmektedir (Mohan, 2003). Ayrıca bu dönüştürücüler boşa çalıştırılmazlar (Bodur, 2005).

#### 5.4 Düşürücü-Yükseltici DC-DC Dönüştürücü

Düşürücü yükseltici dönüştürücüler, gerilimi hem düşürebilen hem de yükseltebilen dönüştürücülerdir. Şekil 5.8'de düşürücü yükseltici dönüştürücünün genel devre şeması görülmektedir (Bodur, 2005). Bu dönüştürücünün diğer dönüştürücülere göre farklı özelliği çıkış geriliminin ters yönlü olmasıdır. Bu yüzden ters çıkışlı dönüştürücü olarak da bilinmektedirler.



Şekil 5.8 Düşürücü yükseltici dönüştürücü devre şeması

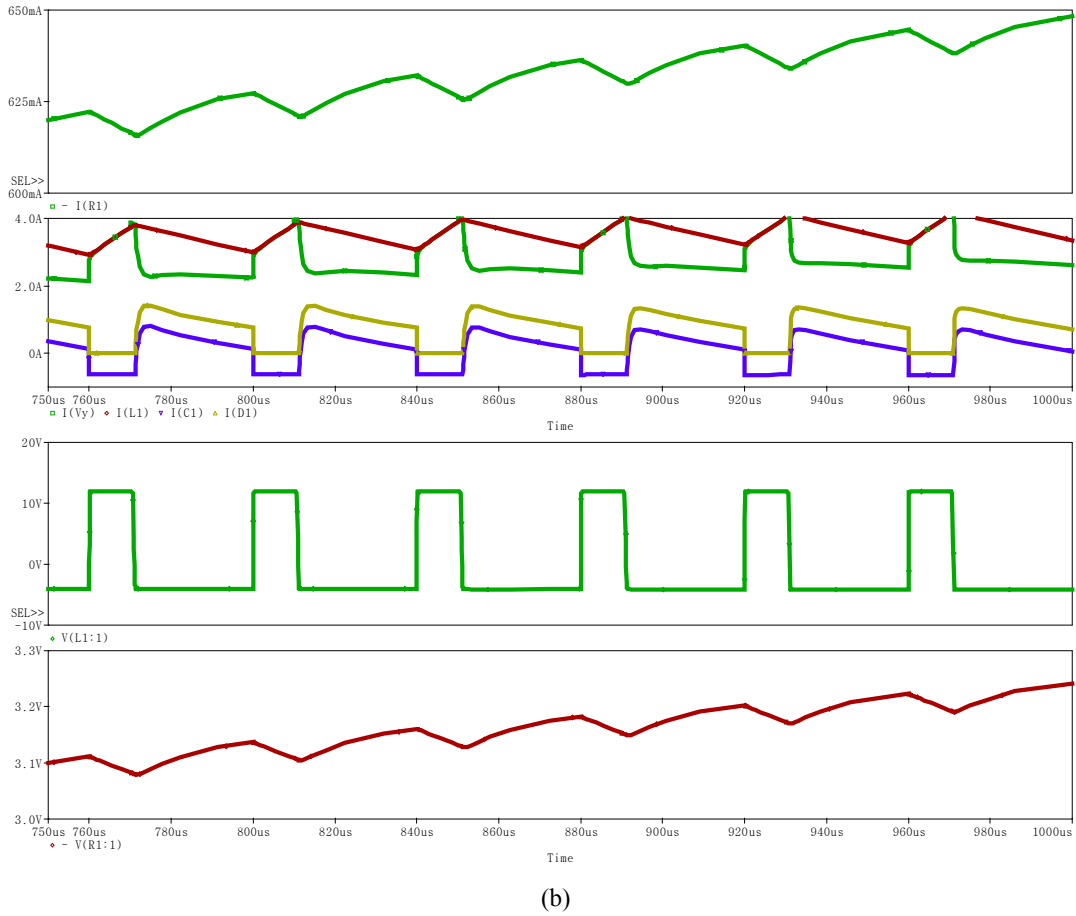
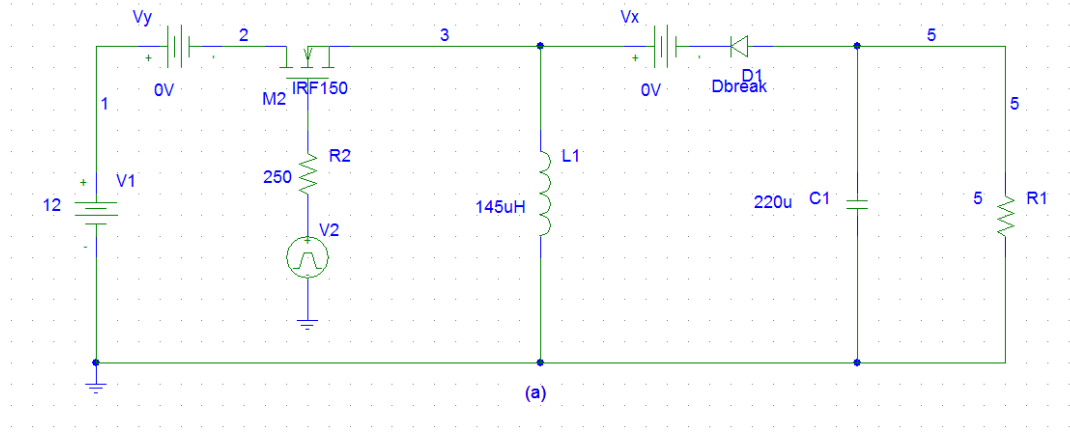
Dönüştürücünün çalışması temel olarak, güç anahtarı iletimde iken giriş gerilim kaynağı endüktansa ilave bir enerji enjekte eder ve bu sırada yükü kondansatör besler. Anahtarın kesime girmesiyle, sadece endüktansta biriken enerji çıkışa aktarılır. Düşürücü yükseltici dönüştürücülerde, sıfır ile belirlenen bir maksimum gerilim arasında kontrol edilebilen bir DC çıkış gerilimi elde edilir. Düşürücü yükseltici dönüştürücüde çıkış gerilimi,

$$U_c = \frac{D}{1-D} U_g \quad (5.6)$$

ile giriş akımı ise,

$$I_g = \frac{D}{1-D} I_c \quad (5.7)$$

ile ifade edilir. Şekil 5.9’da düşürücü yükseltici dönüştürücünün pspice modeli ve temel dalga şekilleri görülmektedir.



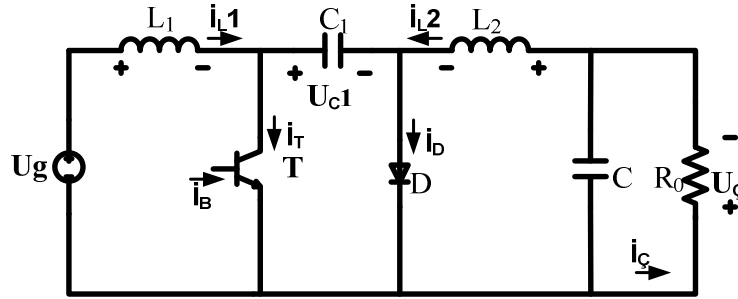
Şekil 5.9 Düşürücü yükseltici dönüştürücü (a) pspice modeli, (b) temel dalga şekilleri

Sürekli akım modunda çalışan düşürücü yükseltici dönüştürücüde, endüktans giriş ya da

çıkışa seri bağlı olmadığından, endüktans akımı giriş ile çıkış akımlarının toplamına eşittir (Şekil 5.9) ve giriş ile çıkış akımlarındaki dalgalanmalar büyüktür. Bu dönüştürücüde boşa çalıştırılmaz (Bodur, 2005).

### 5.5 Cuk DC-DC Dönüştürücü

Cuk dönüştürücüler, düşürücü yükseltici dönüştürücüye benzer olarak ters kutuplu çıkış gerilimi üretir. Şekil 5.10'de cuk dönüştürücünün genel devre şeması görülmektedir. Bu dönüştürücüde  $C_1$  kondansatörü enerjiyi depolayıp girişten çıkışa aktaran temel bileşendir.



Şekil 5.10 Cuk dönüştürücü devre şeması

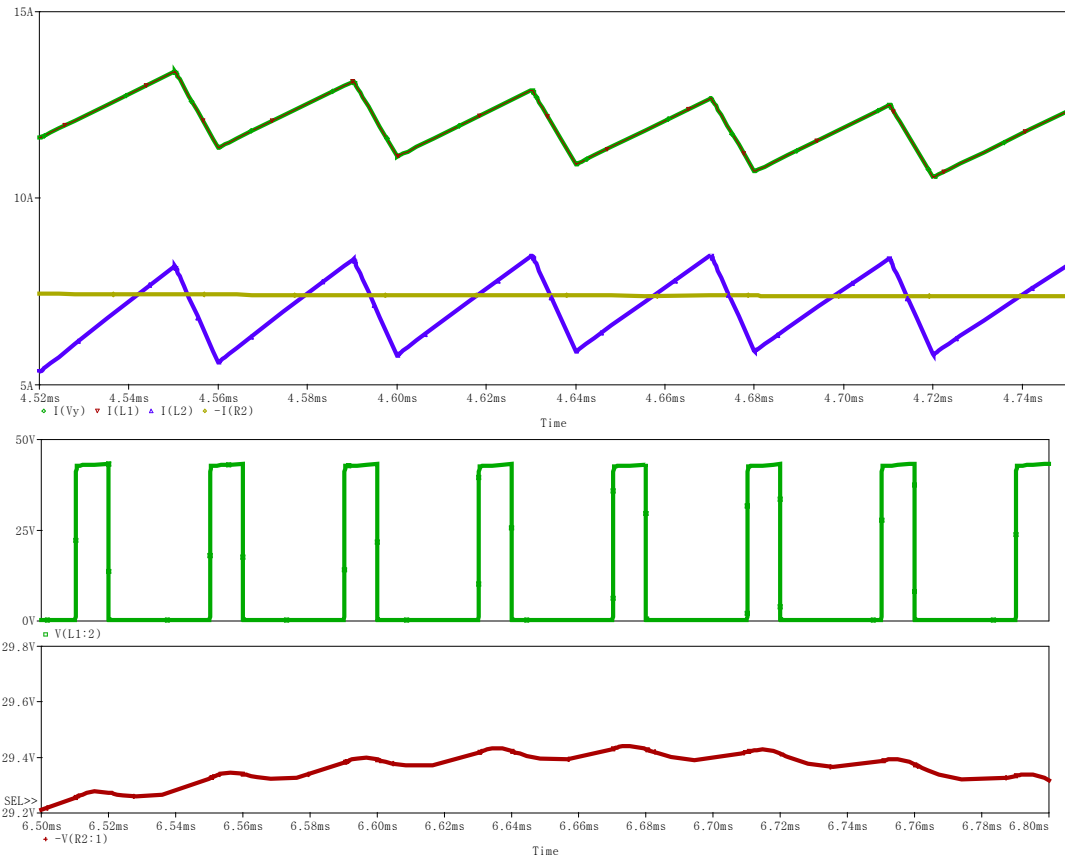
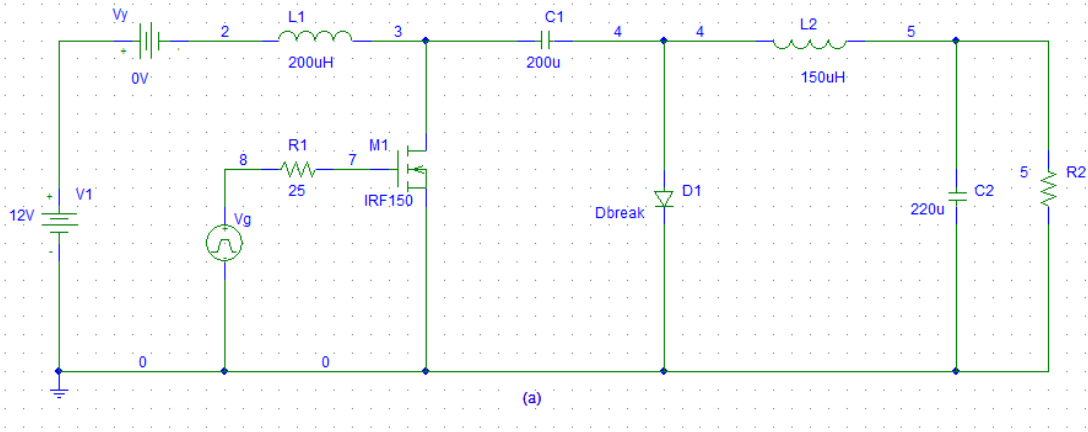
Dönüştürücünün çalışması temel olarak, güç anahtarı iletimde iken endüktans akımları anahtar üzerinden akar.  $C_1$  kondansatör gerilimi diyotu ters kutuplar ve enerjisini çıkışa ve  $L_2$ 'ye aktararak deşarj olur. Bu yüzden  $i_{L2}$  artar ve girişten  $L_1$ 'e enerji aktarıldığı için  $i_{L1}$ 'de artar. Anahtarın kesime girmesiyle, endüktans akımları diyot üzerinden akar.  $C_1$  kondansatörü hem girişten hem de  $L_1$ 'den gelen ve diyot üzerinden geçen enerji ile yüklenir.  $L_2$ 'de depolanan enerji çıkışı besler ve böylece  $i_{L2}$  azalmış olur. Cuk dönüştürücüde çıkış gerilimi,

$$U_c = \frac{D}{1-D} U_g \quad (5.8)$$

ile giriş akımı ise,

$$I_g = \frac{D}{1-D} I_c \quad (5.9)$$

ile ifade edilir. Şekil 5.11'de cuk dönüştürücünün pspice modeli ve temel dalga şekilleri görülmektedir.



(b)

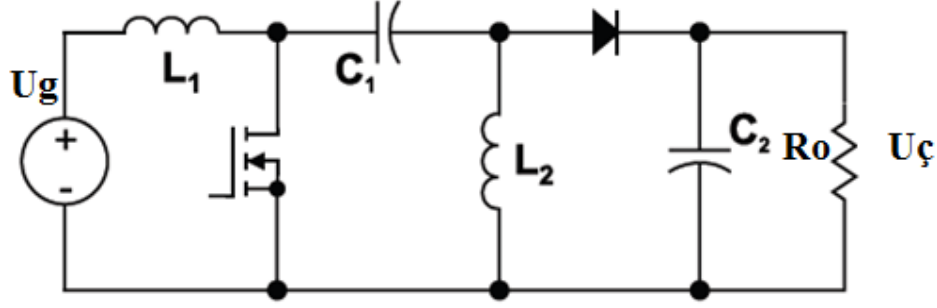
Şekil 5.11 Cuk dönüştürücü (a) pspice modeli, (b) temel dalga şekilleri

Sürekli akım modunda çalışan bu cuk dönüştürücüde, ortalama giriş ve çıkış ilişkileri düşürücü yükseltici dönüştürücüye benzer. Bu dönüştürücüde ortalama endüktans gerilimleri sıfırdır ve dönüştürücünün önemli bir özelliği de hem giriş hem de çıkış akımlarının ve çıkışı besleyen akımın neredeyse dalgasız olmasıdır (Şekil 5.11). Bununla birlikte, dönüştürücüde

büyük dalgalı akımları taşıyabilen büyük bir  $C_1$  kondansatörüne ihtiyaç vardır.

### 5.6 Sepic DC-DC Dönüştürücü

Sepic dönüştürücüler, gerilimi hem düşürebilen hem de yükseltebilen dönüştürücülerdir. Şekil 5.12'de sepic dönüştürücünün genel devre şeması görülmektedir.



Şekil 5.12 Sepic dönüştürücü devre şeması

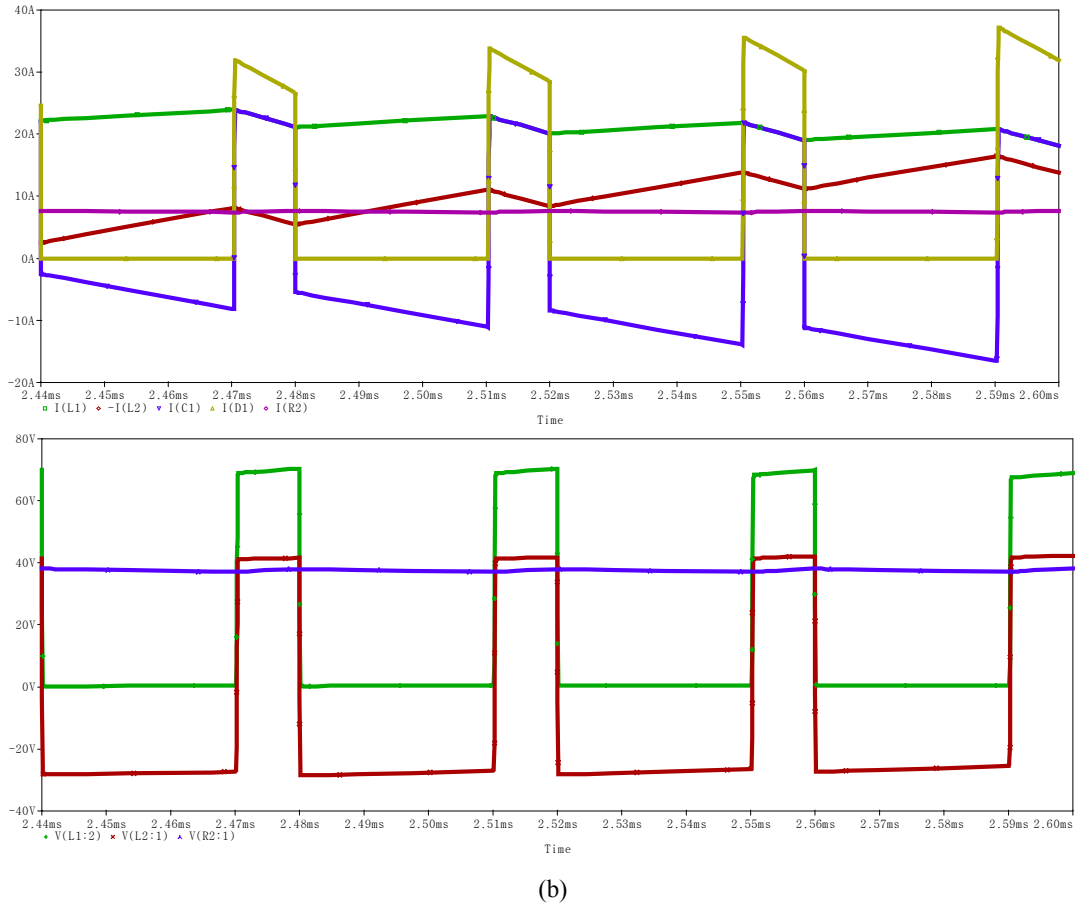
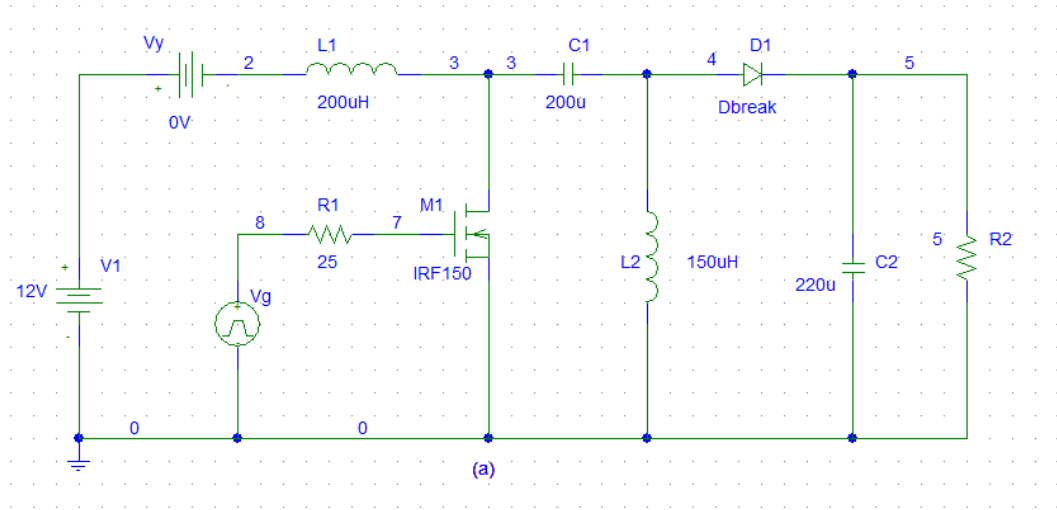
Dönüştürücünün çalışması temel olarak, güç anahtarı iletimde iken giriş gerilimi  $L_1$  endüktansına ilave bir enerji enjekte eder. Bu sırada  $L_2$  endüktansına  $C_1$  kondansatörü enerji enjekte eder ve  $C_2$  kondansatörü yükü besler. Anahtarın kesime girmesiyle,  $L_1$  endüktansı hem  $C_1$  kondansatörünü şarj eder hem de yükü besler. Bu sırada  $L_2$  endüktansında biriken enerjide çıkışa aktarılır. Sepic dönüştürücüde çıkış gerilimi,

$$U_c = \frac{D}{1-D} U_g \quad (5.6)$$

ile giriş akımı ise,

$$I_g = \frac{D}{1-D} I_c \quad (5.7)$$

ile ifade edilir. Şekil 5.13'te sepic dönüştürücünün pspice modeli ve temel dalga şekilleri görülmektedir.

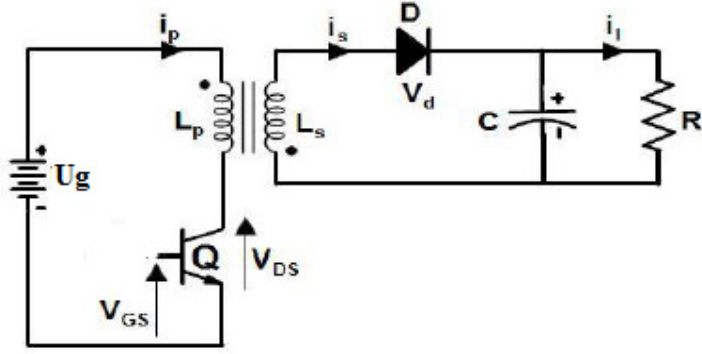


Şekil 5.13 Sepic dönüştürücü (a) pspice modeli, (b) temel dalga şekilleri

Sürekli akım modunda çalışan bu sepic dönüştürücüde, ortalama giriş ve çıkış ilişkileri düşürücü yükseltici dönüştürücüye benzer. Ancak sepic dönüştürücüde giriş ve çıkış gerilimleri aynı polaritedir.

### 5.7 Geri Dönüslü DC-DC Dönüştürücü

Geri dönüslü dönüştürücü, mevcut izolasyonlu dönüştürücüler arasında tasarımı en kolay ve en az elemanlı olanıdır. Yüksek çıkış gerilimi elde edilebilmesi ve birden fazla çıkış verebilmesi bu dönüştürücünün üstünlükleridir (Pressman, 1998). Şekil 5.14'te geri dönüslü dönüştürücünün genel devre şeması görülmektedir



Şekil 5.14 Geri dönüslü dönüştürücü devre şeması

Dönüştürücünün çalışması temel olarak, güç anahtarı iletimde iken giriş gerilimi primer sargıya uygulanır. Sekonder sargının primer sargıya göre ters kutuplanmasından dolayı diyot ters kutuplanır ve sekonderden akım akmaz. Bu sırada kondansatör yükü besler.  $i_p$  akımı,  $L_p$  uçlarında sabit bir gerilim olduğu için lineer olarak artar. Anahtarın kesime girmesiyle, hava aralığında ve manyetik çekirdekte depolanan enerji  $L_s$  üzerinden yüke aktarılır.  $i_s$  akımı,  $L_s$  uçlarında sabit bir gerilim olduğu için lineer olarak azalır (Xiangjun vd., 2003). Geri dönüslü dönüştürücülerde a transformatör dönüştürme oranı olmak üzere çıkış gerilimi,

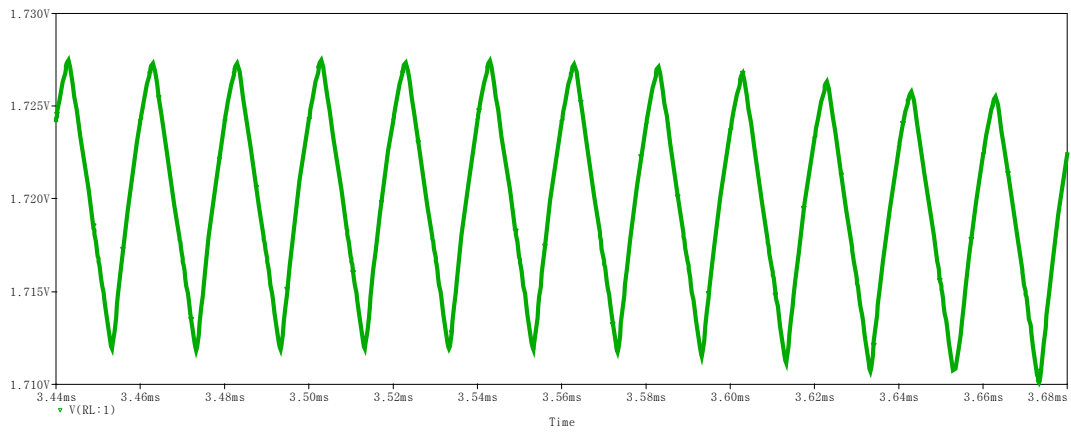
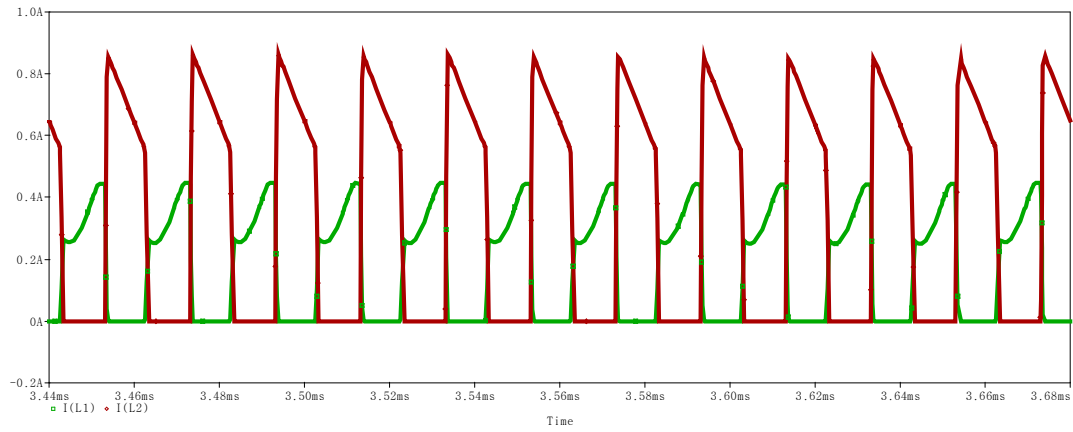
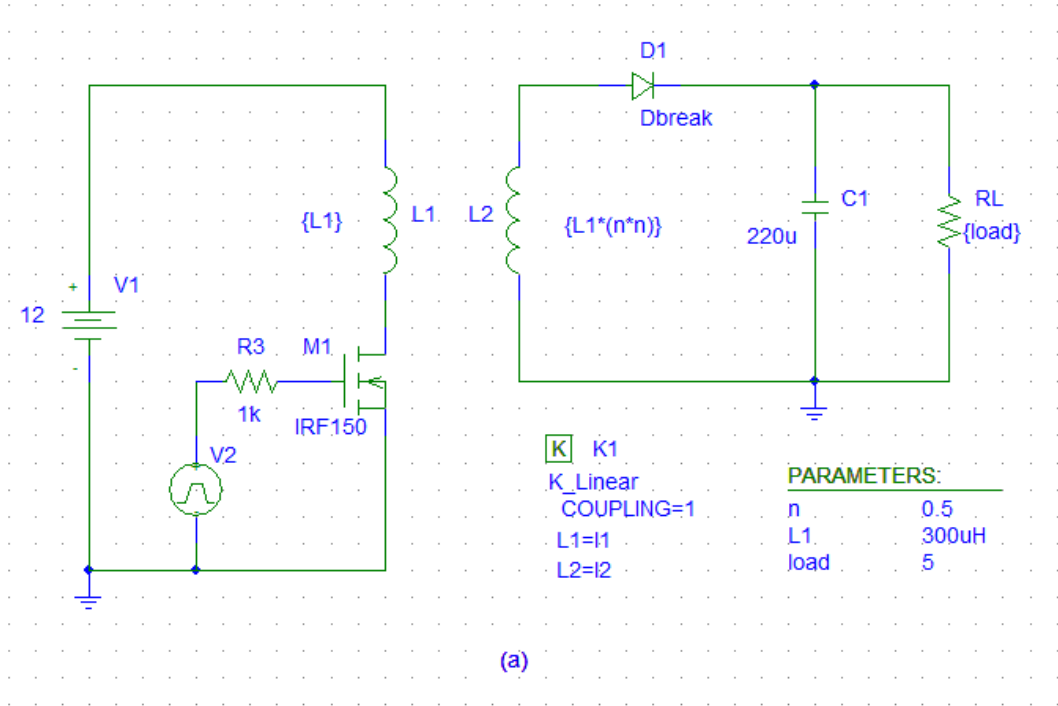
$$U_c = \frac{D}{1-D} \frac{U_g}{a} \quad (5.12)$$

ile giriş akımı ise,

$$I_g = \frac{D}{1-D} \frac{I_c}{a} \quad (5.13)$$

ile ifade edilir. Şekil 5.15'de geri dönüslü dönüştürücünün pspice modeli ve temel dalga şekilleri görülmektedir.





(b)

Şekil 5.15 Geri dönüşlü dönüştürücü (a) pspice modeli, (b) temel dalga şekilleri

Sürekli akım modunda çalışan bu geri dönüşlü dönüştürücü, temel olarak düşürücü yükseltici özellikleri taşır. Ancak giriş ve çıkış arasındaki elektriksel izolasyon nedeniyle çıkış geriliminin ters olması mümkün değildir (Şekil 5.15) ve çıkış ifadelerinde dönüştürme oranı bulunur (Bodur, 2005).

### 5.8 DC DC Dönüştürücülerin Karşılaştırılması

Yukarıda birçok dönüştürücü topolojisine değinilmiştir. Güneş pillerinde kullanılacak topoloji seçiminde pil karakteristiği, yük karakteristiği, kontrol kolaylığı, ebat, güvenilirlik ve sistem maliyeti gibi parametreler sistem tipini belirlemektedir. Ayrıca gerekli bileşenlerin düşük ebat, gerilim ve akımda olması kullanılabilirliğini artırmaktadır. Çizelge 5.1’de dönüştürücü topolojilerine ait özellikler verilmiştir.

Çizelge 5.1 DC DC dönüştürücülere ait özellikler (Özdemir, 2007)

Ölçüt		Azaltan	Arttıran	Azaltan-Arttıran
Anahtar gerilimi		$V_{IN}$	$V_O$	$(V_{IN} + V_O)$
Anahtar akımı		$I_O$	$I_{IN}$	$(I_{IN} + I_O)$
$I_{RMS}$	Anahtar	$\sqrt{D} \cdot I_O$	$\sqrt{D} \cdot I_{IN}$	$\sqrt{D} \cdot (I_{IN} + I_O)$
$I_{AVG}$	Anahtar	$D \cdot I_O$	$D \cdot I_{IN}$	$D \cdot (I_{IN} + I_O)$
	Diyot	$(1 - D) \cdot I_O$	$(1 - D) \cdot I_{IN}$	$(1 - D) \cdot (I_O + I_{IN})$
$I_L$		$I_O$	$I_{IN}$	$(I_{IN} + I_O)$
L'nin C'ye etkisi		Önemli	Az	Az
Darbeli akım		Giriş	Çıkış	Her ikisi

Düşürücü, yükseltici ve düşürücü yükseltici DC-DC dönüştürücülerin tamamı güneş pili sistemlerinin enerji dönüşümünde kullanılabilir. Günümüzde güç dönüştürücülerinde önemli bir nokta, dönüştürücünün yüksek performans sağlarken, ucuza mal olması ve boyutlarının küçük olmasıdır.

DC-DC dönüştürücülerin verim yönünden karşılaştırılmalarına ait simülasyon pspice kullanılarak yapılmıştır. Simülasyonda, Sharp NE-80EJEA güneş modülünün elektriksel karakteristikleri (Çizelge 5.2) kullanılmıştır.  $V_g$  giriş gerilimi güneş modülünün çıkış gerilimidir. DC-DC dönüştürücülere, çıkış gerilimi sabit 17,3V olacak şekilde farklı giriş

gerilimleri uygulanmış ve elde edilen sonuçlar Çizelge 5.3'te verilmiştir.

Çizelge 5.2 Sharp NE-80EJEA güneş modülünün elektriksel karakteristikleri

<b>Elektriksel Karakteristikleri</b>	
Hücre sayısı	36 seri
Açık devre gerilimi ( $V_{oc}$ )	21,6V
Maksimum güç gerilimi ( $V_{pm}$ )	17.3V
Kısa devre akımı ( $I_{sc}$ )	5,16A
Maksimum güç akımı ( $I_{pm}$ )	4,63A
Maksimum güç ( $P_{max}$ )	80W +%10

Çizelge 5.3 DC DC dönüştürücülerin verimlerinin karşılaştırılması

$V_g$ (V)	<b>Düşürücü</b>			<b>Yükseltici</b>			<b>Düşürücü Yükseltici</b>		
	$P_g$ (W)	$P_ç$ (W)	$\eta$ (%)	$P_g$ (W)	$P_ç$ (W)	$\eta$ (%)	$P_g$ (W)	$P_ç$ (W)	$\eta$ (%)
21	61,74	59,85	96,93	-	-	-	66,15	59,85	90,47
19	61,18	59,85	97,82	-	-	-	66,31	59,85	90,25
17,3	-	-	-	64,87	59,85	92,26	66,43	59,85	90,09
15	-	-	-	65,55	59,85	91,30	66,60	59,85	89,86
13	-	-	-	65,91	59,85	90,80	66,95	59,85	89,39

Çizelge 5.3'te görüldüğü gibi, gerilim düşürüldüğünde düşürücü dönüştürücünün düşürücü yükseltici dönüştürücüye göre daha yüksek verime sahip olduğu, gerilim yükseltildiğinde ise yükseltici dönüştürücünün düşürücü yükseltici dönüştürücüye göre daha yüksek verime sahip olduğu anlaşılmaktadır. Sonuç olarak güneş pili uygulamalarında, sistemin kurulacağı bölgedeki ortalama ışınım değerlerine bakılmalıdır. Eğer sistemin enerji ihtiyacının karşılanması için uzun süre gerilimin düşürülmesi gerekiyorsa sadece düşürücü dönüştürücü,

uzun süre gerilimin yükseltilmesi gerekiyorsa sadece yükseltici dönüştürücü kullanılması gerektiği anlaşılmaktadır.

## 5.9 Maksimum Güç Noktası Takip Teknikleri ve Karşılaştırılmaları

Maksimum güç noktası takip edici sistemlerin çok sayıda kontrol tekniği mevcuttur. Genel olarak bu kontrol teknikleri dolaylı kontrol ve doğrudan kontrol olmak üzere ikiye ayrılır. Aşağıdaki bölümlerde yaygın şekilde kullanılan kontrol tekniklerine değinilmiştir.

### 5.9.1 Dolaylı Kontrol Tekniği

Dolaylı kontrol tekniğinde güneş paneli çıkış gerçek gücü sürekli olarak hesaplanmaz. Bu teknik, güneş pili karakteristiğine dayalı olarak deneysel sonuçlarla oluşturulmuş tabloları, modül açık devre gerilimi, modül kısa devre akımı, ışınım şiddeti, modül sıcaklığı gibi değerleri doğrudan ya da matematiksel eşitlikler yardımı ile kullanarak MP noktasını tahmin etmeye dayalıdır. Bu yöntemle yaklaşık güç noktası bulunur. Dolaylı kontrol tekniği ikiye ayrılır (Salas vd., 2006).

#### 5.9.1.1 Sabit Gerilim Metodu

Sabit gerilim (CV) diğer ismi ile açık devre gerilim metodu güneş paneli açık devre gerilimini referans alan bir metottur. Araştırmalar  $V_{MPPT}$  geriliminin  $V_{oc}$  geriliminin doğrusal bir fonksiyonu olduğunu göstermektedir. Bu değer üretim tekniği, çevresel koşullar gibi etkenlere bağlı olarak polikristal modüllerde ortalama  $V_{oc}$  geriliminin %73-80 civarındadır. Genel bir ifade ile,

$$k = \frac{V_{MPPT}}{V_{OC}} \cong Sabit \quad (5.14)$$

elde edilir. Burada k sabiti değişmediğinden MPPT gerilimi ( $V_{MPPT}$ ) açık devre gerilimi ( $V_{oc}$ ) yardımı ile bulunabilir. Örnekleme işlemi çıkış yükü devrede değilken  $V_{OC}$  geriliminin okunması ile gerçekleşir. Sık örnekleme MPPT işleminin hassas bir şekilde sürdürülmesini, dolayısı ile hata oranını azaltacaktır (Kaiser vd., 2006). Şekil 5.16'da sabit gerilim metodunun akış diyagramı görülmektedir.



Şekil 5.16 Sabit gerilim metodu akış diyagramı (Özdemir, 2007)

Sabit gerilim metodu oldukça basit, karmaşık devreler gerektirmeyen, ucuz ve kullanışlı bir yöntemdir. Ancak referans işareti oluşturabilmek için gereken  $V_{OC}$  gerilim bilgisini okuyabilmek için güneş panelinden yükü ayırma gerekliliğinin yükler için sorun teşkil etmesi, bu esnada güneş enerjisinden faydalanılamaması, gerçek MPPT işleminin sürdürülememesi olumsuz etkileridir (Caudhari, 2005). Sistem güvenilirliği ve yüklerin devreden çıkarılmasını önlemek amacı ile aynı özellikte bir hücre örnekleme elemanı olarak kullanan sistemlerde mevcuttur. Bu durumda bir hücre sürekli devre dışı kalmaktadır.

### 5.9.1.2 Sabit Akım Metodu

Sabit akım metodu (kısa devre akım metodu) sabit gerilim metoduna benzer. Güneş paneli maksimum güç noktası akımı ( $I_{mppt}$ ), kısa devre akımı ( $I_{sc}$ ) ile orantılıdır. Bu değer üretim tekniği ve çevresel koşullara bağlı olarak değişmekle birlikte %85'ler civarındadır. (Salas vd., 2006).

Kısa devre akımı ile maksimum güç noktası akımı arasındaki orantısal k sabiti sıcaklık ve ışınım değişikliğinde korunur. Kısa devre akımı ile MPPT akımı arasındaki bağıntı,

$$I_{mppt}(E) = k_2 \times I_{sc}(E) \quad (5.15)$$

olarak ifade edilir. (5.15)'den yararlanılarak  $I_{MPPT}$  bulunur ve (5.16)'da ki akım kontrollü dönüştürücünün referans işareti oluşturulur (Noguchi vd., 2002).

$$I_{ref} = I_{mppt} \quad (5.16)$$

Kısa devre akım metodu basit ve karmaşık devreler gerektirmemesine rağmen kısa devre akımının ölçülmesi gerekliliği, bu esnada enerji kaybı,  $k_2$  sabiti belirleme işlemi ve panel yüzeyinde meydana gelebilecek kirlilik v.b. sebeplerden kaynaklanan  $k_2$  sabiti sapmaları bu yöntemin olumsuz etkilerindedir (Özdemir, 2007)

## 5.9.2 Doğrudan Kontrol Tekniği

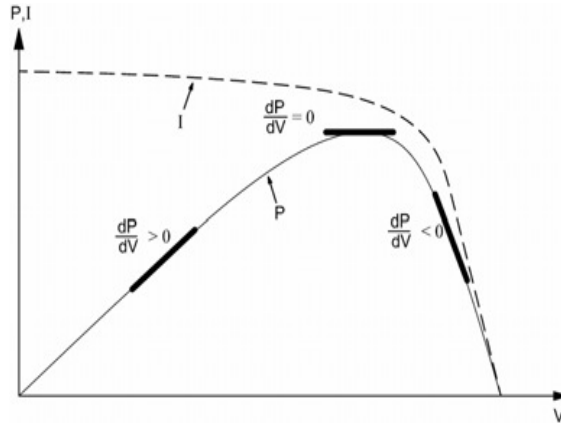
Bu teknikte çalışma noktalarının değiştirilmesiyle en uygun nokta yakalanmaya çalışılır. Uygun noktanın yakalanması açısından sıcaklık, ışınım şiddeti gibi değişkenlerden etkilenmemesi en önemli avantajıdır.

### 5.9.2.1 Değiştir Gözle Metodu

Güneş pili sistemine deneme amaçlı verilen gerilim artırılıp azaltılarak çıkış gücünde meydana gelen değişimlere göre karar verilmesini sağlayan metottur. Eğer güç, verilen gerilim ile artıyorsa bir sonraki döngüde ters yönde gerilim verilir. Bu metot tepe tırmanma (Hill climbing) olarak da adlandırılmaktadır. En yaygın şekilde kullanılan metottur. Çünkü kontrol parametreleri az ve geri beslemesi kolay yapılabilir. Ancak güneş ışınımının hızla değiştiği durumlara karşı tepkisinin yavaş olması ve maksimum güç noktasını yanlış yönde araması dezavantajlarıdır. Sistem sürekli olarak değiştir gözle işlemini yaptığından maksimum güç noktasına ulaştığında burada sabitlenmez. Maksimum güç noktası civarında sürekli olarak osilasyon yapar ve sistemde bir miktar güç kaybı olur (He vd., 1998).

### 5.9.2.2 Artan İletkenlik Metodu

Artan iletkenlik metodunun temeli güneş paneli çıkış gücü eğiminin sıfır olduğu yeri maksimum güç noktası, pozitif olduğu yeri maksimum güç noktasının solu, negatif olduğu yeri maksimum güç noktasının sağı olarak belirlemesine dayalıdır (Esrarn ve Chapman, 2007). Şekil 5.17.'de artan iletkenlik yöntemi çalışma koşuluna ait grafik verilmiştir (Vechiu vd., 2004).



Şekil 5.17 Artan iletkenli metodu çalışma eğrisi

Şekil 5.17'deki eğriden yararlanılarak aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$\frac{dP}{dV} = 0 \rightarrow \text{MP noktasında} \quad (5.17)$$

$$\frac{dP}{dV} > 0 \rightarrow \text{MP noktasının solunda} \quad (5.18)$$

$$\frac{dP}{dV} < 0 \rightarrow \text{MP noktasının sağında} \quad (5.19)$$

Artan iletkenlik metodunun en önemli avantajı hızlı değişen ortam koşullarına uyum sağlayabilmesidir. Ayrıca maksimum güç noktasında meydana gelen osilasyon değişir gözle metoduna göre çok daha azdır (He vd., 1998). Bununla birlikte artan iletkenlik metodu karmaşık ve pahalıdır.

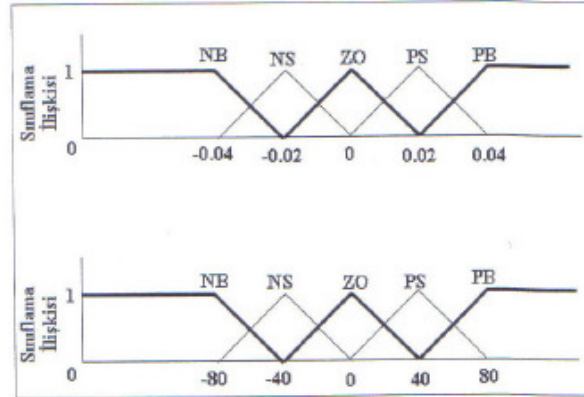
### 5.9.2.3 Bulanık Mantık Metodu

Maksimum güç noktası takip edicilerde bulanık mantık kontrolü yakın zamanda kullanılmaya başlanmıştır. Güneş panelinden aldığı  $dU$ ,  $dP / dI$  ve  $D(dP / dI)$  gibi giriş değişkenleri bulanık mantık yönteminin dil yapısına dönüştürüp işlem yaptıktan sonra sonuçlara göre maksimum güç noktası takibi yapan yöntemdir. Giriş değişkenleri, bulanık mantığa ait dil yapısında PB (Pozitive Big), PS (Pozitive Small), ZO (Zero), NS (Negative Small) veya NB (Negative Big) şeklinde tanımlanır ve Çizelge 5.4 deki gibi oluşturulan kurallar tablosuna göre işleme tabi tutulur.

Çizelge 5.4 Bulanık mantık kurallar tablosu (Esrarn ve Chapman, 2007)

$\Delta E$	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	ZE	ZE	NB	NB	NB
NS	ZE	ZE	NS	NS	NS
ZE	NS	ZE	ZE	ZE	PS
PS	PS	PS	PS	ZE	ZE
PB	PB	PB	PB	ZE	ZE

İşlemlerin bir sonuca bağlanması için kontrol algoritmasında bulanıklaştırma, bulanıklaştırmayı sona erdirmeye ve sonuç çıkarma gibi sınıflar bulunmaktadır. Bulanıklaştırma periyodunda Şekil 5.18’de değişimi gösterilen hata fonksiyonu ve hata değişim fonksiyonu meydana getirilir ve hesaplanır. Sonuç çıkarma periyodunda önceden belirlenmiş sonuç çıktılarına göre uygun bulanık mantık denklemleri geliştirilir (Nakir, 2007). Bulanıklaştırmayı sona erdirmeye periyodunda Çizelge 5.2’deki kurallar yardımıyla sistemin vereceği cevaplara göre sonuçlar elde edilir. Bu yöntemin diğer algoritmalara göre avantajı, güvenilir ve yüksek cevap hızına sahip olmasıdır (Nizam, 2004).



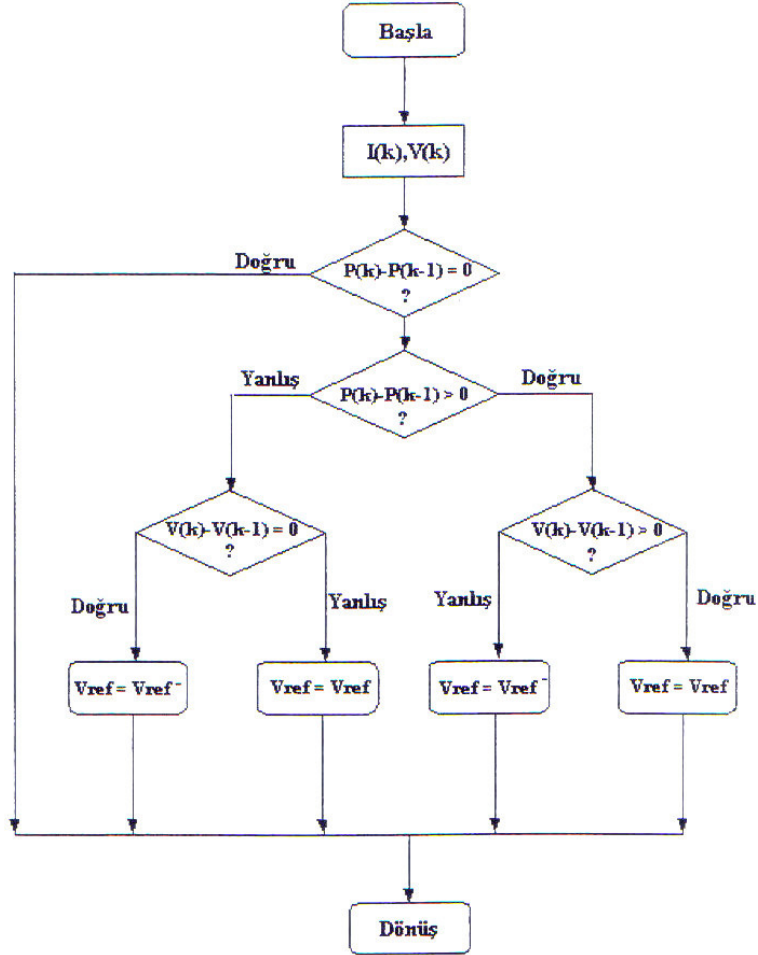
Şekil 5.18 Hata fonksiyonu ve hata fonksiyonunun değişimi

#### 5.9.2.4 Dinamik Bozulma Metodu

Güneş panellerinin karakteristiği ile panel çıkış değerlerini karşılaştırarak maksimum güç noktası takip metodudur. Bu yöntemde çıkış değerleri için üç sınıf söz konusudur. Bu sınıflar, akım değerinin optimum güç seviyesindeki değerinden az olduğu, çok olduğu ve optimum güç seviyesindeki değerine eşit olduğu durumlardır. Bu durumlardan eğer akım değeri



optimum güç seviyesinden az ise güç ve gerilim negatif, akım seviyesi optimum güç seviyesindeki değerinden fazla ise güç ve gerilim pozitif ve sistem maksimum güç noktasında ise güç ve gerilim sıfır kabul edilir (Nakir, 2007).



Şekil 5.19 Dinamik bozulma metoduna ait akış diyagramı

### 5.9.3 MPPT Tekniklerinin Karşılaştırılması

Dolaylı kontrol teknikleri basit yapıları ve maliyet yönünden avantajlı olmalarına karşın genelde MP noktasını doğru bir şekilde takip edemezler. Ayrıca örnekleme esnasında yüklerin devreden çıkartılması ve bu süre zarfında enerjinin kullanılmaması gibi zayıflıkları mevcuttur. Önceleri kullanışlı yöntemler sınıfında olsalar da günümüzde sayısal elektroniğin gelişimi ve yüksek hızlı mikro denetleyicilerin üretilmesi doğrudan kontrol tekniği uygulanabilen sistemleri ön plana çıkarmıştır. Dolaylı kontrol teknikleri maliyetinin düşük

olması sebebi ile halen küçük güçlü sistemler için kullanışlı yöntemler sınıfındadır.

Doğrudan kontrol tekniği ile denetlenen sistemler atmosferik koşullar, yaşlanma gibi dolaylı kontrol tekniklerinin etkilendiği değişkenlerden etkilenmez, MP noktasını doğru bir şekilde takip ederler. Ancak sistem maliyeti ve denetim devreleri biraz daha karmaşıktır. Çizelge 5.5'te kontrol metotlarının verim yönünden karşılaştırılması verilmiştir (Hohm ve Ropp, 2002).

Çizelge 5.5 MPPT metotlarının verimlerinin karşılaştırılması

Atmosfer Durumu	Değiştir Gözle		Artan İletkenlik		Sabit Gerilim	
	Gün	$\eta$ MPPT	Gün	$\eta$ MPPT	Gün	$\eta$ MPPT
Açık	20	98,7	17	98,7	20	90,4
Kısmen bulutlu	14	96,5	11	97	10	90,1
Bulutlu	9	98,1	11	96,7	6	93,1
Hepsi	43	97,8	39	97,4	36	91,2
Benzetim	99,3		99,4		93,1	

Çizelge 5.6'da da MPPT metotlarının temel özellikleri görülmektedir (Esrām ve Chapman, 2007).

Çizelge 5.6 MPPT metotlarının temel özellikleri

MPPT Tekniği	PV Panel Bağımlılığı	Gerçek MPPT	Analog & Sayısal	Periyodik Ayar	İzleme Hızı	Karmaşık	Gerekli Bilgi
Değiştir Gözle	Hayır	Evet	A&S	Hayır	Değişken	Düşük	Akım, gerilim
Artan İletkenlik	Hayır	Evet	S	Hayır	Değişken	Orta	Akım, gerilim
Sabit Gerilim	Evet	Hayır	A&S	Evet	Orta	Düşük	Gerilim
Sabit Akım	Evet	Hayır	A&S	Evet	Orta	Orta	Akım
Bulanık Mantık	Evet	Evet	S	Evet	Hızlı	Yüksek	Değişken

### 5.10 Maksimum Güç Noktası Takip Edici Pspice Simulasyonu

Bilgisayar benzetimi güç elektroniğinin öğrenilmesine yardımcı olan bir araçtır. Aynı zamanda araştırma çalışmalarında yeni bir devrenin analizi amacıyla kullanılır ve devrenin daha iyi anlaşılmasını sağlar. Sanayide ise, laboratuvarında devreyi gerçekleştirip devre parametrelerinin etkilerinin deneylerle incelenmesi yerine, aynı işi bilgisayar modeli üzerinde çok daha hızlı yaptığı için, tasarım süresinin kısaltılması amacıyla kullanılır (Mohan vd., 2003).

PSPICE (Simulation Program with Integred Circuit Emphais) programı elektronik devrelerin bilgisayar ortamında benzetimi için geliştirilmiş önemli programlardan biridir. Bu program MicroSim şirketi tarafından geliştirilmiştir. PSPICE, elektriksel devre dizaynlarını oluşturmada önce, deneme yapılmasına yardımcı olur. Hiçbir donanıma dokunmadan gerekli olan değişikliklerin yapılmasına müsaade eder. Son yıllarda yaygın kullanım alanı bulmuştur.

Şekil 5.20’de akım geri beslemeli MPPT devresinin pspice devresi görülmektedir (Fernandez vd., 2007). Simulasyonda kullanılan ana bloklar şunlardır; güneş paneli pspice modeli, DC/DC ortalama model ile temsil edilen MPPT güç katmanı, standart PWM düzeltici kullanılan MPPT kontrolörü, filtre katmanları, akü dizisi pspice modeli ve akü dizisine paralel bağlanmış dirençten oluşan yüküdür. MPPT konfigürasyonu şöyle çalışmaktadır. Yükün gücü;

$$P_L = V_{aku} \times I_{aku} = V_{aku} \times I_{ph} \quad (5.20)$$

ile ifade edilir.  $V_{aku}$  ve  $I_{aku}$  akü gerilimi ve akımı,  $I_{ph}$  güneş panelinin ürettiği akım ve  $D$  dönüştürücünün bağıl iletim süresidir. Güneş pili geriliminin fonksiyonu olarak,  $p=f(v)$ , maksimum mevcut güç ifadesi aşağıdaki gibi yazılır. Bu fonksiyonun düz bir eğri olduğu varsayılmıştır,

$$P_{max} = P_0 + K \times (V_{conv} + V_D) = P_0 + K \times \left( \frac{V_{aku}}{D} + V_D \right) \quad (5.21)$$

şeklinde ifade edilmiştir. Bu bağıntıda,  $K$  eğrinin eğimi,  $P_0$  panelin kısa devre gücü,  $V_{conv}$  DC-DC dönüştürücünün giriş gerilimi ve  $V_d$  ise panelin çıkış diyotunun iletim halindeki gerilimidir. Maksimum gücün güneş panelinden çekilmesini sağlamak amacıyla, dönüştürücünün bağıl iletim süresi aşağıda verilen bağıntı ile dinamik olarak ayarlanmalıdır:

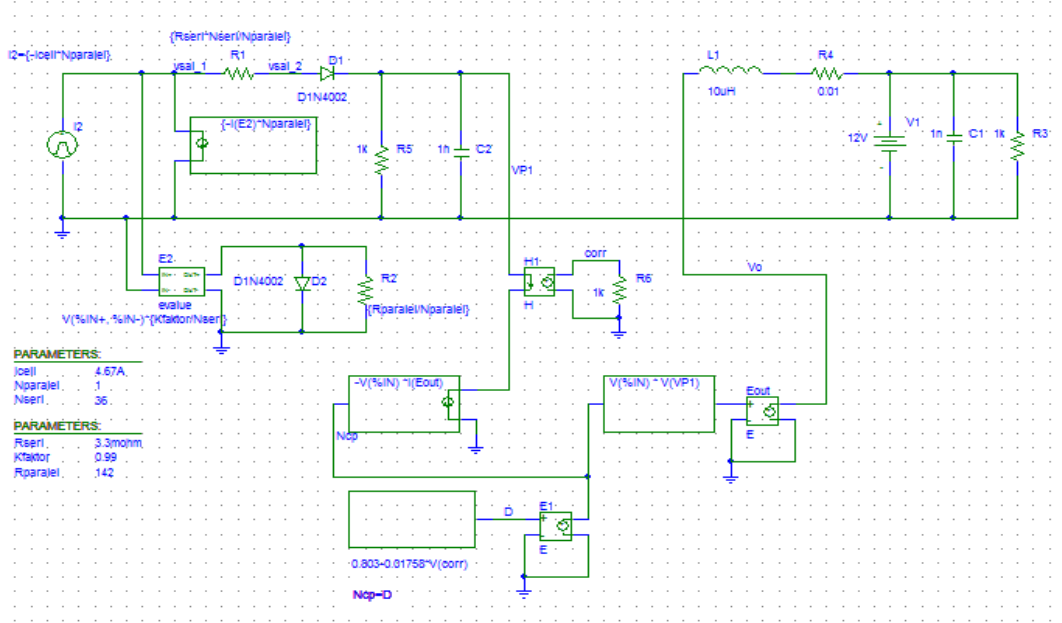
$$D = -\frac{K \times V_{aku}}{P_0 + K \times V_D} + \frac{V_{aku} \times I_{ph}}{P_0 + K \times V_D} = D_{\min} - N \times I_{ph}$$

$$D_{\min} > 0$$

$$N > 0$$

(5.22)

Burada N, orantısal bir sabit ve  $D_{\min}$  ise minimum bağıl iletim süresidir. Bu bağıntı, gerekli ani bağıl iletim süresini güneş paneli tarafından üretilen akımın fonksiyonu olarak verir.

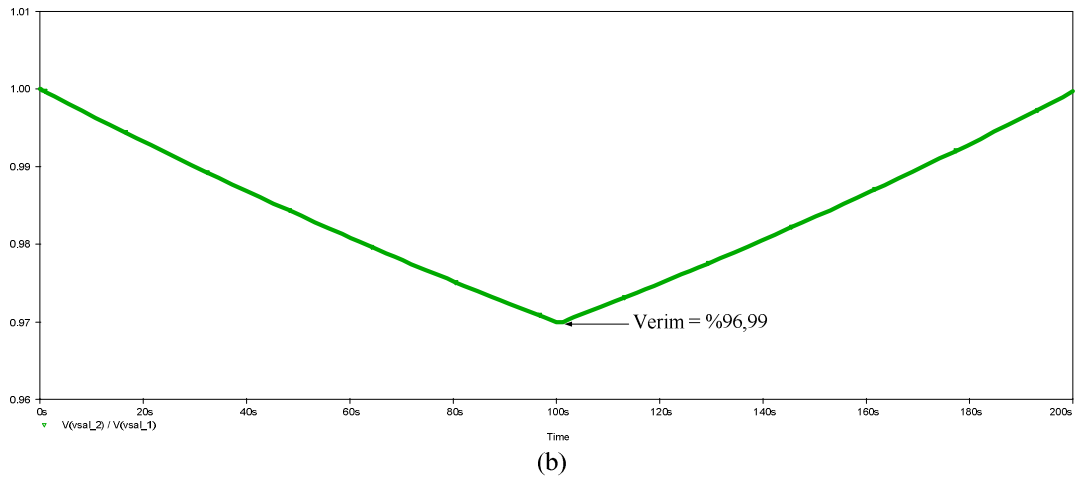
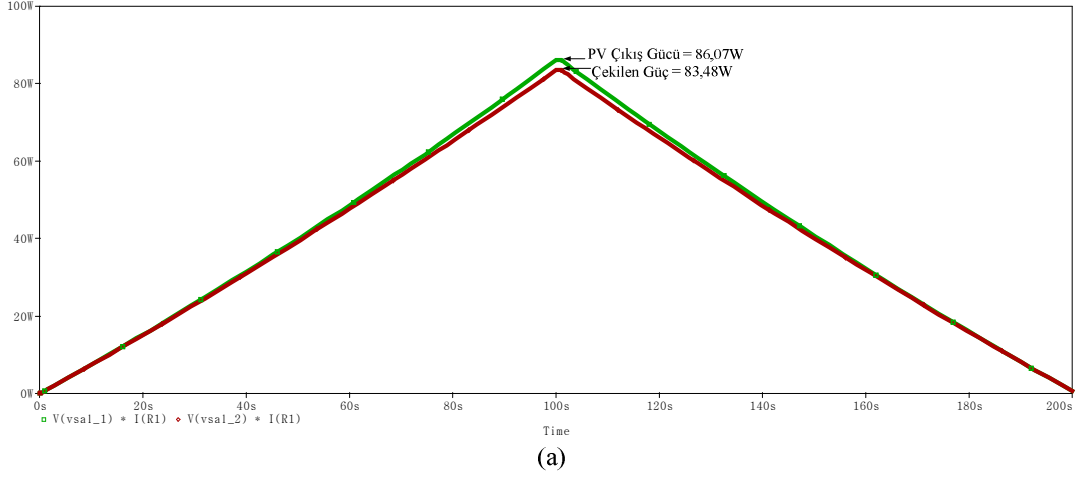


Şekil 5.20 Akım geri beslemeli MPPT devresi

Simulasyon, Isofton I-75S/12 (Çizelge 5.7) güneş modülü için çalıştırılmıştır. Güneş ışığı şiddetindeki değişimler üçgen dalga-şekli ile simüle edilmiştir.

Çizelge 5.7 Isofton I-75S/12 güneş modülünün elektriksel karakteristikleri

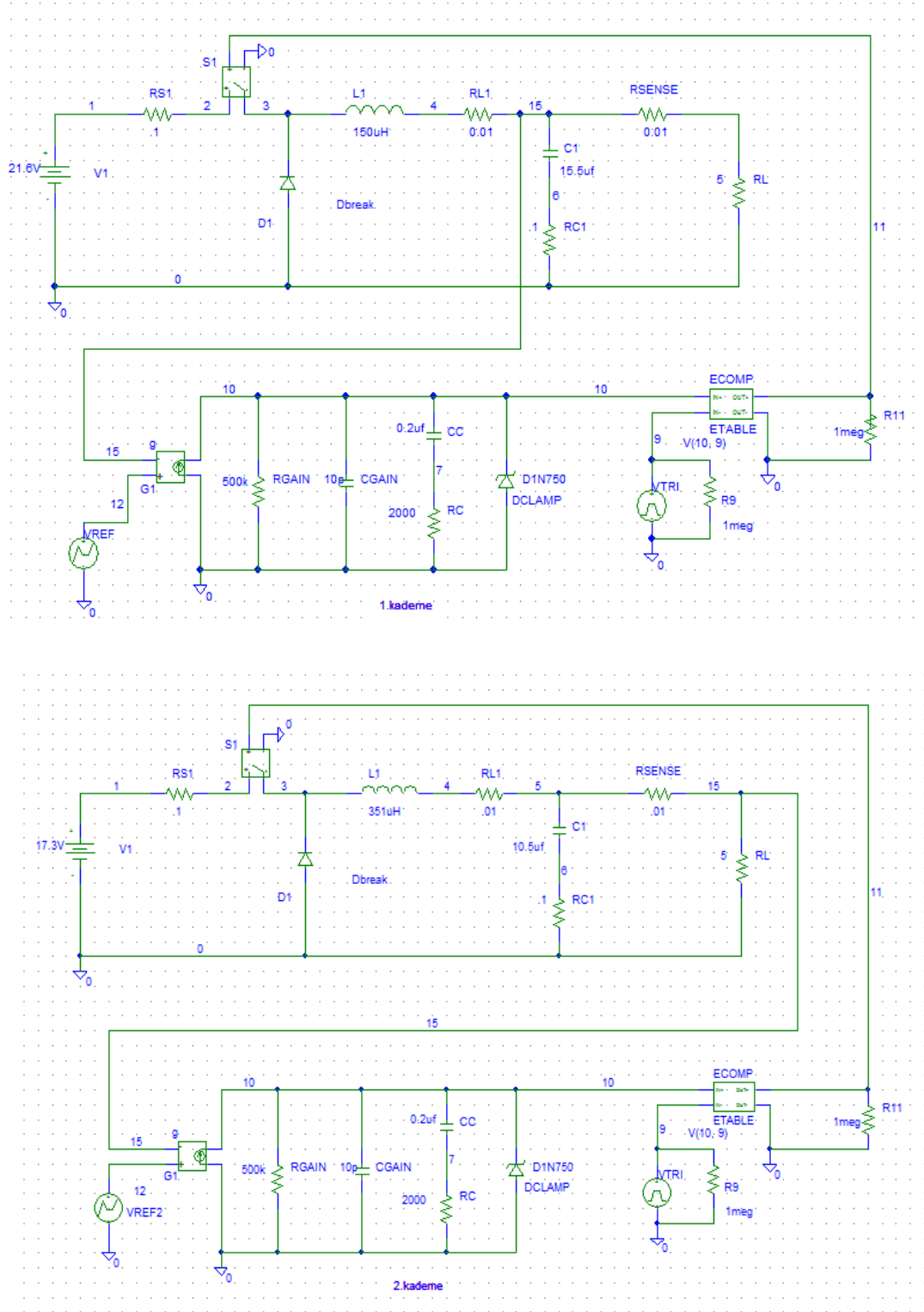
Elektriksel Karakteristikleri	
Hücre sayısı	36 seri
Açık devre gerilimi ( $V_{oc}$ )	21,6V
Maksimum güç gerilimi ( $V_{pm}$ )	17.3V
Kısa devre akımı ( $I_{sc}$ )	4,67A
Maksimum güç akımı ( $I_{pm}$ )	4,34A
Maksimum güç ( $P_{max}$ )	75W $\pm$ %15



Şekil 5.21 Akım geri beslemeli MPPT devresi (a) güç karakteristiği, (b) güç iletimine ait verim

Güneş dizininin teorik maksimum mevcut gücü 86,07 W'dır. Çekilen güç 83,48 W ve MPPT verimi ise % 96,99 'dur ve ideal % 100 verime çok yakın bir değerdir (Şekil 5.21).

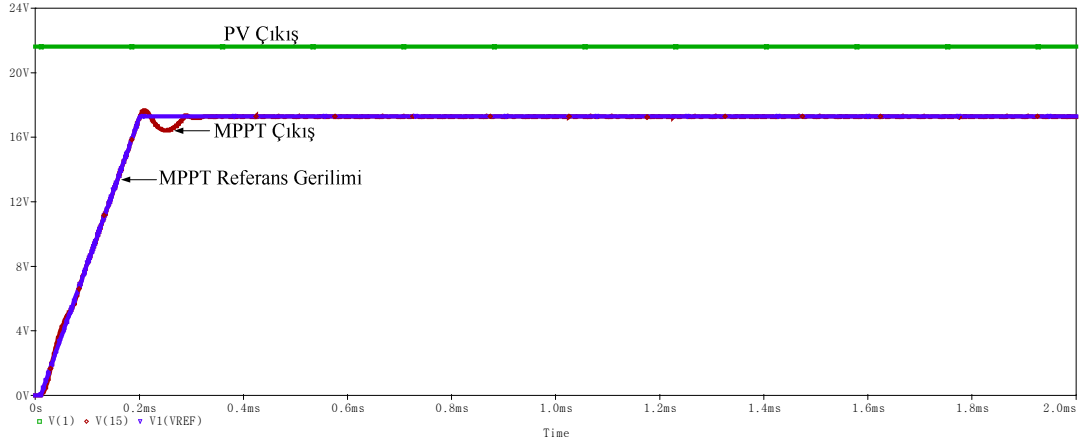
Şekil 5.22'de DC-DC düşürücü dönüştürücü içeren iki kademe, hata amplifikatörü ve PWM üretici bölümden oluşan MPPT'nin psipice devresi görülmektedir.



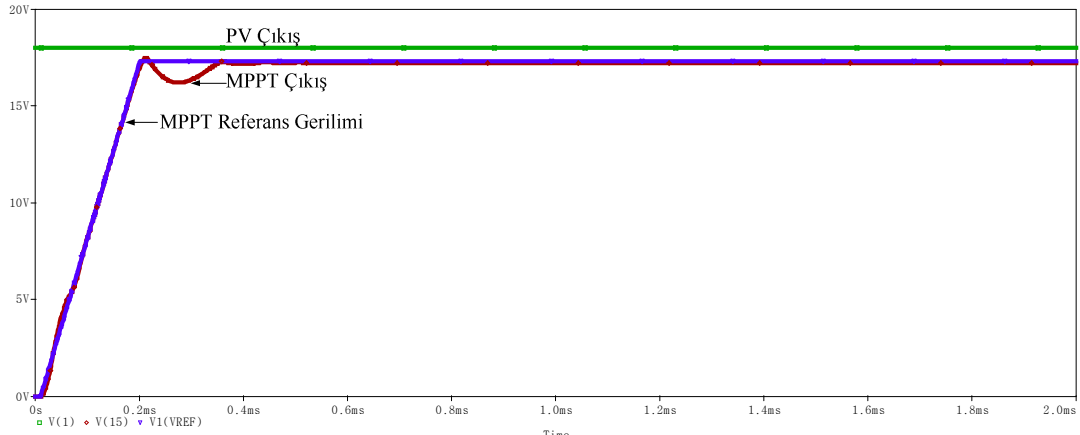
Şekil 5.22 İki kademeli MPPT

İlk kademe olarak besleme kaynağının çıkış gerilimi güneş modülünün en yüksek güç noktası

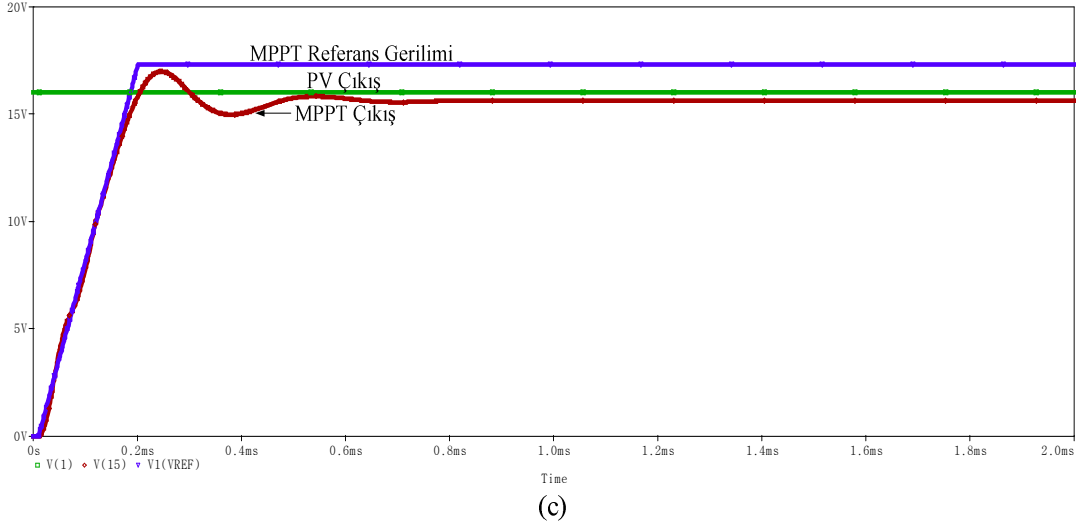
gerilim değeri olduğu daha önceden tahmin edilmiş olan 17,3V değerindedir (Omole, 2006). Simulasyonu kolaylaştırmak adına, güneş modülünün çıkış gerilimi, açık devre geriliminden (21,6V) açık devre geriliminin %75'ine kadar (16V) ayrı ayrı DC gerilimler olduğu farz edilmiştir (Omole, 2006). İlk basamak olan MPPT'nin farklı giriş gerilimlerdeki simulasyon sonuçları Şekil 5.23'te gösterilmiştir.



(a)



(b)

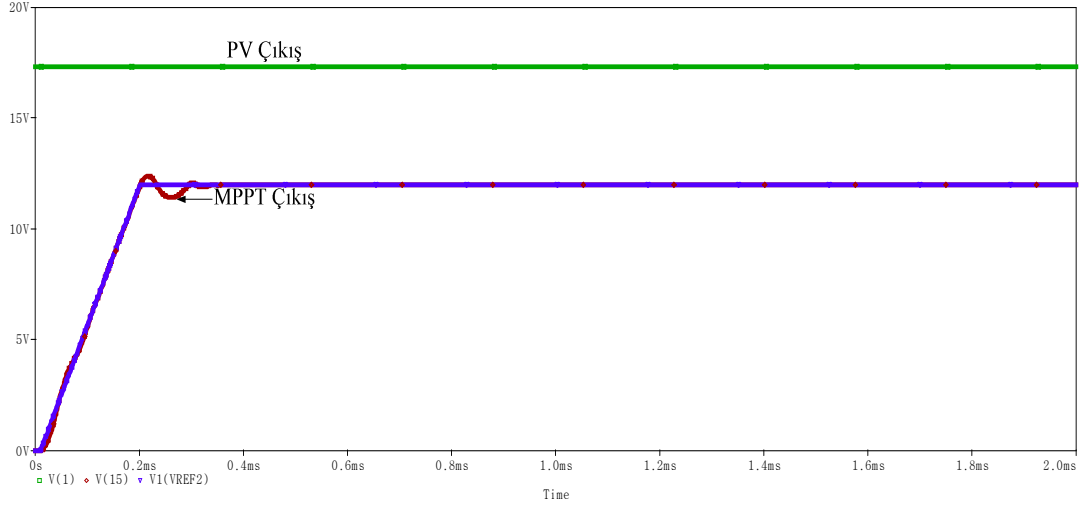


Şekil 5.23 Farklı giriş gerilim değerlerinde 1.kademe MPPT karakteristiği (a)  $V_{pv}=21,6V$ ,  $V_{mppt}= 17,3V$ , (b)  $V_{pv}=18V$ ,  $V_{mppt}= 17,3V$  ve (c)  $V_{pv}=16V$ ,  $V_{mppt}= 15,6V$

Şekil 5.23 de gösterildiği üzere, 17,3V dan yüksek ilk iki PV çıkış gerilimli simülasyon için, MPPT en yüksek gerilim olan 17,3V çıkış güç noktasını sağlayabilmektedir. Buna karşın, PV çıkış geriliminin 16V olduğu yerde, MPPT ancak PV modülün çıkış gerilimine çok yakın değerde (15,6V) bir çıkış gerilimi sağlayabilmektedir. Buna göre bir nevi MPPT'nin sadece giriş geriliminden daha düşük seviyede çıkış gerilimi sağlayabilen bir düşürücü dönüştürücü tipi olması beklenir. Bu yüzden eğer ki sıcaklık artışı ya da atmosferik koşullar nedeniyle güneş modülü çıkışı 17V'un altına düşerse, MPPT yalnızca PV modül tarafından üretilen gerilime çok yakın bir gerilim çıkışı verecektir.

MPPT'nin ikinci kademesi, çıkış gerilimi düzeltme kademesidir. MPPT, yük durumundan bağımsız olarak, bataryaya 12V'luk sabit şarj gerilimi sağlayabilmektedir. MPPT'nin ikinci kademesinin bir simülasyonu Şekil 5.24'te gösterilmektedir.





Şekil 5.24 2.kademedeki MPPT karakteristiği  $V_{pv}=17,3V$ ,  $V_{mppt}= 12V$

## 6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Doğa ve insanlar üzerinde olumsuz etkileri bulunan kömür, petrol gibi enerji kaynaklarının bugünkü tüketim hızı devam ettikçe belirli bir süre sonra tükeneceği bilinmektedir. Bu yüzden araştırmacılar yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmişlerdir. Bu çalışmada yenilenebilir enerji kaynağı olarak güneş enerjisi ele alınmıştır.

Ülkemiz coğrafi konum olarak ılıman kuşakta bulunmaktadır. Yani güneş enerjisi yönünden büyük bir potansiyele sahiptir. Güneş enerjisi yıllardan beri ısıtma ve sıcak su elde etmek amacıyla bir çok uygulamada kullanılmasına rağmen güneş enerjisinden direkt olarak elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerin kullanımı daha yenidir. Bugün güneşten doğrudan elektrik enerjisi elde etmek için güneş pilleri kullanılmaktadır. Ancak günümüzde pil verimlerinin düşük fiyatlarının yüksek olması kullanım alanlarını sınırlamaktadır.

Güneş pili verimini etkileyen en önemli faktörler sıcaklık ve ışınımdır. Güneş pilinin simülasyonu yapılarak, I-V ve P-V karakteristikleri incelenmiş ve sıcaklık arttıkça güneş pili veriminin önemli ölçüde düştüğü anlaşılmıştır. Bununla birlikte ışınımda ki artış-azalışın akımla doğru orantılı gerilimle logaritmik olarak değiştiği gözlenmiştir. Ayrıca bu çalışmada, güneş pili sistemlerinde enerji dönüşüm işleminin etkili bir biçimde uygulanabilmesini sağlayan maksimum güç noktası takip ediciler incelenerek sistem simülasyonu yapılmıştır. Maksimum güç noktası takip edici kullanılmayan sistemlerde verimin daha düşük olduğu anlaşılmıştır.

Mpmp yapısında kullanılan DC-DC dönüştürücüler incelenmiş ve simülasyonları yapılmıştır. Ayrıca temel DC-DC dönüştürücüler verim yönünden karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçlardan düşürücü ve yükseltici tip dönüştürücülerin daha verimli oldukları anlaşılmıştır.

Bütün bunların yanı sıra güneş pili sistemlerinin en önemli dezavantajı ilk kurulum maliyetinin çok yüksek olması ve enerji dönüşüm veriminin istenen düzeylerde olamamasıdır. Bu nedenlerden ötürü ülkemizde yaygın olarak kullanılamamaktadır. Ancak, karşılaştırma yapılırken çevre ve uzun vadede çözülen enerji sıkıntısı dikkat edilmesi gereken unsurlardır. Bu yüzden yenilenebilir enerji kaynaklarına bir an önce gereken önem verilerek, devlet ve özel sektör bazında yatırımlar yapılması gerekmektedir. Ayrıca, gelişen teknolojiyle birlikte güneş pili veriminin artacağı ve maliyetinin düşeceği beklenmektedir.

## KAYNAKLAR

- Al-Ismaily, H.A. ve Probert, D., (1998), "Photovoltaic Electricity Prospects in Oman", *Applied Energy*, 59: 97-124.
- Altın, M., (2004), "Fotovoltaik Malzeme ile Elektrik Üreten Cepheler ve Çatılar", 1.Ulusal Çatı&Cephe Kaplamalarında Çağdaş Malzeme ve Teknolojiler Sempozyumu, 2-3 Nisan 2004, Çatıder, İstanbul.
- Araujo, R.G., Kruter, S., Onnekin, K. ve Quaschnig, V. (2001), *Photovoltaic Energy Systems*, TU, Berlin.
- Aydınöz, C., (1996), "Güneş Enerjisi, Yararlanma Yöntemleri ve Taşıtlara Uygulanabilirliğinin İncelenmesi", YTÜ FBE Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Batcheller, P., (1993), "Microprocessor controlled maximum power point tracker for photovoltaic system", Ms thesis B.S., Devry Institute of Technology, Alberta.
- Batman, M. A., (2001), Elektrik Üretimi için Güneş Pillerinin Kullanımında Verimi Arttırıcı Yeni Bir Yöntem, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, İstanbul.
- Bodur, H., (2005), Güç Elektroniklerinin Endüstriyel Uygulamaları 1, Ders Notu, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Boes, E.G. (1981), *Fundamentals of Solar Radiation*, in *Solar Energy Handbook*, Chapter 2, New York, McGraw-Hill.
- Caudhari, V., (2005), "Automatic Peak Power Tracker Solar PV Modules Using dSPACER Software" Yüksek Lisans Tezi, Maulana Azad Institute of Technology, Bhopal.
- Cheremisinoff, P. N. ve Dickinson, W. C., (1980), *Solar Energy Technology Handbook*, Part A Engineering Fundamentals, 270 Madison Avenue, New York, 865p.
- DIN 5034, (1993), Teil 2, Tageslkt in Innenraumen-Gmndlagen, Berlin.
- Dunlop, J.P., (1997), "Batteries and Charge Control in Stand-Alone Photovoltaic Systems Fundamentals and Application", Sandia National Laboratories Photovoltaic Systems Applications Dept., Albuquerque, NM.
- Erickson, R.W., (1999), "DC-DC Power Converters", *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, 5: 53-63.
- Ertürk N., (1997), "Simulation und experimentelle Untersuchugen von Stationaren und Nachgeführten Photovoltaiksystemen", PhD Thesis, Berlin Technical University, ISBN:3-89574-268-6
- Esrām, T., Chapman, P. L., (2007), "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques" *IEEE Transactions On Energy Conversion*, 22(2): 439-449.
- Glasner, I., ve Appelbaum, J., (1996), "Advantage Of Boost vs. Buck Topology For Maximum Power Point Tracker In Photovoltaic Systems", 19th IEEE Convention of Electrical and Electronics Engineers, Jerusalem, Israel, 355-358.
- He, W., Markwart, T. ve Arnold, R., (1998) "Islanding of grid-connected PV generators experimantal results", *Proc. of 2nd World Conference and Exhibition on PV Solar Energy Conversion*, pp. 2772-5, Vienna, Australia

- Fernandez, H., Martinez, A, Guzman, V., ve Gimenez M.I., (2007), "A Simple, Low Cost Design Using Current Feedback to Improve the Efficiency of a MPPT-PV System for Isolated Locations", 13th International Power Electronics and Motion Control Conference
- Ho, H. ve Lu, C., (2000), Study of Nonlinear Phenomena in Switching DC/DC Converters, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong SAR, China, 1-166
- Hohm, D. P., Ropp, M. E., (2002), "Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms", Progress In Photovoltaics: Reserch and Applications, 11(1): 47-62
- Kaiser, S., Aditya S. ve Mazumder, R., (2006), Performance Evaluation of a MPPT for Solar Electric Vehicle Using Artificial Neural Network, Daffodil International University, pp. 45-49.
- Kuo, Y. C., Liang, T. J., ve Chen, J. F., (2001), "Novel Maximum Power Point Tracking Controller for Photovoltaic Energy Conversion System", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.48, No.3.
- Lindgren, B., (2002), "Power Generation, Power Electronics and Power Systems Issues of Power Converters for Photovoltaic Applications, Chalmers University Of Technology", Thesis for The Degree of Doctor of Philosophy, Göteborg, Sweden
- Liu, C., Johnson, A., Lai, J. S., (2004), "A Novel Phase-shifting Circuit Using Digital First-In First-Out (FIFO) for Multiphase Power Converter Interleaved Control", IEEE Workshop on Computers in Power Electronics, 2004, Urbana, Illinois, USA, 80-84.
- Luis, C., ve Silvestre, S., (2002), Modelling Photovoltaic Systems using Pspice, Barcelona, Spain.
- Markvart, T., (1994), Solar Electricity, J. Wiley and Sons, Chichester, UK.
- Mohan, N., Undeland, T.M. ve Robbins, W.P., (2003), Güç Elektroniği Çeviriciler Uygulamalar Ve Tasarım, (Çev: Nejat Tuncay, Metin Gökaşan, Seta Boğosyan), Literatür Yayınları, 874 p., İstanbul.
- Mohan, N., Undeland, T. M. ve Robbins, W. P., (1989), Power Electronics; Converters, Applications and Design, John Wiley and Sons Publication, 667p., USA.
- Nakir, İ., (2007), "Fotovoltaik Güneş Panellerinde GTS ve MGTS Kullanarak Verimliliğin Arttırılması", Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Nema, R.K., Nema, S., ve Agnihotri, G., (2009), "Computer Simulation Based Study of Photovoltaic Cells/Modules and Their Experimental Verification", International Journal of Recent Trends in Engineering, Vol 1, No.3.
- Nizam, O., (2004), "Güneş Enerjisi Sistemlerinde Maksimum Güç Transferi", İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Noguchi, T., Togashi, S. ve Nakamoto, R.,(2002), "Short-Current Pulse-Based Maximum-Power-PointTracking Method for Multiple Photovoltaic-and- Converter Module System", IEEE Transactions On Industrial Electronics, 49(1): 217-223.
- Okyay Y., (2006), "Kütahya Koşullarında Fotovoltaik Sistemin Deneysel İncelenmesi ve Ekonomik Analizi", Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri.Enstitüsü, Kütahya.

- Omole, A., (2006), “Analysis, Modeling and Simulation of Optimal Power Tracking of Multiple-Modules of Paralleled Solar Cell Systems”, Master Thesis, The Florida State University College Of Engineering, Florida.
- Özdemir, Ş., (2007), “Fotovoltaik Sistemler İçin Mikrodenetleyicili En Yüksek Güç Noktasını İzleyen Bir Konvertörün Gerçekleştirilmesi”, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Özgöçmen, A., (2007), “Güneş Pilleri Kullanarak Elektrik Üretimi”, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Partain, L.D., (1995), Solar Cell and Their Applications, Wiley, New York.
- Pressman, A.I., (1998), Switching Power Supply Design, Second Ed. McGraw-Hill, pp. 105-140.
- Rashid, M. H., (1988), Power Electronics, p. 196-199, Prentice-Hall, Inc.
- Reis, A.M., Coleman, N. T., Marshall, M. W., ve Lehman, Chamberlin, (2002), P. A.,C. E., “Comparison Of PV Module Performance Before And After 11-Years Of Field Exposure”, 29st IEEE Photovoltaic Specialist Conference, New Orleans, Louisiana, USA, 1432-1435
- Ronald, M.D. ve David, A.J.R., (2001), Understanding Batteries, Automic Energy Research Establishment, Victoria, Australia.
- Salameh, Z.M., Mulpur A. ve Fouad D., (1988), "Two-Stage Electrical Array Reconfiguration Controller for PV-Powered Water Pump", IEEE PV Specialists Conference, p. 399-404,19BS.
- Salas, V., Olías, E., Barrado, A. ve Lázaro, A., (2006), “Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems”, Solar Energy Materials and Solar Cells, 11: 1555–1578.
- Tanrıöven, M., (2009), Rüzgar ve Güneş Enerjili Güç Sistemleri, Ders Notu, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Türel E., (2008), “Çatı Malzemesi Olarak Güneş Enerjisi Sistemleri”, Ulusal Çatı & Cephe Kaplamalarında Çağdas Malzeme ve Teknolojiler Sempozyumu, 13-14 Ekim 2008, İTÜ Mimarlık Fakültesi Taşkışla, İstanbul.
- Ural, E.B., (2007), “Fotovoltaik Enerji ve Taşıtlarda Kullanımı”, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Vechiu, I., Camblong, H., Tapia, G., Dakyo, B. ve Nichita, C., (2004), “Dynamic Simulation Model of a Hybrid Power System: Performance Analysis”, 2004 EWEC Conference, 22 - 25 November 2004, London.
- Xiangjun Z., Hankui L. ve Dianguo X., (2003), “Analysis and Design of the Flyback Transformer”, IECON '03. The 29th Annual Conference of the IEEE Volume 1, 2-6 Nov. 2003 Page(s):715 – 719.
- Wang, S., Izaki, K., Hirota, I., Yamashita, H., Omori, H. ve Nakaoka, M., (1998), “Induction-Heated Cooking Appliance Using New Quasi-Resonant ZVS-PWM Inverter with Power Factor Correction”, IEEE Transactions On Industrial Electronics, vol. 34, no. 4, 705-712.

**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarihi	07.09.1981	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1995-1999	İstanbul Haydarpaşa Lisesi
Lisans	2000-2005	Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik–Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2005-2010	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Makineleri ve Güç Elektroniği Programı

**Çalıştığı kurum**

2006-Devam ediyor İstanbul Valiliği  
İstanbul İl Özel İdaresi  
İmar Yatırım ve İnşaat  
Daire Başkanlığı