

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**FOTOVOLTAİK SU POMPALAMA SİSTEMİ TASARIMI VE
MODELLENMESİ**

VOLKAN PEREN

KOCAELİ 2016

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FOTOVOLTAİK SU POMPALAMA SİSTEMİ TASARIMI VE
MODELLENMESİ

VOLKAN PEREN

Prof.Dr. Feriha Erfan KUYUMCU
Danışman, Kocaeli Üniversitesi
Doç.Dr. Ali Bekir YILDIZ
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi
Doç.Dr. Nur BEKİROĞLU
Jüri Üyesi, Yıldız Teknik Üniversitesi


.....

.....

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 29.01.2016

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Dünya üzerindeki enerji talebinin günden güne artması, buna karşılık fosil yakıtların kısıtlı olması, çevre ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerinin bulunması, yüksek maliyete ve güvenlik sorunlarına sahip olması nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik çalışmalar ve yatırımlar giderek artmakta ve yoğunlaşmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının temiz, güvenli, sürdürülebilir, az bakım gerektirmesi gibi avantajları insanlığın artan enerji ihtiyacına yönelik güçlü bir alternatif olmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan Güneş enerjisinden elektrik üretimine dayanan fotovoltaik sistemler (FV) özellikle şebeke elektriğinin olmadığı bölgelerdeki uygulamalar için caziptir. Bu tarz uygulamaların başında tarım alanlarının sulanması amacıyla geliştirilen su pompalama sistemleri gelmektedir.

Bu çalışmada, fotovoltaik su pompalama sistemi tasarımı ve modellenmesi amaçlanmaktadır. Sistem tasarımı yapılırken, günlük su ihtiyacı ve suyu temin etmek için gerekli olan güç, sistem bileşenlerinin verimleri göz önüne alınarak hesaplanmaktadır. Sistem pompa ve motor, FV paneller ve güç dönüştürücülerinden meydana gelmektedir. Sistem tasarımı için gerekli matematiksel denklemler ile örnek bir model kurularak SIMULINK ortamında çalışması incelenmiştir.

Bu tezin hazırlanmasında beni yönlendiren, bana desteğini ve anlayışını esirgemeyen değerli hocam Prof.Dr. Feriha Erfan KUYUMCU'ya, teknik bilgi ve yardımlarından dolayı Dr. Çiğdem Gündoğan TÜRKER'e ve hayatımın her anında yardım ve destekleriyle yanımda olan aileme çok teşekkür ederim.

Ocak - 2016

Volkan PEREN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iv
TABLolar DİZİNİ	vi
SİMGELEr DİZİNİ VE KISALTMALAR	vii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
GİRİŞ	1
1. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER	10
1.1. Güneş Enerjisi	10
1.1.1. Fotovoltaik güneş panelleri	13
1.1.2. Yoğunlaştırılmış fotovoltaik sistemler	13
1.1.3. Yoğunlaştırılmış termal sistemler	14
1.2. Güneş Enerjisi ve Çevre	15
1.3. Fotovoltaik Hücreler	17
1.3.1. Fotovoltaik etki	17
1.3.2. Yarı iletkenlerin elektriksel özellikleri	18
1.3.3. FV hücre türleri	21
1.3.4. FV hücrelerinde güç ve verimlilik	25
1.3.5. FV hücre elektriksel özellikleri	25
1.3.5.1. FV hücre modeli	25
1.3.6. Fotovoltaik güç karakteristikleri	28
1.4. DC/DC Dönüştürücüler	31
1.4.1. DC/DC dönüştürücülerin kontrolü	32
1.4.2. Buck dönüştürücü	32
1.4.3. Boost dönüştürücü	35
1.4.4. Buck-boost dönüştürücüler	39
1.5. Maksimum Güç Noktası Takibi (MPPT)	41
1.5.1. FV panelin maksimum güç noktasında çalıştırılması	41
1.5.2. Pmax belirleme yöntemleri	41
1.6. FV Hücre Verimini Etkileyen Diğer Faktörler	49
1.6.1. Sıcaklık ve ışık şiddeti etkisi	49
1.6.2. Atmosferde kat edilen yolun uzunluğu ve havanın kirlilik boyutu	50
1.6.3. Güneş ışınlarının geliş açısı ve yansıtılmış ışınların eklenmesi	51
1.6.4. FV hücre yapısında kullanılan malzemelerin cinsi ve niteliği	51
1.6.5. Güneşlenme süresi	51
1.7. FV Sistemlerin Uygulama Alanları	51
1.8. Verim Arttırıcı Yöntemler	52
1.8.1. Güneş izleme sistemleri	52
1.8.2. Panel konumlandırma	52
1.8.3. Güneş panellerinin yerleşimi	54
1.9. Şebeke Bağlantılı ve Şebeke Bağlantısız Sistemler	54

1.9.1. Şebeke bağlantılı güneş pili sistemleri	54
1.9.2. Bağımsız güneş pili sistemleri.....	55
2. FIRÇASIZ DC MOTORLAR	57
2.1. Genel Özellikler	57
2.2. Mekanik Yapısı ve Tipleri.....	58
2.2.1. Rotor çeşitleri	60
2.2.2. İç ve dış rotorlu fırçasız dc motorlar	61
2.2.3. Fırçasız dc motorlarda kullanılan sabit mıknatıslar	63
2.2.4. Fırçasız dc motor kontrolünde kullanılan sensörler	66
2.3. Çalışma Prensibi.....	67
2.4. Matematiksel Modeli.....	72
2.5. Fırçasız DC Motor Sürücüleri	73
2.6. Fırçasız DC Motor Kontrol Yöntemleri	74
2.7. Fırçasız DC Motorların Sensörsüz Kontrolü.....	75
3. POMPALAR	78
3.1. Temel Bilgiler.....	78
3.2. Su Pompalama Sistemlerinde Pompa Seçimine Etki Eden Faktörler	81
3.3. Pompa Performans Parametreleri	82
3.3.1. Debi	83
3.3.2. Toplam dinamik yükseklik.....	83
3.3.2.1. Sistemin geometrik yüksekliği.....	84
3.3.2.2. Düşüm	85
3.3.2.3. İşletme yüksekliği veya çıkış basıncı.....	86
3.3.2.4. Sürtünme kayıpları.....	86
3.3.2.5. Hız yüksekliği	87
3.3.3. Pompa hidrolik ve mekanik gücü.....	87
3.3.4. Pompa verimi	88
3.3.5. Emmedeki net pozitif yükü	88
3.3.6. Pompa tipi ve özgül hız.....	89
3.4. Pompalarda Karakteristik Eğriler	89
3.4.1. Pompalarda debi-yükseklik değişimi	90
3.4.2. Pompa veriminin debiye bağlılığı	91
3.4.3. Pompanın mekanik gücünün debiye bağlılığı	91
3.4.4. Pompa işletme noktası.....	92
4. SİSTEM TASARIMI VE ANALİZİ.....	94
4.1. Günlük Su İhtiyacının Belirlenmesi	96
4.2. Toplam Dinamik Yükseklik	96
4.3. Pompanın Gücü	97
4.4. FV Panellerin Boyutlandırılması.....	98
4.5. Simülasyon ve Sonuçlar	99
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	107
KAYNAKLAR	109
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER	113
ÖZGEÇMİŞ	114

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Güneş ışığı spektrumu.....	11
Şekil 1.2. Güneş enerjisinden elektrik üretim yöntemleri.....	12
Şekil 1.3. Fotovoltaik sistem.....	13
Şekil 1.4. Yoğunlaştırılmış fotovoltaik sistem	14
Şekil 1.5. Parabolik oluk sistemi.....	14
Şekil 1.6. Güneş kulesi uygulaması, Sevilla.....	15
Şekil 1.7. Yarı iletkenlerde bant seviyeleri.....	17
Şekil 1.8. Yarı iletken malzemelerin yasak bant enerjileri	18
Şekil 1.9. Yarı iletken maddenin katkılama öncesi ve sonrası kristal yapısı.....	19
Şekil 1.10. P-n eklemi deplasyon bölgesi	20
Şekil 1.11. Güneş pillerinin yıllık enerji getiri eğrileri	24
Şekil 1.12. Monokristal solar hücre	24
Şekil 1.13. Polikristal solar hücre.....	24
Şekil 1.14. FV güç değerinin hava koşullarına göre değişimi.....	25
Şekil 1.15. Fotovoltaik hücrenin basitleştirilmiş ve tek diyotlu eşdeğer devresi	26
Şekil 1.16. İdeal bir fotovoltaik hücrenin I-V ve P-V karakteristikleri	29
Şekil 1.17. Buck dönüştürücü eşdeğer devresi.....	32
Şekil 1.18. Buck dönüştürücüde anahtarın iletim ve kesim durumu.....	33
Şekil 1.19. Buck dönüştürücü sürekli çalışma modu için dalga şekilleri.....	34
Şekil 1.20. Boost dönüştürücü eşdeğer devresi.....	36
Şekil 1.21. Boost dönüştürücüde anahtarın iletim durumu	36
Şekil 1.22. Boost dönüştürücüde anahtarın kesim durumu.....	37
Şekil 1.23. Boost dönüştürücü bobin gerilimi ve akımı.....	39
Şekil 1.24. Buck-boost dönüştürücü eşdeğer devresi	40
Şekil 1.25. Değişim ve gözlem metodu algoritmasının maksimum noktasından iraksaması	44
Şekil 1.26. Değişim ve gözlem metodu algoritması	46
Şekil 1.27. Artımlı iletkenlik algoritması güç-gerilim eğrisi	47
Şekil 1.28. Artımlı iletkenlik metodu algoritması.....	48
Şekil 1.29. Sıcaklığın ve ışık şiddetinin I-V eğrilerine etkisi	50
Şekil 1.30. Aylara göre deklinasyon açısının değişimi	53
Şekil 2.1. Sabit mıknatıslı dc motor ve fırçasız dc motor	59
Şekil 2.2. Fırçasız dc motorun temel yapısı	59
Şekil 2.3. Fırçasız dc motor statoru.....	60
Şekil 2.4. Fırçasız dc motorların rotor çeşitleri.....	60
Şekil 2.5. İç rotorlu fırçasız dc motorun mekanik yapısı	62
Şekil 2.6. Dış rotorlu fırçasız dc motorun mekanik yapısı.....	62
Şekil 2.7. Disk tipi fırçasız dc motorun mekanik yapısı	63
Şekil 2.8. Mıknatıs malzemelerin sıcaklıkla değişen performans eğrileri	66
Şekil 2.9. Tek bobinin zıt emk dalga şekli	69
Şekil 2.10. İnverter ve fırçasız dc motor eşdeğer devresi	70
Şekil 2.11. Fırçasız dc motorların hız/moment eğrisi	71

Şekil 2.12. Pozisyon geri beslemeli tipik bir fırçasız dc motor sürücü sistemi	74
Şekil 2.13. Fırçasız dc motorların sensörsüz kontrolü	76
Şekil 3.1. Toplam tesis yük kaybı eğrisi ve bileşenleri.....	84
Şekil 3.2. Statik basma yüksekliği	85
Şekil 3.3. Bir derin kuyuda seviyeler ile debi düşüm ilişkisi.....	86
Şekil 3.4. Pompanın karakteristik eğrileri.....	90
Şekil 3.5. Pompanın yükseklik-debi karakteristik eğrisi.....	90
Şekil 3.6. Pompanın verim-debi karakteristik eğrisi.....	91
Şekil 3.7. Pompanın mekanik güç-debi eğrisi.....	92
Şekil 3.8. Pompa için işletme noktasının belirlenmesi	92
Şekil 4.1. FV su pompalama sistemi blok şeması.....	94
Şekil 4.2. FV su pompalama sisteminin şematik gösterimi	95
Şekil 4.3. FV su pompalama sistemi simulink modeli.....	99
Şekil 4.4. FV panelin simulink modeli	100
Şekil 4.5. Fırçasız DC motor simulink modeli.....	100
Şekil 4.6. Akım kontrolü bloğu.....	101
Şekil 4.7. Hız kontrol bloğu	101
Şekil 4.8. Akım referans bloğu	102
Şekil 4.9. Pompanın simulink modeli	102
Şekil 4.10. Pompanın debi eğrisi	103
Şekil 4.11. Pompanın devir sayısı.....	103
Şekil 4.12. Pompanın mekanik gücü.....	104
Şekil 4.13. FV Panelin gerilim güç ve çevrim oranı değerleri.....	104
Şekil 4.14. Fırçasız DC motorun bir fazına ait stator akımı.....	104
Şekil 4.15. Elektriksel moment	105
Şekil 4.16. Pompanın yük momenti	105

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Aylara göre Güneşlenme	11
Tablo 1.2. Bölgelere göre Güneşlenme.....	12
Tablo 1.3. Güneş pillerinde hücre verimleri	25
Tablo 1.4. MPPT Teknikleri	42
Tablo 2.1. Mıknatısların akı ve manyetik değerleri	64
Tablo 2.2. Sabit mıknatısların özellikleri.....	65
Tablo 2.3. Rotor konumuna karşılık gelen anahtar durumları	68
Tablo 4.1. FV Modülün Parametreleri	98



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A.	: Amper
B	: Motor sürtünme katsayısı
Bf	: Sabit mıknatıs akı yoğunluğu, (Tesla)
Br	: Artık mıknatıslanma, (Tesla)
cm.	: Santimetre
°C.	: Santigrad derece
C	: Kondansatör, (Farad)
Cu	: Bakır
D	: Çevrim oranı
E	: Zıt emk gerilimi, (V)
e-	: Elektron
eV.	: Elektrovolt
e _s	: Toplam zıt-emk, (V)
f	: Frekans, (Hz)
GaAs	: Galyum Arsenit
H	: Basma yüksekliği, (m)
Hz.	: Hertz
I	: Fotovoltaik hücre akımı, (A)
I _d	: Diyot akımı, (A)
I _{kd}	: Kısa devre akımı, (A)
I _L	: Fotovoltaik akım / Bobin akımı, (A)
I _{MPP}	: Maksimum güç noktası akımı, (A)
I _{sat}	: Diyot ters doyma akımı, (A)
J	: Motor atalet momenti, (N.m)
k	: Boltzman sabiti
k _e	: Zıt emk sabiti
k _t	: Moment sabiti
kW.	: Kilowatt
°K.	: Kelvin derece
L	: Endüktans, (Henry)
L _m	: Karşılıklı endüktans, (Henry)
l	: Rotor uzunluğu, (cm)
l/s.	: Litre bölü saniye
m ³ .	: Metreküp
m ² .	: Metrekare
m ³ /h.	: Metreküp bölü saat
m ³ /s.	: Metreküp bölü saniye
mSS.	: Metre su sütunu
Ni	: Nikel
n	: Diyot emisyon faktörü
Ns	: Bir faz sargısındaki sarım sayısı
Q	: Debi, (m ³ /h)

q	: Elektron yükü, (Coulomb)
P	: Güç, (W)
P _{max}	: Maksimum güç, (W)
Pb	: Kurşun
Pt	: Platinyum
p	: Akışkan yoğunluğu (g/cm ³) / Motor kutup çifti sayısı
r	: Rotor yarıçapı, (cm)
Si	: Silisyum
T	: Mutlak sıcaklık, (°K)
T _e	: Elektriksel moment, (N.m)
T _L	: Yük momenti, (N.m)
V.	: Volt
V _{ad}	: Açık devre gerilimi, (V)
V _d	: Diyot üzerinde düşen gerilim, (V)
V _{MPP}	: Maksimum güç noktası gerilimi, (V)
V _s	: Kaynak gerilimi, (V)
V ₀	: Çıkış gerilimi, (V)
W.	: Watt
Ω.	: Ohm
μ	: Mikro
ω _r	: Rotor hızı, (rad/s)
θ	: Rotor pozisyonu, (°)
λ _s	: Bobin akısı, (Tesla)
φ	: Manyetik akı, (Tesla)
η _d	: Doluluk faktörü
η	: Pompa verimi

Kısaltmalar

AC	: Alternating Current (Alternatif Akım)
AlNiCo	: Aluminum-Nickel-Cobalt (Alüminyum-Nikel-Kobalt)
BLDC	: Brushless Direct Current (Fırçasız Doğru Akım)
DC	: Direct Current (Doğru Akım)
DSP	: Digital Signal Processor (Sayısal İşaret İşleyici)
emk	: Elektromotor Kuvvet
FV	: Fotovoltaik
MOSFET	: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (Metal Oksit Silikon Alan Etkili Transistor)
MPPT	: Maksimum Power Point Tracking (Maksimum Güç Noktası Takibi)
NdFeB	: Neodmiyum-Demir-Bor
OC	: Open Circuit (Açık Devre)
PI	: Proportionally-Integral (Oransal-İntegral)
PWM	: Pulse Width Modulation (Darbe Genişlik Modülasyonu)
SC	: Short Circuit (Kısa Devre)
TDP	: Toplam Dinamik Basınç
TDY	: Toplam Dinamik Yükseklik

FOTOVOLTAİK SU POMPALAMA SİSTEMİ TASARIMI VE MODELLENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada, güneş enerjisinden fotovoltaik (FV) ilkeye bağlı olarak üretilen elektrik enerjisi ile dalgıç pompaların çalıştırılması için gerekli mekanik enerjinin sağlanması durumunda, güneş enerjili sulama sisteminin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, her birinde toplam 96 adet FV hücre bulunan 4 adet modülden oluşan toplam 3 dizi halindeki FV sistemin; akım, gerilim ve güç gibi elektriksel özellikleri ile FV sistemin verimi belirlenmiştir. Ayrıca pompalanan su debileri, pompanın hidrolik güç ve motorun elektriksel güç değerleri hesaplanmıştır. FV panellerden elde edilen enerji DC/DC dönüştürücü üzerinden pompa motorunun (Fırçasız DC motor) sürücüsü beslenmiştir. MPPT algoritmaları ile DC/DC dönüştürücünün anahtarlama sinyali kontrol edilmiş olup, sürekli olarak maksimum gücün elde edilmesi amaçlanmıştır. Sistemin amacı, şebeke elektriğinin olmadığı yerlerde sulama amaçlı olarak fotovoltaik sistemlerin kullanılabilmesi için bir model geliştirmektir. Simülasyon sonucunda sistemin su debisi, ayrıca pompa motoru, DC/DC dönüştürücü ve panellerin akım, gerilim, güç, moment gibi performans değerleri gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler : Fotovoltaik Su Pompalama, Güneş Enerjisiyle Pompalama, Güneş Enerjisiyle Sulama.

PHOTOVOLTAIC WATER PUMPING SYSTEM DESIGN AND MODELLING

ABSTRACT

In this study, implementation of solar irrigation system is intended in the case to provide the necessary mechanical energy for operating the pump with the electricity produced by depending on photovoltaic (PV) principle. For this purpose the electrical properties such as current, voltage and power output and efficiency values of the PV system consists of three array including 96 cells in each module, are determined. Also pumped water flow, hydraulic power and electrical power value of the pump motor is calculated. The pump motor driver (Brushless DC Motor) is fed through DC/DC converter with the electrical energy obtained from PV panels. The switching signal is controlled on DC/DC converter by MPPT algorithms. In this way it is aimed to obtain the maximum power continuously. The main purpose of system is to develop a model to be used for irrigation in remote areas without electricity supply systems. System flow rate, also the pump motor, DC/DC converter and the panel's operating values (the current, voltage, power, torque etc.) are observed from the simulation results.

Keywords : Photovoltaic Water Pumping, Solar Pumping, Solar Irrigation.

GİRİŞ

Yirminci yüzyılın ikinci yarısından itibaren dünya nüfusunun hızlı artış göstermesi, teknolojik gelişmelere bağlı olarak da günlük yaşantımızda bazı alışkanlıklarımızın enerji tüketimi lehine değişmesi, enerji ihtiyacını artmasına neden olmaktadır. Artan bu enerji ihtiyacının karşılanması çevresel, sosyal ve ekonomik faktörleri göz önüne alındığında yenilenemeyen veya geleneksel yakıtlar yerine insanoğlunu yeni yakıtlar arayışına götürmüştür. Fosil yakıtların yerini yavaş yavaş yenilenebilir enerji kaynakları almaktadır. Bu kaynakların en önemli özellikleri, doğada sürekli bulunmaları ve tekrarlanabilir olmalarıdır. Bu kaynaklara örnek olarak güneş, rüzgar, jeotermal, biyoenerji, dalga ve gelgit, hidrolik enerji gösterilmektedir. Yenilenebilir enerji teknolojilerinin çevre dostu olması bu enerjiye ilgiyi daha da arttırmıştır. Güneş enerjisi yenilenebilir enerji kaynakları içinde ön plana çıkan bir enerji türüdür. Başta elektrik üretimi olmak üzere, temelinde elektrik üretimine dayanan bir çok uygulamada güneş enerjisinin kullanımı için çalışmalar mevcuttur.

Bu uygulamalardan biri olan su pompalama uygulaması özellikle tarım sektörü için bir çok avantajı beraberinde getiren bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Bunlardan ilki şebeke elektriğinin olmadığı bölgeler için elverişli olmasıdır. Ayrıca herhangi bir yakıt bağımlılığı yoktur ve az bakım gereksinimine sahiptir. Bu sistemlerin başlıca olumsuzlukları ise; ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olması ve verimlerinin geçerli hava koşullarına bağlı olarak değişmesidir.

Tarım sektöründe enerji kullanımına ilişkin son gelişmeler, yoğun enerji tüketilen sulama uygulamalarının enerji tasarrufunda önemli bir yeri olduğunu göstermektedir. Son yıllarda sulama uygulamalarında enerji tüketiminin azaltılmasına yönelik olarak yapılan araştırmalar; sulama amacıyla yeni ve yenilenebilir doğal enerji kaynaklarının kullanılmasına ve fosil yakıtların tüketildiği geleneksel sistemlere alternatif olarak, düşük maliyetli ve etkinliği yüksek sulama sistemlerinin geliştirilmesine yönlendirilmiştir. En önemli yenilenebilir enerji kaynağı olan güneş

enerjisinden tarımsal sulama amacıyla yararlanılması durumunda, toplam üretim giderleri içerisinde büyük yer tutan sulama giderleri azalacak ve buna bağlı olarak üretim maliyeti de azalacaktır. Alışılacağı enerji kaynaklarından elde edilen enerji bedellerinin yüksek olması nedeniyle, tarımsal sulama amacıyla yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanmak büyük önem kazanmıştır. Sulama uygulamalarında, günümüz enerji varlığını korumak ve çevre kirliliğini önlemek amacıyla fosil enerji kaynakları yerine, doğal enerji kaynaklarından yararlanılması öncelikli bir gereksinimdir.

Tarım sektöründe öncelikli bir tercih olarak görülse de, kullanım ve içme suyu ihtiyacının karşılanması, park ve bahçe sulamaları, atık su tesisleri gibi su pompalamasının olduğu uygulamalar için de güneş enerjili (fotovoltaik) sistemler aynı önceliği taşımaktadır.

Uzun bir geçmişi olan sulama işlemi için en az güç kullanarak su pompalama amacıyla birçok yöntem geliştirilmiştir. Su pompalama için uygulanan bu yöntemlerde, insan enerjisi, hayvan gücü, rüzgar, güneş ve fosil yakıtlar gibi değişik güç kaynaklarından yararlanılmaktadır. Güneş enerjisiyle sulama sistemlerinin, içten yanmalı motorlar ile çalıştırılan sulama sistemlerine kıyasla başlıca üstünlükleri; uzaktan kontrol edilebilir olması, pratik olarak bakım gereksinimlerinin olmaması, kullanım sürelerinin uzun olması, yakıt gerektirmemeleri ve dolayısıyla çevreyi kirlilememeleridir. Diğer önemli bir üstünlükleri de, enerji kaynağı olarak güneşten yararlanmalarıdır. Özellikle elektriğin ulaştırılmadığı yerlerde su temini ve tarımsal sulama amacıyla etkin olarak kullanılabilir. Sulama uygulamalarında, suya en fazla gereksinim duyulan zaman, güneş ışınımının en fazla olduğu zamandır. Bu durum, bu sistemler için bir üstünlük olarak değerlendirilebilir.

Çiftçilerin, başarılı bir hasat dönemi geçirebilmesi yeterli miktarda sularının olmasına bağlıdır. Fakat su kaynaklarının sınırlı olması, suyun idareli kullanılmasını gerektirmektedir.

Türkiye’de sulama gerektiren mevcut tarım alanı: 28×10^6 hektardır. Sulanabilir alan 25 milyon hektar, % 6 eğime kadar sulanabilir alan ise $13,5 \times 10^6$ hektardır. Tüketim amacı ile kullanılacak 98×10^9 m³/yıl yerüstü, 14×10^9 m³/yıl yer altı su kaynağı

mevcuttur. Mevcut sulanan alan $4,9 \times 10^6$ hektar, fiilen sulanan alan ise $3,0 \times 10^6$ hektardır.

Uygulanan sulama yöntemlerine bakıldığında ise %85 yüzey sulama, %12 yağmurlama sulama, %3 damla sulama uygulamada karşımıza çıkmaktadır.

Sulamanın gereğinden fazla yapılması sonucunda toprağın verimi ve elde edilen gelir düşer. Toprağın tuzlanması, çoraklaşması, taban suyunun yükselmesi gibi çevre zararlarına neden olur. Suyun ihtiyaç duyulan miktarın altında kullanılması da yine verimi düşürür.

Çiftçilerin bir diğer sorunu da enerji tüketimidir. Sulama amaçlı kullanılan pompaların tükettiği enerji, çiftçiler için en büyük masraflar kalemlerinden birini oluşturur. Buna rağmen çiftçilerin bir çoğu, etkili kullanıldığında enerjiden önemli miktarlarda tasarruf yapılacağına farkında değildir.

Günümüzün tarım uygulamaları için geliştirilen sulama çözümleri için sürdürülebilirliğe önem vermeli, daha az enerji tüketilmeli, su kaynaklarını korumalı ve topraktan alınan verim en yüksek seviyede tutulmalıdır.

Yer altından su çekmek için uzun yıllardır dalgıç veya dikey tipte türbin pompalar kullanılmaktadır. Yüzey suyunun su alma yapısı olarak kullanıldığı yerlerde ise çeşitli santrifüj pompalar, bölünebilir gövdeli ve uçtan emişli pompalar genel tercihler arasında yer almıştır.

Bu pompaların, yer altında ve üstünde oluşan değişikliklere cevap vermesi beklenir, gün içinde ve yıl boyunca gerekli basınç ile debinin sağlanmasında belirleyicidir.

Pompa sürekli en yüksek seviyede çalıştırıldığında, boşa enerji harcanır. Herhangi bir pivot sulama sırasında değişken devirli pompa kullanılırsa, enerji israfı yapılmaz. Böylece, önemli miktarlarda enerji tasarrufu elde edilir.

Çiftçileri ve toprağı bekleyen zorluklar ancak yeni teknolojiler sayesinde bu sorunun üstesinden gelinebilir. Çiftçilerin, topraklarından daha yüksek verim alması ve sundukları ürünlerle piyasadaki rekabete katılması, enerji tasarrufuna ve su

kaynaklarının akıllıca kullanılmasına bağlıdır. Bu amaçla, istenilen tasarrufun sağlanabilmesi için farklı sulama teknolojileri geliştirilmelidir.

Yer altı ve yüzey suyunun seviyelerinde yaşanan yükselmeler ile alçalmalar, pompa sisteminin özelliklerini değiştirmektedir. Çünkü bu dalgalanmalar, basma yüksekliğinin de değişmesine neden olur. En alçak seviyeden su transfer etmek için tasarlanmış tek devirli bir pompa, seviye yükseldiğinde inanılmaz miktarlarda enerji tüketecektir. Öte yandan değişken devirli pompalar, basma yüksekliğini ve debisini su seviyesindeki dalgalanmalara uygun hale getirir; böylece enerji masraflarını azaltır.

Sulama yöntemlerini, kullandıkları uygulamalarla birlikte ve yenilikçi bir bakış açısıyla ele alınması gerekir. Sulama sisteminin tasarımı ve uygulama bir bütün içinde değerlendirilmelidir. Pompalar, sulama sistemleriyle mükemmel bir uyum içinde çalışabilmelidir. Diğer bir deyişle, pompalar sulama ekipmanına uyacak şekilde tasarlanmalı ya da sulama ekipmanı pompaya uyacak şekilde tasarlanmalıdır.

Değişken devirli hız tahriklerinin eklenmesi, yer altından çekilen ve doğrudan sulama sistemine gönderilen yer altı suyunun verimliliğini artırır. Yüzey suyunun girişi ve dağıtımı, birden fazla pompanın kullanıldığı basınçlandırma sistemleriyle artırılabilir. Benzer şekilde; pompayı kuru çalışmaya ve motor ile güç kaynağındaki sorunlara karşı koruyan izleme ve kontrol sistemleri de su debisinin düzenli olmasını sağlar.

Bahsedilen unsurlar göz önünde bulundurularak tasarlanan bir sulama çözümü, kendisinden beklenen yüksek ve etkili performansı sunmaktadır. Bu sayede, kWh başına daha fazla su düşer ve enerjiden daha yüksek tasarruf elde edilir.

Enerjiden tasarruf etme potansiyeli her zaman vardır ve artırılabilir. Bu şekilde çiftçi, hem işletim masraflarını azaltır hem de daha kaliteli ürün elde eder, kâr oranını artırır ve suyunu daha etkili kullanabilir. Tarımın sürdürülebilir olması da bu koşullara bağlıdır.

Yer altı sularının kullanıldığı yerlerde kuyu alanında ideal koşulların sağlanması önemlidir. Pompaların fazla büyük ya da küçük olması, taban suyu seviyesinin

düşmesi ve bu yüzden pompalardan daha fazla basma yüksekliğinin beklenmesi kuyu alanında en sık karşılaşılan sorunlar arasındadır. Bunların dışında, boru ağından geçen suyun hızı ve basıncıyla ilgili konular da gündeme gelebilir. Bu sorunlar fazla enerji tüketimine, maliyetlerin artmasına ve taban suyu seviyesini koruma ihtiyacının doğmasına neden olabilir.

Yukarıda bahsedilen etkenler göz önünde bulundurulduğunda, fotovoltaik pompa sistemleri düşük güç ihtiyacının karşılanması, bakım ve yakıt takviyesi gerektirmemesi ayrıca şebeke elektriğinin olmadığı kırsal bölgelerde kullanılabilmesi gibi önemli avantajlara sahip olması sebebiyle etkin bir çözüm olarak görünmektedir.

Fotovoltaik su pompalama sistemi temel olarak FV paneller, FV güç dönüştürücüler (DC/DC veya DC/AC), motor ve pompa olmak üzere üç bileşenden oluşur.

Su pompalama uygulamalarında, güneş ışınımının bulunduğu sürelerde su pompalanır veya daha sonra kullanılmak üzere depolanır. Güneş ışınımının olmadığı sürelerde kullanılmak üzere bataryalarda güç depolanabilir. Batarya dolmuş sistemi kullanılması durumunda, batarya sisteminin kontrolü için, elektronik kontrol ünitelerinin kullanılması gereklidir.

Şebekeden bağımsız olan bu sistemlerde, bataryaların kullanılması kullanılan yerdeki su ihtiyacına bağlıdır. Güneş ışığından yararlanılmadığı gece saatlerinde kullanılacaksa ya da üretilen enerjinin fazlası depo edilmek istendiğinde batarya grubuna gereksinim duyulur. Akülerin kullanılması durumunda ayrıca şarj kontrol üniteleri de sisteme ilave edilir.

Elektrik gücünü üretmek için uygun sayıda ve uygun bağlantıyla bir araya getirilen fotovoltaik paneller, pompa motorunu çalıştırmak için yeterli miktarda elektriksel güç üretmektedirler. İlk uygulamalarda pompa motoru olarak DC motorlar ağırlıklı kullanılırken, sonrasında farklı motor tiplerini içeren sistemler geliştirilmiştir. Üretilen elektriğin, motoru çalıştırmak için gerekli olan bir gerilim seviyesinde olması gereklidir. Bu nedenle DC/DC dönüştürücüler kullanılmaktadır. DC/DC dönüştürücüler üzerinden beslenen su pompası, elektriği mekanik enerjiye dönüştürür. Mekanik enerji, daha sonra pompa aracılığıyla su kaynağından su çıkarmak için hidrolik enerjiye dönüştürülür.

Su pompalama amacıyla güneş enerjisinden etkili bir biçimde yararlanmak üzere araştırmacılar tarafından birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda farklı yöntemler kullanılmış ve değişik düzeylerde başarılar da elde edilmiştir. Çalışmanın hazırlık aşamasında yapılan literatür taramasında bu konuyla ilgili pek çok bilimsel araştırma ve çalışmaya rastlanmıştır. Bu literatür çalışmalarının kısa özetleri aşağıda sunulmaktadır.

Şebekeden bağımsız çalışan güneş enerjili pompa sistemi için hibrid MPPT algoritması geliştirmişlerdir. Kontrol sistemi iki adımdan meydana gelmiş olup hızın artırılması veya azaltılmasına karar vermek ve artırma/azaltma için adım büyüklüğünün belirlenmesi konusunda çalışmıştır. Enerjinin bataryalarda depolanmadığı sistemlerdeki olumsuzlukları gidermek için iki farklı MPPT algoritması (Perturb and Observe (P&O), Incremental Conductance) birleştirilerek daha dinamik ve kararlı çalışan bir yöntem geliştirilmiştir [18].

Güneş enerjili sulama sistemlerinde MPPT algoritmalarının kullanılmasıyla maksimum güç elde edilen DC motor kullanılan bir sistem kurulmuş olup, simülasyon ve deneysel sonuçları karşılaştırarak MPPT' nin sistem optimizasyonu açısından gerekliliği ortaya konulmuştur [19].

Üç fazlı asenkron motor kullanılarak kurulan su pompalama sistemi, DC motorun dezavantajlarını gidermek amacıyla geliştirilmiştir. Mikrodenetleyici ile PWM sinyalleri üretilerek skalar (V/f) kontrol yöntemi ile pompanın hız kontrolü sağlanmıştır [20].

İlgili çalışmada DC motor kullanılan bir fotovoltaik sulama sistemi üzerinde çalışılmıştır. Çalışmada MPPT ve DC-DC konverter topolojilerine değinilmiş, kendi sistemi için ise güneş panellerinden aldığı enerjiyi Cúk konverter üzerinden dönüştürerek pompayı besleyen, P&O algoritması içeren bir model tasarlanmış ve simülasyon sonuçlarını sunulmuştur. Artan iletkenlik yönteminin özellikle bulutlu havalarda daha iyi performans gösterdiği fakat küçük ölçekli sistemlerde P&O yönteminin daha uygun olduğunu ileri sürülmüştür [7].

Şebekeden bağımsız ve batarya grubunun kullanılmadığı bir pompa sistemi üzerine çalışılmış olup pompa motoru olarak asenkron motor kullanılmıştır [8].

Tarım teknolojilerinin günden güne hızla değişirken, bu değişimde güneş enerjisinin katkısından bahsedilmiş, önümüzdeki yıllarda güneş enerjisinin tarıma yönelik özellikle de sulama alanında geniş ölçekte kullanılacağı da belirtilmiştir. Temel bir model kurarak sistem bileşenleri tanıtılmış ve sistem tasarımı için göz önünde bulundurulması gereken kriterler açıklanmıştır [9].

Çalışmada fotovoltaik panel, buck dönüştürücü ve motorun dinamik performansı analiz edilmiştir. Pompa motoru olarak sabit mıknatıslı senkron motor seçilmiş ve alan yönlendirmeli kontrol yöntemi kullanılmıştır. Fotovoltaik sulama sistemleri için alternatif bir model elde edilmiştir [10].

Fotovoltaik sabit mıknatıslı DC motor pompa sisteminde kullanılacak MPPT kontrol yöntemi sunulmuştur. Işınımına bağlı olarak belirlenen çevrim oranlarının DC/DC dönüştürücünün panelden maksimum gücü elde etmede önemi gösterilmiştir. Sistemin maksimum güç noktasında çalışma başarısı, pompa motorunun performans analizi ile araştırılarak, gerekli optimum çevrim oranları belirlenmiştir. Sistemde, MPPT algoritmasının kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlar karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir [11].

Mevcut dizel çözümler ile fotovoltaik çözümlerin farklı açılardan karşılaştırılması yapılmış, uzun vadede güneş enerjili çözümlerin avantajları üzerinde durulmuştur. Örnek bir sistem modellemesi yapılarak pompa ve motorun gücü belirlenmiş ve bu güce uygun panellerin mevcut kayıplar göz önüne alınarak seçilmiştir. Ayrıca bu iki sistem için ayrıntılı bir maliyet analizinin de yapıldığı bir karşılaştırma yapılmıştır [14].

Sabit mıknatıslı DC motor ile kurulan su pompalama sisteminin matematiksel analizi yapılmıştır. Mevcut modelin MPPT algoritması kullanılarak ve kullanılmadan üretilen güç gözlemlenerek, MPPT algoritmalarının sistem verimliliği üzerine etkileri üzerinde durulmuştur [13].

Boost dönüştürücü ile yükseltilem gerilim tek fazlı köprü inverter ile alternatif akıma dönüştürülmüş, inverter çıkışına LC filtre konularak harmonikler azaltılmıştır. Asenkron motorun kontrolünde uzay darbe genişlik modülasyonu kullanılmış, hız

kontrolü, pompanın su bastığı tank seviye bilgisi alınarak PID kontrol yöntemi kullanılarak sistem oluşturulmuştur [12].

FV üreteç, DC/AC dönüştürücü, dalgıç pompa ve depolama tankından oluşan bir FV su pompalama sisteminin verimine olan etkisi araştırılmıştır. Çalışmada, sistemin modellenmesi ve kontrolü için teorik bir inceleme de yapılmıştır. Güneş ışınım şiddetinin azalması, FV su pompalama sisteminin verimini olumsuz olarak etkilemektedir. Yapılan incelemenin geçerliliği, benzeşim ve deneysel sonuçlarla da doğrulanmıştır [37].

Santrifüj bir pompayı çalıştıran asenkron motoru kullanılan bir FV pompalama sisteminin optimum çalışma koşulunu araştırılmıştır. Optimizasyon problemi, motor verimi artırılarak günlük pompalanan su miktarının en yüksek düzeye çıkarılması olarak tanımlanmıştır. Düzenlenen algoritmanın verimi, simülasyon ve elde edilen sonuçlara bağlı olarak belirlenmiştir [38].

FV uygulamaların en etkin kullanım alanlarından birisi de su pompalama amacıyla güç kaynağı olarak kullanılmalarıdır. FV su pompalama sistemlerinin yaygın olarak kullanılmaya başlanması, güvenilir ve ekonomik bir uygulama gerçekleştirebilmek için bu sistemlerin tasarım ve etkin kullanımına daha fazla önem verilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu çalışmada, Kuveyt iklim koşullarında FV su pompalama sisteminin verimi değerlendirilmiştir. Sistem tarafından pompalanan su ile kırsal kesimdeki 300 kişinin su gereksinimini karşılayabilecek şekilde dizayn edilmiştir. Su tüketimi için kişi başına 40 L/gün değeri dikkate alınarak, derin kuyudan yıl boyunca günlük olarak 12 m³ hacminde su pompalanmasına gereksinim duyulmaktadır. FV su pompalama sisteminin ekonomik uygulanabilirliği için yaşam döngüsü maliyet analizi yapılmıştır. Fosil yakıtlara göre FV sistemlerin uzun vadede daha uygun maliyette olduğu görülmüştür [39].

Kırsal alanlarda içme suyu temini için FV sistemin verimini incelenmiştir. Toplam yükseklik, su tüketimi, depo kapasitesi ve FV dizinin gücü dikkate alınmıştır. FV pompalama sisteminin verimi, toplam pompalama yüksekliği ve FV dizinin maksimum gücüne bağlı olarak önemli düzeyde değiştiği gözlemlenmiştir [40].

Bir FV dizinin maksimum gücünü optimize etmek ve uygun büyüklükte motor/pompa seçebilmek için, FV pompalama sistemlerinin boyutlandırılmasının çok önemli bir aşama olduğu vurgulanmıştır. Bu amaçla, FV pompalama sistemlerinin boyutlandırılmasına yardımcı olabilmek için, iki matematiksel model geliştirilmiştir. Geliştirilen modellerde; elektriksel güç, su debisi ve toplam yükseklik dikkate alınmıştır. Modeller, deneysel olarak test edilmiş ve tatmin edici sonuçlar ilgili çalışmada belirlenmiştir [41].



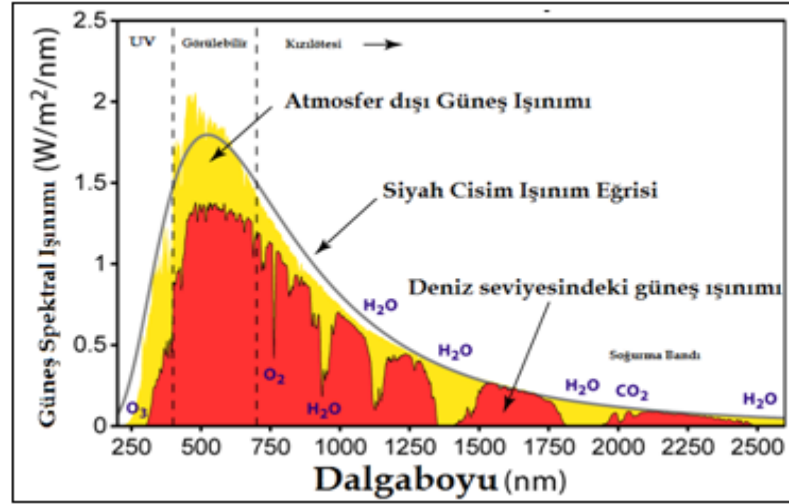
1. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER

1.1. Güneş Enerjisi

Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan güneş enerjisi, fosil yakıtlara alternatif olarak geliştirilen sistemlerde, enerji kaynağı olarak günümüzde kullanımı hızla yaygınlaşmaktadır.

Güneş, evrende birçok temel olayın gerçekleşmesini ve dünya üzerinde canlılığın devamlılığını sağlayan temel enerji kaynağıdır. Madde ve enerji döngüleri, rüzgarlar, deniz ve okyanuslardaki akıntılar, doğadaki su döngüsü güneş ışınları sayesinde gerçekleşmektedir. Rüzgar, dalga, biokütle gibi diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının varolmasındaki temel etkenlerden biri de Güneş'tir [1].

Yeryüzüne her yıl güneşten gelen enerji kapasitesi, yeryüzünde şimdiye kadar belirlenmiş fosil yakıt rezervlerinin 160 katıdır ve yeryüzünde fosil, nükleer ve hidroelektrik tesislerinin bir yılda üreteceğinden 15000 kat daha fazladır. Bu bakımdan güneş enerjisinin bulunması temel bir sorun değil; asıl sorun bu enerjinin insanlığın hizmetine uygun kullanılabilir bir enerji türüne kolayca dönüştürülebilmesidir. Güneş, 1,4 milyon km çapıyla Dünya'nın 110 katı büyüklüğünde ve Dünya'dan $1,5 \times 10^{11}$ m uzaklıkta yüksek basınçlı ve yüksek sıcaklıklı bir yıldızdır. Yüzey sıcaklığı yaklaşık 6000 °K olup iç bölgelerindeki sıcaklığın 8×10^6 K ile 40×10^6 K arasında değiştiği tahmin edilmektedir. Güneşli bir yaz gününde optimum yöndeki 1 m² alana gelen enerji miktarı hemen hemen 1 litre petrolün verebileceği enerji miktarına eşittir. Bununla beraber yalnız Dünya'nın kara alanlarına düşen güneş ışınımı ile elde edilecek enerji miktarı, dünyanın yıllık enerji tüketiminin yaklaşık 2900 kat daha fazladır. Yeryüzüne ulaşan güneş ışınımının toplam gücü $1,7 \times 10^{14}$ kW ve ışınımın % 43'ü görünür bölgede, % 52'si ise infrared bölgesindedir. Şekil 1.1'de güneş ışınımı spektrumu hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Halen dünyada tüketilen enerji ise yaklaşık 13 TW (13×10^9 kW)'dır [1].



Şekil 1.1. Güneş ışığı spektrumu

Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü (EİE) tarafından yapılan çalışmaya göre Türkiye'nin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2640 saat (günlük toplam 7,2 saat), ortalama toplam ışıınım 1311 kW/m²-yıl (günlük toplam 3,6 kWh/m²) olduğu tespit edilmiştir. Aylara göre Türkiye güneş enerji potansiyeli ve güneşlenme süresi değerleri Tablo 1.1 'de verilmektedir [2]. Tablo 1.2.'de ise bölgelere göre güneşlenme süresi değerleri verilmektedir.

Tablo 1.1. Aylara göre güneşlenme [2]

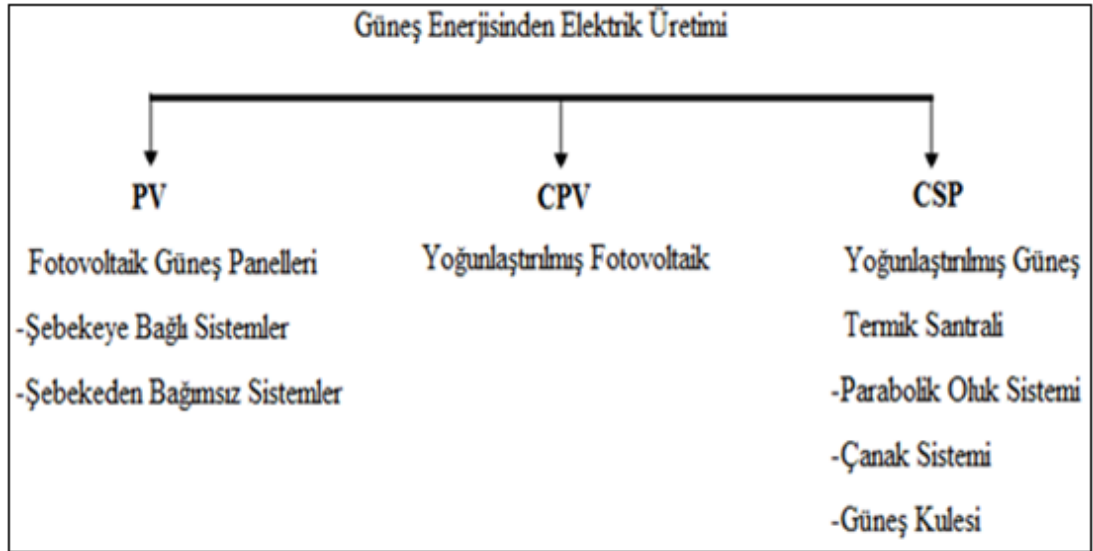
Aylar	(Kcal/cm ² -ay)	(kWh/m ² -ay)	Güneşlenme Süresi (Saat/ay)
Ocak	4,45	51,75	103
Şubat	5,44	63,27	115
Mart	8,31	96,65	165
Nisan	10,51	122,23	197
Mayıs	13,23	153,86	273
Haziran	14,51	168,75	325
Temmuz	15,08	175,38	365
Ağustos	13,62	158,4	343
Eylül	10,6	123,28	280
Ekim	7,73	89,9	217
Kasım	5,23	60,82	157
Aralık	4,03	46,87	103
Toplam	112,74	1311	2640
Ortalama	308,0 cal/cm ² -gün	3,6 kWh/m ² -gün	7,2 saat/gün

Tablo 1.2. Bölgelere göre güneşlenme [2]

Bölge İsmi	Toplam Güneş Enerjisi (kWh/m ² -yıl)	Güneşlenme Süresi (saat-yıl)
Güney Doğu Anadolu	1460	2993
Doğu Anadolu	1390	2956
Akdeniz	1365	2664
İç Anadolu	1314	2628
Ege	1304	2738
Marmara	1168	2409
Karadeniz	1120	1971

Yılın 10 ayı boyunca teknik ve ekonomik olarak ülke yüzölçümünün % 63'ünden ve tüm yıl boyunca %17'sinden yararlanma potansiyeli taşımaktadır [2].

Güneş enerjisinden ısıtma ve elektrik elde etme gibi amaçlarla yararlanılmaktadır. Güneş enerjisi ile elektrik üretimi termoelektrik dönüşüm ve/veya fotoelektrik çevrim ile yapılır. Şekil 1.2'de güneş enerjisinden elektrik üretim yöntemleri gösterilmiştir.



Şekil 1.2. Güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretim yöntemleri

Elektrik enerjisi elde etmek için fotovoltaik hücreler, güneş kollektörleri ve güneş bacası gibi farklı yöntemlere dayanan uygulamalar geliştirilmiştir.

1.1.1. Fotovoltaik güneş panelleri

Güneş ışınlarına duyarlı yarı iletken malzemeler aracılığıyla hücresel düzeyde üretilen elektrik enerjisi, çok sayıda fotovoltaik hücrenin seri/paralel olarak bağlanmasıyla güç santraline dönüştürülür. 1950'li yıllardan sonra bir ileri teknoloji ürünü olarak ortaya çıkan FV sistemler, güneşin olduğu her alanda çalışabilir. Güneş enerjisi, FV hücrenin yapısına bağlı olarak ortalama % 5 ile % 30 arasında bir verimle elektrik enerjisine çevrilebilir. Şekil 1.3'de FV sistem görülmektedir.



Şekil 1.3. Fotovoltaik sistem

1.1.2. Yoğunlaştırılmış fotovoltaik sistemler

Mercek ya da ayna gibi donanımlar kullanılarak güneş enerjisinin daha yoğun olarak FV hücreler üzerine gönderildiği sistemlerdir. Optik yoğunlaştırıcılar, güneş ışınlarını yüksek verimli ve çok küçük alanlı (1-2 cm²) FV hücrelerin üzerine odaklar ve güneş enerjisini Şekil 1.4'deki gibi elektrik enerjisine dönüştürürler.

Bu modüllerin düzlemsel FV'ler ile karşılaştırıldığında avantajları:
-Verilen bir alana düşen güneş enerjisinden üretilen aynı miktardaki enerji için, diğer FV sistemlere göre aktif yarıiletken malzemenin maliyeti 1/1000' i kadardır.
-Güneşten üretilen elektriğin fiyatı günümüzde kullanılanın yarısından azdır.
-Düzlemsel FV panellerin iki katı verime sahiptirler [2].



Şekil 1.4. Yoğunlaştırılmış fotovoltaik sistem

1.1.3. Yoğunlaştırılmış termal sistemler

Güneş enerjisinden ısı (termal) olarak yararlanılan sistem olup en eski yöntemdir. Geniş bir alana düşen güneş ışınlarını parabolik aynalar, çanaklar, heliostat (gün dönüştürücü) veya Fresnel (ayna-mercek sistemi) gibi güneş yoğunlaştırma amacıyla kullanılan yardımcı araçlar ile nispeten küçük bir alana yansıtma esasına dayanır. Küçük bir alana odaklandırılan güneş ışınları, klasik enerji santrallerinde olduğu gibi ısı kaynağı olarak kullanılır. Güneş ışınlarının yoğunlaştırıldığı yerde kullanılan ve yüksek sıcaklıklara çıkabilen bir yardımcı akışkan ile ısı taşınarak suyun buharlaştırılması ve buhar türbinlerinde kullanılarak elektrik üretilir. Parabolik oluk sistemi, çanak sistemi, güneş kulesi, güneş bacası gibi birbirine benzer prensipte çalışan farklı alt uygulamaları mevcuttur. 1800'lü yıllarda kullanımı daha da yaygın olmakla birlikte, petrol kaynaklarının kullanımı yaygınlaştıkça güneş enerjisi kullanımı ve üzerine olan çalışmalar maalesef yavaşlamıştır. Son yıllarda güneş kulesi uygulaması ABD, İspanya gibi ülkelerde yapılmaktadır. CSP sistemler için sıcaklığın çok yüksek olduğu çöller, vahalar gerekmektedir. Şekil 1.5 ve Şekil 1.6 yoğunlaştırılmış sistemlere örnek olarak gösterilmektedir.



Şekil 1.5. Parabolik oluk sistemi



Şekil 1.6. Güneş kulesi uygulaması, Sevilla

1.2. Güneş Enerjisi ve Çevre

Kömür, petrol, gaz gibi fosil yakıtlar, saldıkları CO₂ ve başka çeşitli gazlar yüzünden atmosferi kirletmekte, sera gazı etkisiyle dünyayı ısıtmaktadır. Isınan gezegende buzullar her geçen gün eriyerek azalmakta, ekolojik düzen bozulmaktadır. Ancak, hem nüfus artışı hem de yoğun enerjiye dayalı sanayi üretiminin artması nedeniyle enerji talebi de giderek artmaktadır. Bu nedenle, enerji gereksinimi konusunda su, rüzgâr, güneş, jeotermal gibi alternatif enerji kaynaklarına yönelmek artık bir tercihten öte zorunluluk haline gelmiştir.

Güneş devamlılığı olan ve bedelsiz bir enerji kaynağı olmasının yanında, güneş enerjisi ile çalışan elektrik santralleri sayesinde fosil yakıtların zararları da önlenmektedir. 1 MW Fotovoltaik elektrik santrali ile atmosfer;

- 1000 Ton CO₂,
- 7 Ton CO,
- 450 Ton Kükürt Dioksit,
- 250 Ton Azot Oksit,
- 3 Ton Hidrokarbon,
- 5 Ton kül'den kurtulmaktadır.

Son yıllardaki güneş enerjisine yönelik yapılan çalışmalar ve geliştirilen teknolojiler, bu enerji türünün daha yaygın, yüksek verimli ve ekonomik olmasına katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

Güneş enerjisinin bilinen en temel üstünlükleri:

- Güneş enerjisi çevre açısından temiz ve ekolojik bir kaynak özelliği taşıdığından fosil yakıtlara alternatif olması, hava kirliliğini önlemesi, dolayısıyla sera etkisini azaltması,
- Sağlık ve risk açısından olumsuz etkilerinin bulunmaması, sessiz çalışması nedeniyle gürültü kirliliği yaratmaması,
- Yenilenebilir, sürekliliği olan ve bedelsiz bir enerji kaynağı olması,
- Güvenilir,ekonomik, sınırsız ve uzun ömürlü olması,
- Kurulum finansmanı dışında önemli bir maliyetinin olmaması, işletme maliyetinin düşük olması, batarya sistemleri dışında mekanik yıpranma ve bakım gereksinimi olmaması ve kısa zamanda devreye alınabilmesi,
- Modüler olmasından ötürü istenildiğinde mevcut sistemin kolaylıkla büyütülüp küçültülebilmesi,
- Ekonomik ömrü sonucu sökülme maliyetinin minimum olması ve atıkların yok edilme maliyetinin az olması,
- Hafif olmasından ötürü kurulum ve değişiklik durumlarında kolaylık sağlaması,
- Yaygın istihdam olanakları sağlaması,
- Özellikle şebeke elektriğinin ulaşmadığı kırsal ve dağlık bölgelerdeki dağ evleri, sulama alanları, baz istasyonları gibi tesisler için, enerji ihtiyacını karşılayabilir olması, enerji üretiminde merkezi bir anlayış yerine yerelliğin avantajlarını barındırarak enerji nakil maliyet ve güç kayıplarını ortadan kaldırması, ayrıca yeni bir enerji nakil hattı çekilmesi, trafo yerleştirilmesi gibi ek yatırımlara ihtiyaç duymaması olarak sıralanabilir.

Güneş enerjisi sistemlerinin birçok avantajının yanında dezavantajları da vardır.

Bunlar:

- Üretilen elektriğin depolanmasındaki zorluklar kullanımını sınırlandıran en önemli parametrelerdir.
- Verimleri %20 civarlarında olup, sistem bileşenlerdeki diğer kayıplarla birlikte bu oran daha da düşmektedir.
- İlk kurulum maliyeti oldukça yüksektir.
- Geceleri üretim yapılamaz, kapalı, bulutlu, yağmurlu günlerde performans kaybı olmaktadır. Bunu engellemek için sisteme anahtarlama ve koruma devrelerinin eklenmesine gereksinim vardır, bu da maliyeti arttırmaktadır.

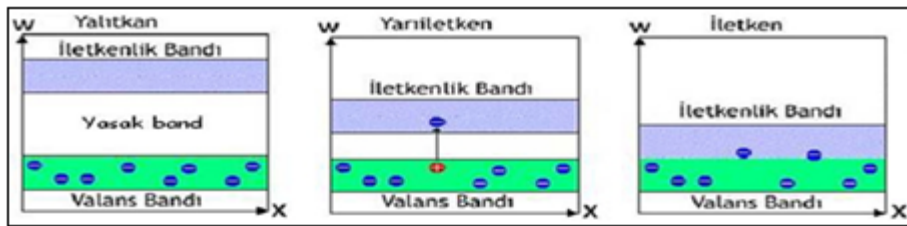
- Sistem parçaları genelde bakım gerektirmese de yapısı gereği bataryaların periyodik olarak kontrol edilmesi gerekmektedir.
- Paneller DC güç ürettiğinden elektrikli aletlerin kullanımı ve şebeke bağlantısı için eviriciler kullanılmalıdır.
- Dış etkilerden kolaylıkla etkilenip zarar görebilirler ve panel yüzeylerinin zarar görmesi verimde kayıplara neden olmaktadır.
- Temiz enerji olarak nitelendirilmesiyle birlikte, hücrelerin üretim aşamalarında çevreye zararlı atıklar ortaya çıkabilmektedir.

1.3. Fotovoltaik Hücreler

1.3.1. Fotovoltaik etki

Güneş ışınları foton adı verilen yüklü taneciklerden meydana gelir ve sahip olduğu enerji fotonlar aracılığıyla taşınır. Fotonlar, güneş ışınım spektrumundaki farklı dalga boylarına bağlı olarak farklı miktarlarda enerji içerirler. Güneş ışığının sahip olduğu enerjinin FV hücreleri meydana getiren yarı iletken madde tarafından soğurulması ile fotovoltaik dönüşüm başlamış olur.

Yarı iletken malzeme yapısında farklı enerji seviyeleri bulunmaktadır. Bu enerji seviyeleri, Şekil 1.7'de görüldüğü gibi değerlik elektronlarının bulunduğu en dış kabuktaki enerji bandı olan "valans bandı" (değerlik bandı), elektronların serbest olarak bulunduğu "iletkenlik bandı" ve bu iki enerji seviyesi arasındaki boşluğu ifade eden "yasak band" denen bölgedir. Bir elektronun valans bandından iletim bandına geçebilmesi için sahip olması gereken enerjiye yasak bant enerjisi (E_g) adı verilir. Yasak enerji bandının büyüklüğü aynı zamanda malzemenin iletkenliğinin de ölçüsüdür. Buna göre, yasak enerji bandı 2,5 eV' dan büyük olan malzemeler yalıtkan olarak nitelendirilirler. Yarı iletken malzemelerin yasak bant enerjileri Şekil 1.8'de verilmiştir.



Şekil 1.7. Yarı iletkenlerde bant seviyeleri

Yarıiletken Malzeme	E_g (eV)
Silikon (Silisyum) (Si)	1.1
Germanyum (Ge)	0.7
Galyum Arsenik (Ga As)	1.4
Kadmiyum Tellür (CdTe)	1.4
Indiyum Fosfor (In P)	1.2
Kadmiyum Diarsenik (CdAs ₂)	1.0

Şekil 1.8. Yarı iletken malzemelerin yasak bant enerjileri

Yarı iletken malzeme içerisinde valans bandında bulunan bir elektronun, yarı iletken malzemenin yasak bant enerjisine (E_g) eşit veya daha yüksek bir foton ile karşılaşarak iletim bandına geçmesi sonucu elektron-boşluk çifti oluşmasına fotovoltajik etki adı verilir. Elektron-boşluk çifti fotovoltajik hücredeki enerji dönüşümünün temelini oluşturur [3].

1.3.2. Yarı iletkenlerin elektriksel özellikleri

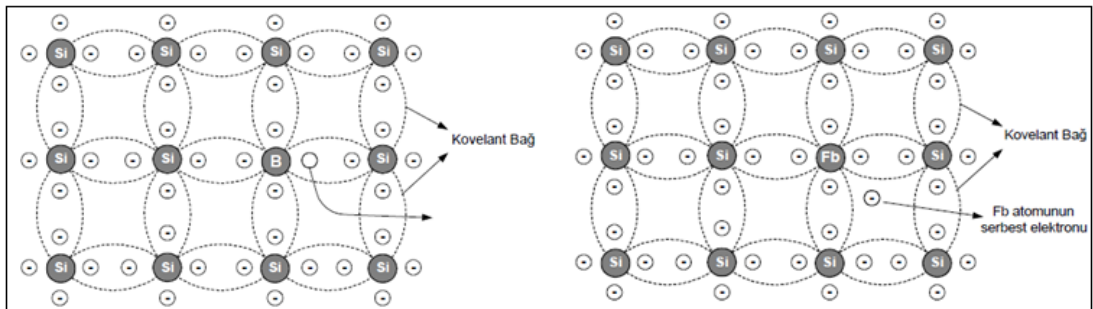
Fotovoltajik hücrelerin yapımında en çok kullanılan yarı iletken malzemeler silisyum ve silisyum alaşımlarıdır. Silisyum yarı iletkeninin valans bandında bulunan bir elektron 1,1 eV değerinden daha büyük bir enerjiye sahip bir foton ile karşılaştığında, arkasında pozitif yüklü bir boşluk (hole) bırakarak iletim bandına geçer. Elektronlar iletim bandının alt tarafında, boşluklar ise iletim bandının üst tarafında kümelenirler. Neticede, her bir elektron, yasak bant enerjisine eşit foton enerjisini çok kısa bir süre içerisinde kaybederek tekrar valans bandındaki boşluklarla birleşirler. Eğer, iletim bandına çıkmış olan elektronlar, ömür süreleri içerisinde boşluklardan (yani artı yüklerden) bir şekilde ayrılmazlar ise, elektriksel akıma yani fotovoltajik hücredeki enerji dönüşümüne katkısı olmayacaktır. Bir fotovoltajik hücre, yasak bant enerjisinden daha yüksek enerji içeriğine sahip fotonlara maruz kaldığı sürece, yarı iletken malzeme içerisinde elektron-boşluk çiftlerinin oluşumu devam eder [3].

Buradaki temel problem, elektron ve boşlukların yeniden birleşmesi neticesinde, yük taşıyıcılarının enerji dönüşümünü tamamlayamadan ortadan kaybolmasıdır. Yeniden birleşmenin önüne geçebilmek için, iletim bandındaki elektronları, boşluklardan uzak tutacak bir kuvvete ihtiyaç duyulur. Bu kuvvet, yarı iletken malzeme içerisinde

oluşturulan bir elektriksel alan ile temin edilir. Söz konusu elektriksel alan, elektronları ve boşlukları zıt yönlere doğru iterek yeniden birleşmeye engel olur.

Gerekli olan bu elektriksel alan, katkılama adı verilen, elektriksel iletkenlik karakteristikleri birbirlerinden farklı olan yarı iletkenlerin bir araya getirilmesi ile sağlanır. Katkılama saf yarı iletken malzemeye, yapısal özelliklerini bozmayacak oranda, katkı maddesi eklenerek, elektriksel özelliklerinin kontrollü bir şekilde değiştirilmesi işlemidir. Yarı iletken malzeme içerisinde elektriksel alan oluşturabilmek için, kristal içerisinde katkılama yapılarak oluşturulan iki farklı bölge meydana getirilir [3].

Bölgelerden biri, saf silikon kristaline periyodik tablonun 3A grubunda yer alan bir elementin (Bor), çok düşük konsantrasyonlarda ilave edilmesiyle oluşturulur. Borun 3 adet valans elektronu ile silisyum 4 adet valans elektronu, kendi aralarında kovalent bağ yapar ve silikon atomuna ait bir valans elektronu boşta kalır. Silikon atomunun boşta kalan valans elektronu, komşu Bor atomunda bulunan boşluğu doldurur. Böylece, silikonun kristal yapısı içerisinde 1 elektron eksikliği meydana gelmiş olur. Yarı iletken kristalinden elektron olarak elektron ihtiyacına neden oldukları için, bu atomlara alıcı (akseptör) atom adı verilir. Silikon kristali içerisinde alıcı atomlarının yer aldığı bölgede boşluk fazlalığı olduğu için bu bölüm p tipi malzeme olarak isimlendirilir. Bu katkılama işlemi sonucunda p tipi yarı iletken oluşur [3]. Şekil 1.9'da katkılama öncesi ve sonrası yarı iletkenin kristal yapısı görülmektedir.



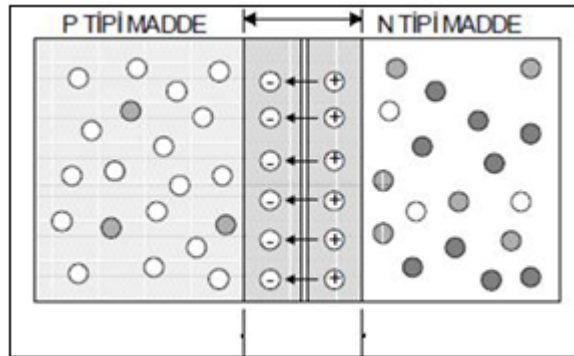
Şekil 1.9. Yarı iletken maddenin katkılama öncesi ve sonrası kristal yapısı

Diğer bölge ise yine saf silikon kristaline, bu sefer periyodik tablonun 5A grubunda bulunan bir elementin (fosfor) eklenmesi neticesinde meydana getirilir. Fosforun 5 adet valans elektronu ile silisyum 4 adet valans elektronu, kendi aralarında kovalent

bağ yapar. Fosforun beşinci valans elektronu kristal içerisinde serbest kalır. Kristale fazladan elektron bıraktığı için bu atomlara verici (donör) atom adı verilir. Silisyum kristali içerisinde verici atomlarının yer aldığı bölgede elektron fazlalığı olduğu için bu bölüm ise n tipi malzeme olarak isimlendirilir. Bu katkılama işlemi sonucunda n tipi yarıiletken oluşur [3].

Elektron eksikliği (ya da boşluk fazlalığı) olan p tipi malzeme ile elektron fazlalığı olan n tipi malzemenin birleştirildikleri sınıra p-n eklemi adı verilir. Eklem bölgesi üzerine ışık düşmesiyle oluşan elektron-boşluk çiftleri, p-n ekleminde oluşan elektriksel alan yardımıyla birbirlerinden ayrılırlar. Oluşan bu elektriksel alan, n-tipi malzemenin eklemeye yakın bölgelerindeki hareketli elektronlarının, arkalarında pozitif yüklü boşluklar bırakarak, p tipi malzemeye geçmelerine sebep olur. Sınırı geçerek p tipi malzeme içerisine gelen elektronlar eklemeye yakın bölgede bulunan boşluklara yerleşirler [3].

P-n eklemindeki elektron ve boşluk hareketi denge durumu elde edilinceye kadar devam eder. Denge durumuna ulaşıldığında Şekil 1.10'da görüldüğü gibi “deplasyon bölgesi” adı verilen bir tabaka oluşur [3]. Deplasyon bölgesi, boşlukları p tipi malzemeye, elektronları ise n tipi malzemeye iterek, elektron ve boşluk hareketini engeller ve elektron ve boşlukların yeniden birleşmesi önlenmiş olur.



Şekil 1.10. P-n eklemi deplasyon bölgesi

Sonuç olarak; ışınım etkisiyle polarize olan katkılı silisyum maddesi, fotonların enerjisini alarak serbest hale gelen elektronlar sayesinde bir enerji kaynağına dönüşür. Işınım etkisiyle bor katkılı p maddesinden ayrılan elektronlar, fosfor katkılı n maddesinde birikir. N tipi yarı iletkenin çoğunluk taşıyıcısı olan elektronlar, dış devre yoluyla p maddesindeki çoğunluk taşıyıcısı boşluklara dönerken enerjilerini

devredeki yük üzerinde bırakırlar. Silikon hücre ışınım aldığı sürece döngü devam eder ve elektrik enerjisi üretimi de böylece gerçekleşmiş olur [3].

1.3.3. FV hücre türleri

FV hücre teknolojisi, kullanılan maddeler ve yapım türleri bakımından son derece zengindir. FV hücre yapımı için, şu anda kullanılmakta olan bir düzineden fazla maddenin yanı sıra, onlarca FV hücre teknolojisi ve yapım türleri vardır. Birçok farklı maddenin de üzerinde çalışılmaktadır. Fotovoltaik teknolojiye gelişmelerin asıl amacı, sadece hücrelerin verimliliğini artırmak değil, aynı zamanda üretim maliyetini de azaltmaktır. Belli başlı FV hücre türleri üç grupta incelenebilmektedir.

Bunlar ;

- Kristal silisyum güneş pilleri;
- İnce film güneş pilleri; amorf silisyum bazlı güneş pilleridir.
- Diğer yapıllı piller; bakır-indiyum-diselenit, kadmiyum-tellür, galyum-arsenik v.b.

Monokristal silikon hücreli güneş pilleri: Siyah veya koyu mavi renktedir. Tek kristalli, yüksek verimli, uzun ömürlü fakat diğer çeşitlerine göre maliyeti daha yüksektir. FV hücrenin monokristal olması demek tüm hücrenin atomik yapısının homojen olması demektir. Monokristal yapı hücreleşmez, düzensiz ve boşluklu yapı oluşturmaz. “Czochralski”, “Float-zone” ya da “Ribbon” metodu ile silisyumun saflaştırılması ve kristalleşmesi işlemiyle üretilen silindir şeklindeki tek kristalli silisyum külçeleri 150-200 mikron kalınlıkta ince tabakalar halinde kesilir. Sonra bu katmanlar üzerinde fosfor ve bor atomları eklenmiş n ve p tipi katmanlar oluşturulur. FV hücrenin silikon nitrat ya da silikon dioksitten yapılmış üst ve alt yüzeyinde, üretilen akımı toplayacak, malzemesi genellikle nikel, bakır ve gümüşten yapılmış negatif kontaklar bulunmaktadır. Gömülü durumda olan bu kontaklar kendi içindeki kayıplarını ve iletimdeki direncini düşürmesini sağlamıştır. Pilin ön yüzeyi, yansıyan ışığı daha iyi toplayabilmek amacıyla, piramitler ve konikler şeklinde dizayn edilebilir. Maliyeti yüksek olmasına karşın yinede monokristal FV hücreler uzun vadeli yatırım için en iyi seçenektir [2, 3].

Polikristal silikon hücreli güneş pilleri: Çoklu kristal fotovoltaik hücrelerin yüzeyi mavi renkte olur. Verimleri monokristale göre %2-5 daha düşük olmasına karşın verimlilik/maliyet oranı yüksek olduğu için bu tip hücreler FV sektöründe en çok

kullanılan teknolojidir. Kristal yapıları kısmen düzgün olduğu için daha az gerilim taşırlar, yani verimlilik faktörleri biraz daha düşüktür. İmalatı daha kolay ve üretimi daha ucuzdur. Çok kristalli malzemede damarlar kristal yapıda olup birbirlerine yönlenmişlerdir. Elektriksel özellikleri hemen hemen tek kristalli hücrelerle özdeştir. Kristalin kalitesi damarların kalınlıklarıyla doğru orantılıdır. Damarlar arasındaki süreksizlik iletimde engelleyici rol oynar. Çok kristalli silisyum üretim teknolojileri daha az enerji gerektirir, yani maliyet tek kristalli hücre baz alındığında düşüktür. Buna rağmen çok kristalli yapının verimi tek kristalli yapının verimine göre daha düşüktür. Ancak bahsedildiği gibi maliyetinin az olması onu daha fazla alanda kullanışlı hale getirmiştir [2, 3].

Fotovoltaik hücre üretiminde kullanılan malzemenin ve işçiliğin azaltılması, teknolojinin basitleştirilerek maliyetlerinin düşürülmesine yönelik yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları, yarı iletken malzemenin geniş yüzeyler üzerine ince bir film şeklinde kaplanmasını gündeme getirmiştir. İnce Film teknolojisi 1-2 mikrometre kalınlığında tabakalar üzerinde yarıiletken malzeme kullanarak FV üretim teknolojisidir. Ayrıca bunun yanında seri üretime yatkınlığı, hücreler arası daha basit elektriksel bağlantılara imkan vermesi ve büyük ebatlarda üretime yatkınlığı gibi avantajlarından dolayı uzun dönem içerisinde kristal silikon üretim teknolojilerine göre üretim maliyetinin düşürülmesini mümkün kılacak bir teknoloji olarak görülmektedir.

Amorf (Amorphous) ince tabaka güneş pilleri: İnce film fotovoltaik malzeme genellikle çok kristalli malzemelerdir ve bükülebilir özelliktedir. Verimleri düşük (%5-8) fakat gölge ortamlarda dahi enerji ürettiklerinden çatılarda kullanımı idealdir. İnce film modüller koyu kırmızı veya koyu kahverengi olur. Düşük malzeme tüketimi ve uygun fiyatları sayesinde geniş yüzeylerin kaplanacağı projelerde tercih edilirler. Parlak gün ışığında verimlilik faktörleri düşüktür, ancak dağınık ışıkta ve daha sıcak iklimlerde pek çok avantajları vardır. Bu malzemeyi kristalli silisyum malzemelerden ayıran özellik, silisyum atomlarının malzeme içindeki düzenlerinin dağınık, gelişigüzel olmasıdır.

Kadmiyum Tellür (CdTe) Güneş Pilleri: Periyodik tabloda II. grupta bulunan kadmiyum elementi ile VI. grubunda bulunan tellür elementinin bir araya getirilmesi

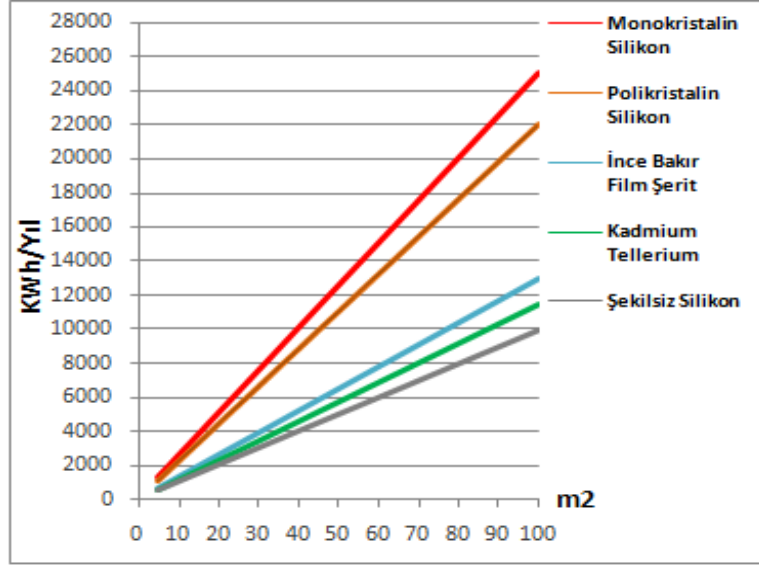
ile oluşan yarı iletken kadmiyum tellürün oda sıcaklığında yasak enerji aralığı $E_g = 1,5$ eV dir. Bu değer ise güneş spektrumundan maksimum dönüşüm elde etmek için gerekli olan değere çok yakındır. Hem yüksek ışın soğurma kabiliyeti hem de kolay, düşük masraflı üretim CdTe yarı iletkeninin öne çıkmasını sağlamıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda en ideal şartlarda CdTe hücresinden %16,5 verim elde edilmiştir. Bu teknikle yapılan ticari modüllerden ise alınan en iyi verim %11 civarındadır. Fakat kadmiyum elementinin zehirli olması sebebiyle kısıtlamalı ve kontrollü kullanım gibi sorunlar ortaya koymaktadır .

CIS (Copper Indium) güneş pilleri: Güneş ışığının daha geniş bandını değerlendirme özelliğine sahip olduğundan bulutlu havalardaki performansı diğer türlerine göre daha iyidir. Verim %5 kadardır.

Bakır indium güneş pillerinin güneş ışığını soğurma katsayısı yüksektir. Yasak enerji aralıkları güneşin spektrumu ile ideal biçimde olacak şekilde ayarlanabilir. Bu pillerin yasak enerji aralıkları 1,02-1,68 eV civarındadır. CIS malzemesine galyum elementi katılması ile daha yüksek verim (%19,5) elde etmek mümkündür. Ayrıca esnek malzemeler üzerinde kullanılabilmesi ve dayanıklı olması gibi yararları vardır. Fakat indium içermesi sebebiyle üretimin sınırlı olması, karmaşık üretim yöntemleri gibi dezavantajları bulunmaktadır.

Galyum Arsenit (GaAs): Kızılötesi ışınlar aşırı duyarlı bir bileşiktir. CPV sistemlerle verimi %30'a kadar çıkmaktadır. Bir yarı iletken maddenin ışığa, ışınımına karşı duyarlılık derecesi, o maddenin verimini ve modül performansını belirler. Yüksek maliyetli yarı iletken malzemeler (GaAs, GaAlAs, GaInAsP, InSb, InP) yer yüzeyine gelen güneş enerjisinin üçte birinden fazlasını elektrik enerjisine çevirebildikleri için bu yönde araştırmalar başlamıştır. 1990'ların başında yapılan deneylerden elde edilen sonuçlarda "multiple-junction" aygıtından %30 verim alındığı görülmüştür. Sonraki çalışmalarda hücre verimi %40 lara sistem verimi de %30-35 civarına ulaşmıştır. Bu sistemlerin maliyeti çok yüksek olduğundan şu an için uzay çalışmalarında kullanılmaktadır.

Şekil 1.11'de çeşitli madde ve teknolojilerle üretilmiş bazı güneş pillerinin yıllık enerji getiri eğrileri verilmektedir. Sistem tasarımı yapılırken verim/maliyet analizi için bu verilerden yararlanılır.



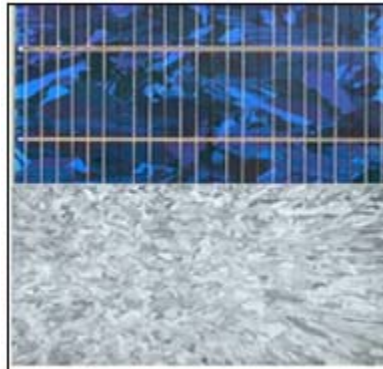
Şekil 1.11. Güneş pillerinin yıllık enerji getiri eğrileri [2]

Fotovoltaik hücrelerden yararlanmak veya bu hücrelerden FV modüller oluşturabilmek için hücrelerin teknik özelliklerinin bilinmesi gerekir.



Şekil 1.12. Monokristal hücre

Kristal yapılı yarı iletken hücreler, tablolar da belirtildiği gibi verimleri ve kapladığı alanlar daha çok önem arz eder. Şekil 1.12'de monokristal ve Şekil 1.13'de polikristal hücreler görülmektedir.



Şekil 1.13. Polikristal hücre

1.3.4. FV hücrelerde güç ve verimlilik

Güneşin yeryüzüne kadar ulaştırdığı 1000 W/m^2 'lik ışımının ne kadarının elektriksel güce dönüştürülebildiğini verimlilik kavramıyla açıklanır. Güneş pillerinin yaklaşık verimleri Tablo 1.3.'de verilmiştir.

Tablo 1.3. Güneş pillerinde hücre verimleri

Teknoloji	Kristal Silikon		İnce Film		
	Mono	Poli	Amorf Silisyum (a-Si)	Kadmiyum Tellür (CdTe)	Bakır İndiyum (CuInSe ₂)
Hücre Verimi	%15-24	%14-19	%6-13	%10-16	%13-20

Bir güneş pilinin ürettiği enerji hava koşullarına ve güneşle olan açısına göre değişir. Her fotovoltaik modülün Standard Test Şartlarındaki (STC-Standard Test Conditions) bir değeri vardır. STC, 1000 W/m^2 güneş enerjisinin 25°C 'lık sıcaklıktaki hava kütesinin taşıdığı şartlardır. Şekil 1.14'te görüldüğü gibi hava koşulları, bir FV modülün güç değeri ve enerji getirisini önemli ölçüde etkilemektedir.

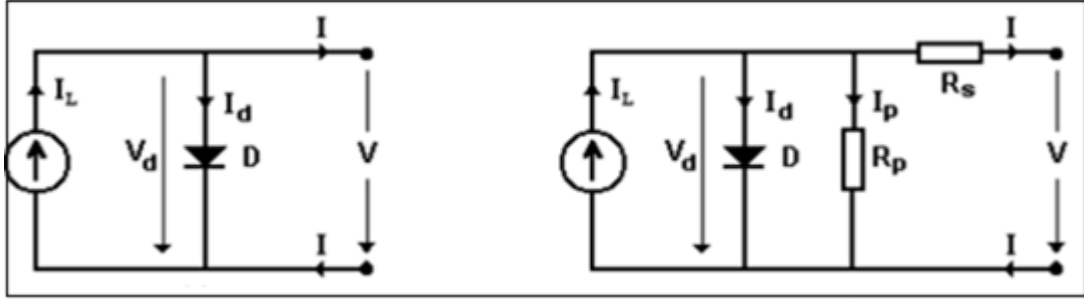


Şekil 1.14. FV güç değerinin hava koşullarına göre değişimi

1.3.5. FV hücre elektriksel özellikleri

1.3.5.1. FV hücre modeli

Bir fotovoltaik hücrenin elektronik davranışının anlaşılabilmesi için, davranışları iyi bilinen ayrı elektriksel bileşenler kullanılarak elektriksel eşdeğer devresinin elde edilmesi gerekir. İdeal bir fotovoltaik hücre, Şekil 1.15'de görüldüğü gibi bir diyot ve paralel bir akım kaynağı kullanılarak modellenabilir.



Şekil 1.15. Fotovoltaik hücrenin basitleştirilmiş ve tek diyotlu eşdeğer devresi

Akım kaynağı, ışık şiddeti (G) ile direkt orantılı olan fotovoltaik akım I_L 'yi meydana getirir. Şekildeki diyot, fotovoltaik hücrenin p-n geçiş bölgesini temsil etmektedir. FV pil yarı iletken bir malzeme olması nedeniyle diyot ile gösterilmiştir [4]. Basitleştirilmiş eşdeğer devreden FV hücrenin akım denklemi, Kirchhoff'un akım kanunundan Denklem (1.1)'deki gibi yazılabilir;

$$I = I_L - I_d \quad (1.1)$$

Burada I fotovoltaik hücre akımı, I_L fotovoltaik akım, I_d diyot akımıdır. Fotovoltaik hücre pratikte ideal olmadığı için, basitleştirilmiş eşdeğer devre elektriksel olarak optimal bir gösterimi vermemektedir. Gerçek fotovoltaik hücrede, harici kontaklar üzerinde gerilim düşümü gözlenir. Buradaki gerilim düşümü seri bir R_s direnci ile ifade edilebilir. Ayrıca, pratikte gözlenen sızıntı akımını ifade etmek amacıyla paralel bir R_p direnci de kullanılır. Böylece fotovoltaik hücre Şekil1.15'deki eşdeğer devre ile modellenilebilir [4].

Eşdeğer devrede görülen temel akımlar;

Fotovoltaik akım I_L : Fotovoltaik hücre üzerine düşen ışık şiddeti ile doğru orantılıdır.

Diyot akımı I_d : Gerilime ve ters doyma akımı I_{sat} 'a bağlıdır ve Denklem (1.2) ile ifade edilir;

$$I_d = I_{sat} \left[\exp \left(\frac{q V_d}{nkT} \right) \right] \quad (1.2)$$

Burada I_{sat} diyot ters doyma akımı, q elektronun elektrik yükü, V_d diyot üzerinde düşen gerilim, n diyot emisyon faktörü, k Boltzmann sabiti ve T mutlak sıcaklıktır.

Paralel kol akımı I_p : Paralel kol direncinde, eklem geriliminin etkisi ile ortaya çıkan ve Denklem (1.3) ile ifade edilen akımdır. Paralel kol direnci R_p , n ve p eklemleri boyunca akan akımdan dolayı ortaya çıkan güç kaybını belirler. R_p ise çok ince katmanlardan oluşan ince film yapısına sahip malzemelerde katmanlar arasında ve hücre çevresinde oluşan dirençlerin toplamıdır [4].

$$I_p = \left(\frac{V_d}{R_p} \right) \quad (1.3)$$

FV hücre çıkış akımı I:

$$I = I_L - I_d - I_p \quad (1.4)$$

Yarı iletkenin direnci, ışık geçirmeyen elektrot direnci ve bağlantı noktalarındaki dirençlerin oluşturduğu seri direnç R_s , Denklem (1.5) ile gösterilen gerilim düşümüne sebep olur.

$$I R_s = V_d - V \quad (1.5)$$

Denklem (1.2), Denklem (1.3) ve Denklem (1.5), Denklem (1.4)'te yerine konulursa, tek bir hücre için Denklem (1.6) ile verilen genel bir matematiksel model elde edilir;

$$I_d = I_{sat} \left[\exp \left(\frac{q(V + I R_s)}{nkT} \right) - 1 \right] - \frac{V + I R_s}{R_p} \quad (1.6)$$

Paralel direnç R_p , çok büyük olduğu için genellikle sonsuz kabul edilir. Hücre sıcaklığı, ışık şiddeti, ortam sıcaklığı ve rüzgar hızı gibi çevre şartlarından etkilenir. Bu faktörlerin tamamı Denklem (1.7)'de gösterildiği gibi fotovoltaik hücredeki ısı transferine etki eder.

$$T = 3,12 + 0,25G + 0,899T_a - 1,3w_s + 273 \quad (1.7)$$

Burada G ışık şiddeti (W/m^2), w_s rüzgar hızı (m/s), T_a ise ortam sıcaklığını ($^{\circ}K$) göstermektedir. Sıcaklığın ters doyma akımına etkisi, Denklem (1.8) ile verilir;

$$I_{sat} = I_{sat,ref} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left(\frac{qE_G}{nk} \left[\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right] \right) \quad (1.8)$$

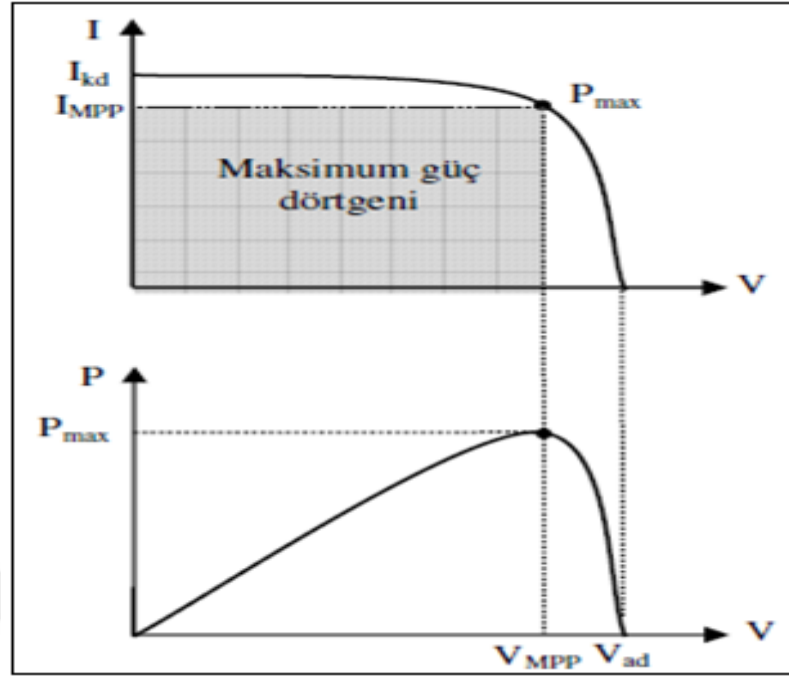
Burada $I_{sat,ref}$ referans sıcaklıktaki diyot ters doyma akımı, T_{ref} referans sıcaklık (298°K), E_G yarı iletken hücrenin band enerjisidir. Fotovoltaik akım, ışık şiddeti ve fotovoltaik hücre sıcaklığının bir fonksiyonudur ve Denklem (1.9) ile ifade edilir;

$$I_L = [I_{L,ref} + k_i (T - T_{ref})] \frac{G}{G_{ref}} \quad (1.9)$$

burada k_i , FV hücre kısa devre akımının sıcaklık katsayısı (A/°C), $I_{L,ref}$ referans sıcaklıktaki fotovoltaik akım, G_{ref} referans sıcaklıktaki ışık şiddetidir. Genel olarak 3 mA/°C olarak alınır [4].

1.3.6. Fotovoltaik güç karakteristikleri

Bir fotovoltaik hücrenin karakteristik akım-gerilim eğrisi Şekil 1.12’de görüldüğü gibidir. Çalışma şartlarına bağlı olarak bu eğrinin herhangi bir noktasında çalışması mümkündür. FV hücre, güneş ışığı altındayken bir gerilim oluşturur. Hücrenin uçlarına sonsuz yük direnci bağlandığında ölçülen bu gerilime açık devre gerilimi V_{ad} denir. Pil, ışığa altındayken uçlarının kısa devre edilmesiyle akan akıma da kısa devre akımı I_{kd} denir. FV hücrenin karakteristik eğrisinde eksenleri ifade eden ve sınır değer oluşturan bu iki tanımdır. Farklı ışığa koşulları altında açık devre gerilimi V_{ad} ve kısa devre akımının I_{kd} büyüklükleri farklı olur. Bu durumda farklı ışığa altındaki FV hücrelerin eğrileri farklıdır. Üretici firmalar 1000 W/m² gibi standart değerler altında yapılan ölçümlere göre bu değerleri belirler. Bu değerler aynı zamanda bir hücrenin verebileceği maksimum akım ve gerilim değerleridir. Yalnız yük altında çalışırken, pilden maksimum güç elde edebilmek için bu değerlerin eğrideki maksimum gücü verecek noktaya kaymaları gerekmektedir [4].



Şekil 1.16. İdeal bir fotovoltaik hücrenin I-V ve P-V karakteristikleri

Yüke aktarılan gücün maksimum olduğu noktaya maksimum güç noktası denir ve bu nokta Şekil 1.16’da görülen P_{max} noktasıdır. Bu nokta üzerindeki akım ve gerilim değerleri I_{MPP} ve V_{MPP} edilir. Hücreden beklenen optimum performans, hücrenin bu nokta üzerinde çalışmasını sağlamaktır. Diğer bir parametre ise maksimum gücün (P_{max}), kısa devre akımı I_{kd} ile açık devre gerilimi V_{ad} ’nin çarpımına bölümünden elde edilen ve Denklem (1.10) ile gösterilen doldurma faktörüdür. Bu değer üretilen FV hücreler için hesaplanabilir ve ideal bir hücre için 0,7 değerinden büyük olması istenir. Genellikle değeri $0,7 < \eta_d < 0,85$ arasındadır. Doluluk faktörü η_d , I-V eğrisinin karesel olmasıyla alakalı bir ölçüttür ve Denklem (1.10) ile gösterilir [4].

$$\eta_d = \frac{I_{MPP} V_{MPP}}{I_{kd} V_{ad}} \quad (1.10)$$

FV güneş pillerinin karakteristik eğrilerinin çalışma koşullarını belirleyen iki önemli etken olan ışık ve sıcaklık seviyelerinden etkilenmektedir. Değişen çalışma koşullarından ötürü, pilin çalışma noktası da sürekli değişmekte dolayısıyla pilin çalışma noktası her zaman maksimum güç noktası olmamaktadır. FV güneş pillerinin uygun şekilde seri ve paralel bağlanmaları sonucunda farklı güç değeri ve karakteristiğine sahip paneller elde edilir. Söz konusu etkiler göz önünde

bulundurularak panellerin sürekli maksimum güç noktasında çalıştırılabilmesi için çıkış akımı ve çıkış gerilimi takip edilerek çıkış gücü ölçülür. Denetleyiciler ve yazılımlar ile panellerin maksimum güç noktaları belirlenir ve çıkış gücü bu akım ve gerilim değerlerinin eğri üzerinde kaydırılmasıyla maksimum güç noktasında kararlı bir çalışma göstermesi beklenir. Güneş takip sistemleri, yansıtıcılar, soğutma sistemleri v.b. ışık ve sıcaklık faktörlerini kontrol etmeyi sağlayan yardımcı sistemler olmakla birlikte esas olarak güç dönüştürücüleri yardımı ile maksimum güç noktasında kararlı çalışması sağlanır.

Bir FV panelin maksimum güç noktasında çalıştırılabilmesi için, öncelikle bu noktanın önceden bilinmesi ya da anlık olarak hesaplanması gerekir. Maksimum güç noktası olarak saptanan bu değer, referans değer olarak kabul edilir ve panelin o andaki çıkış gücüyle karşılaştırma yoluna gidilir.

Denklemlerde geçen I_{sat} akımı; sıcaklıkla artar, malzeme kalitesiyle de azalır. I_{sat} akımının değeri Denklem (1.11) ile hesaplanabilir. Buradan, her 10 °C' lik sıcaklık artışında, I_{sat} akımının 2 katına çıktığı görülmektedir,

$$I_{sat2} = I_{sat1} \cdot 2^{\frac{\Delta T}{10}} \quad (1.11)$$

Çalışma sıcaklığı ya da ışık şiddeti değiştikçe, bu karakteristiklerin biçimleri aynı kalacak şekilde akım, gerilim ve güç değerleri de değişir. FV sistemlerde çıkışa bağlı yük, genellikle sabit bir güce ihtiyaç duymaktadır.

Kullanılan FV panellerin ürettiği çıkış gücünün gerekenden fazla olması durumunda yükü artırarak veya fazla gücü depolayarak çözüm üretilebilir. Ters durumda ise gerekli ek güç, aküler yardımıyla karşılanabilir veya yükte indirime gidilebilir. Sonuç olarak, her iki durumda da çıkışın maksimumda tutulması gerekmektedir. Ancak yükün her zaman sabit olacağını düşünmek yanlış olur. Elektriksel bir sistemde değişken yük göz ardı edilmemesi gereken bir parametredir. FV sistemlerde de yük üzerindeki değişimlerin giderilmesi için DC/DC dönüştürücü devreleri kullanılmaktadır.

1.4. DC/DC Dönüştürücüler

Birçok endüstriyel uygulamada DC/DC dönüştürücüler oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Doğrudan, ayarlanabilir gerilimli bir güç kaynağı uygulaması, herhangi bir uygulamada gerekli olan herhangi bir DC gerilim seviyesinin elde edilmesi ya da empedansları uyumsuz olan ardışık iki katın birbirine uydurulması vb. sebepler için kullanılırlar. DC/DC dönüştürücüler DC motorların sürüş ve faydalı frenlemede enerjinin geri kazanılması amacıyla, DC regülatör olarak ve bir bobin ile birlikte DC akım kaynağında kullanılırlar. FV sistemlerde ise DC/DC dönüştürücüler, istenilen düzeyde çıkış gücü almak ve akülere ya da sistem çıkışındaki yüke bu gücü iletmek için kullanılan elektrikli devrelerdir. DC/DC dönüştürücüler, akülerin gün içinde aşırı yüklenmesini engeller. Çalışma prensibine göre buck (alçaltıcı) ve boost (yükseltici) olmak üzere iki tip DC/DC dönüştürücü vardır.

Beş temel topolojiye sahip olabilirler;

1. Buck (Alçaltıcı) dönüştürücüler
2. Boost (Yükseltici) dönüştürücüler
3. Buck-Boost dönüştürücüler
4. Cúk dönüştürücüler
5. Tam köprü dönüştürücüler

Bu beş tip dönüştürücüden Buck ve Boost dönüştürücüler temel dönüştürücülerdir. Buck-Boost, Cúk ve Tam köprü dönüştürücüler Buck ve Boost dönüştürücülerden türetilmişlerdir. Çıkışın eşdeğer direnç ile temsil edilen bir yükü beslediği varsayılmaktadır. Bu çıkış bir DC motoru besliyorsa yük direnç, endüktans ve seri bağlı DC gerilim kaynağı ile temsil edilir.

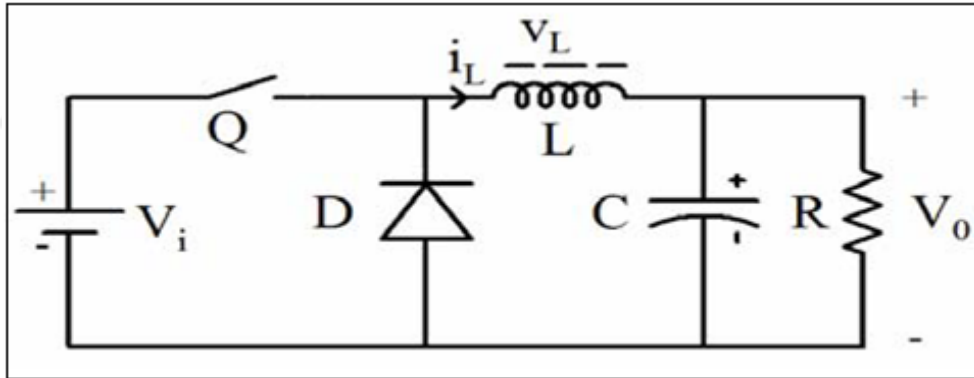
1.4.1. DC/DC dönüştürücülerin kontrolü

Çıkış gerilimi öyle denetlenmelidir ki, giriş gerilimi ve çıkış yükü değişse bile çıkış geriliminin ortalama değeri istenen değerde olmalıdır. Devrede kullanılan anahtarlama elemanının iletimde ve kesimde olma süreleri ayarlanarak denetlenmesiyle çıkış gerilimi ayarlanabilir [34].

Çıkış gerilimini denetleme yöntemlerinden biri anahtarlama frekansını sabit yapmak ve anahtarlamanın iletim süresini belirleyerek çıkış gerilimini denetlemektir. Bu amaçla PWM (Pulse Width Modulation) yöntemi kullanılır. Anahtarın iletimde olduğu sürenin anahtarlama periyoduna oranı D çevrim oranını verir. Anahtarlama frekansındaki değişimler devrenin giriş ve çıkışındaki dalgalı bileşenlerin filtrelenmesini zorlaştırır [34].

1.4.2. Buck dönüştürücü

Düşürücü dönüştürücü, girişindeki doğru gerilimi daha düşük bir doğru gerilim seviyesine düşürerek çıkışa aktaran sistemlerdir. Şekil 1.17'de düşürücü tip dönüştürücü yapısının basitleştirilmiş bir şeması görülmektedir. L bobini ve C kapasitesi çıkış gerilimini filtrelemek için kullanılmaktadır. Anahtarlama elemanı iletimde iken diyot kesimde olmaktadır. Anahtarlama elemanı darbe genişlik modülasyonunun (PWM) anahtarlama frekansı oranına göre açılıp kapatılır.



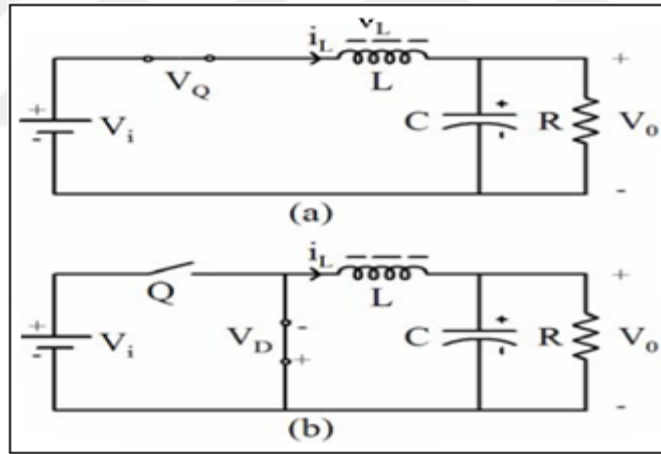
Şekil 1.17. Buck dönüştürücü eşdeğer devresi

Dönüştürücünün güç katı, bobinin akımı için sürekli ya da süreksiz akım modunda çalışır. Kararlı hal için, sürekli akım modunda bobin içerisinden kesintisiz olarak akım geçişi olur [35].

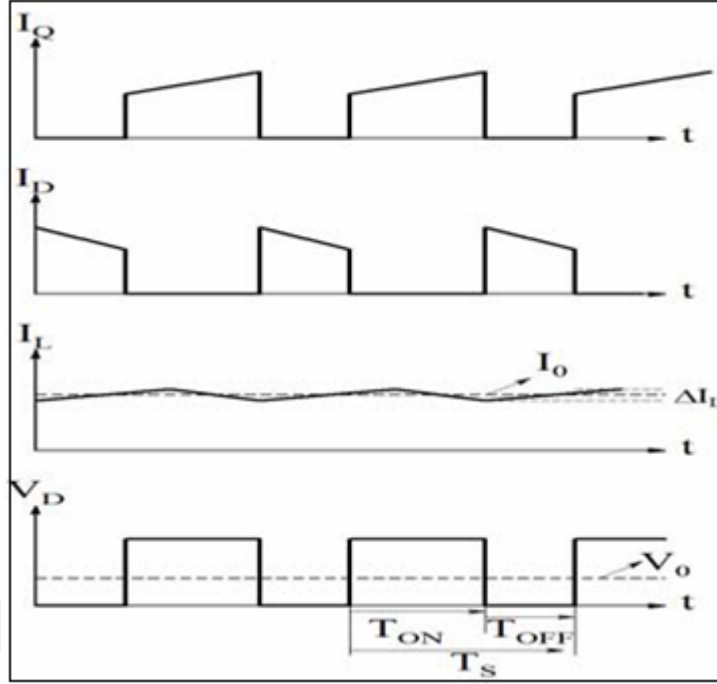
Süreksiz çalışma modunda bir periyotta bobin akımı sıfırdan başlar ve tepe değerine yükselir, anahtarlama periyodu bitmeden tekrar sıfıra düşer. Pratikte dönüştürücü her iki çalışma modunda da çalıştırılabilmektedir. Bu nedenle dönüştürücü tasarımında her iki çalışma modunda gözönünde bulundurulması gerekir [35].

Anahtarın iletimde olduğu anda bobin akımı L bobini üzerinden çıkışı besler. Ancak bu sırada geçen akımla orantılı olarak bobinde bir enerji depolanır. D diyotu ise ters polaritededir. Anahtar kesimde iken L bobini üzerindeki enerji ile D diyotu üzerinden yükü beslemektir. Böylece çıkışta enerji sürekliliği sağlanır. Bobin depolama kapasitesine göre çıkış akımı sürekli ya da süreksiz formda olabilir. Devredeki C kapasitesi ise yük üzerinden akım akıtarak, çıkış gerilimini süzme görevini üstlenir. Anahtar süreksiz iletim modunda çalıştırıldığında kondansatör tam dolmayacağından etkin değeri daha küçük bir gerilimle depolanır. Bu şekilde yük üzerindeki çıkış geriliminin değeri azaltılmış olur. Çıkış kondansatöründen çekilen akım küçüktür. Çıkış gerilimi anahtarın iletimde ya da kesimde olma süresi ile doğrusal ilişkilidir. Şekil 1.17 ve Şekil 1.18'e göre bobin akımındaki artış uç denklemleri kullanılarak Denklem (1.12)'deki gibi elde edilebilir.

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} \rightarrow \Delta I_L = \frac{V_L}{L} \Delta T \quad (1.12)$$



Şekil 1.18. Buck dönüştürücüde anahtarın iletim ve kesim durumu



Şekil 1.19. Buck dönüştürücü sürekli çalışma modu için dalga şekilleri

Buradan iletim durumu için bobin akımındaki yükselme Denklem (1.13) ile hesaplanabilir.

$$\Delta I_L(+)= \frac{V_i- (V_Q- I_L R_L) -V_0}{L} T_{ON} \quad (1.13)$$

Burada R_L bobin eşdeğer devresindeki direnci, V_Q iletim durumunda yarı iletken üzerindeki gerilim düşümünü ve $\Delta I_L(+)$ bobinin akımındaki pozitif dalgalanma miktarını göstermektedir. Kesim durumu için bobin akımındaki azalma Denklem (1.14) ile bulunabilir [35].

$$\Delta I_L(+)=\frac{V_0 + (V_D+ I_L R_L)}{L} T_{OFF} \quad (1.14)$$

Burada da $\Delta I_L(-)$ bobinin akımındaki negatif dalgalanma miktarını göstermektedir. Kararlı hal çalışma şartlarında akımın, iletimdeki artma miktarı $\Delta I_L(+)$ ve kesimdeki azalma miktarı $\Delta I_L(-)$ eşit kabul edilmektedir. Bu nedenle, Denklem (1.13) ve Denklem (1.14) denklemleri eşitlenip sürekli hal için dönüştürücü çıkış gerilimi V_0 bulunabilir [35].

$$V_0 = (V_i - V_Q) \left(\frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}} \right) - V_D \left(\frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}} \right) - I_L R_L \quad (1.15)$$

ve

$$V_0 = \left(\frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}} \right) = \left(\frac{T_{ON}}{T_S} \right) \quad (1.16)$$

$$(1 - D) = \frac{T_{OFF}}{T_S} \quad (1.17)$$

eşitlikleri kullanıldığında çıkış gerilimi Denklem (1.18) ile elde edilebilir.

$$V_0 = (V_i - V_Q)D - V_D (1-D) - I_L R_L \quad (1.18)$$

Genel bir basitleştirme yapmak için V_Q , V_d , ve R_L değerlerinin yeterince küçük olduğu kabul edilirse çıkış gerilimi Denklem (1.19)'daki gibi sadeleştirilebilir [35].

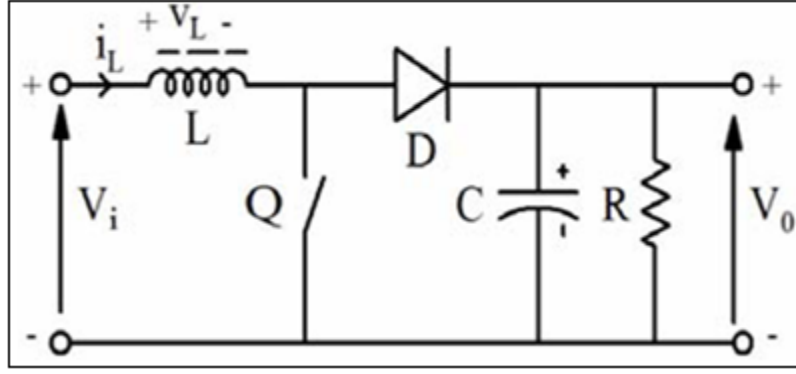
$$V_0 = V_i D \quad (1.19)$$

Şekil 1.18 ve Şekil 1.19 göz önünde bulundurulduğunda bobinin her bir anahtarlama periyodunda kapasiteye ve yüke akım gönderdiği görülür. Bu nedenle, bobin içerisinden geçen akımın ortalama değeri çıkışakımının ortalama değerine eşit olacaktır. Bu ilişki Denklem (1.20)'deki gibi gösterilebilir [35].

$$I_{L(avg)} = I_0 \quad (1.20)$$

1.4.3. Boost dönüştürücü

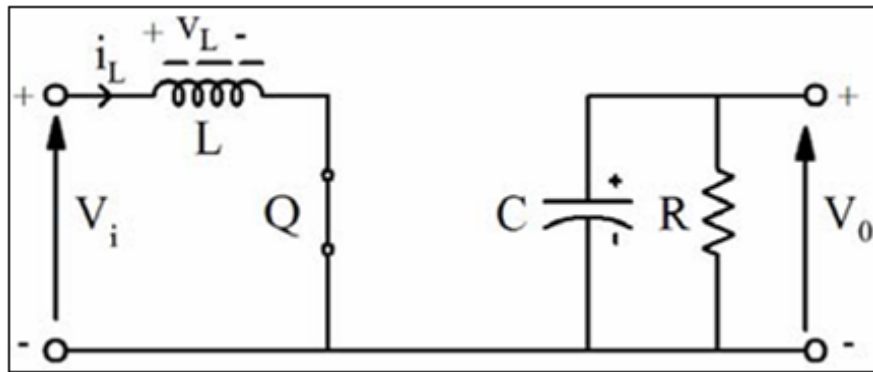
Yükseltici dönüştürücü girişindeki doğru gerilimi daha yüksek bir doğru gerilim seviyesine yükselterek çıkışına aktaran sistemlerdir. İdeal bir yükseltici tip dönüştürücü yapısı Şekil 1.20'de görüldüğü gibi yarı iletken anahtar, diyot, bobin ve kapasite elemanlarından oluşmaktadır.



Şekil 1.20. Boost dönüştürücü eşdeğer devresi

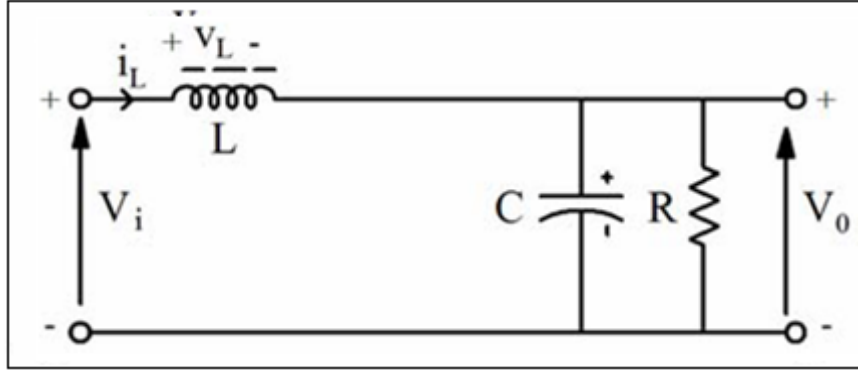
Şekil 1.20'de gösterilen devrenin kontrol mekanizması, yarı iletken güç anahtarının ilettime ve kesime götürülmesine göre gerçekleştirilmektedir. Anahtar ilettime götürüldüğünde bobin içerisinden geçen akım artar ve bobin üzerinde enerji depolanmaya başlar. Şekil 1.21'de görüldüğü gibi devre iki farklı parçaya bölünür. RC devresinin zaman sabitinin anahtarlama periyodundan çok büyük olduğu sürece çıkış gerilimi sabit kalır [36].

Anahtar kesime götürüldüğü anda, bobin içerisinden geçmekte olan şarj akımı D diyotu üzerinden C kapasitesine ve yüke doğru akmaya başlar. Bobin, enerjisini deşarj eder ve bobin üzerindeki gerilimin polaritesinin yönü gerilim kaynağının polaritesi ile aynı olur ve D diyotu üzerinden yüke bağlanır. Böylece çıkış geriliminin seviyesi yükseltilmiş olur [36].



Şekil 1.21. Boost dönüştürücüde anahtarın iletim durumu

Yarı iletken anahtarın kesim durumunu gösteren devre Şekil 1.22'de gösterilmektedir. Bu durumda yük kaynak üzerinden beslenir.



Şekil 1.22. Boost dönüştürücüde anahtarın kesim durumu

Devrenin çalışması periyodik olarak gerçekleşmektedir. Yani, bobin içerisinde akan akım periyodiktir ve anahtarlama periyodunun başındaki ve sonundaki değerleri aynıdır. Yarı iletken anahtarın iletimi ve kesimi sabit frekansta yapılmaktadır, bu frekans değeri T periyodunu belirler. İletim oranı D ile ifade edilir, iletim süresi DT değerine eşit olur. Anahtarın kesimde olduğu süre ise $(1-D)T$ ile ifade edilmektedir [36].

Anahtar iletimdeyken eşdeğer devre Şekil 1.21'de gösterildiği gibi olur. Gerilim kaynağı bobini besler ve bobin akımının yükselme oranı V_s kaynağına ve L değerine bağlı olarak Denklem (1.21)'deki gibi değişir [36].

$$L \frac{di_L}{dt} = \frac{V_s}{L} = V_s(t) \quad (1.21)$$

Eğer gerilim kaynağı sabit ise, bobin akımının yükselme oranı pozitif ve sabittir, böylece bobin doyuma gitmez ve Denklem (1.22) ile ifade edilir.

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{V_s}{L} \quad (1.22)$$

Yarı iletken anahtar bir anahtarlama periyodundaki DT aralığı boyunca iletimde kalır ve DT aralığı Δt şeklinde ifade edilebilir. Anahtarın iletim durumunda, bobin akımındaki net yükselme miktarı Denklem (1.23)'teki gibidir [36].

$$\frac{\Delta I_L}{\Delta t} = \frac{V_s}{L} (DT) \quad (1.23)$$

Anahtar kesimdeyken eşdeğer devre Şekil 1.22' de gösterildiği gibi olur. Bu durumda bobin üzerindeki gerilim Denklem (1.24) ile ifade edilir [36].

$$V_L = V_S - V_0 \quad (1.24)$$

Çıkış geriliminin kaynak geriliminden yüksek olduğu durumda ($V_0 > V_S$) bobin üzerindeki gerilimin ve akan akımın yönü aşağıdaki ifade ile negatif olur.

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_S - V_0}{L} \quad (1.25)$$

Anahtar kesime götürüldüğünde aralık $(1-D)T$ ile ifade edilir ve bobin içerisinden geçen akım aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$\Delta I_L = \frac{V_S - V_0}{L} (1-D) T \quad (1.26)$$

Bir periyottaki akımın net değişimi sıfır olduğundan, Denklem (1.23) ve Denklem (1.26)'nın toplamı sıfır olur. Buna göre;

$$\frac{V_S}{L} DT + \frac{V_S - V_0}{L} (1-D) T = 0 \quad (1.27)$$

Bu ifadenin sadeleştirilmesi ile Denklem (1.28) elde edilmektedir.

$$V_0 = \frac{V_S - V_0}{1-D} \quad (1.28)$$

$$D = \frac{V_0 - V_S}{V_0} \quad (1.29)$$

D değeri $0 < D < 1$ aralığında değişmektedir ve Denklem (1.29)'dan da görüleceği gibi çıkış gerilimi giriş geriliminden yüksek olmaktadır. Böylece, bu devre yükseltici tip dönüştürücü olarak adlandırılır. Çıkış gerilimi en düşük değerini $D=0$ durumunda alır ve çıkış gerilimi giriş gerilimine eşit olur. Doluluk oranı 1 olduğunda çıkış gerilimi sonsuz olmak isteyecektir. Bu nedenle uygulamalarda D değeri $0,1 < D < 0,9$ aralığında seçilir [36]. Devredeki endüktans ve kapasite değerlerinin belirlenmesinde aşağıdaki denklemler kullanılmaktadır.

Denklem (1.23) aynı zamanda Denklem (1.30) 'deki gibi yazılabilmektedir.

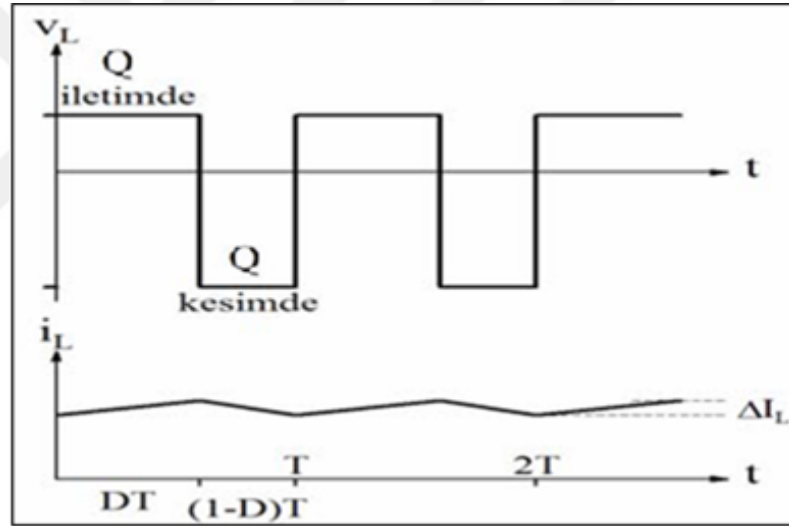
$$\Delta I_L = \frac{V_s D}{f L} \quad (1.30)$$

Denklem (1.30)'da L eşitliğin sol tarafına alınarak Denklem (1.31) elde edilir.

$$L = \frac{V_s D}{f \Delta I_L} \quad (1.31)$$

Kapasite değeri ise Denklem (1.32) ile hesaplanmaktadır.

$$C = \frac{I_{\max} D}{f \Delta V_0} \quad (1.32)$$

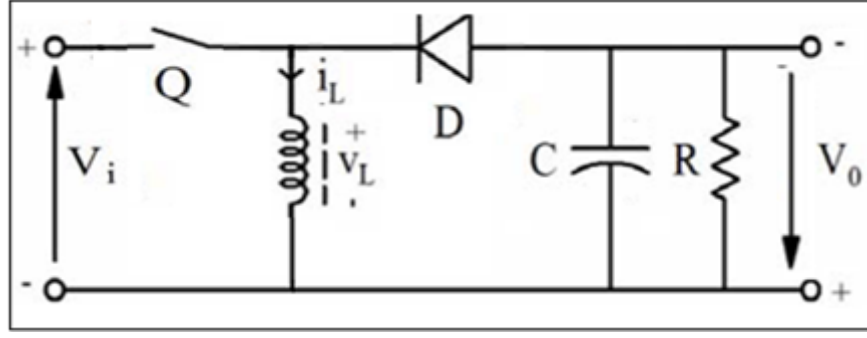


Şekil 1.23. Boost dönüştürücü bobin gerilimi ve akımı

Bobin üzerindeki gerilim ve akım değişimleri Şekil 1.23'te verilmiştir. Bu değişimler çıkış ve giriş gerilimlerinin kararlı olduğu göz önüne alınarak çizilmektedir.

1.4.4. Buck-boost dönüştürücüler

Dönüştürücü tipinin seçimi sabit şarj kontrol akımına bağlıdır. Çevrim oranına göre dönüştürücü buck ya da boost olarak çalıştırılabilir. Eğer fotovoltaik sistemde yük bataryalar üzerinden besleniyorsa buck modda, anlık olarak güneşten aldığı enerjiyle besleniyorsa boost modda çalışır.



Şekil 1.24. Buck-boost dönüştürücü eşdeğer devresi

Bir buck-boost dönüştürücü iki temel dönüştürücünün (alçaltıcı-yükseltici) Şekil 1.24'deki gibi ardarda bağlanmasıyla elde edilebilir. Sürekli durumda çıkış geriliminin giriş gerilimine oranı olan gerilim çevirme oranı ardarda bağlı iki dönüştürücünün çevirme oranlarının çarpımıdır. Bu yüzden çevirme oranına bağlı olarak çıkış gerilimi giriş geriliminden düşük ya da yüksek olabilir.

Buck-boost dönüştürücülerin başlıca uygulaması, giriş uçlarına göre ters kutuplu çıkış gereken ve çıkış geriliminin giriş geriliminden yüksek ya da düşük olmasının ayarlanabilir olduğu dönüştürücülerdir.

$T=0$ iken çıkış akımı negatiftir, böylece akım bobin üzerinden akar ve akım artar. Kondansatör ise deşarj olarak yükü besler. Yük akımı sürekli ve dalgalı olduğu kabul edilir. Çıkış gerilimi kondansatör gerilimine göre değişir.

Bir dT anında anahtar kapandığında $L(di_L/dt)$ gerilimini üretir. Bu diyotu ileri yönde bastırmaktadır. Bobin dT' den T' ye kadar yükü beslemektedir. Bobin akımı düşer, kondansatör şarj olur, çıkış gerilimi yükselir ve ortalama çıkış geriliminin büyüklüğü Denklem (1.33)'deki gibi olur.

$$V_0 = -\frac{D}{(1-D)} V_s \quad (1.33)$$

Dönüştürücünün tasarımı için gerekli olan denklemler aşağıda verilmektedir.

$$L = \frac{(1-D) D R}{2f} \quad (1.34)$$

$$C = - \frac{D}{2fR} \quad (1.35)$$

1.5. Maksimum Güç Noktası Takibi (MPPT)

Maksimum güç noktası takibi, güneş panellerinden maksimum güç elde etmek için geliştirilen elektronik kontrol sistemleridir. Panel çıkışındaki gerilim maksimum çalışma gerilimine getirilmek istenir.

1.5.1. FV panelin maksimum güç noktasında çalıştırılması

FV güneş panelinin üretebileceği maksimum güç P_{max} olarak saptanan değer MPPT için referans bir değer olarak kabul edilir. Panelin anlık olarak ürettiği güç P_{max} değeri ile karşılaştırılır. Aradaki fark DC/DC dönüştürücüsünün iletim periyotlarının belirlenmesi amacıyla kullanılır. Bu periyotlar azaltılıp/arttırılmak suretiyle aradaki fark minimuma indirilir. Bu sayede de yüke uygulanan gerilimin genliği ve çekilen akım ayarlanmış olur.

Yük akımı ile FV panelin akımı aynı olduğundan, uygulanan gerilimin ayarlanmasıyla yük akımı FV panelin maksimum gücüne karşılık gelen akım değerinde kalmaya zorlanır. Bir sonraki adımda aynı karşılaştırma tekrarlanarak döngü devam ettirilir.

1.5.2. P_{max} belirleme yöntemleri

FV sistemlerde, panellerin maksimum güç noktası değerinin belirlenebilmesi için kullanılan yöntemler farklı olmakla beraber, kullandıkları temel mantık aynıdır. Farklı sıcaklık ve ışık şiddeti değerleri için, önceden hesaplanmış veya ölçülmüş olan maksimum güç noktası değerlerinin bulunduğu çizelge veya tablolar kullanılarak bir FV pil modeli oluşturularak referans P_{max} değerleri bulunabileceği gibi, sıcaklık ve ışık şiddeti değerlerine bakılmaksızın maksimum güç noktasını bulmayı amaçlayan algoritmalar da kullanılabilir [4].

Tablo 1.4.' de, günümüzde kullanılan MPPT metotları gösterilmiştir. Bu metotlardan bazıları FV sistem uygulamalarında sıklıkla kullanılırken, bazıları sadece deneysel amaçlı kullanılmaktadır.

Tablo 1.4. MPPT teknikleri

MPPT Teknikleri	FV Diziye Bağımlılık	Analog Dijital	Periyodik Ayar	Yakınsama Hızı	Uyarlama Karmaşıklığı	Parametreler
P&O	-	D/A	-	Değişken	Düşük	Gerilim,akım
IncCond	-	Dijital	-	Değişken	Orta	Gerilim,akım
Fractional Voc	+	D/A	+	Orta	Düşük	Gerilim
Fractional Isc	+	D/A	+	Orta	Orta	Akım
Fuzzy Logic	+	Dijital	+	Hızlı	Yüksek	Değişken
Neural Network	+	Dijital	+	Hızlı	Yüksek	Değişken
RCC	-	Analog	-	Hızlı	Düşük	Gerilim,akım
Current Sweep	+	Dijital	+	Yavaş	Yüksek	Gerilim,akım
DC link Capacitor Droop Control	-	D/A	-	Orta	Düşük	Gerilim
Load I or V Maximization	-	Analog	-	Hızlı	Düşük	Gerilim,akım
dP/dV or dP/dI Feedback Control	-	Dijital	-	Hızlı	Orta	Gerilim,akım
Array Reconf.	+	Dijital	+	Yavaş	Yüksek	Gerilim,akım
Linear Current Control	+	Dijital	+	Hızlı	Orta	Işık
I_{MPP} & V_{MPP} Computation	+	Dijital	+	N/A	Orta	Işık,Sıcaklık
State-Based MPPT	+	D/A	+	Hızlı	Yüksek	Gerilim,akım
OCC MPPT	+	D/A	+	Hızlı	Orta	Akım
BFV	+	D/A	+	N/A	Düşük	-
LRCM	+	Dijital	+	N/A	Yüksek	Gerilim,akım
Slide Control	-	Dijital	-	Hızlı	Orta	Gerilim,akım

Sabit Gerilim/Akım Metodu : MPPT kontrol sistemlerinden en basit kontrol metodu, sabit gerilim veya akım referanslı MPPT kontrol sistemidir. Bu metot, maksimum güç noktasındaki gerilim ile açık devre arasındaki oranın yaklaşık sabit olduğu esasına dayanmaktadır. Güneş paneli geçici olarak maksimum güç noktasından ayrılarak açık devre gerilimi ölçülür ve sabit oran üzerinden maksimum güç noktasındaki gerilim hesaplanır. Bu işlemin periyodik olarak tekrarlanması gerekliliğinden ötürü gücün belirli aralıklarla ani olarak kesilmesi ve sabit oranın optimal değerinin doğru olarak belirlenememesi kullanımındaki temel zorluklardır.

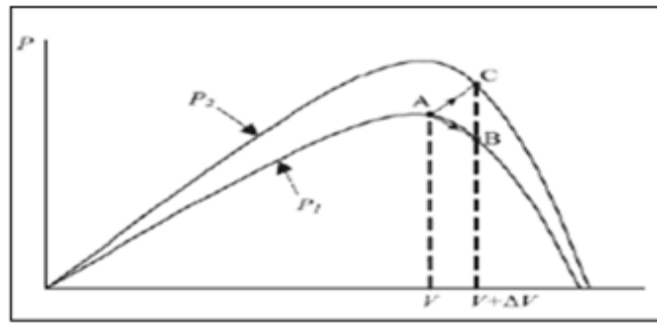
Aynı yaklaşımla akım içinde sabit bir oran belirleyerek maksimum güç noktası takibi yapılabilir. Basit donanımlarla gerçekleştirilebilmekle birlikte ışık şiddeti ve sıcaklık değerlerini hesaba katmamakta, dolayısıyla atmosfer koşullarındaki değişimlere dinamik yanıt verememektedir. FV panele ışık şiddeti ve sıcaklığın etkilerini ihmal etmesine rağmen, özellikle düşük ışık şiddeti altında hem P&O (Perturb and Observe) hem de Artımlı Geçiş (Incremental Conductance-IncCond) metotlarından daha verimli olmaktadır.

Değişim ve Gözlem (Perturbation & Observation-P&O) Metodu : P&O algoritması uygulamadaki basitliği nedeniyle pratikte en çok kullanılan yaklaşımdır. Bu yöntemde FV panelin P-V karakteristiğinden yararlanılarak mevcut sıcaklık ve ışınım seviyelerinde ölçülen değerlere göre hesaplanan güç değerleri arasındaki fark karşılaştırılmaktadır. Yaklaşık 0 değerinden başlayarak FV panelin çalışma gerilimi azar azar arttırılmaktadır. Her adımda küçük bir artış gerçekleştirilerek elde edilen güç miktarı ve bir önceki güç miktarı arasındaki fark hesaplanır. Fark pozitif bir değer ise çalışma gerilimi yeniden arttırılır. Bu şekilde gerilim arttırılarak çalışma noktası P_{max} noktasına yaklaştırılır. Her döngüde güç değerleri arasındaki fark kabul edilebilir bir değerin üzerinde olursa FV panelin I-V eğrisi üzerinde yeni sıcaklık ve ışık şiddeti seviyeleri için yeni bir P_{max} noktası hesaplanır. Hesaplanan fark değeri negatif bir değer aldığında, ise P_{max} noktasının sağ tarafına geçilmiş demektir. Böylece bir önceki adımda hesaplanan güç değeri oandaki sıcaklık ve güneş ışını seviyelerine ilişkin yeni P_{max} olur. Normal olarak bu değere karşılık gelen I_{MPP} ve V_{MPP} değerleri de yeni akım ve gerilim değerleri olacaktır. Sıcaklık ve güneş ışını parametreleri de yeni döngünün başlangıç değerleri olarak atanır. Bu durumda bir sonraki döngüde gerilim azaltılarak olması gereken gerçek P_{max} noktasında sürekli çalışması sağlanır [4, 26].

FV sistemlerin P-V veya P-I karakteristiklerinden de anlaşılacağı gibi; gerilimdeki artma (azalma), maksimum güç noktasının solunda güçte de bir artma (azalma), sağında ise güçte bir azalma (artma) meydana getirmektedir. Sonuç olarak, eğer güçte bir artış varsa, maksimum güç noktasına ulaşmak için, bir sonraki güç değeri tutulmalı, eğer güçte bir azalma varsa, değişim tersine çevrilmelidir [4].

Algoritma sıcaklık ve ışınım parametrelerini sürekli takip etmek zorundadır. Eğer bu parametreler hızlı bir değişim gösteriyorsa, sistem gecikmeler meydana gelerek kararlı çalışmayı olumsuz etkiler. Bu durum Şekil 1.25’ de gösterilmiştir. Sistem, A çalışma noktasında iken atmosferik şartların sabit olduğu kabul edilirse, panel gerilimindeki değişim miktarı ΔV , çalışma noktasını B’ ye getirecek ve bu değişim, güçteki azalma sebebiyle terslenecektir. Buna rağmen, ışık şiddetindeki artış, güç eğrisini tek bir örnekleme periyodu içinde P1’ den P2’ ye getirirse, çalışma noktası A’ dan C’ ye kayar. Bu durum güç değerindeki artışı temsil eder ve değişim aynı tutulur. Sonuç olarak çalışma noktası, maksimum güç noktasından iraksar ve eğer ışık şiddeti artmaya devam ederse iraksamaya da devam eder. Bu durumu engellemek için farklı teknik ve yaklaşımlar önerilmektedir. Işık şiddetinde ani değişimler olması durumunda bile, iraksamayı engellemek için önerilen tekniklerin başında; karar vermeden önce gerçek güç noktasını, önceki 2 noktayla karşılaştırma işlemi yapan “3 Noktalı Ağırlık Tekniği” gelir. Bu işlem basitçe, yüksek örnekleme oranı kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Bu metotta genellikle akım ve gerilim olmak üzere iki farklı sensör gerekmesine rağmen, kullanılan güç çeviricinin özelliğine bağlı olarak yalnızca gerilim sensörü de kullanılabilir [4].

Algoritmanın en önemli dezavantajı ise gün ışığının azaldığı durumlarda eğride bir yataylaşma olduğundan P_{max} 'ı tespit etmesi zorlaşmaktadır. Bunun nedeni gerilimdeki değişmelerin ΔP değerinde çok küçük farklar yaratmasıdır.



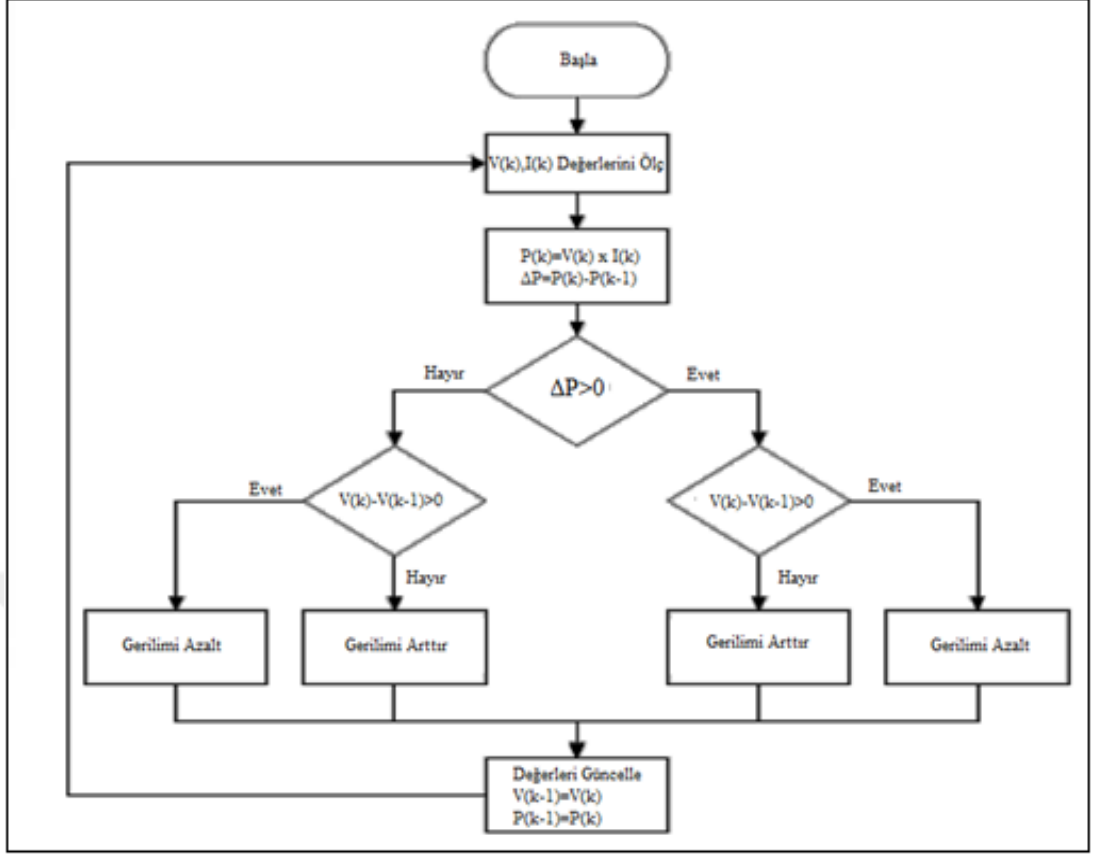
Şekil 1.25. Değişim ve gözlem metodu algoritmasının maksimum noktasından iraksaması

Bir diğer olumsuzluğu ise özellikle sabit veya yavaş değişen atmosfer şartlarında maksimum güç noktasına ulaşılması durumunda bile bu nokta üzerinde sabit kalamaması ancak çok yakın bir bölgede salınım yapmasıdır. Bu durumda bile P_{max} 'a yaklaşılmaya çalışıldığından sistem üzerinde güç kayıpları meydana gelmektedir. Bu

salınımların giderilmesi için farklı yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan bir tanesi, algoritmanın geçmiş döngülerdeki verileri kontrol etmesiyle giderilebilir. Bu durumda maksimum güç noktasına ulaşırsa, algoritmanın değişim kısmı atlanır. Güç kaybını önlemenin diğer bir yolu da değişim aralığını azaltmaktır. Bu durumda da algoritmanın maksimum güç noktasını bulma hızı yavaşlayacaktır.

Ancak, genellikle FV sistemlerde, söz konusu parametrelerde meydana gelen değişimler, sistemin ve kullanılan denetleyicinin elektriksel değişimlerinden çok daha yavaş olduğundan, kullanımı güvenli bir algoritmadır. Diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında daha basit bir yapıya sahip olması ve algoritma için gereken parametrelerin az olması da kullanılabilirliğini artırmaktadır [4].

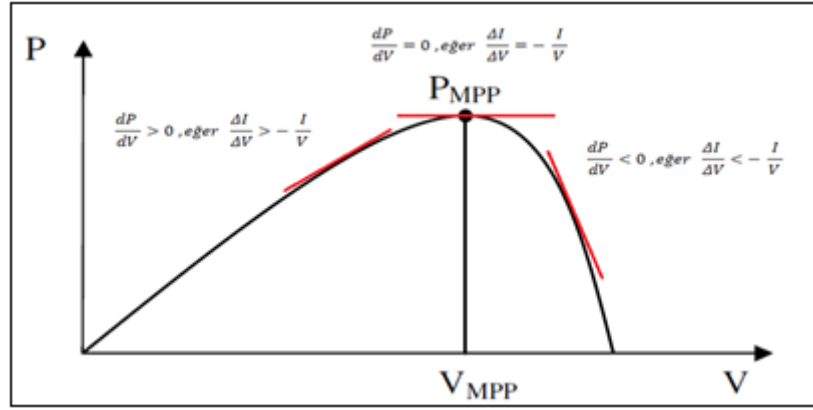
Artımsal iletkenlik (Incremental Conductance-IncCond) metodu : Artan iletkenlik algoritması fotovoltaik panel gücünün gerilime göre türevi alınarak sıfıra eşitlenmesi esasına dayanır. $\frac{dP}{dV}$ değerinin 0 olduğu nokta maksimum güç noktasını verir. Panel terminal gerilimi, daima V_{MPP} değerine göre değiştirilmektedir. Kullanılan algoritma, FV panel karakteristiklerinden bağımsız olduğundan verimi daha yüksektir.



Şekil 1.26. Değişim ve gözlem metodu algoritması

Bir kez maksimum güç noktasına ulaştığında osilasyon yapmadığından, P&O metodunda olduğu gibi güç kayıpları da olmamaktadır. Hızlı değişen atmosferik koşullar altında da daha iyi verime sahip olması, artımsal iletkenlik metodunun daha geniş kullanım alanı bulmasını sağlamaktadır. $-\frac{I}{V}$ değeri FV panelinin ani iletkenlik değerinin tersini ifade etmektedir. Denklem sağ tarafındaki ifade ise artan iletkenlik değeridir. Bu durumda maksimum güç noktasında bu iki değer birbirine eşit fakat zıt işaretli olması gerekir. Bu denklemin bir eşitsizlik olması halinde çalışma geriliminin maksimum güç noktası geriliminde düşük ya da yüksek olduğu anlaşılmaktadır [26].

Şekil 1.27’de görüldüğü gibi; maksimum güç noktasının solunda gerilime bağlı olarak güç artmaktadır. Maksimum güç noktasının sağında ise, gerilime bağlı olarak güç değeri azalmaktadır. Bu durum matematiksel modelleme ile Denklem (1.36) ve Denklem (1.37) 'de gösterilmektedir.



Şekil 1.27. Artımlı iletkenlik algoritması güç-gerilim eğrisi

$$P=V.I \quad (1.36)$$

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(I.V)}{dV} = I + V \cdot \frac{dI}{dV} = I + V \cdot \frac{\Delta I}{\Delta V} = 0 \quad (1.37)$$

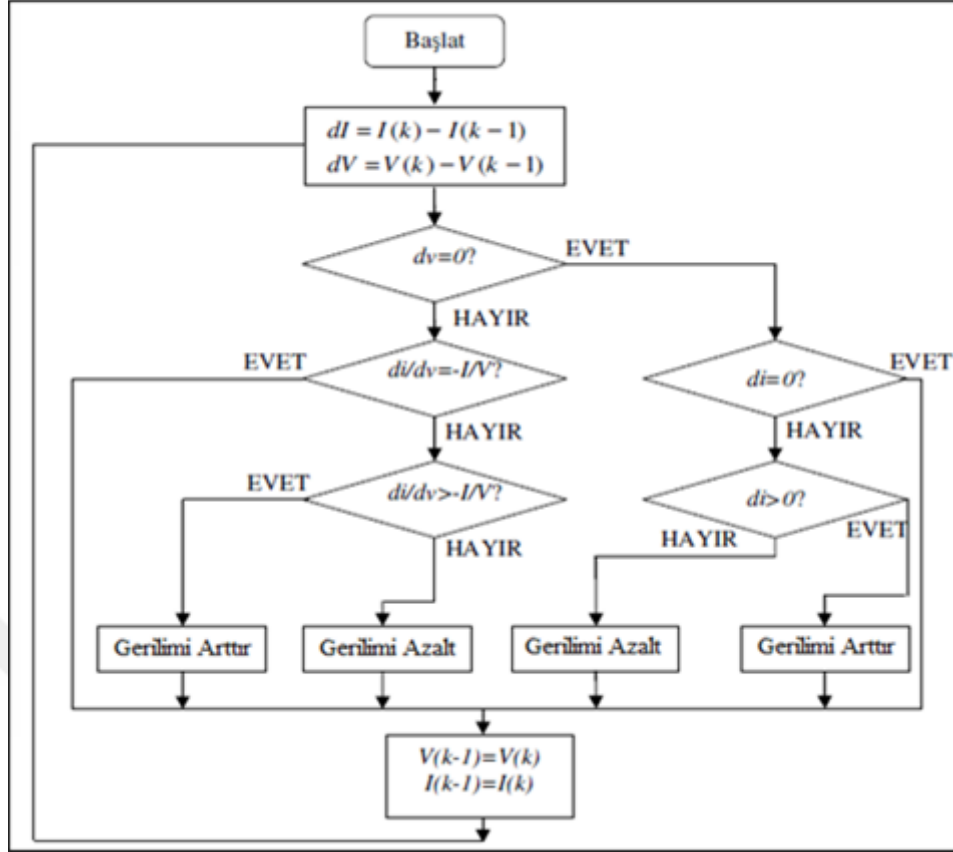
Denklem (1.36), I/V oranı artımsal iletkenlik değerinden büyük olduğunda, çalışma geriliminin maksimum güç noktasının altında olduğunu göstermektedir. Dikkat edilecek olursa bu ifadenin tersi de doğrudur. Dolayısıyla bu algoritmada yapılmaya çalışılan, I/V oranının, artımlı iletkenlik değerine eşit olduğu çalışma gerilimi değerini yakalamaktır. Bu durum aşağıdaki denklemlerde gösterilmiştir [4].

$$\frac{dP}{dV} > 0, \text{ eğer } \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} \quad \text{MPP'nin solunda} \quad (1.38)$$

$$\frac{dP}{dV} > 0, \text{ eğer } \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} \quad \text{MPP'de} \quad (1.39)$$

$$\frac{dP}{dV} < 0, \text{ eğer } \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} \quad \text{MPP'nin sağında} \quad (1.40)$$

Böylece, anlık (sabit) iletkenlik (I/V) ile artımsal iletkenlik değeri ($\Delta I/\Delta V$) karşılaştırılarak MPPT işlemi gerçekleştirilir. Şekil 1.27'de belirtilen V_{ref} değeri, FV dizinin çalışmaya zorlandığı referans gerilimi temsil etmektedir. Maksimum güç noktasında, V_{ref} değeri V_{MPP} 'a eşittir.



Şekil 1.28. Artımlı iletkenlik metodu algoritması

Bu yöntem, maksimum güç noktasına tam olarak ulaşıp ulaşılmadığını da tespit edebilmektedir. Böylece, hızla değişen şartlar altında dahi yanlış yönlü bir izleme dolayısıyla maksimum güç noktası etrafında bir salınım yapmazlar. Maksimum güç noktasına bir kez ulaşıldığında, eğer akım değerinde bir değişim olmazsa ve maksimum güç noktası değişmemişse, FV dizinin çalışma noktası korunur. Algoritma, yeni maksimum güç noktasını bulmak için V_{ref} değerini artırır veya azaltır. Buradaki değişim miktarı, MPPT' nin hızını belirlemektedir. Hızlı MPPT nispeten daha büyük artışlarla elde edilebilmektedir. Atmosferik şartlara bağlı olarak akım değerinde meydana gelen bir değişimde, tüm süreç yeniden başlar. Ancak sistem tam olarak maksimum güç noktasına ulaşamayabilir ve bunun yerine tepe noktasına yakın osilasyon yaparak kayba neden olur. Bu durumu engellemek için iki aşamalı teknikler önerilmektedir. İlk aşamada çalışma noktası, maksimum güç noktasına olabildiğince yaklaştırılır. İkinci aşamada ise artımlı iletkenlik metodu kullanılarak MPPT işlemi tam olarak gerçekleştirilir. Bu 2 aşamalı çözüm, çoklu yerel maksimum durumlarında da yüksek verimli çözüm sağlamaktadır.

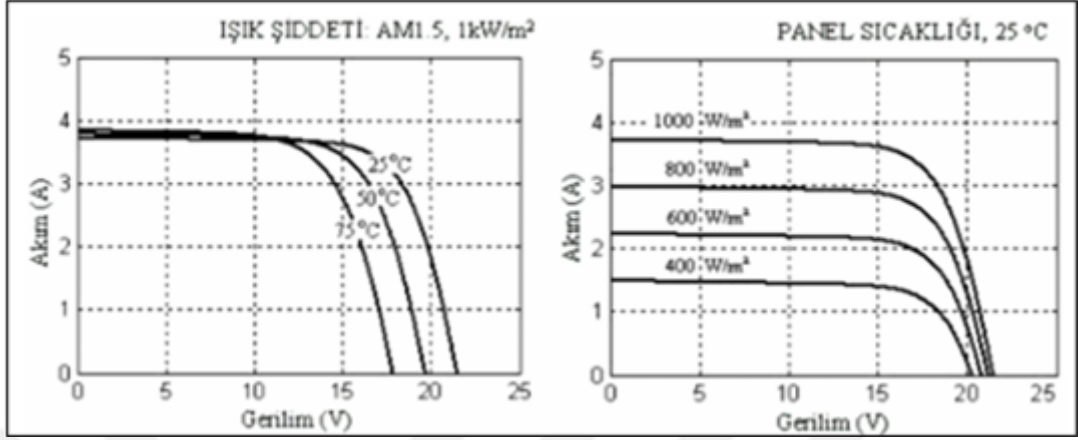
Artan iletkenlik metodu, hata ve gözlem metodundan farklı olarak, ne yönde bir gerilim değişimi yapması gerektiğini hesaplayabilmektedir. Artımlı iletkenlik metodunun en belirgin dezavantajı, özellikle de P&O metoduyla kıyaslandığında, oldukça karmaşık donanım ve yazılım gerektirmesidir. Bu nedenle en iyi sonuçları elde etmek için, artımlı iletkenlik metodu, P&O metodu ile birlikte kullanılmaktadır.

1.6. FV Hücre Verimini Etkileyen Diğer Faktörler

1.6.1. Sıcaklık ve ışık şiddeti etkisi

Fotovoltaik hücreler, atmosfer ve ortam koşulları nedeniyle devamlı olarak standart şartlarda çalışamazlar. Bu koşulları belirleyen iki etki, sıcaklık ve ışınım miktarıdır. FV hücrelerin çalışma sıcaklığının artması hücrenin hem çıkış gerilimini hem de çıkış akımını olumsuz yönde etkilese de asıl etki çıkış gerilimi üzerinde görülür [6]. Güneş enerjisinin kullanıldığı ısıl uygulamaların aksine FV uygulamalar için soğuk ortamlar performans açısından daha uygundur. Şekil 1.29'da sıcaklığın fotovoltaik hücre karakteristiğine olan etkisini gösteren değişimler verilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi sıcaklığın artmasıyla birlikte çıkış geriliminde azalma meydana gelmekte ve gerilimdeki azalma doğrudan güce yansıdığından maksimum güç noktasının kayarak elde edilen çıkış gücünde azalmaya neden olmaktadır. Bunun bir diğer nedeni de, sıcaklığın pil kayıplarını arttırmasıdır. Sıcaklık arttıkça p-n eklemesindeki potansiyel engeli azalacak ve yarıiletken termal olarak oluşan elektron ve boşluk sayısı artacağından kaçak akımda artmaktadır. FV hücre modelinde belirtilen seri direnç üzerinden akan bu kaçak akım ısı olarak kayıplara ve gerilim düşümüne neden olarak çıkış gerilimini azaltmaktadır. Çıkış akımı üzerindeki etki ise yine FV hücre modelinde gösterilen paralel direnç üzerinden akan akım nedeniyledir. Sıcaklık hem hücre verimini hem de hücre ömrünü belirleyen önemli bir etkidir. Bu nedenle paneller, altlarında boşluk kalacak şekilde yerleştirilirler. Sıcaklığın I-V eğrileri üzerindeki etkisi şekilde görülmektedir. Mono ve polikristal silikon hücrelerde bu düşüş ince tabaka (thin film) hücrelerine göre daha belirgindir. Bu nedenle kristal silikon hücreli modülleri için soğutma amaçlı tedbir alınmalı, çok sıcak şartlarda ince tabaka – amorf silikon hücreler tercih edilmelidir. Her 1 derece sıcaklık artışı, FV modül gücünü % 0,5 oranında

azaltırken, amorf silikon hücrelerde her 1 derecelik artış, gücü % 0,2 oranında azaltmaktadır.



Şekil 1.29. Sıcaklığın ve ışık şiddetinin I-V eğrilerine etkisi

Farklı ışık şiddeti seviyeleri için fotovoltaik hücre karakteristikleri Şekil 1.29'da görülmektedir. Işık şiddetinin artması hem çıkış gerilimini hem de çıkış akımını olumlu yönde etkileyerek, artışa neden olmaktadır. Akım üzerindeki artış gerilime göre daha yüksektir. Akım ve gerilim üzerindeki artış, çıkış gücünü de artırarak hücrenin daha yüksek verimde çalışmasını sağlar. Özellikle gökyüzündeki bulutlanma ve gölgelenme gibi durumlar FV panellerin verimini ciddi şekilde etkilemektedir. Sonuç olarak, FV hücreler üzerindeki sıcaklık ve ışık şiddeti etkileri değerlendirildiğinde, bol güneşli ve soğuk ortamlar FV hücrelerin çalışması için en uygun ortamlardır denebilir.

1.6.2. Atmosferde kat edilen yolun uzunluğu ve havanın kirlilik boyutu

Güneş ışınlarının radyasyon enerjileri, güneşin yol aldığı atmosfer kalınlığı ile orantılı olarak değişir. Öğle saatlerindeki 400 km'lik atmosfer yolu, sabah saatlerinde 2 kat (800 km) kadar olmaktadır.

Güneş panelinin güneşle olan açısı sürekli dik tutulsa da, atmosfer yolunun hem uzunluk olarak hem de buhar ve gaz yoğunluğu açısından değişmesi nedeniyle FV modül kazancı da önemli ölçüde değişmektedir. Ayrıca güneş ışınlarını en çok saptıran su buharının tamamının alt katmanda (Troposfer) bulunması önemli bir etkidir.

1.6.3. Güneş ışınlarının geliş açısı ve yansıtılmış ışınların eklenmesi

Fotovoltaik hücrenin ürettiği enerji, hava koşullarının yanı sıra güneşle olan açısına bağlı olarak değişir. Güneş ışınımı yüzeye dik olarak gelmediği durumlarda, yüzeye düşen güneş ışınım miktarı, güneş ışınları ile yüzeyin normali arasında kalan açının kosinüsü ile orantılı olarak azalır. Bu nedenle panellerin doğru açıyla konumlandırılması ve hatta dinamik bir güneş takip sistemi ile hücre üzerindeki güneş ışınlarının geliş açısına bağlı olumsuz etkiler giderilebilir. Ayrıca FV hücreler sadece doğrudan gelen ışınları değil, etraftan yansıyan ışınları da değerlendirir. Eğer sabit konumlu bir panele hareketli bir ayna ile güneş ışını yansıtılacak olursa panel verimi artar.

1.6.4. FV hücre yapısında kullanılan malzemelerin cinsi ve niteliği

FV hücrenin yapısını oluşturan silikon maddenin tek kristalli veya çok kristalli olmasına ya da hücrenin yapısında kullanılan maddenin özelliğine göre de verimi değişmektedir. Mevcut FV hücrelerin verimlerini arttırmak için farklı malzemelerin kullanılmasına ve yeni hücre teknolojilerine yönelik çalışmalar sürdürülmektedir. Bu amaçla geliştirilen çok eklemeli hücreler, nano-fotovoltaik ve organik tabanlı hücreler örnek olarak sunulabilecek alternatif modellerdir.

1.6.5. Güneşlenme süresi

FV panellerden elde edilecek enerji panellerin güneşlenme süresine önemli ölçüde bağlıdır. Panellerin kurulu gücü ne olursa olsun, özellikle mevsimsel farklılıklar nedeniyle gökyüzünün açık ya da bulutlu olması ve gece-gündüz sürelerinin değişmesi panellerin güneşlenme sürelerini belirleyeceğinden verimi önemli ölçüde etkilemektedir.

1.7. FV Sistemlerin Uygulama Alanları

Binalar, siteler, okullar, işletmeler, besi çiftlikleri ve yaylalar, tarımsal sulama alanları, seralar, tohum saklama, çay tütün, üzüm, incir kurutma sistemleri, orman güvenliğini izleme ve otomatik müdahale sistemleri, ormanda hayvan popülasyonu izleme ve envanter çıkarma, süs havuzları, tanıtım panoları, sokak, yol ve bina dış cephe ışıklandırmaları, gezi amaçlı deniz araçları, iletişim ağı (radyo, tv, telefon)

iletme ve aktarma sistemleri, yol boyu acil durum sistemleri, petrol boru hatlarının katodik koruması, metal yapıların (köprüler, kuleler vb.) korozyondan korunması, elektrik ve su dağıtım sistemleri, uzaktan yapılan ölçümler, hava gözlem istasyonları, deniz fenerleri, dağ evleri ya da yerleşim alanlarından uzak evlerde elektrikli aygıtların çalıştırılması, ilkyardım, alarm ve güvenlik sistemleri, deprem ve hava gözlem istasyonları FV sistemlerin uygulama alanlarına örnek olarak gösterilebilir.

1.8. Verim Artırıcı Yöntemler

1.8.1. Güneş izleme sistemleri

FV hücrelerde maksimum verim, güneş ışınlarının panel yüzeyine dik olduğu zamanlarda sağlandığından, gün boyunca güneş geliş açısında ve yıl boyunca deklinasyon açısındaki değişim nedeniyle, güneş ışınlarının devamlı olarak panele dik bir açıyla olarak ulaşması mümkün olmamakta ve hücreler maksimum veriminde çalışmamaktadır. Özellikle güneş panellerinin sabit olarak konumlandırılması ile bu panellerin gün içerisindeki enerji üretim kapasitesi düşmektedir. Bu durumu önlemek için güneşi takip eden hareketli panel sistemi ile güneşin gün boyunca doğundan batıya kadar gökyüzündeki hareketi takip edilerek güneş ışınlarının panele dik bir açıyla düşmesi sağlanır. Bu sayede FV panelin çıkış gücü daha yüksek olacağından ışık şiddetine bağlı olarak maksimum verim elde edilmiş olur.

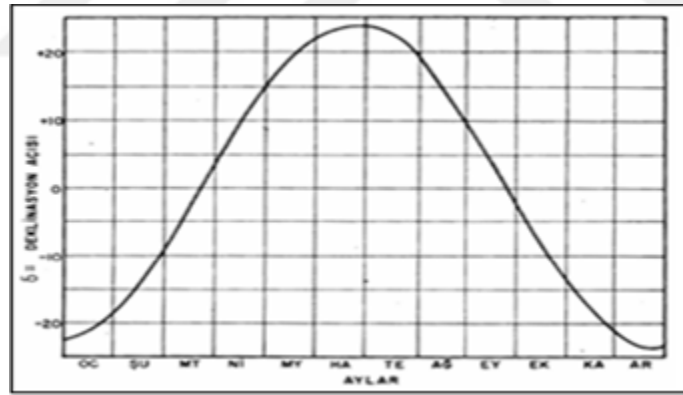
Özellikle kış mevsiminde bu güneş takip sistemleri önemli ölçüde fayda sağlarlar. Paneller tek veya çift eksen üzerinde hareket ettirilebilmektedir. İki eksen üzerinde hareket eden sistemler hem gün içinde güneşin hareketini yatay eksen üzerinde takip ederken hem de dikey eksen üzerinde yıl boyunca değişen güneşin yeryüzü ile yaptığı açığı takip edebilmektedir.

1.8.2. Panel konumlandırma

Güneş panelleri, izleme sistemiyle güneşi yıl boyunca takip etseler bile deklinasyon açısı değişimi nedeniyle sabit enerji getirisi oluşmamaktadır. Paneller genellikle sabit bir açıyla monte edildiklerinden, değişen aylar boyunca güneş ışınları sürekli farklı açılarda gelmektedir. Bu sebepten dolayı güneş ışınları sürekli dik olarak yakalanamaz ve toplam verimin düşmesine neden olur. Bunun önüne geçebilmek için

panel açıları ayarlanabilir olmalı ya da hareketli bir güneş takip sistemi kullanılmalıdır. Hareketli güneş izleme sistemleri ek enerji harcaması, bozulma riski taşıması ve maliyeti artırması nedeniyle de genellikle sabit açılı panel sistemleri tercih edilmektedir. Sonuçta panel sistemi nominal bir açıyla optimum kazanç sağlayacak şekilde ayarlanmalıdır. Güneş panelleri her iki ekseninde de sabit olucaksa, taşıyıcı ayaklarının eğim açıları saptanabilir.

İlk olarak Kuzey-Güney doğrultusu pusula ile tespit edilip, sonra bölgenin 21 Mart veya 23 Eylül gün ortası saati saptanmalıdır. Böylelikle, güneş ışınlarının panel düzlemine dik açıyla geldiği bu tarih ve saatlerdeki panel-yer düzlemi açısı aradığımız nominal eğim açısı olmaktadır. Optimum mevsim performansı için, mevsime yönelik yaklaşık bir ortalama deklinasyon açısı değeri belirlenir. Kuzey yarı kürede yaz için, bu değer; 21 Mart-21 Haziran arasında 0° 'den $23,45^{\circ}$ 'ye ve 21 Haziran-21 Eylül arasında ise $23,45^{\circ}$ 'den 0° 'ye değişir. Şekil 1.30'da gösterilen bu değişim grafiği yaklaşık olarak sinüs eğrisine benzemektedir ve her bir yarı eğrinin ortalama değeri hesaplandığında yaklaşık olarak 15° bulunur [42].



Şekil 1.30. Aylara göre deklinasyon açısının değişimi

Buna göre, 21 Mart-21 Eylül arasında deklinasyon açısının ortalama değeri 15° olur. Benzer şekilde, 21 Eylül-21 Mart arasında da bu açı değeri -15° olur. Buradan yaz ayları için enlem -15° derece, kış ayları için ise enlem $+15^{\circ}$ derecelik bir açı bize optimum değerinde bir eğim açısı verir. Optimum ilkbahar veya sonbahar veya yıllık performans için, güneş panelinin yaklaşık olarak enlemin 0,9 ile çarpılması sonucu elde edilen açı değerinde monte edilmesi gerekmektedir. Bunun yanı sıra, hareketli güneş takip sistemleri kullanmak bu soruna daha kolay bir çözüm olmakla birlikte maliyeti arttırmakta ve ayrıca bakım gerektirmektedir [42].

1.8.3. Güneş panellerinin yerleşimi

Güneş tarlası: Yüksek güç üretimi sağlanabilen bu sistem özel bir ihtiyacı karşılamak ya da şebekeye elektrik satmak amaçlı kurulur.

Çatı üstü montaj: Genelde ev ve işyerlerinin ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla eğimli çatıların üzerine montajları yapılır. Konumları sabittir. Çatı montajında, hem çatıya zarar vermeyecek hem de güvenli bağlantı yapan özel metal aparatlar kullanılır.

Güneş ağacı: Dar alanlarda maksimum güç üretimi sağlar. Kurulumu yapılan alanın altındaki yaşam alanının kullanılabilirliğini etkilemez. Tek ya da iki koordinatta hareket edebilen güneş izleme sistemleri için uygun bir montaj türüdür.

Düz zemine montaj: İhtiyaç halinde bahçe teras vb. gibi geniş alanlarda ihtiyaca uygun ya da yatırım amaçlı panel montaj şekli olup, kurulumu en kolay olanıdır.

Tekli montaj: Basit sehpa düzeneği üzerine kurulan bu sistemde birkaç panel düz ya da eğimli zemine istenilen açıda monte edilir.

1.9. Şebeke Bağlantılı ve Şebeke Bağlantısız Sistemler

1.9.1. Şebeke bağlantılı güneş pili sistemleri

Şebeke bağlantılı FV sistemlerinin gücü, birkaç kW'tan birkaç MW'a kadar değişebilmektedir. Bu tür sistemler, iki ana gruba ayrılır. İlk tür sistem, temelde bir yerleşim biriminin örneğin, bir konutun elektrik gereksinimini karşılar. Bu türün de kullanıcının ihtiyaç ve talebine göre yalnızca şebeke içi kullanım, şebeke içi satışı ve şebeke içi satışı-akülü sistemler olmak üzere farklı türleri mevcuttur. Yalnızca kullanıma yönelik uygulamada şebekeye herhangi bir enerji satışı olmaksızın, üretilen enerji anlık olarak kullanılır. Şebekeye satış olan sistemlerde üretilen enerji şebekeye satılarak kullanıcı gelir elde eder ve kullanım için şebeke elektriği kullanır. Yalnızca elektriğin şebekeye verilebilmesi için üretilen elektriğin bir inverter aracılığıyla DC'den AC'ye çevrilmesi gerekir. Eğer sistemde akü bulunuyorsa o zaman üretilen enerji aküde depolanarak şebekeye verilir. Bu durumda kullanıcı gelir elde ederken aynı zamanda şebeke elektriğinin olmadığı durumlarda da enerji ihtiyacını karşılayabilir. Bununla birlikte şebeke bağlantılı sistemlerde genellikle akü

grubuna ihtiyaç duyulmaz. İkinci tür ise şebekeye bağlı güneş pili sistemleri kendi başına elektrik üretip, bunu şebekeye satan güneş enerjisi santralleridir (GES). Bunların büyüklüğü 600-700 kW'tan, MW'lara kadar değişir. GES'lerin avantajları enerjinin üretildiği yerde tüketilmesi böylece enerji hatlarındaki iletim kayıpları ve yüklenmesinin az olması ayrıca farklı ölçeklerde kurulabilme imkanına sahip olmasıdır [5].

1.9.2. Bağımsız güneş pili sistemleri

FV sistemlerin en tipik ve en yaygın kullanım şekli, yerleşim yerlerinden uzak bölgelerde enerji gereksinimini karşılayan bağımsız sistemlerdir. Bu sistemler, birkaç W'tan birkaç yüz kW'a kadar değişebilen güçlerde enerji talebini karşılayabilir. Bu tür sistemlerde, yeterli sayıda güneş pili modülü enerji kaynağı olarak kullanılır. Güneşin yetersiz olduğu zamanlarda ya da özellikle gece süresince kullanmak üzere genellikle sistemde batarya grubu bulundurulur. FV paneller, gün boyunca elektrik enerjisi üreterek bunu batarya gruplarında depolar, yüke gerekli olan enerji bataryadan alınır. Bataryanın aşırı şarj ve deşarj olarak zarar görmesini engellemek için kullanılan kontrol birimi ise, bataryanın durumuna göre ya güneş pilinden gelen akımı ya da yükün çektiği akımı keser. Şebeke uyumlu alternatif akım elektriğinin gerekli olduğu uygulamada, sisteme bir evirici eklenerek, bataryadaki DC gerilim 220V 50Hz'lik Sinüs dalgasına dönüştürülür. Benzer şekilde uygulamanın sekline göre çeşitli destek elektronik devreler sisteme katılabilir. Bazı bağımsız sistemlerde, güneş pillerinin maksimum güç noktasında çalışmasını sağlayan maksimum güç noktası izleyici cihazı bulunur [5].

Şebekeden bağımsız sistemlerin avantajları şebeke bağlantısı için ek maliyet gerektirmezler, küçük uygulamalarda kullanmak için avantajlıdır, modüler yapısı ile kurulumu az sayıda personel ile kolaylıkla gerçekleştirilebilir.

Güneş enerjisi değişen ve her zaman olmayan bir enerji türüdür. Mesela, güneş doğmadan önce, güneş battıktan sonra veya kapalı ve bulutlu havalarda güneş enerjisi olmadığından toplanan fazla enerjinin depolanıp bu zamanlarda kullanılması gerekir. Bu amaçla yüksek kapasiteli batarya kullanılır. Genel olarak bir bataryanın ömrünü arttırmak için kapasitesinin %80'den fazla deşarj olmaması gerekir.

FV sistemlerde güneş olduğu zamanlarda bataryaların tamamıyla dolduktan sonra akım almalarını (overcharge) önlemek gerekir. Fazla şarj bataryanın ısınmasına, sıvı kaybına ve batarya ömrünün kısılmasına yol açar. Regülatör, FV levhalar ile bataryalar arasına konur ve bataryaların fazla şarj almalarını önler. İnverter 12 veya 24 voltluk düşük doğru akımı 240 volt alternatif akıma dönüştürür. Çok küçük uygulamalarda evirici yerine düşük gerilim ve doğru akımla çalışan elektrikli cihazlar kullanmak mümkündür.



2. FIRÇASIZ DC MOTORLAR

2.1. Genel Özellikler

Fırçasız DC motorlar, statoru üzerinde endüvi sargıları, rotoru üzerinde sabit mıknatısları bulunan ve zıt-emk (elektromotor kuvvet) dalga şekli trapezoidal olan senkron motorlardır. Yapısal olarak fırçasız DC motorlar, geleneksel sabit mıknatıslı DC motorların içten dışa terslenmiş versiyonudur. Fırçasız DC motorlar konstrüktif açıdan sabit mıknatıslı AC motorlarla aynı sınıftan olmakla birlikte çalışma karakteristiği bakımından DC motorlar ile benzerlik göstermektedir.

Fırçasız DC motorların en önemli avantajları; yüksek verim, sessiz çalışma, fırça ve kolektör sistemlerinin kaldırılmasından dolayı bakım işleminin oldukça basit ve masrafsız olması, patlayıcı ortamlarda tehlike oluşturan elektriksel arkların oluşmaması, endüvi sargılarının statorda bulunması nedeniyle sargı sıcaklığının dışarıya kolayca aktarılması, rotor üzerinde hiçbir sargı bulunmadığından dolayı elektriksel kayıpların minimum olması olarak sayılabilir. Düşük güçlerde fırçasız DC motorlar, diğer motorlara göre daha iyi verim ve daha yüksek güç/hacim oranına sahip olduğundan, aynı motor boyutlarında daha fazla çıkış gücü sağlamaktadır [21].

Fırçasız DC motorların dezavantajları ise; kontrolünde DC anahtarlama için anlık rotor pozisyon bilgisi gerektirmesi, motorun çalıştırılmasında başlatma, yol alma ve sürekli çalışma durumları için farklı kontrol algoritmalarının uygulanması, rotor üzerindeki sabit mıknatısların zamanla mıknatıslık özelliklerinin zayıflaması olarak sayılabilir. Ayrıca, manyetik malzemelerdeki büyük gelişmelere rağmen, boyut-fiyat oranları göz önüne alındığında, sabit mıknatıslı uyartım sistemleri, genellikle 20 kW'ın altındaki küçük motorlar için daha uygun olmaktadır. Ancak, manyetik malzemeler ile ilgili çalışmalar, yakın gelecekte yüksek alanlı sabit mıknatısların geliştirilmesi ile birkaç MW'lara kadar sabit mıknatıslı motorların yapımının mümkün olacağını göstermektedir [21].

Yarı iletken anahtarlar ve DSP (Digital Signal Processor)'lerdeki son gelişmeler, ayarlanabilir hızlı motor sürücülerinde devrim yapmıştır. Günümüzde elektrik motorlarının kontrolünde, karmaşık donanım yapılarından ziyade, yazılım tabanlı kontrol yapıları giderek artmaktadır. Bu da, fırçasız DC motorlar gibi özel elektrik motorlarının yaygınlaşmasına neden olmakta, daha güçlü kontrol yöntemlerinin uygulanmasına imkan vermekte ve motor sürücü sistemlerinde performansı artırırken maliyette de oldukça büyük avantajlar sağlamaktadır. Ayrıca bu yönelimin en belirgin örneği, fırçasız DC motor sürücü sistemlerinde görülmektedir. Güç elektroniği teknolojisinin gelişmesine paralel olarak uygulamaların pek çoğunda fırçasız DC motor kullanılmaya başlanmıştır [21].

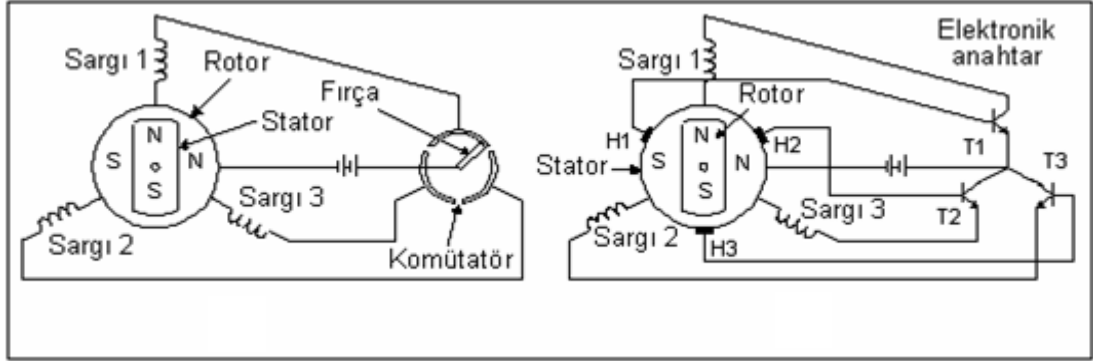
Fırçasız DC motorlar, robotik sistemlerde, uzay teknolojisinde, otomotiv sanayiinde, pompa ve fan uygulamalarında, bilgisayar sistemlerinde, tıp elektroniğinde, askeri alanlarda, ev aletlerinde, yürüyen bant sistemlerinde, parlama ve yanma riski bulunan ortamlarda, sabit disk sürücü ile CD/DVD-ROM, yazıcı gibi bilgisayar donanımlarında ve bilhassa yüksek güç yoğunluğu ve hız gerekliliği olan uygulamalarda yaygın ölçekte kullanım alanına sahiptir.

2.2. Mekanik Yapısı ve Tipleri

Fırçasız DC motorlar, üzerlerinde yoğun stator sargıları ve geniş sabit kutupları bulunan makinelerdir. Bu makinelerde, stator sargıları ve sabit mıknatıslı rotor kutupları, hava aralığında kare dalga formunda bir akı dağılımı elde edilebilecek biçimde yerleştirilir. Soğutma fanları gibi bazı hafif işlerde düşük performanslı küçük fırçasız DC motorlar kullanılır. Bunlar tek veya iki fazlı olarak yapılırlar. Diğer taraftan, MW mertebesindeki motorlar için, yüksek güçlü sürücüler tercih edilir. Çok fazlı motorlar, tek fazlı motorlara göre daha kararlı hareket ederler ve güç tüketimi bakımından daha tasarrufludurlar. Çok fazlı fırçasız DC motorlar on beş faza kadar üretilirler fakat, bu özel tasarım gerektirir ve en yaygını üç fazlı, dört fazlı ve beş fazlı motorlardır [21].

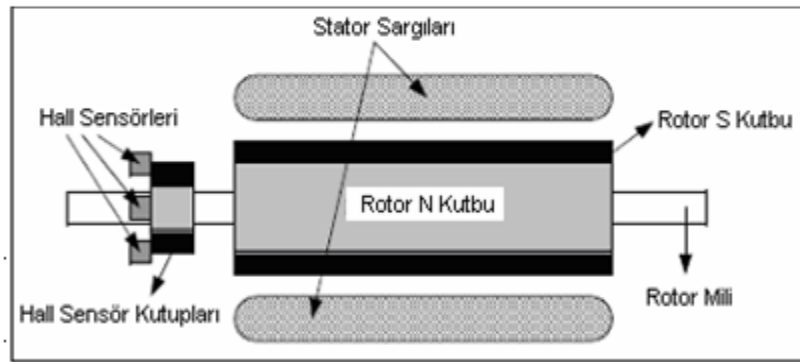
Şekil 2.1'de uyarma sargıları bulunan geleneksel DC motordan yola çıkılarak geliştirilen, sabit mıknatıslı DC motor ve fırçasız DC motor yapıları görülmektedir. Sabit mıknatıslı DC motor, geleneksel DC motorda da bulunan komütatör ve fırça

gibi mekanik anahtarlara sahiptir. Ancak fırçasız DC motorda mekanik anahtarların yerini elektronik anahtarlar almaktadır.

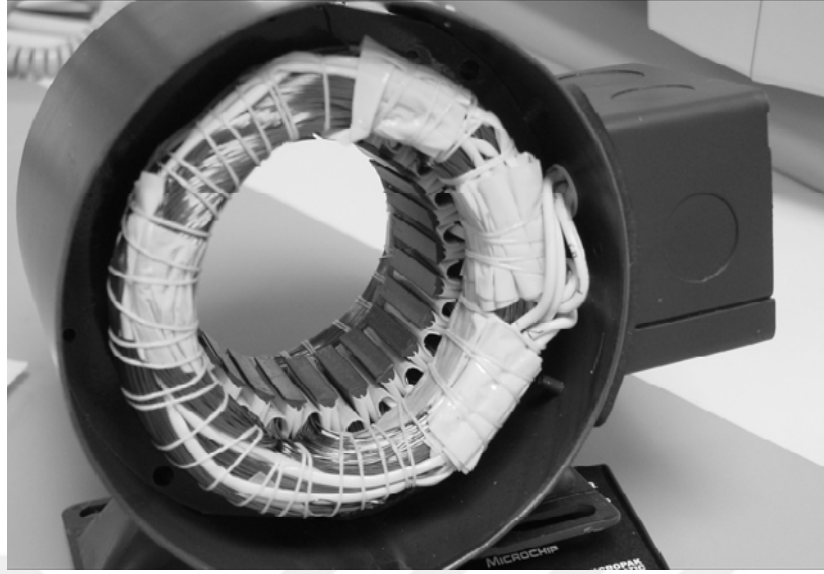


Şekil 2.1. Sabit mıknatıslı dc motor ve fırçasız dc motor

Fırçasız DC motorlar temel yapı olarak, Şekil 2.2’de görüldüğü gibi üzerinde alan sargıları bulunan stator, sabit mıknatıs kutuplu rotor ve elektronik komütatör için rotor pozisyonunu ölçen pozisyon (Hall) sensörlerine sahiptir. Şekil 2.3’de görüldüğü gibi fırçasız DC motorun statoru, bir yüzü yalıtılmış çelik saçların preslenmesiyle elde edilmektedir. Asenkron motorların stator yapısına benzese de, temelde sargıların dağılımında farklı bir tarz vardır. Fırçasız DC motor sargıları, asenkron motorlarda olduğu gibi yıldız veya üçgen bağlanabilir. Fırçasız DC motorlarda stator oluk sayısı, rotor kutup sayısına, faz sayısına ve sargı şekline bağlı olarak seçilir. Genellikle kesirli bir oluk/kutup oranına sahip tasarım tercih edilir [25].



Şekil 2.2. Fırçasız dc motorun temel yapısı

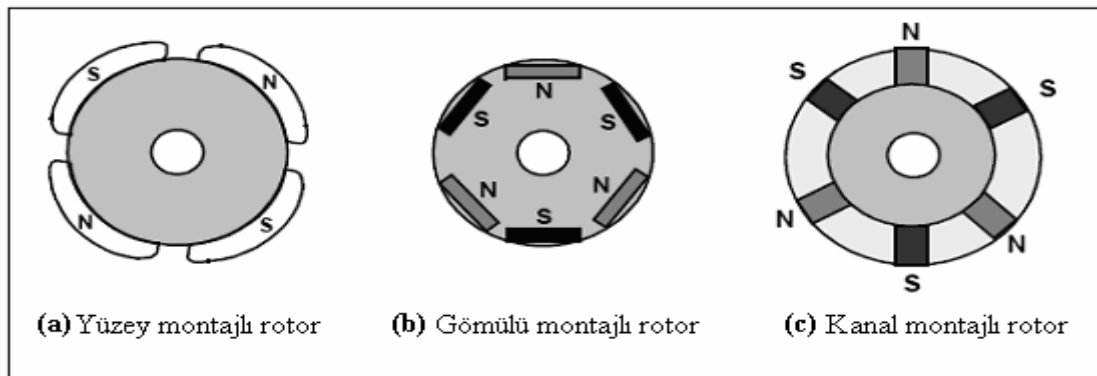


Şekil 2.3. Fırçasız dc motor statoru

2.2.1. Rotor çeşitleri

Fırçasız DC motorlarda, sabit mıknatıslı rotor kutupları rotor üzerine yerleştirilme şekline göre, dikdörtgen kesitli veya dairenin bir parçası gibi eğimli olarak yapılırlar. Kutuplar, birbirleriyle bitişik ve stator sargılarıyla karşılıklı olarak rotor yüzeyine yapıştırılırlar. Rotor kutup sayısı, maksimum dönme hızıyla ters orantılıdır [25].

Fırçasız DC motorlar, Şekil 2.4’de görüldüğü gibi, mıknatısların rotor üzerine yerleştirilme şekline göre üçe ayrılırlar. Bunlar; sabit mıknatısları rotor yüzeyine monte edilmiş motorlar, dikdörtgen kesitli sabit mıknatısları rotor içerisine gömülü monte edilen motorlar ve dikdörtgen kesitli sabit mıknatısları rotor kanallarına yerleştirilen motorlardır [25].



Şekil 2.4. Fırçasız dc motorların rotor çeşitleri

Şekil 2.4’de ilk olarak sabit mıknatısların rotor yüzeyine yerleştirildiği yapı görülmektedir. Motor tasarımı açısından bu tip rotorları yapmak kolay olmasının yanında, yüksek hızlarda sabit mıknatısların parçalanma olasılığı bulunması nedeniyle, yüksek hızlı uygulamalar için uygun değildir. Bu motorlarda etkin hava boşluğu, rotor pozisyonu ile değiştiği için bir miktar endüktans değişimi söz konusudur.

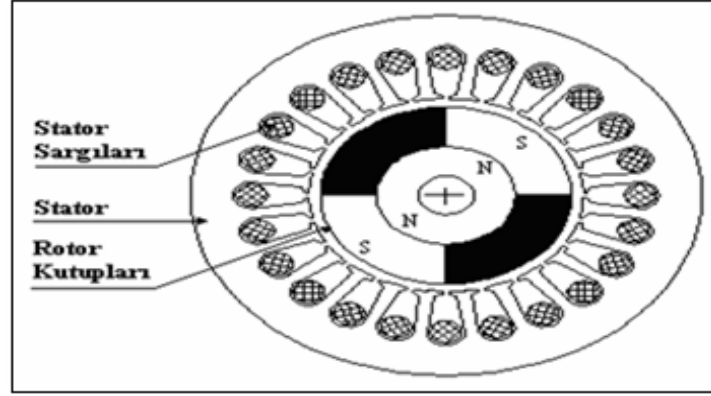
Şekil 2.4’de ikinci olarak dikdörtgen kesitli sabit mıknatısların rotor nüvesinin iç kısmına yerleştirildiği yapı görülmektedir. Kullanımı yaygın olmamakla birlikte, yüksek hızlı çalışmalar için uygundur. Genellikle bu tip motorlarda, rotor pozisyonu ile endüktans değişimi önemsenecek kadar küçüktür.

Şekil 2.4’de son olarak dikdörtgen kesitli sabit mıknatısların rotor kanallarına monte edildiği yapı görülmektedir. Önceki rotor tiplerinin avantajlı yanları göz önüne alınarak dizayn edilmiş bir rotor tipidir.

2.2.2. İç ve dış rotorlu fırçasız dc motorlar

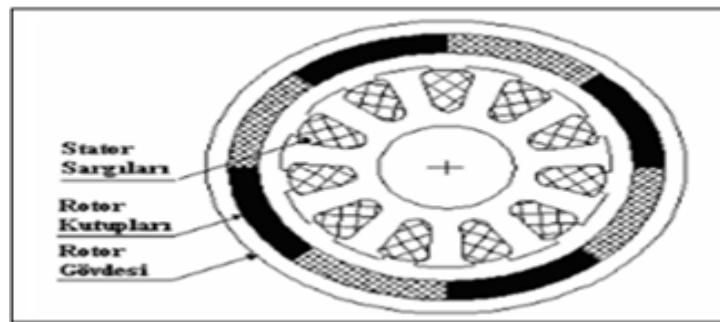
Fırçasız DC motorlar, rotorun içte veya dışta olmasına göre iç rotorlu fırçasız DC motorlar ve dış rotorlu fırçasız DC motorlar olarak da ikiye ayrılırlar.

İç rotorlu fırçasız DC motorlar, yapısal olarak senkron ve asenkron motorlara benzemektedirler. Dış tarafta bulunan stator, sabit endüvi sargılarını taşır. Dış rotorlu fırçasız DC motorlara göre daha yüksek hızlara çıkabilmektedir. Fakat yüksek hızlara çıkıldığında sabit mıknatısların yerlerinden ayrılma tehlikesi nedeniyle, rotorun yüksek elektriksel dirençli metal şeritler ile sarılması gerekir. Ayrıca sargıların statorda bulunması seri üretimde işçilik açısından daha zordur. Bu iki faktör motorun üretim maliyetini arttırır. Bununla birlikte sargıların statorda olması soğutma açısından avantaj yaratırken, eylemsizlik momentinin düşük olması da yüksek kalkış ve fren momenti ihtiyacı gösteren kompresör ve servo uygulamalarda tercih edilen bir motor tipi olmasını sağlar. Şekil 2.5’te uygulamada iç rotorlu motorun mekanik yapısı görülmektedir.



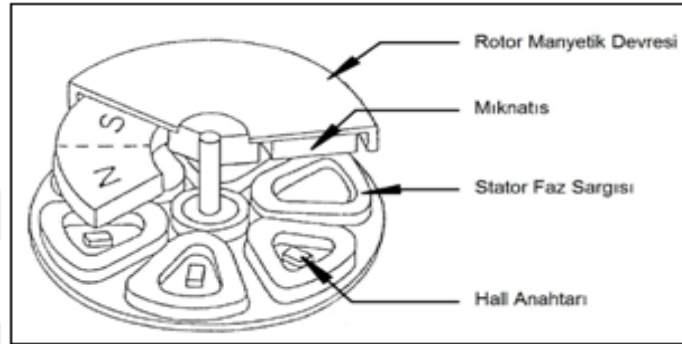
Şekil 2.5. İç rotorlu fırçasız dc motorun mekanik yapısı

Şekil 2.6'da görüldüğü gibi bu yapıda; endüvi sargılarını taşıyan stator içtedir. Mıknatısları taşıyan rotor ise dıştadır ve serbest olarak döner. Bu motorlarda rotorun dışta olması mıknatıs alanını büyütme ve bu nedenle aynı manyetik alan etkisi, ferrit gibi daha düşük kalitede ucuz mıknatıslar ile elde edilebilmektedir. Stator ve rotor yapısı olarak bu motorlar, sabit mıknatıslı fırçalı doğru akım motorlarına çok benzemektedirler. Döner kısmın dışarıda bulunması tasarım açısından kütesinin artmasına ve eylemsizlik momentinin yükselmesine neden olarak, hızın yükteki ani değişimlerden etkilenmemesi istenen sabit hızlı uygulamalar için elverişli bir yapı kazandırır. Ancak yüksek kütle sebebiyle rotorda dengesizlik meydana gelir. Rotordaki küçük çapsal dengesizlikler, anma hızlarında bile, iç rotorlu yapıya göre nispeten büyük olan eylemsizliğin etkisi ile titreşimlere neden olur. Ayrıca çift rulman yerine tek rulman ve mil-yatak kullanabilme imkanı bu tipin üretim maliyetini düşüren etkenlerdir [26]. Bu özellikleri nedeniyle çamaşır makinası ve fan uygulamalarında oldukça tercih edilmektedir.



Şekil 2.6. Dış rotorlu fırçasız DC motorun mekanik yapısı

Çelikten yapılan ve iki yüzeyinden birine mıknatıs yerleştirilen bir disk rotoruna sahiptir. Rotor mıknatıslarına karşılık olarak stator da uyarma sargıları mevcuttur. Baskı devre şeklinde imal edilen sargılar da vardır. Şekil 2.7’de disk tipi bir fırçasız DC motor yapısı görülmektedir. Kullanıldığı hız değerleri 1000 rpm üzerine çıkarsa, yapısındaki rotor ve stator disk çeliklerinde ısınma sorunu baş göstermektedir. Bu sonuçtan yola çıkılarak, disk rotorlu fırçasız DC motorları düşük hız ve güç uygulamaları için tercih etmek doğru bir yaklaşım olacaktır [26].



Şekil 2.7. Disk tipi fırçasız dc motorun mekanik yapısı

2.2.3. Fırçasız dc motorlarda kullanılan sabit mıknatıslar

Günümüzde motor teknolojisinde mıknatısların önemi giderek artmaktadır. Mıknatısların kullanılmasıyla elektrik motorlarının özellikle hız-moment davranışları daha iyi hale gelmiştir. Sabit mıknatıslar, DC motorların ana malzemeleridir. Mıknatısların fırçasız DC motorların yapılarında kullanılmasıyla; fırça arızaları, ark, ısınma vb. dezavantajları da ortadan kalkmıştır [23]. Fırçasız DC motorlarda kullanılan sabit mıknatıslar, B-H düzleminde geniş bir histerezis döngüsüne sahiptir. Son yirmi yılda sabit mıknatıs teknolojisi büyük ölçüde gelişmiştir. Günümüzde sabit mıknatıs malzemelerin pek çok tipleri mevcuttur. Bunlar AlNiCo (Alüminyum-Nikel-Kobalt), ferrit (Seramik), toprak elementi samaryum-kobalt ve NdFeB (Neodmiyum-Demir-Bor)’dir. Son yıllarda geliştirilen NdFeB mıknatıslar, en yüksek güç yoğunluğuna sahiptir. Ferrit mıknatıslar, ucuz maliyetinden dolayı en yaygın kullanılan mıknatıs çeşididir. Her mıknatıs çeşidi, fırçasız DC motorlarda farklı performans seviyelerine ve çeşitli kısıtlamalara yol açan farklı özelliklere sahiptir [21].

AlNiCo mıknatısların, akı yoğunlukları yüksek olup buna karşın zorlayıcı kuvvetleri düşük değerdedir. Bundan dolayı da, sahip oldukları mıknatısiyeti zaman içinde kaybedebilme sıkıntısı vardır ve bu nedendir ki günümüzde pek fazla kullanımı yoktur. AlNiCo mıknatıslar yüksek remenans indüksiyonlarında kullanıma uygundur. AlNiCo mıknatıslar daha çok doğru akım motorlarında kullanılırlar [23].

Ferrit ya da seramik mıknatısların, hem zorlayıcı kuvvetleri, hem de akı yoğunlukları yüksek değerdedir. Sahip oldukları mıknatısiyeti kaybedebilme sıkıntısı da söz konusu değildir. Ferritin doğada çok bulunması ve ucuz olması sebebiyle günümüzde kullanımı yaygındır. Ferrit mıknatıslar ucuzdur, ancak çok daha düşük artık mıknatıslanma akı yoğunluğuna, artık mıknatısiyet yitirme kuvvetine ve güç üretimine sahiptir. Ayrıca ferrit mıknatısların kırılabilir bir yapısı vardır [21]. Tablo 2.1.'de mıknatısların akı ve manyetik değerleri verilmiştir.

Tablo 2.1. Mıknatısların akı ve manyetik değerleri

Mıknatısın Tipi	Derecesi	B_r	H_c	H_{ct}	BH_{max}	T_{max} (°C)
NdFeB	39H	12800	12300	21000	40	150
SmCo	26	10500	9200	1000	26	300
NdFeB	B10N	6800	5780	10300	10	150
AlNiCo	5	12500	640	640	5,5	540
Seramik	8	3900	3250	3250	3,5	300
Flexible	1	1600	1370	1380	0,6	100

Samaryum-kobalt (SmCo) mıknatısların, sahip olduğu manyetik yoğunluğu yüksek olup aynı zamanda da düzgün bir B-H karakterine sahiptir. Bu üstünlükleri dolayısıyla rağbet gören bir malzemedir. Fakat bu alaşımı oluşturan malzemelerin doğada az bulunması nedeniyle diğer malzemelere göre maliyeti yüksektir. Nadir toprak elementi olan kobalt mıknatısların manyetik özellikleri iyidir, ancak pahalıdır. Artık mıknatısiyetleri 1,15 Teslaya kadar çıkmıştır [23].

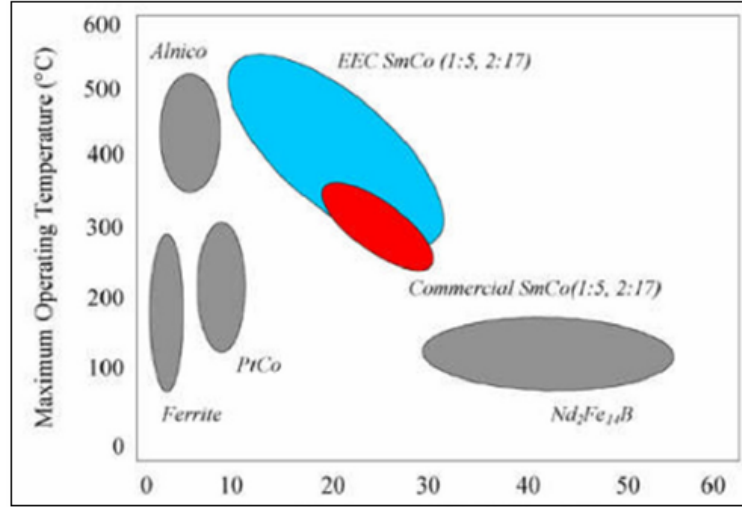
Neodmiyum-ferrit-bor mıknatısları, neodmiyum, demir ve bor maddelerinin alaşımından oluşmuştur. Samaryum-kobalt malzemesine oranla ucuz olması ve düzgün bir B-H karakterine sahip olması gibi üstünlükleri vardır. NdFeB mıknatıs en

yüksek artık mıknatıslanmaya (B_r) ve artık mıknatıslık yitirme kuvvetine (H_c) sahiptir. Nadir toprak elementleri ile oluşturulan demir mıknatıslar ise, kobalt içermedikleri için fiyatları nadir toprak kobalt mıknatıslar kadar yüksek değildir. Artık mıknatısiyetleri 1,25 Tesla yı geçer. Ancak sıcaklık davranışları pek iyi değildir [23]. Sabit mıknatıs malzemelerin karakteristikleri Tablo 2.2'de karşılaştırılmaktadır.

Bir motor için manyetik malzeme seçiminde manyetik akı yoğunlukları, maliyet, karşıt mıknatısiyet gücü ve manyetik kalitesi gibi özellikleri dikkate alınır. Ayrıca göz önünde bulundurulması gereken diğer hususlar ise, çalışma sıcaklığı aralığı, hacim başına moment ve mıknatısların çalışma ortam zorluklarıdır. Motorlarda kullanılacak en ideal mıknatısın seçimi için, mıknatısın maksimum BH (manyetik kalite) değerinin yüksek, H_c karşıt güç değerinin minimum olması kriteri aranır. Bununla birlikte mıknatısın, rotorun eylemsizliğine olan etkisi de düşünülmelidir [23]. Yüksek güçlü kutuplar için doğal olarak geniş hacimli mıknatıslar gerekir. Sabit mıknatısların yüksek sıcaklığa maruz kalması, koersitif gücünün ve akı yoğunluğunun bozulmasına neden olur. Bu yüzden yüksek çalışma sıcaklıklarında mıknatısların seçimi göz önüne alınmalıdır. Şekil 2.8'de manyetik malzemelerin sıcaklıkla değişen eğrileri görülebilmektedir. Mıknatıslar, inverterden kaynaklanan hatalı kısa devre akımlarından dolayı mıknatıslık özelliğini kaybedebilirler. Bu yüzden koruyucu elektronik akım koruma devreleri ile inverter akımı, güvenli sınırlarda tutulmalıdır [21].

Tablo 2.2. Sabit mıknatısların özellikleri

Al-Ni-Co	Yüksek B_r ve düşük H_c , mükemmel mekanik dayanım, büyük boyutlu sabit mıknatıslar için uygundur.
Ferrit	Düşük B_r ve orta H_c , nispeten daha ucuz ve kolay kırılabilir
Nadir-toprak elemanı	Yüksek B_r ve H_c , çok pahalı, küçük sıcaklık katsayısı
NdFeB	Yüksek B_r ve H_c , mükemmel performans, nispeten pahalı



Şekil 2.8. Mıknatıs malzemelerin sıcaklıkla değişen performans eğrileri

2.2.4. Fırçasız dc motor kontrolünde kullanılan sensörler

Sensörler genel olarak, herhangi bir kaynaktan gelen işaret ya da uyarıyı alan ve bu işaretlere uygun bir sinyal üreten devre elemanlarıdır. Motor kontrolü açısından ise, denetlenen elektriksel ya da mekanik büyüklükten geri besleme almak ve kontrol devrelerinde işlenecek büyüklüğe dönüştürmek amacıyla kullanılan elektromanyetik, elektromekanik ya da optik elemanlardır [21]. Motor kontrol uygulamalarında, rotorun açısal konumunu ve hızını algılamak için çoğunlukla enkoderler, hall sensörleri, resolver ve takogeneratörler kullanılır. Motor kontrolünde, rotor pozisyonunun algılanması için, hangi algılama elemanın seçileceğine karar vermek amacıyla bazı kriterlerin değerlendirilmesi gerekir. Bu kriterler; çevre koşulları, rotorda açısal olarak yer değiştirmenin büyüklük derecesi, algılayıcı için ayrılan mesafe, kontrolden beklenen hassaslık ve doğruluk derecesi, algılayıcı elemanın çekmesi beklenen en fazla güç ve algılayıcı elemanın seri biçimde üretilebilme durumu olarak sayılabilir.

Trapezoidal zıt emk'ya sahip fırçasız DC motorlarda rotor pozisyonu, genellikle hall sensörleri ile belirlenir. Hall sensörleri, silisyum temelli ve entegre sensör olmak üzere iki gruba ayrılır. Entegre sensörlerde elektronik arabirim devresi, silisyum sensörle aynı tabaka üzerinde imal edilir. Elektronik bir devre, zayıf olan hall sensör çıkışından az kayıplı olarak bozulmadan çıkış alınmasını sağlar ve çıkışı dijital olarak verir. Elektronik devre, bir eşik değeri içerir ve çıkışından iki durumlu bir

sinyal elde edilir. Uygulanan manyetik alan, eşik değerin altında ise çıkış düşük, eşik değerin üstünde ise çıkış yüksek seviyededir [21].

Hall anahtarı magnetik alan şiddetinin eşik değerinin altında yada üstünde olmasına göre, anahtarın açılmasını ve kapanmasını sağlayan Hall etkisi üzerine kurulu yarı iletken bir anahtardır [26].

2.3. Çalışma Prensipleri

Fırçasız DC motorlar, sabit mıknatıslı bir rotora sahip ve elektronik komütasyon için rotor pozisyonu bilinmesi gereken senkron bir motordur. Bu motorlarda, yoğunlaştırılmış stator sargıları tarafından bir manyetik döner alan üretilmekte ve bu döner alan içine sabit mıknatıs kutuplarına sahip rotor yerleştirilerek döner alan ile aynı hızda hareket etmesi sağlanmaktadır. Üretilen döner alan, rotor pozisyonuna göre yarı iletken elemanların anahtarlanması ile oluşturulmaktadır. Rotora yerleştirilmiş bir konum algılayıcı ile veya konum algılayıcı kullanılmaksızın yani algılayıcısız bir kontrol algoritmasıyla, hangi güç anahtarının açma veya kapama yapması gerektiği belirlenir. Rotor konumunun bilgisi göz önünde tutularak, stator sargılarındaki akım yönü değiştirilir. Statordaki sargılara uygulanan gerilim ve akımın yönü ile statordaki sargılarda manyetik alan kutupları oluşturulur ve bu manyetik alan ile rotordaki sabit mıknatısların yarattığı manyetik alanın etkileşimi sonucunda bir dönme momenti oluşur. Oluşan bu dönme momentinin büyüklüğü, stator ve rotorda oluşan manyetik alanların şiddetlerine bağlı olarak değişir. Oluşan dönme momenti ile rotor konumu değişir. Değişen yeni konum sensörler tarafından algılanarak kontrolöre gönderilir. Rotorda oluşan yeni konum kontrolör tarafından değerlendirilerek, anahtarların yeni konumları belirlenir. Anahtarlama işleminin bu döngü ile devam etmesiyle rotorda sürekli bir hareket sağlanır. Asenkron motorlarda olduğu gibi, stator döner alanı ile rotor hızı arasında bir kayma yoktur. Fırçalı DC motorlarda kutup değişimi, komütatör ve fırçalarla mekanik bir şekilde yapılır. Mekanik komütatör, rotora sabitlendiği için anahtarlama anları, Tablo 2.3.'deki gibi manyetik alanın değişen yönü ile otomatik olarak ayarlanır. Ancak fırçasız DC motorlarda kutup değişimi yarı iletken anahtarlarla elektronik olarak yapılır [21, 25].

Tablo 2.3. Rotor konumuna karşılık gelen anahtar durumları

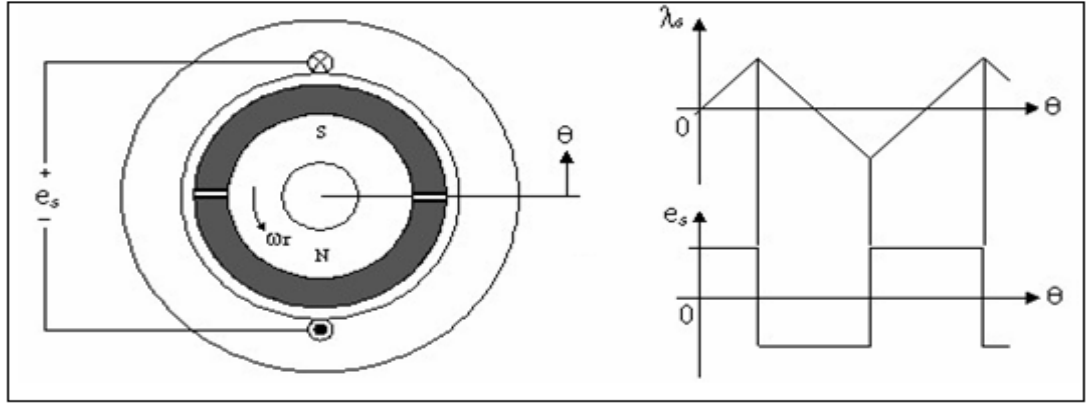
Konum	Konum açısı ϕ	Hall Sensörleri			Anahtar Konumları					
		H1	H2	H3	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
1	$0 \leq \phi < 60$	1	0	0	1	0	0	1	0	0
2	$60 \leq \phi < 120$	1	1	0	1	0	0	0	1	0
3	$120 \leq \phi < 180$	0	1	0	0	0	1	0	0	1
4	$180 \leq \phi < 240$	0	1	1	0	1	1	0	0	0
5	$240 \leq \phi < 300$	0	0	1	0	1	0	0	0	1
6	$300 \leq \phi < 360$	1	0	1	0	0	0	1	1	0

Fırçasız DC motorlar, trapezoidal zıt emk'ya sahiptir ve sabit moment üretmek amacıyla kare dalga akımla çalışacak biçimde tasarlanırlar. Bu tip motorlar;

- Hava boşluğunda dikdörtgen dağılımlı mıknatıs akısı,
- Dikdörtgen akım şekli,
- Yoğunlaştırılmış stator sargıları,
- Sinüzoidal zıt emk'lı motorlara göre daha düşük üretim maliyeti,
- Sinüzoidal zıt emk'lı motorlara göre daha basit kontrol yapısı,
- Bir elektriksel çevrim için altı farklı komütasyon noktası,
- Komütasyon anlarında moment dalgalanması,

gibi özelliklere sahiptir. Bu tip fırçasız DC motorların uyartım akımı, kare dalga şeklindedir. Bu kare dalga akım, her faz sargısından bir periyot içerisinde 120° süreyle iki defa geçer. Trapezoidal zıt emk'lı fırçasız DC motorlar, sinüzoidal zıt emk'lı motorlarla karşılaştırıldığında, bazı önemli sistem basitleştirmeleri sağlar. Özellikle bir elektriksel çevrimde sadece altı komütasyon anı gerektiği için, rotor pozisyon sensörlerinin kararlılık gereksinimleri çok daha azdır.

Fırçasız DC motor sürücülerinde moment üretmek için, fırçasız DC motorun sargılarında oluşan zıt emk karakteristiklerini çok iyi anlamak gereklidir. Şekil 2.9'da, akı bağıntısı ve çeşitli pozisyonlarda meydana gelen tek bir bobinin zıt emk'sı görülmektedir.



Şekil 2.9. Tek bobinin zıt emk dalga şekli

Şekil 2.9 göz önüne alındığında, tek bir bobinin akı bağıntısı matematiksel olarak aşağıdaki gibi türetilebilir;

$$\lambda_{fs} = (\pi r l) B_f \frac{\theta}{\pi/2} \quad (-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2) \quad (2.1)$$

Burada r ; rotor yarıçapı, l ; rotor uzunluğu, B_f ; sabit mıknatısın akı yoğunluğu, θ ise rotor pozisyonudur. Meydana gelen zıt-emk'nın büyüklüğü ise;

$$e_s = \frac{d\lambda_s}{dt} = \frac{d\lambda_s}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} = \frac{\pi r l B_f \omega_r}{\pi/2} = 2N_s B_f l r \omega_r \quad (2.2)$$

olmaktadır. Burada ω_r , elektriksel olarak rotor açısal hızını (rad/s) göstermektedir. Eş merkezli sargılarda meydana gelen toplam zıt emk'nın büyüklüğü aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$E = 2N_s B_f l r \omega_r \quad (2.3)$$

Burada N_s , bir faz sargısındaki iletken sayısıdır. Fırçasız DC motorlarda moment, enerjilenen stator fazlarıyla rotor kutuplarının aynı hizaya gelme eğilimi ile üretilir. Analitik olarak, fırçasız DC motorlardaki moment;

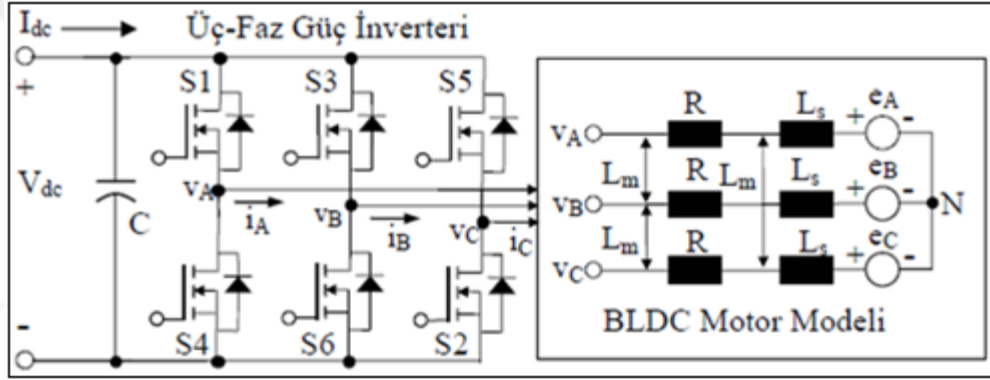
$$T_e = \frac{e_A i_A + e_B i_B + e_C i_C}{\omega_r} \quad (2.4)$$

şeklinde olmaktadır. Burada e_A , e_B , e_C ; zıt emk değerlerini ve i_A , i_B , i_C ; faz akımlarını göstermektedir. Mekanik hareket denklemlerinden rotor açısal hızının değişimi,

$$\frac{d}{dt}\omega_r = \left(\frac{p}{2} (T_e - T_L) - B\omega_r \right) / J \quad (2.5)$$

ifadesiyle verilebilir. Burada p motor kutup sayısını, T_L yük momentini, J atalet momentini ve B sürtünmeyi temsil etmektedir.

Denklem (2.5)'de görüldüğü gibi fırçasız DC motorlarda sabit moment üretmek için tahrik edilen fazlar, zıt emk'nın düz kısımları ile senkronize edilmelidir. Pratik sistemlerde üretilen moment, ideal bir şekilde düz değildir ve bir dalgalılığa sahiptir. Fırçasız DC motorların kontrolünde, motor sargılarının beslenmesi için inverter devresine ihtiyaç vardır. Şekil 2.10'da, inverter ve bir fırçasız DC motor eşdeğer devresi görülmektedir.



Şekil 2.10. İnverter ve fırçasız dc motor eşdeğer devresi

Fırçasız DC motorlar ile sabit mıknatıslı DC motorlar arasındaki benzerliği göstermek amacıyla, bir faza ait zıt emk geriliminin genliği, Denklem (2.3) referans alınarak aşağıdaki gibi tekrar yazılabilir.

$$E = k\phi\omega_r \quad (2.6)$$

Burada k her bir faz için bobin sarım sayısına bağlı gerilim katsayısı, ϕ sabit mıknatıs akısı ve ω_r rotor hızıdır. Her bir 120° 'lik periyot boyunca, mekaniğe çevrilen anlık elektriksel güç, seri iki fazın toplamından bulunur.

$$P_0 = \omega_r T_e = 2EI \quad (2.7)$$

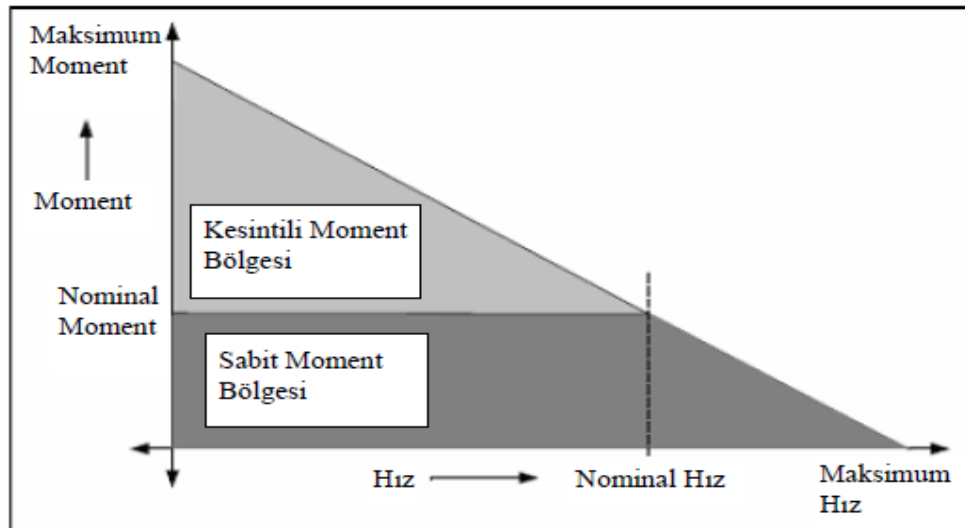
Burada, T_e çıkış momenti, I anlık faz akımıdır. Denklem (2.6) ve Denklem (2.7)'den çıkış momenti yazılırsa,

$$T_e = 2k\phi I = k_t I \quad (2.8)$$

olmaktadır. Burada k_t , moment sabitidir.

Geleneksel sabit mıknatıslı bir DC motorda moment-hız karakteristiği, endüvi reaksiyonu etkisinin önemli olduğu yüksek moment seviyeleri hariç lineerdir. “Fırçasız DC motor” terimi; fırçalı DC motordaki gibi lineer bir moment-hız karakteristiğine sahip AC motor, inverter ve rotor pozisyon sensörü bileşiminden oluşan sürücü sistemini ifade etmek için kullanılmaktadır. Yani, fırçasız DC motorların moment-hız karakteristikleri ve performans denklemleri hemen hemen DC motorlarla aynıdır. Şekil 2.11’de bir fırçasız DC motorun hız/moment eğrisi görülmektedir.

Fırçasız DC motorlarda bir stator fazının moment dağılımı, faz akımı ve rotor pozisyonunun bir fonksiyonudur. Bir stator fazına, sabit bir doğru akım uygulanırsa ve rotor harici bir güç tarafından döndürülürse, sargı akımı ve manyetik akının birbirini etkilemesinden dolayı meydana gelen moment, mil pozisyonu ile periyodik olarak değişecektir. Bu karakteristik, motorun moment fonksiyonu veya statik moment/açı karakteristiği olarak bilinir. Şekil 2.11’de motorun karakteristiği gösterilmiştir.



Şekil 2.11. Fırçasız dc motorların hız/moment eğrisi

2.4. Matematiksel Modeli

Fırçasız DC motor sürücülerin matematiksel analizleri ile ilgili değişik çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalarda fırçasız DC motor modeli; durum-uzayı denklemleri, fourier serileri ve d-q eksen modelleri şeklinde elde edilmektedir. Fırçasız DC motorların zıt emk ve akım dalga şekillerinin sinüzoidal olmayan yapısından dolayı, d-q modelinin kullanımı elverişsiz olmaktadır. Ayrıca, bu parametreleri sinüzoidal kabul ederek model elde etmek anlamsızdır. Modelleme ve simülasyon çalışmalarında, faz değişimi yaklaşımını kullanmak daha kolay olmaktadır [24].

Fırçasız DC motor sürücülerin matematiksel analizini yapabilmek için aşağıdaki kabullerin yapılması, kolaylık sağlamaktadır;

- Motor doyma altında olmadığı kabul edilir.
- Motor sargıları sabit bir dirence, öz endüktansa ve karşılıklı endüktansa sahiptir.
- Tüm fazların dirençleri ve endüktansları eşittir.
- Fazların hepsi aynı zıt emk şekline sahiptir.
- İnverterdeki güç yarıiletkenleri idealdir.
- Demir kayıpları ihmal edilebilir düzeydedir.

Yukarıdaki kabuller dikkate alınarak, Şekil 2.10 ile verilen bir fırçasız DC motorun gerilim denklemleri, matrisel formda Denklem (2.9)'daki gibi gösterilebilir;

$$\begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_A \\ e_B \\ e_C \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$L = L_s - L_m$$

ile ifade edilebilir. Burada v_A , v_B ve v_C faz gerilimlerini, e_A , e_B ve e_C zıt emk'ları, i_A , i_B ve i_C faz akımlarını, L öz endüktansı, L_m karşılıklı endüktansı göstermektedir.

Fırçasız DC motorların zıt emk dalga şekilleri, rotor pozisyonuna (θ) bağlı trapezoidal bir yapıdadır. Matematiksel olarak zıt emk değerleri;

$$\begin{bmatrix} e_A \\ e_B \\ e_C \end{bmatrix} = E \begin{bmatrix} f_A(\theta) \\ f_B(\theta) \\ f_C(\theta) \end{bmatrix}$$

$$E = (k_e \omega_r), \left(\frac{d}{dt} \theta = \omega_r \right) \quad (2.10)$$

ile gösterilebilir. Burada k_e zıt emk sabiti, $f_A(\theta)$, $f_B(\theta)$ ve $f_C(\theta)$ sırasıyla A, B ve C fazlarına ait zıt emk dalga şeklini tanımlayan şekil fonksiyonlarıdır.

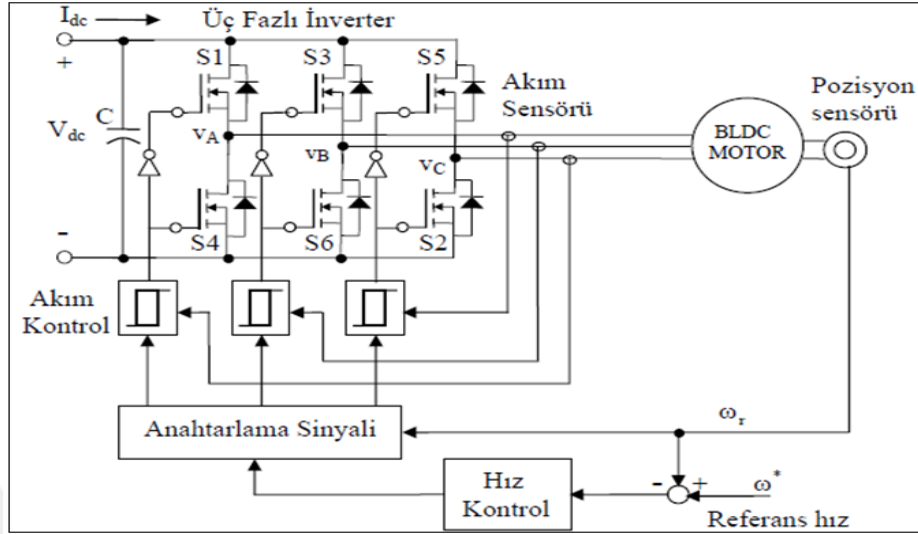
2.5. Fırçasız DC Motor Sürücüleri

Tipik bir fırçasız DC motor sürücü sistemi; fırçasız DC motor, inverter ve sayısal bir kontrol sisteminden oluşur. İnverter, bir köprü diyot vasıtasıyla şebekeden elde edilen bir DC güç kaynağına veya bir bataryaya bağlanır. Sayısal kontrolör, inverter vasıtasıyla fırçasız DC motorun her bir fazını sıra ile enerjilendirir. Sabit moment üretmek için bu enerjilendirme, rotor pozisyonu ile senkron yapılır. Bu nedenle pozisyon geri beslemesi için sistemde genellikle, fırçasız DC motorun içine yerleştirilen mekanik bir pozisyon sensörü kullanılmaktadır. Şekil 2.12'de pozisyon geri beslemeli tipik bir fırçasız DC motor sürücü sistemi görülmektedir.

Sensörlerden elde edilen konum bilgisi altı adet yarıiletken anahtarın açılması ve kapanması için kullanılır. Üç fazlı bir fırçasız DC motoru için her bir fazın trapezoidal zıt emk dalgalarından biri pozitif diğeri negatif alternansta bir tanesi de enerjisiz ve aralarında elektriksel olarak 120° aralık olacak şekilde anahtarlar iletime sokulur. Meydana gelen akım darbeleri, 120° süresince iletim durumunda, 60° süresince ise kesim durumundadır. Bu, her bir fazdan, elektriksel 360° periyodunun $2/3$ 'ü süresince akım aktığı anlamına gelmektedir. Bu akımın 120° 'si pozitif 120° 'si negatif yönde akmaktadır. Komutasyon için gerekli elektriksel 60° lik aralıklar için 6 ayrı noktada rotor konumunun algılanması gerekmektedir. Üç fazlı bir fırçasız doğru akım motoru için Hall anahtarları aralarında elektriksel 120° 'lik açı farkı olacak şekilde stator içersine yerleştirilirler. Hall sensörlerinden alınan sayısal işaretler eviricinin üç faz anahtarlama sıralarını elde etmek için kod çözücüde işlenmelidir.

Hız kontrol birimi, mekanik pozisyonu okur ve hangi fazın anahtarlanacağına karar verir. İdeal olarak her bir stator fazı, darbeli kare dalga akımla tahrik edilir. Akım darbesinin büyüklüğü ve anahtarlama örneğinin zamanlaması, mekanik parametrelerle birlikte meydana gelen momentin büyüklüğü üzerinde doğrudan bir

etkiye sahiptir. Şekil 2.12'de pozisyon geri beslemeli fırçasız dc motorun sürücü sistemi gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Pozisyon geri beslemeli tipik bir fırçasız dc motor sürücü sistemi

2.6. Fırçasız DC Motor Kontrol Yöntemleri

Fırçasız DC motorlarda kullanılan kontrol yöntemleri ile motorun akımı, momenti, rotor konumu ve hızı gibi parametreleri kontrol edilir. Denetleyicinin ürettiği kontrol sinyali, seçilen kontrol algoritmasına göre PWM (Darbe Genişlik Modülasyonu) sinyallerinin durumunu kontrol eder. Değişik darbe genişliğine sahip gerilimler, sabit bir kaynağın anahtarlama işlemiyle elde edilir. Anahtarın açık olma süresinin, anahtarın açık olma ve kapalı olma sürelerinin toplamına bölünmesi ile darbe genişliği elde edilir. Rotor konumu göz önünde tutularak yarı iletken anahtarlar bir sıra dahilinde tetiklenir. İşlemci sürücünün tetiklenmesini sağlayarak konum sensörlerinden aldığı bilgiye dayanarak bir faza pozitif, bir diğer faza negatif ve üçüncü faza ise gerilim uygulamaz. Bu gerilim uygulaması, sistematik bir şekilde sırayla her faza ayrı ayrı tatbik edilir. Bu şekilde işlemci, bu sürücü yapısıyla motorda bir dönme momenti meydana getirir.

Fırçasız DC motorların kontrolünde, yapılarının basit ve düşük maliyetli olması nedeniyle, hassasiyetin aranmadığı birçok uygulamada klasik denetleyiciler tercih edilir. Klasik denetleyiciler PI (oransal- integral kontrolü), PD (oransal-türev kontrolü), PID (oransal-integral ve türev kontrolü) ya da histerezis tipindeki

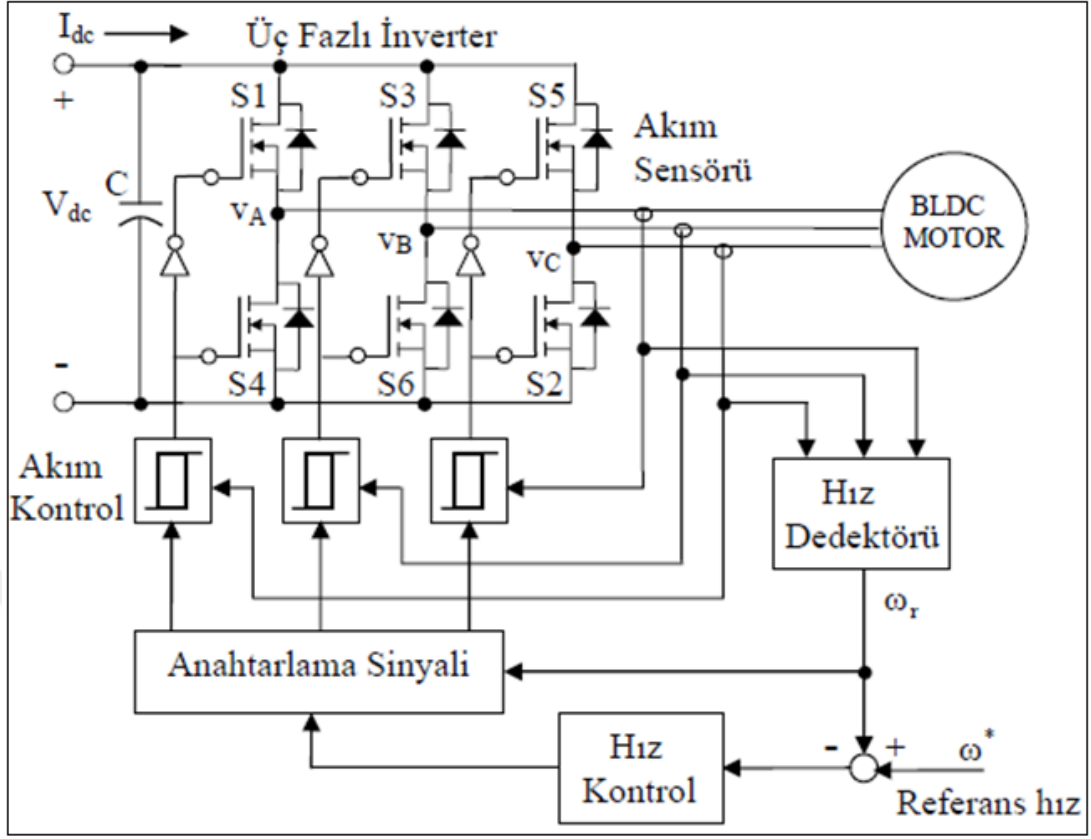
denetleyicilerdir. Ancak bu tip denetleyicilerin, denetlenecek sistemin modeline gereksinim duymaları ve optimum kazanç değerlerinin deneme-yanılma yöntemiyle belirlenmesi olumsuz yönlerini oluşturur. Ayrıca fırçasız DC motorlarda faz akımları ile rotor hızı arasındaki bağıntı lineer değildir. Klasik denetim yöntemleri kullanıldığında, motor kontrolü için, lineer olduğu kabul edilmektedir. Bu şekilde akım kontrolü ile hız kontrolü birbirinden ayrı tutulmaktadır .

Klasik denetleyicilerin yeterli derecede performans sergileyemediği veya daha çok hassasiyet istendiği uygulamalarda, modern denetim teknikleri (bulanık mantık, yapay sinir ağları, genetik algoritma, sinirsel bulanık denetleyiciler v.b.) kullanılması daha doğru bir yaklaşım olur [46].

2.7. Fırçasız DC Motorların Sensörsüz Kontrolü

Fırçasız DC motorun moment üretim prensibinden anlaşılacağı gibi sabit moment üretmek için, stator akımı uyarımlarının, rotor pozisyonu ile senkronize edilmesi gerektiği açıktır. Bu nedenle, fırçasız DC motorların kontrolü için rotor pozisyon bilgisi gereklidir. Fırçasız DC motorlarda, elektriksel senkronizasyon için anahtarlanması gereken fazın belirlenmesinde, hall etkili pozisyon sensörleri kullanılır. Yüksek performanslı sürücüler için genellikle, daha yüksek çözünürlüğe sahip optik enkoderler veya resolverler kullanılır. Ancak bu mekanik pozisyon sensörleri, gerçek uygulamalarda bazı problemlere yol açar. Şekil 2.13’de fırçasız DC motorların pozisyon sensörsüz kontrolü görülmektedir [21].

Mekanik pozisyon sensörleri ile ilgili ilk problem, sensörlerin pahalı olmasıdır. Rotor pozisyon sensörlerinin yüksek maliyeti, ev aletleri ve toptan üretim endüstrisi gibi maliyete duyarlı uygulamalar için bir sorun teşkil etmektedir [21].



Şekil 2.13. Fırçasız dc motorların sensörsüz kontrolü

Mekanik pozisyon sensörleri ile ilgili ikinci problem, güvenilirliğin az olmasıdır. Eğer fırçasız DC motor, özellikle sıcak, soğuk veya nemli bir çevreye yerleştirilirse, pozisyon sensörleri çalışmayabilir veya sensörlerden alınan bilgi kaybolabilir ya da hatalı olabilir [21].

Mekanik pozisyon sensörlerinin üçüncü problemi, elektrik motorunun içinde veya etrafında pozisyon sensörlerinin yerleştirilebileceği bir yere ihtiyaç duyması yani ilave hacme sebep olmalarıdır. Bir örnek olarak klima kompresörlerinde kullanılan fırçasız DC motorlar, pozisyon sensörlerinin yerleştirilmesinin yapısal zorluğundan dolayı genellikle pozisyon sensörleri içermez. Ayrıca uzay araçları ve uçaklardaki gibi sınırlı alana sahip uygulamalarda mekanik sensörler, fırçasız DC motor sürücüsünün boyutunu büyütmede ve uygulamaların gerçekleştirilmesine engel olmaktadır. Ayrıca mekanik pozisyon sensörleri, güç kablolarının yanında çalışırken bozuk veya hatalı sinyal üretebilmektedir. Bu yüzden harici pozisyon sensörlerinin kullanımı sınırlı alana sahip, maliyete duyarlı ve ayrıca güvenilirliğin çok önemli olduğu uygulamalarda tavsiye edilmemektedir. Pozisyon sensörlerinin kullanımının

bu problemleri, araştırmacıların ve endüstrinin rotor pozisyon bilgisini elde etmek için alternatif metotları araştırmasına yol açmıştır [21].

Literatürde fırçasız DC motorlar için pek çok sensörsüz kontrol yöntemlerinin uygulandığı görölmektedir. Kullanılan sensörsüz kontrol metotları öncelikle üç kategoride sınıflanabilir ;

1. Zıt emk temelli metotlar
2. Akı kestirim metodu
3. Önceki iki kategoriye girmeyen diğer özel metotlar.

Sensörsüz motorlar, sensörlü motorlar kadar yüksek hızlara ve ivmelere ulaşamazlar.



3. POMPALAR

3.1. Temel Bilgiler

Pompalar sıvıların enerjisini veya basıncını artıran makinelerdir. Bu bakımdan bir sıvının alçak seviyeden yüksek seviyeye veya düşük basınçtan yüksek basınca gönderilebilmesi için pompalar kullanılır. Diğer taraftan pompalar bir boru içinde akan sıvının akış hızını ve dolayısıyla debisini artırmak için de kullanılır.

Pompalar genel olarak iki ana kısımda toplanmıştır. Bunlar pozitif kaydırlı pompalar ve dinamik (santrifüj) pompalardır. Pompalar genellikle hacimsel ve santrifüj pompalar olmak üzere iki grupta incelenir. Pozitif kaydırlı pompalar sıvının akması için akışkan bölmesinin boyutunu (veya taşınmasını) mekanik araçlar kullanarak değiştirirler. Pozitif kaydırlı pompaların pistonlu pompalar, dişli pompalar, paletli pompalar ve diyaframlı pompalar gibi çeşitleri bulunmaktadır. Diğer taraftan dinamik (santrifüj) pompalar sıvının içine gömülmüş çarklarla sıvıya moment uygularlar. Salyangozlu pompalar, difüzörlü (kademeli) pompalar, derin kuyu pompalar ise santrifüj pompalardır. Bu pompalar silindirik bir gövde ve bunun içinde devir yapan kanatlar ile bölmelere ayrılmış bir çarktan oluşur. Taşınacak sıvı çarkın eksenine girer. Kanatlar sıvı taneciklerini santrifüj hareketi ile gövde içine fırlatır. Bu sırada kuvvetli bir basınç ekseninde kalan sıvı, gövdenin kenarında bulunan teğet borudan hızla dışarı çıkar. Santrifüj tulumbalar, pistonlu tulumbaların tersine sıvıların sürekli olarak iletilmesine olanak verir. Pozitif kaydırlı pompalar sabit moment karakteristiğine sahiptirler, oysa santrifüj pompalar değişken moment karakteristiği gösterirler [32].

Pompa tipinin seçiminde bilinmesi gereken çalışma şartlarının başlıca değişkenleri debi (Q) ve çalışma noktasında istenilen basma yüksekliği (H) değerleridir. Pompanın büyüklüğü ve devri, pompanın karakteristik eğrilerinden belirlenir. Seçilen pompanın verim, pompa motorunun gücü gibi diğer parametreleri de pompa performans eğrilerinden okunur.

Pompa debisi: Q ile gösterilir, birim zamanda pompadan geçen sıvının hacmidir. Yaygın olarak m^3/h , m^3/s ve l/s birimleri kullanılır.

Pompa basma yüksekliği: H ile gösterilir, Newton'un yerçekimi yasasına karşı gösterdiği dirence basma yüksekliği denir. Pompa tarafından akışı sağlanmak istenilen sıvıya verilen faydalı kinetik enerjidir. Basma yüksekliğinin farklı tipleri, sürtünme, hız ve basınç toplam yükseklik içinde tanımlanır [32]. Yaygın olarak metre (m) birimi kullanılır.

Sistemin basma yüksekliği: sistemin basma yüksekliği H aşağıdaki gibi belirlenir:

$$H=h+TDP+ PA \quad (3.1)$$

h, basılacak sıvının serbest sıvı yüzeyi ile basıldığı yer arasındaki statik yükseklik farkıdır.

TDP (toplam dinamik basınç), tüm basınç kayıplarının toplamıdır. Bu toplam basınç farkı emiş ve basma hattındaki borulardaki sürtünme kayıpları, tüm vana, armatür ve ek parçalarının sürtünme kayıplarından oluşur.

PA (akma basıncı), basma hattının sonunda sıvının vana, armatür veya borudan akış basıncıdır.

Her pompa sisteminin Q-H grafiği üzerinde kendine özel bir sistem çalışma eğrisi vardır. Her pompanın optimum çalışma noktası sistem eğrisi ile pompa karakteristik eğrisi olan Q-H eğrisinin kesişme noktasıdır. Genellikle pompa devir sayısının, fan çapının veya sistemin karakteristiğinin değiştirilmesiyle çalışma noktası değişebilir.

Sistemin karakteristik eğrisinin değiştirilmesi şu yöntemlerle yapılır. Eğer basılan sıvı viskozitesi su veya benzeri değerde ise sistemin karakteristiğini değiştirmenin pratik yolu boru hattının basınç kayıplarını artırmak veya azaltmaktır. Bu boru çapını değiştirerek veya vanayı açıp kapatma şeklinde olur. Diğer bir yolu ise statik kısmının değiştirilmesidir. Bu basma hattının basıncı veya su seviyesinin artırılması veya azaltılması şeklinde olur.

Pompa karakteristik eğrisinin değiştirilmesi ise, aşağıdaki eşitliklerdeki değişkenlerin fonksiyonudur. Pompanın çarkının çapı, debisi ve basma yüksekliği arasındaki matematiksel bağlantı şöyledir:

$$[D_2/D_1]^2 = Q_2/Q_1 = H_2 / H_1 \quad (3.2)$$

D- burada pompanın çark çapını göstermektedir.

Ayrıca pompayı tahrik eden motorun devir sayısı da değiştirilerek pompanın karakteristik eğrisi değiştirilebilir.

$$n_2 / n_1 = Q_2 / Q_1 \quad (3.3)$$

$$[n_2 / n_1]^2 = H_2 / H_1 \quad (3.4)$$

$$[n_2 / n_1]^3 = P_2 / P_1 \quad (3.5)$$

Viskozitesi ve yoğunluğu sudan farklı olan akışkanların kullanıldığı sistemlerde pompanın seçiminde bu durum dikkate alınmalıdır. Bu gibi durumlarda hem sistemin karakteristiği hem de performans değerlerinde sapmalar olur. Pompalanan akışkanın viskozitesi arttığında pompanın bu akışkan için debi, basma yüksekliği, verimi düşer, ihtiyaç duyulan motor gücü artar.

Pompanın motor gücünün doğru olarak seçilmesi de önemlidir. Motor gücünün doğru olarak seçiminde şu formülden faydalanılır:

$$P_h \text{ (kW)} = QH p / 102 \eta \quad (3.6)$$

Pompanın işletim noktasındaki debisi Q [l/s], basma yüksekliği H [metre], akışkanın yoğunluğu p [kg/l] birimleriyle ve pompa verimi η ise ilgili pompa eğrisinden alınarak formülde yerine konulduğunda , gerekli olan asgari motor gücü P [kW] olarak bulunur. Kullanılan akışkan su olduğunda $p=1$ [kg/dm³] kabul edilerek dikkate alınmaz.

3.2. Su Pompalama Sistemlerinde Pompa Seçimine Etki Eden Faktörler

Sulama pompaj tesislerinin, en önemli elemanı pompadır. Bir pompalama tesisine ilişkin en uygun pompa seçiminde, sistemin mevcut durumunun iyi bir şekilde araştırılması ile tesisten tatmin edici bir performans sağlanabilir. Verilen bir sistem için, uygun ve yüksek verimli bir pompa seçiminden önce, sistemin tasarım sınırları, sulama yöntemi ve istenilen esneklik iyi bir şekilde araştırılmalıdır.

Pompa seçiminde göz önünde bulundurulması gereken kriterler ; debi miktarı, basma yüksekliği, çalışma basıncı, çalışma hızı, verimi, dönüş yönü, maliyeti, bakım ve onarım kolaylığı, boyutları, sessiz ve titreşimsiz çalışması, montajı gibi kriterlerdir.

Tesise uygun pompa seçiminden önce, sulama sisteminin gereksinim duyduğu debi ve toplam dinamik yükseklik değerleri belirlenmelidir. Bunun için sisteme ait, debi ve toplam dinamik yükseklik ilişkisini gösteren tesis toplam yük kaybı eğrisinin (TYKE) çizilmesi gerekmektedir. TYKE'nin çizilebilmesi için, sistemin geometrisi (geometrik yükseklik, kullanılacak borunun çapı, cinsi, toplam uzunluğu, kullanılması kaçınılmaz olan boru armatür ve donanımları) önceden belirlenmelidir. Sistemde kullanılacak optimum boru çapının belirlemede, pompalanan debi ve su hızı önemli rol oynamaktadır. İletilmesi istenen debi için $2\pm 0,5$ m/s su hızı esas alınır. Pompaj tesislerinde zorunlu kalınmadıkça borudan akacak suyun hızı hiçbir zaman 3 m/s yi aşmamasına özen gösterilmelidir.

Pompa seçimine gösterilecek özen, tesisin işletme ekonomisine büyük ölçüde etki etmektedir. Pompalar bir yılda, kendi maliyetinin on katı tutarında enerji harcayabilir. Uygun pompa seçimi ile bu enerji optimum değere indirilebilir. Pompa seçimi, belli bir sulama sistemi için en uygun pompanın seçilmesi yöntemidir. Sulama sisteminin performans ihtiyaçlarına uygun tip ve özelliklere sahip bir pompa tipi seçilmelidir. Bir tesise uygun pompa seçebilmek için bazı unsurların mutlaka sağlıklı olarak elde edilmesi gerekmektedir. Bunlar:

- Pompalanacak suyun sıcaklığı, özgül ağırlığı, viskozitesi ve temizliği olup, pompanın yapısal yönüyle yakından ilgilidir.
- Pompa büyüklüğünün belirlenebilmesi için gerekli pompaj debisi bilinmelidir.
- Sistemin geometrisi ve topografya bilgileri, TDY (Toplam Dinamik Yükseklik) değerinin hesaplanması ve TYKE çizilebilmesi için gereklidir.

- Su kaynağı ve emme koşulları sorgulanmalı, kuyu karakteristikleri iyi ve doğru incelenmelidir.
- Tesisin kurulacağı yer ile ilgili bilgiler edinilmelidir.
- Bir depoya değil de, doğrudan bir boru şebekesine su pompalaması ve debinin vana ile ayarlanması durumunda, TDY-Q eğrisi yatık olan pompalar, hidroforlu sistemlerde ve çok sayıda pompanın paralel bağlandığı koşullarda ise dik TDY-Q eğrisine sahip pompalar seçilmelidir.
- Derin kuyulardan su çekilmesinde, eğer debi küçük, basınç büyükse ($TDY > 60$ m) dalgıç tip, büyük debi ve küçük TDY ($TDY < 60$ m) koşullarında ise, milli tip derin kuyu pompaları öncelikle değerlendirilmelidir.
- Debi değişken değilse teknolojik mecburiyet olmadıkça, en iyi çözüm, en iyi verim bölgesinde çalışan, sabit devirli pompalardır. Değişken devirli (frekans kontrollü) pompalar, debinin az olması istendiği sürece, TDY de azalma meydana geldiği için sistem veriminde iyileşme sağlar.
- Pompa seçiminde, son zamanlarda “ömür boyu maliyet” diye ifade edilen unsurlar da dikkate alınmalıdır. Bunlar, yatırım, montaj ve işletmeye alma, enerji, işletme, bakım ve onarım, arıza süresindeki ürün kaybı, çevresel, ömrü biten pompanın söküm ve atım maliyetleri olarak sayılabilir.
- Pompalar motorla tahrik edildiği zaman, bunlar tahrik eden motora genellikle esnek bir kaplinle birleştirilir. Bu uygulamalarda, millerle kaplinler arasındaki eksenleme ayarı, pompanın düzgün bir şekilde çalışması için son derece önemlidir. Eksende kaçıklık, aşırı derecede pompa ve motor rulman yatağı aşınmasına sebep olur. Bu aşınma motor pompa ünitesinin çalışma ömrünü fazlasıyla azaltır.

3.3. Pompa Performans Parametreleri

Debi, toplam dinamik yükseklik, pompa mil gücü, verim, emmedeki net pozitif yük ve pompanın özgül hızı, bir pompanın performansını tanımlayan parametrelerdir.

3.3.1. Debi

Pompanın debisi, birim zamanda pompalanan kütleli veya hacimsel su miktarıdır. Büyüklüğü, pompanın geometrisi ve devir sayısına bağlıdır. Metrik sistemde, m³/s, m³/h, l/s, l/min, birimleri kullanılır. Pratikte, sulama pompaları için en fazla l /s ve m³/h, hidrolik pompaları için ise l/min birimleri tercih edilmektedir. Bunun nedeni, rakamsal büyüklüğünün daha basit ve kolay ifade edilebilmesidir.

Bir pompalama tesisinin debisi ise, pompanın temin etmesi istenen su miktarını belirtir ve sulanacak alan, bitki cinsi, tesisin kurulacağı yerdeki toprak ve iklim özellikleri, sulama yönteminin tipine, verimine ve sulama süresine bağlıdır. Sistem debisi, kabaca Denklem (3.7.) yardımıyla belirlenebilir.

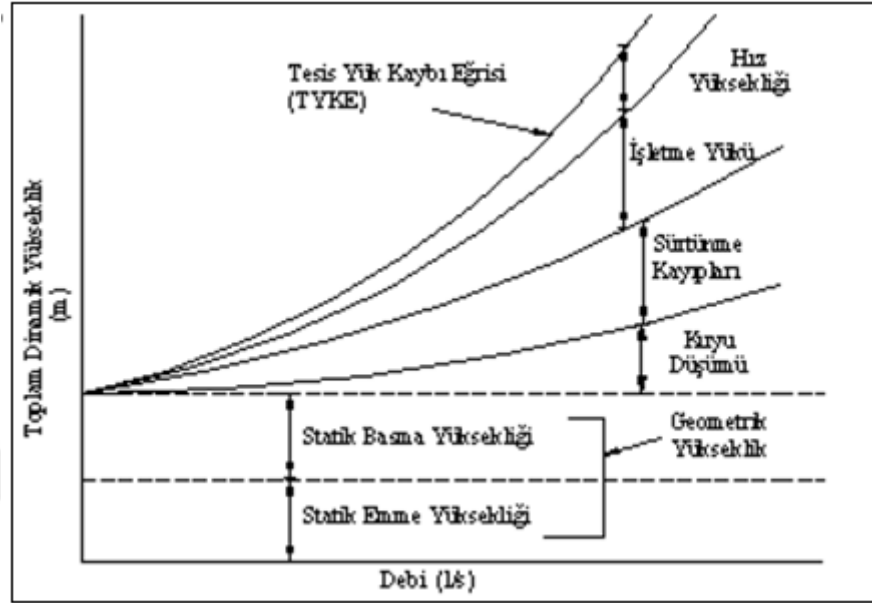
$$Q \text{ (l/s)} = A \text{ (ha)} \cdot q \text{ (l /s ha)} \quad (3.7)$$

Burada, A sulanması istenen alanı, q ise bitki cinsi, toprak ve iklim etkenleri ile sulama yöntemine ait etkenleri içeren, teorik yada uygulamalı olarak belirlenebilen, sulama modülü olarak tanımlanan bir terim olup, değeri değişik Tarımsal Araştırma Enstitüleri tarafından yayınlanan “Bitki Su Tüketim Rehberi”nden alınabilmekte veya toprak-bitki-su ilişkilerini açıklayan temel literatürden hesaplanmaktadır. Orta Anadolu koşulları için kurulacak pompaj tesislerinde sulama modülü 0,5 – 0,75 l /s ha alınmaktadır. Bitki su tüketimi düşük, etkinliği yüksek sulama yöntemi, fazla doğal yağış alan yöreler ve su tutma kapasitesi yüksek olan toprak koşulları için sulama modülünün küçük değerleri, tersi durumda ise daha büyük değerleri alınabilir. Gerek yer altı gerekse yer üstü su kaynağı, belirlenen bu sistem debisini karşılayıp karşılamadığı kontrol edilmelidir. Eğer su kaynağı bu debiyi karşılamıyorsa, su kaynağını artırmak (örneğin; ikinci bir derin kuyu açmak), alanı azaltmak veya bitki desenine müdahale etmek gibi seçenekler değerlendirilmelidir.

3.3.2. Toplam dinamik yükseklik

Toplam dinamik yükseklik (TDY), pompa çarkı vasıtasıyla, suyun birim ağırlığının yaptığı iştir. Pompanın giriş ve çıkışı arasındaki suyun taşıdığı enerjideki artış, toplam dinamik yükseklikle belirtilir.

Pompa, verilen bir sulama sisteminde istenilen toplam dinamik yükseklikte istenilen debiyi sağlamalıdır. Belirli bir sistemden, geçen değişik debilerdeki, toplam dinamik yükseklik bileşenlerinin değişimi Şekil 3.1' de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Toplam tesis yük kaybı eğrisi ve bileşenleri

Geometrisi belirlenmiş bir sistemde, toplam dinamik yükseklik (TDY) aşağıda Denklem (3.8)'de belirtilen bileşenlerden oluşmaktadır.

$$TDY = H_g + H_d + H_p + H_f + H_v \quad (3.8)$$

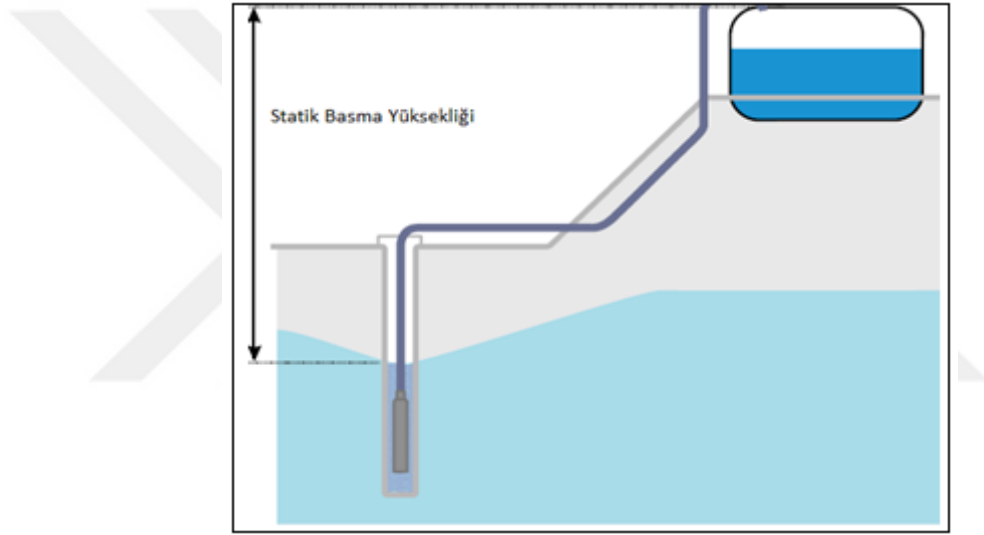
Bunlar, H_g geometrik yükseklik, H_d derin kuyu yada su kaynağında debiyeye bağlı meydana gelen düşüm, H_p sistemin çıkışında istenen basınç veya işletme basıncı, H_f sistemde kullanılan düz boru ve armatürlerde meydana gelen toplam sürtünme kayıpları ve H_v pompalanan suyun hız enerjisidir.

3.3.2.1. Sistemin geometrik yüksekliği

Sistem geometrik yüksekliği (H_g), su kaynağı yüzeyi ile suyun iletileceği en üst nokta arasındaki düşey seviye (kot farkı) olup, statik emme yüksekliği ile statik basma yüksekliğinin toplamından oluşur. Sistem debisinden bağımsızdır ve tüm debi değerleri için sabittir. Bununla beraber, yıldan yıla, mevsimsel kullanıma ve su kaynağının özelliklerine bağlı olarak değişmesi söz konusu olabilir.

Statik emme yüksekliği (h_{se}) : Kaynaktan su çekilmez iken, su kaynağı ile pompa mili eksenini arasındaki kot farkı statik emme yüksekliği olarak tanımlanmaktadır. Eğer su kaynağı, pompa ekseninden aşağıda ise statik emme yüksekliği pozitif; pompa eksenini, su kaynağı düzleminden daha aşağıda ise o zaman statik emme yüksekliği negatif değer almaktadır.

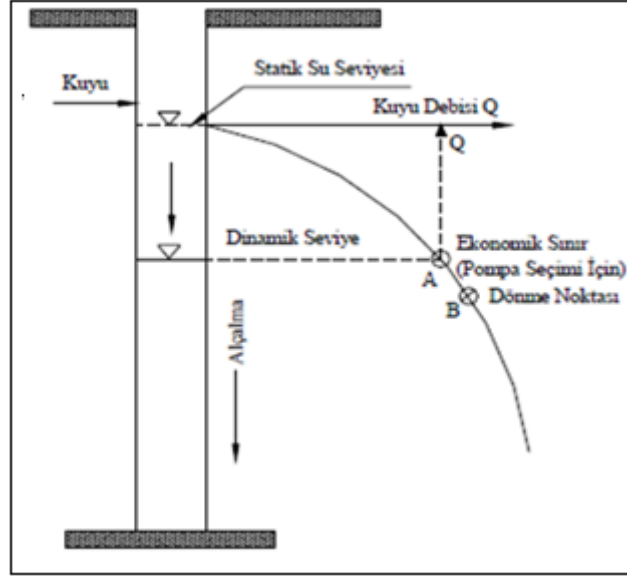
Statik basma yüksekliği (h_{sb}) : Yine kaynaktan su çekilmez iken, pompa mili eksenini ile suyun iletildiği kullanım yerinin en üst noktası arasındaki kot farkı, statik basma yüksekliği olarak tanımlanmaktadır (şekil 3.2). Eğer pompa emdiği suyu aynı düzleme boşaltırrsa o zaman statik basma yüksekliği sıfır olur.



şekil 3.2. Statik basma yüksekliği

3.3.2.2. Düşüm

Kuyu gibi yer altı su kaynaklarında, statik seviye, kuyudan su pompajı yapılmazken kuyunun su yüzeyini ile yer yüzeyi arasındaki düşey uzaklıktır. Düşüm kuyudan su çekimi ile başlar, artan debiye göre parabolik bir yükseliş göstermektedir. Düşümün değeri, pompaj debisine, akifer özelliklerine, kuyu boyutuna, kuyunun donanım metoduna ve pompaj süresine bağlı olarak değişir (şekil 3.3). Kuyudan çekilen su miktarı artırıldıkça, düşüm de orantılı olarak artar. Fakat, belli bir debi değerinden sonra, bu düşüm daha da büyük artış gösterir.



Şekil 3.3. Bir derin kuyuda seviyeler ile debi-düşüm ilişkisi

3.3.2.3. İşletme yüksekliği veya çıkış basıncı

Bazı sulama sistemleri, kullanım noktalarında ilave basınç isterler. Bu basıncın değeri sistemin özelliğine göre değişir. Yüksek basınçlı merkezi tek tabancalı yağmurlayıcılar 7 bar, taşınabilir yağmurlama sulama sistemleri 2,5-3,5 bar'a kadar işletme basıncına gereksinim duyarken, damla sulama sistemleri daha düşük, örneğin 0,5-2 bar şiddetinde işletme basıncına gereksinim duymaktadır. Bununla birlikte yüzey sulama sistemleri için işletme basıncı değeri sıfır olabilmektedir. Pratikte, taşınabilir yağmurlama sulama sistemleri için işletme yada çıkış basıncı değeri 3 bar veya eşdeğeri olan 30 mSS olarak alınmakta ve toplam dinamik yüksekliğe eklenmektedir.

3.3.2.4. Sürtünme kayıpları

Bir borudan su akarken sürtünmeden dolayı yükseklik ya da basınç kaybı olur. Sistemin akışı yapabilmesi için üstesinden gelmesi gereken kayıplara (yüksekliğe) sürtünme kayıpları (yüksekliği) denir. Bu da borunun boyutu, tipi, akış oranı ve sıvının yapısına bağlıdır [24]. Bu kayıpların değeri hidrolik formüller veya boru imalatçıların hazırladığı tablolar ve eğrilerden elde edilebilir. Pompa, suya sürtünme kayıplarını karşılamak için de enerji aktarmaktadır. Pratikte, bu sürtünme kayıplarını tamamen ortadan kaldırmak mümkün değildir. Mühendislik uygulamaları

bu kayıpları en aza indirmek için yapılmaktadır. Belli çaptaki bir borudan geçen debiyi artırdıkça, su hızı da artar. Ancak, sürtünme kaybı, artan su hızının karesi ile artmaktadır. Bundan dolayı, uygulamada belli çaplardan belirli debilerin iletilmesine izin verilir.

3.3.2.5. Hız yüksekliği

Hız yüksekliği, suyun kinetik enerjisi olup, şu eşitlikle belirlenir.

$$H_v = v^2 / 2.g \quad (3.9)$$

Pompalama tesislerinde hız yüksekliği genellikle 0,3 m den daha küçüktür. Çünkü, hız yüksekliği su hızının karesiyle artmaktadır, ancak sürtünme kayıpları da su hızının karesiyle arttığı için, pratikte bir fayda sağlamamaktadır. Su hızının artışı ayrıca, su darbelerinin oluşumuna da neden olabileceğinden, hız daha önce de ifade edildiği gibi genellikle $2\pm 0,5$ m/s aralığında olması arzu edilmektedir.

4.3.3. Pompa hidrolik ve mekanik gücü

Pompalarda mil gücü (P_{mek}), pompalanan suyun debisi, toplam dinamik yükseklik ve pompa veriminin bir fonksiyonudur. Pompanın verdiği güç, su gücü yada hidrolik gücün (P_h) belirlenebilmesi için, pompalanan suyun debisi ve toplam dinamik yüksekliği bilinmelidir.

Hidrolik güç (P_h), Denklem (3.10) ile hesaplanmaktadır;

$$P_h (W) = Q(m^3 /s).TDY(m).p(10^3kg/m^3).g(m/s^2) \quad (3.10)$$

Herhangi bir mekanik sistemde hesaba katılması gereken, önlenemeyen kayıplar her zaman vardır. Bunun sonucunda belirlenen hidrolik gücü sağlamak için, her zaman daha fazla miktarda gücün, pompa miline aktarılması gerekmektedir. Pompa miline aktarılması gereken güç yani mekanik güç (P_{mek}), hidrolik güç (P_h) ve pompa verimi (η_p) belirler ve aşağıdaki Denklem (3.11) ile hesaplanır.

$$P_{mek} (W) = P_h (W) / \eta_p (\%) \quad (3.11)$$

3.3.4. Pompa verimi

Pompa verimi (η_p), pompa miline verilen gücün, suya aktarılan kısmının yüzdesini ifade eder. Başka deyişle, hidrolik gücün mekanik güce oranı ile belirlenir.

$$\eta_p (\%) = P_h / P_{mek} \quad (3.12)$$

Kayıplar, pratikte tümüyle ortadan kaldırılamadığından dolayı pompa verimi her zaman %100 den küçüktür. Pompalarda kayıplar genelde, hidrolik, mekanik ve hacimsel kaynaklı olmaktadır. Teknoloji ve mühendislik çalışmaları bu kayıpları en aza indirme gayreti içinde bulunmaktadır. Pompa verimi, esas olarak pompa büyüklüğü, tipi, tasarımı ve yapımında kullanılan malzeme özelliklerine bağlı olarak değişebilmektedir. Büyük debili pompaların verimi genellikle daha yüksek olmaktadır. Pompa verimi, pompa deney düzeneklerinde, belirli bir çalışma hızındaki, debi, basınç ve yükseklikler ölçülerek hidrolik güç hesaplanır. Mekanik güç ise, elektriksel veya mekanik güç ölçme yöntemleri ile belirlenir. En sağlıklı mekanik güç ölçme yöntemi ise, torkmetre yöntemidir.

3.3.5. Emmedeki net pozitif yükü

Emmedeki net pozitif yük (ENPY) terimi, pompaların emme koşullarının incelenmesinde kullanılır. Kavitasyonu önlemek için, emme hattındaki herhangi bir noktada mutlak basınç değeri, suyun sıcaklığına bağlı buhar basıncı değerinin altına düşmemelidir. Mevcut ENPY'yi artırmak için debinin azaltılması gerekebilir. Pompanın emme hattında suyu pompa çarkına taşıyan toplam yararlanabilir enerji olarak tanımlanabilen ENPY, mutlak basınç olarak belirtilen genel emme yüksekliği ile buhar basıncının farkıdır. Pompa emme ağzında buharlaşma olmaması için gerekli minimum emme yüksekliğidir. Mevcut ENPY daima gerekli ENPY'den fazla olmalıdır. Aksi takdirde pompa emme ağzında sıvı buharlaşır ve pompa çalışmaz [23]. ENPY, yabancı literatürde, NPSH harfleri ile simgelenmiş olup, açılımı " Net Positive Suction Head" dir. Su yüksekliği cinsinden ifade edilmekte ve metre (m) birimi ile kullanılmaktadır.

Kavitasyon ise sıvı içinde önce buhar taneciklerinin oluşması ve sonra aniden yoğunlaşması olayıdır. Kanatlarda aşınma ve mekanik problemlere neden olur. Kavitasyonun sebebi mevcut ENPY'nin yeterli olmamasıdır [22].

3.3.6. Pompa tipi ve özgül hız

Özgül hız (n_q veya n_s), pompanın bir kademesinin maksimum verim noktasındaki, debi (Q), toplam dinamik yükseklik (TDY) ve pompa devir sayısının (n) bir fonksiyonu olup pompanın tipini belirleyen indeks sayısıdır.

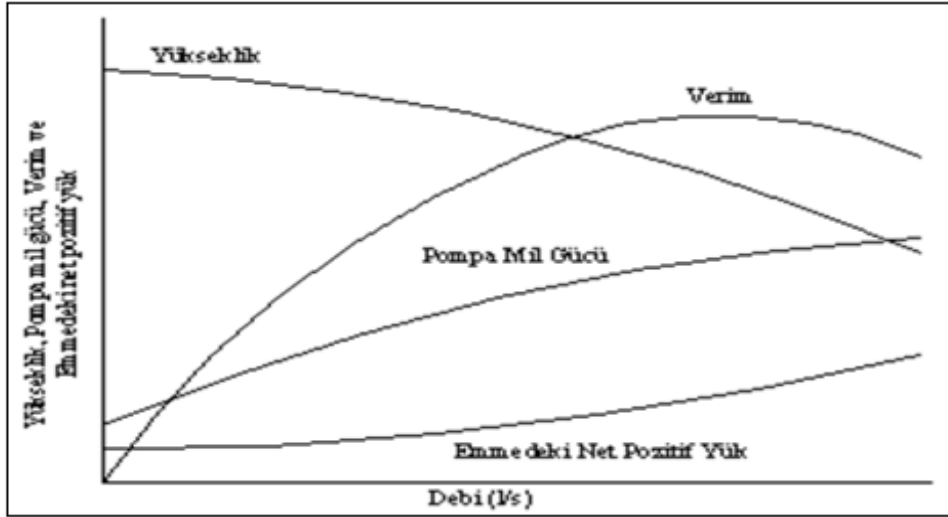
$$n_q = n \cdot Q^{1/2} \cdot (TDY)^{-3/4} \quad (3.13)$$

$$n_s = 3,65 \cdot n_q \quad (3.14)$$

Tanım olarak bir santrifüj pompanın özgül hızı, bu pompaya hidrolik ve geometrik olarak benzeyen ve optimum çalışma durumunda $1 \text{ m}^3/\text{s}$ debiyi 1 m su sütunu (mSS) toplam dinamik yüksekliğe ileten model pompanın dakikada devir sayısıdır.

3.4. Pompalarda Karakteristik Eğriler

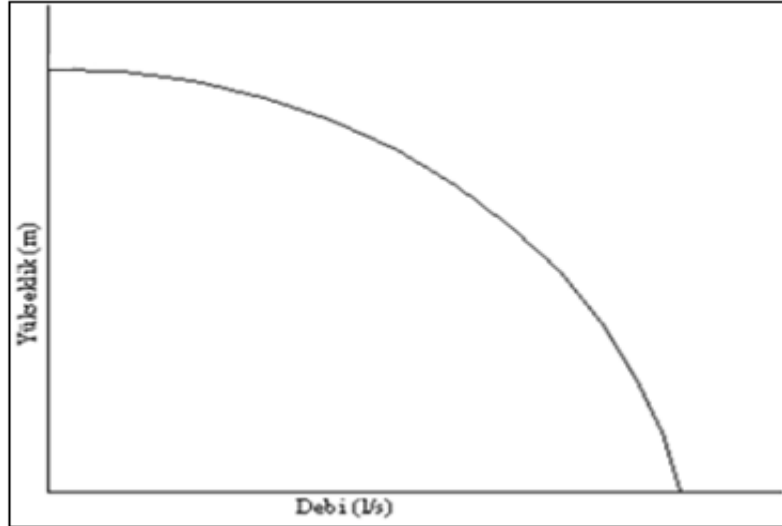
Pompaların işletme özelliklerini tanımlamak için kullanılan, pompanın karakteristik eğrileri olarak dört çeşit eğri bilinir. Bunlar, belli bir çalışma hızı ve pompa modeli için, pompa debisinin fonksiyonu olarak, toplam dinamik yükseklik, verim, güç ve yük ilişkileridir (Şekil 3.4). Pompa imalatçıları, yaptıkları her bir pompa için normal olarak pompa karakteristiklerini katalog halinde yayınladılar. Bir pompanın işletme performansı, pompa çark ve gövdesinin geometrisi ile çalışma hızına bağlıdır.



Şekil 3.4. Pompanın karakteristik eğrileri

3.4.1. Pompalarda debi-yükseklik değişimi

Şekil 3.5'te bir pompa için tipik bir yükseklik ile debi arasındaki değişim gösterilmiştir. Bu eğri, pompa tarafından birim zamanda pompalanan su miktarı ile geliştirebildiği yükseklik arasındaki ilişkiyi açıklamaktadır. Genellikle pompalanan debi arttıkça, üretilen yükseklik azalır ve en büyük yükseklik, sıfır debi değerinde görülür.



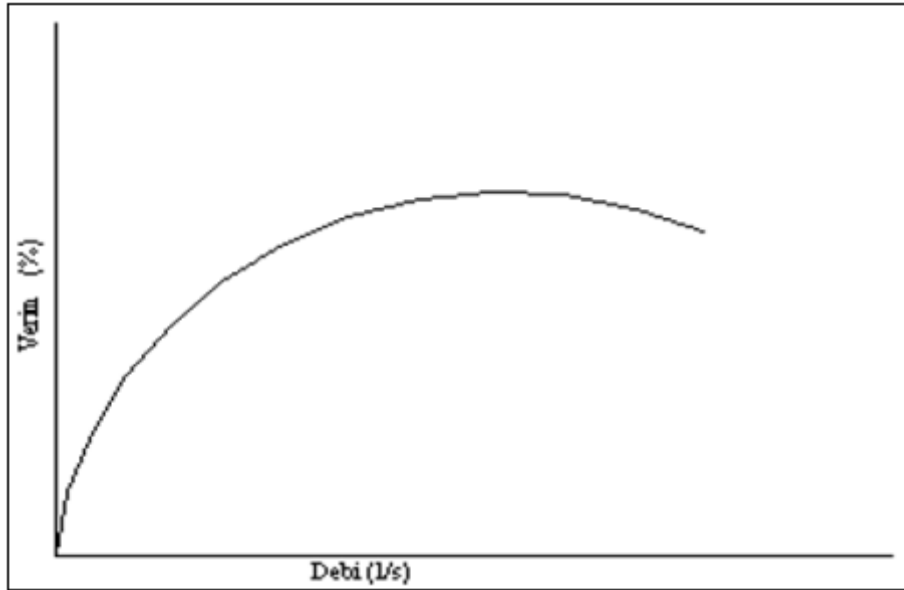
Şekil 3.5. Pompanın yükseklik-debi karakteristik eğrisi

3.4.2. Pompa veriminin debiye bağıllığı

Pompalardaki verim ile debi arasındaki ilişki Şekil 3.6'da verilmektedir. Bir pompanın verimi orijin noktasından başlar, artan debi ile maksimum bir noktaya kadar yükselir, daha sonra debinin artmasına karşılık bir azalma gösterir. Verim, pompa tipi, imalatçı ve modeller arasında önemli değişiklikler gösterir.

Verim, ortaya çıkan işin, girdi işe oranlanması ile belirlenir. Başka deyişle, pompanın çıktısı olan hidrolik enerji yada gücün, pompa miline verilen mekanik enerji ya da güce oranıdır.

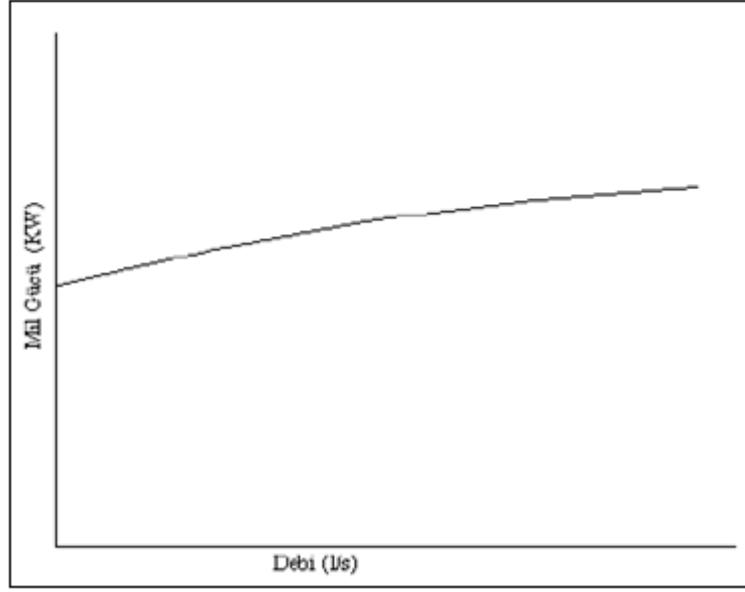
Verim, birimsiz olup genellikle % olarak ifade edilir. Verim düzeyi, pompa seçiminde dikkate alınması gereken en önemli kriterlerden biridir.



Şekil 3.6. Pompanın verim-debi karakteristik eğrisi

3.4.3. Pompanın mekanik gücünün debiye bağıllığı

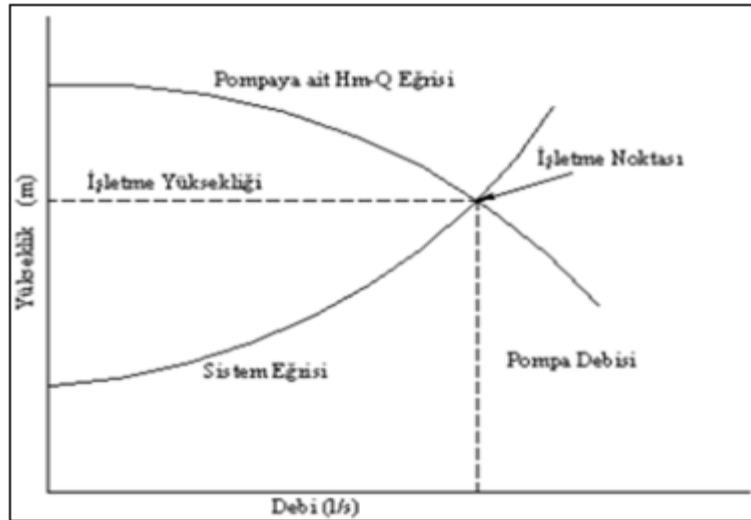
Pompanın mekanik gücü; debi, TDY, verim ve iletilen akışkanın özgül kütlelerinin bir fonksiyonudur. Pompalar için en yaygın mekanik güç-debi eğrisinin biçimi Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Pompanın mekanik güç-debi eğrisi

3.4.4. Pompa işletme noktası

Bir pompa, sabit devir sayısındaki TDY-Q eğrisinin tüm noktalarında çalıştırılabilir. Bu eğri üzerindeki her noktaya karşılık gelen bir debi ve TDY değeri vardır. Aynı ölçekle çizilerek karşılaştırılan, TYKE ile pompanın TDY-Q eğrilerinin kesişim noktası, pompanın işletme noktası olarak adlandırılır (Şekil 3.8). Bir başka ifade ile işletme noktasında, sistemin gereksinim duyduğu TDY ve Q ile pompanın ürettiği TDY ve Q değerleri dengededir ve aynı koordinatları göstermektedir. İşletme noktasındaki debi, sistem tarafından istenen debiyi sağlamalıdır.



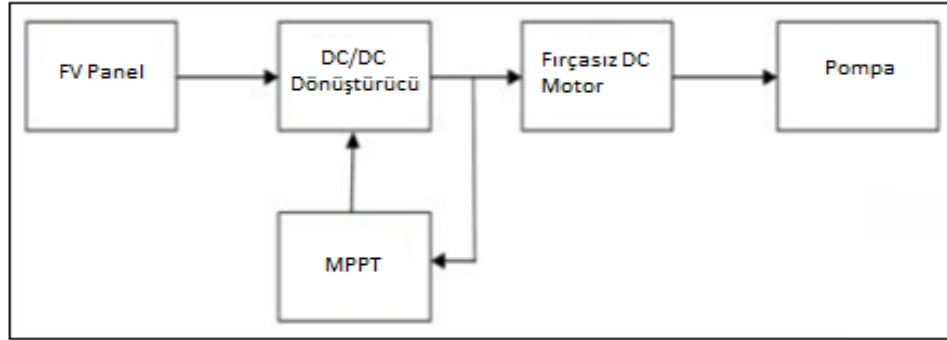
Şekil 3.8. Pompa için işletme noktasının belirlenmesi

Tesis yük kaybı ve pompa TDY-Q eğrilerinden herhangi birisi değişirse işletme noktası da değişebilir. TYKE, sulama yönteminin değişmesi, pompa çıkışındaki vana ile debinin değiştirilmesi, boru hattının çap, cins ve uzunluğunun değişmesi, armatür eklenmesi, boruların eskimesi, su seviyesindeki değişimler gibi nedenlerden dolayı eğrinin şekli değişir.



4. SİSTEM TASARIMI VE ANALİZİ

Fotovoltaik su pompalama sisteminin blok diyagramı Şekil 4.1'de verilmektedir. Sistem FV panellerden, güç dönüştürücüsünden, MPPT, motor, motor sürücüsü ve pompadan meydana gelmektedir. FV panellerin çıkışındaki gerilim, ışınım ve sıcaklık gibi faktörlerden etkilenecek şekilde değişkenlik gösterebilir. DC/DC dönüştürücü bu olumsuzluğu çıkış gerilimini istenen değerlerde tutarak gidermeye çalışır. Bu amaçla sistemin maksimum verimde çalışabilmesi için maksimum güç noktasını izlemek üzere özel elektronik devre ve algoritmalar kullanılmaktadır. Sistem, güneş ışınımının bulunduğu sürelerde suyu pompalar veya üretilen enerji daha sonra kullanılmak üzere depolar. Güneş ışınımının olmadığı sürelerde kullanılmak üzere bataryalarda güç depolanabilir. Batarya dolmama sistemi kullanılması durumunda, sistemin kontrolü için elektronik kontrol üniteleri gereklidir. Bataryalar, bulutlu günlerde güneş ışınım şiddetinin düşük olması durumunda, sistemin çalışmasına olanak sağlarlar.

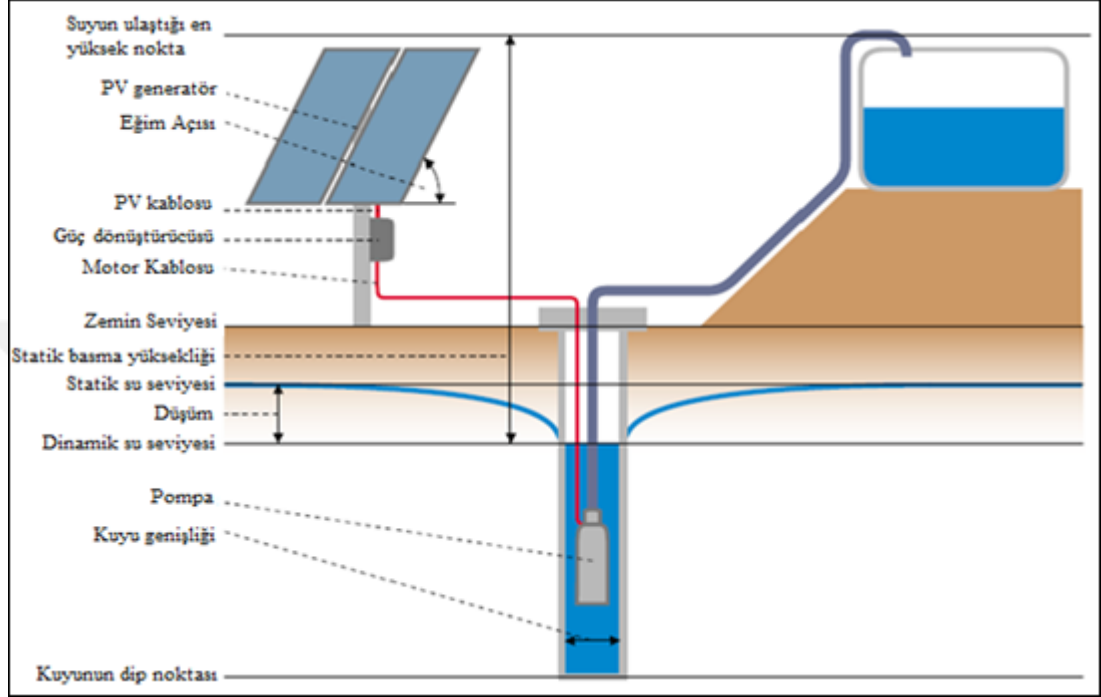


Şekil 4.1. FV su pompalama sistemi blok şeması

Elektrik motoru, güç gereksinimi ve akım tipine bağlı olarak seçilmelidir. Alternatif akım (AC) ile çalışan motor kullanılması durumunda, sisteme DC/AC dönüştürücü yerleştirilmesi gerekir.

Fotovoltaik sistemlerin maliyetlerinin yüksek olması, bu sistemlerin olabildiğince doğru bir şekilde boyutlandırılmasını gerektirmektedir.

Bu sistemlerin tasarımında; suyun pompalanacağı toplam yükseklik, gereksinim duyulan günlük su ve bölgedeki ortalama güneş enerjisi miktarlarının önceden hesaplanması veya tahmin edilmesi gerekir. Şekil 4.2'de FV sistem şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.2. FV su pompalama sisteminin şematik gösterimi

Uygulamada su kaynağı olarak kuyu, depo, nehir, kanal v.b. olmasına göre kullanılacak pompa tipi değişecektir. Yüzeysel uygulamalarda santrifüj pompalar kullanılırken, kuyu suyu temini için dalgıç pompalar tercih edilir. Simülasyonunu gerçekleştireceğimiz uygulama için kuyudan su temini düşünülerek dalgıç tipi pompa seçilmiştir. Dalgıç pompalar suyun içinde çalışan ve dikey olarak yerleştirilen pompalardır. Seçilen dalgıç pompalar fırçasız DC elektrik motoru tahriklidir.

Fotovoltaik sulama sistemi tasarlanırken aşağıdaki maddeler göz önünde bulundurulmalıdır:

- Kurulumun yapılacağı yerdeki güneş enerjisi miktarı (güneş ışınımı ve güneşlenme süreleri)
- Gereken su miktarı,
- Sistemdeki toplam dinamik yükseklik,
- Pompalanan suyun kalitesi,

- Su kaynağı (kuyu, akarsu, su kanalı, baraj ya da tank)
- Kullanılacak FV teknolojisi (Mono/Polikristal, ince film)
- Panellerin kurulacağı yer (çatı, bahçe, arazi vb.) ve montaj tipi.

Uygulamanın yapıldığı arazi şartlarına, sulamanın yapılacağı ürüne göre sulama miktarı ve ihtiyaç duyulan su miktarı değişmektedir. Su miktarının değişmesi tasarımı etkilemektedir. Ayrıca pompayla temin edilen suyun bir tankta depolanması avantaj sağlayacaktır. Böylece güneşlenmenin olmadığı zamanlarda da su kullanılabilir ve seçilen boru çapı da önemlidir. Geniş çapta boru seçmek dinamik basma yüksekliğini düşüreceğinden toplam güç tüketimini azalatacaktır.

4.1. Günlük Su Gereksiniminin Belirlenmesi

Sistem tasarımını gerçekleştirebilmek için öncelikli gereken bilgi günlük pompalanacak su miktarıdır. Bu pompanın gün içerisinde sağladığı toplam su miktarıdır. Su pompaları için debi m^3/s , $m^3/saat$, l/s gibi birimlerle ifade edilirken, fotovoltaik sistem güneş ışığına bağlı olarak çalıştığından sistem tasarımında ihtiyaç duyulan su miktarı gün bazında ele alınır.

Tasarlanan sistem su ihtiyacı kuyudan karşılanan, tarım arazilerinin sulamasına yönelik bir sistem olarak düşünülse de farklı uygulamalar (içme ve kullanım suyu temini, endüstriyel uygulamalar, park ve bahçe sulaması v.b.) için de kullanılması mümkündür. Sulamaya yönelik uygulamalarda yetiştirilen ürün tipine bağlı olarak su ihtiyacı, sulama süresi ve sulama yöntemleri değişiklik gösterebilir. Bütün bu faktörler uygulama yapılan yere göre değişerek, toplam su ihtiyacını da değiştirmektedir. Bu nedenle çalışmanın bu aşamasında örnek bir uygulamadan yola çıkarak, 6 hektarlık bir alanın sulanması için sistemin toplam su ihtiyacının $120 m^3/gün$ olarak kabul edilmektedir.

4.2. Toplam Dinamik Yükseklik

Suyun en alçak noktası ile ulaştığı en yüksek nokta arasındaki uzaklık statik yükseklik olarak adlandırılır. Statik yükseklik ve sürtünme kayıplarının toplamı bize toplam dinamik yüksekliği verir. Denklem (3.8)'de yerine konularak hesaplanır.

Bunlar, H_g geometrik yükseklik, H_d derin kuyu yada su kaynağında debiye bağlı meydana gelen seviye düşümü, H_p sistemin çıkışında istenen basınç veya işletme basıncı, H_f sistemde kullanılan düz boru ve armatürlerde meydana gelen toplam sürtünme kayıpları ve H_v pompalanan suyun hız enerjisidir. Geometrik yükseklik H_g , dışındaki yükseklik ve kayıplar mevcut uygulama için ihmal edilebilir ölçektedir. Buna bağlı olarak tüm kayıplarda dahil olmak üzere sistem için öngörülen TDY, 40 m olarak düşünülmektedir.

4.3. Pompanın Gücü

Pompalanacak su miktarı, beraberinde sulama süresine bağlı olarak debinin ve TDY' nin bilinmesiyle pompa sistemi için gerekli güç Denklem (3.10) ve Denklem (3.11) ile hesaplanabilir. Seçilen pompanın katalogunda yazan verimi %55, pompa motorunun verimi ise %92'dir. Gün içinde sulama yapılan süre, 8-10 saat olduğu bununla birlikte gün ışığına bağlı olarak üretilen güç ve pompalanan su debisi değişeceğinden, pompanın ortalama $15 \text{ m}^3/\text{saat}$ 'lik bir debiye sahip olması durumunda toplam su ihtiyacını karşılayabileceği öngörülmüştür.

$$15 \text{ m}^3/\text{saat} = 0,00416 \text{ m}^3/\text{s} \text{ 'dir.}$$

$$P_h = 0,00416 \text{ (m}^3/\text{s)}. 40 \text{ (m)}. 10^3 \text{ (kg/m}^3). 9,8 \text{ (m/s}^2) = 1,63 \text{ kW}$$

$$P_{\text{mek}} \text{ (kW)} = 1,63 / 0,55 = 2,96 \text{ kW}$$

Mekanik gücün motor verimine bölünmesiyle, elektriksel giriş güç aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$P_{\text{elk}} = 2,96 / 0,92 = 3,21 \text{ kW}$$

Güç dönüştürücüsünün veriminin de % 90 olduğu kabul edilerek FV panellerden çekilecek olan güç değeri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$P_{\text{FV}} = 3,21 \text{ kW} / 0,9 = 3,57 \text{ kW}$$

4.4. FV Panellerin Boyutlandırılması

Eğer sistemin geceleri de çalışması düşünülüyorsa batarya grubuna ihtiyaç vardır. Fakat böyle bir zorunluluk yoksa enerjinin depolanması yerine gün içerisinde suyun depolanması, akülerin pahalı, ağır ve sınırlı bir kullanım ömrüne sahip olması göz önüne alındığında daha da ekonomik bir çözüm olacaktır. FV panellerin boyutlandırılması sistem yükü ve sistemdeki tüm kayıplar göz önüne alınarak yapılmalıdır.

Seçilen modül SunPower SPR-305-WHT'dir. FV panellerin sağlaması beklenen 3,57 kW 'lık gerekli gücü karşılamak için 3 dizi halinde 4 seri modül kullanılacaktır. Bu durum da toplam kurulu güç $12 \cdot 305,2 = 3,66$ kW'tır. Tablo 4.1.'de FV modül parametreleri verilmiştir.

Tablo 4.1. FV Modülün Parametreleri

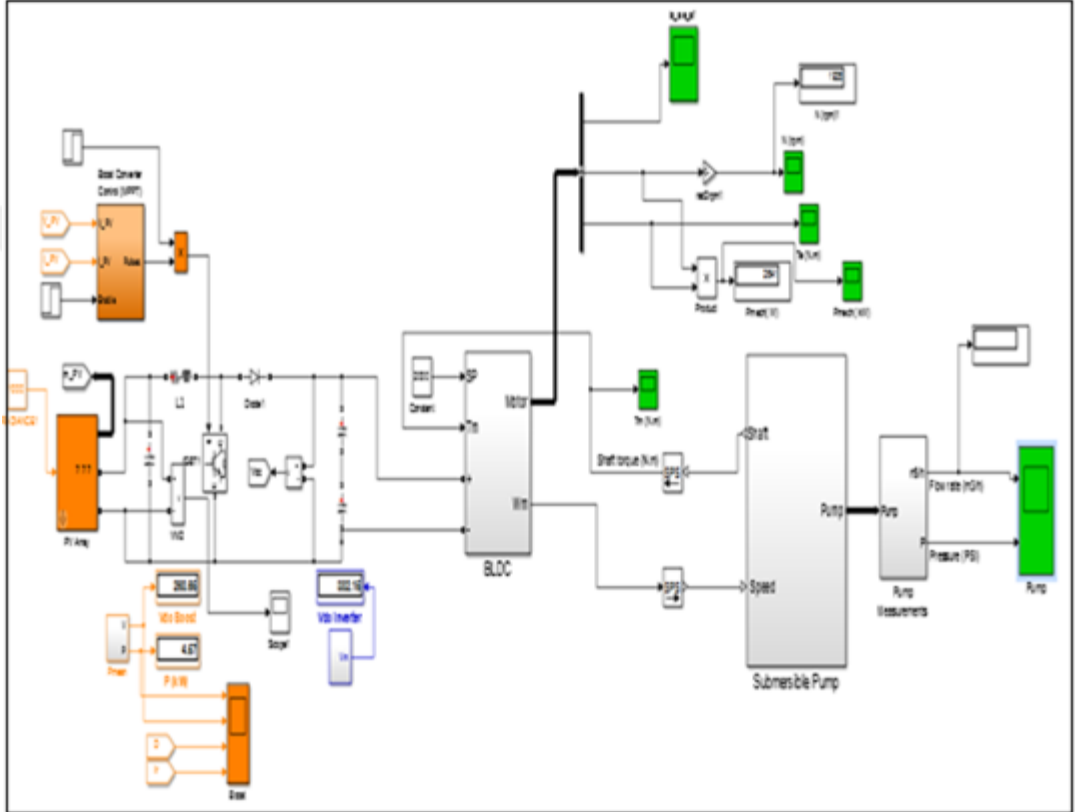
Sıra No	Parametreler	Değerler
1	Kısa devre akımı (I_{kd})	64,2 A
2	Açık devre gerilimi (V_{od})	5,96 V
3	Maksimum güç (P_{max})	305,2 W
4	Maksimum güç noktasındaki gerilim (V_{mpp})	54,7 V
5	Maksimum güç noktasındaki akım (I_{mpp})	5,58 A
6	Seri hücre sayısı (N_s)	96
7	Paralel hücre sayısı (N_p)	1

4.5. Simülasyon ve Sonuçlar

FV su pompalama sistemi simülasyonu için MATLAB SIMULINK ortamında tasarlanan model Şekil 4.3'de gösterilmiştir. Model FV panel, DC/DC dönüştürücü, MPPT kontrol bloğu, fırçasız DC motor ve pompadan oluşmaktadır.

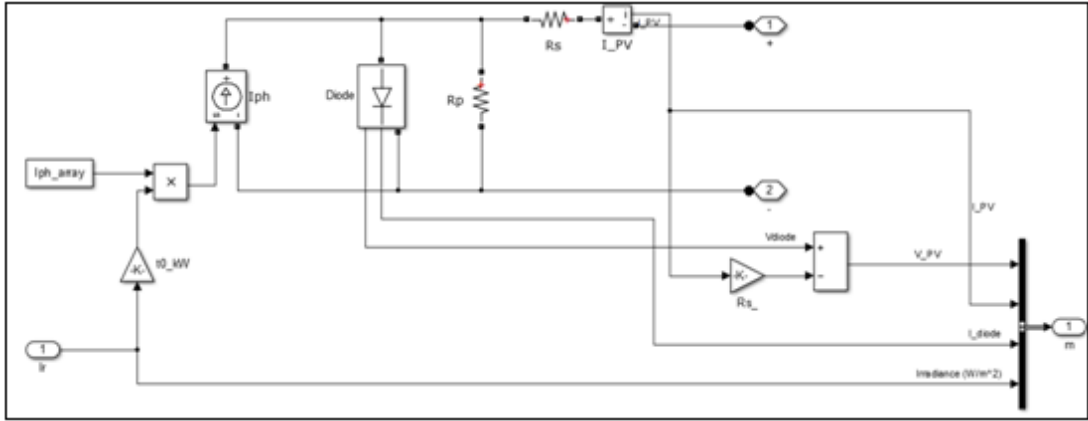
Simülasyon başlatıldığında FV panellerde üretilen elektrik enerjisi DC/DC dönüştürücü üzerinden fırçasız DC motoru beslemekte ve pompanın çalışması sağlanmaktadır. Simülasyon başlangıcından itibaren FV panellerin çıkışındaki gerilim ve akım değerleri maksimum güç noktasına ulaşıncaya kadar yükselir ve bu

noktaya ulaşıldığında gerilim ve akım değerleri MPPT kontrol bloğunun gönderdiği kapı sinyalleri ile DC/DC dönüştürücünün çıkışındaki değerler kontrol edilmiş olur. Simülasyonun başlangıcından itibaren motorun devir sayısı ve pompalanan su miktarı giderek artar. Maksimum güç noktasında çalışırken bir süre sonra motorun devir sayısı isteneneğere sabitlenir ve hedeflenen debiye ulaşılır. Pompa, bu noktada kararlı çalışmasını sürdürür.



Şekil 4.3. FV su pompalama sistemi simulink modeli

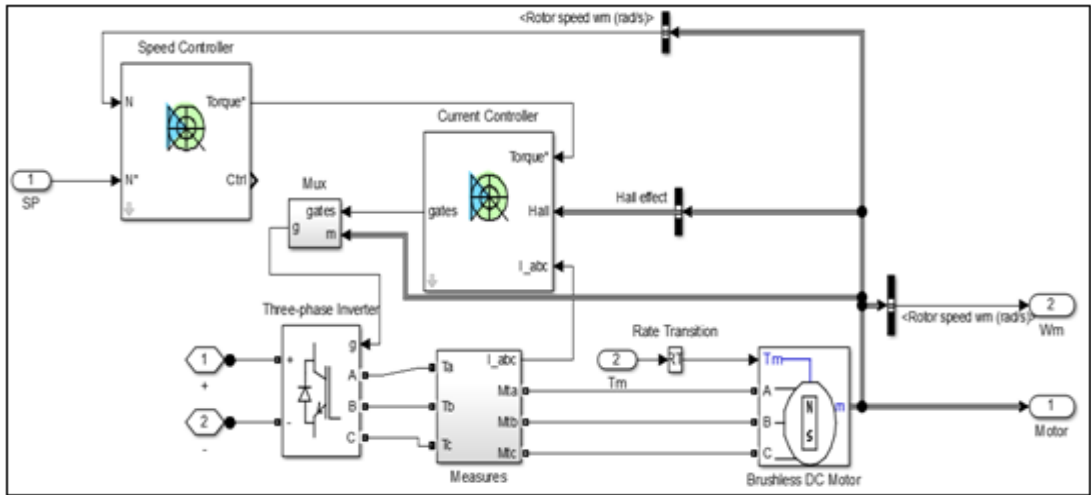
Modüler bir yapıya sahip olan FV su pompalama sisteminin her bir bileşeni, ayrı ayrı bloklar halinde modellenmiş ve bir araya getirilmiştir. Aşağıda her bir bloğun modellenmesine dair ayrıntılar açıklanmıştır. Şekil 4.4'de FV panelin simulink modeli verilmiştir.



Şekil 4.4. FV panelin simulink modeli

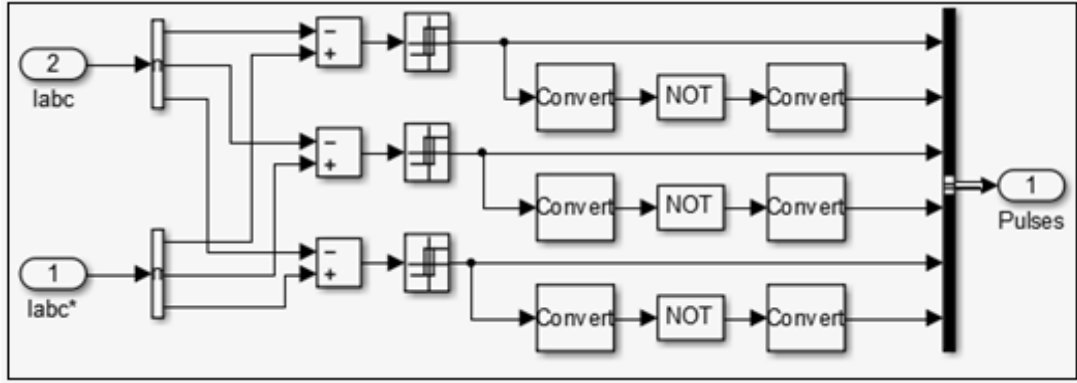
FV panelin modellenmesinde Denklem (1.6) ' dan yararlanılmıştır.

Işımanın sabit olduğu kabul edilmiş ve panelin katalog değerlerinde çalışması amacıyla 1000 W/m^2 seçilmiştir. Bunun yanı sıra sıcaklık etkisi de göz ardı edilmiş ve $25 \text{ }^\circ\text{C}$ olarak belirlenmiştir. Seçilen güneş panellerinin her bir modülünde 96 adet hücre bulunmaktadır. 4 adet seri bağlı modülün bulunduğu 3 diziden meydana gelerek $3,66 \text{ kW}$ 'lık kurulu güce sahiptir. Simülasyonda kullanılan güneş panellerinin katalog değerleri Tablo 4.1'de verilmektedir.



Şekil 4.5. Fırçasız DC motor simulink modeli

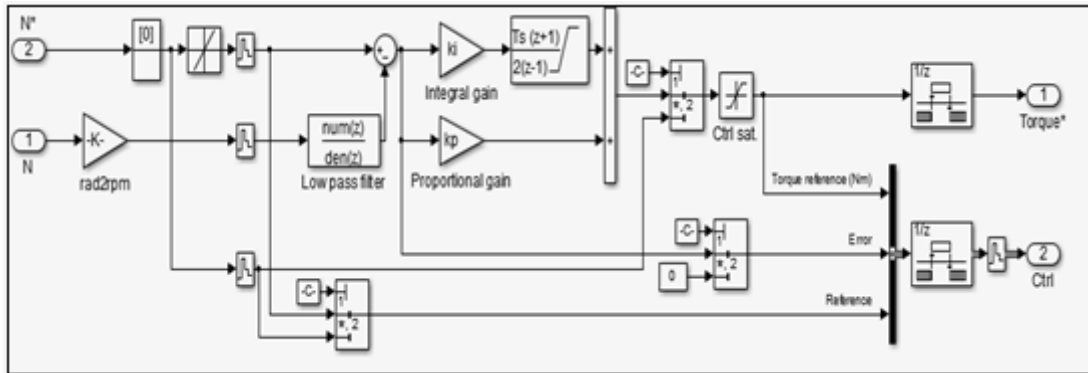
Şekil 4.5'de fırçasız DC motor için dışarıdan referans bir hız değeri ve pompanın yük momenti girilmektedir. Buna bağlı olarak geri besleme elemanından alınan bilgiyle konum bilgisi alınarak referans akımlar hesaplanmakta ve anahtarlama sinyalleri üretilmektedir. Motorun sürücü kısmı akım kontrolü ve hız kontrolü olmak üzere iki kısımdan meydana gelmektedir.



Şekil 4.6. Akım kontrolü bloğu

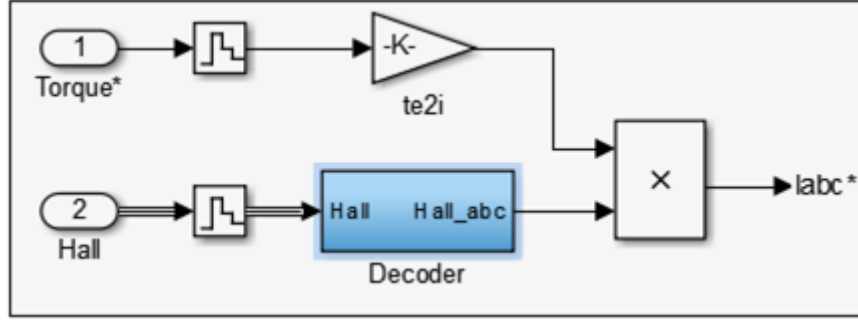
Şekil 4.6'daki akım kontrolü bloğunda referans akımlar ile faz akımları histerezis kontrol yapısı ile karşılaştırılmaktadır. Histerezis kontrolör, gerçek akım ile referans akım arasındaki farkı hesaplayarak, gerçek akımın belirli bir aralık içinde kalmasını sağlar. Fazların enerjilendirilmesi için eviriciye gönderilecek olan darbe sinyalleri üretilir.

Şekil 4.7'deki hız kontrolü bloğunda ise PI kontrolör yardımıyla, referans hız ile gerçek rotor hızı arasındaki hata hesaplanarak, hata sifıra indirilmeye çalışılmıştır. Bu da biriktirme, hafızalama ve gecikme özellikleri sayesinde yapılmaktadır. Hız kontrolöründeki çıktı referans akım bloğuna giriş olarak kullanılmaktadır.



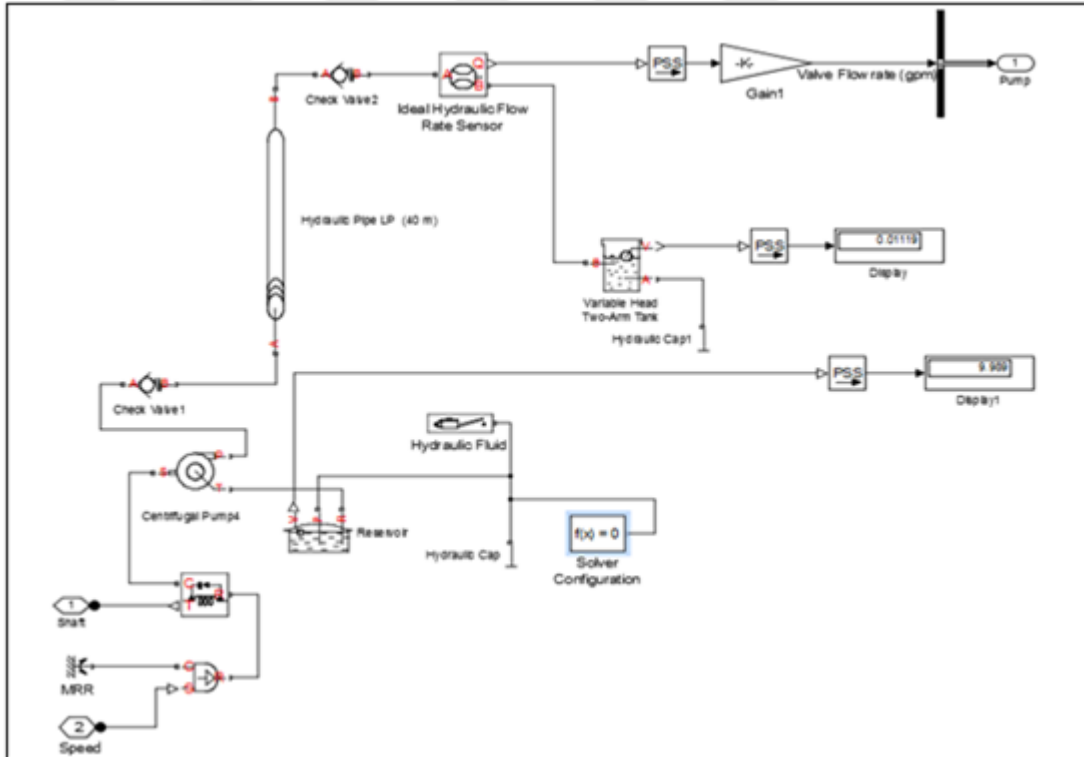
Şekil 4.7. Hız kontrol bloğu

Şekil 4.8'deki akım referans bloğu hız kontrolöründen ve Hall sensöründen gelen sinyaller ile referans akım sinyallerinin oluşturulduğu kısımdır. Hız kontrolünden gelen moment sinyali pozisyona göre değişen bir fonksiyon kullanılarak akım sinyaline dönüştürülür. Hall sensöründen gelen konum bilgisi ile referans akım karşılıkları çıktı olarak akım kontrolörüne gönderilir.



Şekil 4.8. Akım referans bloğu

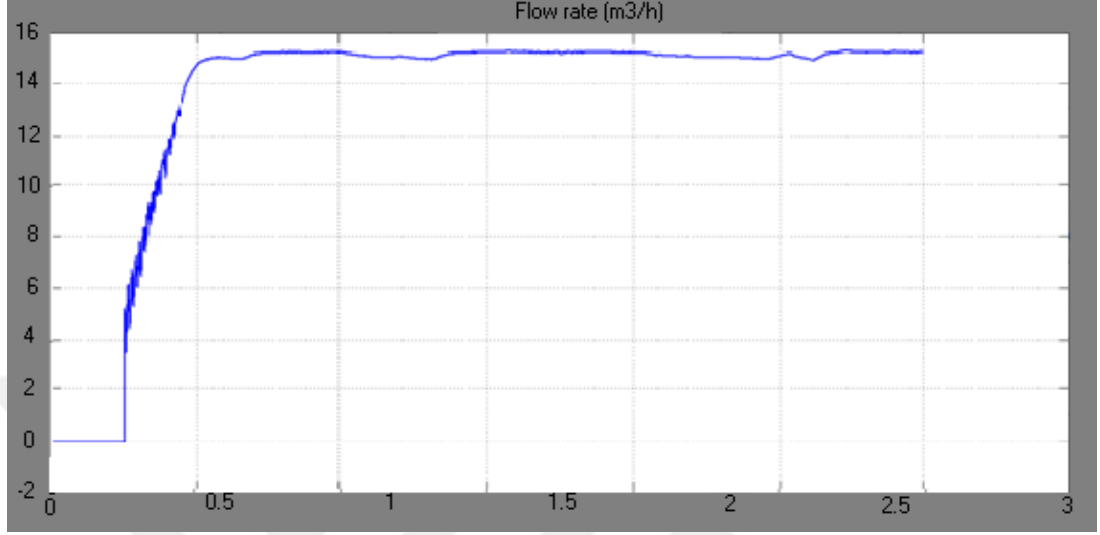
Evirici bloğu altı adet mosfet (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) kullanılarak oluşturulan üç faz tam köprü eviricidir. Akım kontrolöründen gelen PWM darbe sinyalleri ile ilgili mosfetler anahtarlanarak fırçasız DC motoru besleyen sinyaller üretilir.



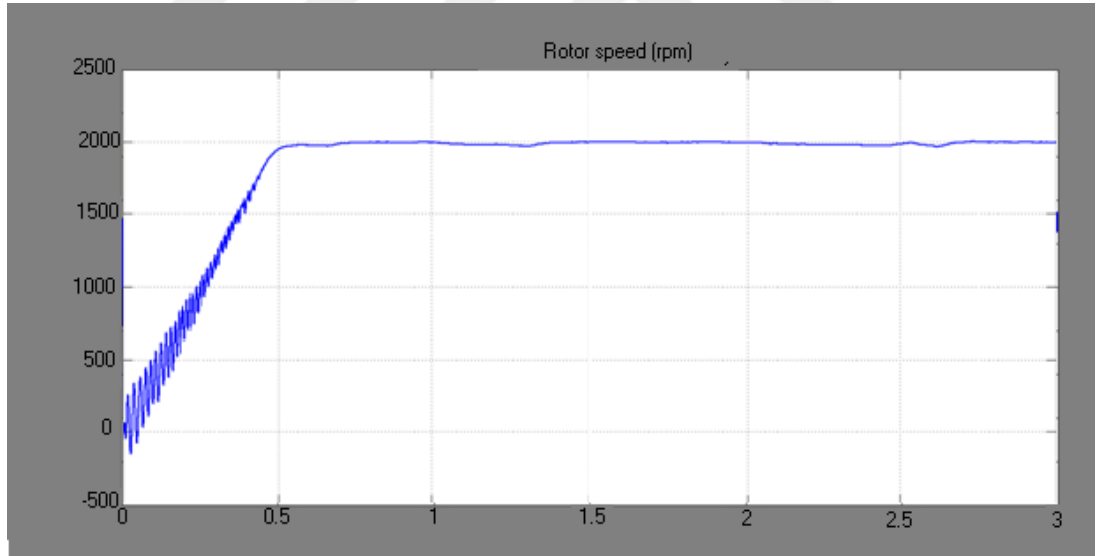
Şekil 4.9. Pompanın simulink modeli

Şekil 4.9'daki pompa modelinde ise motor mili üzerinden bir mekanik hız bilgisi alınmakta, bu hız bilgisi moment sensörü üzerinden yük momenti olarak motora iletilmektedir. Burada su temin edilen kuyu, bir seviyesi değişen bir tank olarak düşünülmüştür. Pompa kuyudan çektiği suyu boru aracılığıyla basmaktadır. Basma yüksekliği 40 m uzunluğunda bir boru ile modellenmiştir. Boru çıkışına bir akış

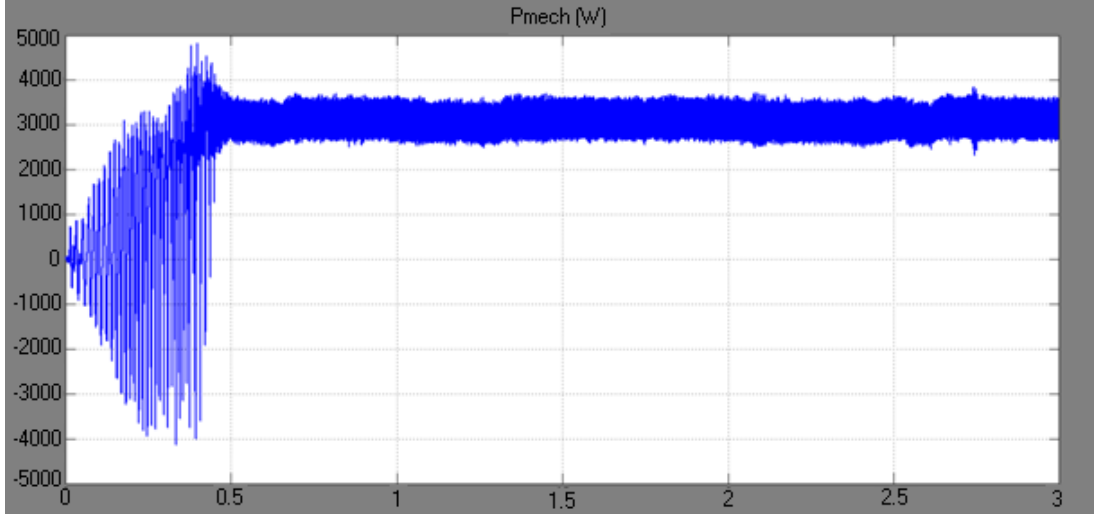
sensörü konularak debi ölçülmüştür. Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12, Şekil 4.13, Şekil 4.14, Şekil 4.15, ve Şekil 4.16 simülasyon sonucunda elde edilen performans eğrileridir.



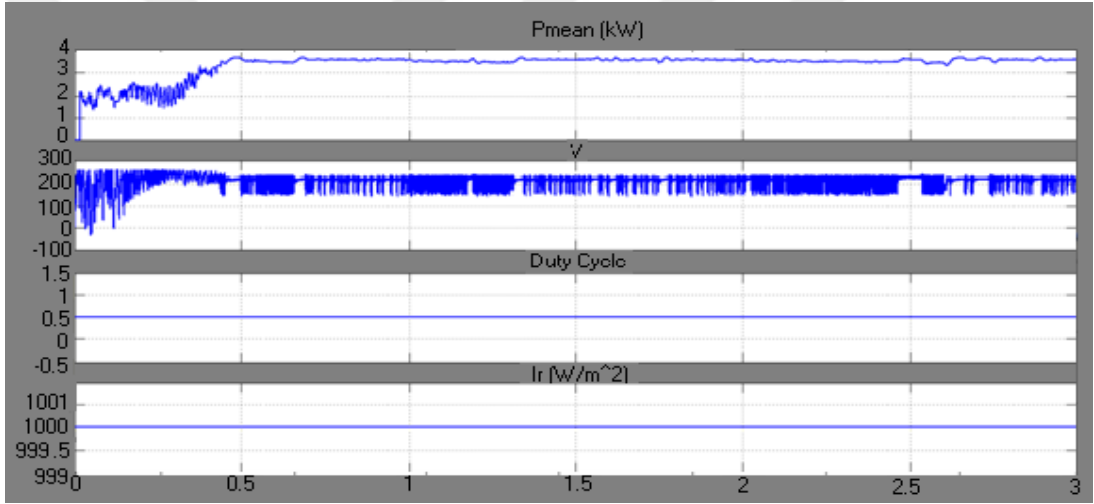
Şekil 4.10. Pompanın debi eğrisi



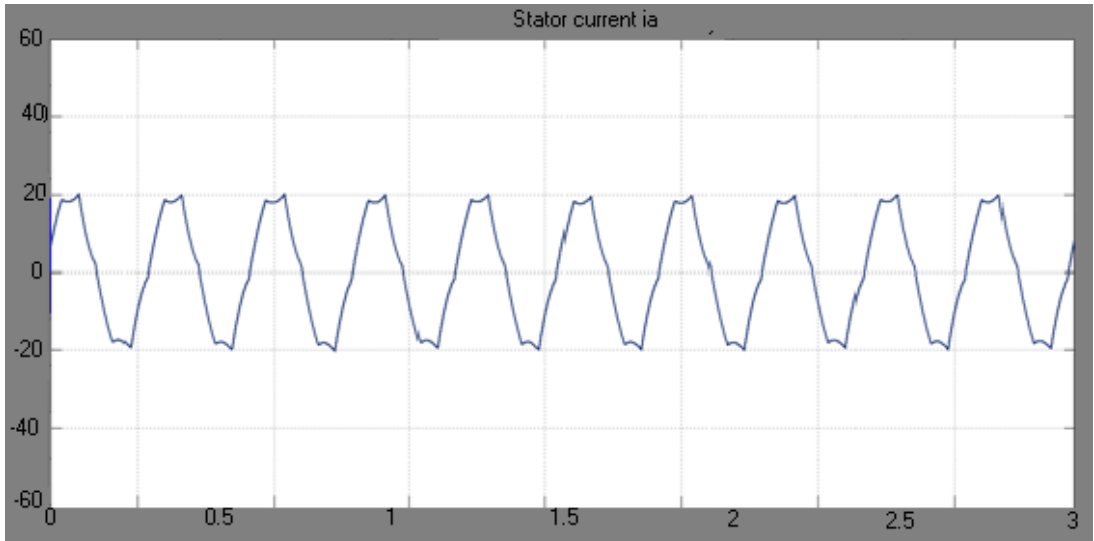
Şekil 4.11. Pompanın devir sayısı



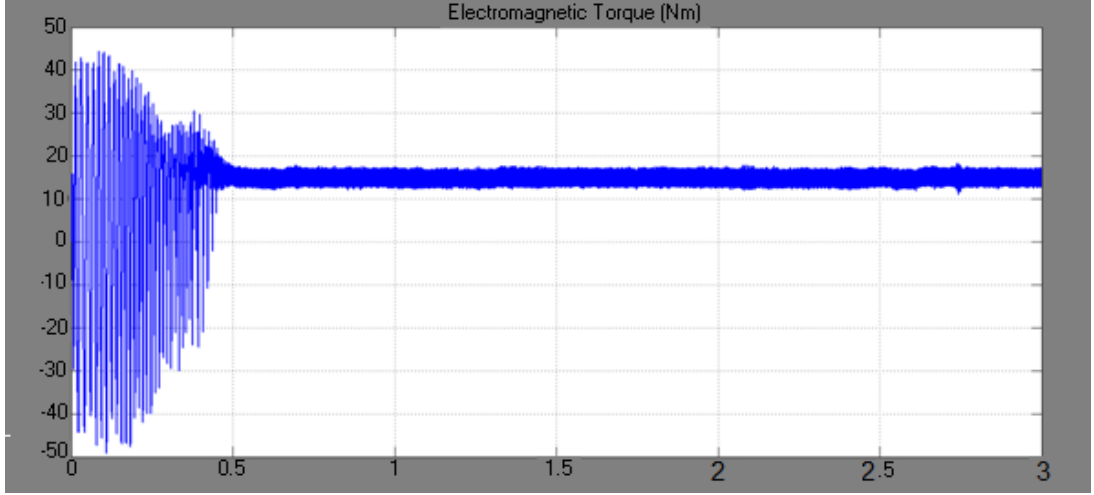
Şekil 4.12. Pompanın mekanik gücü



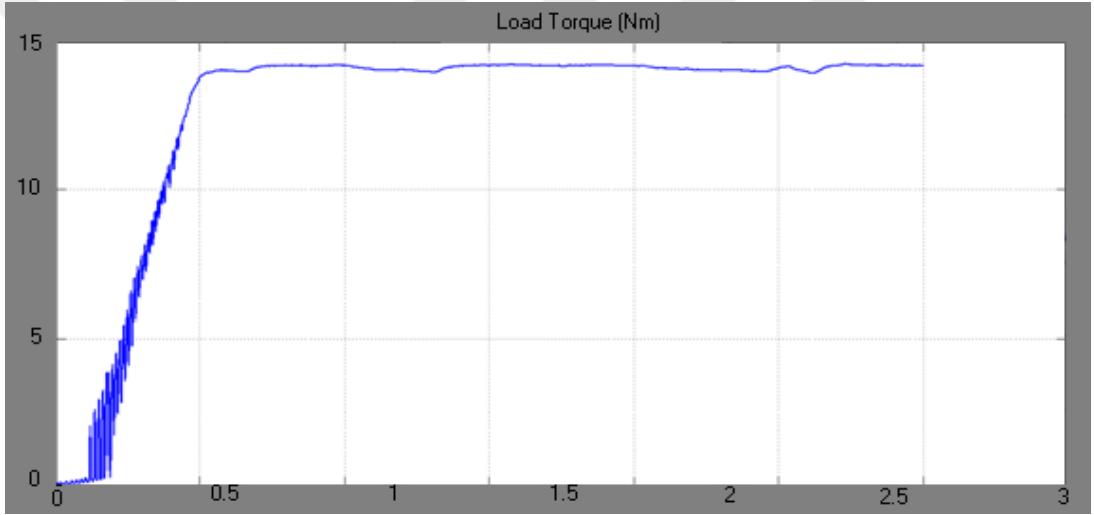
Şekil 4.13. FV Panelin gerilim güç ve çevrim oranı değerleri



Şekil 4.14. Fırçasız DC motorun bir fazına ait stator akımı



Şekil 4.15. Elektriksel moment



Şekil 4.16. Pompanın yük momentini

Sistem simülasyonu sonucunda, güneş panellerinden üretilen elektrik enerjisi, boost dönüştürücü üzerinden fırçasız DC motoru besleyerek pompanın öngörülen miktarda yaklaşık $15,26 \text{ m}^3/\text{saat}$ su pompalaması sağlandı. FV panellerden elde edilen güç değeri maksimum noktasında olduğu ve bu noktada kararlı çalıştığı görülmektedir. Boost dönüştürücünün girişi ve çıkışındaki gerilim değerleri, motorun çektiği akım ve güç değerleri motor kataloğundaki değerlerle örtüşmektedir. Simülasyonda elde edilen bu değerler boost dönüştürücü giriş gerilimi 235 V çıkış gerilimi 365 V, giriş akımı 15,58 A çıkış akımı 10 A olarak okundu. Pompa kataloğundaki değerler ise motor besleme gerilimi max. 375 V, akımı max. 15 A'dir. Pompa yaklaşık 0,5 saniye gibi bir süre sonra maksimum debiye ulaşmakta ve kararlı hale geçmektedir. Pompanın hız set değeri 2000 devir/dakika olarak belirlendi, simülasyon sonucunda

da belirlenen set değerinde çalıştığı görüldü. Panel verimi %18,7, pompanın verimi % 55'dir. MPPT algoritması yardımıyla belirlenen çevrim süresinin 0,5 olarak simülasyon boyunca sabit kaldığı görüldü. Bütün bunların yanı sıra boost dönüştürücü üzerinden pompanın çektiği akımda dalgalılık gözlemlendi. Mevcut dalgalılığın giderilerek pompanın daha düzgün çalışması için iyileştirmeler yapılabileceği sonucu çıkarıldı.



SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Fotovoltaik su pompalama sistemleri, uygulamadaki mevcut geleneksel çözümlere göre birçok avantajı barındırmaktadır. Ayrıca sistemin modüler bir yapıya sahip olması farklı uygulamalara kolayca adapte edilmesini sağlar. Tarım alanlarında modern sulama tekniklerinin (damla ve yağmurlama) FV su pompalama sistemleriyle birlikte kullanılması ile enerji tasarrufunun yanında su israfı, çoraklaşma, tuzlaşma gibi önemli sorunların çözümüne de katkı sağlanmaktadır. Tarımda üretim verimliliğinin artması, ülke ekonomisinin gelişmesini ve kırsal kesimdeki gelir düzeyinin artmasını sağlayacaktır.

Fotovoltaik sistemlerinin ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olması, bu sistemlerin olabildiğince doğru bir şekilde boyutlandırılmasını gerektirmektedir. Güneş enerjisi ile çalışan tarımsal sulama sistemlerinin tasarımında; suyun pompalanacağı toplam yükseklik, gereksinim duyulan günlük su ve bölgedeki ortalama güneş enerjisi miktarlarının önceden hesaplanması veya tahmin edilmesi gereklidir. Bu verilere bağlı olarak sistemin boyutlandırılması ve panel, pompa, motor gibi bileşenlerin seçimi kolaylaşır.

Talep artışı doğal olarak, teknolojinin gelişimine ve de maliyetlerin düşmesine neden olmaktadır. FV su pompalama sistemlerinin, ülkemizdeki konvansiyonel güç şebekesinin yetersizliği düşünüldüğünde, kullanım suyu amaçlı, tarımsal amaçlı ya da sulama amaçlı bir çok uygulama alanında, ekonomik ve uzun ömürlü olduğu görülmektedir.

Özellikle akaryakıt fiyatlarının dünya standartlarından çok üstte olduğu ülkemizde, tarımsal sulama için oldukça yüksek bütçeler ayrılmaktadır. Bu durum akaryakıt sektöründe dışa bağımlı olan ülkemiz için hem ekonomik açıdan hem de sürdürülebilir bir dünya açısından oldukça olumsuz durumları ortaya çıkarmaktadır. Sürdürülebilir çevre açısından son derece önemli olan yenilebilir enerji kaynaklarının etkin ve yerinde kullanımı, hükümetler tarafından daha fazla desteklenmesi ile hızla

yaygınlaşması beklenmektedir. Bu yeni teknolojilerin hem daha düşük maliyetlere kurulabilmesi hem de tüm toplum tabanına yaygınlaşabilmesi için yenilenebilir enerji kaynaklarının özellikle de FV teknolojilerin kullanılacağı her uygulama alanına destek verilmesi büyük bir önem arz etmektedir.

Bu çalışmada hedeflenen model ile daha önce arz edilen sorunların gidermesi, verimli, ekonomik ve sürdürülebilir bir sistemin mevcut uygulamalarda fosil yakıtlı geleneksel sistemlerin yerini alabileceği gösterilmeye çalışıldı. Kurulan FV su pompalama sistemi modeli ile gerçek uygulamalardan örnek alınarak simülasyon gerçekleştirilmiş ve simülasyon sonuçları ile piyasada var olan ürünlerin performans değerlerinin örtüştüğü görüldü. Bununla birlikte pompa motorunun akımına ait dalgalı yapıdaki sinyal formunun düzeltilmesi için güç dönüştürücüsü ve motor sürücüsü üzerinde yapılacak iyileştirmeler, sistemin daha optimum bir performans sağlaması için geliştirilebilir özellikleri olarak değerlendirildi. Sistemin GSM ve/veya internet üzerinden kontrol edilebilmesi için gerekli donanımların sisteme eklenmesi, uzaktan kontrol ve gözlem imkanı tanınması sayesinde sistemi daha cazip hale getireceği düşünüldü.

KAYNAKLAR

- [1] Yörükoğulları E., Güneş enerjisi, Editör: Yörükoğulları E., *Yenilenebilir enerji kaynakları*, 1. Baskı, Anadolu Üniversitesi Web-Ofset Tesisleri, Eskişehir, 2-25, 2013.
- [2] Elektrik İşleri Etüt İdaresi, Türkiye'de Güneş Enerjisi, Elektrik İşleri Etüt İdaresi, <http://www.eie.gov.tr/eie-web/turkce/YEK/gunes/tgunes.html>, (Ziyaret Tarihi: 20 Nisan 2015).
- [3] Nelson J., *The physics of solar cells*, 1st edition, Imperial College Press, London, UK, 2003.
- [4] Kangal H., Fotovoltaik Sistem Analizi Ve Labview Tabanlı Mppt Simülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2008, 212885.
- [5] Akgün A., Mikrodenetleyici Tabanlı Güneş Enerjisinden Elektrik Enerjisi Üretim Sisteminin Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2006, 180051.
- [6] Kulaksız A., Maksimum Güç Noktası İzleyicili Ve Uvm İverterli Fotovoltaik Sistemin Yapay Sinir Ağları Tabanlı Kontrolü, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2007, 212386.
- [7] Oi A. Design And Simulation Of Photovoltaic Water Pumping System, Master of Science Thesis, California Polytechnic State University, San Luis Obispo, September 2005.
- [8] Lajnef T., Abid S., Ammous A., Design And Simulation Of Water Pumping System, *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 2013, **2**, 161-164.
- [9] Eker B., Solar powered water pumping systems, *Trakya Journal of Sciences*, 2005, **3**, 7-11.
- [10] Hammadi S., Hidouri N., Sbita L., Foc Drive Scheme For A Photovoltaic Water Pmsm-Pumping System, *International Conference on Control, Engineering & Information Technology (CEIT'13) Proceedings Engineering & Technology*, 2013, **2**, 27-32.
- [11] Atlam Ö., Kuyumcu F. E., Fotovoltaik Pompa Sisteminde Maksimum Güç Noktasının İzlenmesi, *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 10. Ulusal Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 18-21 Eylül 2003.

- [12] Rohit K. B., Karve G. M., Khatri, Solar Water Pumping System, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2013, **3**, 323-337.
- [13] Jayakumar M., Rajini V., Investigation of Photovoltaic Water Pumping System, *International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies ICCPCT-2013*, Nagercoil, India, 20-21 March 2013.
- [14] Abu-Aligah M., Design of Photovoltaic Water Pumping System and Compare It with Diesel Powered Pump, *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering (JJMIE)*, 2011, **5**, 273-280.
- [15] Khader S., Daud A., Pv-Grid Tie System Energizing Water Pump, *Smart Grid and Renewable Energy*, 2013, **4**, 409-418.
- [16] Bayrak G., Cebeci M., 3.6 Kw Gücündeki Fotovoltaik Generatörün Matlab Simulink ile Modellenmesi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2012, **28**, 198-204.
- [17] Pandiarajan N., Muthu R., Mathematical Modeling Of Photovoltaic Module with Simulink, *International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES 2011)*, Tamilnadu, India, 3-5 January 2011.
- [18] Heng G., Zheng X., You-Chun L., Hui W., A Novel Maximum Power Point Tracking Strategy for Stand-Alone Solar Pumping Systems, *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific*, Dalian, China, 15-18 August 2005.
- [19] Durgadevi A., Arulselvi S., Natarajan S. P., Study And Implementation of Maximum Power Point Tracking (Mpppt) Algorithm for Photovoltaic Systems, *1st International Conference on Electrical Energy Systems*, Tamilnadu, India, 3-5 January 2011.
- [20] Yousuf N. B., Salim K. M., Haider R., Alam M. R., Zia F. B., Development of A Three Phase Induction Motor Controller for Solar Powered Water Pump, *2nd International Conference on the Developments in Renewable Energy Technology*, Bangladesh, Dhaka, 2012.
- [21] Aydoğdu Ö., Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Genetik Tabanlı Bulanık Denetleyici ile Sensörsüz Kontrolü, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2006, 183326.
- [22] Krishnan R., *Electric Motor Drives Modelling Analysis and Control*, 1st edition, Prentice Hall, New Jersey, USA, 2001.
- [23] Hancı O., Servo Motorlar ve Örnek Bir Uygulama Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007, 177997.
- [24] Rambabu S., Modeling and Control of A Brushless Dc Motor, Master of Technology Thesis, Department of Electrical Engineering National Institute of Technology, Rourkela, 2007, 769008.

- [25] Yedamale P., Brushless Dc (Blde) Motor Fundamentals, Microchip Technology Inc., AN885, 1-20, 2003.
- [26] Gödekoğlu H., Fırçasız Doğru Akım Motoru Konum Kontrolörü Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007, 223613.
- [27] Kürkcü B., Çelik M., Çetin S., Özsoy İ., GÜdümlü Bir Sistem için Fırçasız Dc Motorun Modellenmesi Simülasyonu ve Uygulanması, *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı*, Malatya, Türkiye, 26-28 Eylül 2013.
- [28] Atay Ü., İşiker Y., Yeşilata B., Fotovoltaik Güç Destekli Mikro Sulama Sistemi Projesi-1: Genel Esaslar, *V.Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, Diyarbakır, Türkiye, 19-21 Haziran 2009.
- [29] Onat N., Ersöz S., Fotovoltaik Sistemlerde Maksimum Güç Noktası İzleyici Algoritmalarının Karşılaştırılması, *V.Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, Diyarbakır, Türkiye, 19-21 Haziran 2009.
- [30] Rishel J. B., *Water Pumps And Pumping Systems*, 1st edition, McGraw-Hill, USA, 2002.
- [31] Karassik I. J., Messina J. P., Cooper P., Heald C. C., *Pump Handbook*, 3rd edition, McGraw-Hill, USA, 2001.
- [32] Zeren C., Devridaim Sistemleri İçin Küçük Güçlü Fırçasız Doğru Akım Motoru Tasarımı, Üretimi ve Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2015, 392983.
- [33] Ender D., Ertöz A. Ö., Değişken Devirli Pompa Seçimi, *4. Pompa kongresi*, İstanbul, Türkiye, 08-10 Kasım 2001.
- [34] Mohan N., Undeland T. M., Robbins W. P., *Power Electronics: Converters Applications and Design*, 2nd edition, Wiley, USA, 1995.
- [35] Ürgün S., Erfidan T., Çoruh N., DA-DA Buck Dönüştürücü Tasarımı ve Gerçeklenmesi, *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa, Türkiye, 26-30 Kasım 2008.
- [36] Ürgün S., Erfidan T., Çoruh N., DA-DA Boost Tipi Dönüştürücü Tasarımı ve Gerçeklenmesi, *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa, Türkiye, 26-30 Kasım 2008.
- [37] Hamrouni, N., Jraidi, M., Cherif, A., Theoretical and Experimental Analysis of The Behaviour of A Photovoltaic Pumping System, *Solar Energy*, 2009, **83**,1335-1344.
- [38] Betka A., ve Attali A., Optimization of A Photovoltaic Pumping System Based on The Optimal Control Theory, *Solar Energy*, 2010, **84**, 1273-1283.

- [39] Ghoneim A. A., Design Optimization of Photovoltaic Powered Water Pumping Systems, *Energy Conversion and Management*, 2006, **47**, 1449-1463.
- [40] Hamidat A. ve Benyoucef B., Systematic Procedures for Sizing Photovoltaic Pumping System Using Water Tank Storage, *Energy Policy*, 2009, **37**, 1489–1501.
- [41] Hamidat A. ve Benyoucef B., Mathematic Models of Photovoltaic Motor-Pump Systems, *Renewable Energy*, 2008, **33**, 933–942.
- [42] Messenger R., Ventre J., *Photovoltaic Systems Engineering*, 2nd edition, CRC Press, USA, 2004.



KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Peren V.**, Kuyumcu F. E., Türker Ç. G., Güneş enerjisi ile tarım sulama sistemi tasarımı ve simülasyonu, *3e Electrotech*, 2015, **257**, 114-122.



ÖZGEÇMİŞ

1987 yılında İstanbul'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 2005 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği bölümünden 2009 yılında mezun oldu. 2012 yılında Çift Anadal Programı kapsamında öğrenim gördüğü Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği bölümünü bitirdi. Haziran 2011-Kasım 2013 tarihleri arasında proje ve taahhüt hizmeti veren özel bir firmada şantiye şefi olarak görev yaptı. 2010-2015 yılları arasında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimini sürdürmektedir. 2015 Kasım ayından bu yana Hyundai Assan fabrikasında Genel Tesis Yönetimi Bölümünde Yardımcı Tesisler İşletme ve Bakım Mühendisi olarak görev yapmaktadır.