

**T.C.  
SİİRT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇİFT EKSENLİ GÜNEŞ TAKİP SİSTEMİ TASARIMI VE MODELLEMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ramazan MENAK  
(163111001)**

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Hakan KIZMAZ**

**Kasım-2018  
SİİRT**

## TEZ KABUL ve ONAYI

Ramazan MENAK tarafından hazırlanan “Çift Eksenli Güneş Takip Sistemi Tasarımı ve Modellemesi” adlı tez çalışması 19/11/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliğiyle Siirt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANSTEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### İmza

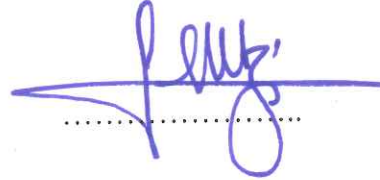
**Prof. Dr. Saadettin Aksoy**  
(Başkan)




**Dr. Öğr. Üyesi Hakan KIZMAZ**  
(Danışman)



**Doç. Dr. Fevzi HANSU**  
(Üye)



Yukarıdaki sonucu onaylarım.



**Doç. Dr. Fevzi HANSU**  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ÖN SÖZ

Çalışmalarım boyunca ve bu tezi hazırlamam konusunda bana sabır gösteren, bilgi ve deneyimiyle bana farklı bakış açıları kazandıran, akademik ve bilimsel katkılarıyla bana yol gösteren değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Hakan KIZMAZ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bana her konuda destek olan, yardımını ve desteğini her zaman yanımda hissettiğim değerli hocam Doç. Dr. Fevzi HANSU'ya teşekkürü bir borç bilirim. Çalışmam süresince tecrübe ve bilgisiyle bana destek veren değerli hocam Prof. Dr. Saadettin AKSOY'a teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmalarım sırasında yardımını ve desteğinin esirgemeyen çalışma arkadaşım Arş. Gör. Rıdvan ÇETİN'e teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim öğretim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, bu günlere gelmemde büyük katkıları olan ve varlıklarıyla bana her zaman güç katan aileme sonsuz şükranlarımı sunarım.

**Ramazan MENAK**  
**SIİRT-2018**

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖN SÖZ .....	iii
İÇİNDEKİLER .....	iv
TABLolar LİSTESİ .....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	viii
KISALTMALAR ve SİMGELER LİSTESİ .....	xi
ÖZET .....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI</b> .....	<b>3</b>
<b>3. GÜNEŞ ve GÜNEŞ ENERJİSİ</b> .....	<b>11</b>
3.1. Güneş Enerjisi ve Yapısı.....	11
3.2. Türkiye'nin Güneş Enerji Potansiyeli.....	12
3.3. Güneş Açıları ve Astronomisi.....	14
3.3.1. Enlem açısı.....	15
3.3.2. Deklinasyon açısı .....	15
3.3.3. Saat açısı .....	15
3.3.4. Zenit açısı ile güneş yükseklik açısı .....	16
3.3.5. Güneş azimut açısı .....	17
3.3.6. Yüzey azimut açısı.....	17
3.3.7. Eğim açısı .....	18
3.3.8. Güneş geliş açısı .....	18
<b>4. GÜNEŞ TAKİP SİSTEMLERİ (GTS)</b> .....	<b>20</b>
4.1. Kontrol Yapısına Göre GTS .....	20
4.1.1. Kapalı çevrim kontrol .....	21
4.1.2. Açık çevrim kontrol .....	21
4.2. Eksen Tipine Göre GTS.....	21
4.2.1. Tek eksenli güneş takip sistemi .....	22
4.2.2. Çift eksenli güneş takip sistemi .....	22
4.3. Sürücü Tipine Göre GTS .....	23
4.3.1. Aktif güneş takip sistemleri .....	23
4.3.2. Pasif güneş takip sistemleri.....	24
<b>5. DENEY DÜZENİĞİNİN KURULMASI</b> .....	<b>27</b>
5.1. GTS Tasarımı.....	27
5.1.1. Sistemin tahrik mekanizması için aktüatör seçimi .....	27
5.1.2. Fotovoltaik panel seçimi ve yük direncinin belirlenmesi .....	27

5.1.3. GTS sensör (solar göz) düzeneğinin tasarımı .....	29
5.1.4. GTS kontrol kartı tasarımı .....	30
5.1.5. GTS kontrol algoritması .....	31
5.1.6. GTS giriş ve çıkış parametrelerinin ölçümü .....	33
5.1.7. Deney sisteminin genel gösterimi .....	34
<b>6. GTS’NİN BENZETİM ORTAMINDA MODELLENMESİ .....</b>	<b>36</b>
6.1. Fotovoltaik Panellerin Modellenmesi .....	36
6.1.1. Işınım sonucu üretilen akımın elde edilmesi .....	40
6.1.2. Diyot doyma akımının elde edilmesi .....	40
6.1.3. Genetik algoritmalar kullanarak $R_s$ ve $R_p$ dirençlerinin kestirimi .....	40
6.1.4. FV panelin benzetim modeli .....	45
6.2. Güneş, Güneş Açıları ve Konum Bilgilerinin Modellenmesi .....	47
6.2.1. Doğu-batı güneş açısının (DBGA) modellenmesi .....	50
6.2.2. Güneş yükseklik açısı modeli .....	51
6.2.3. Güneş ve konum bilgileri modeli .....	51
6.3. Etkin Radyasyon Değerinin Hesaplanması .....	51
6.4. Solar Göz Sensör Bloğunun Modellenmesi .....	52
6.5. Denetleyicinin Modellenmesi .....	55
6.6. Motor Sürücüsünün Modellenmesi .....	56
6.7. Doğu-Batı Dönme Hareketinin Modellenmesi .....	57
6.7.1. Doğu-Batı lineer aktüatörün modellenmesi .....	58
6.7.2. Doğu-Batı panel açısının (DBPA) modellenmesi .....	59
6.7.3. Yüzey azimut açısının modellenmesi .....	60
6.7.4. Doğu-batı hareketinin modeli .....	62
6.8. Kuzey-Güney Dönme Hareketinin Modellenmesi .....	62
6.8.1. Kuzey-Güney lineer aktüatörün modellenmesi .....	62
6.8.2. Kuzey-Güney panel açısının (KGPA) modellenmesi .....	64
6.8.3. Panel eğim açısının modellenmesi .....	65
6.8.4. Kuzey-güney hareketinin modeli .....	65
6.9. Güneş Geliş Açısının Modellenmesi .....	66
6.10. FV Panel Giriş Değişkenlerinin Modellenmesi .....	66
6.11. Sabit FV Panelin Benzetim Ortamında Modellenmesi .....	67
6.12. Tek Eksenli GTS’nin Benzetim Ortamında Modellenmesi .....	68
6.13. Çift Eksenli GTS’nin Benzetim Ortamında Modellenmesi .....	69
<b>7. BULGULAR ve TARTIŞMA .....</b>	<b>71</b>
7.1. Sabit ve Hareketli Sisteme İlişkin Deneysel Sonuçlar .....	71
7.1.1. Birinci güne ait deneysel sonuçlar ve verimlilik analizi .....	72
7.1.2. İkinci güne ait deneysel sonuçlar ve verimlilik analizi .....	74
7.2. Deneysel ve Benzetim Sonuçlarının Karşılaştırılması .....	77
7.2.1. Birinci güne ait deneysel ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması .....	77
7.2.2. İkinci güne ait deneysel ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması .....	82
7.3. Benzetim Modelleri ile Verimlilik Analizleri .....	86
7.3.1. Benzetim ortamında tek ile çift eksenli sistemlerin karşılaştırılması .....	86
7.3.2. Benzetim ortamında tek eksenli hareketli sistem için sabit eğim açısının panel verimliliğine olan etkisi .....	86
7.3.3. Hareketli sistemlerde panel yüzey sıcaklığının panel verimliliğine etkisi ...	87

<b>8. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....</b>	<b>89</b>
8.1. Sonuçlar .....	89
8.2. Öneriler .....	90
<b>9. KAYNAKLAR .....</b>	<b>92</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>98</b>



## TABLolar LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 6.1.</b> GA parametreleri ile GA sonucu .....	45
<b>Tablo 6.2.</b> FV panele ait parametreler ve değerleri.....	46
<b>Tablo 6.3.</b> Denetleyici girişlerine göre çıkışta görülen lojik bilgiler .....	56
<b>Tablo 6.4.</b> Sürücülere gelen lojik bilgilere göre çıkışta görülen gerilim değerleri .....	57
<b>Tablo 6.5.</b> DB lineer aktüatörün her bir mil uzunluğuna karşılık gelen DBPA değeri..	60
<b>Tablo 6.6.</b> KG lineer aktüatörün her bir mil uzunluğuna karşılık gelen KGPA değeri .	64



## ŞEKİLLER LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1. Metal hibrid aktüatörlü solar takip mekanizması.....	9
Şekil 2.2. Görüntü işleme tabanlı güneş takip sisteminin elektromekanik yapısı .....	10
Şekil 3.1. Güneşten gelen ışınımın dağılması.....	12
Şekil 3.2. Türkiye'nin güneş ışınım haritası.....	14
Şekil 3.3. TR güneş kuşağı atlası.....	14
Şekil 3.4. Saat açısı genel gösterimi .....	16
Şekil 3.5. Zenit ve güneş yükseklik açılarının gösterimi.....	16
Şekil 3.6. Solar azimut açısının genel gösterimi .....	17
Şekil 3.7. Güneş azimut açısı ile yüzey azimut açısı arasındaki ilişki .....	18
Şekil 3.8. Eğim açısı ve diğer güneş açılarının genel gösterimi.....	18
Şekil 3.9. Eğik bir yüzeye gelen güneş geliş açısı.....	19
Şekil 4.1. Güneş takip sistemlerinin genel sınıflandırılması .....	20
Şekil 4.2. Kapalı çevrim kontrol yapısının genel gösterimi .....	21
Şekil 4.3. Açık çevrim kontrol yapısının genel gösterimi .....	21
Şekil 4.4. Tek eksenli güneş takip sistemi mekanizmalarının gösterimi.....	22
Şekil 4.5. Çift eksenli güneş takip yapan izleyici sistemi .....	23
Şekil 4.6. LDR devresinin aydınlık ve karanlık durumlardaki tepkisi .....	24
Şekil 4.7. Küçük güneş pillerinden oluşturulmuş solar göz sensör düzeneği.....	24
Şekil 4.8. Güneş takibi yapan pasif bir izleyici sistemi.....	25
Şekil 4.9. Sunsaluter damıtma sistemi ile pasif bir şekilde güneş takibi yapan düzenek.....	26
Şekil 5.1. $I-V$ ve $P-V$ eğrileri üzerinde bulunan farklı direnç değerlerindeki yük eğrilerinin gösterimi .....	28
Şekil 5.2. Alüminyum kaplamalı 100 W 3.3 $\Omega$ değerindeki yük direnci .....	29
Şekil 5.3. Solar göz sensör düzeneğinin genel gösterimi .....	30
Şekil 5.4. Solar göz sensör düzeneğinin FV panel üzerine yerleştirilmesi.....	30
Şekil 5.5. Güneş takip sisteminde hareketi sağlayan genel sistemin gösterimi.....	31
Şekil 5.6. GTS kontrol algoritmasının akış diyagramı .....	32
Şekil 5.7. GTS kontrol sisteminin Proteus/ISIS programında benzetiminin gerçekleştirilmesi .....	32
Şekil 5.8. Deneysel düzeneğin giriş değişkenlerinin ölçümü.....	34
Şekil 5.9. Deneysel olarak tasarlanmış sabit ve hareketli sistemin deney ortamındaki şematik gösterimi .....	35
Şekil 5.10. Deney düzeneğinin üzerinden geçen güneş yolu ve deney yerinin uydudan görünümü .....	35
Şekil 6.1. $p-n$ eklemde elektron akışından kaynaklanan elektrik alanı görüntüsü .....	37
Şekil 6.2. $p-n$ çiftine elektriksel bir yük bağlandığında devrede oluşan akım.....	37
Şekil 6.3. Diyodun karanlık ve aydınlık ortamlardaki $I-V$ karakteristiği .....	37
Şekil 6.4. Tek diyot modellenmiş fotovoltaiik sistemin eş değer devresi.....	38



Şekil 6.5. Seri direnç değerinin FV panel $I-V$ karakteristik eğrisine etkisi .....	42
Şekil 6.6. Paralel direnç değerinin FV panel $I-V$ karakteristik eğrisine etkisi.....	43
Şekil 6.7. GA çalışma mantığı akış diyagramı .....	44
Şekil 6.8. FV hücre Matlab/Simulink ortamında oluşturulmuş blok modeli.....	46
Şekil 6.9. Modellenen FV hücre bloğunun benzetim sonucu elde edilen $I-V$ ve $P-V$ eğrileri .....	47
Şekil 6.10. Güneş açılarını hesaplayan çevrimiçi arayüz yazılımı .....	48
Şekil 6.11. Güneş açıları ve konum bilgileri için oluşturulan veri seti .....	49
Şekil 6.12. Saat açısı ve DBGA arasındaki ilişkinin şematik gösterimi.....	50
Şekil 6.13. Güneş, güneş açıları ve konum bilgilerinin modeli.....	51
Şekil 6.14. DBPA, DBGA, GYA, KGPA gösterimi .....	52
Şekil 6.15. Solar göz blok modeli.....	53
Şekil 6.16. Solar göz sensör bloğu .....	55
Şekil 6.17. Denetleyicinin benzetim modeli.....	56
Şekil 6.18. Motor sürücülerinin blok modeli.....	57
Şekil 6.19. $D-B$ lineer aktüatörün blok modeli .....	59
Şekil 6.20. DBPA'nın lineer aktüatör mil uzunluğuna göre değişimi.....	59
Şekil 6.21. Mil uzunluğuna göre değişen DBPA blok modeli .....	60
Şekil 6.22. DBPA sınırları içerisinde ve dışında değişen yüzey azimut açısının şematik gösterimi .....	61
Şekil 6.23. Yüzey azimut açısının blok modeli .....	62
Şekil 6.24. GTS'nin doğu-batı hareketi blok diyagramı .....	62
Şekil 6.25. Kuzey-güney lineer aktüatörün benzetim ortamında blok modeli .....	63
Şekil 6.26. KGPA'nın lineer aktüatör mil uzunluğuna göre değişimi.....	64
Şekil 6.27. KGPA'nın benzetim ortamında blok modeli.....	65
Şekil 6.28. Panel eğim açısının blok modeli .....	65
Şekil 6.29. Kuzey-güney hareketinin blok diyagramı .....	65
Şekil 6.30. Güneş geliş açısının blok modeli.....	66
Şekil 6.31. FV panelin giriş değişkenlerinin blok modeli .....	67
Şekil 6.32. Sabit FV panelin benzetim ortamında tasarlanan blok diyagramı .....	68
Şekil 6.33. Benzetim ortamında tasarlanan tek eksenli GTS'nin hareket sistemi bloğu	69
Şekil 6.34. Tek eksenli GTS'nin benzetim ortamında tasarlanan blok diyagramı .....	69
Şekil 6.35. Benzetim ortamında tasarlanan çift eksenli GTS'nin hareket sistemi bloğu	70
Şekil 6.36. Çift eksenli GTS'nin benzetim ortamında tasarlanan blok diyagramı .....	70
Şekil 7.1. Yamuklar yöntemi integrasyon kuralının bir eğri üzerinde gösterimi .....	72
Şekil 7.2. Birinci güne ait hareketli ve sabit sistemin gerilim-zaman grafiği .....	72
Şekil 7.3. Birinci güne ait hareketli ve sabit sistemin akım-zaman grafiği .....	73
Şekil 7.4. Birinci güne ait hareketli ve sabit sistemin güç-zaman grafiği .....	74
Şekil 7.5. İkinci güne ait hareketli ve sabit sistemin gerilim-zaman grafiği .....	75
Şekil 7.6. İkinci güne ait hareketli ve sabit sistemin akım-zaman grafiği.....	75
Şekil 7.7. İkinci güne ait hareketli ve sabit sistemin güç-zaman grafiği .....	76

<b>Şekil 7.8.</b> Birinci güne ait hareketli ve sabit sistemin deneysel sonuçlar ile edilmiş çıkış ve giriş değişkenleri grafikleri.....	79
<b>Şekil 7.9.</b> Birinci güne ait hareketli ve sabit sistemin benzetim ortamında deneysel giriş değişkenlerine göre elde edilmiş olan çıkış değişkenleri grafikleri .....	80
<b>Şekil 7.10.</b> Birinci güne ait hareketli ve sabit sistemin benzetim ve deneysel çıkış değişkenlerinin hata farkları grafikleri.....	81
<b>Şekil 7.11.</b> İkinci güne ait hareketli ve sabit sistemin deneysel sonuçlar ile edilmiş çıkış ve giriş değişkenleri grafikleri .....	83
<b>Şekil 7.12.</b> İkinci güne ait hareketli ve sabit sistemin benzetim ortamında deneysel giriş değişkenlerine göre elde edilmiş olan çıkış değişkenleri grafikleri.....	84
<b>Şekil 7.13.</b> İkinci güne ait hareketli ve sabit sistemin benzetim ve deneysel çıkış değişkenlerinin hata farkları grafikleri.....	85
<b>Şekil 7.14.</b> Birinci güne ait benzetim ortamında sabit, tek eksenli ve çift eksenli sistemlerinin çıkış güçleri grafiği.....	86
<b>Şekil 7.15.</b> Birinci güne ait benzetim ortamında farklı eğim açılarıyla konumlandırılmış tek eksenli güneş takip sistemlerinin çıkış güçleri grafiği .....	87
<b>Şekil 7.16.</b> Birinci güne ait benzetim ortamında değişken ve sabit sıcaklık koşulları altında sabit, tek eksen ve çift eksenli sistemlerin panel çıkış güçleri.....	88

## KISALTMALAR ve SİMGELER LİSTESİ

<u>Kısaltma</u>	<u>Açıklama</u>
AC	: Alternating Current
DB	: Doğu Batı
DC	: Direct Current
DBGGA	: Doğu Batı Güneş Açısı
DBPA	: Doğu Batı Panel Açısı
DE	: Differential Evolation
DSP	: Digital Signal Processing
FV	: Fotovoltaik
GA	: Genetik Algoritma
GEPA	: Güneş Enerji Potansiyeli Atlası
GS	: Güneş Saati
GTS	: Güneş Takip Sistemi
GYA	: Güneş Yükseklik Açısı
KG	: Kuzey Güney
KİS	: Klasik İzleme Sistemi
Wh	: Watt-saat
KWh	: Kilowatt-saat
LCD	: Liquid Crystal Display
LDR	: Light Dependent Resistor
MCU	: Microprocessor Control Unit
MH	: Metal Hibrid
Mhz	: Mega Hertz
mm	: Milimetre
MPPT	: Maximum Power Point Tracker
OGİS	: Otomatik Güneş İzleme Sistemi
KGPA	: Kuzey Güney Panel Açısı
PID	: Proportional Integral Derivative
PLC	: Programmable Logic Controller
PSO	: Particle Swarm Optimization
SA	: Simulated Annealing
SMA	: Shape Memory Alloy
SMC	: Sliding Mode Control
TEP	: Ton Eşdeğer Petrol

<u>Simge</u>	<u>Açıklama</u>
$E_g$	: Yarı iletken bant genişliği
$f_e$	: Amaç/uygunluk fonksiyonu
$G$	: Işınım şiddeti
$G_{etkin}$	: Etkin güneş ışınım şiddeti
$G_{ref}$	: Referans ışınım şiddeti
$I$	: Akım
$I_0$	: Diyot doyma akımı
$I_{0,ref}$	: Referans diyot doyum akımı
$I_d$	: Diyot akımı
$I_{fv}$	: Güneş ışığından kaynaklanan akım
$I_{max}$	: Maksimum akım

$I_{sc}$	: Kısa devre akımı
$I_{sc,ref}$	: Referans kısa devre akımı
$K$	: Kelvin
$K_i$	: Kısa devre akımı/sıcaklık katsayısı
$k$	: Boltzmann sabiti
$P$	: Güç
$P_{max}$	: Maksimum güç
$q$	: Elektron yükü
$R_p$	: Paralel direnç
$R_s$	: Seri direnç
$R_y$	: Yük direnci
$S$	: Panel yüzey alanı
$T$	: Sıcaklık
$T_{act}$	: Gerçek sıcaklık
$T_{ref}$	: Referans sıcaklık
$V$	: Gerilim
$V_d$	: Diyot gerilimi
$V_{max}$	: Maksimum gerilim
$V_{oc}$	: Açık devre gerilimi
$V_{oc,ref}$	: Referans açık devre gerilimi
$W$	: Güç
$V_t$	: Solar hücre termal gerilimi
$W_h$	: Hareketli panel enerji miktarı
$W_{panel}$	: Panel gücü
$W_s$	: Sabit panel enerji miktarı
$^{\circ}C$	: Santigrad Derece
$\alpha$	: Diyot idealite faktörü
$\alpha_s$	: Güneş yükseklik açısı
$\beta$	: Panel eğim açısı
$\gamma$	: Yüzey azimut açısı
$\gamma_s$	: Güneş azimut açısı
$\delta$	: Deklinasyon açısı
$\eta$	: Verim
$\eta_{panel}$	: Panel verimliliği
$\theta$	: Güneş geliş açısı
$\Sigma$	: Toplam Sembolü
$\varphi$	: Enlem açısı
$\Psi$	: Zenit açısı
$\omega$	: Saat açısı

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

## ÇİFT EKSENLİ GÜNEŞ TAKİP SİSTEMİ TASARIMI VE MODELLEMESİ

**Ramazan MENAK**

**Siirt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Hakan KIZMAZ**

**2018, 98 + xiv Sayfa**

Sanayileşen ve küreselleşen dünyanın, enerji tüketimi gün geçtikçe artmaktadır. Dünya enerji ihtiyacının büyük çoğunluğunu önceleri fosil yakıtlarından sağlanmaktaydı. Ancak bu tür enerji kaynaklarının gün geçtikçe tükenmesi, enerji ihtiyacını karşılamayacağı endişesi ve çevre dostu olmaması sebebiyle alternatif enerji kaynaklarına yönelim artmıştır. Bu alternatif enerji kaynakları arasından yenilenebilir enerji kaynakları, temiz, çevre dostu ve sürekli olmasından dolayı insanlığı bu kaynakları kullanmaya yönelmiştir. En önemli yenilenebilir enerji kaynakları olan güneş, rüzgâr, biokütle, jeotermal, hidrolik, dalga vb. gibi kaynaklar kullanılmaya başlanılmıştır. Bu kaynaklardan en önemlisi olan güneş enerjisi son yıllarda yaygın olarak kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarının başında gelir. Güneşten elektrik enerjisi elde etmek için güneş panelleri kullanılır. Güneş panellerinden en iyi şekilde verim elde etmek için çeşitli yöntemler kullanılır. Bu yöntemlerden bir tanesi de güneş takip sistemleridir.

Bu tez çalışmasında, iki eksenli bir güneş takip sistemi ile sabit bir sistem düzeneği deneysel olarak tasarlanmıştır. Hareketli düzenek hem iki eksenli hem de tek eksenli güneş takibi yapabilen bir sistem olarak tasarlanmıştır. Ayrıca deneysel olarak tasarlanan sistemin tüm parçaları Matlab/Simulink ortamında modellenmiştir. Deneysel düzende bulunan hareketli ve sabit panelden iki ayrı günde alınan ölçümlerle karşılaştırma yapılarak verimlilik analizleri yapılmıştır. Birinci ve ikinci güneş için karşılaştırma sonucundaki verilere göre hareketli sistem sabit sisteme göre daha verimli olduğu tespit edilmiştir. Hareketli sistemin sabit sisteme göre birinci günde ve ikinci günde sırasıyla % 37,234 ve % 35,756 daha verimli olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla hareketli sistemlerin sabit sistemlere göre % 35-40 arası daha verimli olduğu sonucuna varılmıştır. Matlab/ Simulink ortamında modellenmesi yapılan hareketli sistem ile sabit sistemin deneysel ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması yapılmıştır. Karşılaştırma sonucunda deneysel ile benzetim sonuçlarının büyük ölçüde örtüştüğü gözlemlenmiştir. Böylelikle deneysel düzenek kurulmadan, değişen çevresel ve fiziksel faktörler altında benzetim ortamında benzetim modeli ile analiz yapılması mümkün kılınmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Enerji verimliliği, Güneş enerjisi, Güneş takip sistemleri, Yenilenebilir enerji

## **ABSTRACT**

### **MSc. THESIS**

## **DESIGNING AND MODELLING DUAL AXIS SOLAR TRACKER SYSTEM**

**Ramazan MENAK**

**The Graduate School of Natural and Applied Science of Siirt University  
The Degree of Master of Science  
In Electrical-Electronics Engineering**

**Supervisor: Assist. Prof. Dr. Hakan KIZMAZ**

**2018, 98+xiv Pages**

Energy consumption of industrialized and globalized world has been increasing day by day. Vast majority of world's energy need were provided by fossil fuels. However, the tendency to alternative energy sources has increased due to the fact that such energy sources will be exhausted, and they are not meeting energy need apprehension, and also they are not-so-eco. As these renewable energy sources are clean, eco-friendly, and sustainable among the other energy sources, mankind tend to use these sources. The most important renewable energy sources such as sun, wind, biomass, geothermal, hydraulic, waves have been started to use. To be the most important source among them, solar energy has been the most used primary energy in recent years. In this way, solar panels are used to obtain electrical energy from the sun. Various methods are used to achieve optimal efficiency from the solar panels. One of these methods is solar tracking system.

In this thesis study, a dual axis solar tracking and a fixed panel system has been designed for an experimental purpose. The designed tracking system has been designed that could tracking the sun in both dual axis and single axis. Each part of the experimentally designed system has been modeled in Matlab/Simulink environment. The productivity analysis has been made by comparing the measurements which was taken in two different days from the tracking and fixed panel in the experimental setup. According to the result of the comparison of the first and second day, it is determined that tracking system is more efficient than fixed system. It is determined that the tracking system %37,234 and %35,756 more efficient than fixed system on the first day and second day respectively. Therefore, it is concluded that the tracking system % 35-40 more efficient than fixed system. Tracking system and fixed system which was modeled in Matlab/Simulink, has been compared by their experimental and simulation results. As a result of the comparison, it was observed that the modeling and real data results majorly overlap with each other. The simulation model enables to make analysis under varying environmental and physical factors in the simulation environment instead of experimental setup.

**Keywords:** Energy efficiency, Renewable energy, Solar energy, Solar tracking systems

## 1. GİRİŞ

Sanayileşen ve küreselleşen dünyanın, enerji tüketimi gün geçtikçe artmaktadır. Dünya enerji ihtiyacının büyük çoğunluğu ilk zamanlarda fosil yakıtlarla sağlanmaktaydı. Ancak bu tür enerji kaynaklarının çevre dostu olmaması ve gelecekte enerji talebini karşılayamayacağı endişesi alternatif enerji kaynaklarına olan ilgiyi arttırmıştır. Bu alternatif enerji kaynakları arasında yenilenebilir enerji kaynaklarının, temiz, çevre dostu ve sürdürülebilir olması bu ilginin temel sebebidir. En önemli yenilenebilir enerji kaynakları güneş, rüzgâr, biokütle, jeotermal, hidrolik, dalga vb. gibi kaynaklardır. Bu kaynaklardan güneş enerjisi son yıllarda yaygın olarak kullanılan yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yere sahiptir.

Güneş enerjisi, güneşte bulunan hidrojen gazının helyuma dönüşmesi sonucunda oluşan füzyon tepkimesinden doğar. Dünya atmosferi dışından gelen güneş ışınım şiddeti  $1370 \text{ W/m}^2$  civarlarında olmasına rağmen ancak  $0-1100 \text{ W/m}^2$  kadar yeryüzüne ulaşabilmektedir. Buna rağmen bu miktar, insanoğlunun enerji ihtiyacını karşılamak için önem arz etmektedir. Bu bağlamda söz konusu ışınım miktarını elektrik enerjisine dönüştürebilmek için *FV* (fotovoltaik) paneller kullanılır (Varış, 2017).

Güneş pilleri güneş ışınlarını elektrik enerjisine çeviren yapı taşı yarı iletken malzeme olan küçük hücrelerden oluşur. Bu hücreler bir araya getirilerek modülleri, modüller de bir araya getirilerek dizileri oluşturur. Diziler bir araya gelerek *FV* panelleri meydana getirir. Yüzey şekilleri daire, kare, dikdörtgen, şeklinde olabilen güneş pillerinin yüzey alanları genellikle  $100 \text{ cm}^2$  civarında, kalınlıkları ise  $0.2-0.4 \text{ mm}$  arasındadır. Güneş pilleri *FV* prensibe göre yani üzerlerine ışık düştüğünde uçlarında gerilim oluşacak şekilde çalışırlar. Güneş pilinin verdiği elektrik enerjisinin kaynağı, yüzeyine gelen güneş ışımıdır (Uzunok, 2007).

*FV* paneller çevre dostudurlar ve kullanımları sırasında atık madde veya zararlı madde üretmezler. Tam aksine çevreye duyarlı, temiz enerji elde edilmesini sağlarlar. Kullanılacakları yerlere kurulduktan sonra kullanımları sırasında bakım ve onarım masrafları yok denecek kadar azdır. Ancak bu kazanımın yanında panellerin kurulum maliyetinin yüksek olması gibi bir olumsuzluk da vardır. *FV* paneller üzerlerine gelen güneş ışınımının ancak bir miktarı elektrik enerjisine dönüştürülebilmektedir. Bu bakımdan verimlilikleri % 10-25'ler civarındadır. Bu durum, kurulum ve işletme maliyetlerini karşılamak adına amorti edebilme süresini uzatır. Bundan dolayı *FV*

panellerden en iyi şekilde verim elde edebilmek için panel verim artırma yöntemleri kullanılır. Bu yöntemlerden bir tanesi de güneş ışınlarının panelin yüzeyine dik gelebilmesini sağlamaktır. Güneş enerjisinden maksimum verim sağlamak önemlidir ancak güneşin konumu bulunduğu yerin enlemine, gün uzunluğuna ve mevsimine göre değişiklik gösterdiğinden, güneş ışınlarının bir *FV* panele dik gelmesini sağlamak için ‘güneş takip sistemleri’ kullanılır.

Güneş takip sistemleri çeşitli sensörlü ve sensörsüz algoritmalar kullanılarak güneşin yön tayinini yapıp güneş ışınlarının panel yüzeyine dik gelmesini sağlayacak şekilde paneli güneşe doğru çevirir. Bu sayede panele gelen güneş ışınımının panele dik gelmesi sağlanmış olur. Bu şekilde panelin verimi arttırılmış olur.

Bu tez çalışmasında iki eksenli güneş takip sistemi ile sabit sistem tasarımı yapılmış ve deneysel olarak gerçekleştirilip test edilmiştir. Tasarlanan iki eksenli güneş takip sistemi tek eksenli takip de yapabilir. Tasarlanan sistemlerin tüm elemanlarının matematiksel modelleri elde edilerek bilgisayarda benzetim ortamında modellenmişlerdir. Daha sonra sistemlerin benzetim ve deneysel sonuçları karşılaştırılmıştır.

Tezin ikinci bölümü *GTS* (Güneş Takip Sistemleri) konusu kapsamında önceki yıllarda yapılan çalışmalar hakkında literatür araştırmalarını içermektedir. Tezin üçüncü bölümünde güneş enerjisi ve Türkiye’nin güneş enerjisi potansiyeli hakkında genel bilgiler verilmiş ve ayrıca güneş astronomisi ile ilgili temel kuramlara değinilmiştir. Tezin dördüncü bölümünde güneş takip sistemlerinin sınıflandırılmasına yer verilmiştir. Beşinci bölümde deneysel olarak tasarlanan hareketli sistem ile sabit sisteme ilişkin tasarımda kullanılan malzemeler, sistemin kontrol yapısı ve deney düzeneğinin gerçekleştirilme aşamaları ile ilgili bilgiler verilmiştir. Tezin altıncı bölümünde tasarlanan *GTS* sistemi ile sabit sistemin bilgisayar benzetim ortamında, her bir elemanın blok modeli oluşturulup sistemin genel olarak modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Tezin yedinci bölümünde deneysel olarak ve benzetim ortamından zamana bağımlı olarak elde edilen gerilim, akım, güç gibi veriler grafikler halinde verilmiştir. Söz konusu grafiklerde güç eğrileri ve panellerin ürettikleri enerji miktarları vurgulanmak üzere elde edilen tüm veriler karşılaştırılmıştır. Sekizinci bölümde ise bu çalışmadan çıkarılan sonuçlar ile bu alanda daha sonra yapılabilecek çalışmalar için bazı öneriler sunulmuştur.



## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde *GTS* hakkında geçmiş yıllarda yapılmış çalışmalar verilmiştir. Araştırmanın içerisinde *GTS* sistemlerinde kullanılan temel elemanlar, kontrol yapıları ve sistem mekanizmaları hakkındaki bilgiler verilmiştir. *GTS* ile sabit sistemlerin verimlilik analizlerini içeren çalışmalar ele alınmıştır.

Armakan (2003)'ın yaptığı bir çalışmada açık devre bilgisayar kontrollü iki eksenli güneş takip sistemi tasarlanmıştır. Gerçekleştirilen düzeneğin kontrolü için gün boyu güneş takibi yapacak astronomik matematiksel ifadelerle dayalı bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Bu yazılım Pentium IV 1600 MHz bilgisayar üzerindeki Visual Basic derleyicisi ile gerçekleştirilmiştir. Bunların yanında sistemin matematiksel modeli benzetim ortamında oluşturulmuş ve üzerinde kararlılık analizleri yapılmıştır. Tasarlanan prototip iki eksenli güneş takip sistemi ile sabit güneş pilinin enerji verimlilikleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda iki eksenli sistemin, sabit sisteme göre % 40 daha verimli çalıştığı tespit edilmiştir (Armakan, 2003).

Roth ve ark. (2004) tarafından yapılan bir çalışmada, güneşin yön tayinini yapıp konumunu izlemek için elektromekanik bir sistem tasarlanmıştır. Bu sayede pirometre ile doğrudan gelen güneş ışınım şiddeti ölçülebilmektedir. Dört kadranlı, ışığa duyarlı sensör ile 2 tane küçük DC motor kullanılarak güneş konumu tespit edilmiştir. Bulutlu havalarda, sensör işlevini yerine getirmediği zaman güneş konumunu hesaplayan algoritmalar otomatik olarak devreye girerek güneş takibini yapmaktadır. Bu işlem sensörler tekrar ışık alana kadar devam eder. Sistemin aynı mantıkla daha büyük yapıları güneş panelleri için de kullanılabilirliği önerilmiştir. Sistemin ayrıca daha yüksek hassasiyetle cevap verebilmesi için DSP (Digital Signal Processor) kullanılması uygun görülmüştür (Roth ve ark., 2004).

Al-Mohamad (2004) yaptığı çalışmada PLC (Programmable Logic Controller) ile kontrol edilen bir güneş takip sistemi tasarlamıştır. Yapılan testler sonucunda günlük olarak hareketli bir sistemin sabit sisteme göre % 20 oranında daha verimli çalıştığını tespit etmiştir. Sabah ve akşam saatlerinin hesaba katılmasıyla verimliliğin %40'lara kadar çıkabileceğine değinmiştir. Ayrıca denetleyici olarak PLC'nin kullanılmasının seri-paralel bağlı birden fazla panelin kullanılmasına olanak tanıyarak maliyeti düşüreceğine dikkat çekmiştir (Al-Mohamad, 2004).

Abdallah (2004) yaptığı çalışmada dört farklı mekanik yapıya sahip güneş takip sistemleri tasarlayıp sabit eğim açılı bir sisteme göre enerji verimliliklerini deneysel

olarak karşılaştırmıştır. Karşılaştırma sonucunda çift eksen % 43.87, tek eksen dikey % 37.53, tek eksen doğu-batı % 34.43 ve tek eksen kuzey-güney takip % 15.69 daha verimli çalıştığını tespit etmiştir (Abdallah, 2004).

Bakos (2006) iki eksenli bir güneş takip sisteminin enerji verimliliğini deneysel olarak incelemiştir. Çift eksenli sistem, güneşe bakarak konumlandırılmış 40° eğim açısına sahip sabit bir panele göre % 46.46 daha verimli çalıştığı sonucuna varmıştır. Ayrıca önerilen iki eksenli takip sisteminin basit yapıya sahip olması, düşük bakım gereksinimleri ve düşük kurulum maliyeti ile gerçekleştirildiğine değinmiştir (Bakos, 2006).

2006 yılında yapılan bir çalışmada *FV* malzemelerin karakteristikleri incelenmiş ve *FV* panellerin günümüzdeki kullanım alanlarının gittikçe arttığı vurgulanmıştır. Bu teknolojik ilerlemelerle beraber *FV* panellerin güneş ışığını elektrik enerjisine çevirmede verimlilik artırma yöntemlerinde, *FV* hücrelerin kimyasal yapısının yanında gelen güneş ışımının panel ile yaptığı açının önemine vurgu yapılmıştır. Bu sayede panelden elde edilen elektrik enerjisi miktarının % 37'lere kadar arttığı tespit edilmiştir (Bilgin, 2006).

2007 yılında yapılan bir çalışmada iki eksenli güneş takip sistemi ile sabit sistemin sıcaklık, güneş radyasyon şiddeti, akım ve voltaj değerleri ölçülmüştür. Bu ölçümler ile hareketli sistemin sabit sisteme göre % 17.07 daha verimli olduğu tespit edilmiştir. Ölçümlerin yıl içinde farklı mekan ve zamanda yapılmasının daha sağlıklı verilere ulaşılmasına imkan sağlayacağı vurgulanmıştır. Ayrıca ölçümler sonucunda daha az güneş pili kullanılarak kısıtlı alanlarda güneş enerjisinden azami şekilde faydalanılabileceği tespit edilmiştir (Uzunok, 2007).

Abu-Khader ve ark. (2008) yaptıkları bir çalışmada çok eksenli (kuzey-güney, doğu-batı, dikey) bir güneş takip sisteminin deneysel incelemesi yapılmıştır. Deneysel olarak hareketli sistem ile sabit sistem karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda hareketli sistemlerin sabit sistemlere göre % 30-45 oranında daha verimli olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca en verimli çalışan hareketli sistem kuzey-güney eksenli sistem olduğu tespit edilmiştir (Abu-Khader ve ark., 2008).

Sungur (2009) yaptığı bir çalışmada *PLC* ile kontrol edilen ve güneş azimut ve yükseklik açısını takip eden iki eksenli bir güneş takip sistemini tasarlamıştır. Sistemin kontrolü ve performans ölçütlerinden sonra sabit sistem ile hareketli sistem karşılaştırılmıştır. Ölçüm ile elde edilen veriler, hareketli sistemin sabit sisteme göre % 42.6 daha verimli olduğu tespit edilmiştir (Sungur, 2009).

Önal (2009) yaptığı bir çalışmada güneş enerjisinin Türkiye'deki potansiyeli grafiklerle anlatılmıştır. Dünyada ve Türkiye'de güneş izleme sistemi üzerine yapılan çalışmaları içeren bir literatür araştırması yapılmıştır. Güneş takip sistemlerini içeren yeni bir sınıflandırma türü oluşturulmuştur. Sensörlü bir otomatik güneş takip sistemi (*OGİS*) ile beraber sensörlerin elle kullanılması veya sensörlerin kullanılmaması durumunda klasik izleme sistemi (*KİS*) seçeneği de sağlanarak bir tasarım gerçekleştirilmiştir. *OGİS*'in tek eksenliye göre verimliliği grafikte gösterilmiştir (Önal, 2009).

Al-Soud ve ark. (2010) tarafından hem manuel hem de otomatik kontrol edilebilen güneş takip sistemli bir güneş ocağı tasarlanmış ve test edilmiştir. 3 günlük deneysel veriler sonucunda, yaz ayında ölçülen ortam sıcaklığı 36°C iken ocağın içerisinde bulunan tüpün içerisindeki su sıcaklığının 90°C olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca ortam sıcaklığı ve gelen güneş ışınımı arttıkça su sıcaklığının da arttığı tespit edilmiştir. Tasarlanan sistem, yemek pişirmenin yanında yiyecek ve içeceklerin ısıtılmasında, sütün pastörize edilmesinde de kullanılacağı bildirilmiştir (Al-Soud ve ark., 2010).

Chin ve ark. (2011) yaptıkları bir çalışmada tek eksenli bir güneş takip sisteminin tasarımı ve bilgisayar ortamında modellenmesi yer almaktadır. Paneli güneş ışınımına dik olarak yöneltmek için panel yüzeyine yerleştirilmiş iki adet *LDR* (Light Dependent Resistor) kullanılmıştır. Sistem güneş ışınımına bağlı olarak otomatik hareket etmektedir. Ayrıca sensörlerden bilgi gelmezse sistem belli aralıklarla doğu-batı yönünde 2°'lik hareket sağlamaktadır. Gece olunca, sistemin uyku moduna geçerek doğuya dönmesi sağlanmıştır. Bunlarla birlikte gerçekte kurulan sabit ve hareketli sistemin tüm elemanları bilgisayar ortamında modellenerek gerçek veriler ile benzetim verilerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Karşılaştırma sonucunda benzetim verileri ile gerçek verilerin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Ayrıca hareketli sistemin sabit sisteme göre % 20 daha verimli çalıştığı tespit edilmiştir (Chin ve ark.,2011).

Mastar (2011) yaptığı bir çalışmada güneş takip sistemlerinin ortalama % 25 ile % 40 arası daha verimli çalıştığı belirtilmiştir. Yapılan çalışmada güneş takip sistemlerinin kullanıldığı teknolojiler, takip sistemlerinin sınıflandırılması, ekonomik getirisi ve piyasadaki yaşam döngüsünün bağlı olduğu etmenlerden bahsedilmiştir. Prototip bir *FV* güneş takip sistemi ile sabit sistemin enerji üretimi ve maliyet açısından karşılaştırılmaları yapılmıştır (Mastar, 2011).

2011 yılında yapılan bir çalışmada Balıkesir ilinde yapılacak uygulamalara teşvik olması ve yapılacak çalışmalara referans olmak amacıyla maksimum güç noktası takip sistemli (*MPPT*) birisi sabit diğeri iki eksenli olmak üzere iki adet *FV* güneş enerji

sisteminin kurulumu ve eş zamanlı olarak çalıştırılarak verimlilik karşılaştırılmaları yapılmıştır. Ölçümler sonucunda iki eksenli güneş takip sisteminin sabit sisteme göre % 39 daha verimli çalıştığı tespit edilmiştir (Beyoğlu, 2011).

Seme ve Stumberger (2011) yaptıkları çalışmalarında güneş açılarına bağlı olarak hareket etme özelliğine sahip iki eksenli bir güneş takip sistemi geliştirmişlerdir. Güneş takibi yapan sistemin en az düzeyde enerji tüketmesi için eğim açısının ve azimut açısının bir optimizasyon tekniği ile kontrol edilmesi sağlanmıştır. Bu optimizasyon tekniği diferansiyel evrim olarak adlandırılan kestirim tabanlı bir algoritmaya dayalıdır (Seme ve Stumberger, 2011).

Kalaycı (2012) yaptığı bir çalışmada tek eksenli güneş takip eden parabolik bir güneş takip sistemi gerçekleştirilmiştir. Sistemin elektronik ve mekanik tasarımı bilgisayar ortamında yapılmıştır. Gerçekleştirilen prototip tek eksenli sistemin güneş takibi yapması durumunda % 15.5 oranında maliyete etkisi olduğu belirtilmiştir. Bunun yanında tek eksenli takip sonucunda % 31 civarında enerji kazancı sağlandığı tespit edilmiştir. Bu analizler güneş takip sistemlerinin daha ekonomik olarak kurulabileceğini göstermiştir (Kalaycı, 2012).

Özer (2012) yaptığı çalışmada yatay eksenli step motor ile hareketi sağlanan bir güneş takip sistemi tasarlanmıştır. Tasarlanan sistemin aynı ortamda bulunan sabit bir sistem ile karşılaştırılması yapılmış ve elde edilen veriler grafiklerle yorumlanmıştır. Her iki sistemin verimlilikleri anlık olarak hesaplanmıştır. Güneş takip eden sistemin verimliliğinin günün her anında hemen hemen aynı olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanında sabit sistemin ise gün içerisinde saat 10:00 - 15:00 arasında daha verimli çalıştığı diğer saatlerde veriminin düşük olduğu görülmüştür (Özer, 2012).

Rhif (2012) yaptığı çalışmada kayma kip kontrollü iki eksenli sensörsüz, güneş takibi yapan bir sistem tasarlamıştır. Sistemin her yıl boyunca her saniye güneş takibi yapması sağlanarak *FV* panelin ürettiği enerji miktarı artırılmaya çalışılmıştır. Kayma kip kontrolün ölçüm gürültülerinden etkilenen sensörlerin yerine kullanabilecek en iyi takip etme yöntemi olarak kullanılabilmesini ileri sürmüştür. Bu şekilde kontrol yapılarak enerji üretiminin % 40 kadar daha fazla olduğu tespit edilmiştir (Rhif, 2012).

2013 yılında yapılan bir çalışmada sensörsüz iki eksenli takip yapan bir sistem tasarlanmıştır. Sistemin sensörsüz olması hava koşullarından etkilenmemesi için tercih edilmiştir. Sistemin güneşin konumunu bildiren algoritmalar içeren mikrodenetleyici ile kontrol edilmesi maliyeti düşürmüştür. Mikrodenetleyiciden gelen bilgilere göre paneli güneşe yönlendirmek için lineer aktüatörler kullanılmıştır. Çalışma sonucunda hareketli

sistem ile sabit sistem karşılaştırılmıştır. Saat 08:00 ile 18:00 arasında saatte bir alınan ölçümler hareketli sistemin sabit sisteme göre % 25 daha verimli olduğu tespit edilmiştir. Yıl boyunca ve güneşin doğuşundan batışına kadar tüm saatlerde ölçüm alındığında verimliliğin % 40'lara kadar artabileceği belirtilmiştir (Tirmikci, 2013).

2013 yılında yapılan bir çalışmada farklı teknolojilerle üretilmiş sabit ve hareketli güneş takip sistemlerinin farklı algoritmalarla güneş takibi yapması üzerine detaylı bir çalışma yapılmıştır. Sistemde *PLC* tabanlı bir kontrol yapılmıştır. Tüm sistemlerin ayrı ayrı belli aralıklarla akım, gerilim ve sıcaklık parametreleri kayıt altına alınmıştır. Ölçümler sonucunda polikristal güneş panelinin enerji üretimi toplam üretimin % 46'sı ile birinci sırada, monokristal güneş panelinin enerji üretimi % 44 ile ikinci sırada, ince film güneş panelinin enerji üretimi toplam üretimin % 10 ile son sırada yer almıştır. Ayrıca hareketli ve sabit sistemler karşılaştırıldığında monokristal güneş panellerinde % 34.2, polikristal güneş panellerinde % 41.5 ve ince film güneş panellerinde % 55.3 kadar verim artışı tespit edilmiştir. Güneş takip sistemleri için en verimli panelin ince film güneş paneli olduğu belirtilmiştir (Orhun, 2013).

Rustemli ve ark. (2013) yaptıkları çalışmalarında *FV* paneller için güneş takip sistemlerinin ve panel soğutma sistemlerinin panelin verimliliğine olan etkisini incelemişlerdir. Güneş takip sistemlerinin panelin verimliliğini % 15-45 arasında artırdığına ve çift eksenli sistemlerin sabit sistemlere göre % 10-20 arasında daha verimli olduğuna değinmişlerdir. Ayrıca güneş panellerinin yüksek sıcaklıktan etkilenecek verimliliklerinin düştüğüne dikkat çekmişlerdir. Bu yüzden çeşitli panel soğutma tekniklerinin kullanılması gerektiği kanısına varmışlardır. Ancak bunların belli bir maliyet oluşturduğuna ve bu maliyetin azaltılması için sistemin deniz, göl, nehir vb. su kaynaklarına yakın olmasının gerekliliğini vurgulamışlardır (Rustemli ve ark., 2013).

Rizal ve ark. (2013) yaptıkları çalışmalarında güneş takip sistemi için güneş konumu algoritmalarını kullanmışlardır. Bu algoritmaların bilgisayar benzetim sonuçları ile güneşin zenith ve azimuth açısı hesaplanarak *FV* panellerin uzaktan tek bir bilgisayar tarafından kontrol edilmesine olanak sağlanmıştır. Ayrıca sisteme sensörler de eklenerek hem açık çevrim hem de kapalı çevrim güneş takibi yapılabileceği vurgulanmıştır (Rizal ve ark., 2013).

Huang ve ark. (2013) yaptıkları çalışmalarında tek eksenli üç konumlu bir güneş takip sistemi tasarlamışlardır. Söz konusu sistem sabah, öğle ve akşam olmak üzere ayrı ayrı üç konuma göre tek eksenle güneş takibi yapmışlardır. Açık bir günde yapılan deneyde, hareketli sistem sabit sisteme göre % 39 daha verimli çalışmıştır. 1 Mart 2010

tarihinden 31 Mayıs 2012 tarihine kadar uzun süreli yapılan ölçümlerde toplam enerji artışının % 24.2 olduğu gözlemlenmiştir. Bu oranın yüksek güneş ışınımının olduğu yerlerde % 37.5 kadar çıkabileceği ileri sürülmüştür (Huang ve ark., 2013).

2014 yılında yapılan bir çalışmada güneş takip sistemleri ve sınıflandırılması incelenmiş olup güneşin matematiksel konumuna dayalı *PLC* programları geliştirilmiştir. *PLC* yazılımı ile 4 ve 8 dakikalık iki ayrı güneş takip etme aralığı kullanılarak *FV* panellerin ürettikleri enerjiler hesaplanmıştır. Güneye yönelmiş 30° sabit eğimli sisteme göre tek eksenli güneş takip sisteminde % 41, çift eksenli güneş takip sisteminde ise % 46 daha fazla enerji elde edildiği gözlemlenmiştir (Er, 2014).

Sohag ve ark. (2015) yaptıkları çalışmalarında hem *LDR* sensörlü hem de görüntü işlemeli hibrit bir güneş takip sistemi tasarlamışlardır. Çalışma sonucunda, kamera ile görüntü işleme tekniği ve *LDR* sensörlü sistemin, sadece *LDR* sensörlü sisteme göre daha verimli olduğu grafiklerle gösterilmiştir. Önerdikleri sistemin geleneksel güneş takip sistemlerine göre daha doğru ve daha verimli çalıştığı sonucuna varmışlardır (Sohag ve ark., 2015).

Fayhabadi (2016) yaptığı çalışmada yeni bir yüksek hassasiyetli *MPPT* (maksimum güç noktası izleyicisi) tabanlı kapalı çevrim sensörsüz bir çift eksenli güneş takip sistemi tasarlamıştır. *MPPT*, *FV* panelin maksimum güç çıkışını vermesini sağlar. Sistem güneşin azimuth ve yükseklik açısını, anlık, çevrimiçi ve kapalı çevrim olarak hesapladığından diğer sensörsüz güneş takibi yapan açık çevrim sistemlere göre daha hassas çalıştığı anlaşılmıştır. Önerilen sistemin sensörlü ve sensörsüz açık çevrim takip yapan sistemlerden daha avantajlı olduğu ve diğer sistemlerin sahip olduğu dezavantajları taşımadığı belirtilmiştir. Tasarlanan sistemin sabit sistemlere göre mevsime de bağlı olarak % 28.8 – 43.6 arasında daha verimliliği çalıştığı belirtilmiştir (Fathabadi, 2016).

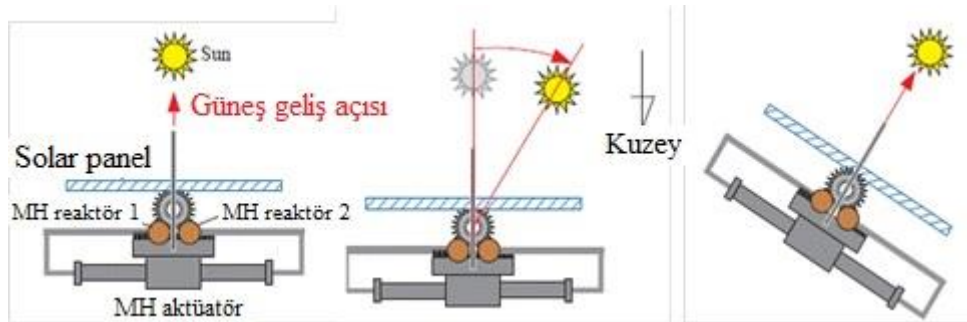
2016 yılında yapılan bir çalışmada Labview tabanlı iki eksenli güneş takibi sağlayan bir sistem tasarlanmıştır. Sistem, güneşten aldığı verileri Labview ara yüzü ile anlık olarak bilgisayar ortamına aktararak grafiğe dökmektedir. Sistem ayrıca güneş takip sistemi kullanıcılarına otomatik ya da el ile müdahale edebilme şansı da tanımaktadır (Kan, 2016).

2016 yılında yapılan bir çalışmada İzmir ili koşullarında, çift eksenli takip yapabilen 1 kW'lık *FV* bir güç sisteminin bilgisayarda benzetim ortamında modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Bu benzetim ortamında elde edilen veriler, kurulu bir gerçek sistemle karşılaştırılmış ve sonuçları incelenmiştir. Karşılaştırma sonucunda gerçek sistemle, benzetim sonuçlarının birbirine yakın değerlerde olduğu görülmüştür. Sonuç olarak

hareketli sistemin sabit sisteme göre % 29.6 daha verimli olduğu tespit edilmiştir (Atalay, 2016).

Sidek ve ark. (2017) yaptıkları bir çalışmada iki eksenli açık çevrim kontrollü bir güneş takip sistemi tasarlamışlardır. Tasarımda bir mikrodenetleyicinin yanında optik kodlayıcı ve *GPS* gibi yardımcı elemanlar kullanılarak güneşin yön tayini yapılmıştır. *GPS* bilgileri kullanılarak güneş yolu algoritmaları mikroişlemciye programlanarak bir kontrol gerçekleştirilmiştir. Böylelikle çift eksende güneş takibi yapan sistem  $\pm 5^\circ$  hassasiyetle güneş konumunu takip etmiştir. Ayrıca sistemde oransal-integral-türev (*PID*) denetleyicisi kullanılarak güneşin yükseklik ve azimut açıları en az düzeyde enerji harcayarak elde edilmeye çalışılmıştır. Ölçümler sonucunda güneşi takip eden sistem ile sabit sistemin ürettikleri enerji miktarları hesaplanmıştır. Hesaplama sonucunda hareketli sistem, sabit sisteme göre % 12.8 ile % 26.9 arasında daha verimli çalıştığı tespit edilmiştir (Sidek ve ark., 2017).

Obara ve ark. (2017) yaptıkları çalışmalarında elektrik enerjisi harcanmadan güneş ışınımı ile sürülebilir bir *MH* (metal hidrat) aktüatör kullanarak güneş takip sistemi tasarlamıştır. Tasarlanan sistemde güneş paneline dik olarak konumlandırılmış iki adet *MH* reaktörü bulundurulmuştur. Her bir *MH* reaktörden, güneş ışınımı kesmek için *MH* reaktörlerin arasına koruyucu bir plaka yerleştirilmiştir. Böylelikle bir taraf aydınlık olurken diğer tarafta gölge olması sağlanmıştır. Bu işlem *MH* reaktörleri arasında bir sıcaklık farkının olmasına neden olur böylelikle güneşin geliş açısının değiştiği anlaşılır. Bu durumda her reaktörde hermetik olarak sızdırılmaz hale getirilen hidrojenin denge basıncının değişmesiyle bir basınç farkının oluşturulması ve bu basınç farkına göre aktüatörün dengeyi sağlamaya çalışarak güneş takibi yapması sağlanmış olur. Bu sayede güneşin hareket ettiği yöne doğru gölgelendirme kaldırılarak *FV* panelin güneşe doğru yönelmesi sağlanmaktadır. Şekil 2.1’de metal hibrid aktüatörlü solar takip mekanizması şematik olarak gösterilmiştir. (Obara ve ark., 2017).



Şekil 2.1. Metal hibrid aktüatörlü solar takip mekanizması

2017 yılında yapılan bir çalışmada güneşlenme süresi ve güneş ışınım şiddeti yüksek olan Siirt ilinde tek eksenli bir güneş takip sisteminin sabit bir sisteme göre ne kadar daha verimli olduğu deneysel olarak irdelenmiştir. Deneyde birisi hareketli diğeri ise sabit olmak üzere 250 Watt'lık iki panel kullanılmıştır. Gün boyunca ve farklı günlerde belli aralıklarla alınan ölçümler hareketli sistemin sabit sisteme göre % 30-35 arası daha verimli çalıştığı tespit edilmiştir (Bükün, 2017).

2017 yılında yapılan bir çalışmada birisi tek eksenli hareketi sağlayan diğeri ise sabit olmak üzere iki adet özdeş 255 W gücünde *FV* panel kullanılmıştır. Sabit panel eğim açısı, Konya yöresinde kurulu güneş sistemlerinden yıl boyunca elde edilen enerjinin optimal olmasını sağlayan 32° açı değerine ayarlanmıştır. Hareketli sistem ise bir kontrol kartıyla kontrol edilen ve sonsuz dişli çarklı *DC* motorla hareketi sağlayan bir sistem olarak tasarlanmıştır. Her iki sistem yan yana güneşe bakacak şekilde konumlandırılmış ve anlık gerilim, akım, ışınım değerleri kayıt altına alınmıştır. Nisan ayı boyunca yapılan ölçümlerde tek eksenli güneş takibi yapan sistemin, sabit sisteme göre % 23 daha verimli çalıştığı tespit edilmiştir (Nuhoglu, 2017).

Abdollahpour ve ark. (2018) yaptıkları bir çalışmada bir *FV* panelin üzerine yerleştirilen bir çubuğun kamera ile alınan görüntünün işlenmesiyle çubuğun gölgesinin sıfırlanması suretiyle bir güneş takip sistemi tasarlanmıştır. Sistemin yaklaşık olarak  $\pm 2^\circ$  hassasiyetle güneş takibi yaptığı tespit edilmiştir. Sistemin başlangıç konumlandırma ayarlarından bağımsız çalıştığı ve herhangi bir coğrafi bölgede rahatlıkla kullanılacağı belirtilmiştir. Şekil 2.2'de görüntü işleme tabanlı güneş takip sisteminin elektromekanik yapısı gösterilmiştir. (Abdollahpour ve ark., 2018).



Şekil 2.2. Görüntü işleme tabanlı güneş takip sisteminin elektromekanik yapısı



### 3. GÜNEŞ ve GÜNEŞ ENERJİSİ

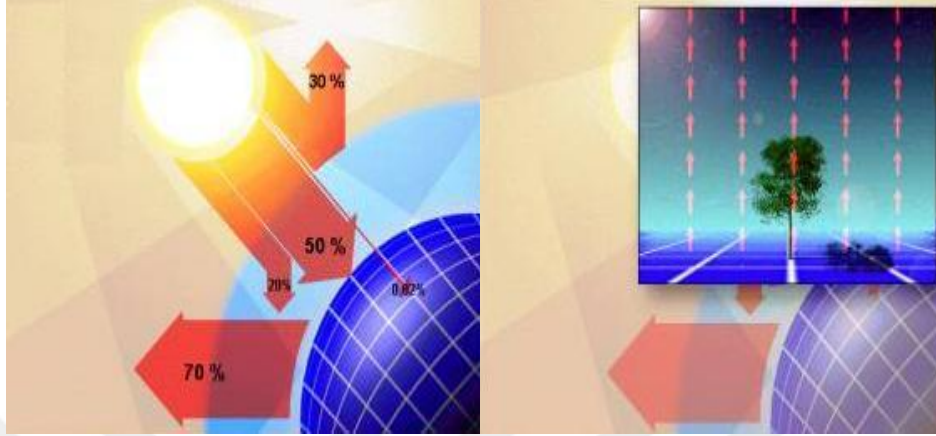
#### 3.1. Güneş Enerjisi ve Yapısı

Güneşin yaşamın sürdürebilmesindeki önemi, geçmişteki tüm antik toplumlardan günümüze kadar tüm insanlık tarafından bilinmektedir. Babiller, Hindular, Persler ve Mısırlılar gibi antik toplumlar inançları ölçüsünde güneşe ibadet etmişlerdir. Yazılı kaynaklardan elde edilen bilgilere göre antik Yunanlılar'ın evlerinde pasif güneş enerjisi tasarımlarını kullanan ilk topluluk olduğu ve güneş enerjisini farklı amaçlar için kullandıkları bilinir. Bir rivayete göre, *M.Ö 2. yy*'da Archimedes parlak bronz kalkanlarla güneş ışınlarını bir odak noktasına yansıtıp düşman gemilerini yakmak suretiyle bir savunma aracı olarak kullanmıştır. Romalılar da tıpkı Yunanlılar gibi evlerinde ısınma amaçlı ve diğer amaçlarla güneş enerjisinden yararlanma geleneğini devam ettirmişlerdir. Hatta Romalılar'da bir komşusunun güneş ışığına erişimi engel teşkil edecek bir durumun suç olarak kabul edildiği şeklinde çeşitli kanunlar getirilmiştir (Letcher, 2018).

Dünyamızdaki enerji kaynaklarının tümü güneşin varlığı sonucu ortaya çıkmıştır. Şu anda halen kullandığımız fosil yakıtlar binlerce yıl önce güneşten aldığı enerji sonucunda başkalaşım geçirerek günümüze ulaşmıştır. Ancak bu fosil yakıtların sürdürülemez ve ileride tükenecek olması yeni alternatif enerji kaynaklarına yönelmeye mecbur bırakmıştır. Özellikle 1970'lerden sonraki petrol krizinden sonra alternatif enerji kaynaklarına yönelim başlamış ve bu alandaki çalışmalar hız kazanmıştır. Bu alternatif enerji kaynakları başlıca güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, dalga enerjisi, okyanus akıntısı enerjisi, jeotermal, biokütle vb. gibi enerji kaynaklarıdır. Bunların arasında uygulanabilirliği en yüksek, bol ve dünyanın her yerinde görülebilme imkânı olan enerji kaynağı şüphesiz ki güneş enerjisidir.

Güneş enerjisinden elektrik enerjisi, ısınma vb. çalışmalar dünya petrol krizinden dolayı 1970'lerden sonra hız kazanmış, güneş enerjisi sistemleri teknolojik bakımdan gelişme ve maliyet açısından azalma göstermiş, çevreye duyarlı temiz bir enerji kaynağı olarak kullanılmaya başlanmıştır. Şekil 3.1'de görüldüğü gibi gelen güneş ışınımı tümüyle yer yüzeyine ulaşamaz, % 30 kadarı atmosfer tarafından geri yansıtılır. Gelen güneş ışınımının ancak % 50'si atmosferi geçerek dünya yüzeyine ulaşır. Bu enerji ile birlikte Dünya'nın sıcaklık seviyesi yükselir ve yeryüzünde yaşamın sürdürülmesine olanak sağlar. Bu ısınma rüzgâr hareketlerine, okyanus akıntı ve dalgalanmalarına da neden olur. Gelen güneş ışınımının % 20'si atmosfer ve bulutlarda tutulur. Yeryüzüne gelen güneş ışınımının % 1'den azı bitkiler tarafından fotosentez olayında kullanılır.

Bitkiler, fotosentez sırasında güneş ışığıyla birlikte karbondioksit ve su kullanarak, oksijen ve şeker üretirler. Fotosentez, yeryüzünde bitkisel yaşamın kaynağıdır. Güneş, nükleer enerji dışındaki bütün enerjilerin dolaylı veya doğrudan kaynağıdır (Url-1, 2018).



Şekil 3.1. Güneşten gelen ışınımın dağılımı

Güneş Dünya'dan ortalama olarak 150 milyon *km* uzakta bulunan, Dünya'ya en yakın ve Güneş Sistemi'nin merkezinde bulunan orta büyüklükteki bir yıldızdır. Çapı  $1392 \cdot 10^5$  *km*, kütlesi yaklaşık olarak  $1.989 \cdot 10^{30}$  *kg* olarak Dünya'nın kütlesinin 332.950 katıdır. Güneşin kütlesi sıcak gazlardan oluşur ve çevresine ısı ve ışık yayar. Güneş yüzey sıcaklığı yaklaşık olarak 5900 *K* (Kelvin) olan bir foto küre olarak bilinir. Güneş içerisinde bulunan  $\sim 8.9 \cdot 10^{56}$  adet proton yani hidrojen çekirdeğinin füzyon tepkimesinden sonra saniye başına  $3.4 \cdot 10^{38}$  kadarı helyum çekirdeğine dönüşür. Saniye başına  $4.26 \cdot 10^6$  ton madde-enerji dönüşme oranıyla  $3.83 \cdot 10^{26}$  *W* ya da başka bir deyişle  $9.15 \cdot 10^{10}$  mega tona eşdeğer petrol enerjisi açığa çıkar. Açığı çıkan ve enerjisi yüksek olan (kozmetik, gama ve X ışınları) fotonlar fotosentez ile Dünya'daki hayatın devamını sağlayıp Dünya'nın iklimi ve hava durumu üzerinde önemli bir görev üstlenirler (Grozdev, 2010).

### 3.2. Türkiye'nin Güneş Enerji Potansiyeli

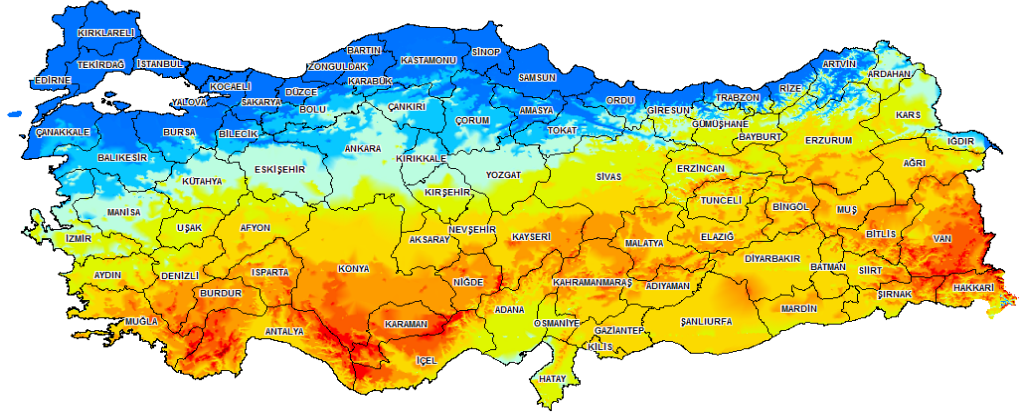
Türkiye,  $36^\circ - 42^\circ$  kuzey paralelleri ile  $26^\circ - 45^\circ$  doğu meridyenleri arasında yer alır. Diğer bir ifadeyle ülkemiz; Ekvator'a göre Kuzey Yarım Küre'de, Greenwich'e göre de Doğu Yarım Küre'de yer alır (Url-2, 2018).

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığınca hazırlanan, Türkiye'nin Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlasına (*GEPA*) göre, yıllık toplam güneşlenme süresi 2.741 saat (günlük

ortalama 7.5 saat), yıllık toplam gelen güneş enerjisi  $1.527 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{yıl}$  (günlük ortalama  $4.18 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{gün}$ ) olduğu tespit edilmiştir. Güneş enerjisi teknolojileri yöntem, malzeme ve teknolojik düzey açısından çok çeşitlilik göstermekle birlikte iki gruba ayrılır. Isıl Güneş Teknolojileri ve Odaklanmış Güneş Enerjisi (*CSP*), Güneş enerjisinden ısı elde edilen bu sistemlerde, ısı doğrudan kullanılabilmesi gibi elektrik üretiminde de kullanılabilir. *FV* güneş elektrikli sistemleri de denilen güneş hücreleri, yarı iletken malzemelerden yapılmış olup, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine çevirirler (Url-3, 2018).

Ülkemizde 2017 yılı sonu itibari ile toplam kurulu güneş kolektör alanı yaklaşık  $20.000.000 \text{ m}^2$ 'ye ulaştığı ve  $823.000 \text{ TEP}$  (Ton Eşdeğer Petrol) ısı enerjisi ürettiği belirlenmiştir. 2017 yılı sonu itibariyle, işletmede bulunan  $3.421 \text{ MW}$ 'lık kurulu güce sahip  $3.616$  adet Güneş Enerji Santrali Türkiye'de toplam kurulu gücün yaklaşık % 4'üne karşılık gelmektedir. Güneş enerjisinden elektrik üretimi 2017 yılında  $2.684 \text{ GWh}$  olarak gerçekleşmiş olup elektrik üretimimizin % 0.91'i güneşten elde edilmiştir (Url-3, 2018).

Şekil 3.2'de Türkiye'nin güneş ışınım haritası verilmiştir (Url-4, 2018). Ülkemizde enlem değeri ve rutubetten kaynaklanan bir sebeple en az ışınım alan bölge Orta ve Doğu Karadeniz Bölgesidir. Karadeniz ile kıyaslandığında Marmara ve Kuzey Ege Bölgesi, güneş ışınımı açısından daha iyi durumdadır. Orta Anadolu, Güney Ege ve Batı Akdeniz Bölgeleri orta derecede ışınım alan bölgelerimizdir. Doğu Anadolu ve Doğu Akdeniz Bölgeleri güneş ışınım değerleri iyi olan bölgelerimizdir. Şekil 3.2'de görüldüğü üzere ışınım değerleri en iyi olan bölgemiz Güney Doğu Bölgesinin doğudaki ucu olan bölgedir. Bu bölge sert ve soğuk iklime sahip olmasına rağmen kış mevsiminde en fazla ışınım alan yerdir. Rakımı çok yüksektir. Havada bulunan su buharının, kar ve yağmur şeklinde yoğunlaşmasından dolayı atmosfer daha temiz ve duru olur. Bu da gelen güneş ışınımının engellenmesini en aza indirir. Şekil 3.3'de verilen haritada güneş ışınım değerlerine göre dört kuşağa ayrılmış bölgelerimiz gösterilmiştir (Aksungur ve ark., 2009).



Şekil 3.2. Türkiye'nin güneş ışınım haritası



Şekil 3.3. TR güneş kuşağı atlası

### 3.3. Güneş Açıları ve Astronomisi

Şekil olarak küresel olan Dünya, kendisinin ve Güneş'in etrafında dönmesi sonucu mevsimler oluşur. Güneş'in bu hareketinden dolayı yıl içinde her gün konumu değişir. Bilim insanları güneşin konumunu belirlemek için güneş açıları kavramını ortaya koymuştur. Bu açılar bilindiği takdirde her hangi bir anda her hangi bir bölgede güneşin pozisyonu rahatlıkla tespit edilebilmektedir. Güneş panellerinden etkin bir şekilde verim alabilmek için bu açıların bilinmesi ve kurulacak olan sistemlerin bu açılara göre tasarlanması gerekir.

Dünya, Güneş yörüngesi üzerinde eksenini  $23.45^\circ$  eğimli olarak dönmektedir. Bu eğim açısı, güneşin yaz ayları boyunca bulut içerisinde kışa nazaran daha yüksek konumda olmasını sağlamaktadır. Bu durum yaz aylarında gündüz saatlerinin uzamasına ve kış aylarında da gündüz saatlerinin daha kısa olmasına sebep olmaktadır (Cheremisinoff, Dickinson, 1980).

Sabit veya hareketli güneş panelleri yüzeyine gelen güneş ışınları, düzlemin bulunduğu yerin enlem, boylam ve o güne ait olan tarih ve gün içindeki zaman dilimiyle değişiklik gösterir (Şenpınar, 2006). Sistemin kurulacağı düzlemin konumu ve eğim açısı güneş panelinin üzerine düşen ışınım değeri üzerinde önemli bir rol oynar. Bundan dolayı güneş konumunu belirleyen bu açılarının bilinmesi gerekir (Yılmaz, 2013).

### 3.3.1. Enlem açısı

Enlem açısı ( $\varphi$ ), yeryüzündeki herhangi bir noktayı Dünya'nın merkeziyle birleştiren doğrunun Ekvator düzlemi ile yaptığı açıdır. Ekvator'un kuzeyinde pozitif değerli; güneyinde ise negatif değerlidir. Enlem açısı  $-90 \leq \varphi \leq 90$  arasında değişir.

### 3.3.2. Deklinasyon açısı

Güneş ışınlarının Ekvator düzlemi ile yaptığı açıya deklinasyon ( $\delta$ ) açısı denir. Dünyanın kendi eksenini, yörünge düzleminin normali arasındaki  $23,45^\circ$ 'lik açıdan dolayı meydana gelir. 21 Haziran gününde  $23,45^\circ$ ; 21 Aralık gününde  $-23,45^\circ$  değerindedir. Ekinoks günlerinde yani 21 Mart ve 23 Eylül günlerinde açı değeri  $0^\circ$ 'dir. Deklinasyon açısının değeri Denklem (3.1)'deki gibi hesaplanır.

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284 + d}{365}\right) \quad (3.1)$$

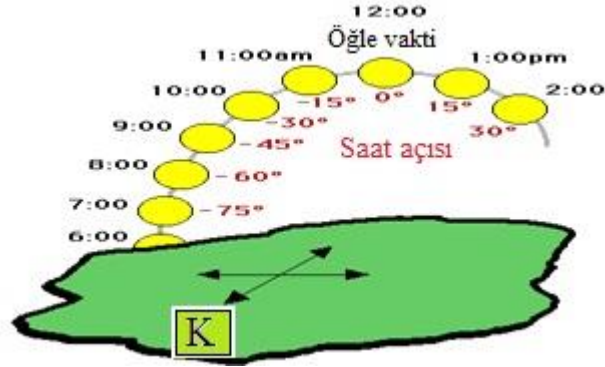
Burada;  $d$  gün sayısıdır. 1 Ocak tarihinden itibaren ( $d=1$ ) olarak hesaplanır.

### 3.3.3. Saat açısı

Saat açısı ( $\omega$ ) güneş ışınlarının bulunduğu boylam ile göz önüne alınan yerin boylamı arasındaki açıdır. Saat açısı her  $15^\circ$ 'de bir değişir. Öğle vaktinde değeri negatif; öğle vaktinden sonra değeri pozitiftir. Güneş öğlesinde,  $GS$  (güneş saati) 12'dir. Güneş öğle vakti ile herhangi bir zaman arasındaki farkın 15 katsayısı ile çarpımı saat açısını verir. 15 katsayısı, dünyanın güneş etrafındaki  $360^\circ$ 'lik hareketinin gün uzunluğu; yani 24'e bölünmesiyle elde edilir. Şekil 3.4'te günün bazı saatlerinde saat açısının değişimi şematik olarak gösterilmiştir.

Saat açısının değeri Denklem (3.2) ile bulunur.

$$\omega = 15 \cdot (GS - 12) \quad (3.2)$$



Şekil 3.4. Saat açısı genel gösterimi

### 3.3.4. Zenit açısı ile güneş yükseklik açısı

Zenit açısı ( $\psi$ ) doğrudan gelen ışınım ile yatay düzlemin normali arasındaki açıdır. Güneşin doğuş ve batış saatlerinde  $90^\circ$ ; güneş ışınlarının dik geldiği öğle vakitlerinde ise  $0^\circ$ 'dir. Zenit açısının hesabı için ilgili yerin enlem açısı, saat açısı ve deklinasyon açısı bilinmelidir.

Zenit açısının değeri Denklem (3.3) ile elde edilir.

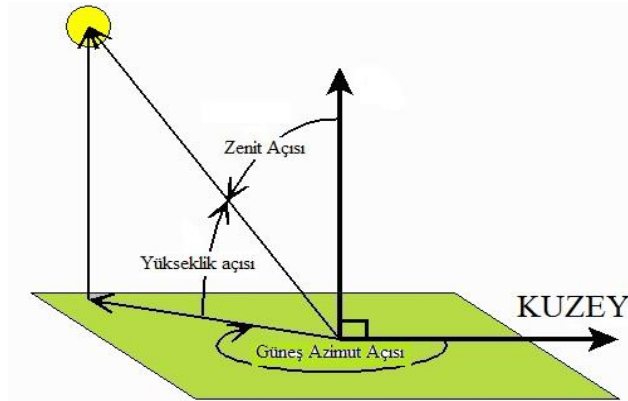
$$\cos(\psi) = \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\delta) \cos(\omega) \quad (3.3)$$

Şekil 3.5'te gösterildiği gibi güneş yükseklik açısı ( $\alpha_s$ ) direkt gelen güneş ışınımı ile yatay düzlem arasındaki açıdır. Bir başka deyişle zenit açısını  $90^\circ$ 'ye tamamlayan açıdır.

Güneş yükseklik açısı aşağıdaki formüllerle bulunabilir.

$$\left. \begin{aligned} a_s &= 90^\circ - \psi \\ \sin(a_s) &= \cos(\psi) \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

$$a_s = \sin^{-1} [\cos(\delta) \cos(\varphi) \cos(\omega) + \sin(\delta) \sin(\varphi)] \quad (3.5)$$

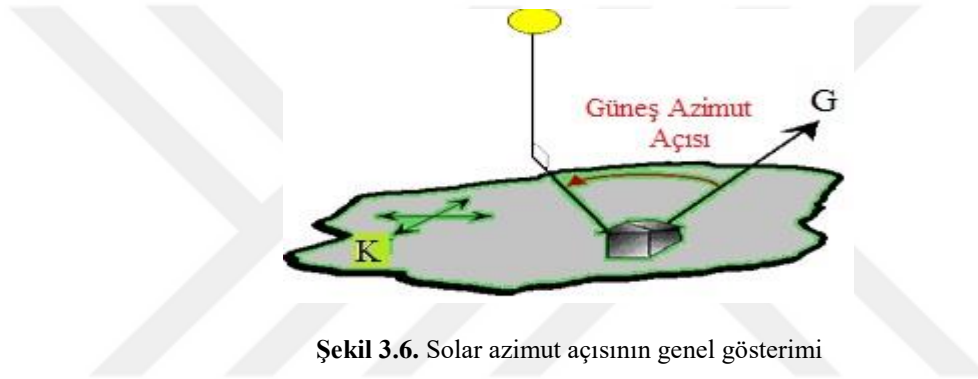


Şekil 3.5. Zenit ve güneş yükseklik açılarının gösterimi

### 3.3.5. Güneş azimut açısı

Şekil 3.6’da gösterildiği gibi Güneş azimut açısı ( $\gamma_s$ ) Güneş-Dünya doğrultusunun yatay düzlemdeki iz düşümünün, kuzey-güney doğrultusu ile yapmış olduğu açıdır. Yani kuzey-güney doğrultusunun, doğrudan güneş ışınımı arasındaki açıdır. Güneş azimut açısı  $-180^\circ$  ile  $180^\circ$  derece arasında değişen bir açıdır. ISO19115 standartına göre jeodezik azimuth açısı kuzeyde (360;0) dereceyle başlayıp, doğuda  $90^\circ$ , güneyde  $180^\circ$ , batıda  $270^\circ$  olarak da gösterilebilir (Kittler ve Darula, 2013). Güneş azimut açısı Denklem (3.6) ile hesaplanır.

$$\sin(\gamma_s) = \frac{-\cos(\delta) \sin(\omega)}{\sin(\psi)} \quad (3.6)$$



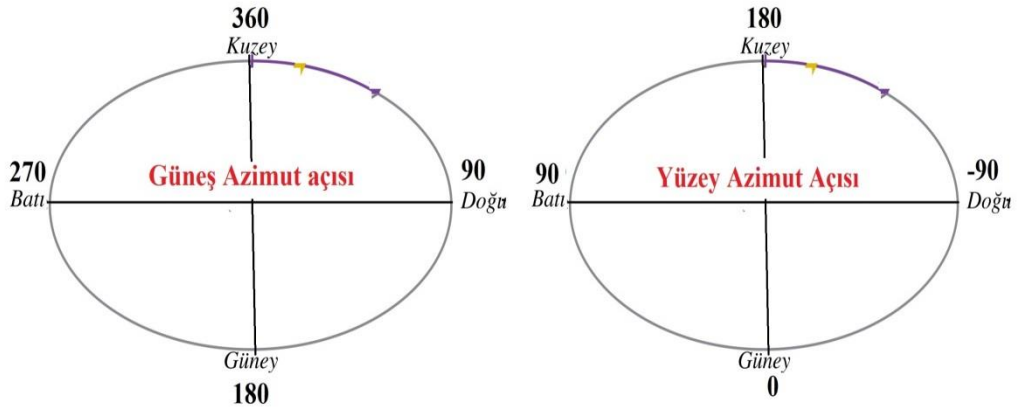
Şekil 3.6. Solar azimut açısının genel gösterimi

### 3.3.6. Yüzey azimut açısı

Yüzey azimut açısı ( $\gamma$ ), yüzeyin dikinin (normalinin) yatay düzlemdeki izdüşümü ile güney doğrultusu arasındaki açıdır. Güneye bakan yüzeyler için sıfır; batıya doğru pozitif; doğuya doğru negatif değerini alır (Abuşka, 2012).

Kuzey yarım kürede bulunan sabit paneller güneye doğru konumlandırılır. Sabit bir FV panel düzleminin yüzey azimut açısı güneye baktığı için sıfır derecedir. Güneş takip sistemleri gibi hareketli panel düzlemlerinde yüzey azimut açısı Denklem (3.7) ile bulunur. Güneş azimut açısı ile yüzey azimut açısı arasındaki ilişki Şekil 3.7’de gösterilmiştir.

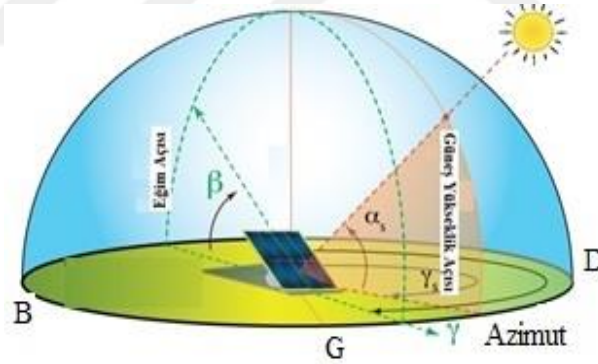
$$\gamma = \gamma_s - 180^\circ \quad (3.7)$$



Şekil 3.7. Güneş azimut açısı ile yüzey azimut açısı arasındaki ilişki

### 3.3.7. Eğim açısı

Eğim açısı ( $\beta$ ) eğik yüzeyin yatay zeminle yaptığı açıdır. *FV* panellerden en iyi verimi alabilmek için belli bir eğim açısına konumlandırılmaları gerekir. Şekil 3.8’de güneye bakan eğik bir *FV* panelin eğim açısı ile diğer güneş açılarının genel gösterimi verilmiştir.

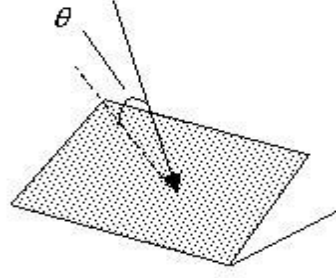


Şekil 3.8. Eğim açısı ve diğer güneş açılarının genel gösterimi

### 3.3.8. Güneş geliş açısı

Güneş geliş açısı ( $\theta$ ), herhangi bir yüzeye gelen güneş ışınımı ile o yüzeyin normali arasındaki açıdır. Yüzeye gelen ışınımın geliş açısı sıfır derece ise ışınım yüzeye diktir anlamına gelir. Güneş takip sistemlerinde bu açının sıfır ya da sıfıra yakın olması sağlanır. Şekil 3.9’da eğik bir yüzeye gelen, güneş geliş açısı gösterilmiştir.





**Şekil 3.9.** Eğik bir yüzeye gelen güneş geliş açısı

Güneş geliş açısı Denklem (3.8) ile hesaplanır.

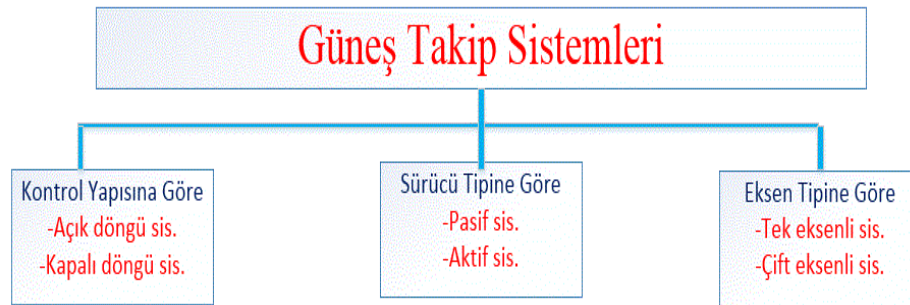
$$\cos \theta = \sin(\delta) \sin(\varphi) \cos(\beta) - \sin(\delta) \cos(\varphi) \sin(\beta) \cos(\gamma) + \left. \begin{aligned} &+ \cos(\delta) \cos(\varphi) \cos(\beta) \cos(\omega) + \cos(\delta) \sin(\varphi) \sin(\beta) \cos(\gamma) \cos(\omega) + \\ &+ \cos(\delta) \sin(\beta) \sin(\gamma) \sin(\omega) \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

Burada  $\theta$  güneş geliş açısı,  $\delta$  deklinasyon açısı,  $\beta$  panel eğim açısı,  $\varphi$  panelin bulunduğu yerin enlem açısı,  $\gamma$  yüzey azimut açısı,  $\omega$  saat açısıdır.

## 4. GÜNEŞ TAKİP SİSTEMLERİ (GTS)

Güneş takip sistemleri, *FV* panellerden en verimli şekilde enerji üretmek için gün boyunca güneş ışığını takip edecek şekilde tasarlanan sistemlerdir. Bu bağlamda düşünüldüğünde çalışma yapıları ayçiçeklerine benzetilebilir. İlk solar takip mekanizması 1927 yılında C. Finster tarafından tanıtılmıştır. Bu sistem gerçek zamanlı takip yapabilen, güneşin konumunu tespit etmek için zayıf bir sistem idi. Daha sonra güneşin konumunu otomatik olarak tespit eden bir sistem 1963 yılında A. Saavendra tarafından yapılmıştır. 1975 yılına gelindiğinde Raymond H. Mcfee tarafından güneşin konumu  $0.5^\circ$  ile  $1^\circ$  hata farkıyla, ayna kullanılarak tespit edilmiştir. İlk ticari amaçlı tasarlanan güneş takip sistemi 1980 yılında Mark E. Dorian ve David H. Nelson tarafından tanıtılmıştır. Tanıtılan sistem, kollektörler ile gelen güneş ışınımının aynı yerde toplanması esas alınarak tasarlanmıştır. Mikroişlemci tabanlı ilk güneş takip sistemi 1981 yılında Semma ile Imamura tarafından gerçekleştirilmiştir. Bilgisayar programlı güneş konumunu tespit eden ilk algoritmalar 1983 yılından Maldonado tarafından ortaya atılmıştır (Singh ve ark, 2018). Bu çalışmalar doğrultusunda güneşten en uygun şekilde enerji verimi elde etmek için çeşitli güneş takip yöntemleri kullanılmıştır.

Şekil 4.1’de gösterildiği gibi güneş takip sistemleri 3 ana başlıkta incelenebilir; Bunlar kontrol yapısına göre, sürücü tipine göre ve eksen tipine göre sınıflandırılabilir.



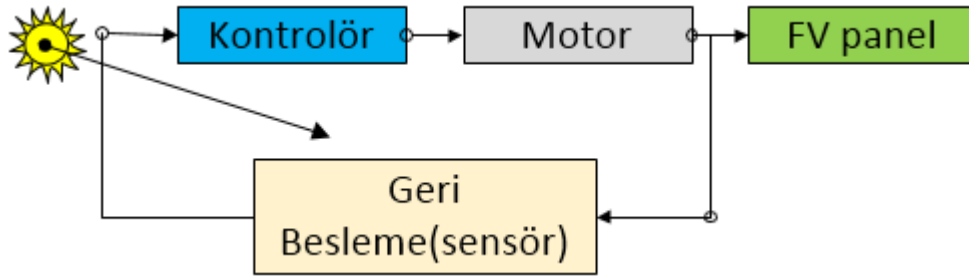
Şekil 4.1. Güneş takip sistemlerinin genel sınıflandırılması

### 4.1. Kontrol Yapısına Göre GTS

GTS’lerde kontrol yapısına göre açık çevrim kontrollü ile kapalı çevrim kontrollü olmak üzere iki tür kontrol yapısı bulunmaktadır.

#### 4.1.1. Kapalı çevrim kontrol

Kapalı çevrim kontrol geri besleme prensibine göre çalışır. Yani sistemde bulunan sensörler yardımıyla çıkış verisi girişe aktararak, güneş panelinin konum kontrolü yapılır. Güneşin konumunu tespit eden sensörlerdeki bilgiler bir kontrolör yardımıyla işlenerek panel güneşe yönlendirilir. Şekil 4.2’de kapalı çevrim kontrol yapısının genel gösterimi verilmiştir.



Şekil 4.2. Kapalı çevrim kontrol yapısının genel gösterimi

#### 4.1.2. Açık çevrim kontrol

Açık çevrim yapısına göre çalışan sistemlerde çıkış bilgisi girişe verilmez. Bu kontrol yapısında sistemde herhangi bir sensör kullanılmaz. Sistemin girişine zaman ve tarih bazlı veriler girilir ve güneş konumunu tespit eden çeşitli algoritmalar kullanılarak güneş takibi yapılması sağlanır. Kapalı çevrim ile kıyaslandığında daha ucuz ve daha basittir. Ancak algoritmanın yeterince sağlıklı çalışıp çalışmadığını tespit etmek ciddi bir ön çalışma gerektirir. Kontrol edinilen sistemin çıkış verisi gözlemlenmediği için sistemin güneşi takip edip etmediği konusunda endişeler vuku bulur (Walter ve ark., 2018). Şekil 4.3’de açık çevrim kontrol yapısının genel gösterimi verilmiştir.



Şekil 4.3. Açık çevrim kontrol yapısının genel gösterimi

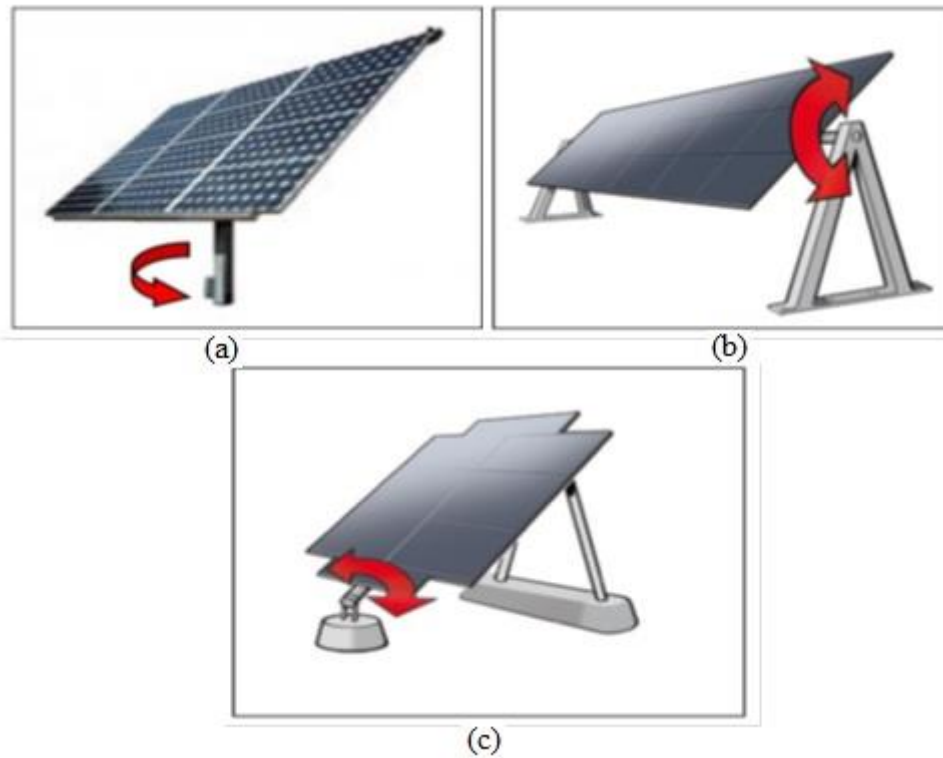
#### 4.2. Eksen Tipine Göre GTS

GTS’lerden en uygun şekilde verim alabilmek için tek eksenli ya da çift eksenli olarak kullanılmaları gereklidir. Çift eksenli sistemler tek eksenli sistemlere göre daha

karmaşık ve maliyetli olmasına karşın panellerden en iyi şekilde verim elde etme konusunda daha kullanışlıdır.

#### 4.2.1. Tek eksenli güneş takip sistemi

Tek eksenli güneş takip sistemleri, tek eksenle (dikey, yatay) hareket ederek güneş takibi yapar. Genellikle yıl içerisinde belli aralıklarla eğim açısı manuel olarak ayarlanıp, doğu-batı yönünde otomatik hareket sağlanır. Tek eksenli sistemler çift eksenli sistemlere göre maliyet açısından daha ekonomiktir ama verimlilik açısından daha düşük verime sahiptir. Tek eksenli sistemler güneşin yörüngesi ve havanın durumuna bağlı olarak dikey ya da yatay eksenle hareket ettirilir. Şekil 4.4 (a)'da azimut açısını takip eden tek eksenli izleyici; 4.4 (b)'de yatay eksenli takip yapan tek eksenli izleyici; 4.4 (c)'de dikey eksenli takip yapan tek eksenli izleyici şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Tek eksenli güneş takip sistemi mekanizmalarının gösterimi

#### 4.2.2. Çift eksenli güneş takip sistemi

Çift eksenli sistemler hem yatayda hem de düşeyde iki eksenli hareket edebilme mekanizmasına sahip sistemlerdir. Tek eksenli sistemlere göre daha karmaşık ve daha pahalı olmasına rağmen gerekli donanımlar ve iyileştirmeler sonucunda enerji üretimi

açısından daha verimli olabilirler. Şekil 4.5'te çift eksende takip yapabilen bir izleyici sistemi gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Çift eksende takip yapan izleyici sistemi

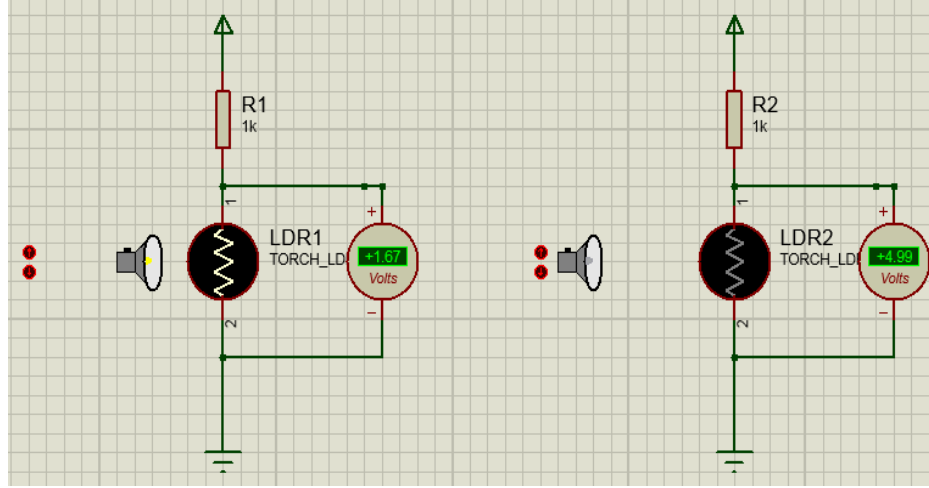
### 4.3. Sürücü Tipine Göre GTS

Sürücü tipine göre GTS, Aktif GTS ile Pasif GTS olarak iki ana başlığa ayrılır.

#### 4.3.1. Aktif güneş takip sistemleri

Aktif güneş takip sistemleri sensör, motor, denetleyici gibi elektronik aksamlar kullanılarak gün boyunca otomatik olarak güneş ışınlarının panele dik gelmesini sağlayan sistemlerdir. Tahrik mekanizması olarak *DC* motorlar, servo motorlar, redüktörlü motorlar, lineer aktüatörler ve dişli sistemler kullanılır. Denetleyici olarak mikroişlemci tabanlı kontrol kartları veya *PLC* kullanılabilir. Sensör olarak ışığa duyarlı algılayıcılar veya küçük güneş pilleri kullanılır. Çeşitli şekilde tasarlanan sensörler panelin ön tarafına konumlandırılır. Sensörler ışığa duyarlı oldukları için ışığın yoğun olduğu taraftan gelen sinyallere göre bir denetleyici vasıtasıyla paneli ışığa yönlendirecek motorları uyararak güneşe yönelme sağlanır.

Işığa duyarlı sensör tipleri *LDR*'ler ve küçük güneş pilleridir. *LDR*, aydınlık ile karanlık ortamda farklı direnç özellikleri gösterir. Değişen direnç özelliği içerdiği gerilim bölücü devrede değişken gerilim çıkışları verir. Bu voltaj farklılıkları bir algoritmayla kontrolörde değerlendirilerek güneş konumu tespit edilir. *LDR* sensörleri çevresel etkenlerden, güneş ışığı dışındaki ışınım huzmelerinden ve toz zerreciklerinden kolayca etkilenerek zamanla yanlış ölçümlere neden olabilir. Şekil 4.6'da *LDR* devresinin aydınlık ve karanlık durumlardaki tepkisi gösterilmiştir.



Şekil 4.6. LDR devresinin aydınlık ve karanlık durumlardaki tepkisi

Küçük güneş pilleri de sensör olarak kullanılabilir. Küçük güneş pilleri üzerlerine düşen güneş radyasyonuna bağlı olarak farklı gerilim değeri üretirler. Aynı *LDR* sistemindeki gibi bu gerilim farklılıklarından kaynaklanan sinyallere göre denetleyici yardımıyla panel güneşe yönlendirilir. Bu amaçla tasarlanan sensörler kesik piramit şeklindedir. Şekil 4.7’de gösterildiği gibi kesik piramidin, her bir yan yüzeyine küçük güneş hücreleri konumlandırılır. Kesik piramidin kuzey-güney ve doğu-batı yönünde yerleştirilmiş küçük güneş pilleri ile güneşin yön tayini yapılır (Eren, 2010).



Şekil 4.7. Küçük güneş pillerinden oluşturulmuş solar göz sensör düzeneği

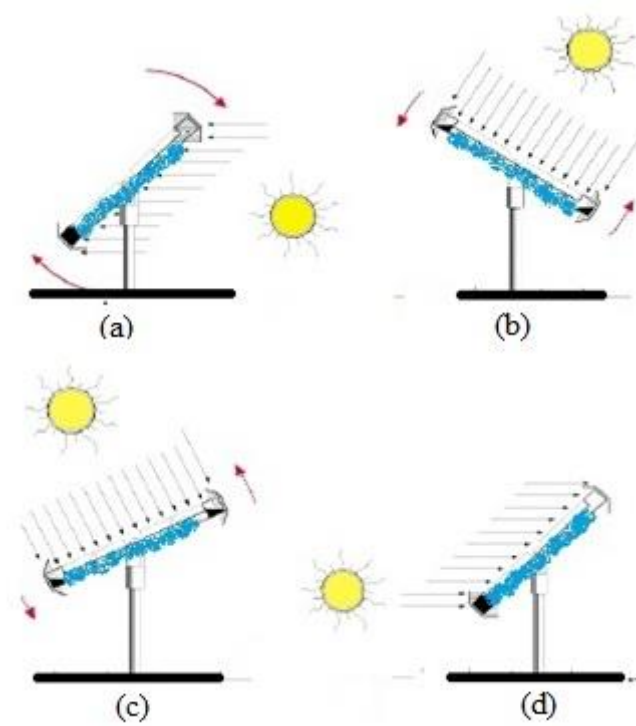
#### 4.3.2. Pasif güneş takip sistemleri

Pasif güneş takip sistemlerinde panelin güneşe doğru yönlendirilmesi tahrik mekanizması olmadan sağlanır. Pasif güneş takip sistemleri termo-hidrolik aktüatör, çift-

metalli termal aktüatör ve biçim belekli alaşımlar ile kategorize edilebilir (Singh ve ark., 2018).

Pasif sistemlerde genellikle bir kimyasal maddenin (freon) genişmesinden kaynaklanan durumlar söz konusudur. İki özdeş silindirik tüpün her biri panelin karşılıklı kenarlarına kısmi basınç altında bir sıvı ile doldurulur. Güneş ışığının geldiği taraftaki sıvı ısınarak genişir ve bir tüpten diğerine sıvı akışı gerçekleşir. Bu sayede dengede duran güneş panelinin ağırlık merkezi, paneli güneşe yönlendirecek şekilde yer değiştirir. Sistem aktif sistemlere göre basit, düşük maliyetli ancak yavaştır. Hava şartlarına bağlı olarak düşük sıcaklıklarda çalışmama durumu söz konusudur (Clifford ve Eastwood, 2004).

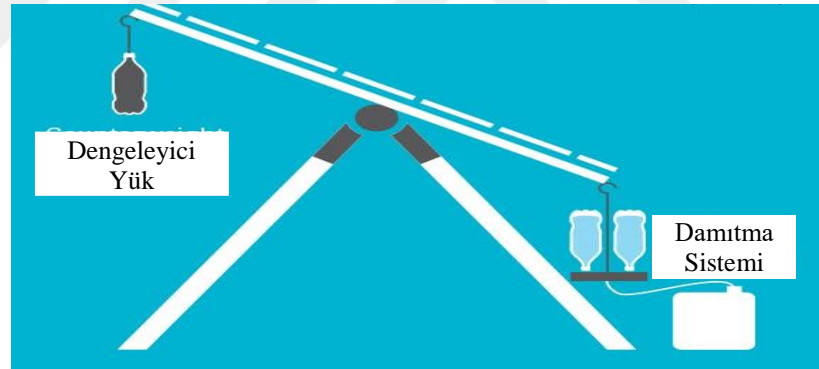
Şekil 4.8’de güneş takibi yapan pasif bir izleyici sistemi gösterilmiştir. Şekil 4.8 (a)’da panel gün sonunda batıya yönelmiş olarak kalmış ve sonraki gün doğumunda alt taraftaki tüpe daha fazla güneş ışınımı gelmekte ve tüp içindeki sıvı genişerek diğer kaba doğru çıkmaktadır; (b) güneş ışınlarının geliş açısı her iki tüpe eşit gelinceye kadar panel dönmektedir; (c) güneş batıya döndükçe panel de güneşi takip etmektedir; (d) gün batımında panel güneşin battığı tarafta kalır (Bilgin, 2006).



Şekil 4.8. Güneş takibi yapan pasif bir izleyici sistemi

Poulek (1994) yapmış olduğu SMA (biçim bekleli alaşım) aktüatörlü tek eksenli hareket eden bir sistem tasarlamıştır. SMA aktüatörünün nispeten düşük sıcaklıklarda ( $<70^{\circ}\text{C}$ ) kolay deforme olup ısıya dayalı pasif bir tahrik mekanizması olarak çalıştığını göstermiştir. Sıcaklık aktüatörün dönüşüm sıcaklığının üstüne çıkması durumunda, sistemin eski haline geri geldiği ve bu termal döngüler sırasında SMA'nın bir ısı motoru gibi çalıştığını belirtmiştir. Aktüatörün verimliliğinin % 2 olduğu ve çift metalli termal alaşımlı aktüatörlerden iki kat daha büyük olduğunu belirtmiştir (Poulek, 1994).

Şekil 4.9'da gösterildiği gibi Sansaluter isminde bir organizasyon birkaç plastik şişe ve içindeki su ile damıtma yöntemi kullanarak hem temiz su ihtiyacını karşılamak hem de tek eksenli güneş takibi yapan pasif bir güneş takip sistemi geliştirmişlerdir. Sistemin yerçekimi ve suyun gücünü kullanarak güneş panelinden % 30 enerji verimliliği ile beraber dört litre temiz su ihtiyacını karşıladığı belirtilmiştir. Söz konusu pasif sistemin geleneksel aktif sistemlere göre 30 kat daha ucuz olduğu, güvenilir ve elektrik enerjisi harcamayan bir sistem olarak karşımıza çıktığı öne sürülmüştür (Url-5, 2018).



Şekil 4.9. Sansaluter damıtma sistemi ile pasif bir şekilde güneş takibi yapan düzenek

İşlem sırası olarak;

1. Panelin bir tarafına dört litre su ile dolu iki adet su şişesi diğer tarafa da dengeleyici bir su şişesi konur.
2. Güneşin hareketine bağlı olarak damıtılma sisteminin hız ayarı yapılır. Bu sayede su damıtılarak temiz su başka bir kaba aktarılır ve ağırlık merkezi de değişir.
3. Gün sonunda tamamen damıtılan su bir kaba aktarılmış olur ve sistem dengeleyici yük tarafına kayar.



## 5. DENEY DÜZENİĞİNİN KURULMASI

Bu bölümde deneysel amaçla tasarlanmış olan *GTS* ve sabit sistem hakkında genel bilgiler verilmiştir. Sistemin kurulum aşaması ve sistemde kullanılan malzemeler tanıtılmıştır. 6. bölümde ise 5. bölümde kullanılan sistemlerin blok modelleri bilgisayarda benzetim ortamında oluşturularak icra edilmiştir.

### 5.1. *GTS* Tasarımı

#### 5.1.1. Sistemin tahrik mekanizması için aktüatör seçimi

*GTS* sistemlerinde genellikle *AC* indüksiyon motor, sabit mıknatıslı fırçalı *DC* motor, fırçasız *DC* motorlar, servo motorlar, step motorlar, redüktörlü motorlar ile doğrusal (lineer) aktüatörler (actuator) kullanılır.

*GTS*'lerde kontrol edilmesi gereken açılar yüzey azimuth ile güneş yükseklik açısıdır. Güneş yükseklik açısı ile panelin eğimi ayarlanır. Bunun için içerisindeki *DC* motor sayesinde doğrusal hareket etmeyi sağlayan ve itme-çekme gibi işlemlerde çok iyi performans gösteren lineer aktüatörler kullanılır. Azimuth hareketini sağlamak amacıyla sonsuz dişli redüktörler kullanılır. Azimuth açısının ayarlanması için sonsuz dişli redüktörlü aktüatör kullanılmasının, hareket hassasiyeti ve dönme açısının çok net ayarlanması gibi avantajları olsa da daha fazla bakım, parça ve maliyet gerektirdiğinden bunların yerine de lineer aktüatör kullanılabilir.

Bu tez çalışmasında tasarlanan sistemde paneli kuzey-güney ve doğu-batı yönünde yönlendirmek için iki adet lineer aktüatör kullanılmıştır. Kuzey-güney yönlendirmesi ile eğim açısı ayarlanmıştır. Doğu-batı yönlendirmesiyle panelin, doğu-batı açısının değişimine bağlı olarak yüzey azimuth açısı değişmektedir. Bu sayede güneş takibi sağlanmıştır.

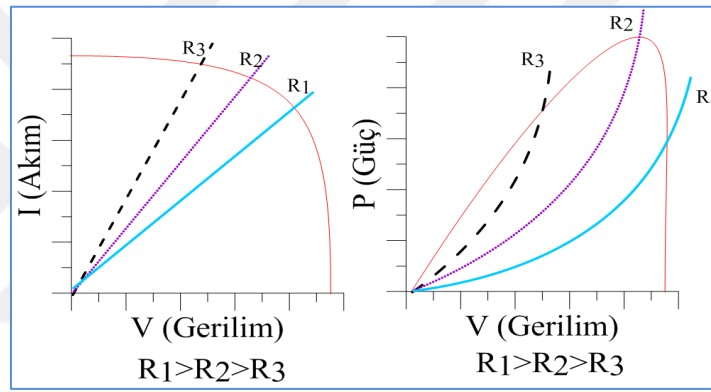
#### 5.1.2. Fotovoltaik panel seçimi ve yük direncinin belirlenmesi

Söz konusu deneysel düzenek, maliyet ve lineer aktüatörlerin uzunluğu ile ilişkili gereksinimler hesaba katıldığında  $100 \times 70$  cm<sup>2</sup> yüzey alanına sahip olan 100 W (Watt) gücünde bir *FV* panel kullanılmıştır.

Panelin çıkışındaki gerilim, akım değerlerinin okunması için panel çıkışına bir yük direncinin bağlanması gerekir.

Şekil 5.1’de görüldüğü gibi bir *FV* panelin akım-gerilim (*I-V*) ile güç-gerilim (*P-V*) grafikleri verilmiştir. Grafiklerden de anlaşılacağı üzere *FV* panelin çıkışındaki *I-V* ve *P-V* lineer olmayan karakteristik özelliğe sahiptir. Farklı direnç değerleri farklı güç noktaları sağlamaktadır. Her ne kadar güneş takip sistemlerinde en uygun güç çıkışı sağlanmak istense de panellerin lineer olmayan karakteristik özelliklerinden dolayı üretilen gücün yüke maksimum şekilde aktarılması gerekir. Bunun için *FV* panelin çıkışındaki gücün yüke maksimum şekilde yansımını sağlayan *MPPT* (maksimum güç noktası izleyicileri) tasarlanır.

Şekil 5.1’de görüldüğü gibi  $R_2$  direncine sahip olan yükün harcadığı güç  $P_{max}$  yani gücün maksimum olduğu nokta olarak belirlenir. Yükün maksimum olduğu noktada akım ve gerilim değerleri de maksimumdur.



Şekil 5.1. *I-V* ve *P-V* eğrileri üzerinde bulunan farklı direnç değerlerindeki yük eğrilerinin gösterimi

$$P_{max} = I_{max} \cdot V_{max} \quad (5.1)$$

Kullanılan *FV* panelde  $I_{max}=5.65$  A (Amper),  $V_{max}=17.7$  V (Volt) değerlerine sahiptir. Dolayısıyla ohm yasası uygulandığında  $R_y$  direnci (nominal koşullarda  $1000 \text{ W/m}^2$   $25^\circ\text{C}$ 'deki yük direnci)  $R_y=V_{max}/I_{max}=17.7/5.65=3.13 \text{ } \Omega$  olarak bulunur.  $100 \text{ W}$  gücünde  $3.13 \text{ } \Omega$  (ohm) değerinde piyasada taş direnç olarak adlandırılan bir direnç veya alüminyum kaplamalı bir direnç kullanılması gerekir. Bu çalışmada deneysel olarak incelenecek sistemde yük direnci  $3.3 \text{ } \Omega$  olarak belirlenmiştir. Piyasada  $3.13 \text{ } \Omega$  değerinde sabit direnç bulunmadığından ve deneysel ortamın nominal koşulları sağlamadığı (ışınım şiddeti daha düşük, sıcaklık daha yüksek) düşünülürse  $3.13 \text{ } \Omega$  değerine en yakın ve büyük olan  $3.3 \text{ } \Omega$  değerinde bir direnç kullanılabilir.

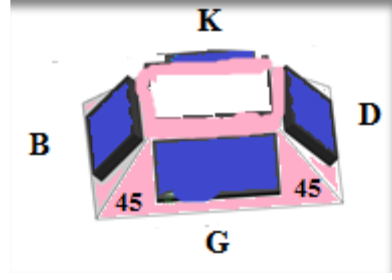


Şekil 5.2. Alüminyum kaplamalı 100 W 3.3  $\Omega$  değerindeki yük direnci

### 5.1.3. GTS sensör (solar göz) düzeneğinin tasarımı

*GTS*'de genellikle *LDR* gibi foto dirençler kullanılır. *LDR*'lerle oluşturulan sensör düzeneğinin her tarafı aynı miktarda ışık alacak şekilde panel hareketi sağlanır. Tek eksenli sistemler için iki adet, çift eksenli sistemler için en az dört adet kullanılmaları gerekir. Bu tür sensörlerin güneş haricinde daha aydınlık ama daha düşük radyasyon değerine sahip başka bir ışınım kaynağına yönelmeleri söz konusu olabilir. Güneş panelleri ile beraber kullanıldığı düşünüldüğünde ömürleri güneş panelleri kadar uzun olmadığından, uzun ömürlü ve büyük sistemler için ileride bakım ve onarım masrafları doğuracaktır. Sıcaklığa bağlı olarak hassasiyetleri bozular. Aşırı ısı altında sağlıklı çalışmazlar ki bu durum güneşin doğuşundan batışına kadar güneş takibi yapan bir sistem için kaçınılmaz bir durumdur (Eren, 2010).

Bu tez çalışmasında, dezavantajları bulunan *LDR* sensör düzeneğinin yerine küçük güneş pilleri ile tasarlanmış bir solar göz sensör kullanılmıştır. Güneş pilleri, üzerlerine düşen güneş ışınım şiddetine bağlı olarak farklı gerilim değerleri verirler. *LDR*'nin aksine gerilim bölücü devreleri, güç beslemesi gibi ek donanımlar gerektirmediği için daha kullanışlı ve daha basit bir yapıya sahiptirler. Sensör tasarımı yapılırken kuzey-güney yönü için iki adet; doğu-batı yönü için de iki adet olmak üzere toplam dört adet küçük güneş pili kullanılmıştır. Şekil 5.3'te gösterildiği gibi 45° açılarla karşılıklı olarak yerleştirilmiş olan dört adet güneş pilinin bir araya gelmesi ile beraber kesik piramit şeklini andıran bir görüntü ortaya çıkar. Tasarlanan solar göz düzeneği Şekil 5.4'te gösterildiği gibi *FV* panelin orta üst noktasına monte edilmiştir.



Şekil 5.3. Solar göz sensör düzeneğinin genel gösterimi



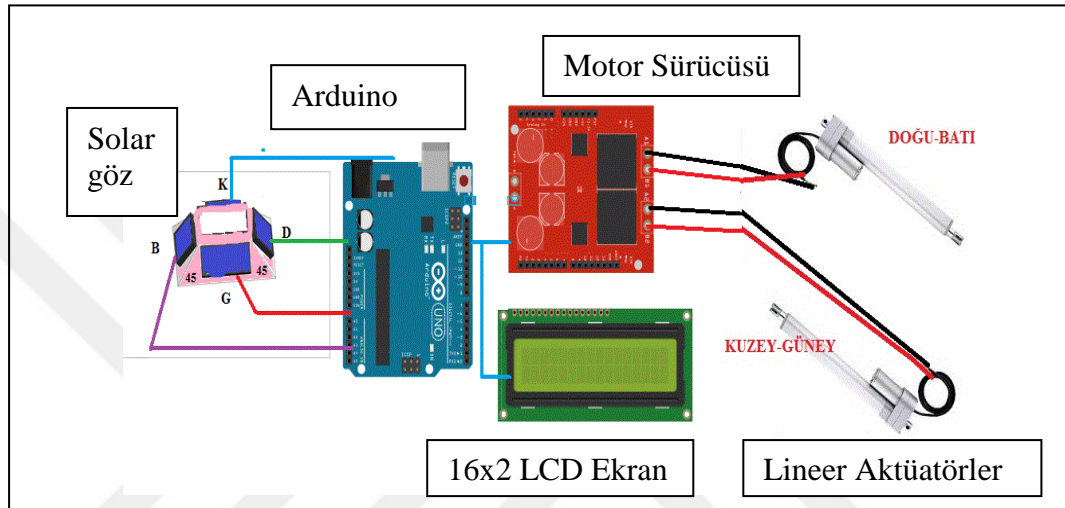
Şekil 5.4. Solar göz sensör düzeneğinin FV panel üzerine yerleştirilmesi

#### 5.1.4. GTS kontrol kartı tasarımı

*GTS* kontrol kartı üzerindeki denetleyici, motor sürücü kartı ve anlık bilgileri göstermek için 16×2'lik bir *LCD* ekran bulundurur. *LCD* ekran, sensörlerden gelen anlık gerilim bilgilerini, güneşin yönünü ve panelin hangi yöne dönmesi gerektiği gibi uyarıları göstererek sistemin doğru çalışıp çalışmadığını görsel olarak kullanıcıya izleme fırsatı sunar. Sistemin çalışma yapısı genel olarak sırasıyla solar gözden gelen bilgilerin denetleyiciye aktarılması, denetleyicinin motor sürücü kartı üzerinden lineer aktüatörleri uarması ve aktüatörlerin uzunluklarının değişmesiyle panelin yükseklik ve azimuth açılarının değişmesi olarak açıklanabilir.

Denetleyici olarak, kullanımı kolay, çevresel birimleri gelişmiş ve en önemlisi açık kaynak kodlu bir platform olduğu için Arduino kartı tercih edilmiştir. Ana işlemci birimi ATmega tabanlıdır. Arduino kartı, bilgisayar ile seri port arasında haberleşme sağlanarak Arduino IDE programlama ara yüzü ile kolayca programlanabilir. Genellikle elektronik ve robotik uygulamalarında bu kart kullanılır.

Düzenekte iki adet motoru birbirinden bağımsız olarak sürebilen bir motor sürücü kartı kullanılmıştır. Motor sürücü kartı üzerinde iki adet *VNH2SP30* entegresi bulunur. Kart 30 Ampere kadar dayanıklı ve maksimum 16 V besleme gerilimine sahiptir. Akım hassasiyeti Arduino analog pinine uygundur. Güneş takibi esnasındaki panel döndürme, yükseltme ve alçaltma işlemleri yapılırken oluşabilecek ani yüksek akımlara karşı koruma sistemine sahiptir. Şekil 5.5'te güneş takip sisteminde kullanılan elemanların genel gösterimi verilmiştir.



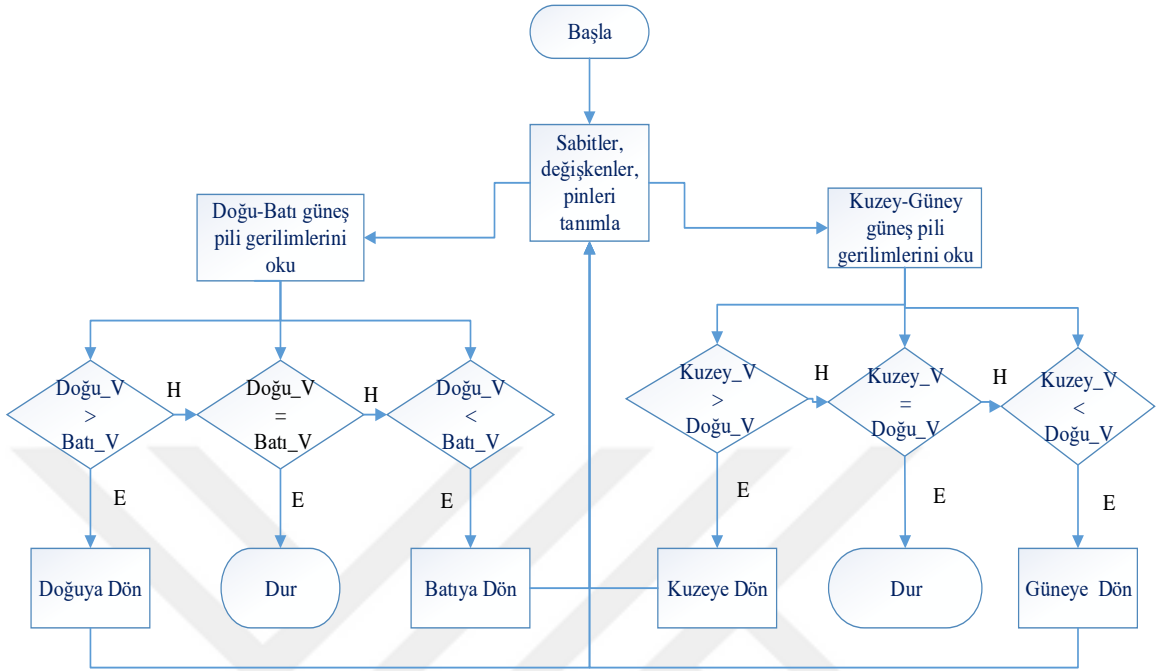
Şekil 5.5. Güneş takip sisteminde hareketi sağlayan genel sistemin gösterimi

### 5.1.5. GTS kontrol algoritması

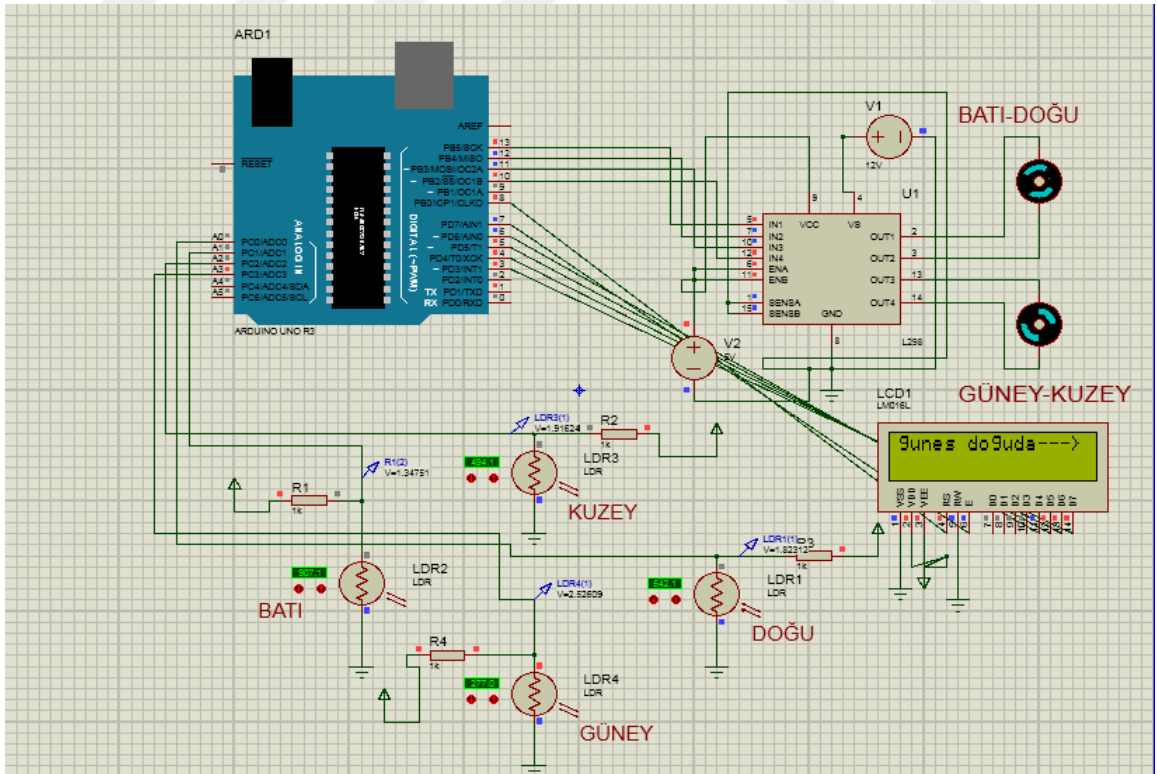
*GTS* kontrol algoritması için akış diyagramı Şekil 5.6'da verilmiştir. Arduino solar gözden sinyaller alır. Alınan sinyaller işlenerek güneş ışığının en yoğun olduğu açı tespit edilir ve motor sürücüsü girişine gerekli lojik bilgiler gönderilir. Bu sayede panel ışığa yönlendirilmiş olur.

Kullanılan denetleyici yazılımının testi Şekil 5.7'de gösterilen Proteus benzetim ortamında gerçekleştirilmiştir. Benzetim ortamında Arduino kartının, temsili motor sürücü kartının, lineer aktüatörleri temsilen *DC* motorların model blokları da kullanılmıştır. Proteus kütüphanesinde güneş pili olmadığı için ışığın şiddetine göre değişen direnç değerlerine bağlı olarak farklı voltaj çıkışları veren *LDR* devresi kullanılmıştır. *LDR*'den gelen analog yapıya sahip gerilim verileri Arduino'nun analog veri girişlerine bağlanır. Arduino IDE ara yüzünde yazılan ve Arduino'ya gömülen program bu verileri işleyerek paneli güneşi çevirmek için çıkışına bağlanılan motor sürücü kartına veriler gönderir. Motor sürücü kartı lineer aktüatör motorlarını bu verilere göre sürerek paneli güneşe yönlendirir. Sisteme aynı zamanda, sistemin durumu hakkında

bilgi veren bir *LCD* ekran eklenmiştir. Bu sayede kullanıcı, sistemin doğru işleyip işlemediğini görsel olarak görme imkânına sahip olur.



Şekil 5.6. GTS kontrol algoritmasının akış diyagramı



Şekil 5.7. GTS kontrol sisteminin Proteus/ISIS programında benzetiminin gerçekleştirilmesi

### 5.1.6. GTS giriş ve çıkış parametrelerinin ölçümü

Deneysel *GTS* düzeneğinde panel çıkışındaki yük direnci üzerindeki akım ve gerilimin ölçümü için sayısal gerilim-akım ölçer kullanılmıştır. Gelen güneş ışınım şiddetini  $W/m^2$  cinsinden ölçen cihaz piranometredir. Panel yüzeyindeki sıcaklık değerleri için  $^{\circ}C$  cinsinden ve temassız ölçüm yapabilen bir sıcaklık ölçer kullanılmıştır.

Panel verim hesabı için panelin çıkış gücünün bilinmesi gerekir. Panelin çıkışına bağlanan  $100\ W$  ve  $3.3\ \Omega$  değerindeki sabit yük direnci üzerine düşen güç bir güç ölçer (Wattmetre) ile ölçülebilir. Ancak sistem çıkış değişkenlerinden akım ve gerilim değerlerinin bir avometre ile ölçümü yapıldığı takdirde  $P=I \cdot V$  formülü ile anlık güç hesabı yapılabilir. Dolayısıyla deneysel düzende hem sabit sistem için hem de hareketli sistem için gerilim ve akım ölçümlerinde avometre kullanılması yeterli görülmüştür. Verim hesabı için hem sabit sistemden hem de hareketli sistemden 10 dakikada bir alınan ölçüm değerleriyle elde edilen güç değerleri kullanılmıştır. 6. Bölümde tartışılacak olan *GTS* benzetimi ve deneysel verilerin karşılaştırması için deneysel düzenden 30 dakikada bir alınan gerilim, akım, panel yüzey sıcaklığı ve gelen güneş ışınım şiddeti değerleri kaydedilmiştir.

Sistemin giriş değişkenlerinden biri panel yüzeyine düşen güneş ışınım şiddetidir. Işınım şiddetinin ölçümünde kullanılan piranometreler prensip olarak ışınımı tutma ve yansıtma özelliğine göre çalışırlar. Üzerlerinde birer beyaz ve siyah yüzeyli kısım bulunur. Siyah yüzey gelen ışınımı yutar ve dolayısıyla siyah yüzey sıcaklığı yükselir. Bundan dolayı ışınımı yansıtan beyaz yüzeye göre sıcaklık farkı oluşur. Bu sıcaklık farkından dolayı bir elektriksel potansiyel meydana gelir.  $10-20\ mV$  arasında değişen bu elektriksel potansiyelin belli zaman aralıklarında integrali alındığında  $W/m^2$  cinsinden global radyasyon değeri ölçülmüş olur. Yatay yüzeye düşen toplam ışınım değerinin ölçümü için sensör yüzeye yatay olarak yerleştirilmesi gerekir (Url-6, 2018).

Sistemin bir başka giriş değişkeni olan panel yüzey sıcaklığı ölçümü için, temassız ölçüm yapabilen bir kızılötesi sıcak ölçer kullanılmıştır. Kızılötesi sıcaklık ölçer seçerken dikkat edilmesi gereken önemli husus sıcaklık ölçümü yapacağımız nesnenin sıcaklık aralığı ile ne kadar mesafede ölçüm yapacağımızdır. Şekil 5.8 (a)'da piranometre ile gelen güneş ışınım şiddetinin ölçülmesi, (b)'de temassız lazerli sıcaklık ölçer ile panel yüzey sıcaklığının ölçülmesi gösterilmiştir.



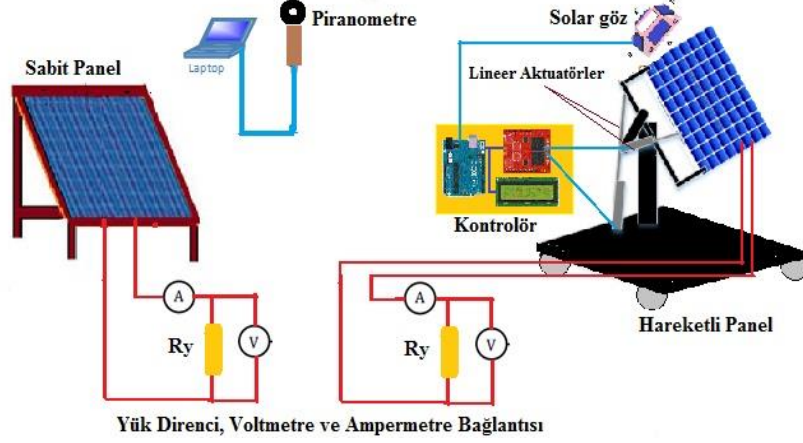
(a) (b)  
**Şekil 5.8.** Deneysel düzeneğin giriş değişkenlerinin ölçümü

### 5.1.7. Deney sisteminin genel gösterimi

Deney sisteminin genel gösterimi Şekil 5.9’da gösterilmiştir. Sabit panel  $30^\circ$  eğim açısıyla yerleştirilmiştir. Panel açısı, sistemin bulunduğu yerin enlemine, mevsimine ve güneş ışınım şiddetine göre belirlenir. Sistem, Siirt ili, Siirt Üniversitesi Kezer yerleşkesinde deneysel olarak incelendiğinden, Siirt ilinde kurulan güneş santrallerinin panel eğim açıları ve Siirt ilinin koordinat bilgileri göz önüne alınarak panel eğim açısının yaklaşık olarak  $30^\circ$  alınması uygun görülmüştür.

Tasarlanan hareketli sistem, tek veya çift eksenli hareket yapabilecek şekilde tasarlanmıştır. Sistemin tek eksenli olarak kullanılabilmesi için kuzey-güney aktüatörünün manuel olarak çalıştırılmasıyla panel eğim açısı, istenilen açı değerine ayarlanabilir. Bu sayede sabit eğim açılı doğu-batı yönünde güneş takibi yapan bir sistem elde edilir. Eğim açısı ayarlanan bu sistemde, eğim açısını değiştiren kuzey-güney lineer aktüatörü pasif duruma düşürdüğünden dolayı enerjiden tasarruf sağlanacaktır. Bu deneysel düzenekte de hareketli panel tıpkı sabit panelde olduğu gibi eğim açısı  $30^\circ$ ’ye sabitlenerek *doğu-batı* yönünde güneş takibi sağlanmıştır. Gerekli olduğu durumda kuzey-güney motoru da sisteme dâhil edilerek çift eksenli güneş takibi yapılabilir. Ancak bu durumda ikinci motor için de enerji harcanacaktır. Tek eksenli sistemin kullanılmasının sebebi, gün içerisinde çok az miktarda değişen eğim açısının değişmesinden kaynaklanan kuzey-güney motorunun harcadığı enerjiyi ortadan kaldırmaktır.





Şekil 5.9. Deneysel olarak tasarlanmış sabit ve hareketli sistemin deney ortamındaki şematik gösterimi

Her iki sistemde bulunan paneller özdeş ve 100 Watt'lık panellerdir. Panel çıkış güçlerini hesaplamak için panellerin çıkışlarına alüminyum kaplamalı 100 Watt 3,3  $\Omega$  değerindeki dirençler bağlanmıştır. Sisteme ampermetre ve voltmetre bağlanarak dirençler üzerinden geçen akım ile dirençlerin uçlarında oluşan gerilim değerleri 10 dakika aralıklarla ölçülmüştür. Ölçülen bu veriler ile panel çıkış güçleri ve gün boyunca ürettikleri enerji miktarları hesaplanmış ve elde edilen verilerin tümü karşılaştırılmıştır.

Deneysel veriler ile benzetim verilerinin karşılaştırılabilmesi için 30 dakika aralıklarla, gelen güneş ışınım şiddeti, panellerin yüzey sıcaklıkları ve çıkış güçleri ölçülmüştür.

Deney düzeneği Siirt Üniversitesi Kezer yerleşkesinde bulunan ve güneşin doğuşundan batışına kadar gölgelenmenin olmadığı bir yerde kurulmuştur. Yapılan hesapların doğrulanabilmesi için iki farklı günde ölçümler alınmıştır. Şekil 5.10'da gösterildiği gibi sistem yer tespitinin, güneş yörüngesi ve güneye bakan tarafının belirlenmesinde *Suncalc* programı kullanılmıştır (Url-7, 2018).



Şekil 5.10. Deney düzeneğinin üzerinden geçen güneş yolu ve deney yerinin uydudan görünümü

## 6. GTS'NİN BENZETİM ORTAMINDA MODELLENMESİ

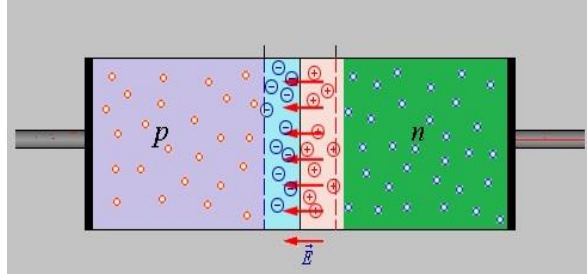
Bu bölümde deneysel olarak tasarlanan *GTS* ile sabit sistem, *Matlab/Simulink* ortamında modellenmiştir. *FV* panelin giriş değişkenleri ışınım şiddeti ve sıcaklık; çıkışı ise yük direnci üzerindeki akım ve gerilim olmak üzere blok modeli oluşturulmuştur. Güneş modeli olarak, temsilen güneşin konum bilgileri kullanılarak güneş geliş açısını veren bir blok model oluşturulmuştur. Sensör olarak kullanılan solar göz sensörü, denetleyicinin ve panel hareketlerini sağlayan lineer aktüatörlerin ayrı ayrı blok modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan modeller benzetim ortamında bir araya getirilerek sabit sistem, tek eksenli ve çift eksenli *GTS*'nin benzetim modelleri şeklinde ayrı ayrı olarak gerçekleştirilmiştir.

### 6.1. Fotovoltaik Panellerin Modellenmesi

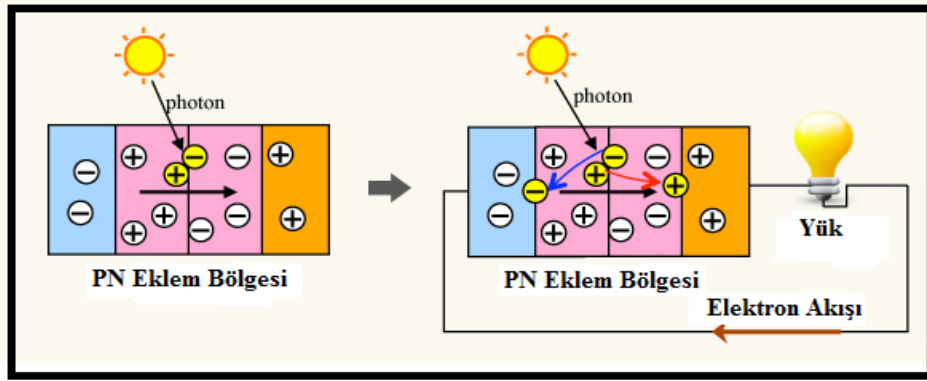
*FV* güneş pilleri, üzerlerine ışın demeti (fotonlar) düştüğü zaman yapılarındaki yarı iletken maddeler aracılığıyla bu ışınım enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren yapılardır. Kristal yapılarında, temel elektronik elemanlardan diyota benzer şekilde *n-tipi* ve *p-tipi* olarak katkılanmış olmak üzere silisyum, kadmiyum tellür ve galyum arsenit gibi yarı iletken maddeler bulunur. Yarı iletkenin *n-tipi* ya da *p-tipi* olması katkı oranına bağlıdır. Örneğin en yaygın kullanılan güneş pili yarı iletken maddesi silisyumdan *n-tipi* silisyum elde etmek için silisyum solüsyonuna periyodik tablonun 5. grubunda (verici ya da katkı maddeli grup) bulunan bir element (fosfor) eklenebilir. Çünkü silisyumun son yörüngesinde 4, fosforun son yörüngesinde 5 elektron bulunduğundan dolayı fosforda bulunan fazla elektron birleşmiş kristal olan yapıya bir elektron verir. *P-tipi* katkılanmış yarıiletken elde edilmek isteniyorsa; silisyum solüsyonuna 3. gruptan (alıcı) bir element eklenebilir. Bunların dış yörüngesinde 3 elektron olduğundan dolayı kristal yapıda bir elektron boşluğu oluşur. Bu oyuk ya da boşluk pozitif yük taşıyıcı olarak görev yapar. *P-tipi* ve *n-tipi* malzemeler bir araya getirilerek *p-n* eklemeni oluştururlar.

*p-n* eklemesinde *n* tipindeki çoğunluk taşıyıcı olan elektronlar *p* tipine doğru akım oluştururlar. Bu süreç her iki tarafta da yük dengesi oluşana kadar devam eder. Sonuçta eklem bölgesinin *p* tarafında negatif, *n* tarafında pozitif bir yük birikir. Bu durum, Şekil 6.1'de gösterildiği gibi eklem bölgesinde elektron ve oyukların yayılmasını engelleyen ve bir denge oluşmasını sağlayan elektrik alanı oluşmasına sebep olur. Sistem güneş ışığına maruz kaldığında eklem bölgesinde *elektron-oyuk* çiftleri oluşur ve bu elektrik alanı elektronları *n* bölgesine; oyukları ise *p* bölgesine taşır. Şekil 6.2'de gösterildiği gibi

sisteme  $n$  tarafı ile  $p$  tarafını birleştiren bir yük bağlandığında,  $n$  tarafındaki elektronlar  $p$  bölgesindeki oyukları doldurmak için hareket edeceğinden dolayı bir elektron akışı gerçekleşir. Elektron akışı, iki bölge arasında bir potansiyel farkının oluştuğunun bir göstergesidir. Bu durumda elektrik enerjisi üretilmiş olur.

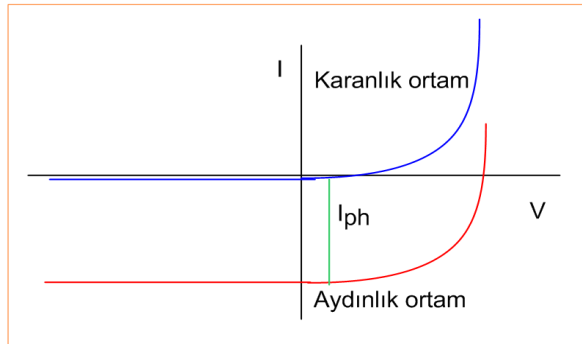


Şekil 6.1.  $p$ - $n$  eklemde elektron akışından kaynaklanan elektrik alanı görüntüsü

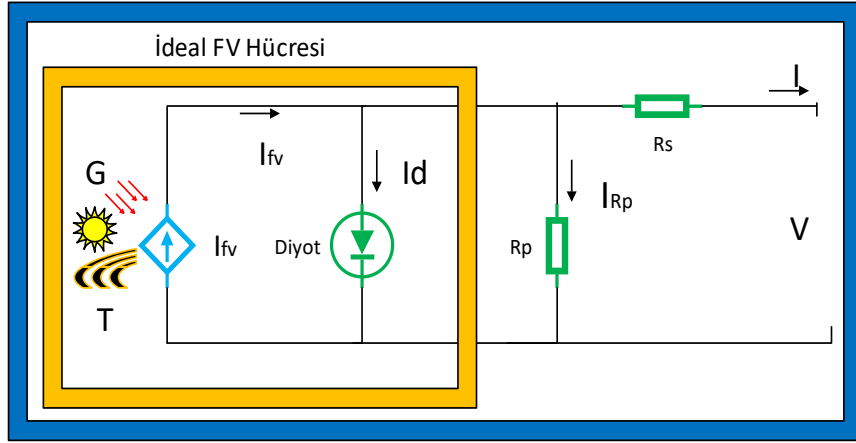


Şekil 6.2.  $p$ - $n$  çiftine elektriksel bir yük bağlandığında devrede oluşan akım

$FV$  güneş pillerinin yapısı yarıiletken bir eleman olan diyota benzetilebilir. Şekil 6.3'te gösterildiği gibi solar hücrenin güneş almadığı zamana ait  $I$ - $V$  karakteristiği bir diyotun  $I$ - $V$  karakteristik özelliğine benzer. Karakteristik özelliklerindeki benzerlikten dolayı  $FV$  panellerin modellenmesinde Şekil 6.4'teki diyot modeli kullanılır.



Şekil 6.3. Diyodun karanlık ve aydınlık ortamlardaki  $I$ - $V$  karakteristiği



Şekil 6.4. Tek diyot modelli fotovoltaik sistemin eş değer devresi

Güneş pilinin  $I$ - $V$  karakteristiği temel olarak Shockley diyot eşitliğine göre Denklem (6.1)'de verilmiştir.

$$I_d = I_0 \left[ \exp\left(\frac{q \cdot V_d}{a \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right] \quad (6.1)$$

Burada  $I_d$  diyot akımı,  $I_0$  diyot doyum akımı,  $q$  elektron yükü ( $1.602 \times 10^{-19}$  C),  $V_d$  diyot gerilimi,  $a$  diyot ideallik faktörü (1.2-5),  $k$  Boltzman sabiti ( $1.38 \times 10^{-23}$  J/K),  $T$  Kelvin cinsinde hücre gerçek (anlık) sıcaklığıdır. İdeal bir güneş hücresi bir akım kaynağına paralel bağlı bir diyottan oluşur. İdeal bir  $FV$  hücre için temel eşitlikler Denklem (6.2) ve Denklem (6.3) ile ifade edilebilir.

$$I = I_{fv} - I_d \quad (6.2)$$

$$I = I_{fv} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{q \cdot V_d}{a \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right] \quad (6.3)$$

Burada  $I_{fv}$  güneş ışığından kaynaklanan akımı,  $I$  ise  $FV$  hücre çıkış akımını ifade eder. Pratikte güneş hücresinde ideal güneş hücresi modeline ek olarak  $R_s$  (seri direnç) ile  $R_p$  (paralel direnç) bulunur. Burada  $R_s$ , solar hücrenin akımdan kaynaklanan iç kayıplarını (yarı iletken yapı, metal bağlantı noktaları) ifade etmektedir. Solar hücreden en uygun şekilde güç elde edebilmek için küçük olması istenir ancak pratikte bu pek mümkün değildir. İdealde  $1 \Omega$  olması istenir.  $R_p$  paralel direnci ise yarı iletken yapıya paralel olan rezistif yolda bulunan diyot kaçak akımından kaynaklanan kayıpları temsil eder. Solar hücreden en uygun şekilde güç elde edebilmek için idealde sonsuz olması istenir.

İdeal solar hücre sine  $R_s$  ile  $R_p$  dirençleri eklendiği takdirde panel çıkış akımı Denklem (6.6) ile bulunur. Burada  $I_{Rp}$  paralel direnç üzerinden geçen akımı ifade eder.

$$I_{fv} = I_d + I_{Rp} + I \quad (6.4)$$

$$I = I_{fv} - I_d - I_{Rp} \quad (6.5)$$

$$I = I_{fv} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{q \cdot V_d}{k \cdot T \cdot a}\right) - 1 \right] - \frac{V_d}{R_p} \quad (6.6)$$

Denklem (6.6)'da  $V_d = V + IR_s$  ve  $V_t = \frac{N_s kT}{q}$  olarak tanımlanıp Denklem (6.6)'da yerine yazılırsa, bir FV hücrenin matematiksel modeli Denklem (6.7)'deki gibi olur. Burada  $V_t$  solar hücre termal gerilimi,  $N_s$  seri hücre sayısını ifade eder.

$$I = I_{fv} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{V_t \cdot a}\right) - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (6.7)$$

Sistemde seri ve paralel solar hücreler olduğunda eşitliğe  $N_s$  (seri hücre sayısı) ile  $N_p$  (paralel hücre) sayısı eklenir.  $N_s$  seri hücre sayısı  $V_t$  eşitliğinin içerisinde mevcuttur.  $N_p$  ise sisteme eklendiğinde, birbirine seri ve paralel bağlı FV hücre modeli için çıkış Denklem (6.8) ile bulunur.

$$I = N_p I_{fv} - N_p I_0 \left[ \exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{V_t \cdot a}\right) - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (6.8)$$

Bir FV hücre modellenmesinde Denklem (6.8) kullanılabilir. Ancak eşitlikteki tüm parametrelerin bilinmesi gerekir. Panel üreticileri panele ait bilgileri içeren kataloglarda panellerin nominal koşullar altındaki ( $1000 \text{ W/m}^2$ ,  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ) davranışlarından elde edilen değerlere yer verirler. Nominal koşullar altında  $V_{oc}$  (açık devre gerilimi) ile  $I_{sc}$  (kısa devre akımı) elde edilir. Bu bilgilerin ışığında katalog bilgisinde  $V_{mp}$  (maksimum güç noktasındaki gerilim değeri),  $I_{mp}$  (maksimum güç noktasındaki akım değeri),  $K_v$  (açık devre gerilimi ile sıcaklık katsayısı oranı),  $K_i$  (kısa devre akımı ile sıcaklık katsayısı oranı) ve  $P_{max}$  (maksimum güç noktasındaki güç) verilir.

Denklem çözümleri için gerekli olan ancak katalog bilgisinde bulunmayan parametreler, nominal koşullar altındaki referans değerleri kullanılarak bulunabilir. Bilinmeyen bu parametreler  $I_{fv}$ ,  $I_0$ ,  $R_s$  ile  $R_p$  değerleridir.

### 6.1.1. Işınım sonucu üretilen akımın elde edilmesi

Işınım şiddeti ile sıcaklık gibi giriş parametreleri, yarı iletkenin eklem bölgesindeki yük taşıyıcılarının üretimini doğrudan etkiler. Dolayısıyla  $FV$  hücrenin ürettiği akım değerinin oranıyla doğrudan etkilidirler. Işınım sonucu  $FV$  hücreden elde edilen akım ( $I_{fv}$ ), solar ışınım şiddeti ( $G$ ) ile anlık hücre sıcaklığına ( $T$ ) bağlı olarak lineer bir değişim gösterir.

$$I_{fv} = \frac{G}{G_{ref}} \left( I_{sc,ref} + K_i (T_{act} - T_{ref}) \right) \quad (6.9)$$

Burada  $G_{ref}$  nominal koşuldaki referans ışınım şiddeti,  $I_{sc,ref}$  referans kısa devre akımı,  $T_{ref}$  referans panel sıcaklığı ve  $T_{act}$  hücrenin anlık sıcaklık değeridir.

### 6.1.2. Diyot doyma akımının elde edilmesi

Diyot doyma akımı, diyot ters yönde ön gerilimli çalıştığında azınlık yük taşıyıcılarının oluşturduğu akımdır. Diyot doyma akımı temel olarak sıcaklık ile değişim gösteren bir parametredir ve Denklem (6.10) ile hesaplanır.

$$I_0 = I_{0,ref} \left( \frac{T_{act}}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[ \frac{q \cdot E_g}{a \cdot k} \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{act}} \right) \right] \quad (6.10)$$

Denklem (6.10)'da verilen  $E_g$  değeri yarı iletken maddenin bant aralık değeridir. Birimi  $eV$ 'tur.  $25^\circ C$ 'de polikristal Si için  $E_g$  değeri  $1,12 eV$ 'tur. Denklemde verilen  $I_{0,ref}$  değeri için Denklem (6.11) kullanılır.

$$I_{0,ref} = \frac{I_{sc,ref}}{\exp \left( \frac{V_{oc,ref}}{a \cdot V_{t,ref}} \right) - 1} \quad (6.11)$$

Denklem (6.11)'deki  $V_{oc,ref}$  nominal koşullardaki referans açık devre voltajı,  $V_{t,ref}$  ise  $T_{ref}$  sıcaklığındaki seri bağlı hücre termal gerilimidir.

### 6.1.3. Genetik algoritmalar kullanarak $R_s$ ve $R_p$ dirençlerinin kestirimi

Genetik algoritmalar ( $GA$ ) Darwin'in doğal seçilim ilkesinden ilham alınarak geliştirilmiş sezgisel aramaya dayalı stokastik bir optimizasyon yöntemidir. Matematiksel olarak geleneksel hesaplama teknikleriyle çözülemeyecek kadar zor veya yinelemeli olarak çözüme gidilebilecek türden problemlerin çözümünde etkili sonuçlar verebilir. Homojen olmayan, karmaşık bir uzayda anlaşılması güç olan nesnelerin sonuca varmasını

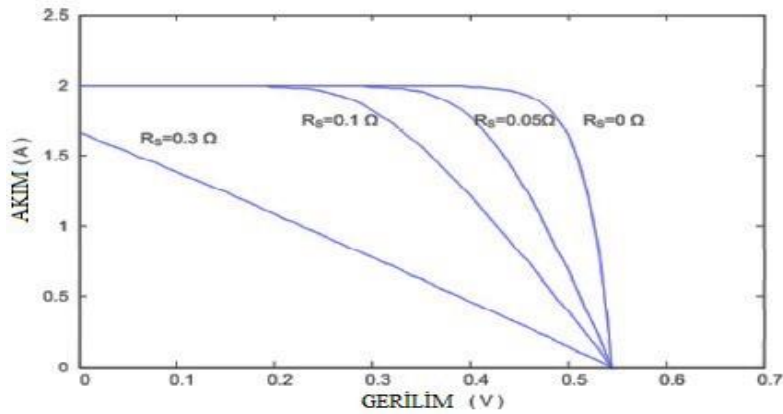
sağlar. Genetik Algoritma doğal seçim sürecini taklit eden sezgisel bir arama algoritmasıdır. İlk olarak 1975 yılında John Holland tarafından geliştirilen genetik algoritmanın teorik temeli *Doğal ve Yapay Sistemlerde Adaptasyon* kitabında yer almaktadır (Holland, 1975). 1989 yılında Holland'ın öğrencisi ve bir inşaat mühendisi olan David Goldberg gaz boru hatlarının kontrolü ile ilgili çalışmalarında genetik algoritmaları kullanmışlardır (Goldberg, 1989). Halen günümüzde birçok alanda (mühendislik, fen, işletme, iktisat, tasarım) kullanılmaktadır. Genetik algoritmalar görüntü işleme, gezgin satıcı problemi, sistem tanımlama, robotik sistemler, ses işleme, mühendislik tasarımları, planlama, kontrol, parametre kestirimi gibi uygulamalarda sıkça kullanılan bir optimizasyon yöntemidir (Kristinsson ve Dumont, 1992).

Genetik algoritmalar diğer sezgisel arama yöntemlerinden farklı genetik işlemler uygulayarak bir çözüm sunarlar. Oluşacak bu çözümler kodlanarak ikili dizilerden oluşan çözüm gruplarını oluştururlar. Burada çözüm grubu popülasyon olarak adlandırılırken çözüm kodları da kromozom olarak adlandırılır. GA çalışırken ilk popülasyon rastgele oluşturulur. Popülasyonu oluşturan birey sayısı, popülasyon büyüklüğünü temsil eder. Eğer popülasyon büyüklüğü çok fazla olursa oluşacak ilk nesillerde optimal global noktanın bulunması mümkün olabilir. Ancak popülasyon büyüklüğünün çok yüksek olması durumunda, GA'nın çalışma hızını azaltarak yerel optimum noktalara takılma olasılığının artmasına yönelik bir eğilim gerçekleşebilir. Bu yüzden çözümlenen problemin karmaşıklığına göre makul bir popülasyon büyüklüğü yeterlidir. İlk popülasyonun oluşturulmasından sonra popülasyonda bulunan bireylerin ne kadar iyi olduğu tespit edilir. Bu bağlamda bir amaç ya da uygunluk fonksiyonu denilen minimize edilecek bir fonksiyon oluşturulur. GA, doğal seleksiyon kuramında da olduğu gibi güçlü olanların hayatta kalıp sonraki kuşaklara aktarılması, zayıf olanların ise elenmesiyle bir sonraki kuşakta etkisinin azaldığı bir seçim operatöründen geçilmesini sağlar. Güçlü ve zayıf bireylerin uygunluğu amaç veya uygunluk fonksiyonu ile puanlandırılır. Oluşan güçlü ve zayıf puanlara sahip bireyler puanlarına göre rastgele seçilir ve çoğalma işlemine devam edilir. Düşük bir ihtimal bile olsa zayıf bireylerin seçilme ve çoğalma işlemine tabi tutulmasına belli bir olanak tanınır. Seçilen tüm bireyler bir çaprazlama (crossover) ve mutasyona (mutation) uğrar. Çaprazlama, seçilen iki veya daha fazla bireyin sahip olduğu genlerinin kullanılarak yeni bireyler oluşturulması işlemini gerçekleştirir. Mutasyon ise popülasyondaki çeşitliliğin artmasına olanak sağlar. Böylelikle çözüm sonucunun yerel minimum noktalara takılma olasılığı azalır. Bu noktadan sonra oluşan yeni nesil bireyler, ebeveyn bireylerle yer değiştirerek popülasyon büyüklüğünün sabit

tutulması işlemini gerçekleştirir. Sonra kromozomların uygunluk değeri tekrar hesaplatılır. Bu işlem, belirlenen nesil (generation) sayısına ulaşana kadar devam eder. Daha önce belirlenen bir adım sayısına ulaşıncaya uygunluk fonksiyonuna göre en iyi sonuç elde edilir (Usta, 2007; Mutluer, 2007).

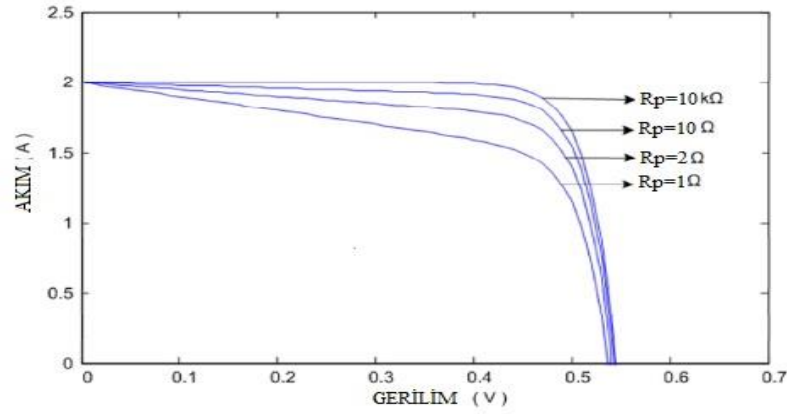
FV panel eş değer devresi için elde edilen Denklem (6.8) lineer olmayan ve çözümü karmaşık olan bir denklem olduğu için, içerisinde bulunan  $R_p$  ve  $R_s$  bilinmeyen parametreleri GA ile kestirilebilir.

$R_p$  direnç değeri  $R_s$ 'ye göre büyüktür. Bu yüzden bazı çalışmalarda değeri ihmal edilmiştir (Glass, 1996; Matagne ve ark.,2007; Veerachary, 2006; Walker, 2001; Xiao ve ark., 2004; Yusof ve ark., 2004).  $R_s$  ise çok küçük olduğu için bu değer de bazı çalışmalarda ihmal edilmiştir (Benavides ve Chapman, 2008; Glass, 1996; Kajihara ve Harakawa, 2005; Tan ve ark., 2004). Ancak FV bir hücrenin modellenmesinde bu iki değer bilmesi önem arz etmektedir. Eğer  $R_s$  ve  $R_p$  değerleri olması gereken değerden daha büyük ya da daha küçük ise FV hücre V-I, P-V karakteristiklerinin değişmesine neden olur. Benzetim ortamındaki FV hücre modelinin gerçekteki güneş panelinin verdiği sonuçlara daha yakın sonuçlar verebilmesi için  $R_s$  ve  $R_p$  değerlerinin kestirimi yapılabilir. Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'da  $R_s$  ve  $R_p$  değerine bağlı olarak I-V karakteristik eğrilerindeki farklar ve tepe noktasının kaydığı görülmektedir (Büyükgüzel, 2011).



Şekil 6.5. Seri direnç değerinin FV panel I-V karakteristik eğrisine etkisi





Şekil 6.6. Paralel direnç değerinin FV panel  $I$ - $V$  karakteristik eğrisine etkisi

Grafiklerden de anlaşılacağı üzere  $R_s$  ve  $R_p$  direnç değerlerinin  $FV$  panel karakteristik eğrileri üzerinde önemli bir etkisi olduğu sonucuna varılmıştır. Bu iki parametrenin kestiriminin önemine binaen literatürde çeşitli yöntemler mevcuttur. Bu yöntemler üç kategoriye ayrılabilir:

- İterasyon yöntemi (Newton-Raphson)
- Analitik yöntem (Lambert W-function)
- Sezgisel yöntemler (Differential evolution ( $DE$ ), particle swarm optimization ( $PSO$ ), simulated annealing ( $SA$ ), genetic algorithm ( $GA$ ))

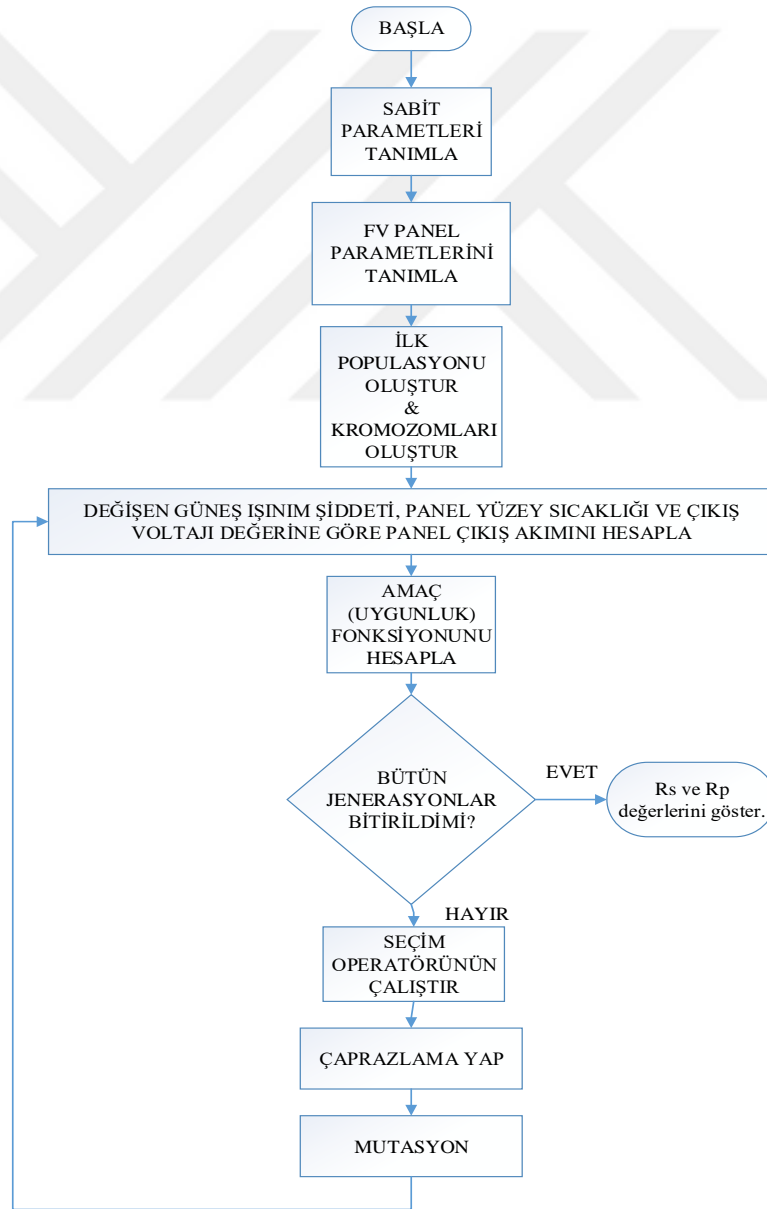
Bu yöntemlerden en çok kullanılanı iterasyonlu (yinelemeli) bir çözüm yöntemi olan Newton-Raphson yöntemidir (Appelbaum ve Peled, 2014; Bellia ve ark., 2014; Nassar-Eddine ve ark., 2016; Qi ve Ming, 2012). Sezgisel olarak en çok kullanılan yöntem ise genetik algoritmalarıdır (Appelbaum ve Peled, 2014; Harrag ve Messalti, 2015; Ismail ve ark., 2013; Jervase ve ark., 2001; Moldovan ve ark., 2009; Zagrouba ve ark., 2010).

Bu tez çalışmasında  $FV$  panel eş değer devresi parametrelerinden  $R_p$  ve  $R_s$  direnç değerlerinin kestirimi için genetik algoritmalar kullanılmıştır. Deneysel ölçümle elde edilen panel giriş ve çıkış değerlerinden oluşturulan veri seti  $GA$  ile kestirim için gereklidir.  $FV$  panel giriş verileri, panel üzerindeki etkili radyasyon değeri ve panel yüzey sıcaklığıdır. Çıkış verileri ise yük direnci üzerinde ölçülen gerilim ve akım değerleridir. Panel çıkış akımı ile ilgili Denklem (6.1) - Denklem (6.11) arasındaki denklemler panel modellemesinde kullanılmış ve  $R_p$  ile  $R_s$ 'nin kestirimi gerçekleştirilmiştir. Kestirimin gerçekleştirilebilmesi için önce bir amaç fonksiyonu belirlenmiş ve bu fonksiyon  $GA$  ile minimize edilmiştir. Amaç fonksiyonun minimize edilmesi durumunda söz konusu parametreler kestirilmiş olurlar.  $GA$ , deneysel olarak elde edilmiş veri setindeki akım değeri ile  $GA$ 'nın hesapladığı akım değerinin farkının alınmasıyla elde edilmiş hatayı

sıfıra yakınsayacak şekilde parametreleri optimize eder. GA sona erdiğinde uygunluk fonksiyonu sıfır ya da sıfıra yakın değerler verirse kestirimin doğruluk yüzdesi de artar.

$$f_{\varepsilon} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N \left( I_{deneysel}(j) - I_{hesaplanan}(j) \right)^2 \quad (6.12)$$

Denklem (6.12)'de verilen parametrelerden  $f_{\varepsilon}$  uygunluk fonksiyonunun değeri,  $N$  veri sayısı,  $I_{deneysel}$  deneysel verilerle elde edilmiş akım değeri,  $I_{hesaplanan}$  deneysel veriler ile oluşturulan veri setine göre GA'nın hesapladığı akım değeridir. GA her  $N$  adımında hesapladığı sonuçları  $f_{\varepsilon}$  fonksiyonuna atar ve her adımda  $f_{\varepsilon}$ 'yi minimize eden parametreleri arar. Bu işlem Şekil 6.7'de verilen akış diyagramına göre gerçekleşir.



Şekil 6.7. GA çalışma mantığı akış diyagramı

Tablo 6.1’de kullanıcı tarafından girilen popülasyon sayısı ile jenerasyon sayısına göre elde edilen  $R_p$  ve  $R_s$  değerleri verilmiştir. Amaç fonksiyonunun değerinin sıfır olması % 100 doğrulukta bir sonuç elde edildiğini gösterir. % 100 doğruluğa yaklaşan kestirim gerçekleştirebilmek için veri setinin genişletilmesi, kullanıcı tarafından girilen popülasyon sayısı ile jenerasyon sayısı gibi parametrelerin deneme yanılma yoluyla en uygun değerlere ayarlanmaları düşünülebilir. Yüksek oranda doğruluğun gerçekleşme olasılığı pratikte düşüktür. Bu yüzden amaç fonksiyonunun sıfıra en yakın elde edilen değerinde GA’nın verdiği optimal parametreler referans olarak alınır.  $R_p$  ve  $R_s$  kestiriminin yapıldığı sistemimizde birden çok yapılan denemelerden sonra en uygun amaç fonksiyonunun değeri 1.4 olarak bulunmuştur. Bu uygunluk değerine göre GA’nın sonuç olarak verdiği  $R_p$  ve  $R_s$  değerleri FV hücre eş değer devresinin modellenmesinde kullanılmıştır.

**Tablo 6.1.** GA parametreleri ile GA sonucu

<b>Parametre</b>	<b>Değer</b>
Populasyon sayısı	500
Jenerasyon sayısı	2000
Uygunluk fonksiyonu	1.4
$R_p$	76.814
$R_s$	0.099

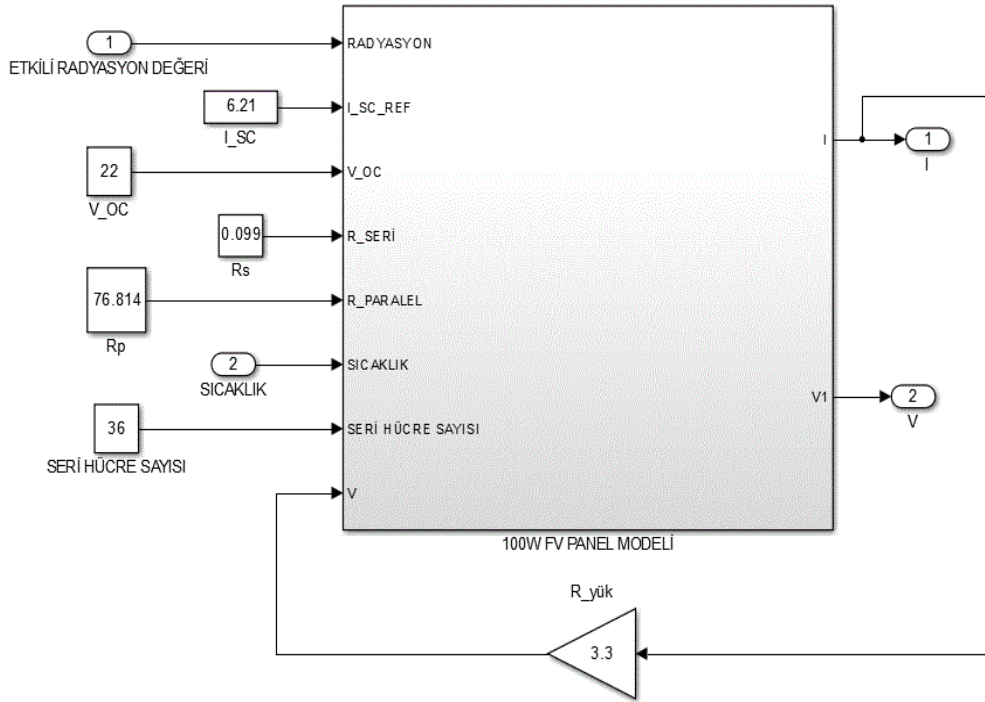
#### 6.1.4. FV panelin benzetim modeli

Deneyde kullanılan FV panelin benzetim blok modeli Denklem (6.1)–(6.11) arasındaki eşitlikler kullanılarak oluşturulmuştur. Modelleme için gerekli olan parametreler, panelin katalog bilgisindeki bilgiler ile kestirilen parametreler kullanılarak elde edilmiştir.

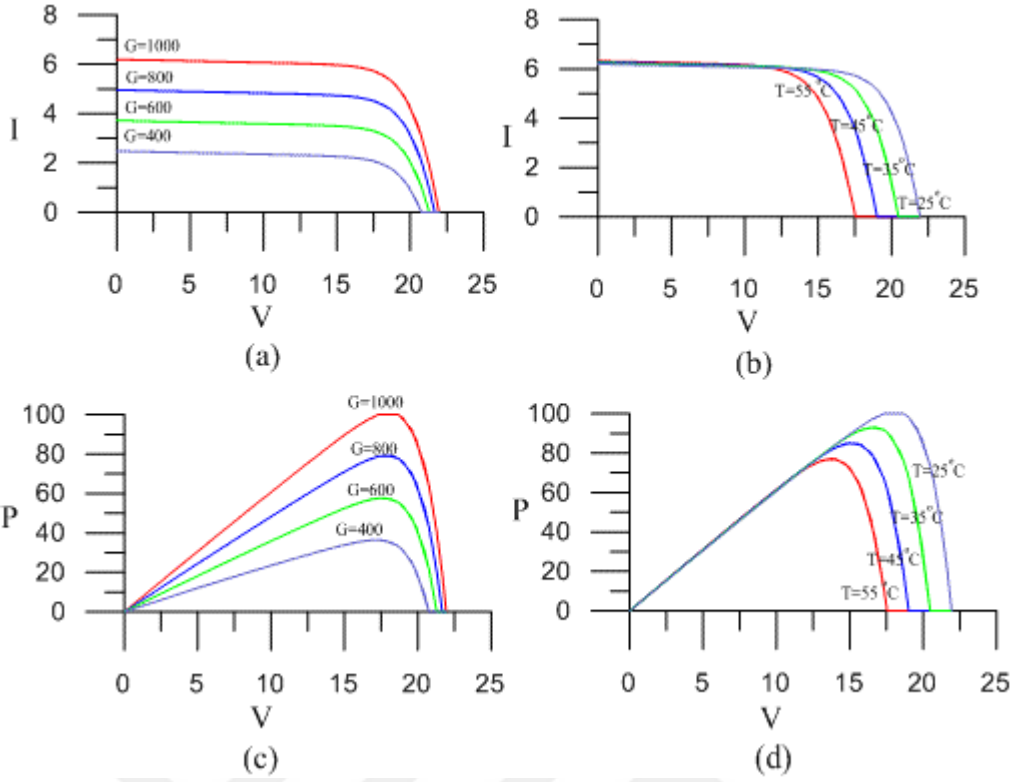
Tablo 6.2’deki parametreler FV panelin benzetim modelinde kullanılan parametrelerdir. FV sistem bloğu Şekil 6.8’de gösterilmiştir. Şekil 6.9’da modellemesi yapılan FV panelin Şekil 6.9 (a) eşit sıcaklık farklı ışınım şiddetleri altında değişen  $I-V$  eğrileri, Şekil 6.9 (b) eşit ışınım şiddeti farklı sıcaklık değerleri altında değişen  $I-V$  eğrileri, Şekil 6.9 (c) eşit sıcaklık farklı ışınım şiddetleri altında değişen  $P-V$  eğrileri, Şekil 6.9 (d) eşit ışınım şiddeti farklı sıcaklık değerleri altında değişen  $P-V$  eğrileri benzetim ortamında oluşturulmuş ve test edilmiştir.

**Tablo 6.2.** FV panele ait parametreler ve değerleri

Parametre	Değer
Maksimum akım $I_{max}$	5.65 A
Maksimum gerilim $V_{max}$	17.7 V
Maksimum güç $P_{max}$	100 W
Kısa devre akımı $I_{sc}$	6.21 A
Açık devre gerilimi $V_{oc}$	22 V
Kısa devre akımı/sıcaklık katsayısı $K_i$	0.0040 A/K
Diyot idealite faktörü $a$	1.2
Yarı iletken madde band aralığı $E_g$	1.12 eV
Seri hücre sayısı $N_s$	36
Şönt direnci $R_p$	76.814 $\Omega$
Seri direnç $R_s$	0.099 $\Omega$



**Şekil 6.8.** FV hücre Matlab/Simulink ortamında oluşturulmuş blok modeli



Şekil 6.9. Modellenen FV hücre bloğunun benzetim sonucu elde edilen  $I$ - $V$  ve  $P$ - $V$  eğrileri

## 6.2. Güneş, Güneş Açıları ve Konum Bilgilerinin Modellenmesi

Benzetim ortamında güneş modellemesi yapılırken güneş açıları, konum bilgileri ve ölçülen güneş ışınımı (radyasyon) değerleri bilinmelidir. Konum bilgisi olarak güneş takip sisteminin bulunduğu yerin enlem ( $37.933^\circ$  kuzey) ve boylamı ( $41.940^\circ$  doğu) dikkate alınmıştır. Saat açısı, azimuth açısı, zenit açısı ve deklinasyon açısı gibi bilinmesi gereken parametreler, Şekil 6.10'da verilen *MIDC SOLPOS Calculator* isimindeki çevrimiçi olarak erişilebilen bir arayüz yazılımından elde edilmiştir. Deneysel verilerden 30 dakikada bir veri alınmış olduğundan arayüz yazılımında da her 30 dakikada bir veri alınarak Matlab/Simulink ortamında kullanmak üzere bir veri seti oluşturulmuştur.

**Compute the solar position and intensity from time and place**

**Required input fields:**

Enter start date:  
Year: 2018 Month: August Day: 9

Enter end date:  
Year: 2018 Month: August Day: 9

Enter output time interval:  
Interval: 30 Units:  Second  Minute

**Enter site location information:**

37.933 Latitude, degrees north (south negative)  
41.940 Longitude, degrees east (west negative)  
3 Time zone, east (west negative)  
1013.0 Surface pressure (mbar)  
15 Ambient dry-bulb temperature (°C)

**Optional input values:**

0 Azimuth of panel surface  
0 Degrees tilt from horizontal of panel  
1367 Solar constant ( $W/m^2$ )  
7.6 Shadow-band width (cm)  
31.7 Shadow-band radius (cm)  
0.04 Shadow-band sky factor  
0 Interval of a measurement period (sec)

**Check additional desired output values:**

Relative optical airmass  
 Pressure-corrected airmass  
 Solar zenith angle, degrees from zenith, refracted  
 Solar azimuth angle  
 Cosine of solar incidence angle on panel  
 Cosine refraction corrected solar zenith angle  
 Solar elevation (no atmospheric correction)  
 Solar elevation angle (degrees from horizon, refracted)  
 Extraterrestrial Global Horizontal Solar Irradiance ( $W/m^2$ )  
 Extraterrestrial Direct Normal Solar Irradiance ( $W/m^2$ )  
 Extraterrestrial Global Irradiance on a tilted surface ( $W/m^2$ )  
 Sunrise time, minutes from midnight (local w/o refraction)  
 Sunset time, minutes from midnight (local w/o refraction)  
 Shadow-band correction factor  
 Factor that normalizes  $K_t$ ,  $K_n$ , etc. (prime)  
 Factor that normalizes  $K_t'$ ,  $K_n'$ , etc. (unprime)

Day angle (degrees)  
 Hour angle (hour of sun from solar noon, degrees west)  
 Solar zenith angle, no atmospheric correction  
 Declination (zenith angle of solar noon at equator, deg. north)  
 Ecliptic longitude (degrees)  
 Obliquity of ecliptic  
 Time of ecliptic calculations  
 Equation of time (minutes)  
 Earth radius vector (ratio)  
 Mean anomaly (degrees)

**Şekil 6.10.** Güneş açılarını hesaplayan çevrimiçi arayüz yazılımı

Şekil 6.11'deki gibi oluşturulan veri setinde her bir değere karşılık gelen zaman saniye cinsinden ele alınmıştır. Bunun nedeni Simulink ara yüzündeki benzetim süresinin saniye cinsinden olmasıdır. Veri setinin içerisinde zenit açısı, saat açısı, deklinasyon ve azimuth açıları *MİDC SOLPOS Calculator* ara yüzünden elde edilmiştir. Güneşten gelen ışınım şiddeti (güneş radyasyonu) değerleri deneysel verilerden elde edilmiştir. Veri setinde bulunan diğer açılardan doğu-batı güneş açısı (*DBGA*), yüzey azimut açısı ve güneş yükseklik açısı, diğer açı değerlerinden (saat açısı, solar azimut, zenit) elde edilen açılardır.

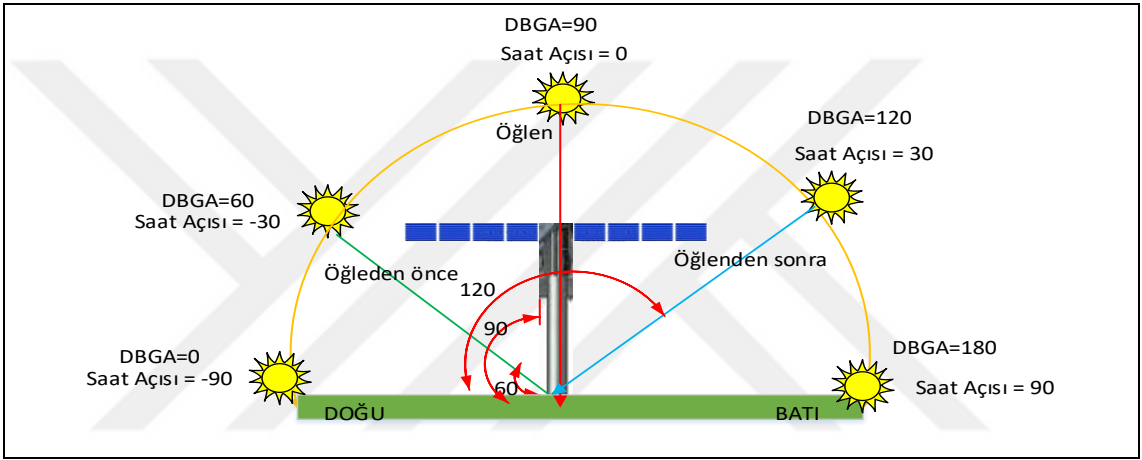
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
ZAMAN	ZENİT AÇISI	SAAT AÇISI	DEKLİNASYON	ENLEM	AZİMUTH AÇISI	GELLEN RADYASYON DEĞERİ	DOĞU BATI AÇISI	YÜZİY AZİMUTH AÇISI	GÜNEŞ YÜKSEKLİK AÇISI
SAAT=07:30 27000	66,2238	-71,9509	15,8702	37,933	95,8596	616	18,0491	-84,1404	23,7762
28800	60,3128	-64,45	15,8642	37,933	95,8596	784,6	25,55	-84,1404	29,6872
30600	54,4252	-56,9496	15,8582	37,933	97,5576	873,8	33,0504	-82,4424	35,5748
32400	48,6089	-49,4487	15,8522	37,933	103,0194	864,4	40,5513	-76,9806	41,3911
34200	42,9299	-41,9478	15,8462	37,933	109,2424	880,3	48,0522	-70,7576	47,0701
36000	37,4841	-34,4474	15,8402	37,933	116,5915	862,3	55,5526	-63,4085	52,5159
37800	32,4185	-26,9465	15,8342	37,933	125,5887	864,7	63,0335	-54,4113	57,5815
39600	27,9675	-19,4456	15,8282	37,933	136,9243	852,4	70,5544	-43,0757	62,0325
41400	24,4909	-11,9453	15,8221	37,933	151,2906	845,5	78,0547	-38,7094	65,5091
SAAT=12:00 43200	22,4612	-4,4444	15,8161	37,933	168,7467	833,3	85,5556	-31,2533	67,5388
45000	22,2862	3,0566	15,8101	37,933	187,7753	827	93,0566	-27,7753	67,7138
46800	24,0071	10,557	15,8041	37,933	205,6771	844,6	100,557	-25,6771	65,9929
48600	27,2623	18,0579	15,7981	37,933	220,6284	854,2	108,0579	-20,6284	62,7377
50400	31,571	25,5588	15,7921	37,933	232,4621	841,4	115,5588	-12,4621	58,429
52200	36,549	33,0592	15,786	37,933	241,8217	868,2	123,0592	-1,8217	53,451
54000	41,9429	40,5601	15,78	37,933	249,4212	881,4	130,5601	69,4212	48,0571
55800	47,5923	48,061	15,774	37,933	255,8128	858,4	138,861	75,8128	42,4077
57600	53,3938	55,5614	15,768	37,933	257,746	822,2	145,5614	77,746	36,6062
59400	59,2786	63,0623	15,7619	37,933	257,746	873,6	153,0623	77,746	30,7214
61200	65,1953	70,5632	15,7559	37,933	257,746	749,9	160,5632	77,746	24,8047
63000	71,103	78,0637	15,7499	37,933	257,746	660,4	168,0637	77,746	18,897
64800	76,9672	85,5646	15,7438	37,933	257,746	556,9	175,5646	77,746	13,0328
66600	82,7334	93,0655	15,7378	37,933	257,746	240,7	183,0655	77,746	7,2466
SAAT=18:00 68400	88,4261	100,5659	15,7318	37,933	257,746	90,5	190,5659	77,746	1,5739
70200	93,9473	108,0668	15,7257	37,933	257,746	0	198,0668	77,746	-3,9473
30 DK ARALIKLARLA (SN)		SOLPOS CALCULATOR	PANEL KONUMU	SOLPOS CALCULATOR	DENEYSEL OLARAK ÖLÇÜLEN RAD.	SAAT AÇISI + 90	AZİMUTH - 180	90 - ZENİT	

Şekil 6.11. Güneş açıları ve konum bilgileri için oluşturulan veri seti

### 6.2.1. Doğu-batı güneş açısının (DBGA) modellenmesi

Doğu-batı güneş açısı (*DBGA*), panele kuzey yönünden bakıldığında, gelen güneş ışınının yer düzlemi ile yaptığı açıyı ifade eder. Benzetimde doğu-batı hareketi, saat açısının değişmesinden yola çıkılarak uygulanmıştır. Şekil 6.12’de gösterildiği gibi her bir saat açısına bağlı olarak bir *DBGA* oluşur. *DBGA* 0-180° arasında değer alır. Sistem güneş takibi yaparken *DBGA*’nın *DBPA*’ya eşit olması sağlanır. Böylelikle güneş ışınları panele dik gelir. *DBGA* değeri Denklem (6.13) ile elde edilir. Denklemde verilen  $\omega$  saat açısını ifade eder.

$$DBGA = \omega + 90^\circ \quad (6.13)$$



Şekil 6.12. Saat açısı ve DBGA arasındaki ilişkinin şematik gösterimi

Doğu-batı güneş açısı, panelin doğu-batı açısını değiştirerek dolaylı yoldan panelin yüzey azimut açısının değişmesi görevini üstlenmektedir. Doğu-batı güneş açısı saat açısına 90° eklenmesiyle elde edilir. Tasarlanan güneş takip sisteminde doğu-batı motoru, güneşin doğu-batı hareketine bağlı olarak *FV* paneli doğu-batı yönünde döndürür. Doğu-batı güneş açısına bağlı olarak doğu-batı panel açısı da değişmektedir. Bu değişim benzetimde saat açısına bağlı olarak değişen açı değeri olarak ele alınmıştır. Güneşin doğu-batı yönünde 180°’lik açıyı taradığını varsayarsak panelin de güneşi takip etmesi için 180° taraması gerekir. Ancak deney düzeneğinde kullanılan doğu-batı lineer aktüatörün uzunluğu ile alakalı olarak tasarımdan kaynaklanan nedenden dolayı panel 0-180° arası tam tarama yerine 27-140° arası bir tarama yapabilmektedir. *DBGA* ile yüzey azimut açısı arasındaki ilişki tezin ileriki bölümlerinde detaylı bir şekilde anlatılmıştır.



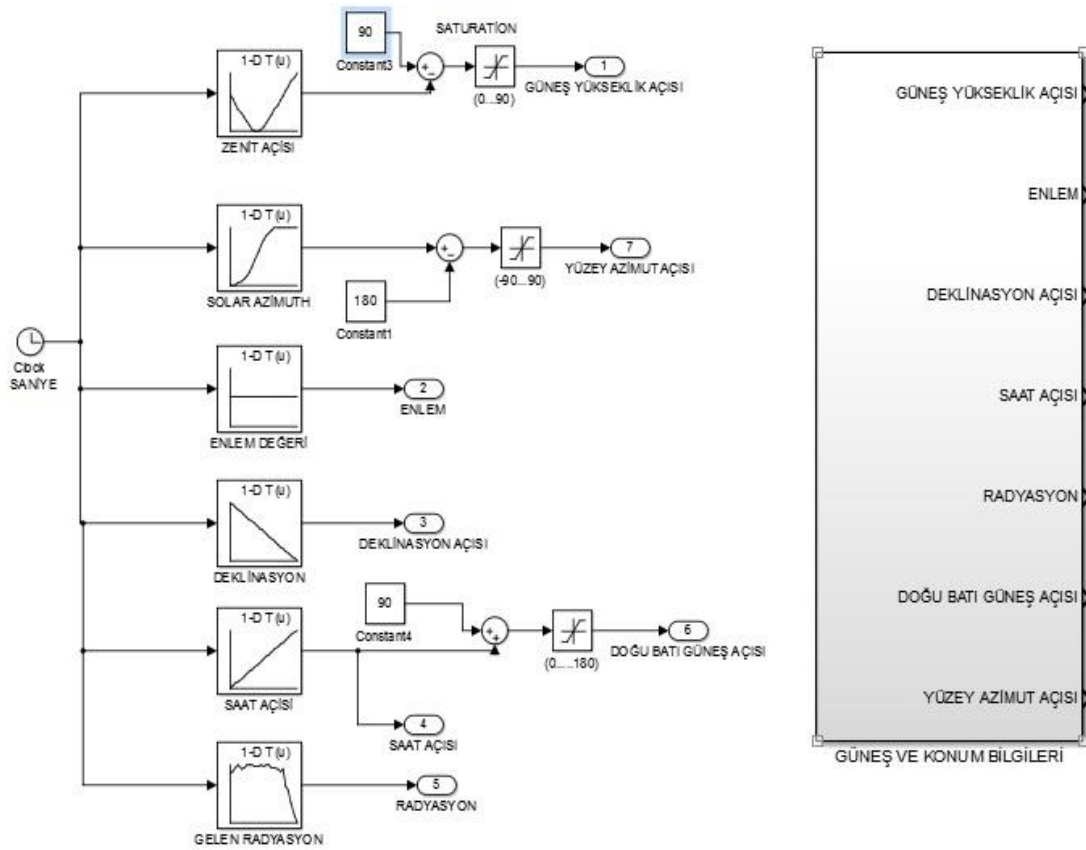
### 6.2.2. Güneş yükseklik açısı modeli

Güneş yükseklik açısı zenit açısına bağlı olarak elde edilir. Panelin eğim açısının ayarlanmasındaki görevi üstlenmektedir. Bu açı değerlerinin benzetimdeki etkileri tezsin ileriki bölümlerinde detaylı olarak incelenecektir.

### 6.2.3. Güneş ve konum bilgileri modeli

Bilgisayar ortamında oluşturulan veri seti benzetim ortamına aktarılıp benzetim ortamında gerektiği yerde *Look-Up Tables* (Hazır veri tabloları) ile kullanılmıştır.

Şekil 6.13’de gösterildiği gibi güneş açıları ve konum bilgilerinden oluşan bir sistem bloğu elde edilmiştir.



Şekil 6.13. Güneş, güneş açıları ve konum bilgilerinin modeli

### 6.3. Etkin Radyasyon Değerinin Hesaplanması

Etkin radyasyon değeri, bir yüzeye gelen güneş ışınım şiddetinin o yüzeye dik olarak etki ettiği değeridir. *FV* panellerde bu işlem genel olarak Denklem (6.15)’e göre gerçekleşir (Chin ve ark., 2011).

$$G_{etkin\_rad} = G_{gelen\_rad} \cdot \cos(\text{güneş açısı} - \text{panel açısı}) \quad (6.15)$$

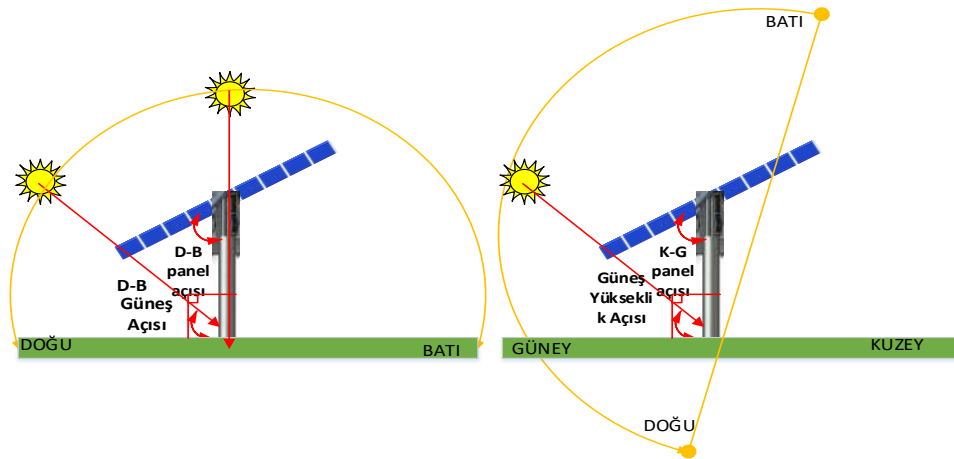
Doğu batı yönünde güneş takibi yapılırken, doğu-batı yönündeki etkin radyasyon değeri işlemi Denklem (6.16)'ya göre yapılır. Denklemde verilen  $DBPA$  (doğu-batı panel açısı), panele kuzey yönünden bakıldığında panelin normali ile yatay düzlem (yer) arasındaki açıyı ifade eder.

$$G_{etkin\_rad\_DB} = G_{gelen\_rad} \cdot \cos(DBGA - DBPA) \quad (6.16)$$

Kuzey-güney yönünde güneş takibi yapılırken panelin eğim açısı ayarlanır. Kuzey güney yönündeki etkin radyasyon değeri Denklem (6.17)'ye göre yapılır. Denklemde verilen  $GYA$ , güneş yükseklik açısıdır.  $KGPA$  kuzey güney panel açısıdır.  $KGPA$  açısının değeri  $KGPA=90^\circ-\beta$  ile ifade edilir.  $\beta$  ise panelin eğim açısıdır.

$$G_{etkin\_rad\_KG} = G_{gelen\_rad} \cdot \cos(GYA - KGPA) \quad (6.17)$$

Bu denklemler tezin sonraki bölümlerinde anlatılacak olan sensör modelinin oluşturulmasında kullanılacaktır. Denklemlerden anlaşılacağı üzere gelen güneş ışınımının panele tümüyle etki etmesi için  $\cos(\cdot)$  ifadesi bire eşit olmalıdır. Bu durum, panel açısı ile güneş açısının birbirine eşit olmasıyla sağlanır. Şekil 6.14'te  $DBPA$ ,  $DBGGA$ ,  $GYA$  ve  $KGPA$  açılarının genel gösterimi verilmiştir. Benzetim ortamında güneş takibi yapılırken doğu-batı yönündeki panel açısı ile kuzey-güney yönündeki panel açısı sırasıyla veri setindeki  $DBGGA$  ile  $GYA$  açılara eşitlenerek işlem gerçekleştirilir.



Şekil 6.14. DBPA, DBGGA, GYA, KGPA gösterimi

#### 6.4. Solar Göz Sensör Bloğunun Modellenmesi

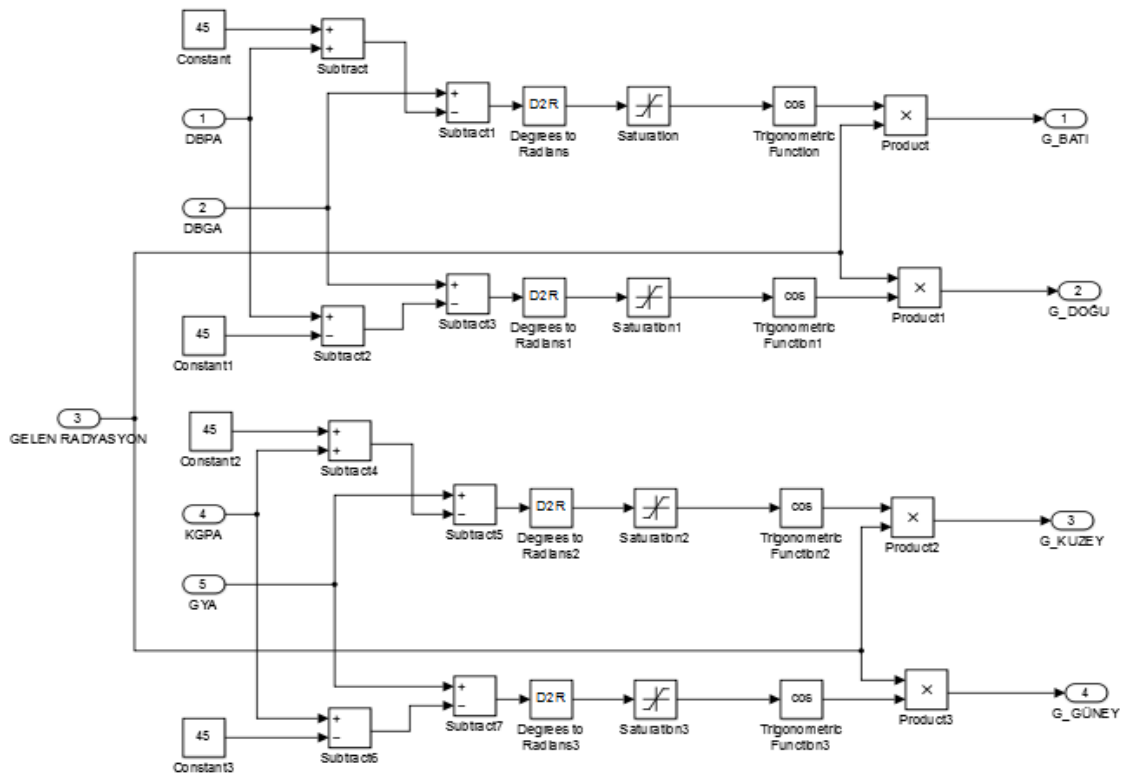
Solar sensör çalışma mantığı 5. Bölümde detaylı olarak anlatılmıştır. Solar göz sensörü, kesik bir piramidin her bir yüzüne yerleştirilen dört adet küçük güneş pillerinden oluşmaktadır. Bu dört yüzeye düşen etkili radyasyon değerine göre güneş pillerinin ürettiği çıkış gerilimleri bir denetleyicide değerlendirilerek paneli hareket ettirecek tahrik

mekanizması için gereken geri besleme bilgisi üretilir. Benzetim ortamındaki solar gözün tasarımı kuzey-güney ve doğu-batı olmak üzere iki kısma ayrılmıştır.

Modelleme yapılırken önce solar gözlerin üzerinde düşen etkin radyasyon değerlerinin hesaplanması gerekir. Bu işlem Denklem (6.18)'de verildiği gibi yapılır.

$$G_{etkin} = G_{gelen} \cdot \cos(ga - (pa - sa_i)); \quad i = d, b, k, g \quad (6.18)$$

Burada  $G_{gelen}$  ortama gelen ışınım şiddettir. Güneş açısı ( $ga$ ), doğu-batı yönü için doğu-batı güneş açısı değeri, kuzey-güney yönü için güneş yükseklik açısı olarak değerlendirilmelidir. Panel açısı ( $pa$ ) aynı mantıkla doğu-batı için doğu-batı panel açısı ( $DBPA$ ), kuzey-güney için kuzey-güney panel açısı ( $KGPA$ ), sensör açısı ( $sa$ ) sensörlerin  $FV$  panel yüzeyi ile yaptığı açığı ifade eder. Batı ( $b$ ) ve kuzey ( $k$ ) sensörü için konumlarından dolayı  $-45^\circ$  doğu ( $d$ ) ve güney ( $g$ ) sensörü için  $45^\circ$  olarak alınır. Şekil 6.15'te panel açıları, güneş açıları ve gelen radyasyon değerine göre küçük güneş pillerinin üzerinde oluşan etkili radyasyon değerlerinin benzetim ortamındaki hesabı gerçekleştirilmiştir.



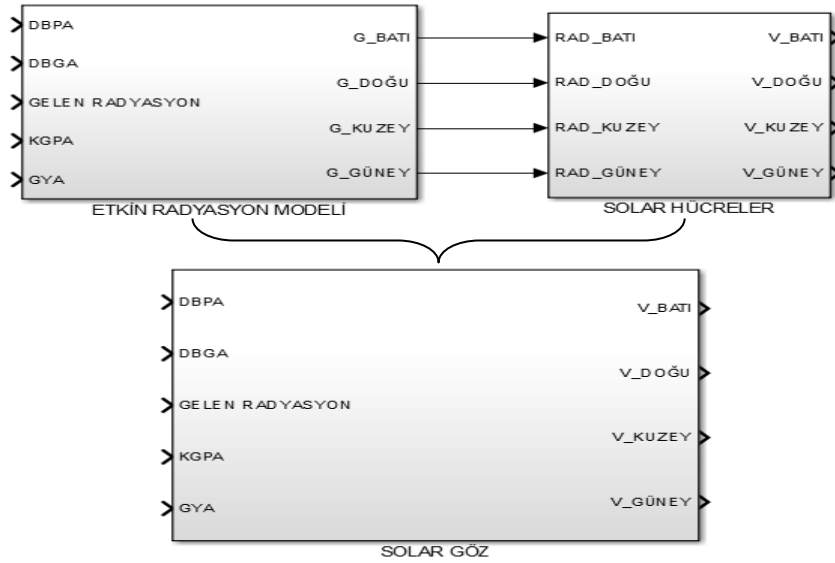
Şekil 6.15. Solar göz blok modeli

Şekil 6.15'te, Denklem (6.16) ile Denklem (6.17) baz alınarak oluşturulan Denklem (6.18) ile Matlab/Simulink ortamında blok diyagramları kullanılarak bir sistem bloğu oluşturulmuştur. Modelde açıların hesabından sonrasına sınırlayıcı olarak

*saturation* bloğu konulmuştur. Hesaplanan açı farkı radyan cinsinde  $\pi/2$ 'den büyük ise sensörlere herhangi bir ışınım gelmediği dolayısıyla sensörlerin güneşi göremediği anlamına gelir. Gece vakti ya da güneşin *FV* panelin arkasında olması bu duruma örnektir. Sensörlerin bir çıkış sağlayamayacağı bu durumların etkisi göz önüne alınarak blok modeline  $-\pi/2$  ile  $\pi/2$  radyanlık açı limitlerine sahip bir sınırlayıcı eklenmiştir (Ort, 2016). Şekil 6.16'da verildiği gibi sonuç olarak her bir sensörün üstüne düşen etkin radyasyon değerlerini hesaplayacak bir etkin radyasyon blok modeli elde edilmiştir.

Etkin radyasyon bloğunun çıkışı küçük güneş pillerinin girişine verilecektir. Bilindiği üzere küçük güneş hücreleri *FV* etkiye göre çalışır. Önceki bölümlerde anlatılan güneş panellerinin modellenmesi kısmında bir *FV* hücrenin modellenmesi ile ilgili detaylı bilgi verilmiştir. Solar göz modelinde giriş değişkenleri etkin radyasyon ve sıcaklıktır. Çıkış değişkenleri ise gerilim ve akımdır. Güneş pilinin girişi olarak ele alınması gereken ana değişken radyasyon değeridir. Bunun sebebi farklı ışınım şiddetleri altında farklı gerilim değerlerinin oluşmasıdır. Güneş pilinin yüzey sıcaklığının çıkış değişkenlerine etkisi varsa da etkinliği ihmal edilebilir boyuttadır. Her dört güneş pili de aynı ortamda bulunduğundan yüzey sıcaklıkları aynı olacak ve bu durumun ölçüme olumsuz bir katkısı bulunmayacaktır. Modellemede bu dört hücrenin yüzey sıcaklığı sabit ve eşit kabul edilebilir. Ancak güneş ışınım şiddetinin değişmesi bir çıkış değişkenlerini belirgin bir şekilde etki edeceği için sistemin ana giriş değişkeni olarak ele alınmıştır. Solar hücrelerin çıkış gerilimleri arasındaki fark bir hücrenin aydınlık diğer hücrenin gölgede kalmasından kaynaklanır. Ana çıkış değişkeni olarak çıkış gerilimi değeri ele alınabilir. Çünkü çıkış gerilim değeri denetleyicinin bir analog girişine verilir. Güneş pili modellemesinde sistemin çıkışındaki akım bir kazanç bloğu ile ifade edilebilen büyük değerli bir yük direnci (*gain*) bağlanarak  $V=I \cdot R$  bağıntısına göre  $V$  girişine verildiğinde sistemin açık devre gerilimi elde edilir. Her ne kadar deneysel ortamda tüm parametreleri bilinmeyen küçük bir güneş hücresi kullanılmış olsa da modellemede parametreleri bilinen her hangi bir güneş hücresi kullanılabilir. Modellemede kullanılan *FV* hücrenin küçük ya da büyük güçte olmasının genel *GTS* modelinin işlevini yerine getirmesinde olumsuz bir etkisi olmaz. Burada önemli olan dört adet hücrenin üzerine düşen ışınım şiddetleri ölçüsünde çıkış gerilimi vermeleridir. Sistem çıkışında elde edilen bu gerilimlerin ne kadar büyük ya da ne kadar küçük olduğu önemli değildir. Hücrelerin birbirlerine göre çıkış gerilimlerinin karşılaştırılması yapıldığından dolayı, hücrelerin sadece özdeş olması hücrelerden doğru bilgi alınması için yeterlidir. Örneğin maksimum 23 Volt (büyük) ve 5 Volt (küçük) açık devre gerilimine sahip özdeş *FV* hücreler ayrı ayrı modellenip her

iki model aynı ortamda ve doğu tarafından güneş ışığına maruz bırakılmak suretiyle yerleştirilirse, doğu tarafındaki sensör çıkış gerilimlerinin sırasıyla büyük ve küçük hücreler için 20 V ile 2,5 V; batı tarafında ise sırasıyla 12 V ile 1.2 V olarak ölçülmesi muhtemeldir. Bu durumda, doğu tarafındaki sensör ele alındığında her iki hücre için çıkış değerleri her ne kadar farklı olsa da batıdaki özdeş hücrelerine karşın daha büyük sonuç elde edildiği gözlemlenir. Bu duruma göre söz konusu hücrelerle, güneşin doğu tarafında olduğu tespit edilmiş olur. Burada bu prensip göz önüne alınarak model parametreleri bilinen herhangi bir  $FV$  hücrenin modellenmesi yeterlidir. Sonuç olarak küçük güneş hücreleri modelinde giriş değişkeni olarak etkin radyasyon değeri, çıkış değişkeni olarak gerilim değeri ele alınmıştır. Radyasyon değeri etkin radyasyon modelinden alınmıştır. Girişte oluşan etkin radyasyon değerlerine göre elde edilen ve çıkış değişkeni olan gerilim değeri denetleyici girişine verilmektedir. Bu gerilim değerlerinin denetleyicide farkları alınarak güneşin yön tespiti yapılır. Şekil 6.16’da girişinde güneş açıları, panel açıları ve gelen radyasyon değeri; çıkışında ise her bir yönde bulunan küçük güneş hücrelerinin çıkış gerilimlerini veren bir solar göz sensör bloğu tasarlanmıştır.



Şekil 6.16. Solar göz sensör bloğu

## 6.5. Denetleyicinin Modellenmesi

Denetleyicinin modellenmesi için giriş değişkeni olarak solar göz modelinden gelen gerilim değerleri ele alınmıştır. Şekil 6.17’de gösterildiği gibi denetleyici içerisinde *doğu-batı* ile *kuzey-güney* gerilimlerinin farkları Denklem (6.19) ile Denklem (6.20)’ye göre alınmak suretiyle karşılaştırılmaları yapılmıştır.

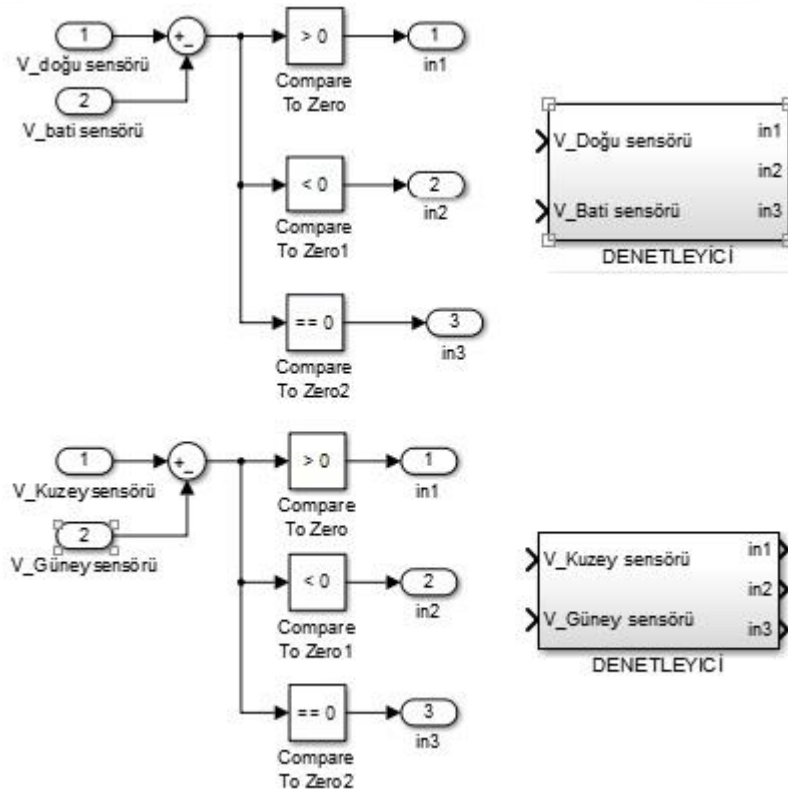
$$FARK_{D-B} = V_{DOĞU} - V_{BATI} \quad (6.19)$$

$$FARK_{K-G} = V_{KUZEY} - V_{GÜNEY} \quad (6.20)$$

Alınan farkın sonuçlarının negatif, pozitif ya da sifıra eşit olduğu durumlar mantıksal olarak Tablo 6.3'teki gibi yorumlanabilir. Bu mantıksal veriler bir sonraki adımda modellenecek olan motor sürücüsünün girişine verilerek motorların benzetim ortamında ileri-geri hareketi sağlanır.

**Tablo 6.3.** Denetleyici girişlerine göre çıkışta görülen lojik bilgiler

D-B FARK	K-G FARK	in1	in2	in3
>0	>0	1	0	0
<0	<0	0	1	0
=0	=0	0	0	1

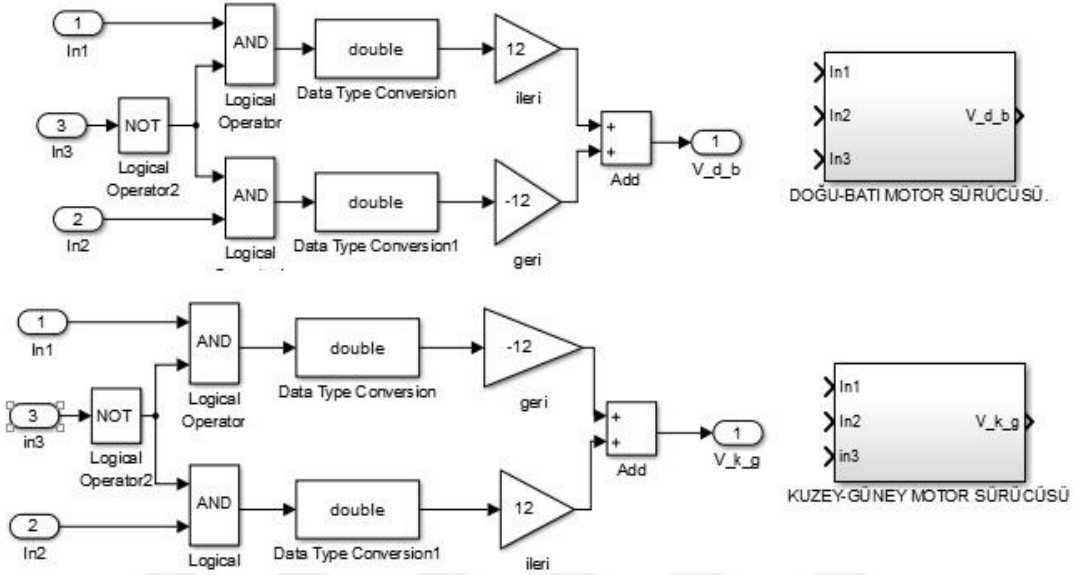


**Şekil 6.17.** Denetleyicinin benzetim modeli

## 6.6. Motor Sürücüsünün Modellenmesi

Motor sürücüsü modelinde giriş değişkenleri, denetleyici çıkışındaki mantıksal verilerdir. Tablo 6.4'te sürücüye gelen lojik bilgilere göre çıkışta görülen gerilim değerleri ve motor hareketinin durumu verilmiştir. Şekil 6.18'de gösterildiği gibi sürücü girişine gelen mantıksal verilere göre motor sürücüsü +12 V, -12 V veya 0 V gerilim değerlerini çıkıştan verir. Sistemde kullanılan lineer aktüatördeki DC motor 12 V besleme

gerilimine sahiptir. Doğu-batı hareketi için, panelin doğuya dönme işlemi +12 V (ileri), batıya dönme işlemi -12 V (geri) olarak tanımlanmıştır. Kuzey-Güney hareketi için kuzeye dönme -12 V (geri), güneye dönme hareketi +12 V (ileri) olarak tanımlanmıştır. İleri hareket lineer aktüatörlerin açılması, geri hareket ise lineer aktörlerin kapanması anlamı taşır.



Şekil 6.18. Motor sürücülerinin blok modeli

Tablo 6.4. Sürücülere gelen lojik bilgilere göre çıkışta görülen gerilim değerleri

DOĞU-BATI YÖNLENDİRME					KUZEY-GÜNEY YÖNLENDİRME				
in1	in2	in3	V_DB	DURUM	in1	in2	in3	V_KG	DURUM
1	0	0	+12	İleri (Doğuya)	1	0	0	-12	Geri (Kuzeye)
0	1	0	-12	Geri (Batıya)	0	1	0	+12	İleri (Güneye)
0	0	1	0	Dur	0	0	1	0	Dur

## 6.7. Doğu-Batı Dönme Hareketinin Modellenmesi

Güneş takip sisteminde doğu-batı yönündeki hareket doğu-batı motorunun sürülmesi sonucu olarak *DBPA*'nın değişmesiyle gerçekleşir. *DBPA* değişmesiyle dolaylı yoldan panelin yüzey azimut açısı değişmektedir. Doğu-batı hareketi esnasında sistemin yüzey azimut açısına bağlı olarak güneş ışınlarının panele dik gelmesi sağlanır. Doğu-batı yönlendirme için modelleme yapılırken tahrik mekanizması için kullanılan *DB* lineer aktüatörün blok modeli, *DBPA* blok modeli ve yüzey azimut açısının blok modeli gerekir.

### 6.7.1. Doğu-Batı lineer aktüatörün modellenmesi

Lineer (doğrusal) aktüatörler içerisindeki *DC* motorun açısal hareketine bağlı olarak, lineer bir hareket sağlayan mekanizmalardır. Lineer aktüatördeki *DC* motorun ileri ve geri hareketine bağlı olarak aktüatörün mil boyunun uzaması ve kısalmasıyla itme ve çekme işlemleri gerçekleşir. Tasarlanan güneş takip sisteminde *DB* aktüatörü +12 V ileri besleme ile mil boyunun uzamasıyla paneli doğu tarafına çevirir. -12 V geri besleme ile mil boyunun kısalmasıyla paneli batı yönüne çevirir. 0 V ile aktüatör çalışmaz dolayısıyla mil boyunun değişmesi söz konusu değildir. Bu hareketler ile mil boyuna bağlı olarak *DBPA* değişimi gerçekleşir. Lineer aktüatör modelleme mantalitesi besleme gerilimi ( $\pm 12$  V) süresince oluşan uzama veya kısalma miktarının belirlenmesine dayanır. Modelleme için aşağıda deneysel olarak elde edilen veriler dikkate alınmıştır.

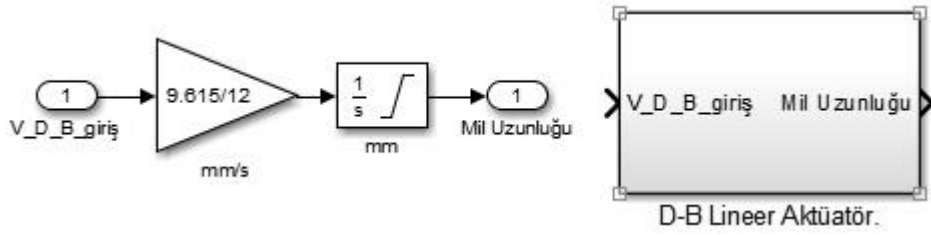
- Deneysel düzenekte lineer aktüatörün doğudan batıya veya batıdan doğuya doğru bir tur hareket edebilmesi için gerekli süresinin 52 saniye olduğu tespit edilmiştir.
- Lineer aktüatörün mil boyu 500 mm olduğundan dolayı 500 mm uzama veya 500 mm kısalma işlemini 52 saniyede gerçekleştirdiği tespit edilmiştir.
- 500 mm/52 saniye işlemi sonucunda aktüatörün hızı saniyede 9.615 mm olarak hesaplanmıştır.
- Sistem dinamik bir sistem olduğu için hızın integrali alınarak belirli bir süre

içerisindeki mil boyu uzama miktarı elde edilebilir. 
$$x(t) = \int_{t_0}^{t_1} v(\tau) d\tau, \quad t_0 \leq t < t_1,$$

Burada;  $x(t)$ , mil boyunun mm cinsinden uzunluk değeridir.

Şekil 6.19’da gösterildiği gibi lineer aktüatör bloğunun giriş değişkeni ( $\pm 12$  V veya 0 V) çıkış değişkeni ise mil uzunluğudur. Girişteki değer 9.615/12 gibi kazançla çarpılarak saniyedeki mil hareketi miktarı elde edilir. Giriş  $\pm 12$  V olduğunda saniyede 9.615 mm kadar uzama ya da kısalma gerçekleşir. Bu değişimi gerçekleştirecek ifade integral bloğu ile sağlanır. İntegral bloğunun içerisine mil boyunun başlangıç değeri 500 mm olarak girilmiştir. Çünkü panel tam doğuda iken benzetim başlatılmıştır. Panel tam doğuda olduğundan mil boyu 500 mm uzunluğa kadar açılmış demektir. Ayrıca sınırlayıcı olarak minimum 0 mm ve maksimum 500 mm uzama miktarları integratörün içerisine dâhil edilmiştir.

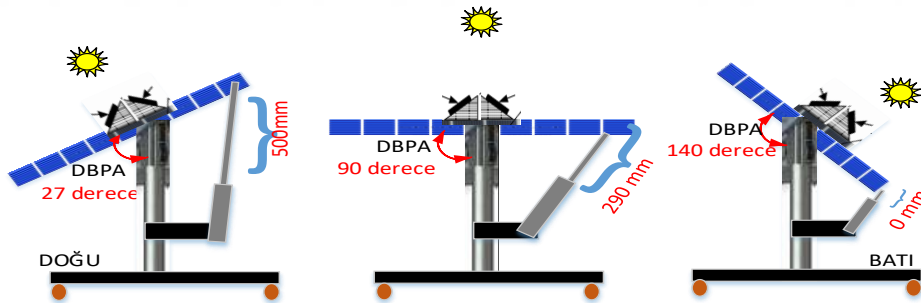




Şekil 6.19. D-B lineer aktüatörün blok modeli

### 6.7.2. Doğu-Batı panel açısının (DBPA) modellenmesi

Doğu batı panel açısı (DBPA) panele kuzey yönünden bakıldığında doğu tarafından başlamak üzere panelin normali ile yatay düzlem (yer) arasındaki açıyı ifade etmektedir. Şekil 6.20’de gösterildiği gibi DBPA açısı lineer aktüatörün mil uzunluğuna bağlı olarak değişim gösterir. Mil uzunluğu azaldıkça DBPA açısı artış göstermektedir. Paneli güneşe yönlendiren aktüatörün güneş takibi boyunca karşılaştığı yük momenti değiştiğinden dolayı mil uzunluğu ile DBPA arasında doğrusal bir artış söz konusu değildir. Aralarındaki bağıntı deneysel olarak, adım adım her bir noktadaki mil uzunluğuna karşılık gelen DBPA açısı kaydedilerek hazır veri tablosu oluşturulmuştur. Şekil 6.21’de gösterildiği gibi benzetim ortamındaki hazır veri tablosu, girişine verilen mil uzunluğuna karşılık, çıkışından DBPA açısı alınan bir sistem bloğudur.

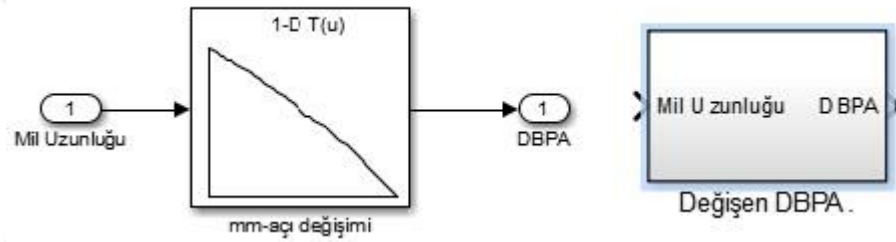


Şekil 6.20. DBPA’nın lineer aktüatör mil uzunluğuna göre değişimi

Oluşturulan bloğun girişine, lineer aktüatör sistem bloğu çıkışı olan mil uzunluğu bağlanmıştır. Bu sayede her bir mil boyu uzunluğuna karşılık gelen açı değeri bloğun çıkışından güneş takibi yapan panelin doğu-batı açısı olarak elde edilir. DBPA açısı doğu tarafından en az 27°, batı tarafından en fazla 140° açıyı gösterir. Dolayısıyla güneş takibi sırasında panel 27°-140° arasındaki açıları tarayabilir. Lineer aktüatör 0 mm uzunluğunda iken DBPA açısı 140°, 500 mm uzunluğunda iken DBPA açısı 27° değerine karşılık gelir. Benzetim ortamında her bir mil uzunluğuna karşılık gelen DBPA açısını veren hazır veri tablosu bloğu Tablo 6.5’deki verilerle oluşturulmuştur.

**Tablo 6.5.** DB lineer aktüatörün her bir mil uzunluğuna karşılık gelen DBPA değeri

Mil Uzunluğu (mm)	DBPA (derece)
0	140
10	139
20	137
30	135
40	134
⋮	⋮
290	90
⋮	⋮
460	39
470	36
480	33
490	30
500	27



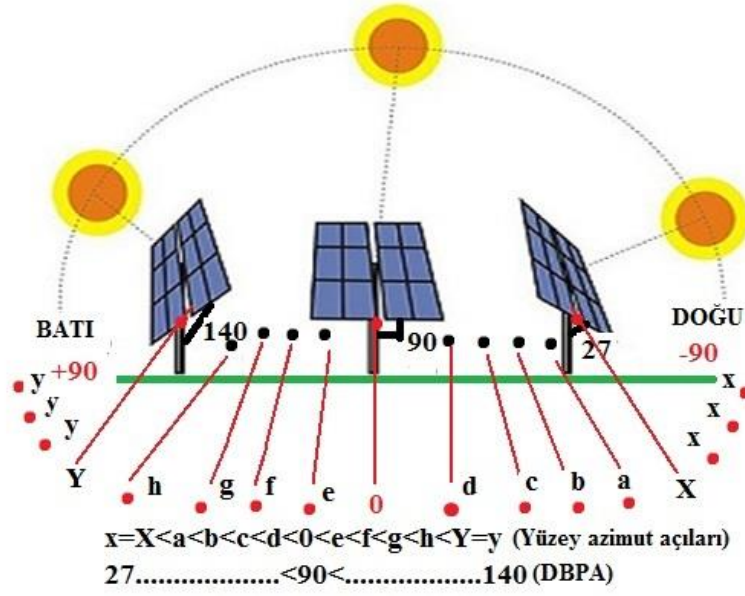
**Şekil 6.21.** Mil uzunluğuna göre değişen DBPA blok modeli

### 6.7.3. Yüzey azimut açısının modellenmesi

Doğu-batı hareketi, değişen *DBPA* açılara karşılık gelen yüzey azimut açılarının değişimine göre panelin doğu-batı yönünde güneşi takip etme durumunu ifade eder. Daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi yüzey azimut açısı güneye yönelen sabit sistemler için  $0^\circ$  olarak alınır. Hareketli sistemlerde ise panel güneş hareketine bağlı olarak döndüğü için yüzey azimut açısı günün her anında farklı değer alır. Yüzey azimut açısının değeri güneş azimut açına bağlı olarak değişir. Bu değişimi ifade eden formül Denklem (3.7)'de verilmiş idi.

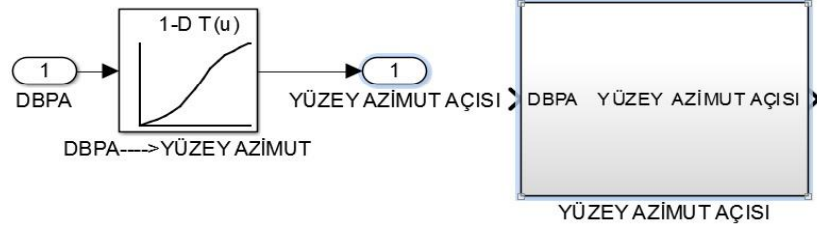
Yüzey azimut açısı kuzey yarım kürede doğuya yönelen *FV* panel sistemlerinde  $-90^\circ$  değerini alır. Güneye doğru artarak tam güneye bakan sistemlerde  $0^\circ$  değerini alır. Batıya doğru artarak tam batıya bakan sistemlerde  $+90^\circ$  değerini alır. Deneysel düzenekte panel  $0-180^\circ$  arasında tam tarama yapamadığından dolayı güneşin  $0-27^\circ$  ile  $140-180^\circ$  arasındaki açılarında sabit değerdedir.  $27-180^\circ$  arasındaki açılarda ise değişken değerlidir.  $0-27^\circ$  arasındaki yüzey azimut değeri veri setinde  $27^\circ$ 'ye karşılık gelen değer

ne ise o değeri alır. 140-180° arasındaki yüzey azimut açısı ise veri setinde 140°'ye karşılık gelen değer ne ise o değeri alır. Bunun nedeni panel açısının 27° altına düşmemesi ve 140° üstüne çıkamamasıdır. 27-140° arasındaki değerlerde panel güneşi takip edebildiği için yüzey azimut açısı değişir. Bu değerler veri setinde her bir *DBPA* açısına bağlı olarak elde edilir. Şekil 6.22'de *DBPA* sınırları içerisinde ve dışında değişen yüzey azimut açısının şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 6.22. DBPA sınırları içerisinde ve dışında değişen yüzey azimut açısının şematik gösterimi

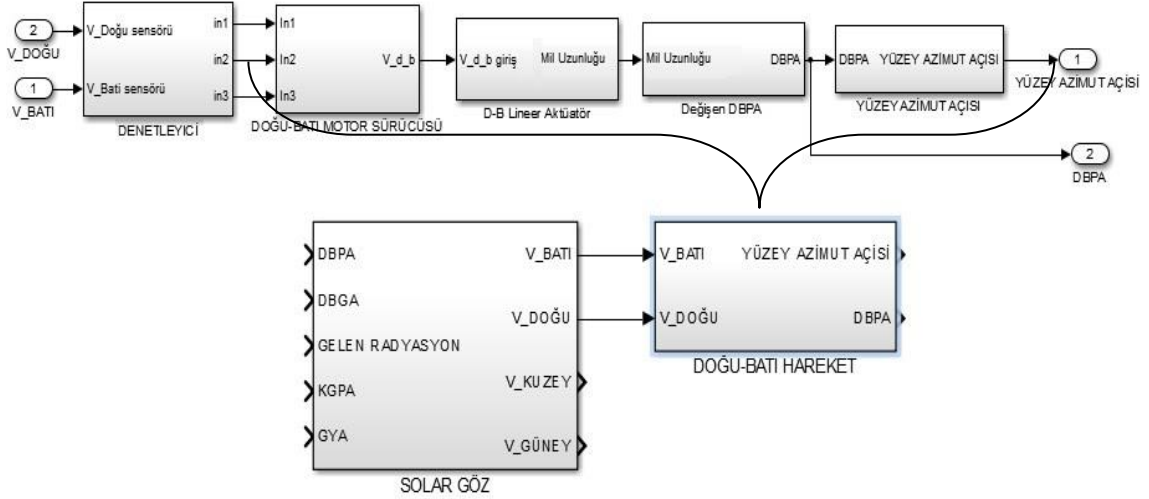
Şekil 6.22'de görüldüğü gibi güneş doğduğunda, panelin dönebileceği maksimum *DBPA* 27°'de sabit durduğundan dolayı 27° altındaki *DBGA* değerleri için yüzey azimut açıları sabit ve 27°'deki değere karşılık gelen değerde olur. Güneş batıya gittikçe ve *DBGA* 27° üstüne çıktığında panel de dönerek *DBPA*'yı *DBGA*'ya eşitleyecek şekilde güneş takibi yapacaktır. Dolayısıyla 27°-140° arasında her bir *DBGA* açısına karşılık gelen bir yüzey azimut açısı değeri oluşur. Güneş daha da batıya yöneldiğinde ve *DBGA* 140° üstüne çıktığında, panelin dönme açısı en fazla 140° olduğundan dolayı daha fazla dönemeyecektir. Dolayısıyla bu noktadan sonra yüzey azimut açısı sabit ve 140°'deki değere karşılık gelen değerde olur. Bu prensibe göre veri setinde her bir *DBPA*'ya karşılık gelen yüzey azimut açısı hazır veri tablosu bloğuna eklenerek yüzey azimut açısı modellenmiştir. Hazır veri tablosu bloğunun 1. sütununa (giriş) *DBPA* değerleri kaydedilmiş; 2. sütuna (çıkış) ise yüzey azimut açıları kaydedilmiştir. Şekil 6.23'te gösterildiği gibi benzetim ortamında her bir *DBPA* açısına karşılık gelen yüzey azimut açısı değerini oluşturan bir blok modeli tasarlanmıştır.



Şekil 6.23. Yüzey azimut açısının blok modeli

#### 6.7.4. Doğu-batı hareketinin modeli

Sonuç olarak Şekil 6.24'te gösterildiği gibi benzetim ortamındaki güneş takip sisteminin doğu-batı yönündeki hareketi için solar göz sensör modeli, denetleyici modeli, doğu-batı motor sürücüsü modeli, doğu-batı lineer aktüatör modeli, *DBPA* modeli ve yüzey azimut açısı modelleri kullanılmıştır.



Şekil 6.24. GTS'nin doğu-batı hareketi blok diyagramı

#### 6.8. Kuzey-Güney Dönme Hareketinin Modellenmesi

Güneş takip sisteminde kuzey-güney yönünde hareket, kuzey-güney motorunun sürülmesi sonucu *KGPA*'nın değişmesiyle gerçekleşir. *KGPA* değişmesiyle panel eğim açısı da değişir. Kuzey-güney hareketi *GYA*'ya bağlı olarak panel eğim açısı değiştirilerek güneş ışınlarının panele dik gelmesi sağlanır. Kuzey-güney hareketinin modeli için *KG* lineer aktüatör bloğu, *KGPA* bloğu ve panel eğim açısı bloğu gereklidir.

##### 6.8.1. Kuzey-Güney lineer aktüatörün modellenmesi

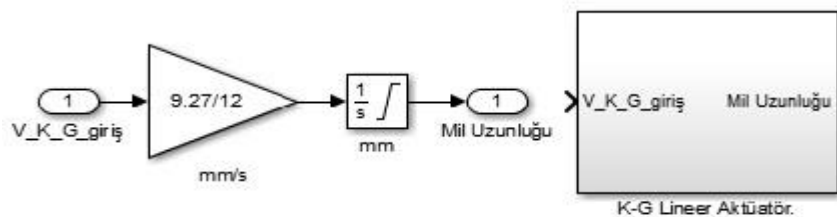
Kuzey-Güney lineer aktüatörün mil boyunun uzaması veya kısalmısıyla güneş yükseklik açısına bağlı olarak panel eğim açısı ayarlanır. *KG* aktüatörünün +12 V beslenmesi ile panel kuzeye -12 V beslenmesi ile panel güneye yönlendirilir. Lineer

aktüatörün modelleme mantalitesi besleme geriliminin süresince mildeki uzama veya kılalma miktarının belirlenmesidir. Modellemede aşağıdaki deneysel tespitler göz önüne alınmıştır.

- Deneysel düzenekte lineer aktüatöre +12 V veya -12 V besleme yapılarak sırasıyla kuzeyden güneye veya güneyden kuzeye olmak suretiyle bir tam turu 37 saniyede aldığı deneysel olarak tespit edilmiştir.
- Mil boyu başlangıçta 157 mm (KGPA=90°) tam açıldığında ise 500 mm (KGPA=30°) olduğuna göre, 500-157=343 mm'yi 37 saniyede aldığı tespit edilmiştir.
- 343 mm/37 saniye işleminin sonucuna göre saniyede 9.27 mm hız elde edilmiştir.
- Hızın integrali alınarak belli bir süre içerisindeki mil boyu

$$x(t) = \int_{t_0}^{t_1} V(\tau) d\tau, \quad t_0 \leq t < t_1$$
 bağıntısıyla elde edilebilir. Burada  $x(t)$ , mil boyunun mm cinsinden uzunluk değeridir.

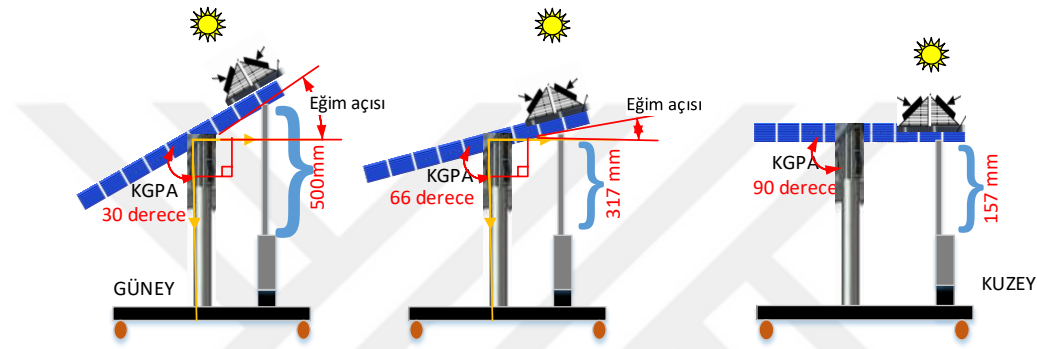
şekil 6.25'te gösterildiği gibi KG lineer aktüatör bloğunun giriş değişkeni besleme gerilimi; çıkış değişkeni ise mil uzunluğu değişimi olmak üzere bir model tasarlanmıştır. Giriş değişkeni 9.27/12 gibi bir kazançla çarpılarak saniyedeki uzama ya da kılalma miktarı elde edilir. Girişe ±12 V geldiğinde saniyede 9.27 mm gibi bir uzama veya kılalma gerçekteşir. Söz konusu model integratör bloğu ile oluşturulabilir. İntegratör bloğunun içerisinde mil boyunun başlangıç değeri 500 mm olarak girilmiştir. Çünkü panel tam güneyde iken benzetim başlatılmıştır. Panel tam güneyde olduğunda mil boyu tamamen açılmış yani 500 mm uzunluğundadır. Ayrıca sınırlayıcı olarak en az 157 mm ve en fazla 500 mm uzama miktarları integratörün içerisinde dâhil edilmiştir. Bunun nedeni KGPA açısının 30-90° arasında sınırlanmasından kaynaklanmaktadır. KGPA'nın en az 30° olması tasarımdan kaynaklanan bir durumdur. KGPA'nın en fazla 90° olması ise panelin güneş ışığını üzerine alabilmesi ile ilgilidir. Eğer KGPA 90° üstüne çıkarsa güneş panelin arkasında bulunur ve panelin kendi üzerinde gölgesi oluşur.



şekil 6.25. Kuzey-güney lineer aktüatörün benzetim ortamında blok modeli

## 6.8.2. Kuzey-Güney panel açısının (KGPA) modellenmesi

Kuzey-güney panel açısı (KGPA), panele doğu yönünden bakıldığında güney tarafından başlamak üzere panelin normali ile yatay düzlem (yer) arasındaki açıyı ifade eder. Şekil 6.26’da gösterildiği gibi KGPA açısı lineer aktüatörün mil uzunluğuna bağlı olarak değişim gösterir. Tasarımdan dolayı mil uzunluğu azaldıkça KGPA açısı artış gösterir. Panelin eğim açısının değişimi ile KGPA değişimi arasında doğrusal bir ilişki olmadığından aralarındaki bağıntı deneysel olarak, adım adım her bir noktadaki mil uzunluğuna karşılık KGPA açıları kaydedilerek bir *hazır veri tablosu* oluşturulmuştur.

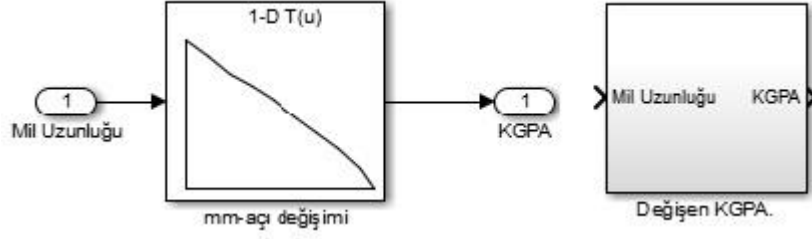


Şekil 6.26. KGPA'nın lineer aktüatör mil uzunluğuna göre değişimi

Şekil 6.27’de gösterildiği gibi oluşturulan blok modelinin giriş değişkeni mil uzunluğu; çıkış değişkeni ise KGPA’dır. KGPA açısı güney tarafına en az 30°, kuzey tarafına en fazla 90° açığı göreceğ şekilde tasarlanmıştır. Güneş takibi sırasında GYA’ya bağlı olarak KGPA açıları da elde edilir. KGPA 30-90° derece arasında tarama yapar. Dolayısıyla eğim açısı 0-60° arasında değerler alır. Lineer aktüatör 157 mm uzunluğunda iken KGPA açısı 90°, 500 mm uzunluğunda iken KGPA açısı 30° değerine karşılık gelir. Tablo 6.6’da her bir mil uzunluğuna karşılık gelen KGPA değeri verilmiştir. KGPA’nın modellenmesinde söz konusu değerler kullanılmıştır.

Tablo 6.6. KG lineer aktüatörün her bir mil uzunluğuna karşılık gelen KGPA değeri

Mil Uzunluğu (mm)	KGPA (derece)
157	90
197	84
⋮	⋮
477	38
500	30



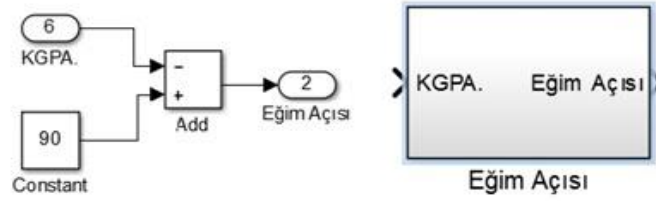
Şekil 6.27. KGPA'nın benzetim ortamında blok modeli

### 6.8.3. Panel eğim açısının modellenmesi

Panel eğim açısı ( $\beta$ ) yatay düzlem ile eğik düzlem arasında kalan açı değeridir. Modellenen sistemde panel eğim açısı  $KGPA$  açısına bağlı olarak değişim gösterir. Aralarındaki ilişki Denklem (6.20) ile ifade edilir.

$$\beta = 90^\circ - KGPA \quad (6.20)$$

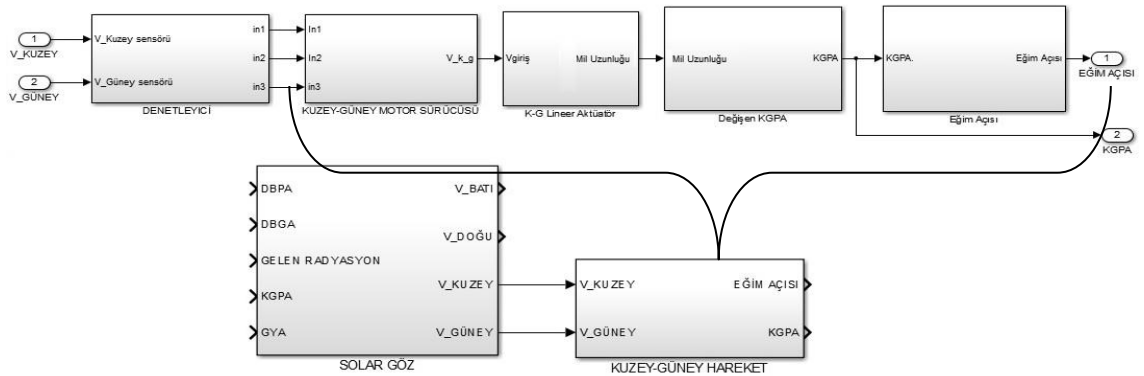
Denklem (6.20) panel eğim açısı blok modelinin matematiksel ifadesidir.



Şekil 6.28. Panel eğim açısının blok modeli

### 6.8.4. Kuzey-güney hareketinin modeli

Şekil 6.29'da gösterildiği gibi benzetim ortamında güneş takip sisteminin kuzey-güney yönündeki hareketi için solar göz sensör bloğu, denetleyici bloğu, kuzey-güney motor sürücüsü bloğu, kuzey-güney lineer aktüatör bloğu, değişen  $KGPA$  değerleri bloğu ve panel eğim açısı bloğu kullanılmıştır.



Şekil 6.29. Kuzey-güney hareketinin blok diyagramı

## 6.9. Güneş Geliş Açısının Modellenmesi

Güneş geliş açısı ( $\theta$ ), herhangi bir yüzeye gelen güneş ışınımı ile o yüzeyin normali arasındaki açıdır. Yüzeye gelen ışınımın geliş açısı sıfır derece ise ışınım yüzeye diktir. Güneş takip sistemlerinde bu açının sıfır ya da sıfıra yakın olması sağlanır. Eğer  $\theta=0^\circ$  olursa  $\cos\theta=1$  olur ve dolayısıyla gelen güneş ışınımı panelin üzerine en etkin bir şekilde gelmiş olur.

Güneş geliş açısının modeli Denklem (3.8) kullanılarak elde edilir. Şekil 6.30'da gibi tasarlanan modelin girişinde deklinasyon, enlem açısı, eğim açısı, yüzey azimut açısı ve saat açısı değerleri bulunur. Modelin çıkışında ise  $\cos(\theta)$  elde edilir. Burada güneş geliş açısı modeli, hareketli ve sabit panelin üzerine düşen güneş ışınımının geliş açısını elde etmek için kullanılmıştır. Deklinasyon, enlem ve saat açısı, güneş ve konum bilgileri modelinden gelen değerlere göre girişlerdir. Sabit sistem için eğim açısı olarak sabit bir değer girilir. Hareketli sistemde ise eğim açısı kuzey-güney hareketinin blok modelinden gelir. Yüzey azimut açısı, sabit sistemler için kuzey yarım kürede sabit sıfır değerine eşit olur. Eğer sistem hareketli bir sistem ise yüzey azimut açısı doğu-batı yönlendirmesi bloğundan gelen değere eşit olur.



Şekil 6.30. Güneş geliş açısının blok modeli

## 6.10. FV Panel Giriş Değişkenlerinin Modellenmesi

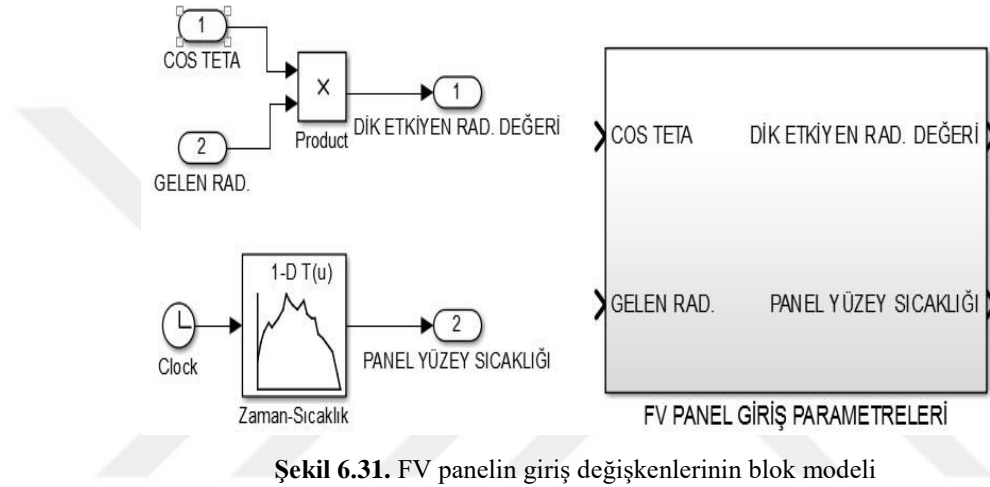
Daha önceden modellenen FV panelinin giriş değişkenlerinin güneş ışınım şiddeti ve panel yüzey sıcaklığı olduğu belirtilmişti. Burada panele etki eden güneş ışınım şiddetinin (solar radyasyon) dik bileşeni Denklem (6.21)'ye göre hesaplanır.

$$G_{etkin} = G_{gelen} \cos(\theta) \quad (6.21)$$



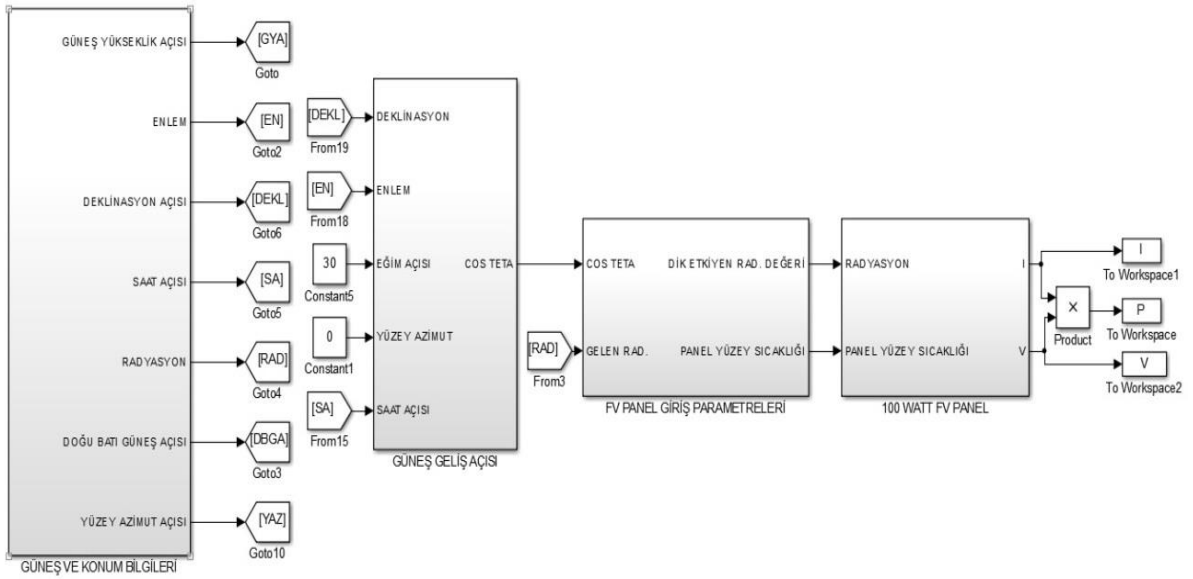
Gelen radyasyon değerinin ne kadarının güneş panelinin üzerine düştüğünü  $\cos(\theta)$  belirler. Güneş takip sistemlerinde  $\cos(\theta) \cong 1$  olduğu durumlarda panel gelen güneş ışınımı en etkin biçimde üzerine alır. Sabit sistemlerde güneş geliş açısı  $0^\circ$  olmadığı için gelen güneş ışınımının ancak bir kısmını üzerine alabilmektedir.

*FV* panelin bir başka giriş değişkeni panel yüzey sıcaklığıdır. Deneysel veriler ile zamana bağlı olarak elde edilmiş panel yüzey sıcaklıklarının benzetim ortamında *hazır veri tablosu* bloğu kullanılarak bir blok modeli oluşturulmuştur. Şekil 6.31’de gösterildiği gibi benzetim ortamında *FV* panel giriş değişkenlerinin blok modeli tasarlanmıştır.



### 6.11. Sabit FV Panelin Benzetim Ortamında Modellenmesi

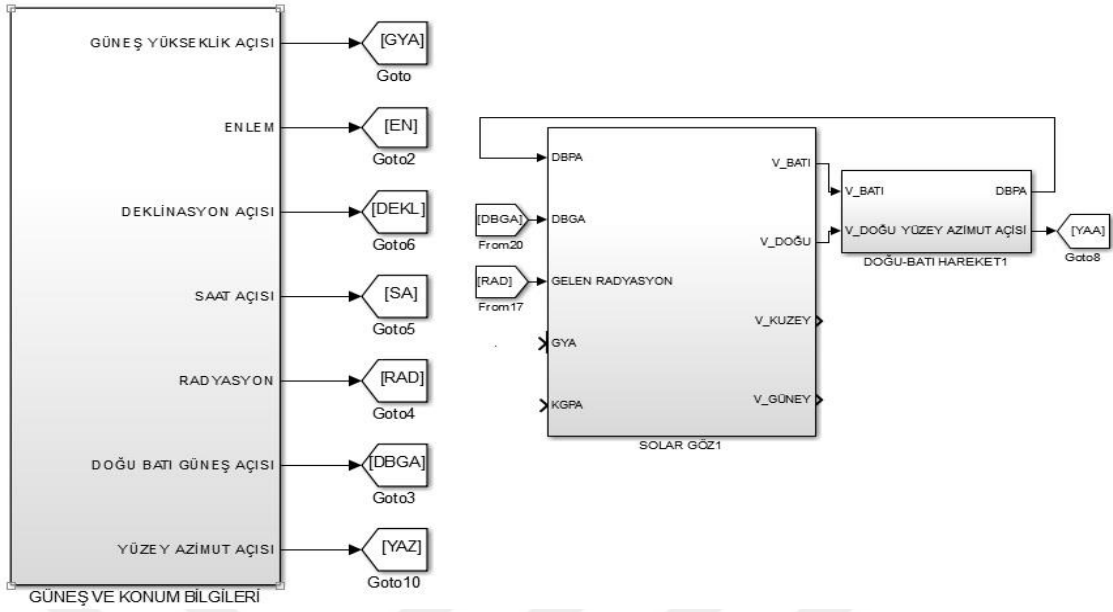
Sabit FV panelin benzetim ortamında modellenebilmesi için güneş konum bilgileri bloğu, güneş geliş açısı bloğu, *FV* panel giriş değişkenleri bloğu ve 100 Watt gücündeki *FV* panel blok modeli gereklidir. Burada dikkat edilmesi gereken husus, güneş geliş açısı modelindeki panel eğim açısı ve yüzey azimut açısı değerlerinin sabit değerler olmasıdır. Eğim açısı girişine, deneysel düzenekteki sabit *FV* panel eğim açısı olan  $30^\circ$  değeri girilmiştir. Yüzey azimut açısı girişine  $0^\circ$  sabit değeri girilir. Bunun nedeni *FV* panel sabit ve güneşe doğru yönlendirilmiş olmasından dolayıdır. Sonuçta panelin girişine güneş açıları ve panel konumuna bağlı olarak dik etkiyen bir güneş ışınımı olacaktır. Bununla beraber deneysel veriler ile elde edilmiş panel yüzey sıcaklıkları panelin yüzey sıcaklık girişine verilerek panel çıkışından gerilim ( $V$ ), akım ( $I$ ) ve güç ( $P$ ) değişkenleri elde edilir. Şekil 6.32’de benzetim ortamındaki sabit FV panel sisteminin blok diyagramı verilmiştir.



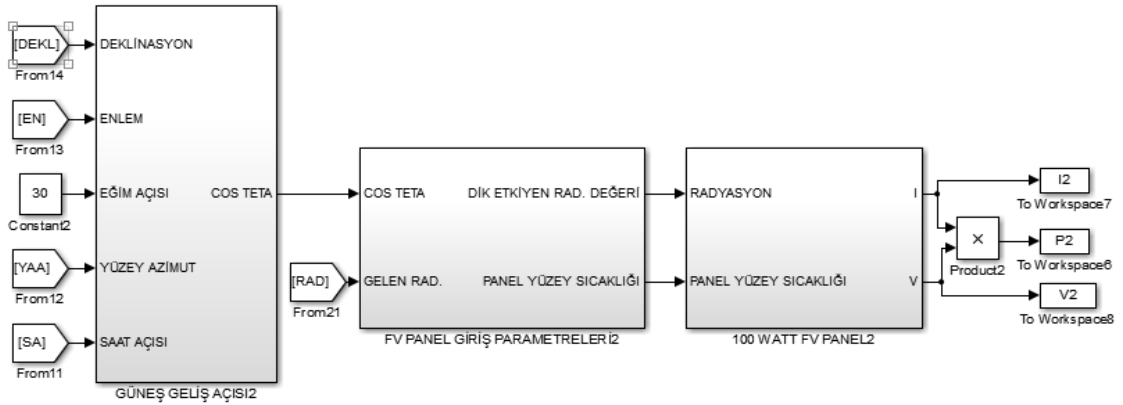
Şekil 6.32. Sabit FV panelin benzetim ortamında tasarlanan blok diyagramı

## 6.12. Tek Eksenli GTS'nin Benzetim Ortamında Modellenmesi

Tek eksen *FV* panelin benzetim ortamında modellenmesi için güneş konum bilgileri modeli, güneş geliş açısı bloğu, solar göz bloğu, doğu-batı hareket bloğu, *FV* panel giriş değişkenleri bloğu ve 100 *Watt* gücündeki *FV* panel blok modelidir. Burada dikkat edilmesi gereken husus güneş geliş açısı modelindeki panel eğim açısı sabit bir değer ve yüzey azimut açısı değerlerinin doğu-batı hareketi blok modelinden gelen değerler olduğudur. Tek eksenli sistemde panel sabit bir eğim açısına konumlandırılıp doğu-batı yönünden güneşi takip edecek şekilde tasarlanır. Sistem doğu-batı yönünde takip gerçekleştirdiğinden *DBPA* açısı benzetim süresi boyunca değişir. Bu değişimi ifade etmek için doğu-batı hareket blok modelinden solar göz modeline geri besleme yapılmıştır. Sonuçta panelin giriş değişkeni, güneş açılarına ve panel konumuna bağlı olarak dik etkiyen güneş ışınımı olacaktır. Bununla beraber deneysel veriler ile elde edilmiş panel yüzey sıcaklıkları, panelin yüzey sıcaklık girişine verilerek panel çıkışından gerilim ( $V$ ), akım ( $I$ ) ve güç ( $P$ ) değişkenleri elde edilir. Şekil 6.33 ve Şekil 6.34'te benzetim ortamındaki tek eksenli *GTS* sistemine ait tasarlanan hareket sistemi bloğu ile sistemin genel blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 6.33. Benzetim ortamında tasarlanan tek eksenli GTS'nin hareket sistemi bloğu

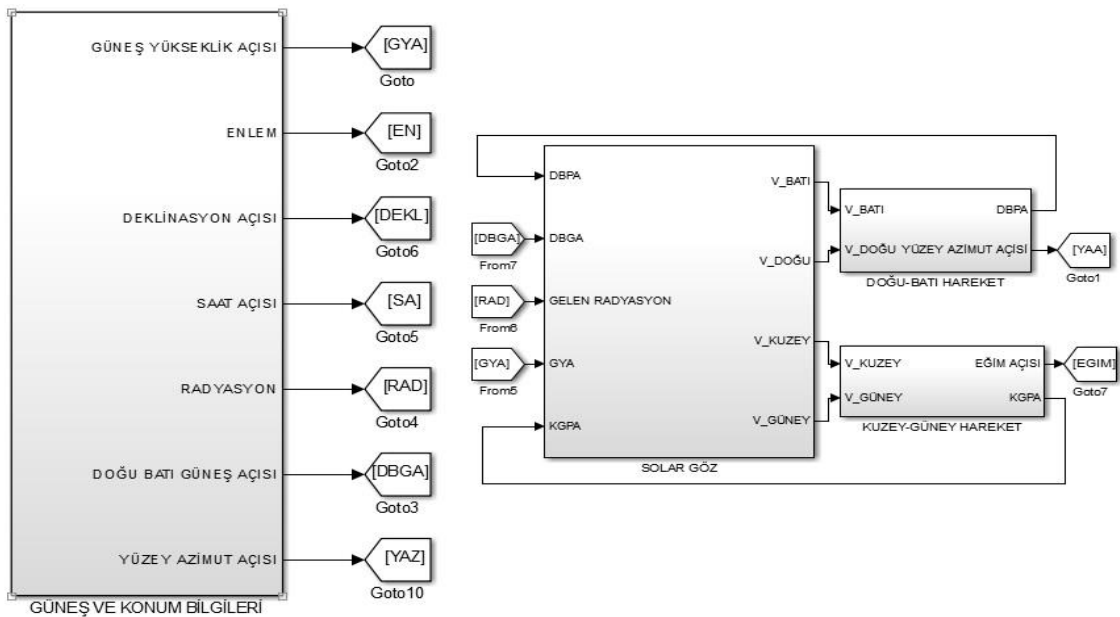


Şekil 6.34. Tek eksenli GTS'nin benzetim ortamında tasarlanan blok diyagramı

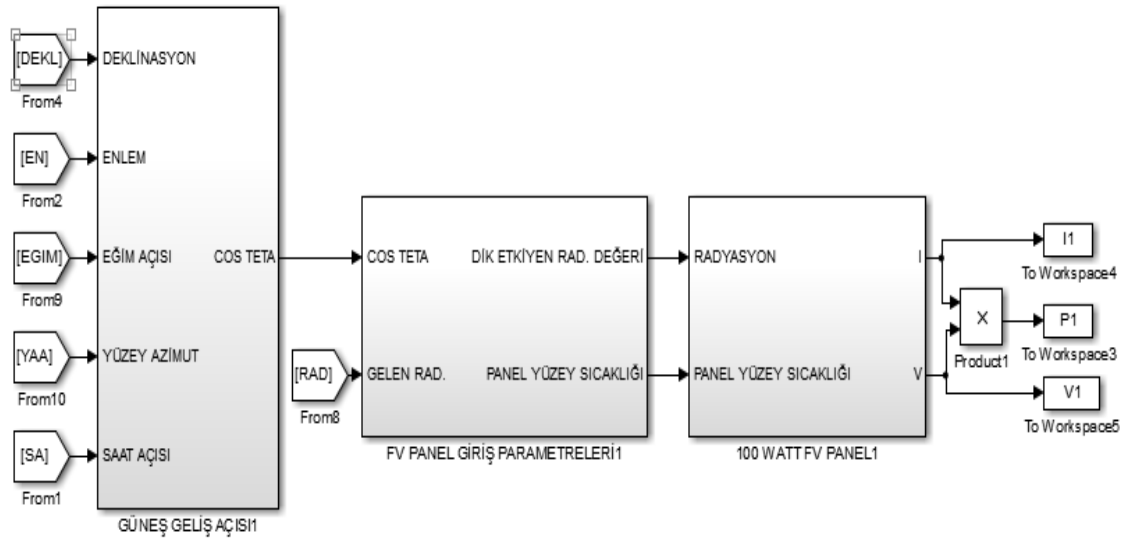
### 6.13. Çift Eksenli GTS'nin Benzetim Ortamında Modellenmesi

Çift eksenli *FV* panelin benzetim ortamında modellenmesi için ihtiyacımız olan bloklar; güneş ve konum bilgileri bloğu, güneş geliş açısı bloğu, solar göz bloğu, doğu-batı hareket bloğu, kuzey-güney hareket bloğu, *FV* panel giriş değişkenleri bloğu ve 100 *Watt* gücündeki *FV* panel blok modelidir. Burada dikkat edilmesi gereken husus güneş geliş açısı modelindeki panel eğim açısı ve yüzey azimut açısı değerlerinin sırasıyla kuzey-güney ve doğu-batı hareket blok modelinden gelen değerler olduğudur. Çift eksenli sistemde panel eğim açısı güneş yükseklik açısına göre değişerek kuzey-güney yönlü güneş takibi yapılmıştır. Bunun yanında saat açısına göre değişen *DBGA* değerlerine göre doğu-batı yönünden güneş takibi yapılacak şekilde bir tasarım

yapılmıştır. Panelin *KGPA* ve *DBPA* değerleri benzetim süresi boyunca değişir. Bu değişimleri ifade etmek için doğu-batı hareket modelinden ve kuzey-güney hareket modelinden sırasıyla *DBPA* ve *KGPA*'dan solar göz modeli girişine geri besleme bağlanmıştır. Sonuçta panelin giriş değişkeni, güneş açılarının ve panel konumunun belirlediği güneş ışınımının dik bileşeni olacaktır. Bununla beraber deneysel yolla elde edilebilen panel yüzey sıcaklıkları panelin yüzey sıcaklık blok modelinin girişine verilerek panel çıkışından gerilim (*V*), akım (*I*) ve güç (*P*) değişkenleri elde edilir. Şekil 6.35 ve Şekil 6.36'da benzetim ortamındaki tek eksenli *GTS* sistemine ait tasarlanan hareket sistemi bloğu ile sistemin genel blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 6.35. Benzetim ortamında tasarlanan çift eksenli *GTS*'nin hareket sistemi bloğu



Şekil 6.36. Çift eksenli *GTS*'nin benzetim ortamında tasarlanan blok diyagramı

## 7. BULGULAR ve TARTIŞMA

### 7.1. Sabit ve Hareketli Sisteme İlişkin Deneysel Sonuçlar

31.07.2018 (1. gün) ve 09.08.2018 (2. gün) tarihlerinde olmak üzere iki ayrı günde saat 07:30 – 19:00 arasında 10'ar dakika arayla panellerin çıkışına bağlanan yük direnci üzerinde oluşan gerilim ve akım değerleri kayıt altına alınmıştır. Elde edilen akım ve gerilim değerlerinden panellerin anlık güçleri elde edilmiştir. *Gerilim-zaman*, *akım-zaman* ve *güç-zaman* grafikleri oluşturulmuştur. Hareketli panel ile sabit panelin ürettikleri enerji miktarlarını karşılaştırmak amacıyla *güç-zaman* eğrileri altında kalan alanlar (enerji) hesaplanmıştır. Elde edilen enerji miktarları birbirleriyle karşılaştırılarak hareketli panelin sabit panele göre verim farkı yüzdesel olarak hesaplanmıştır. Enerji miktarlarının hesabı için trapez kuralı ile integrasyon yöntemi kullanılmıştır.

Yamuklar yöntemi ile integrasyon işlemi için Şekil 7.1'de görülen  $[a,b]$  aralığı  $n$  adet eşit parçaya bölünmüştür. Bu durumda her bir parçanın genişliği  $\Delta x=(b-a)/n$  olur. 'i.' aralığın genişliği Denklem (7.1) gibi olur.

$$[x_i, x_{i+1}] = [x_i, x_i + \Delta x] = [a + i\Delta x, a + (i+1)\Delta x], \quad i = 0, \dots, n-1 \quad (7.1)$$

Şekil 7.1'deki yamuğun taralı alanı Denklem (7.2) ile elde edilir.

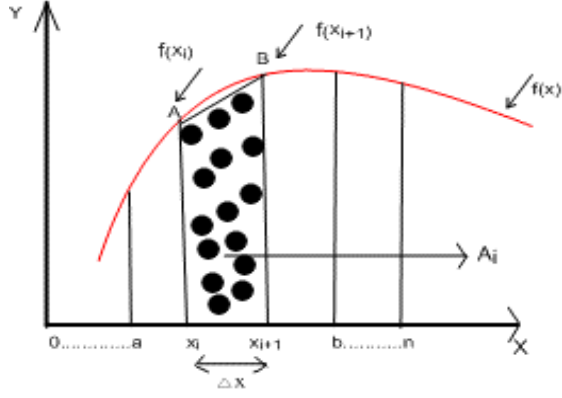
$$A_i \approx (x_{i+1} - x_i) \cdot \frac{f(x_i) + f(x_{i+1})}{2} = \frac{\Delta x}{2} (f(x_i) + f(x_{i+1})) \quad (7.2)$$

$$A_{ig} = \int_{x_i}^{x_{i+1}} f(x) dx \quad (7.3)$$

Elde edilen  $A_i$  alanı Denklem (7.3) ile hesaplanan gerçek alandan daha büyük değerde değildir. Şekil 7.1'de verilen  $f(x)$  eğrisinin yamuklar yöntemi ile integrasyon kuralına göre hesaplanan tüm alanı yaklaşık olarak Denklem (7.4) ile elde edilebilir.

$$A_{Top} = \sum_{i=0}^n \frac{\Delta x}{2} (f(x_i) + f(x_{i+1})) = \frac{\Delta x}{2} (f(x_0) + 2f(x_1) + \dots + 2f(x_{n-1}) + f(x_n)) \quad (7.4)$$

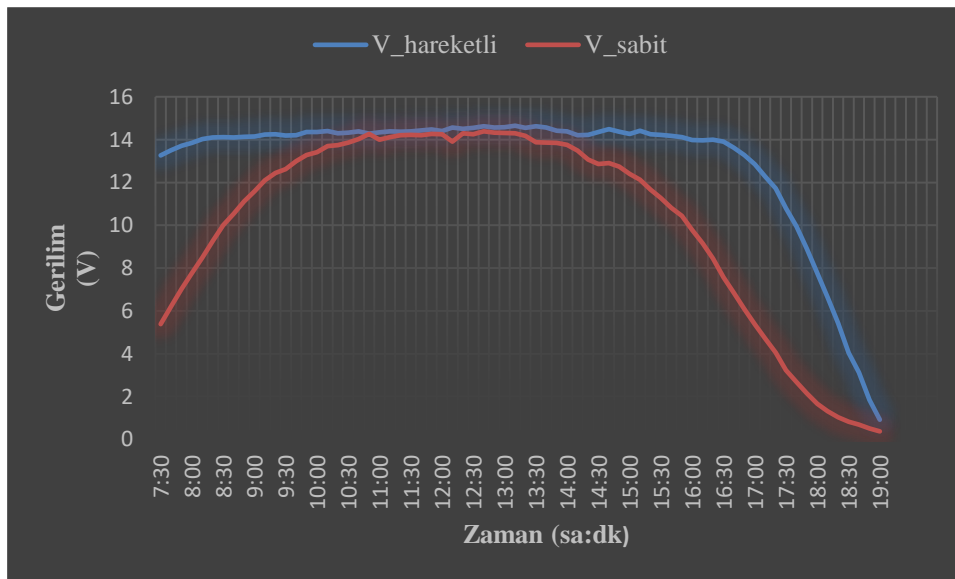
Deneysel verilerle elde edilmiş olan güç-zaman eğrisi altında kalan alanın yani toplam enerji miktarının hesabı için yamuklar yöntemi ile integrasyon kuralının uygulandığı Matlab'de *trapz* komutu kullanılmıştır.



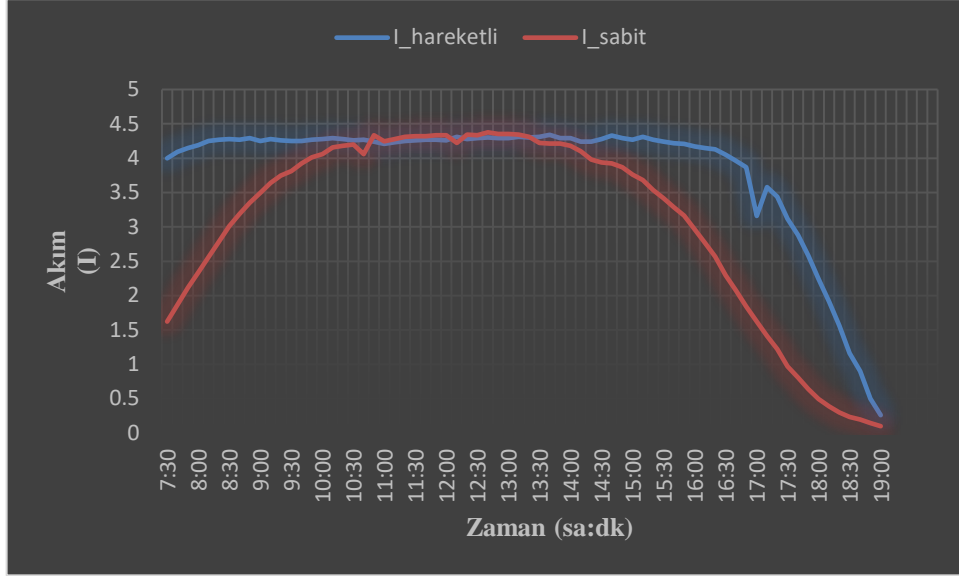
Şekil 7.1. Yamuklar yöntemi integrasyon kuralının bir eğri üzerinde gösterimi

### 7.1.1. Birinci güne ait deneysel sonuçlar ve verimlilik analizi

Birinci günde sabit sistem ile hareketli sisteme ait saat 07:30 – 19:00 arasında 10’ar dakika arayla elde edilmiş *gerilim-zaman*, *akım-zaman* ve *güç-zaman* grafikleri sırasıyla Şekil 7.2, Şekil 7.3 ve Şekil 7.4’te verilmiştir. Grafiklerden de anlaşılacağı üzere hareketli sistem sabit sisteme göre daha verimlidir. Özellikle öğleden önce ve öğleden sonraki vakitlerde hareketli sistemin sabit sisteme göre daha verimli olduğu görülmektedir. Öğle vaktinde ise güneş tam tepede olduğundan dolayı güneşi takip eden sistem sabit sistemin konumlandırıldığı şekilde bir hal almış ve bu yüzden hareketli sistemin sürekli güneş ışınımına maruz kalması sebebiyle sıcaklık yükselmiş ve yüksek sıcaklık nedeniyle verimliliği azalmıştır. Bu sebeple güç grafiğinde öğle vakitlerinde sabit ve hareketli panel güçlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 7.2. Birinci güne ait hareketli ve sabit sistemin gerilim-zaman grafiği



Şekil 7.3. Birinci güne ait hareketli ve sabit sistemin akım-zaman grafiği

Hareketli sistemin sabit sisteme göre olan verim farkını hesaplamak için Şekil 7.4 grafiğindeki hareketli panel ile sabit panelin güç eğrilerinin altında kalan alan hesabı için Denklem (7.4) kullanılarak Denklem (7.5) yazılabilir;

$$W \cong \sum_{i=0}^n \frac{f(x_i) + f(x_{i+1})}{2} \cdot h = \frac{h}{2} \sum_{i=0}^n (f(x_i) + f(x_{i+1})) \quad (7.5)$$

Denklemden  $n$  ölçüm sayısı,  $h$  saat cinsinden ölçüm aralığıdır. Buna göre Şekil 7.4'te verilen grafiğe göre  $n=70$ ,  $h=0.167$  değerleri olarak güç-zaman grafiğinin altında kalan alan hesaplanmıştır.  $n$  değerinin 70 olması saat 07:30 – 19:00 arası 10'ar dakikayla alınan ölçüm sayısına eşittir.  $h$  ise 10 dakikanın 10/60'tan saat cinsinden değeridir.

$$W_s \cong \frac{0.167}{2} \cdot \sum_{i=0}^{70} (f(x_i) + f(x_{i+1})) = 2694.51 \quad (7.6)$$

$$W_h \cong \frac{0.167}{2} \cdot \sum_{i=0}^{70} (f(x_i) + f(x_{i+1})) = 3697.171 \quad (7.7)$$

Denklem (7.6) ile Denklem (7.7)'de hesaplanan  $W_s$  ve  $W_h$  değerleri sırasıyla sabit ve hareketli panellerden elde edilen enerji miktarlarının toplamıdır. Hesaplanan bu değerlerden anlaşılacağı üzere hareketli panelin ürettiği toplam enerji miktarı sabit panelin ürettiği toplam enerji miktarından fazladır. Hareketli panelin, sabit panele göre yüzdesel olarak ne kadar daha verimli olduğu Denklem (7.8) ile hesaplanır.

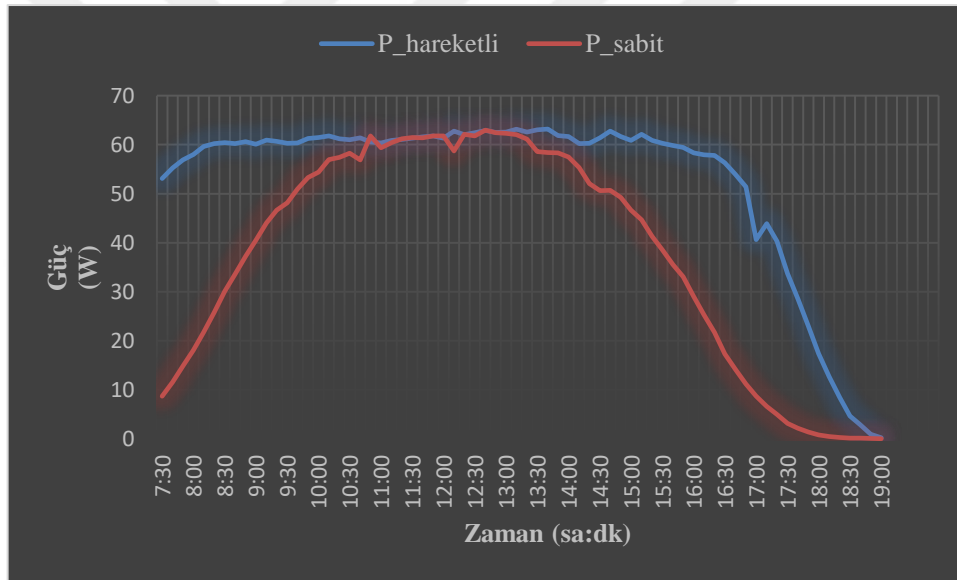
$$\eta = \frac{W_h - W_s}{W_s} \cdot 100 = \frac{3697.171 - 2694.051}{2694.051} \cdot 100 \cong \%37.234 \quad (7.8)$$

Denklem (7.6) ve Denklem (7.7) ile 11.5 saat boyunca hareketli ve sabit panelden elde edilen toplam enerji miktarları ayrı ayrı hesaplanmıştır. Üretilen bu enerji miktarları toplam saate bölüldüğünde ortalama enerji miktarları elde edilir. Buna göre panellerin saat başı ürettikleri ortalama enerji miktarı  $Wh$  (Watt-saat) veya  $kWh$  (kilowatt-saat) cinsinden Denklem (7.9) ve Denklem (7.10) ile hesaplanmıştır.

$$W_s = \frac{2694.051}{11.5} = 234.265(Wh) = 0.234(kWh) \quad (7.9)$$

$$W_h = \frac{3697.171}{11.5} = 321.493(Wh) = 0.321(kWh) \quad (7.10)$$

Birinci güne ait hesaplama sonucunda sabit eğim açılı doğu batı yönünde güneş takibi yapan hareketli panelin sabit panele göre % 37.234 daha verimli olduğu görülmüştür.



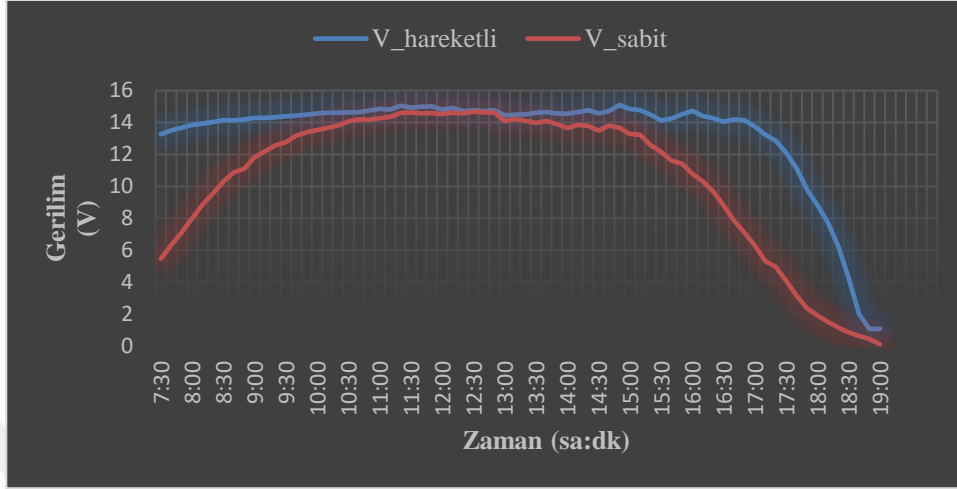
Şekil 7.4. Birinci güne ait hareketli ve sabit sistemin güç-zaman grafiği

### 7.1.2. İkinci güne ait deneysel sonuçlar ve verimlilik analizi

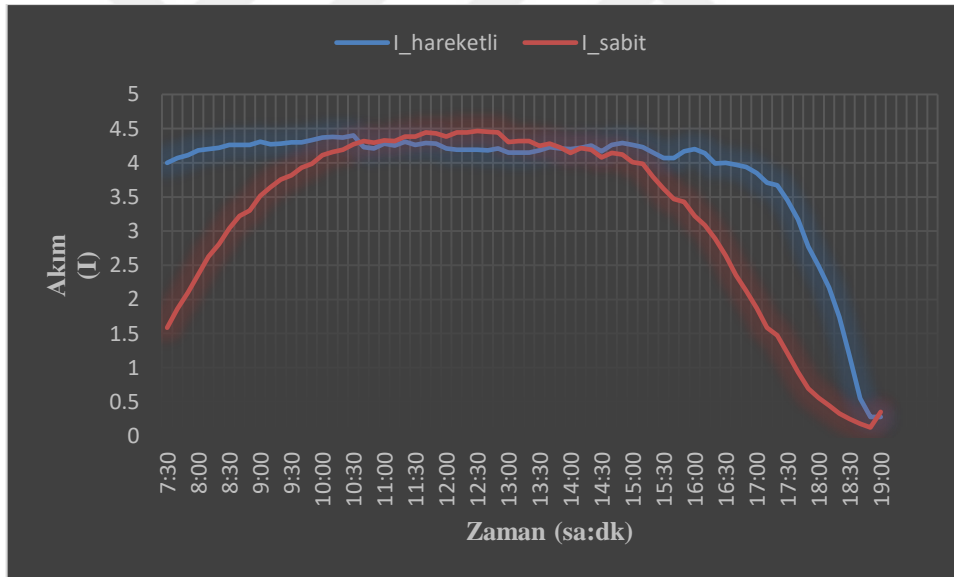
İkinci günde sabit sistem ile hareketli sisteme ait saat 07:30 – 19:00 arasında 10'ar dakika arayla elde edilmiş *gerilim-zaman*, *akım-zaman* ve *güç-zaman* grafikleri sırasıyla Şekil 7.5, Şekil 7.6 ve Şekil 7.7'de verilmiştir. Grafiklerden de anlaşılacağı üzere tıpkı birinci güne ait verilerde olduğu gibi hareketli sistemin sabit sisteme göre daha verimli olduğu görülmektedir. Bu durum özellikle öğleden önce ve öğleden sonra daha belirgindir. Öğle vaktinde güneşi takip eden sistem sabit sistemin konumuna yakın konuma sahip olur. Hareketli sistem öğle vaktine kadar sürekli güneş ışınımına maruz



kalıp ısındığından, yükselen sıcaklık nedeniyle verimliliği azalmıştır. Bundan dolayı Şekil 7.7’deki güç eğrisi grafiğinde öğle vakitlerinde sabit sistemin hareketli sisteme göre çok az bir zaman aralığında da olsa daha verimli olduğu görülmektedir.



Şekil 7.5. İkinci güne ait hareketli ve sabit sistemin gerilim-zaman grafiği



Şekil 7.6. İkinci güne ait hareketli ve sabit sistemin akım-zaman grafiği

İkinci günde hareketli sistemin sabit sisteme göre olan verim farkını hesaplamak için Şekil 7.7 grafiğindeki hareketli panel ile sabit panelin güç eğrilerinin altında kalan alan hesabı için Denklem (7.4) kullanılarak Denklem (7.11) yazılabilir;

$$W \cong \sum_{i=0}^n \frac{f(x_i) + f(x_{i+1})}{2} \cdot h = \frac{h}{2} \sum_{i=0}^n (f(x_i) + f(x_{i+1})) \quad (7.11)$$

Denklemden  $n$  ölçüm sayısı,  $h$  saat cinsinden ölçüm aralığıdır. Buna göre Şekil 7.7’de verilen grafiğe göre  $n=70$ ,  $h=0.167$  değerleri alınarak grafiğin altında kalan alan

hesabı yapılmıştır.  $n$  değerinin 70 olması saat 07:30 – 19:00 arası 10’ar dakikayla alınan ölçüm sayısını ifade eder.  $h$  ise 10 dakikanın 10/60’tan saat cinsinden değeridir.

$$W_s \cong \frac{0.167}{2} \sum_{i=0}^{70} (f(x_i) + f(x_{i+1})) = 2787.729 \quad (7.12)$$

$$W_h \cong \frac{0.167}{2} \sum_{i=0}^{70} (f(x_i) + f(x_{i+1})) = 3784.530 \quad (7.13)$$

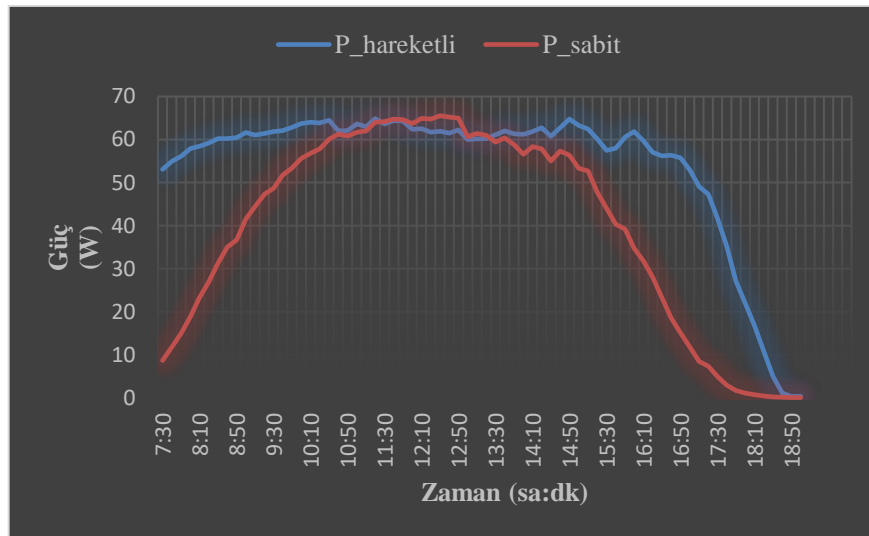
Denklem (7.12) ve Denklem (7.13) ile hesaplanan  $W_s$  ve  $W_h$  değerleri sırasıyla sabit ve hareketli panellerden elde edinilen toplam enerji miktarlarıdır. Hesaplanan bu değerlerden anlaşılacağı üzere hareketli panelin ürettiği toplam enerji miktarı sabit panelin ürettiği toplam enerji miktarından fazladır. Hareketli panelin sabit panele göre yüzdesel olarak ne kadar daha verimli olduğu Denklem (7.14) ile hesaplanabilir.

$$\eta = \frac{W_h - W_s}{W_s} \cdot 100 = \frac{3784.530 - 2787.729}{2787.729} \cdot 100 \cong \%35.756 \quad (7.14)$$

Denklem (7.12) ile Denklem (7.13) ile sırasıyla 11.5 saat süresince sabit ve hareketli panelden elde edilen toplam enerji miktarları ayrı ayrı elde edilmiştir. Buna göre panellerin saat başı ürettikleri ortalama enerji miktarlarının  $Wh$  (Watt·saat) veya  $kWh$  (kilowatt·saat) cinsinden değerleri Denklem (7.15) ve Denklem (7.16) ile hesaplanabilir.

$$W_s = \frac{2787.729}{11.5} = 242.411(Wh) = 0.242(kWh) \quad (7.15)$$

$$W_h = \frac{3784.530}{11.5} = 329.089(Wh) = 0.329(kWh) \quad (7.16)$$



Şekil 7.7. İkinci güne ait hareketli ve sabit sistemin güç-zaman grafiği

Alınan sonuçlardan ikinci güne ait hesaplama sonucunda sabit eğim açılı doğu batı yönünde güneş takibi yapan hareketli panelin sabit panele göre % 35.756 daha verimli olduğu görülmüştür. Deneyin başka bir gün tekrarlanmasının sebebi, birinci gün yapılan deneyin sonuçlarını doğrulamaktır. Sonuç olarak deneylerin yapıldığı güne ait havanın açık veya kapalı olma durumu, ışıma şiddeti ve güneş konum bilgilerine göre biraz farklı olsa da, genel anlamda sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür. Farklı günlere ait deney sonuçlarına göre güneşlenme süresi ve güneş ışınım şiddetinin yüksek olduğu bir günde sabit eğim açılı *doğu-batı* yönünde tek eksenle güneş takibi yapan sistemlerin sabit sistemlere göre % 35-40 kadar daha verimli olduğu tespit edilmiştir.

## **7.2. Deneysel ve Benzetim Sonuçlarının Karşılaştırılması**

### **7.2.1. Birinci güne ait deneysel ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması**

Bilgisayar ortamında benzetim gerçekleştirilirken güneş ve konum bilgileri blok modelinde olan veri setinin oluşması için *MIDC SOLPOS Calculator* arayüz programından ilgili güne ait tarih, saat yada dakika cinsinden veri alınma aralığı, ihtiyaç duyulan güneş açıları belirlenir. Bu işlemten sonra Şekil 6.11 gibi bir veri seti oluşur. Oluşturulan veri setine ek olarak deneysel ölçümlerle elde edilen gelen güneş radyasyon değeri ile diğer açı değerleri (sistemin kurulduğu yerin enlemi, doğu-batı güneş açısı, yüzey azimut açısı, güneş yükseklik açısı) dahil edildikten sonra veri seti benzetim ortamına ilgili yere aktarılır. Bu işlemten sonra benzetimi gerçekleştirilecek olan hareketli sistem ile sabit sistem aynı benzetim ortamında olmak suretiyle ve ilgili girişlerine gerekli bağlantılar yapıldıktan sonra benzetim çalışmaya hazır duruma getirilir. Benzetim süresinin başlangıç ve bitiş değerleri saniye cinsinden girilir. Örneğin tez içerisinde tasarlanan deney düzeneği saat 07:30-19:00 arasında gerçekleştirildiğinden dolayı benzetim ortamında bu saat değerlerine karşılık gelen saniye değerleri (27000-68400) girilmelidir. Burada dikkat edilmesi gereken husus saat 00:00 değerinin 0 saniyeyi karşılık gelme durumunun baz alınmasıdır.

Birince güne ait deneysel ve benzetim sonuçlarında deney düzeneğinden 30 dakikalık aralıklarla ölçülen gelen güneş radyasyon değeri, panel yüzey sıcaklıkları gibi giriş değişkenleri kullanılmıştır. Bu giriş değişkenlerine göre panelin çıkışında gerilim, akım, güç gibi çıkış değişkenleri, elde edilmiştir.

Şekil 7.8’de birinci güne ait 30 dakikalık aralıklarla deneysel ölçümler ile elde edilen sabit ve hareketli panelin bulunduğu ortama gelen radyasyon miktarı ile benzetim sonucunda görülen sabit ve hareketli panellerin üzerine düşen etkili radyasyon değerleri grafikleri Şekil 7.8 (a) ile verilmiştir. Şekil 7.8 (b)’de hareketli ve sabit panellerin deneysel ortamda ölçülen panel yüzey sıcaklıkları verilmiştir. Deney düzeneğinde bulunan hareketli ve sabit panelin çıkışlarından gün boyunca ölçülen gerilim, akım ve güç değerleri grafikleri sırasıyla Şekil 7.8 (c), (d), (e) grafiklerinde verilmiştir. Şekil 7.8 (f)’deki grafik panel verimliliklerini göstermektedir. Panel verimliliğindeki mentalite panel yüzeyine gelen etkili ışınım şiddetine göre panelin çıkışına elde edilen gücün değeri belirlenerek, panelin yüzdesel olarak ne kadar verimlilikle çalıştığını hesaplamaktır. Panel verimliliği yüzdesel olarak Denklem (7.17) ile elde edilmiştir.

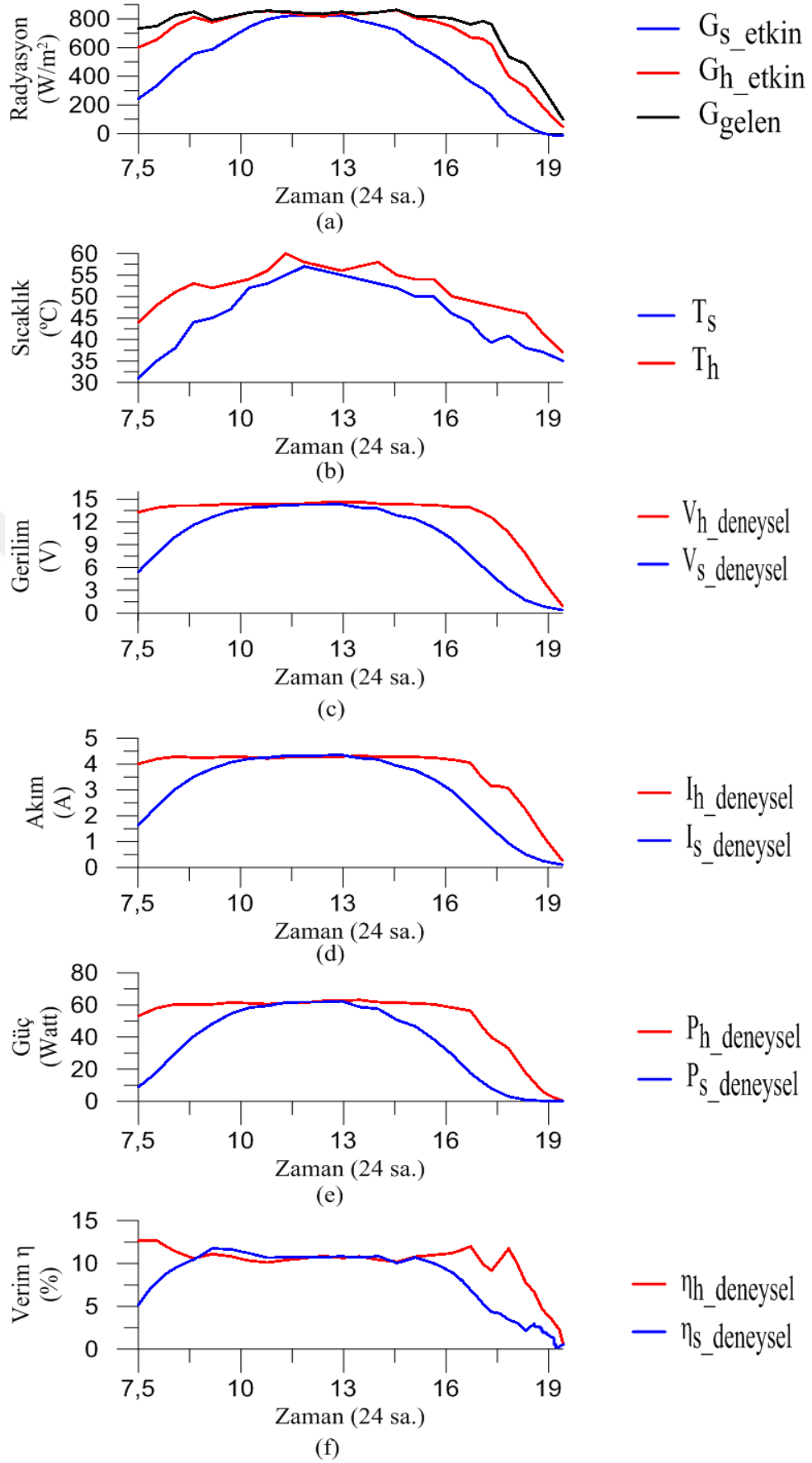
$$\eta_{panel} = \frac{W_{panel}}{S \cdot G_{etkin}} \cdot 100 \quad (7.17)$$

Denklemden verilen  $W_{panel}$  (W) panelin çıkışından ölçülen güç değeridir.  $S$  ( $m^2$ ) panel yüzey alanı ( $100 \text{ cm} \times 70 \text{ cm} = 0.7 \text{ m}^2$ )  $G_{etkin}$  ( $W/m^2$ ) panel yüzeyine düşen etkili radyasyon değeridir.

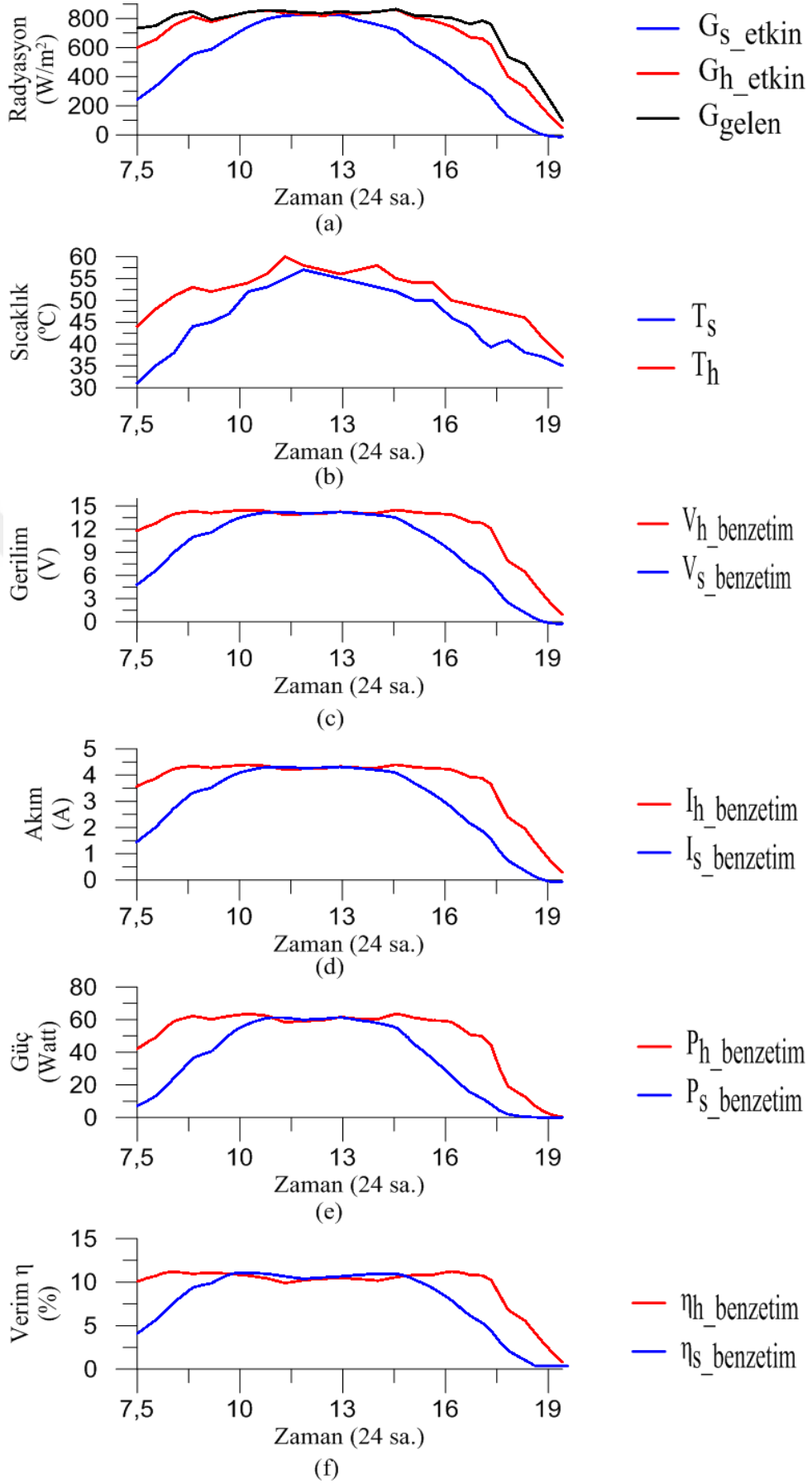
Şekil 7.9 benzetim sonuçlarını göstermektedir. Sistemlerin benzetim modelleri girişlerine, güneş ve konum bilgileri, deneyde ölçülen panel yüzey sıcaklıkları ve gelen radyasyon değerleri verilmiştir. Benzetim sonucunda hareketli ve sabit panel benzetim modelleri çıkışlarından elde edilen gerilim, akım, güç değerleri ve panel verimlilikleri sırasıyla Şekil 7.9 (c), (d), (e), (f) grafiklerinde verilmiştir.

Şekil 7.10’daki grafik, Şekil 7.8’deki deneysel ve Şekil 7.9’daki benzetim verilerinin farkları alınarak karşılaştırılmalarını içermektedir. Şekil 7.10 (c), (d), (e), (f) grafiklerinde görüldüğü üzere deneysel ve benzetim sonuçları çok az hata farklarıyla oldukça uyumlu oldukları görülmektedir.

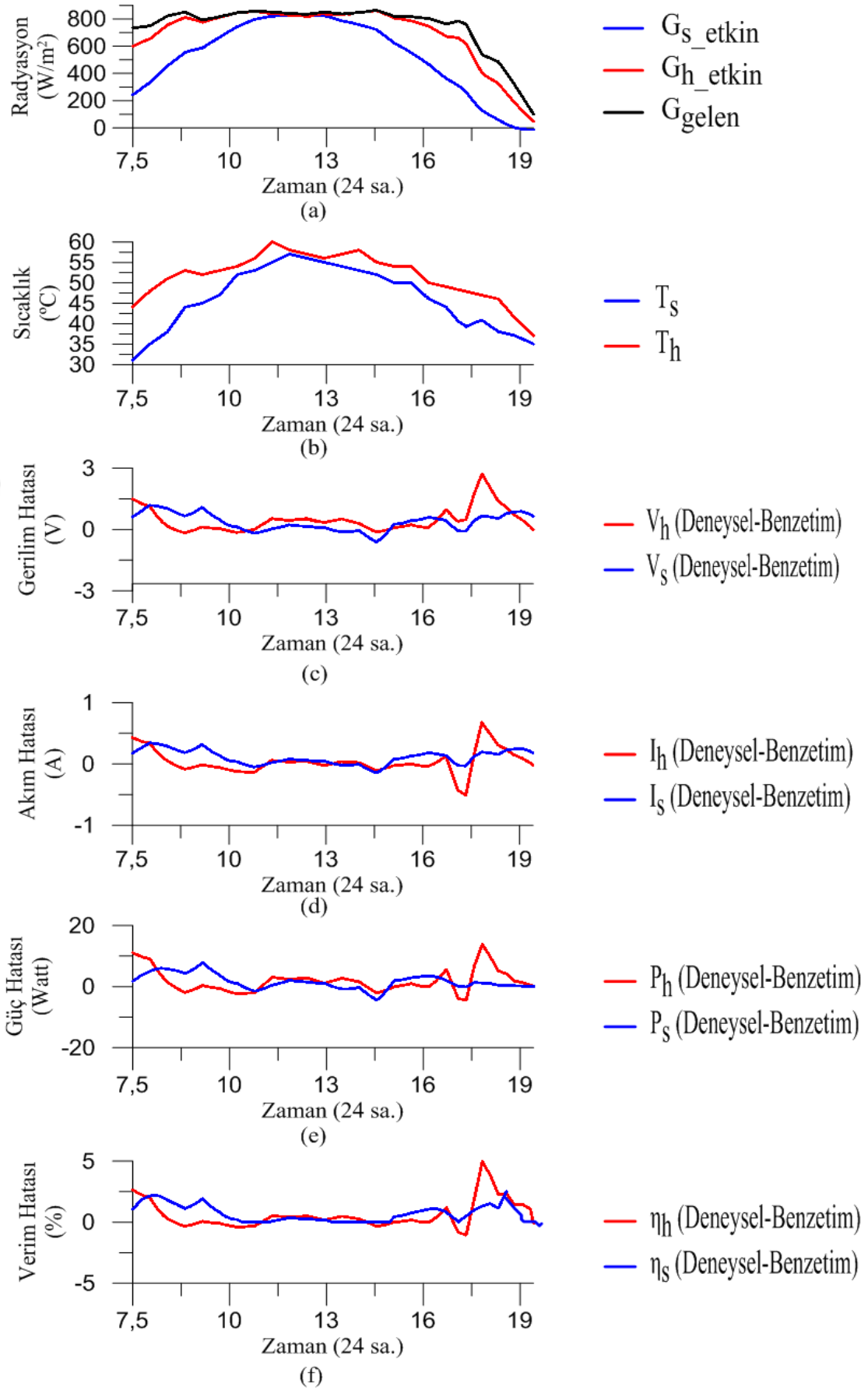
Deney düzeneğinin benzetim ortamında yüksek doğrulukta modellenebilmesi gerçek zamanlı deney ile elde edilebilecek sonuçların benzetim yoluyla yaklaşık da olsa elde edilebileceği anlamına gelir. Bu durum güneş takip sistemlerinin bilgisayar ortamındaki benzetim modellerinden faydalanarak farklı koşullar altında da güç ve verimlilik analizi yapılmasına büyük katkı sağlar. İlk deneyde elde edilen verileri teyit etmek amacıyla ikinci deneye ait veriler de benzetim ortamında test edilmiştir.



Şekil 7.8. Birinci güne ait hareketli ve sabit sistemin deneysel sonuçlar ile edilmiş çıkış ve giriş değişkenleri grafikleri



Şekil 7.9. Birinci güne ait hareketli ve sabit sistemin benzetim ortamında deneysel giriş değişkenlerine göre elde edilmiş olan çıkış değişkenleri grafikleri



**Şekil 7.10.** Birinci güne ait hareketli ve sabit sistemin benzetim ve deneysel çıkış değişkenlerinin hata farkları grafikleri

## 7.2.2. İkinci güne ait deneysel ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması

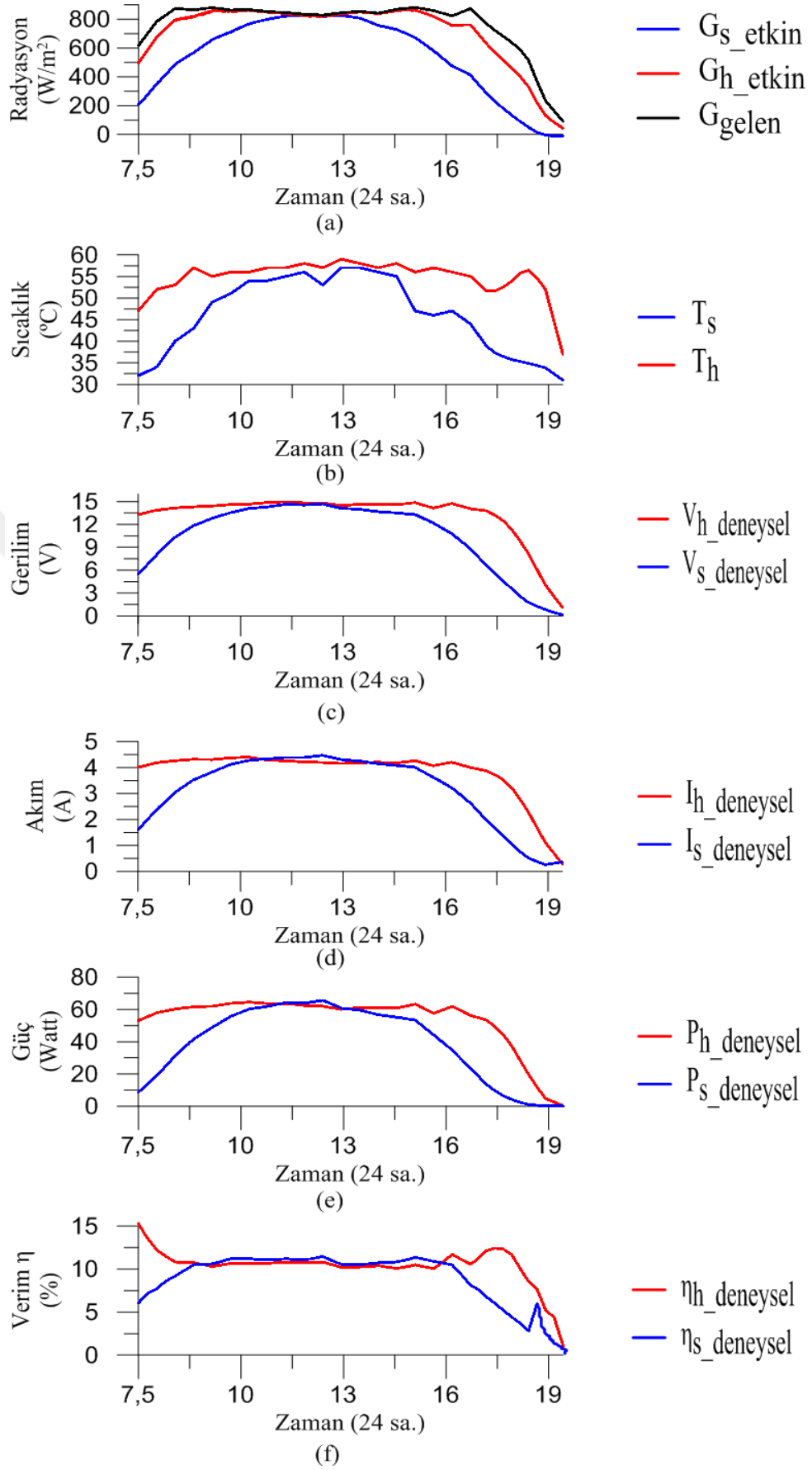
İkinci güne ait deneysel ve benzetim sonuçlarında deney düzeneğinden 30 dakikalık aralıklarla ölçülen gelen güneş radyasyon miktarı, panel yüzey sıcaklıkları gibi giriş değişkenleri kullanılmıştır. Bu giriş değişkenlerine göre panelin çıkışında gerilim, akım, güç gibi çıkış değişkenleri, elde edilmiştir. Şekil 7.11’de ikinci güne ait 30 dakikalık aralıklarla deneysel ölçümler ile elde edilen sabit ve hareketli panelin bulunduğu ortama gelen radyasyon miktarı ile sabit ve hareketli panellerin üzerine düşen etkili radyasyon değerleri grafikleri Şekil 7.11 (a)’da verilmiştir. Şekil 7.11 (b)’de hareketli ve sabit panellerin deneysel ortamda ölçülen panel yüzey sıcaklıkları verilmiştir. Şekil 7.11 (c), (d), (e) grafiklerinde sırasıyla panelin çıkışından ölçülen gerilim, akım ve güç değerleri verilmiştir. Şekil 7.12 (f) panel verimliliklerini göstermektedir.

Şekil 7.12’de benzetim sonuçları görülmektedir. Benzetim modelinin girişine güneş ve konum bilgileri, ölçülen panel yüzey sıcaklıkları ve ortama gelen radyasyon değeri verilmiştir. Şekil 7.12 (c), (d), (e), (f)’de sırasıyla hareketli ve sabit panel benzetim modellerinin çıkışlarındaki gerilim, akım, güç değerleri ve panel verimlilikleri görülmektedir. Şekil 7.13’deki grafik, Şekil 7.11’deki deneysel ve Şekil 7.12’deki benzetim verilerinin farkları alınarak karşılaştırılmalarını içermektedir. Şekil 7.13’da görüldüğü üzere deneysel ve benzetim sonuçları çok az hata farklarıyla oldukça uyumlu oldukları görülmektedir.

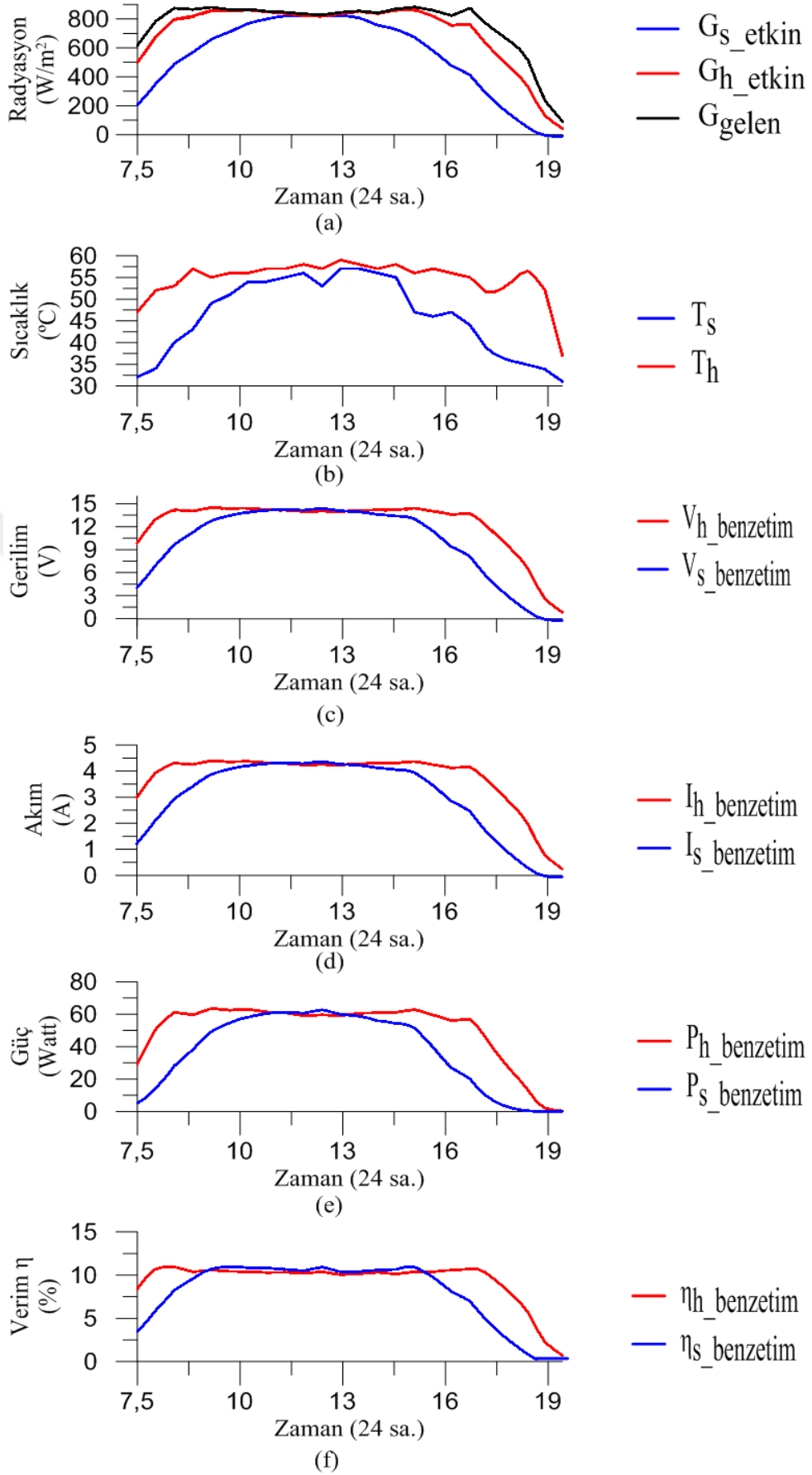
Birinci ve ikinci deneye ait sabit eğim açılı doğu-batı hareketi sağlayan hareketli sistem ile sabit sistemin deneysel ve benzetim sonuçlarının az fark da olsa uyum içinde oldukları görülmektedir. GTS ile sabit sistemin benzetim modelleri ile gerçek sistemleri arasındaki hatanın göz ardı edilebilecek kadar yakın sonuçlar vermesi sebebiyle, söz konusu sistemlerin benzetim modelleri kullanılarak güneş enerji sistemlerinin verimliliklerinin artırılmasına yönelik bazı testler bilgisayar ortamında gerçekleştirilmiştir. Bunlar;

- Benzetim ortamında tek eksen ile çift eksenli sistemin karşılaştırılması,
- Benzetim ortamından tek eksen hareketli sistem için sabit eğim açısının önemi,
- Hareketli sistemlerin panel yüzey sıcaklığının panelin verimliliğine olan etkisinin incelenmesidir.

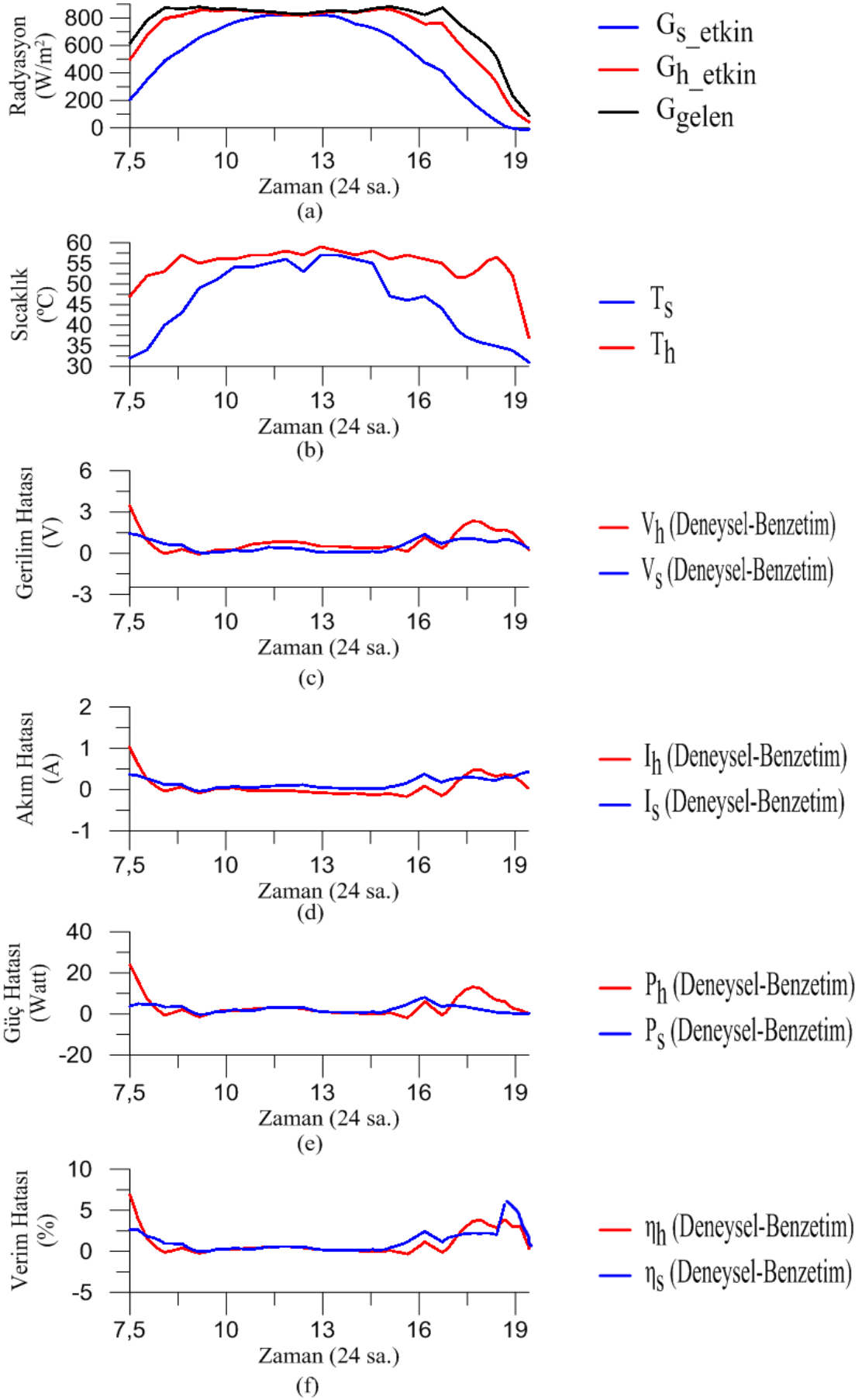




Şekil 7.11. İkinci güne ait hareketli ve sabit sistemin deneysel sonuçlar ile edilmiş çıkış ve giriş değişkenleri grafikleri



Şekil 7.12. İkinci güne ait hareketli ve sabit sistemin benzetim ortamında deneysel giriş değişkenlerine göre elde edilmiş olan çıkış değişkenleri grafikleri

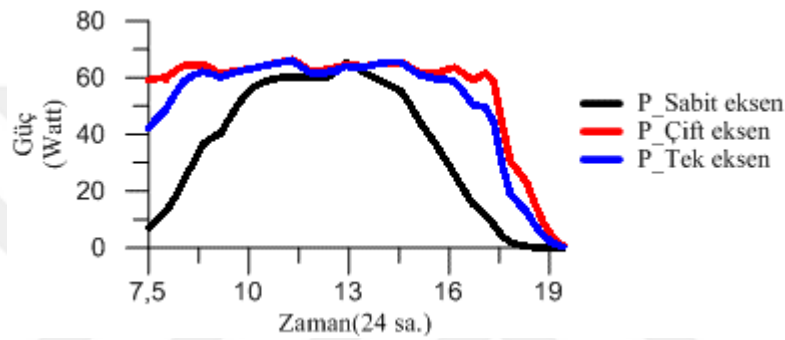


Şekil 7.13. İkinci güne ait hareketli ve sabit sistemin benzetim ve deneysel çıkış değişkenlerinin hata farkları grafikleri

### 7.3. Benzetim Modelleri ile Verimlilik Analizleri

#### 7.3.1. Benzetim ortamında tek ile çift eksenli sistemlerin karşılaştırılması

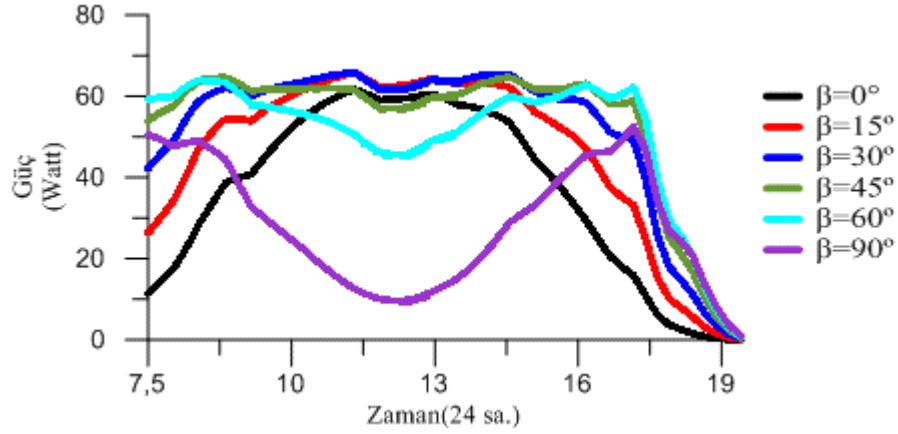
Birinci güne ait verilerin kullanıldığı benzetim ortamında sabit, tek eksenli ve çift eksenli sistemler karşılaştırılmıştır. Şekil 7.10'da görüldüğü gibi çift eksenli sistem tek eksenli sisteme göre daha verimlidir. Tek eksenli sistem ile çift eksenli sistemler öğle vakitlerinde birbirine yakın sonuçlar verse de, çift eksenli sistemlerin öğleden sonra tek eksenli sistemlere nazaran daha verimli olduğu görülmektedir. Dolayısıyla çift eksenli sistemlerin uzun vadede daha verimli olduğu kanaati oluşmuştur.



Şekil 7.14. Birinci güne ait benzetim ortamında sabit, tek eksenli ve çift eksenli sistemlerinin çıkış güçleri grafiği

#### 7.3.2. Benzetim ortamında tek eksenli hareketli sistem için sabit eğim açısının panel verimliliğine olan etkisi

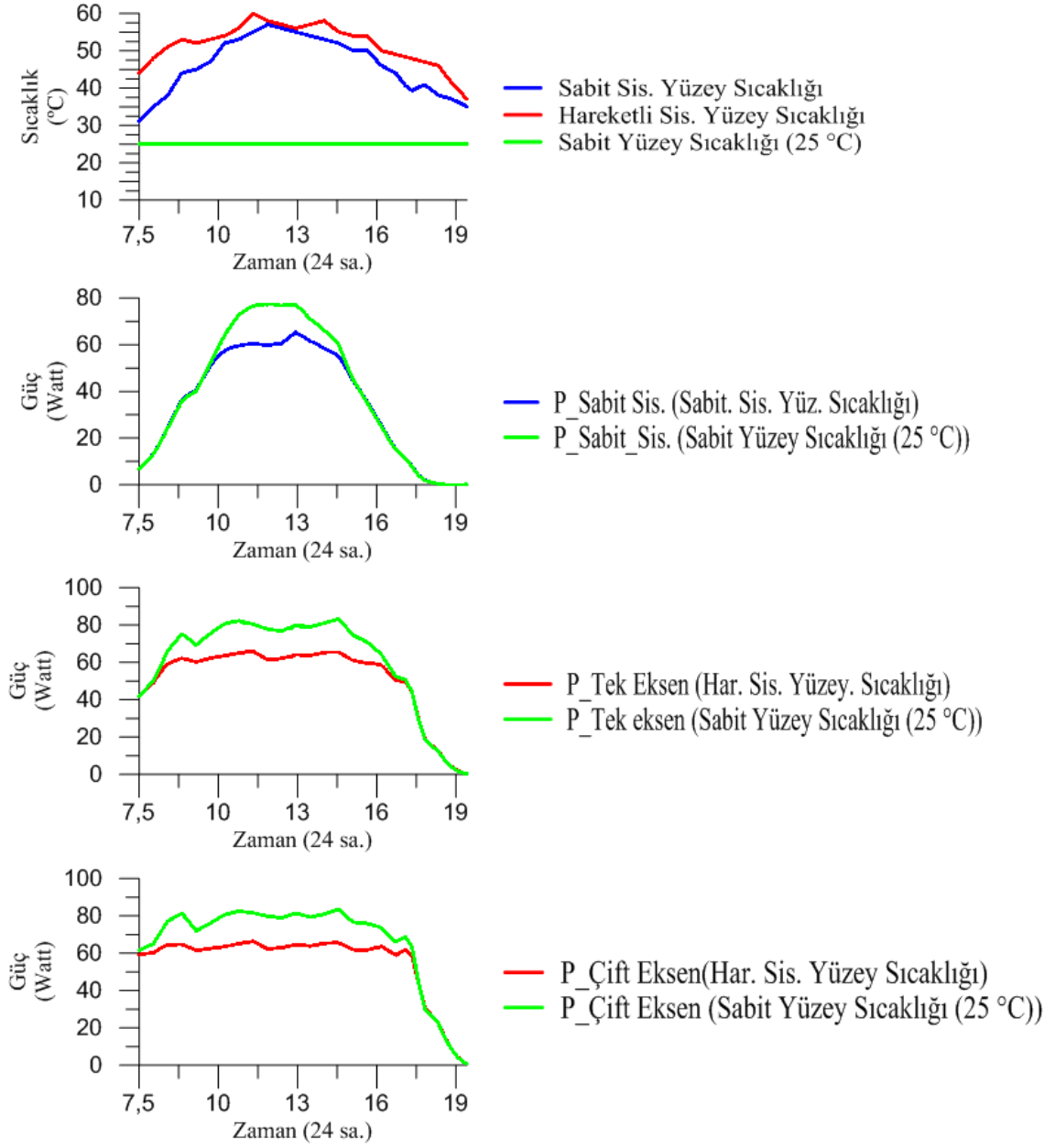
Tez kapsamında deneysel hareketli sistemde deneyin yapıldığı yerin konumuna göre eğim açısının  $30^\circ$  olması uygun görülmüştür. Bu değer güneş yükseklik açısına bağlı olarak gün içinde çok az da olsa değişir. Çift eksenli sistemler bu değişimi algılar. Her ne kadar çift eksenli sistemler tek eksenli sistemlere göre daha verimli çalışsa da ek maliyet ve bakım gerektirdiğinden bazen tercih edilmeyebilir. Bu sebeple tek eksenli güneş takibi yapan sistemler belli eğim açısıyla konumlandırılır. Bu açının değeri panelin bulunduğu yerin koordinat bilgisi, mevsim ve güneş ışınım şiddeti gibi faktörlere göre belirlenir. Şekil 7.11'de farklı eğim açılara sahip tek eksenli güneş takip sistemlerinin çıkış güçleri görülmektedir. Dolayısıyla panelin eğim açısına göre panelin verimi de değişmektedir. Bu yüzden tek eksenli güneş takip sistemlerinin en iyi verimi için en uygun eğim açısıyla konumlandırılmaları gerektiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 7.15. Birinci güne ait benzetim ortamında farklı eğim açılarıyla konumlandırılmış tek eksenli güneş takip sistemlerinin çıkış güçleri grafiği

### 7.3.3. Hareketli sistemlerde panel yüzey sıcaklığının panel verimliliğine etkisi

FV etkiyle elektrik üreten güneş panelleri yarıiletken maddelerden imal edildiğinden dolayı sıcaklığa duyarlıdır. Sıcaklık arttıkça panellerin verimi azalır. Panel yüzey sıcaklığı artışı özellikle hareketli sistemlerin verimliliğine olumsuz etki eder. Hareketli sistemler sürekli güneşe yöneldiklerinden dolayı panel yüzeyinde daha kısa sürede ısı birikir. Bunun sonucunda panel yüzey sıcaklığı gün boyunca yüksek değerlerde olur. Şekil 7.4 (b) ile Şekil 7.7 (b)'den görüldüğü kadarıyla hareketli sisteme ait panel yüzey sıcaklığı sabit sisteme göre gün boyunca daha fazladır. Bu olumsuzluğu önlemek için çeşitli panel soğutma teknikleri kullanılarak panellerin yüzey sıcaklıkları ideal seviyede tutulabilir. Şekil 7.12'de benzetim ortamında sabit eksen, tek eksen ve çift eksenli sistemlerin gün boyunca değişken sıcaklık (30°C- 60°C) ve sabit sıcaklık (25°C) koşulları altındaki çıkış güçleri görülmektedir. Buradan, panel yüzey sıcaklığının uygun koşullardaki sıcaklık değerinde sabit tutulması ile panellerin verimliliğinde artış olacağı sonucuna varılmıştır.



**Şekil 7.16.** Birinci güne ait benzetim ortamında değişken ve sabit sıcaklık koşulları altında sabit, tek eksen ve çift eksenli sistemlerin panel çıkış güçleri

## 8. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

### 8.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında hem çift ekseninde hem de sabit eğim açılı *doğu-batı* yönünde tek ekseninde güneş takibi yapabilen hareketli bir sistemin tasarımı yapılmıştır. Hareketli sistemin sabit bir sisteme göre ne kadar verimli olduğu incelenmiştir. Söz konusu sistemler modellenerek benzetim ortamında test edilmiştir. Benzetim sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmış ve benzetimin doğruluğu teyit edilmiştir. Bu aşamadan sonra hareketli sistem ile sabit sistemin farklı koşullar altındaki verimlilikleri bilgisayar ortamında test edilmiştir. Tez kapsamında yapılan işlemler sonucunda aşağıda maddeler halinde yazılmış sonuçlara varılmıştır;

- 31.07.2018 tarihinde güneye bakacak şekilde yan yana yerleştirilmiş sabit eğim açılı doğu batı yönünde tek ekseninde güneş takibi yapan hareketli sistem ile sabit hareketsiz sistemin gün boyunca ürettikleri enerji miktarları ölçülerek yapılan karşılaştırmada, hareketli sistemin sabit sisteme göre % 37.234 daha verimli olduğu tespit edilmiştir.
- 09.08.2018 tarihinde güneye bakacak şekilde yan yana yerleştirilmiş sabit eğim açılı *doğu-batı* yönünde tek ekseninde güneş takibi yapan hareketli sistem ile sabit eksenli sistemlerin deneysel olarak gün boyunca ürettikleri enerji miktarları karşılaştırıldığında, hareketli sistemin sabit sisteme göre % 35.756 daha verimli olduğu tespit edilmiştir.
- GTS otomatik kontrolü için açık kaynak kodlu tasarımı basit istenilen amaca uygun olarak ek modülleri bulunabilen Arduino'nun kullanılması uygun görülmüştür.
- Piranometre ile yapılan ölçümler sonucunda hareketli sistemlerin üzerine düşen güneş ışınım şiddetinin sabit sistemlere göre daha fazla olduğu görülmüştür.
- Sıcaklık ölçer ile panellerin ölçülen yüzey sıcaklıklarına göre, hareketli panelin sıcaklığının sabit sisteminkine göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebinin hareketli panelin gün içinde daha çok ışınım almasıyla ilgili olduğu kanısına varılmıştır.
- Güneş takip sistemlerinde tahrik mekanizması olarak lineer aktüatör kullanımının ekonomik ve sistem karmaşıklığı açısından daha sade daha basit olması gibi avantajlarının olduğu görülmüştür. Bunların yanında eğim açısının ayarlanmasında lineer aktüatör kullanılmasının uygun olduğu ancak *doğu-batı*

hareketini sağlamak adına bazı olumsuzlukları olduğu görülmüştür. Bunlar, aktüatör mil boyunun yetersiz olması dolayısıyla panelin tam dönememesidir.

- Her hangi bir güneş takip sistemindeki elektriksel ve mekanik elemanların matematiksel modellerinin benzetim ortamına aktarılabilmesi ve aynı ortamda test edilmeleri mümkündür.
- Deney düzeneğinin benzetim ortamında modeli oluşturulduktan sonra elde edilen benzetim verilerinin deneyde ölçüm yoluyla elde edilen verilerle uyumlu olduğu görülmüştür. Dolayısıyla deney düzeneğinin benzetim modeli ile farklı koşullar altında güvenilir veriler verebilecek analizler yapılmasının mümkün olabileceği kanaatine varılmıştır.
- Benzetim ortamında test edilen çift eksenli sistemin tek eksenli sisteme göre daha verimli olduğu görülmüştür.
- Benzetim ortamında analizi yapılan *GTS*'nin farklı eğim açılara göre veriminin değiştiği görülmüştür. Dolayısıyla sabit eğim açılı *GTS* yılın gününe, mevsimine ve bulunduğu yerin güneş ışınımı şiddetine göre uygun bir eğim açısına konumlandırılması gerektiği anlaşılmıştır.
- Benzetim ortamında modellenen panellerin yüzey sıcaklıklarının ideal sıcaklıkta sabit tutulması durumunda panellerde verimlilik artışı gözlemlenmiştir.
- Güneş takip sistemlerinin sabit sistemlere göre % 35-40 arasında daha verimli olduğu sonucuna varılmıştır.
- Ülkemizin güneş enerji potansiyeli düşünüldüğünde *FV* panellerin *GTS*'lerde kullanımının önemli bir enerji kaynağı olan güneşten en iyi faydanın sağlanmasına katkıda bulunacağı sonucuna varılmıştır.

## 8.2. Öneriler

Tezin sonucunda elde edilmiş bilgiler doğrultusunda, aynı alanda yapılacak çalışmalar için aşağıdaki öneriler sunulmuştur;

- Hareketli ve sabit panellerin giriş ve çıkış değişkenlerinin ölçümü gün boyunca daha sık aralıklarla (10 dakikadan mümkün olduğunca daha kısa sürelerde) yapıldığında yapılan analizlerin doğruluğu artar.
- Deney verilerinin güneşin tam doğuş vaktinden tam batış vaktine kadar alınması daha kapsamlı sonuçlar verecektir.



- Tasarılan güneş takip sistemi için sensör olarak küçük güneş pilleri kullanılmıştır. Küçük güneş pilleri yerine *LDR* gibi ışığa duyarlı sensörler ya da sensörsüz güneş konum algoritmalarıyla kurulan sistemlerin verimlilik karşılaştırmaları yapılabilir.
- Tasarılan sistem için kış şartları göz önüne alınarak rüzgâra karşı dayanıklılığı test edilebilir.
- Tahrik mekanizması olarak lineer aktüatörden başka mekanik elemanlar kullanılabilir.
- Sabit, tek eksenli, çift eksenli sistemlerden oluşan deney düzeneği kurularak farklı kontrol yapılarına sahip sistemlerin verimlilikleri analiz edilebilir.
- Hareketli sistemler ve sabit sistemlerin panel yüzey sıcaklıklarını ideal seviyede tutacak soğutma teknikleri kullanılarak hem hareketli hem de soğutmalı sistemlerin verimlilik analizleri yapılabilir.
- Tasarılan sistemin yıl bazında verimlilik analizi yapılabilir.
- Benzetim ortamında oluşturulan modeller ile güneş enerji sistemlerinin aylık, mevsimlik, yıllık verim analizleri yapılabilir.
- GTS ve sabit sistem modelleri kullanılarak panelin en uygun eğim açısı benzetim ortamında yapılan testlerle belirlenebilir.
- Güneş takip sistemlerinin güneşe yönlendirilmelerinde kontrol amaçlı mekanik ve elektromekanik parçaların daha az enerji harcayacak şekilde tasarlanmasıyla sistemden elde edilen toplam enerjinin kontrol sisteminde kullanılan kısmının azaltılması sağlanabilir.

## 9. KAYNAKLAR

- Abdallah, S., 2004. The effect of using sun tracking systems on the voltage-current characteristics and power generation of flat plate photovoltaics. *Energy Conversion and Management*, 45(11-12), 1671-1679. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.10.006>
- Abdollahpour, M., Golzarian, M. R., Rohani, A., Abootorabi-Zarchi, H., 2018. Development of a machine vision dual-axis solar tracking system. *Solar Energy*, 169(April), 136-143. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.03.059>
- Abuşka, M., 2012. Güneş Enerjisi ve Uygulamaları, Ders Notları, 1-40.
- Abu-Khader, M. M., Badran, O. O., Abdallah, S., 2008. Evaluating multi-axes sun-tracking system at different modes of operation in Jordan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(3), 864-873. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.10.005>
- Aksungur, K. M., Kurban, M., FİLİK, Ü. B., 2009. Türkiye' n in Farklı Bölgelerindeki Güneş Işınım Verilerinin Analizi ve Değerlendirilmesi Özet, 3-6.
- Al-Mohamad, A., 2004. Efficiency improvements of photo-voltaic panels using a Sun-tracking system. *Applied Energy*, 79(3), 345-354. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2003.12.004>
- Al-Soud, M. S., Abdallah, E., Akayleh, A., Abdallah, S., Hrayshat, E. S., 2010. A Parabolic solar cooker with automatic two axes sun tracking system. *Applied Energy*, 87(2), 463-470. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.08.035>
- Appelbaum, J., & Peled, A., 2014. Solar Energy Materials & Solar Cells Parameters extraction of solar cells – A comparative examination of three methods. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 122, 164-173. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.11.011>
- Armakan, E., 2003. Analysis of Two Axis Sun Tracking System, Master of Science Thesis, *Izmir Institute of Technology*, Izmir, Turkey.
- Atalay, Y., 2016. İki-eksenli Güneş Takip Mekanizmasına Sahip 1 KW'lık Fotovoltaik Güç Sisteminin Modellenmesi ve Analizi, Yüksek Lisans Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir.
- Bakos, G. C., 2006. Design and construction of a two-axis Sun tracking system for parabolic trough collector (PTC) efficiency improvement. *Renewable Energy*, 31(15), 2411-2421. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.11.008>
- Bellia, H., Youcef, R., Fatima, M., 2014. A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 3(1), 53-61. <https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2014.04.001>
- Benavides, N. D., Chapman, P. L., 2008. Modeling the effect of voltage ripple on the power output of photovoltaic modules. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(7), 2638-2643. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.921442>
- Beyoğlu, M. F., 2011. Balıkesir İlinde Çift Eksenli Güneş Takip Sistemi ile Sabit Eksenli PV Sistemin Verimlerinin Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir.

- Bilgin, Z., 2006. Güneş Takip Sistemi Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- Bükün, N., 2017. Siirt Yöresi İçin Tek Eksenli Güneş Takip Sistemli Güneş Panellerinin Enerji Verimliliğinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Siirt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Siirt.
- Büyükgüzel B., 2011. Microcontroller Based Maximum Power Point Tracker for Solar Panels Department, Master of Science Thesis, *Çukurova University Institute of Natural and Applied Sciences*, Adana, Turkey.
- Tirmikci CA., 2013. Yüksek Verimli ve Akıllı Fotovoltaik Sistem Tasarım, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya.
- Cheremisinoff Paul N. Dickinson William C. (1980). Solar Energy Technology Handbook, Part A Engineering Fundamentals, 270 Madison Avenue, New York, 865p.
- Chin, C. S., Babu, A., McBride, W., 2011. Design, modeling and testing of a standalone single axis active solar tracker using MATLAB/Simulink. *Renewable Energy*, 36(11), 3075–3090. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.026>
- Clifford, M. J., Eastwood, D. 2004. Design of a novel passive solar tracker, 77, 269–280. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.06.009>
- Er, E., 2014. Programlanabilir Lojik Kontrol (PLC) ile Güneşi İzleyen Sistemin Bir Fotovoltaik Modüle Uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, *Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Muğla
- Eren, E., 2010. Piramid Sensör Tekniği ile Güneş İzleme Sistem Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Zonguldak.
- Fathabadi, H., 2016. Novel high accurate sensorless dual-axis solar tracking system controlled by maximum power point tracking unit of photovoltaic systems. *Applied Energy*, 173, 448–459. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.109>
- Glass, M. C., 1996. Improved solar array power point model with SPICE realization. In *IECEC 96. Proceedings of the 31st Intersociety Energy Conversion Engineering Conference* (Vol. 1, pp. 286–291). <https://doi.org/10.1109/IECEC.1996.552886>
- Goldberg, D. E., 1989. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc. Boston, MA, USA. <https://doi.org/10.1007/3-540-44673-7>
- Grozdev M., 2010. Alternatif Enerji Kaynakları: Güneş Enerjisi ve Güneş Pilleri, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Harrag, A., ve Messalti, S., 2015. Extraction of solar cell parameters using genetic algorithm. *2015 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/INTEE.2015.7416775>
- Holland, J. H., 1975. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press.
- Huang, B. J., Huang, Y. C., Chen, G. Y., Hsu, P. C., Li, K., (2013. Improving solar PV system efficiency using one-axis 3-position sun tracking. *Energy Procedia*, 33, 280–287. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.05.069>

- Ismail, M. S., Moghavvemi, M., Mahlia, T. M. I., 2013. Characterization of PV panel and global optimization of its model parameters using genetic algorithm. *Energy Conversion and Management*, 73, 10–25. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.03.033>
- Jervase, J. A., Bourdoucen, H., Al-Lawati, A., 2001. Solar cell parameter extraction using genetic algorithms. *Measurement Science and Technology*, 12(11), 1922–1925. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/12/11/322>
- Kajihara, A., ve Harakawa, T., 2005. Model of photovoltaic cell circuits under partial shading. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology* (Vol. 2005, pp. 866–870). <https://doi.org/10.1109/ICIT.2005.1600757>
- Kalaycı, D., 2012. Güneş Takip Sistemleri Tasarımı, *Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa.
- Kan, H., 2016. Deneysel Amaçlı, Çift Eksenli Güneş Takip Sisteminin Labview Tabanlı Kontrolü, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyonkarahisar.
- Kittler, R., ve Darula, S., 2013. Determination of time and sun position system. *Solar Energy*, 93, 72–79. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.03.021>
- Kristinsson, K., ve Dumont, G. A., 1992. System identification and control using genetic algorithms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 22(5), 1033–1046. <https://doi.org/10.1109/21.179842>
- Letcher, T. M., 2018. *1 - Why Solar Energy? A Comprehensive Guide to Solar Energy Systems*: Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811479-7/00001-4>
- Mastar, E., 2011. Güneş Panelleri için Güneş Takip Mekanizmasının Tasarımı, *Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa.
- Matagne, E., Chenni, R., El Bachtiri, R., 2007. A photovoltaic cell model based on nominal data only. In *2007 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives* (pp. 562–565). <https://doi.org/10.1109/POWERENG.2007.4380173>
- Moldovan, N., Picos, R., Garcia-Moreno, E., 2009. Parameter extraction of a solar cell compact model usign genetic algorithms. *Proceedings of the 2009 Spanish Conference on Electron Devices, CDE'09*, 0(C), 379–382. <https://doi.org/10.1109/SCED.2009.4800512>
- Mutluer, M., 2007. Asenkron Motor Elektriksel Eşdeğer Devre Parametrelerini Hibrid Genetik Algoritma Yöntemiyle Belirlenmesi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Nassar-Eddine, I., Obbadi, A., Errami, Y., El Fajri, A., Agunaou, M., 2016. Parameter estimation of photovoltaic modules using iterative method and the Lambert W function: A comparative study. *Energy Conversion and Management*, 119(May), 37–48. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.030>
- Nsengiyumva, W., Chen, S. G., Hu, L., Chen, X., 2018. Recent advancements and challenges in Solar Tracking Systems (STS): A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(August 2017), 250–279. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.085>
- Nuhoğlu, S., 2017. Tek Eksen Güneş Takipli Fotovoltaik Sistem Tasarımı ve Konya İçin

Örnek Bir Uygulama, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.

- Obara, S., Matsumura, K., Aizawa, S., Kobayashi, H., Hamada, Y., Suda, T., 2017. Development of a solar tracking system of a nonelectric power source by using a metal hydride actuator. *Solar Energy*, 158(August), 1016–1025. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.08.056>
- Orhun, M., 2013. Farklı Güneş Panellerinin Adaptif bir Güneş Takip Sistemi Üzerinde Yıllık Performanslarının Karşılaştırılması ve Güç Tahmini, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyonkarahisar.
- Ort M. İ., 2016. Fv Sistemlerde Güneşi Takip Eden Sistem Tasarımı Ve MPPT Kontrolü İle Enerjinin Yüke Maksimum Olarak Aktarılması, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Önal, M. A., 2009. İki Eksenli Güneş İzleme Sistemi Tasarımı, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya.
- Özer, O., 2012. Karabük İli İklim Şartlarında Güneş Pillerinin Hareketli Yüzeylerdeki Performans Değerlerinin İncelenmesi ve Analizi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük.
- Poulek, V., 1994. Testing The New Solar Tracker With Shape Memory Alloy Actors, 1131–1133.
- Qi, C., ve Ming, Z., 2012. Photovoltaic Module Simulink Model for a Stand-alone PV System. *Physics Procedia*, 24, 94–100. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.02.015>
- Rhif, A., 2012. A Sliding Mode Control for a Sensorless Tracker : Application on a Photovoltaic System. *International Journal of Control Theory and Computer Modeling*, 2(2), 1–14. <https://doi.org/10.5121/ijctcm.2012.2201>
- Rizal, Y., Wibowo, S. H., Feriyadi., 2013. Application of solar position algorithm for sun-tracking system. *Energy Procedia*, 32, 160–165. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.05.021>
- Roth, P., Georgiev, A., Boudinov, H., 2004. Design and construction of a system for sun-tracking. *Renewable Energy*, 29(3), 393–402. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(03\)00196-4](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(03)00196-4)
- Rustemli, S., Dincer, F., Unal, E., Karaaslan, M., Sabah, C., 2013. The analysis on sun tracking and cooling systems for photovoltaic panels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 598–603. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.014>
- Seme, S., & Stumberger, G., 2011. A novel prediction algorithm for solar angles using solar radiation and differential evolution for dual-axis sun tracking purposes. *Solar Energy*, 85, 2757–2770. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.08.031>
- Sidek, M. H. M., Azis, N., Hasan, W. Z. W., Ab Kadir, M. Z. A., Shafie, S., Radzi, M. A. M., 2017. Corrigendum to “Automated positioning dual-axis solar tracking system with precision elevation and azimuth angle control” [Energy 124 (2017) 160–170] (S0360544217301755) (10.1016/j.energy.2017.02.001). *Energy*, 127, 803. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.151>
- Singh, R., Kumar, S., Gehlot, A., Pachauri, R., 2018. An imperative role of sun trackers in photovoltaic technology: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,

82(August 2017), 3263–3278. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.018>

- Sohag, H. A., Hasan, M., Khatun, M., Ahmad, M., 2015. An accurate and efficient solar tracking system using image processing and LDR sensor. *Electrical Information and Communication Technology (EICT), 2015 2nd International Conference on, (Eict)*, 522–527. <https://doi.org/10.1109/EICT.2015.7392008>
- Sungur, C., 2009. Multi-axes sun-tracking system with PLC control for photovoltaic panels in Turkey. *Renewable Energy*, 34(4), 1119–1125. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.06.020>
- Şenpınar, A., 2006. Calculation of Optimum Fixed Solar Array Angle Depend on Solar Angles. *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları*.
- Tan, Y. T., Kirschen, D. S., Jenkins, N., 2004. A model of PV generation suitable for stability analysis. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 19(4), 748–755. <https://doi.org/10.1109/TEC.2004.827707>
- Usta, H., 2007. Genetik Algoritmalarla Mutasyon Çaprazlama ve Bellek Mekanizmalarının Etkileri ve İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Samsun.
- Uzunok, S., 2007. Fotovoltaik Modüllerin Elektrik Enerjisi Üretiminde Güneş Takip Sisteminin Etkisinin İncelenmesi, *Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Antakya.
- Varış, Ç., 2017. Çift Eksenli Güneş Takip Sisteminin Pilot Uygulaması, Üretim değerlendirilmesi ve Ekonomik Analizi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Veerachary, M., 2006. PSIM circuit-oriented simulator model for the nonlinear photovoltaic sources. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 42(2), 735–740. <https://doi.org/10.1109/TAES.2006.1642586>
- Walker, G., 2001. Evaluating Mppt Converter Topologies Using a Matlab Pv Model. *Journal of Electrical Electronics Engineering*, 21(1), 49–56. <https://doi.org/10.7237/>
- Xiao, W., Dunford, W. G., Capel, A., 2004. A novel modeling method for photovoltaic cells. In *PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference* (Vol. 3, pp. 1950–1956). <https://doi.org/10.1109/PESC.2004.1355416>
- Yahfdhou, A., Mahmoud, A. K., Youm, I., 2016. Evaluation and determination of seven and five parameters of a photovoltaic generator by an iterative method. arXiv preprint arXiv:1601.03257.
- Yılmaz, M., 2013. Güneş Takip Sistemi ile Güneş Enerjisinden Elektrik Enerjisi Elde Etme Yöntemleri ve Optimum Verimin Belirlenmesi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Yusof, Y., Sayuti, S. H., Latif, M. A., Wanik, M. Z. C., & Ieee. (2004). Modeling and simulation of maximum power point tracker for photovoltaic system. *National Power & Energy Conference: PECon 2004, Proceedings*.
- Zagrouba, M., Sellami, A., Bouaïcha, M., Ksouri, M., 2010. Identification of PV solar cells and modules parameters using the genetic algorithms: Application to maximum power extraction. *Solar Energy*, 84(5), 860–866.

<https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.02.012>

Url-1<[http://www.yegm.gov.tr/yenilenebilir/g\\_enj\\_tekno.aspx](http://www.yegm.gov.tr/yenilenebilir/g_enj_tekno.aspx)>, [Ziyaret Tarihi: 04 Eylül 2018]

Url-2<<http://www.cografyabilimi.gen.tr/turkiyenin-mutlak-konumu/>>, [Ziyaret Tarihi 05 Eylül 2018]

Url-3 <<http://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Gunes>> , [Ziyaret Tarihi 05 Eylül 2018]

Url-4<<http://www.yegm.gov.tr/MyCalculator/Default.aspx>>, [Ziyaret Tarihi 05 Eylül 2018]

Url-5<<http://w.sunsaluter.com/howitworks.html>>, [ Ziyaret Tarihi 11 Eylül 2018]

Url6<[http://esm.klu.edu.tr/dosyalar/birimler/esm/dosyalar/dosya\\_ve\\_belgeler/F%C3%B6y.pdf](http://esm.klu.edu.tr/dosyalar/birimler/esm/dosyalar/dosya_ve_belgeler/F%C3%B6y.pdf) >, [ Ziyaret Tarihi 14 Eylül 2018]

Url-7 < <http://www.suncalc.net> >, [ Ziyaret Tarihi 17 Eylül 2018]

## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : Ramazan MENAK  
**Doğum Yeri ve Tarihi** : Kurtalan - 10.09.1993  
**E-posta** : ramazanmenak@siirt.edu.tr

### EĞİTİM

Derece		Bitirme Yılı
Lise	: Siirt Atatürk Anadolu Lisesi, SİİRT	2011
Lisans	: İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, MALATYA	2015

### İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2017-Devam Ediyor	Siirt Üniversitesi, Mühendislik Fak., Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü	Araştırma Görevlisi

**UZMANLIK ALANI** : Yenilenebilir enerji kaynakları, Fotovoltaik güç sistemleri, Robotik sistemler.

**YABANCI DİLLER** : İngilizce (YDS: 71.25, 2016)