



**GÜNEŞ PANELLERİ İLE ÜRETİLEN ENERJİNİN  
ORTAM BİLGİLERİ KULLANILARAK  
YAPAY SİNİR AĞLARIYLA TAHMİNİ**

**İsmail KAYRI**

**Doktora Tezi  
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. Muhsin Tunay GENÇOĞLU  
KASIM-2017**

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

**GÜNEŞ PANELLERİ İLE ÜRETİLEN ENERJİNİN ORTAM BİLGİLERİ  
KULLANILARAK YAPAY SİNİR AĞLARIYLA TAHMİNİ**

**DOKTORA TEZİ**

**İsmail KAYRI**

**(091113203)**

**Anabilim Dalı: Elektrik Elektronik Mühendisliği**

**Programı: Elektrik Tesisleri**

**Danışman: Prof. Dr. Muhsin Tunay GENÇOĞLU**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 21 Kasım 2017**

**Kasım-2017**

T.C  
FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÜNEŞ PANELLERİ İLE ÜRETİLEN ENERJİNİN ORTAM BİLGİLERİ  
KULLANILARAK YAPAY SİNİR AĞLARIYLA TAHMİNİ

DOKTORA TEZİ

İsmail KAYRI

(091113203)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 21 Kasım 2017

Tezin Savunulduğu Tarih : 12 Aralık 2017

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Muhsin Tunay GENÇOĞLU (FÜ)

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Mehmet CEBECİ (FÜ)

Doç. Dr. Hayrettin CAN (FÜ)

Doç. Dr. Necmettin SEZGİN (BTÜ)

Yrd. Doç. Dr. Dursun ÖZTÜRK (BÜ)

ARALIK-2017

## ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasını yöneterek yenilenebilir enerji kaynakları alanına küçük de olsa bir katkı sunmamı sağlayan, çalışmalarım sırasında her türlü desteği sunan, tezin hazırlanması ve yazımı süresince yardımlarını esirgemeyen saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Muhsin Tunay GENÇOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım. Doktora eğitimim boyunca, görüş ve önerileriyle beni aydınlatan saygıdeğer hocam Prof. Dr. Mehmet CEBECİ ve tüm değerli bölüm hocalarıma ayrı ayrı teşekkür ederim.

Çalışmalarım süresince bana destek olan Doç. Dr. Hüseyin AYDIN'a, özellikle yapay sinir ağları konusunda sağladığı katkı için sevgili ağabeyim, değerli hocam Prof. Dr. Murat KAYRI'ye ve deney setinin oluşturulmasında gösterdiği özveri için makine teknikeri saygıdeğer Mehmet Salih GÜNEŞ'e teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde büyük emeği olan sevgili annem ve babama, yollarımızın kesiştiği günden beri her türlü manevi desteği sunarak yanımda duran kızlarıma ve sevgili eşim Neslihan KAYRI'ye şükranlarımı sunarım.

**İsmail KAYRI**  
**BATMAN - 2017**

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>I</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>II</b>
<b>ÖZET</b> .....	<b>V</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>VI</b>
<b>ŞEKİLLER LİSTESİ</b> .....	<b>VII</b>
<b>TABLolar LİSTESİ</b> .....	<b>IX</b>
<b>SİMGELER LİSTESİ</b> .....	<b>X</b>
<b>KISALTMALAR LİSTESİ</b> .....	<b>XI</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1. Tezin Amacı ve Kapsamı.....	4
1.2. Literatür Özeti.....	5
1.3. Tezin Yapısı .....	7
<b>2. ENERJİ VE GÜNEŞ ENERJİSİ</b> .....	<b>9</b>
2.1. Giriş.....	9
2.2. Güneş Enerjisi .....	10
2.2.1. Dünyada Güneş Enerjisi .....	12
2.2.2. Türkiye’de Güneş Enerjisi .....	20
<b>3. FOTOVOLTAİK HÜCRELER</b> .....	<b>26</b>
3.1. Fotovoltaik Teknolojisi.....	26
3.2. Güneş Pillerinin Yapısı.....	27
3.3. Fotovoltaik Hücre Çeşitleri.....	30
3.3.1. Kristalize Silikon Fotovoltaik Hücreler .....	31
3.3.1.1. Tek Kristalli Silikon Fotovoltaik Hücreler .....	31
3.3.1.2. Çok Kristalli Silikon Fotovoltaik Hücreler .....	33
3.3.2. İnce Film Fotovoltaik Hücreler .....	34
3.3.2.1. Amorf Silikon İnce Film Fotovoltaik Hücreler .....	34
3.3.2.2. Galyum Arsenit (GaAs) İnce Film Fotovoltaik Hücreler .....	36
3.3.2.3. Kadmiyum Tellürid (CdTe) İnce Film Fotovoltaik Hücreler .....	37
3.3.2.4. Bakır İndiyum Diseleneid (CIS) İnce Film Fotovoltaik Hücreler .....	39
3.3.2.5. Fotovoltaik Hücre Teknolojilerinin Karşılaştırılması.....	40
3.4. Güneş Açıları .....	41
3.4.1. Temel Güneş Açıları.....	44
3.4.1.1. Enlem Açısı.....	44

3.4.1.2. Deklinasyon Açısı .....	45
3.4.1.3. Saat Açısı .....	47
3.4.2. Türetilmiş Güneş Açıları .....	48
3.4.2.1. Eğim Açısı.....	48
3.4.2.2. Yüze Azimut Açısı .....	48
3.4.2.3. Geliş Açısı.....	49
3.4.2.4. Zenit Açısı.....	49
3.4.2.5. Güneş Yükseklik Açısı .....	50
3.4.2.6. Güneş Azimut Açısı.....	50
3.5. Güneş İzleme Sistemleri.....	52
3.5.1. Güneş İzleyici Sistemlerin Eksen Sayısına Göre Sınıflandırılması .....	54
3.5.1.1. Tek Eksenli Güneş İzleyicileri .....	54
3.5.1.2. İki Eksenli Güneş İzleyicileri.....	56
3.5.2. Güneş İzleyici Sistemlerin Sürücü Yöntemine Göre Sınıflandırılması.....	57
3.5.2.1. Pasif Güneş İzleme Sistemleri.....	58
3.5.2.2. Aktif Güneş İzleme Sistemleri .....	59
3.5.2.2.1. Sensörlü Aktif Güneş İzleme Sistemleri.....	60
3.5.2.2.2. Mikroişlemcili Aktif Güneş İzleme Sistemleri .....	61
3.5.2.2.3. Akıllı Aktif Güneş İzleme Sistemleri .....	61
3.6. Fotovoltaik Hücrelerin Modellenmesi.....	62
3.6.1. İdeal Tek Diyotlu Model.....	62
3.6.2. Gerçek Tek Diyotlu Model .....	63
3.6.3. İki Diyotlu Model.....	64
<b>4. PV PANELLER İLE ÜRETİLEN ENERJİNİN TAHMİN EDİLMESİ .....</b>	<b>66</b>
4.1. Materyal.....	67
4.1.1. Sabit Açılı Panel.....	68
4.1.2. Tek Eksen Hareketli Panel.....	71
4.1.3. Meteoroloji İstasyonu .....	73
4.2. Yöntem .....	78
4.2.1. İleri Beslemeli Geriye Yayılımlı Yapay Sinir Ağı Yöntemi .....	79
4.2.2. Verilerin Analizi.....	84
<b>5. BULGULAR.....</b>	<b>86</b>
5.1. Sabit Açılı Fotovoltaik Panel Uygulaması Bulguları.....	86
5.2. Tek Eksen Hareketli Fotovoltaik Panel Uygulaması Bulguları.....	94
<b>6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>103</b>

6.1. Sonuçlar .....	103
6.2. neriler .....	105
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>107</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>117</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>138</b>



## ÖZET

Bir fotovoltaik panelin çıkış gücü, güneş ışınımı, hava sıcaklığı, rüzgâr hızı, rüzgâr yönü, bağıl nem oranı vb. çevresel faktörlere bağlıdır. Bu bağıllık nonlinear olup fotovoltaiklerin üretim tekniklerinin farklılığından kaynaklanmaktadır. Bu durum fotovoltaik panel karakteristiklerinin saptanması için ayrıntılı deneysel çalışmaları zorunlu hale getirmektedir. Fotovoltaik panellerin üreteceği gücün doğru şekilde tahmin edilmesi, güç üretim sistemlerinin doğru planlanmasında son derece önemlidir.

Bu çalışmada, yapay sinir ağları kullanılarak fotovoltaik panellerin ürettiği güç değeri tahmin edilmeye çalışılmıştır. Daha hassas bir tahmin gerçekleştirebilmek için deneysel çalışmada, ortama ait güneş ışınımı miktarı, hava sıcaklığı, rüzgâr hızı, rüzgâr yönü, bağıl nem oranı ve güneş yükseklik açısı çevresel değişkenleri ile beraber, fotovoltaik panellerin ürettiği güç değerleri bir yıl boyunca ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Çalışmada sabit açılı ve tek eksenli güneş izleyici fotovoltaik tek kristalli silikon paneller kullanılmıştır. Geliştirilen yapay sinir ağı modelleri ile elde edilen tahmini değerler, ölçülmüş değerlerle karşılaştırılmış ve elde edilen bulgular irdelenmiştir. Geliştirilen yapay sinir ağı modelleri, ağın eğitim sürecinde kullanılmamış verilerle test edildiğinde, sabit açılı panel için %1,4'ü, hareketli panel için %2,34'ü aşmayan Kök Ortalama Kare Hata (RMSE) oranları ile çok doğru bir tahminleme yaptığı görülmüştür. Geliştirilen yapay sinir ağı modellerinde, bağımlı güç değişkeni ile çevresel değişkenler arasındaki korelasyon katsayısının %99,637 ile %99,998 arasında çok yüksek bir değerde olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca bu çalışmada, geliştirilen modeller geleneksel yöntemlerden biri olan Çoklu Doğrusal Regresyon (MLR) ile test edilmiştir. Sonuçlar, çevresel değişkenlerin kullanılmasıyla elde edilen modellerin, fotovoltaik panellerin ürettiği güç değerini yüksek bir doğrulukla tahmin edebildiğini göstermiştir. Bu çalışma, Batman ilinde gerçekleştirilmiştir ancak; dünyanın herhangi bir konumunda, meteoroloji istasyonlarından elde edilecek çevresel değişkenler kullanılarak, tesis edilmek istenen fotovoltaik sistemlere ait enerji üretimi, yüksek bir doğrulukla tahmin edilebilecektir.

**Anahtar Kelimeler:** Fotovoltaik sistemler, Yenilenebilir enerji kaynakları, Yapay sinir ağları.

## SUMMARY

### **Prediction of Power Produced by Solar Panels with Artificial Neural Networks by using Environmental Factors**

The output power of a photovoltaic panel is dependent on environmental factors such as solar irradiance, air temperature, wind speed, wind direction, relative humidity etc. This dependence is nonlinear and is due to the differences in the production techniques of photovoltaics. This necessitates detailed experimental studies for the detection of photovoltaic panel characteristics. Robust prediction of the power generated by photovoltaic panels is crucial in the proper planning of power generation systems.

In this study, it was tried to estimate the power value produced by photovoltaic panels using artificial neural networks. In order to make a more robust prediction in experimental work, the power values produced by photovoltaic panels were measured and recorded for one year, considering the environmental variables such as the amount of solar radiation, air temperature, wind speed, wind direction, relative humidity and solar elevation angle. In the study, fixed and single axis tracking monocrystalline panels were used. The predicted values obtained by the developed artificial neural network models were compared with the measured values and the obtained findings were examined. When the developed artificial neural network models were tested with data that were not used in the network training process, it was observed that very robust predictions were performed with the Root Mean Squared Error (RMSE) error rates not exceeding 1.4% for the fixed panel and 2.34% for the single axis tracking panel. In the developed artificial neural network models, it is observed that the correlation coefficient between the dependent power variable and the environmental variables was very high with a value between 99.637% and 99.998%. Furthermore, in this study, the developed models were tested by Multiple Linear Regression which is one of the traditional methods. The results showed that the models obtained by using environmental variables predicted the power value produced by the photovoltaic panels with high accuracy. This study was carried out in Batman province; however, at any location in the world, the energy production of any planned photovoltaic installations can be estimated with high accuracy using environmental variables obtained from meteorological stations.

**Keywords:** Photovoltaic systems, Renewable energy sources, Artificial neural network.

## ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 2.1. Farklı enerji çeşitleri arasındaki dönüşüm.....	10
Şekil 2.2. Dünya atmosferi dışına gelen ışınım enerjisinin aylara göre değişimi .....	11
Şekil 2.3. Dünya fosil yakıt enerjisi tüketimi .....	13
Şekil 2.4. Küresel elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı, 2016 .....	13
Şekil 2.5. Enerji tüketimi kaynaklı karbondioksit salınımı .....	14
Şekil 2.6. Küresel ışınım bandı.....	15
Şekil 2.7. Isıl uygulamalarla güneşten elektrik enerjisi üretimi .....	16
Şekil 2.8. Güneşten direkt ısı enerjisi üretimine ait küresel kurulu güç .....	17
Şekil 2.9. Fotovoltaik sistemlerle elektrik üretimine ait küresel kurulu güç.....	18
Şekil 2.10. Fotovoltaik kapasitenin ülkelere ve yıllara göre artışı .....	18
Şekil 2.11. Silikon fotovoltaik hücrelerin fiyat geçmişi .....	19
Şekil 2.12. Türkiye güneş enerjisi potansiyel atlası.....	20
Şekil 2.13. Türkiye’de elektrik enerjisi kurulu güç gelişimi.....	22
Şekil 2.14. Türkiye’de 2016 yılında devreye giren santrallerin kaynak bazında dağılımı ..	23
Şekil 2.15. Türkiye’de 2016 yılı sonu itibarıyla kurulu gücün kaynak bazında dağılımı....	24
Şekil 3.1. PV hücrenin çalışma ilkesi .....	27
Şekil 3.2. Güneş pilinin katmanları .....	28
Şekil 3.3. Fotovoltaik gruplar .....	29
Şekil 3.4. PV hücre ve modüle ait I-V eğrileri .....	29
Şekil 3.5. PV hücre üretim teknolojileri.....	30
Şekil 3.6. Tek kristalli silikon dilimlerinin üretilmesi .....	31
Şekil 3.7. Tek kristalli bir PV hücre .....	32
Şekil 3.8. Çok kristalli bir PV hücre .....	33
Şekil 3.9. Amorf silikon bir PV modül .....	35
Şekil 3.10. Farklı türdeki ince film silikon materyallerin soğurma katsayıları.....	35
Şekil 3.11. Galyum Arsenit bir PV modül .....	36
Şekil 3.12. Kadmiyum tellürid bir PV modül.....	38
Şekil 3.13. Kadmiyum tellürid ince film tabaka yapısı.....	38
Şekil 3.14. Bakır İndiyum Diseleneid bir PV modül.....	39
Şekil 3.15. Bakır İndiyum Galyum Diselenid ince film tabaka yapısı .....	40
Şekil 3.16. Dünya eliptik yörüngesi.....	42
Şekil 3.17. Hava kütlelerinin gösterimi .....	43
Şekil 3.18. Deklinasyon açısının yerküre üzerindeki gösterimi .....	45
Şekil 3.19. Deklinasyon açısının yıl içindeki değişimi.....	47
Şekil 3.20. Saat açısının gün içindeki değişimi .....	48
Şekil 3.21. Güneş açılarının yerküre üzerinde gösterimi .....	51
Şekil 3.22. PV panelleri üzerine düşen ışınım.....	52
Şekil 3.23. Sabit ve hareketli panellerin gün içinde güneşe göre konumu .....	53
Şekil 3.24. Eğim ve yönelim açılarının panel üzerinde gösterimi.....	54
Şekil 3.25. Tek eksenli güneş izleyicilerin yönleri.....	55
Şekil 3.26. Polar tek eksen izleyicili bir PV uygulaması.....	55
Şekil 3.27. İki eksenli güneş izleyicilerin yönleri.....	56
Şekil 3.28. İki eksen izleyicili bir PV uygulaması.....	57
Şekil 3.29. PV panel sistemlerinin güç bakımından karşılaştırılması.....	57
Şekil 3.30. Sürücü tekniğine göre güneş izleme sistemlerinin sınıflandırılması.....	58
Şekil 3.31. Pasif güneş takip sistemlerinin çalışma süreci.....	59

Şekil 3.32. PLD tabanlı güneş izleyici blok diyagramı.....	61
Şekil 3.33. İdeal tek diyotlu model.....	62
Şekil 3.34. Gerçek tek diyotlu model.....	63
Şekil 3.35. İki diyotlu model.....	64
Şekil 4.1. Sabit açılı panel uygulaması .....	69
Şekil 4.2. Rezistif yük .....	70
Şekil 4.3. Gerilim bölücü devre .....	70
Şekil 4.4. Hareketli panel uygulaması .....	72
Şekil 4.5. Hareketli panel için kullanılan motor ve redüktör sistemi .....	72
Şekil 4.6. Hareketli panel denetleyici devresi .....	73
Şekil 4.7. Meteoroloji istasyonu uygulama görüntüleri.....	74
Şekil 4.8. Meteoroloji istasyonunda kullanılan sensörler .....	75
Şekil 4.9. Data-logger bağlantısı .....	76
Şekil 4.10. Ölçülen değerlere ait örnek grafikler.....	77
Şekil 4.11. Deneysel çalışmaya ait blok diyagram .....	78
Şekil 4.12. Geliştirilen YSA modellerinin mimari yapısı.....	82
Şekil 4.13. Kullanılan YSA'ya ait blok diyagramı.....	84
Şekil 5.1. YSA Model-1 ve YSA Model-2'ye ait performans hata değerleri .....	88
Şekil 5.2. YSA Model-1 güneşli 3 gün için tahminler.....	90
Şekil 5.3. YSA Model-2 bulutlu 3 gün için tahminler.....	90
Şekil 5.4. YSA ve MLR Model-1'in gerçek değerlerle karşılaştırılması.....	92
Şekil 5.5. YSA ve MLR Model-2'nin gerçek değerlerle karşılaştırılması.....	92
Şekil 5.6. YSA Model-3 ve YSA Model-4'e ait performans hata değerleri .....	96
Şekil 5.7. YSA Model-3 güneşli 3 gün için tahminler.....	98
Şekil 5.8. YSA Model-4 güneşli 3 gün için tahminler.....	99
Şekil 5.9. YSA ve MLR Model-3'ün gerçek değerlerle karşılaştırılması.....	100
Şekil 5.10. YSA ve MLR Model-4'ün gerçek değerlerle karşılaştırılması.....	101

## TABLolar LİSTESİ

	<b>Sayfa No</b>
Tablo 2.1. Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyelinin aylara göre dağılımı .....	21
Tablo 2.2. Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyelinin bölgelere göre dağılımı .....	22
Tablo 3.1. PV hücre teknolojilerinin karşılaştırılması .....	41
Tablo 3.2. Yılın çeşitli günlerinde deklinasyon açısı değerleri .....	46
Tablo 4.1. Kullanılan panele ait karakteristik özellikler .....	69
Tablo 5.1. Sabit açılı panel modelinde yer alan değişkenlere ait betimsel istatistikler .....	86
Tablo 5.2. Sabit açılı panel için değişkenler arasındaki korelasyon katsayıları .....	86
Tablo 5.3. Sabit panel için YSA ve MLR modellerine ait performans ölçüt değerleri .....	89
Tablo 5.4. Sabit açılı panel için ölçülen ve YSA ile tahmin edilen enerji değerleri .....	91
Tablo 5.5. Sabit panel için YSA ve MLR modellerinin karşılaştırılması .....	93
Tablo 5.6. Sabit açılı panel için bağımsız değişkenlerin önem düzeyi .....	94
Tablo 5.7. Hareketli panel modelinde yer alan değişkenlere ait betimsel istatistikler .....	95
Tablo 5.8. Hareketli panel için değişkenler arasındaki korelasyon katsayıları .....	95
Tablo 5.9. Hareketli panel için YSA ve MLR modellerine ait performans ölçüt değerleri .....	98
Tablo 5.10. Hareketli panel için ölçülen ve YSA ile tahmin edilen enerji değerleri .....	100
Tablo 5.11. Hareketli panel için YSA ve MLR modellerinin karşılaştırılması .....	101
Tablo 5.12. Hareketli panel için bağımsız değişkenlerin önem düzeyi .....	102

## SİMGELER LİSTESİ

$E$	: Enerji
$m$	: Kütle
$c$	: Işık hızı
$CdTe$	: Kadmiyum tellürid
$CdS$	: Kadmiyum sülfür
$CuInSe_2$	: Bakır indiyum diselenid
$CuInGaSe_2$	: Bakır indiyum galyum diselenid
$SiO_2$	: Silisyum dioksit
$E_{eo}$	: Güneş sabiti
$r_g$	: Dünya ile Güneş arasındaki mesafe
$f_g$	: Güneş düzeltme faktörü
$P_{max}$	: Maksimum güç
$V_{oc}$	: Açık devre gerilimi
$V_{pm}$	: Maksimum güç gerilimi
$I_{sc}$	: Kısa devre gerilimi
$\emptyset$	: Enlem açısı
$\delta$	: Deklinasyon açısı
$\theta_z$	: Zenit açısı
$\omega$	: Saat açısı
$\beta$	: Eğim açısı
$\gamma$	: Yüzey azimut açısı
$\theta$	: Geliş açısı
$\alpha_s$	: Güneş yükseklik açısı
$\gamma_s$	: Güneş azimut açısı
$I_{PH}$	: Foton akımı
$I_D$	: Diyot akımı
$I_S$	: Diyot doyma akımı
$m_d$	: Diyot kalite faktörü
$R_S$	: Seri direnç
$R_P$	: Paralel direnç
$V$	: Panel gerilimi
$V_T$	: Termal gerilim
$p_i$	: Tahmin edilen değer
$o_i$	: Gerçek değer
$w$	: Ağırlık değeri
$b$	: Sapma
$e$	: Hata değeri
$J$	: Jacobian matrisi
$\mu$	: Marquardt düzeltme parametresi
$f$	: Aktivasyon fonksiyonu
$\bar{o}$	: Gözlenen değerlerin ortalaması

## KISALTMALAR LİSTESİ

m-Si	: Tek kristalli silikon
p-Si	: Çok kristalli silikon
a-Si	: Amorf silikon
YSA	: Yapay sinir ağları
FL	: Bulanık mantık
FNN	: Bulanık sinir ağları
SI	: Uluslararası birim sistemi
PV	: Fotovoltaik
EİE	: Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü
CST	: Konsantre güneş teknolojisi
CPV	: Konsantre fotovoltaik
MPPT	: Maksimum güç noktası izleyici
STC	: Standart test koşulları
CVD	: Kimyasal buhar biriktirme
CIS	: Bakır indiyum diselenid
CGS	: Bakır galyum diselenid
CIGS	: Bakır indiyum galyum diselenid
LDR	: Işığa duyarlı direnç
PLD	: Programlanabilir lojik denetleyici
PIC	: Programlanabilir arabirim denetleyici
IEA	: Uluslararası enerji birliği
GI	: Güneş ışıınımı
T	: Hava sıcaklığı
WS	: Rüzgâr hızı
WD	: Rüzgâr yönü
RH	: Bağıl nem oranı
EA	: Güneş yükseklik açısı
BP	: Geriye yayılım
FBPANN	: İleri beslemeli geriye yayılımlı yapay sinir ağları
MSE	: Ortalama karesel hata
RMSE	: Kök ortalama karesel hata
MAE	: Ortalama mutlak hata
RAE	: Bağıl mutlak hata
RRAE	: Bağıl mutlak hata karekökü
MLR	: Çoklu doğrusal regresyon

## 1. GİRİŞ

İnsanoğlu, özellikle Avrupa'da bař gösteren Sanayi Devrimi ile enerjinin potansiyel bir gúc olduğunu kavramıştır. Bir "medeniyet ve gúc göstergesi" olarak başlayan enerji üretim ve tüketim serüveni, yerini zamanla mutlak bir ihtiyaç olmaya terk etmiştir. Artan nüfus ve sanayileşmenin yanında geleneksel enerji kaynağı olan fosil yakıt rezervlerindeki artış paralellik göstermemiştir. Bu ahengin bozulması toplumlar arasında savaşlara neden olmuş veya onları savaşların eşiğine getirmiştir. Toplumlar enerji elde ettikçe sanayileşme artmış, sanayileşme arttikça daha çok enerji ihtiyacı duyulmuştur.

19. yüzyılın sonlarında keşfedilen nükleer enerji üzerine devam eden araştırmalar, bu enerji türünü günümüz ve geleceğin en önemli enerji kaynaklarından biri haline getirmiştir. Ancak özellikle bu enerjinin üretilmesi sırasında karşılaşılan zorluklar, ülke yöneticilerinin haklı veya haksız olarak bu enerji türünün kullanılmaması yönünde karar vermelerine neden olmaktadır. Yetişmiş eleman, yakıt temini, atıkların depolanması ve yetersiz güvenlik, az gelişmiş veya gelişmekte olan ülkelerin, nükleer enerji üretimini zorlaştıran faktörler olarak çözüm beklemektedir. İşletme sırasında baş gösteren arızaların ortaya çıkardığı kalıcı tahripler, sivil toplum kuruluşlarını tedirgin etmekte ve onları nükleer enerjinin üretilmemesi yönünde eylemler gerçekleştirmeye itmektedir. 2011 yılında Japonya'da meydana gelen Fukuşima nükleer kazası ile beraber toplam dört büyük nükleer kaza kayıtlara geçmiştir. Bütün bu olumsuzluklara rağmen dünyada 400'ün üzerinde nükleer enerji santrali bulunmaktadır. Bu santraller ile dünyanın toplam elektrik enerjisi ihtiyacının %9'u sağlanmaktadır.

Günümüzde elektrik enerjisi üretiminin büyük kısmı, kömür, fuel-oil, odun, doğal gaz gibi fosil yakıtlarından elde edilen ısı enerjisinin kullanılmasıyla gerçekleştirilmektedir. Ancak ulaşılabilir fosil rezervlerindeki azalma ve bu yakıtların kullanılmasıyla ortaya çıkan karbondioksit gazının sebep olduğu küresel iklim bozuklukları, insan ve diğer canlıların hayatını tehdit etmektedir. Fosil kökenli yakıtların kullanımı, yerkürenin ortalama sıcaklığını son bin yılın en yüksek değerlerine ulaştırmış, yoğun hava kirliliğinin yanı sıra milyarlarca dolar zarara yol ačan sel, fırtına gibi doğal felaketlerin gözle görölür şekilde artmasına sebebiyet vererek, canlıların hayatlarını dolaylı ve direkt olarak etkilemektedir. Ortalama küresel sıcaklığın bu ivmeyle artması halinde, kutuplardaki buzulları tetikleyeceği ve nihayetinde okyanuslara yakın yaşam alanlarının sular altında kalacağı bile önemsenen

senaryolar arasında yer almaktadır. Bütün bu tehditler, ülkelerin enerji üretim yatırımlarının temiz odaklı olmasını zorunlu hale getirmektedir. Avrupa Birliği üyeliği sözleşme şartlarında yer alan Kyoto Protokolü, Türkiye dâhil birçok ülke tarafından kabul edilmiştir. Bu sözleşmenin odak noktası, ülkelerin enerji üretim ve tüketimi esnasında, atmosfere salınması muhtemel karbondioksit, metan gibi sera etkisine yol açan gazları sınırlandırmaktır. Bu nedenle Türkiye dâhil bu protokolü kabul eden tüm ülkeler, enerji ihtiyaçlarını daha çevreci olan yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelerek çözmek durumundadırlar. Avrupa Birliği'nin önemli bir üyesi olan Almanya, hükümet politikası olarak özellikle Fukuşima faciasından sonra, kendi ülkelerinde bulunan tüm nükleer santralleri kapatarak temiz enerji üretme yöntemlerine yatırım yapma kararı almıştır. Fransa ve İsviçre hükümetleri de kendi ülkelerinde bulunan nükleer santrallerin bir kısmını veya tümünü kapatmayı gündemlerine alarak Almanya'yı izlemişlerdir. Birçok özel araştırma kurumunun hazırladıkları raporlara göre 2060 yılında dünya enerji ihtiyacının yaklaşık %60'ının yenilenebilir kaynaklardan karşılanacağı öngörülmektedir [1].

Yukarda sıralanan sorunların ortaya çıkmasıyla başlayan alternatif enerji kaynakları arayışı, bu alandaki çalışmaların, güvenilir ve çevre dostu, neredeyse limitsiz bir enerjiye sahip yenilenebilir enerji kaynağı olan güneş enerjisi üzerinde toplanmasını sağlamıştır. Güneş enerjisi çevre kirletici etki oluşturmayan enerji üretim seçeneklerinin başında gelmektedir [2-5].

Alternatif enerji kaynaklarından biri olan güneş enerjisi çok eski tarihlerden bu yana ısıtma ve sıcak su elde etmek amacıyla birçok uygulamada kullanılmış olmasına rağmen güneş enerjisini direkt elektrik enerjisine dönüştüren sistemler yeni sayılmaktadır. Güneş pilleri adıyla anılan bu dönüştürücü sistemler ilk olarak uzay çalışmaları için geliştirilmiş; daha sonra şebekeden bağımsız, güç üretim merkezine uzak olan deniz fenerleri, orman gözetleme kuleleri, telekomünikasyon istasyonları, dağ evleri gibi yerlerde enerji ihtiyacını karşılamak üzere kullanılmaya başlanmıştır [6]. Özellikle son yıllarda, fotovoltaik üretim teknolojilerinin gelişmesi, üretici firmaların sayısının artması ve bu firmalar arasındaki rekabet, panel fiyatlarının düşmesini sağlamıştır. Bu sayede güneş enerjisinden elektrik enerjisi eldesi, sadece enerji iletiminin zor veya imkânsız olduğu yerlerde değil, enterkonnekte şebekeye dâhil edilmiş bir şekilde, ülkelerin toplam enerji üretiminde kayda değer bir yer tutmasını sağlamıştır. Güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretiminin gün geçtikçe daha çekici hale gelmesindeki temel etken sadece panel üretim maliyetlerinin düşmesi değildir. Bununla beraber güneş pillerinin yüksek işletim güvenilirliği, kararlı

performans artışı, şarj regülatörü, inverter, şebekeden bağımsız sistemlerde kullanılması gereken enerji depolama birimleri gibi ekipmanlardaki fiyat düşüşleri de enerji üretim politikalarının güneş enerjisinden elektrik elde edilmesi üzerinde odaklanmasında son derece etkilidir. Güneş enerjisi kullanımının birçok avantajına karşılık diğer üretim yöntemlerine göre daha geniş fiziksel sahalar gerektirmesi ve panel verimlerinin istenen düzeyde olmaması gibi dezavantajları nitelikli çözümler bekleyen sorunlar arasındadır.

Bu sorunların üstesinden gelmenin en etkili yolu, güneş pillerinin hücre verimliliğinin artırılmasıdır. Bunu gerçekleştirmek üzere, zaman içinde farklı yarı iletken teknolojileri kullanılarak hücre verimi yüksek güneş panelleri üretilmiştir. Bunların başlıcaları; mono-kristal silikon (m-Si), poli-kristal silikon (p-Si), kadmiyum tellürid (CdTe), amorf silikon (a-Si), bakır indiyum diselenid ( $CuInSe_2$ ) ve bakır indiyum galyum diselenid ( $CuInGaSe_2$ ) hücreleridir. Kullanılan bu teknolojilerin tümü, birbirine göre verimlilik, uygulamadaki zorluklar, üretimlerinden kaynaklanan zorluklar ve üretim maliyetleri açısından avantaj ve dezavantajlara sahiptirler.

Güneş pilleri, güneşten yeryüzüne gelen ışınımı elektrik enerjisine dönüştüren yapılar olduklarından, güneş santrallerinin tesisi aşamasında, panellerin güneş ışınımından azami düzeyde faydalanmasını sağlayacak şekilde tespit edilmesi de verimi arttıran etkenler arasında yer almaktadır. Bu esasa göre güneş izleme sistemleri geliştirilmiştir. Pasif ve aktif güneş izleme sistemlerinin genel amacı, güneşten hücrelere gelen ışınımı hücre üzerine azami düzeyde düşürebilmek üzere, panel yüzeyini güneşe dik halde tutmaktır. Uygulamada, güneşi doğu-batı veya güney-kuzey yönlerine göre izleyen tek eksenli güneş takip sistemleri ve hem doğu-batı hem de güney-kuzey yönlerine göre izleyen iki eksenli güneş takip sistemleri mevcuttur. Güneş ışınımından daha fazla faydalanabilmek için kullanılan izleyici sistemlerin tesisi için oluşturulan dinamik ve statik konstrüksiyonlarla beraber, kullanılması zorunlu olan motor, hidrolik veya pnomatik mekanizmalar, kayış kasnak veya redüktörlü sistemler, sabit açılı panel sistemlerine göre maliyeti arttırsa da, kısa sürede kendilerini amorti etmeleri dolayısıyla özellikle küçük ve orta güçlü uygulamalarda sıklıkla tercih edilebilmektedir. Güneş enerjisinden elektrik elde etmeye yönelik güneş santrallerinin kurulması planlanırken, sabit veya hareketli sistemlerden hangisinin kullanılacağına, güneş izleyici sistemler kullanılacaksa hangi izleyici türünün tercih edileceğine karar verebilmek için, santralin kurulacağı bölgenin güneş enerjisi potansiyelinin bilinmesi son derece önemlidir.

## 1.1. Tezin Amacı ve Kapsamı

Fotovoltaik (PV) paneller açık hava şartlarında tesis edilen sistemler olduklarından, uygulama bölgelerindeki atmosferik değişkenlere maruz kalacak biçimde işletilmeleri söz konusudur. Güneş panellerinden elde edilen elektrik enerjisi miktarı, başta güneş ışınımı olmak üzere çeşitli atmosferik ve meteorolojik değişkenlere bağlıdır. Bunlar genel olarak, panellerin yüzey sıcaklığını etkileyen hava sıcaklığı ve bağıl nem oranı, bölgedeki rüzgâr rejimi ve hava kütesinin bir ifadesi olarak atmosfer basıncıdır. Güneş paneli üreticileri, ürettikleri panellere ilişkin akım-gerilim (I-V) ve güç-gerilim (P-V) karakteristiklerini, standart test koşullarına göre belirtmektedirler. Ancak güneş panelleri doğrusal olmayan yarı iletken yapılarından ötürü, kullanıldıkları bölgelere göre, üreticiler tarafından sunulan katalog verilerinden farklı karakteristikler gösterebilmektedirler.

Enerji potansiyeli bilgisi; bir bölgede PV sistemlerin tesisinin uygunluğuna karar verilmesine yardımcı olan, tesis edilmesi durumunda yapılacak yatırımların optimizasyonuna ışık tutan en önemli fizibilite çalışmasıdır. Bu tezde, alternatif enerji kaynakları arasında önemli bir paya sahip güneş panellerinin ürettiği enerji miktarının, güneş ışınımı, hava sıcaklığı, rüzgâr hızı, rüzgâr yönü, nem vb. çevresel değişkenlerle korelasyonunu bulmak amaçlanmıştır. Bu sayede, büyük bir enerji rezervi olan güneşten, doğrudan elektrik enerjisi elde edilmesini sağlayan ve hâlâ büyük tesis maliyetlerine yol açan PV sistemlerin projelendirilmesi aşamasında, sistemin tesis edileceği bölgeye ait enerji potansiyelinin tespit edilmesi sağlanabilecektir.

Çalışmada, dünya genelinde, (hücre verimliliği)/fiyat bakımından sağladığı avantaj nedeniyle en çok kullanım alanı bulan tek kristalli silikon (m-Si) paneller kullanılacaktır. Deneysel çalışma için güç değerleri, sabit açı ile konumlandırılmış (hareketsiz) panel ve doğu-batı yönünde hareket edebilen tek eksen güneş izleyici ile kontrol edilen panel olmak üzere iki ayrı sistemden elde edilecektir.

Deneysel çalışma için 37,889 Kuzey enlemi, 41,129 Doğu boylamında bulunan ve güneş enerjisi potansiyeli bakımından zengin olan Batman ili seçilmiştir. Tezin amacı doğrultusunda, Batman iline ait bir yılı kapsayacak şekilde, hava sıcaklığı, rüzgâr hızı, rüzgâr yönü, bağıl nem oranı, güneş ışınımı değerleriyle beraber prototip olarak gerçekleştirilen sabit ve hareketli PV panellerden elde edilen güç değerleri kaydedilecektir. Elde edilen büyük veri seti üzerinde yapay sinir ağları tekniği ile analizler yapılarak güneş panellerinden elde edilen güç değerinin ilgili çevresel değişkenlerle ilişkisi saptanacaktır.

Batman ili özelinde yapılan bu çalışmadan elde edilen bulgular, yenilenebilir özelliğe sahip olacağından diğer güneş kuşağı bölgeleri için de kullanılabilirliği beklenmektedir.

## 1.2. Literatür Özeti

Fosil yakıt rezervlerindeki azalmaya karşılık artan enerji talebi, alternatif enerji kaynaklarına olan ilgiyi gün geçtikçe arttırmaktadır. Literatür incelendiğinde, özellikle son 20 yıl içinde yaygın kullanım alanı bulan ve yenilenebilir enerji kaynakları arasında popüler hâle gelen PV teknolojisi ve uygulamaları üzerine çok sayıda araştırma olduğu görülmektedir. Ancak tezin konusu kapsamında literatür özeti; güneş ışınımı miktarı, hava sıcaklığı, bağıl nem oranı, rüzgâr hızı, rüzgâr yönü vb. meteorolojik parametrelerin PV paneller üzerindeki etkileri ile yapay sinir ağları (Artificial Neural Network, YSA), bulanık mantık (Fuzzy Logic, FL) ve bulanık sinir ağları (Fuzzy Neural Network, FNN) gibi yöntemlerin PV sistemlerle ilgili araştırmalarda kullanılmasını içeren iki başlık altında toplanmıştır.

Mellit vd. [7] günlük toplam ışınım değerini tahmin etmek için YSA ve Wavelet teorisini bir arada kullanmışlardır. Yazarlar, belli bir bölgeye ait 19 yıllık meteorolojik verilerden faydalanarak geliştirdikleri wavelet-network sayesinde, bir güne ait toplam güneş ışınımı miktarını %97 oranında bir doğrulukla tahmin edebilmişlerdir.

Hiyama vd. [8] bir PV modülünün maksimum güç verebileceği çalışma noktalarını belirlemek için bir YSA geliştirmişlerdir. Çalışmada, geniş bir zaman dilimine ait çevresel bilgileri kullanarak geliştirilen YSA modeli, gerçek zamanlı bir güneş izleme sistemi ile kullanılmıştır. Çalışmada ayrıca maksimum güç tahmini de araştırılmış olup, kullanılan YSA ile %99 gibi çok yüksek bir tahmin gerçekleştirilmiştir.

Bahgat vd. [9] bir PV modülünün ürettiği nominal ve maksimum gücü, geliştirdikleri YSA modeli ile büyük bir doğruluk oranıyla tahmin etmişlerdir. Araştırmacılar başka bir çalışmalarında, geliştirdikleri YSA modeli ile PC tabanlı bir maksimum güç noktası izleyicisi (Maximum Power Point Tracker, MPPT) tasarlamış ve uygulamışlardır [10].

Mellit vd. [11] az sayıda giriş bilgisi kullanarak, bağımsız PV sistemlerinin boyutlandırılması için verimli bir model geliştirmişlerdir. Önerilen model "Radial Basis Function Ağı" ve "Infinite Impuls Response Filtresi" kombine edilerek geliştirilmiştir. Çalışmada, YSA kullanılarak geliştirilen modelin diğer klasik modellerden daha az bilgi ile daha hızlı bir tahmin gerçekleştirdiği vurgulanmıştır.

Karatepe ve Boztepe [12] bir PV hücrenin eşdeğer devre parametrelerini, geliştirdikleri YSA tabanlı model ile hassas bir şekilde belirleyebilmişlerdir. Bir PV modülün eşdeğer devre parametreleri genel olarak güneş ışınımı ve PV panel yüzey sıcaklığına bağlıdır. Bu bağılılığı akım-gerilim eğrileri kullanarak inceleyen yazarlar, PV'lerin doğrusal olmayan yapılarından dolayı analitik yöntemlerle elde etmenin zorluklarını vurgulamışlardır. Yapılan çalışmada önerilen YSA modeli ile bu zorluklar ortadan kaldırılmış ve eşdeğer devre parametreleri yüksek bir doğrulukla belirlenebilmiştir.

Abdulhadi vd. [13] güneş hücrelerinin kısa devre akımı ve açık devre gerilimini tahmin etmek üzere bir FNN modeli geliştirmişlerdir. Araştırma, geliştirilen FNN ile elde edilen solar hücre modelinin, geleneksel modellerden daha tutarlı olduğunu göstermiştir.

Hiyama ve Kitabayashi [14] çevresel bilgileri kullanarak bir PV modülünden elde edilen maksimum gücü, geliştirdikleri YSA ile tahmin etmişlerdir. Önerilen ağ modeli, meteoroloji istasyonlarından alınan tahmini bilgileri kullanarak, PV modülünün bir sonraki güne ait üreteceği enerjiyi %94 oranında bir doğrulukla tahmin edebilmiştir. Araştırmacılar, geliştirilen ağ modelinin, geleneksel çoklu doğrusal regresyon modelinden daha doğru sonuçlar verdiğini belirtmiştir.

Mellit vd. [15] monokristalin bir PV modülün üreteceği gücü tahmin etmek üzere bir YSA modeli geliştirmişlerdir. Çevresel bilgiler ve modülün ürettiği güç yaklaşık bir yıl için ölçülmüştür. Bu verilerle elde edilen ağ modelleri, herhangi bir güne ait modülün ürettiği gücü yaklaşık %95 oranında bir doğrulukla tahmin etmiştir. Yazarlar, geliştirdikleri ağ modelinin, polinomal regresyon, çoklu doğrusal regresyon, analitik ve tek diyot modellerinden daha doğru tahminleme yaptığını ifade etmişlerdir.

Fesharaki vd. [16] sıcaklığın PV modülleri üzerindeki etkilerini inceleyen bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada, PV hücrelerin modellenmesinde kullanılan tek diyotlu elektrik eşdeğer devresi temel alınarak, verimlilik, güneş radyasyonu ve sıcaklık arasındaki ilişki incelenmiştir. Araştırmanın bulguları, sıcaklık artışının PV modül verimliliğinde düşüşe sebep olduğunu göstermiştir.

Radziemska [17] sıcaklık değişkeninin kristalize silikon güneş hücreleri üzerindeki etkisini ortaya koyan deneysel bir çalışma yapmıştır. Teoride, kristalize hücrelerin verimi, sıcaklığın 1 K° değerinde artmasıyla %0,4 oranında düşmektedir [18]. Radziemska'nın çalışma bulgularına göre ise, standart test koşullarına göre +25 C° sıcaklıktaki kristalize silikon hücrenin enerji dönüştürme etkinliği %13,3 iken, +60 C° sıcaklıkta %22,55'lik bir düşüşle %10,3'e inmektedir.

Mekhilef vd. [19] toz, nem ve rüzgâr hızının PV hücreler üzerindeki etkisini inceleyen deneysel bir araştırma yapmışlardır. Araştırmada, nem PV hücrelerinin verimliliğini düşürürken, rüzgâr hızının verim üzerinde olumlu bir etkisi olduğu bildirilmiştir. Araştırmacılar bu sonuçları, nem faktörünün panellerin tozlanma miktarını arttırarak hücre verimliliğini düşürmesine, rüzgâr hızının ise panelleri soğutarak hücre verimliliğini arttırmasına bağlamaktadır.

Yukarıda sunulan çalışmalardan, PV alanında yapılan farklı bilimsel araştırmalarda, yapay sinir ağları (YSA) yönteminin sıklıkla kullanıldığı anlaşılmaktadır. Diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında YSA yönteminin hassasiyet, doğruluk, basitlik ve uyarlanabilirlik açısından daha kararlı sonuçlar verdiği görülmektedir. Literatüre göre, sıcaklık, rüzgâr ve nem gibi meteorolojik parametrelerin PV hücre verimliliği üzerinde etkili olduğu görülmektedir.

### **1.3. Tezin Yapısı**

Bu tez çalışması, altı bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde; fosil kökenli yakıtların enerji üretiminde kullanılmasıyla ortaya çıkan olumsuzluklar irdelendikten sonra genelde yenilenebilir ve sürdürülebilir kaynakların, özelde güneş enerjisiyle elektrik üretiminin önemi vurgulanmıştır. Devamında tezin amaç ve kapsamı belirtilerek bu amaç doğrultusunda PV sistemlerle ilgili literatür taraması yapılmak suretiyle konu hakkında bir özet sunulmuştur.

İkinci bölümde; doğada bulunan enerji kaynakları arasındaki dönüşüm ile ilgili bilgi verildikten sonra güneş enerjisi hakkında ayrıntılı bilgiler verilmiştir. Ayrıca, güneş enerjisinin ısıl ve PV uygulamalarda kullanımı, dünya ve Türkiye genelindeki güncel istatistikler ışığında diğer enerji kaynaklarıyla karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır.

Üçüncü bölümde; PV teknolojisi ve bu teknolojinin önemi hakkında genel bilgiler verildikten sonra, güneş pillerinin yapısı, modellenmesi ve panel pazarlarında yer alan PV hücre teknolojileri hakkında ayrıntılı bilgiler verilmiştir. Dünya'nın kendi etrafında ve Güneş etrafında dönmesiyle oluşan temel güneş açıları ve PV sistemlerin uygulanmasında kullanılmak üzere türetilmiş güneş açıları tanımlandıktan sonra, güneş izleme teknoloji ve uygulamaları hakkında ayrıntılı bilgiler de bu bölümde sunulmuştur.

Dördüncü bölümde; veri setinin elde edilmesi amacıyla, deneysel çalışmada kullanılan sabit açılı ve tek eksen güneş izleyici panel sistemleri tasarlanmış ve uygulanmıştır. Deney

seti genel olarak, sabit eğimli panel, tek eksen güneş izleyicili panel ve meteoroloji istasyonu ünitelerinden oluşmaktadır. Sistemin içerdiği üniteler ve bu ünitelerde kullanılan ekipmanlar hakkında bilgiler bu bölümde verilmiştir. Verilerin analizinde yöntem olarak kullanılan yapay sinir ağları tekniği ile ilgili bilgiler verildikten sonra, ağın eğitim kriterleri belirlenmiştir. Belirlenen kriterlere göre MatLab yazılımı aracılığıyla veri seti üzerinde yapılan analizler sonucunda en iyi tahminlemeyi gerçekleştiren yapay sinir ağı modelleri geliştirilmiştir. Geliştirilen yapay sinir ağı modellerinin başarısını test etmek üzere, literatürde başarılı bir yöntem olarak ifade edilen "çoklu doğrusal regresyon" metodu tanıtılmıştır. Geliştirilen yapay sinir ağı ve çoklu doğrusal regresyon modellerinin performansını ölçmede kullanılan istatistiksel terimlere ilişkin tanımlamalar da bu bölümde yer almaktadır.

Beşinci bölümde; geliştirilen yapay sinir ağı modellerinin sabit açılı ve tek eksenli güneş izleyici panel tarafından üretilen enerji değerini tahmin etmedeki başarısı tablo ve grafikler şeklinde sunulmuştur.

Altıncı bölümde; tez kapsamında yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular değerlendirilerek, konu ile ilgili sonraki çalışmalara ışık tutacağı düşünülen önerilerde bulunulmuştur.

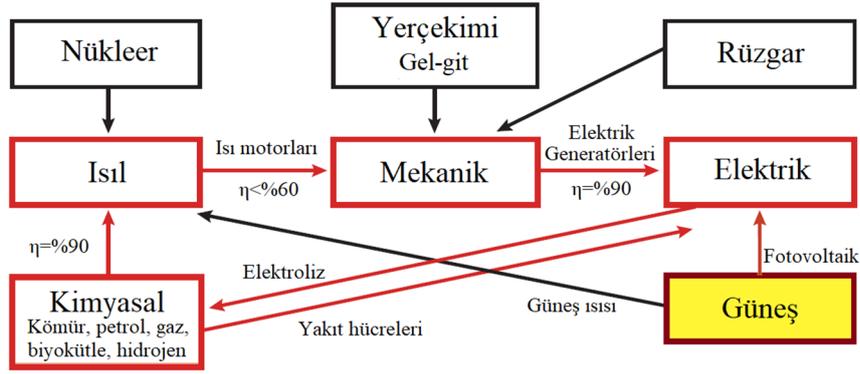
## 2. ENERJİ VE GÜNEŞ ENERJİSİ

### 2.1. Giriş

Fizik biliminde enerji, dolaylı olarak gözlenebilen bir nicelik olarak değerlendirilmektedir ve genel olarak bir fiziksel sistemin başka bir fiziksel sistem üzerinde iş yapabilme yeteneği olarak tanımlanmıştır [20]. Enerji, 1650'li yıllarda Yunanca "energeia" ismiyle anılan bir kavram olarak kullanılmasına rağmen, 1660'ların başında İngilizcede daha çok güç ifadesini de kapsayan bir nicelik olarak kullanılmıştır. Kinetik, potansiyel, elektrik, ısı, ışık, yer çekimi, ses ve elektromanyetik enerji biçimleri, enerjinin farklı formlarını içerir. Enerji skaler bir büyüklüktür ve Uluslararası Birim Sistemi (SI)'ya göre birimi Joule'dür [21].

Dünyada artan nüfus ve gelişmekte olan sanayileşme, enerjiye olan ihtiyacı gün geçtikçe arttırmaktadır. Mevcut tüketim değerleriyle, enerji ihtiyacı her yıl yaklaşık %4-5 oranında artmaktadır. Buna karşın, enerji ihtiyacının önemli bir kısmını karşılayan fosil kökenli yakıt rezervleri hızla azalmaktadır. En iyimser senaryolara göre bile, kömür dâhil, fosil kökenli enerji rezervlerinin büyük ölçüde azalarak enerji ihtiyacına cevap veremeyeceği öngörülmektedir [1]. Bununla beraber, fosil kökenli yakıtların kullanımı sonucunda atmosfere salınan sera gazlarının, canlıların yaşam alanlarını tahrip ettiği, Dünya'nın ortalama sıcaklık değerini arttırdığı ve buna bağlı olarak büyük maddi kayıplara yol açan doğal afetleri tetiklediği göz önüne alındığında, dünya ülkelerinin fosil kökenli yakıt rezervlerinin bitmesini beklemeden temiz enerji kaynaklarına yönelmesinin önemi anlaşılacaktır.

Termodinamiğin birinci yasasına göre izole bir ortamda bulunan hiçbir enerji kaybolmamakta, ancak enerji çeşitleri arasında dönüşümler söz konusu olmaktadır. Şekil 2.1'de, doğal ve türetilmiş enerjiler arasındaki dönüşüm blok diyagramı olarak gösterilmiştir [22]. Enerjinin korunumu olarak da bilinen Termodinamiğin birinci yasası, birçok araştırma alanına ışık tutmuştur. Bu araştırma alanlarından biri de yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. Yenilenebilir enerjinin birçok tanımı olmakla birlikte, genel olarak kabul gören, "doğanın kendi çevrimi içinde var olan enerjiden elde edilen tükenmeyen sürdürülebilir enerji" tanımıdır [23].



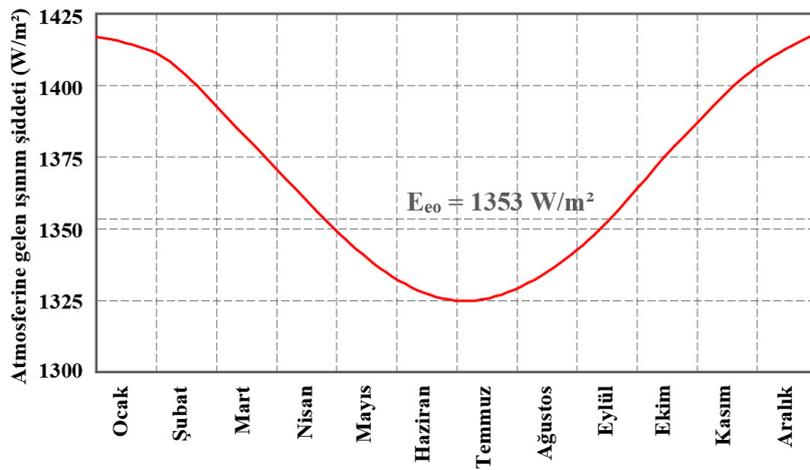
Şekil 2.1. Farklı enerji çeşitleri arasındaki dönüşüm

Son yıllarda, kendini sınırsız tekrarlayan, sürdürülebilir, atmosferi kirletmeyen ve hammadde maliyeti olmayan enerji kaynakları arasında yer alan güneş, rüzgâr, su, jeotermal, biyo-kütle, hidrojen ve dalga enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları önem kazanmış ve bu sahadaki çalışmalar büyük bir ivmeyle devam etmektedir. Gelişmiş ve gelişmekte olan birçok ülke, gerek kendi enerji ihtiyaçlarını karşılamak ve gerekse enerji piyasasında yer edinmek için, enerji üretimine dair finansal yatırımlarını yenilenebilir enerji kaynaklarına kaydırarak, temiz enerji odaklı politikaları benimsemektedirler.

## 2.2. Güneş Enerjisi

Dünya’da ve Güneş sisteminde bulunan diğer gezegenlerde bulunan nükleer yakıtlar hariç, tüm enerji kaynaklarının kökeni Güneş’tir. Yaklaşık 1,4 milyon km çapa sahip olan ve yeryüzünden yaklaşık 151,106 milyon km uzaklıkta bulunan Güneş’in sahip olduğu büyük hacim, yoğun şekilde gazlar içermektedir. Güneş, sahip olduğu enerjiyi, içinde bulunan hidrojen elementinin sürekli olarak helyum elementine dönüştüğü nükleer füzyon tepkimeleriyle sağlamaktadır. Nükleer tepkime esnasında oluşan kütle farkı ışık enerjisi olarak kendi atmosferinin dışına yayılmaktadır. Güneş’te meydana gelen nükleer tepkime basit olarak şu şekilde açıklanabilir: Proton bombardımanına maruz kalan hidrojen molekülü, hidrojenin türevi olan döteryuma dönüşür. Kararsız hale iki adet döteryum çekirdeği füzyon tepkimesi geçirecek şekilde birleşerek görece ağır olan helyuma dönüşür. Reaksiyon sonunda açığa çıkan iki adet proton nükleer zincirin devamını sağlamaktadır. Tepkimeye giren hidrojenin kütlesi ve tepkime sonrası oluşan helyumun kütlesi arasındaki fark,  $E = mc^2$  enerji yasasına göre ışınım enerjisine dönüşerek Güneş atmosferini terk etmektedir. Bu reaksiyon

sonucunda açığa çıkan enerji miktarı çok büyüktür. Güneş'in bu denli büyük bir enerji potansiyeline sahip olabilmesi, her saniyede  $10^{38}$  adet protonun helyum çekirdeğine dönüştürmesini gerektirmektedir ve bu sırada Güneş, kendi atmosferinin dışına  $4.10^{26}$  Watt'lık bir güç yaymaktadır [24]. Dünya atmosferinin içinde bulunan karbondioksit, azot, ozon gibi gazlar ve su buharı Güneş'ten kaynaklanan ışınımın önemli bir kısmını yansıtır ve bir kısmını soğurur. Dünya atmosferinin dış yüzeyine ulaşan ışınım değeri, "güneş sabiti" olarak da bilinen  $1353 \text{ W/m}^2$  değerindeyken, yeryüzüne ulaşan değer ise ortalama  $1000 \text{ W/m}^2$  olarak kabul edilmektedir [25-27]. Yeryüzüne ulaşan ışınım miktarı, güneşten doğrudan gelen ve atmosferde difüzyona uğramış ışınların toplamıdır. Dolayısıyla atmosferdeki hava basıncı, bulutluluk ve toz oranı gibi değişkenler atmosfer dışına ulaşan ışınların, saçılıma uğramış ışına oranını değiştirir. Bulutluluk oranının yüksek olduğu bir günde yerküreye direkt ulaşan ışınım miktarı az iken, aydınlık düzeyinin büyük bir kısmı saçılıma uğramış endirekt ışınlardan kaynaklanacaktır. Bunun yanında hava şartlarının bulutsuz olduğu bir günde, yerküreye ulaşan ışınların büyük kısmını güneşten doğrudan gelen ışınlar teşkil edecektir. Güneş'ten doğrudan gelen ve saçılıma uğramış ışınların toplamı, "küresel ışınım" olarak adlandırılır. PV sistemlerin tesis edileceği bölgelerdeki küresel ışınım verileri, tesis ve işletme bakımından büyük önem taşır. Dünya'nın Güneş etrafında çizdiği yörüngenin eliptik yapısından dolayı, Güneş'ten Dünya'ya gelen ışınım değeri değişken olup, Dünya atmosferinin dışına gelen güneş ışınımına ait güç değeri yaklaşık  $1300$  ila  $1400 \text{ W/m}^2$  arasında değişmektedir. Dünya atmosferine ulaşan ışınım enerjisinin bir yıl için aylara göre değişimi Şekil 2.2'de gösterilmiştir [28].



Şekil 2.2. Dünya atmosferi dışına gelen ışınım enerjisinin aylara göre değişimi

Yıl içinde herhangi bir gün için Güneş'ten Dünya'nın atmosferi dışında birim alana yansıyan ışınım gücünü hesaplamak için güneş sabiti  $E_{eo}$  değeri kullanılır. Dünya atmosferi dışına yılın herhangi bir gününde  $1 \text{ m}^2$  alana yansıyan tüm dalga boylarının ışınım şiddeti  $E_g$ , güneş sabiti  $E_{eo}$ , Dünya ile Güneş arasındaki mesafe  $r_g$  ve Dünya ile Güneş arasındaki ortalama mesafe  $r_o$  olmak üzere;

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

şeklinde yazılabilir. Burada  $f_g$  güneş düzeltme faktörü olup, "g" bir yılın ilk gününde ışınım değeri hesaplanmak istenen güne kadar olan gün sayısını göstermek üzere;

$$f_g = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(360 - \frac{g}{365}\right) \quad (2.2)$$

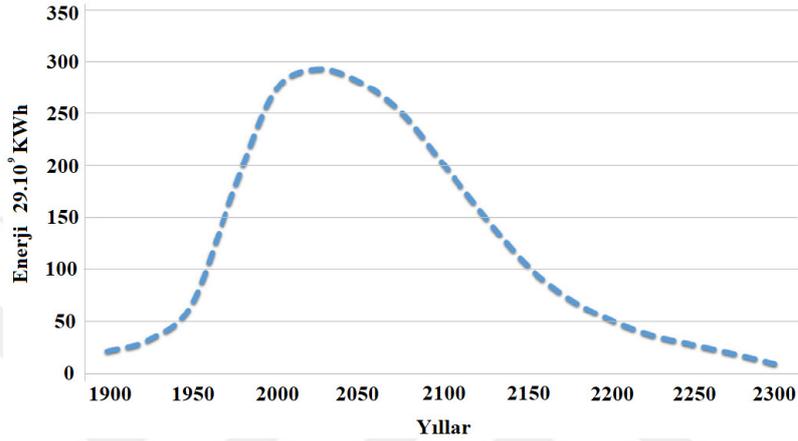
şeklinde ifade edilir [29].

Son yıllarda yapılan araştırmalar, yerkürede bulunduğu konum itibarıyla, güneşlenme alanı ve süresi oldukça iyi olan Türkiye'de yılda ortalama  $1100 \text{ W/m}^2$  değeriyle Dünya ortalamasının üzerinde güneş enerjisi potansiyeli olduğunu göstermektedir [30]. Değerler karşılaştırıldığında, güneş enerjisinin gelecek yıllar için ülkemizde yerli enerji kullanımının yaygınlaşması halinde önemli bir alternatif enerji kaynağı olarak karşımıza çıkması beklenmektedir.

### 2.2.1. Dünyada Güneş Enerjisi

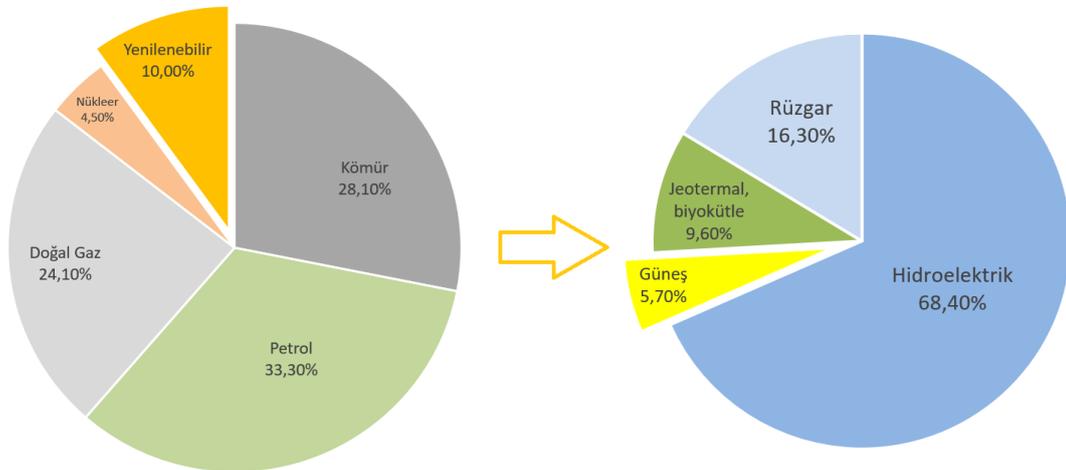
Petrol, doğal gaz, kömür gibi birincil enerji kaynaklarının sahip olduğu rezervler, endüstrinin enerji ihtiyacını karşılamak üzere sıklıkla kullanıldığından gün geçtikçe azalmaktadır. Bununla beraber elektrik enerjisine duyulan ihtiyaç, artan nüfus ve gelişen teknolojiye paralel olarak artmaktadır [31]. Sınırlı fosil kaynakları tüm dünya ülkelerini ilgilendiren kritik bir konudur. 2004 yılında dünyanın toplam elektrik enerjisi üretimi  $17.450 \text{ TWh}$  iken, artan nüfusun talebine cevap verebilmek için, 2030 yılında  $31.657 \text{ TWh}$  elektrik enerjisi üretiminin gerçekleşeceği tahmin edilmektedir. Süreç içinde artan bu talep binlerce yeni santralin tesis edilmesine neden olmuştur [32, 33]. Bu santrallerin tükettiği fosil yakıt

rezervlerindeki azalma ivmelenecek devam etmektedir. Şekil 2.3'te dünya genelinde gerçekleşmiş ve geleceğe dönük tahmin içeren fosil yakıt enerjisine ait tüketim değerleri verilmiştir. Bu veri açıkça göstermektedir ki, 2050 yılından itibaren fosil yakıt rezervlerinde ciddi bir kriz başlayacak ve bu kriz tırmanarak devam edecektir. Sonuç olarak 2300 yılından itibaren fosil yakıtlarını kullanmak mümkün olmayacaktır [34].



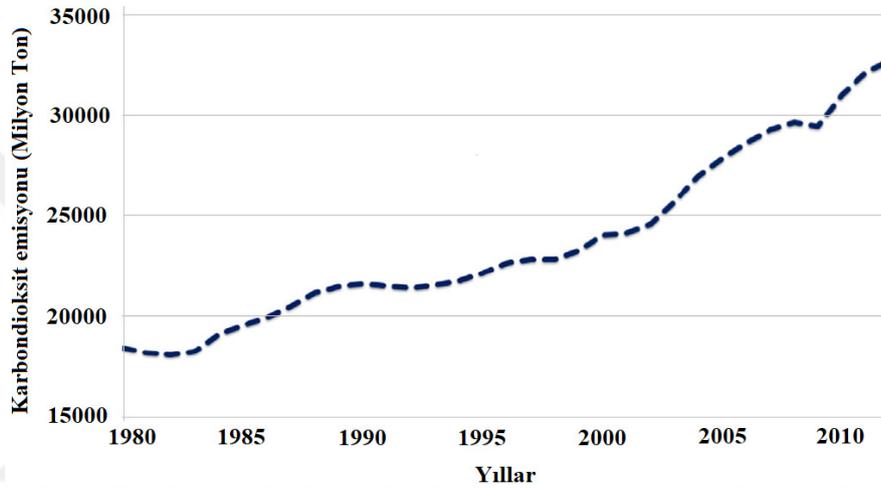
Şekil 2.3. Dünya fosil yakıt enerjisi tüketimi

Dünya enerji ihtiyacının karşılanması için birçok enerji türünden faydalanılmaktadır. Şekil 2.4'te 2016 yılına ait, dünya enerji üretim kaynakları verilmiştir [35]. Bu verilere göre, enerji ihtiyacının %85,5'i fosil yakıtlarının kullanılmasıyla karşılanmaktadır. Dünya genelinde yenilenebilir kaynakların kullanılmasıyla elektrik enerjisi üretimi %10 iken, bu üretimin sadece %5,7'i güneş enerjisi kökenlidir.



Şekil 2.4. Küresel elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı, 2016

Şekil 2.4'e göre, Dünya elektrik üretiminin sadece %0,57'si güneş enerjisinden elde edilmektedir. Bu da göstermektedir ki, PV teknolojisinin gelişmesine, birçok ülke tarafından PV panellerin üretilmesine ve kullanılmasına rağmen, enerji üretimi açısından büyük bir boşluk bulunmaktadır [36]. Fosil yakıtlarıyla yapılan tüm üretim işlemleri, atmosferi karbondioksit (CO<sub>2</sub>) ve diğer sera etkisi yapan emisyonlarla kirleterek, canlıların yaşamını tehdit etmeye devam etmektedir. Şekil 2.5'te elektrik enerjisi üretimi esnasında atmosfere salınan CO<sub>2</sub> miktarının yıllara göre değişimi verilmiştir [37].



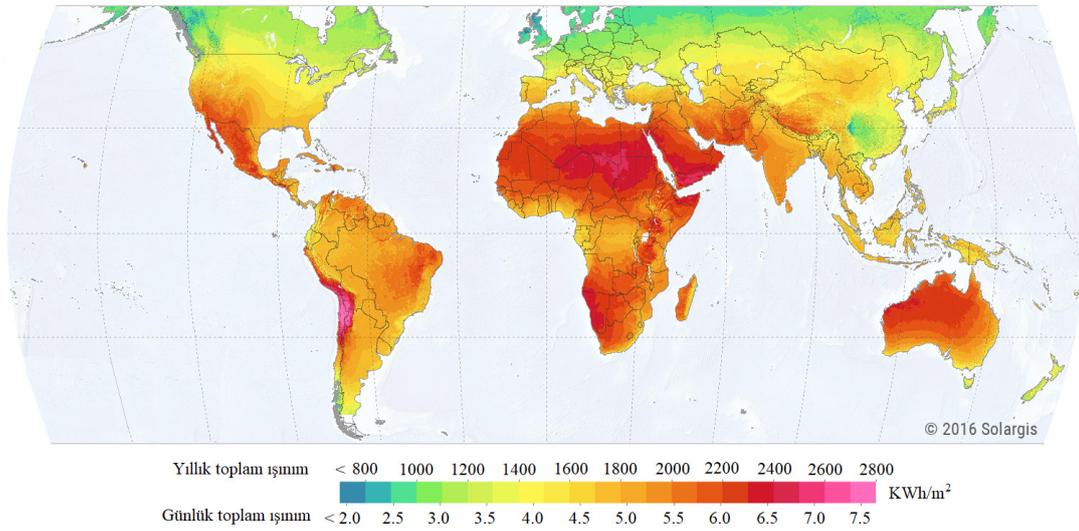
Şekil 2.5. Enerji tüketimi kaynaklı karbondioksit salınımı

Şekil 2.5'te Dünya genelinde elektrik enerjisi üretilirken kullanılan fosil kökenli yakıtların atmosfere saldığı CO<sub>2</sub> gazı miktarının yıllara göre hızla arttığı görülmektedir. Sadece 2012 yılında atmosfere salınan CO<sub>2</sub> gazı miktarı 32.723 milyon tondur. Bu salınımlar atmosferin ortalama sıcaklığını arttırarak, buzulların erimesine, deniz seviyelerinin yükselmesine ve benzeri çevre sorunlarına yol açmaktadır.

Fosil yakıtlarının azalmakla ve nihayetinde tükenmekle karşı karşıya kalmasıyla beraber doğacak enerji krizini önlemenin en etkili yollarından biri, yenilenebilir enerji kaynaklarını doğru tanımak ve onları olabildiğince enerji üretimine dâhil etmektir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olarak güneş enerjisi, çevreyi kirletmeyen ve yakıt kullanmayan bir teknoloji olarak yukarıda sayılan sorunları çözmeyi vaat etmektedir [38].

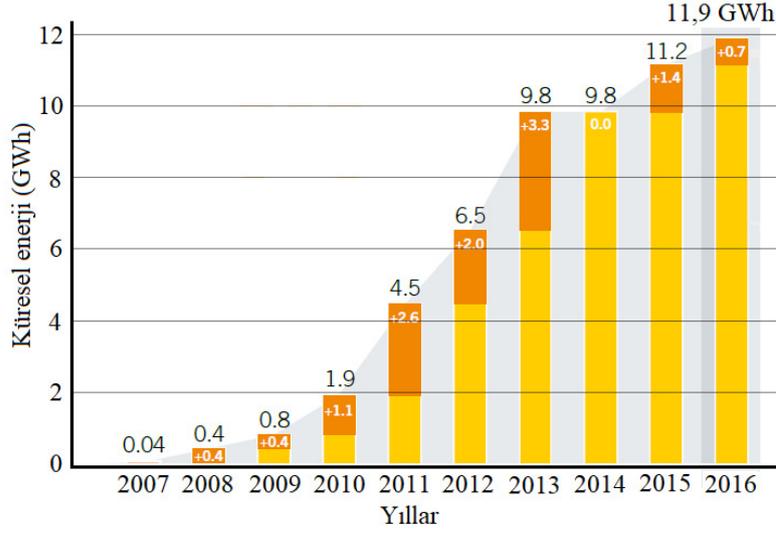
Büyük bir enerji potansiyeline sahip olan güneşten, yeryüzüne ulaşan bölgesel ışınım miktarı, ilgili bölgenin başta coğrafi konumları olmak üzere atmosferik değişkenlerine göre değişmektedir. Bölgelerin coğrafi konumlarına göre sahip oldukları yağış ve rüzgâr

rejimleri, havadaki toz miktarı, rakım, iklimsel sıcaklık değerleri gibi değişkenler, güneşten ilgili bölgeye doğrudan veya yayılım yoluyla erişen ışınım miktarını değiştirmektedir. Ancak, uzun yıllar boyunca yapılan meteorolojik ölçümler yerkürede bulunan tüm toprak parçalarına düşen ışınım miktarı ortalama bir değer olarak bilinmektedir. Şekil 2.6'da yeryüzüne ulaşan ışınım miktarını gösteren küresel ışınım bandı verilmiştir [39]. Haritaya göre, güneş enerjisinden iyi düzeyde faydalanabilmek için, güneş enerjisini dönüştürecek sistemlerin, "güneş kuşağı" adı verilen 40° Kuzey ve 40° Güney enlemleri arasında tesis edilmesi gerekmektedir [40].



Şekil 2.6. Küresel ışınım bandı

Güneş enerjisi, daha çok endüstriyel ve evsel ısıtma, soğutma ve sıcak su elde etmek için kullanılmaktadır. Sıcak suya duyulan yoğun ihtiyaç nedeniyle, dünya genelinde daha çok sıcak su elde etmek amacıyla yaygınlık kazanmıştır. Yaşam alanlarının ısıtılması amacıyla kullanım, ısı depolama sistemlerindeki teknik ve ekonomik zorluklar nedeniyle yaygınlık kazanmamıştır. Soğutma amacıyla kullanım ise, yüksek enerji gerektirdiğinden, güneşlenme zamanı ve miktarının çok yüksek olduğu bölgelerde mümkün olabilmektedir. Isıtma amacıyla kullanım, ısıyı depolama tekniklerinin gelişimiyle daha verimli kullanılabilir hale gelecektir. Güneş'ten yerküreye gelen ışınımın cisimler üzerinde soğurulması esasına dayanan ısı uygulamaları sayesinde elektrik enerjisi elde edilebilmektedir. Şekil 2.7'de, dünya genelinde güneşin ısı enerjisi kullanılarak elektrik enerjisi üreten uygulamalara ilişkin enerjinin yıllara göre değişimi verilmiştir [41].

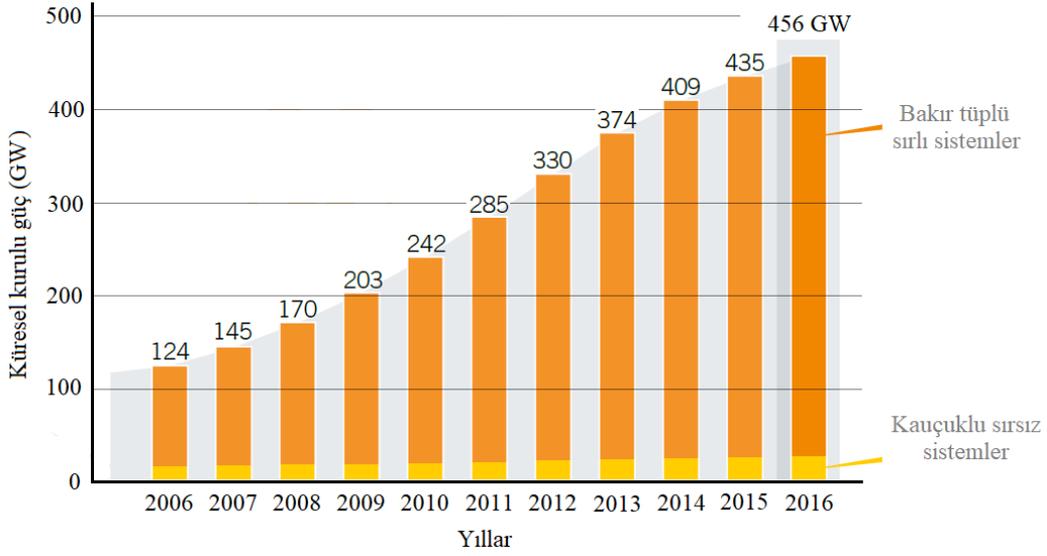


**Şekil 2.7.** Isıl uygulamalarla güneşten elektrik enerjisi üretimi

Şekil 2.7’de görüldüğü gibi, güneşin yerküreye yaydığı ışınım enerjisinin aynalar ile bir kule üzerinde bulunan su kütlesi üzerinde yoğunlaştırılarak, türbinleri tahrik edecek kızgın buhar elde edilmesine dayanan bu yöntemin, dünya genelinde sahip olduğu kurulu güç ve bu gücün yıllara göre artışı çok büyük değildir. Bunun nedeni, görece yüksek tesis ve işletme maliyetlerinin yanı sıra, hali hazırda güneşin ısı enerjisinden sıcak su elde etmeye yarayan güneş kolektörlerinin daha çok rağbet görmesidir.

Güneş enerjisinden yararlanmak için kullanılan ısıl uygulamalar, elektrik üreten yöntemlerden daha çok, düzlemsel kolektörlerde su ısıtılması, konut ve seraların ihtiyaç duyduğu ısı enerjisinin temini, endüstriyel faaliyetler için gerekli sıcak su ve buhar üretimi gibi alanlarda kullanılmaktadır. Geniş bir alana düşen güneş ışınlarının parabolik aynalarla bir noktada odaklanması sonucu yoğunlaştırılan sıcaklıklarla metal eritme tekniğini kullanan uygulamalar da vardır. Ancak bu sistemler, ışınımı belli bir değerin üzerinde tutabilmek için güneş izleyici mekanizmalara ihtiyaç duyduğundan fazla kullanılmamaktadır. Şekil 2.8’de, güneşin ısı enerjisini kullanarak endüstriyel ve evsel sıcak su elde etmeye yarayan sistemlerin dünya genelindeki kurulu gücünün yıllara göre değişimi gösterilmiştir [42].

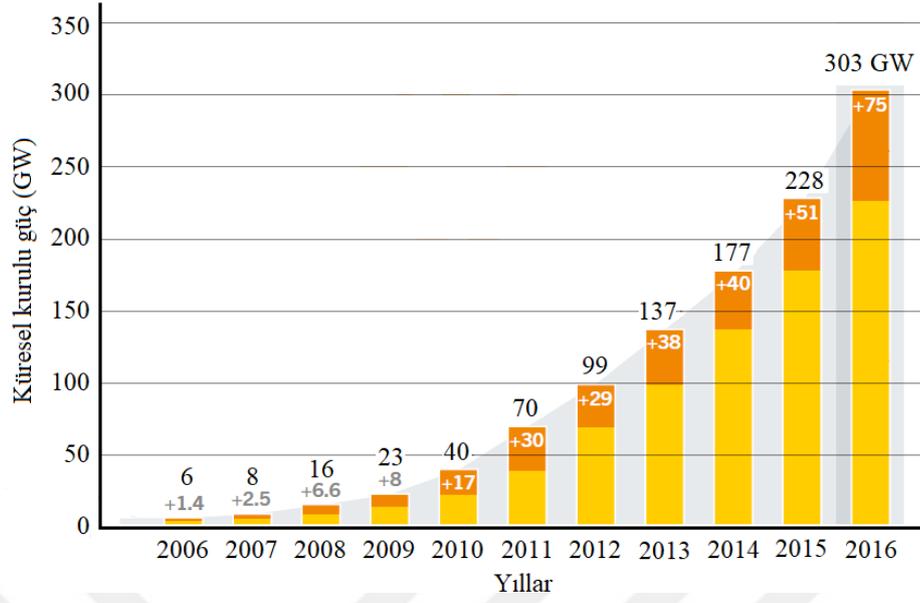
Şekil 2.8’den anlaşılacağı üzere, güneşten doğrudan ısı enerjisi elde etmek için kullanılan sistemler, dünya genelinde büyük bir kurulu güce sahiptir ve verimlerinin yüksek olması, düşük tesis ve işletme maliyetine sahip olmalarından dolayı endüstriyel ve evsel kullanımlarda enerji ihtiyacını karşılamak üzere kurulu güçleri düzenli bir şekilde artmaktadır.



**Şekil 2.8.** Güneşten direkt ısı enerjisi üretimine ait küresel kurulu güç

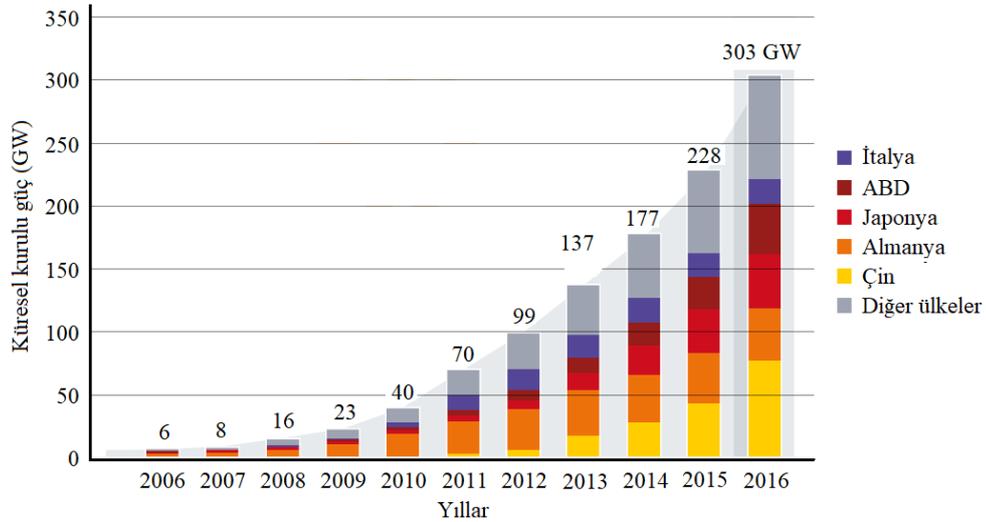
Güneş enerjisini diğer enerji formlarına dönüştüren yöntemlerinden biri de PV uygulamalarıdır. Güneş pillerini kullanan PV sistemler, güneşten gelen ışınımı doğrudan elektrik enerjisine dönüştürmektedirler. Üretilen elektrik enerjisi doğru akım formunda olup, doğru akımla çalışan sistemleri doğrudan besleyebildiği gibi inverter ile alternatif akıma dönüştürülüp kullanılması da mümkündür. Dünya'nın sahip olduğu güneş enerjisi potansiyelinin çok büyük olması ve en temiz enerji üretim yöntemlerinden biri olması, PV sistemlerle elektrik enerjisi üretimini dünya genelinde odak noktası haline getirmiştir. Şekil 2.9'da, PV sistemlerle elektrik üretimine ilişkin küresel kurulu güç verilmiştir [43].

Sadece 2016 yılı boyunca, dünya çapında yaklaşık 75 GW güç üretebilen PV sistem tesis edilmiştir. Bu büyük güç üretimi, saatte ortalama 31.000'den fazla güneş panelinin kurulmasını gerektirmektedir. 2016 yılında tesis edilen PV sistem kurulu gücü, önceki 5 yıldaki artışın toplamından daha büyüktür. 2016 yılının sonuna kadar tesis edilen PV sistemlerle beraber, küresel kurulu güç 303 GW değerine ulaşmıştır. Son dört yıl boyunca uzak doğu ülkeleri, toplam küresel artışın üçte ikisini gerçekleştirerek diğer tüm ülkeleri gölgede bırakmıştır. Çin, ABD, Japonya, Hindistan ve Birleşik Krallık'ta tesis edilen PV sistemler 2016 yılındaki ciddi artışın %85'ini oluşturmaktadır. Bunun yanında kümülatif kapasite açısından en iyi ülkeler sırasıyla, Çin, Japonya, Almanya, ABD ve İtalya'dır.



Şekil 2.9. Fotovoltaik sistemlerle elektrik üretimine ait küresel kurulu güç

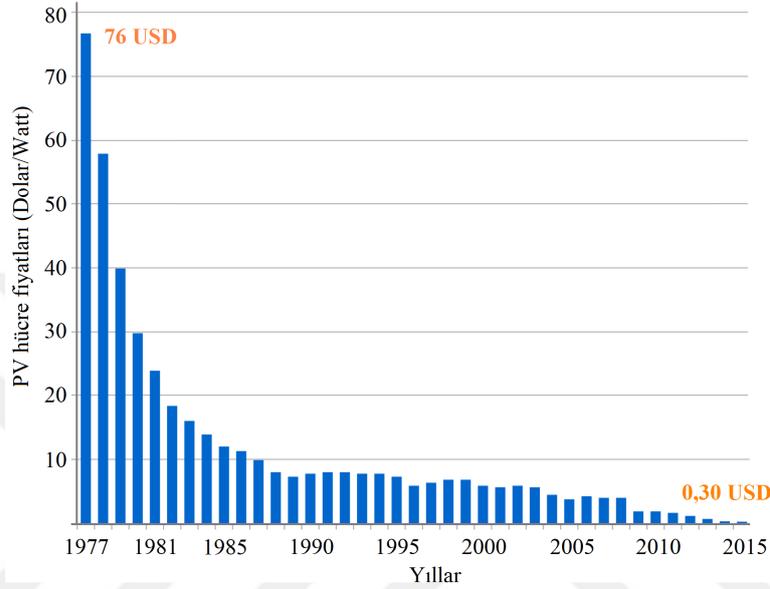
Konut başına düşen güneş enerjisi kapasitesi bakımından en iyi ülkeler sırasıyla, Almanya, Japonya, İtalya, Belçika ve Avustralya'dır. Çin, PV panel üretimi ve kullanımında lider olmaya devam ederken, tüm kıtalarda gelişmekte olan PV pazarı, küresel kurulu gücün artmasına katkı sağlamaya başlamıştır [41]. Şekil 2.10'da, PV'lerle elektrik enerjisi üretimine ait küresel kurulu gücün ülkelere ve yıllara göre değişimi verilmiştir [43].



Şekil 2.10. Fotovoltaik kapasitenin ülkelere ve yıllara göre artışı

Fotovoltaikler sayesinde güneş enerjisinden doğrudan elektrik enerjisi üretiminin dünya genelinde rağbet görmeye başlamasının en önemli nedenlerinden biri, PV hücre üretim

maliyetlerindeki düşüştür. Geçmişte güneş pillerinin üretimi çok zor ve sınırlı iken birçok araştırmacının katkısıyla geliştirilen teknikler sayesinde hem hücre verimlilikleri artırılmış hem de fiyatlarda düşme sağlanmıştır. Şekil 2.11’de üretimde sıklıkla kullanılan silikon esaslı PV hücre fiyatlarının yıllara göre değişimi verilmiştir [36].



Şekil 2.11. Silikon fotovoltaik hücrelerin fiyat geçmişi

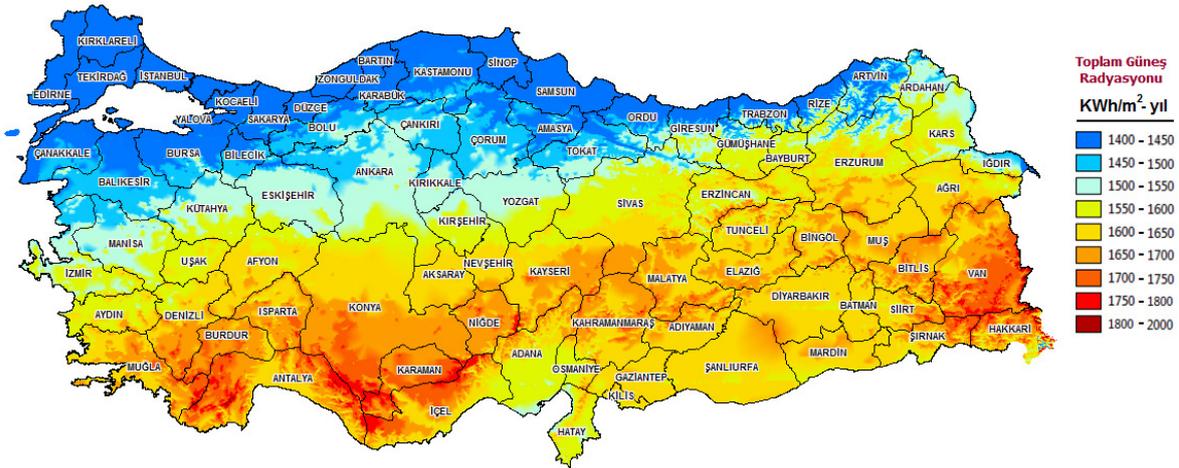
1977 yılında, silikon esaslı PV hücrelerin fiyatı watt başına 76 USD iken, PV alanındaki yeni üretim teknikleri ve PV pazarının dünya çapında gelişmesinin sağladığı rekabet, 2015 yılı sonlarında fiyatların watt başına 0,30 USD’lere kadar inmesini sağlamıştır.

Fotovoltaikler ile elektrik enerjisi üretimi, tüm bu hızlı gelişmelere rağmen, küresel enerji üretiminin sadece %0,57’sini oluşturmaktadır. Çevre dostu olması noktasında, mevcut enerji üretme yöntemleriyle kıyaslanamayacak kadar temiz bir yöntem olmasına rağmen, yüksek güneş enerjisi potansiyeline sahip dünyanın birçok önde gelen ülkesi, güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretimine yeterli ilgi göstermemektedir. PV’lerin yaygınlaşması için, temiz enerji üretimi noktasında küresel bilincin oluşturulması yetmemektedir. Dünya devletlerinin, PV’lerin üretimine ve dağıtımına yatırım yapmak isteyen müteşebbislerin güvenini sağlamak üzere teşvik edici politikalar üretmelidir. Bununla beraber, PV alanında araştırmaların artırılmasının yanında uluslararası işbirliğinin geliştirilmesi de gerekmektedir. Güneş enerjisi kullanarak elektrik enerjisi üretme yönteminin hak ettiği düzeye erişebilmesi için, hükümetler ve sanayinin AR-GE çabalarını

arttırmaları ve aynı zamanda uzun vadeli yenilikleri benimseyen yatırımlar yapmaları gerekmektedir [44].

### 2.2.2. Türkiye’de Güneş Enerjisi

Dünya’nın küresel şeklinden dolayı, Güneş’ten gelen ışınım enerjisi, tüm kara parçaları üzerine farklı değerlerde enerji düşmesine yol açmaktadır. En büyük güneş enerjisi potansiyeline sahip bölgeler, 40° Kuzey ve 40° Güney enlemleri arasında kapsayan güneş kuşağı adı verilen aralıkta kalan bölgelerdir [40]. Türkiye, toprakları, 36°-42° Kuzey enlemleri ve 26°-45° Doğu meridyenleri arasında olan bir ülke olarak, yüksek güneş enerjisi potansiyeline sahip ülkeler arasında yer almaktadır. Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü (EİE), 1982 yılından günümüze kadar, yenilenebilir enerji kaynakları alanında faaliyetler yürütmekte ve yapılan araştırmalara ait bulguları paylaşmaktadır. Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü tarafından, 1966 yılından bu yana ülke genelinde kaydedilen ışınım şiddeti ve güneşlenme süreleri verileri, EİE’nin yaptığı çalışmalar neticesinde Türkiye’nin sahip olduğu güneş enerjisi potansiyelini gösterir bir harita haline getirilmiştir. Şekil 2.12’de, Türkiye’nin güneşlenme değerlerine göre çizilmiş potansiyel atlası verilmiştir [45].



Şekil 2.12. Türkiye güneş enerjisi potansiyel atlası

Güneş enerjisi potansiyel haritasına göre, Türkiye’de yıllık ortalama güneş ışınımı 1311 kWh/m<sup>2</sup> değerindedir. Yapılan ölçümlere göre ortalama yıllık güneşlenme süresi ise toplam 2640 saattir. Türkiye, günlük 7,2 ve yıllık 110 saat güneşlenme süresine sahip olarak bir

günde birim alan başına 3,6 kWh enerji üretme potansiyeline sahiptir. Coğrafi ve iklimsel engellerden doğan teknik ve ekonomik zorluklar göz önüne alındığında, Türkiye’de yılın 10 ayı boyunca ülke yüzölçümünün %63’ünden ve tüm yıl boyunca %17’sinden yararlanılabilmektedir [46, 47]. Türkiye’nin sahip olduğu güneş enerjisi potansiyeli ve güneşlenme süresi değerlerinin aylara göre dağılımı Tablo 2.1’de verilmiştir [47].

**Tablo 2.1.** Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyelinin aylara göre dağılımı

Aylar	Aylık Toplam Güneş Enerjisi		Güneşlenme süresi
	(kcal/cm <sup>2</sup> -ay)	(kWh/m <sup>2</sup> -ay)	(saat/ay)
Ocak	4,45	51,75	103
Şubat	5,44	63,27	115
Mart	8,31	96,65	165
Nisan	10,51	122,23	197
Mayıs	13,23	153,86	273
Haziran	14,51	168,75	325
Temmuz	15,08	175,38	365
Ağustos	13,62	158,4	343
Eylül	10,6	123,28	280
Ekim	7,73	89,9	214
Kasım	5,23	60,82	157
Aralık	4,03	46,87	103
Toplam	112,74	1311	2640
Ortalama	308,0 cal/cm <sup>2</sup> -gün	3,6 kWh/m <sup>2</sup> -gün	7,2 saat/gün

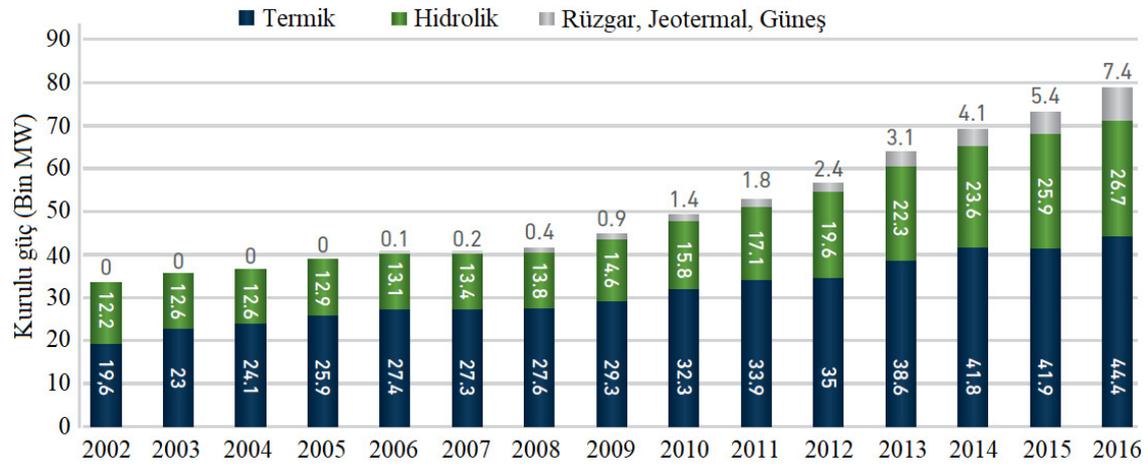
Türkiye’de güneş ışınımının yıllık ortalama en küçük ve en büyük değerleri sırası ile, 1120 kWh/m<sup>2</sup>-yıl ile Karadeniz Bölgesi’nde ve 1460 kWh/m<sup>2</sup>-yıl ile Güneydoğu Anadolu Bölgesi’nde gerçekleşmektedir. Bu ışınım şiddetleri ile Türkiye’nin, Güneydoğu ve Akdeniz bölgeleri içinde kalan ve yüzölçümünün %17’sini kapsayan bölümünde, güneşli su ısıtıcılarının yıl boyunca tam kapasiteli olarak çalıştıkları görülmektedir. Türkiye yüzölçümünün %63’ünü kapsayan bölümde ise güneşli su ısıtıcılarının yıl boyunca çalışma oranı %90 ve ülkenin %94’ünü kapsayan bir bölümdeki çalışma oranı ise %80’dir [48]. Tablo 2.2’de Türkiye’nin güneş enerjisi potansiyelinin bölgelere göre dağılımı görülmektedir [49].

**Tablo 2.2.** Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyelinin bölgelere göre dağılımı

Bölge	Toplam ortalama güneş enerjisi	En çok güneş enerjisi (Haziran)	En Az güneş enerjisi (Aralık)	Ortalama güneşlenme süresi	En çok güneşlenme süresi (Haziran)	En az güneşlenme süresi (Aralık)
	kWh/m <sup>2</sup> -yıl	kWh/m <sup>2</sup>	kWh/m <sup>2</sup>	saat/yıl	saat	saat
Güney Doğu Anadolu	1.460	1.980	729	2.993	407	126
Akdeniz	1.390	1.869	476	2.956	360	101
Doğu Anadolu	1.365	1.863	431	2.664	371	96
İç Anadolu	1.314	1.855	412	2.628	381	98
Ege	1.304	1.723	420	2.738	373	165
Marmara	1.168	1.529	345	2.409	351	87
Karadeniz	1.120	1.315	409	1.971	273	82

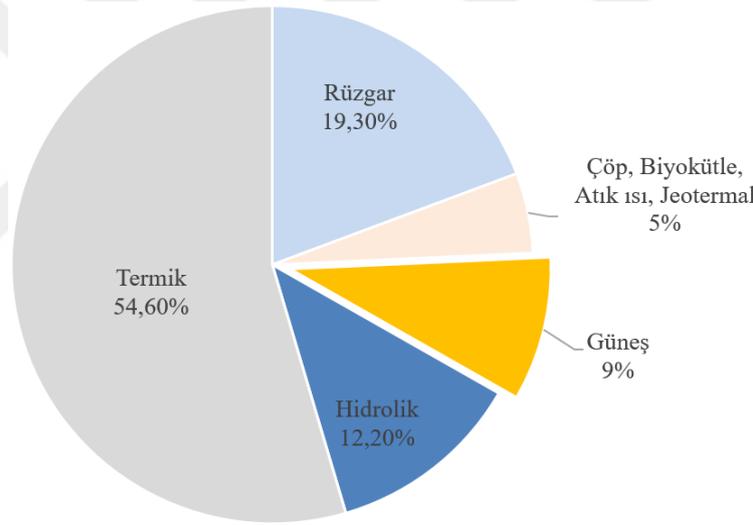
Türkiye'nin birçok bölgesinde, sahip olduğu güneş enerjisi potansiyeli sayesinde, endüstriyel ve evsel amaçlı sıcak su elde etmede kullanılan güneş kolektörleri, yılın %70'ini kapsayan bir sürede tam kapasite ile kullanılabilirdiğinden, özellikle Güney ve Ege kıyıları başta olmak üzere, bütün bölgelerde yaygınlık kazanmaktadır. Türkiye'de güneş kolektörü yıllık üretim hacmi 750.000 ila 1.000.000 m<sup>2</sup> arasında değişmektedir. Yerli üretim, tüm ihtiyacı karşılayamadığından bir kısmı ihraç edilmektedir [50].

Türkiye'nin elektrik enerjisi talebinin artış oranı, son 14 yılda, yıllık ortalama yüzde 5,5 olarak gerçekleşmiştir. 2016 yılında yaklaşık 5.899 MW kurulu gücünde lisanslı elektrik üretim santrali devreye alınmıştır. 2016 yılı sonu itibarıyla Türkiye'deki toplam kurulu güç değeri 78.497 MW'a ulaşmıştır. Şekil 2.13'te Türkiye'de elektrik enerjisi kurulu güç gelişimi verilmiştir [51].



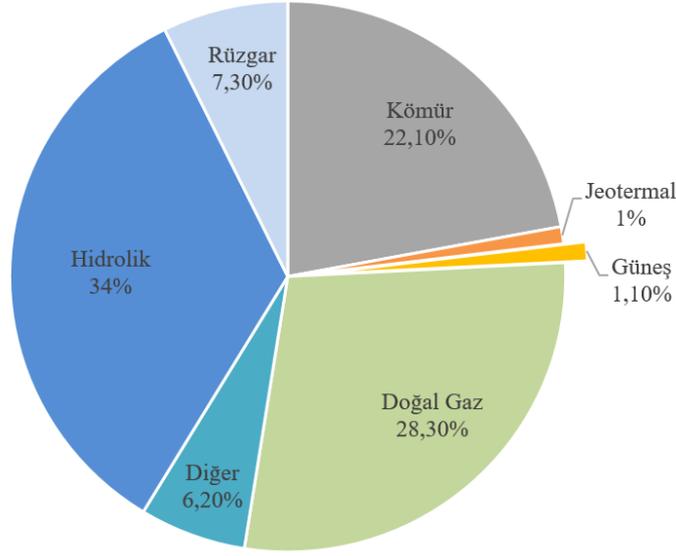
**Şekil 2.13.** Türkiye'de elektrik enerjisi kurulu güç gelişimi

Erişilen toplam kurulu gücün %44,4'ü termik, %26,7'si hidrolik ve %7,4'ü başta rüzgâr, jeotermal ve güneş enerjisi olmak üzere alternatif enerji kaynaklarından oluşmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarına sağlanan teşvikler neticesinde 2008 yılından itibaren özellikle hidrolik, rüzgâr, güneş ve jeotermal başta olmak üzere yenilenebilir enerji kaynaklarının kurulu güç içindeki payı son yıllarda artış göstermiştir. 2016 yılı sonu itibarıyla ülkemizin kurulu elektrik gücünün yaklaşık %34'ünü yenilenebilir enerji, %66'sını diğer kaynaklar oluşturmaktadır. Lisanslı üretimlerin yanı sıra, Türkiye genelinde 2016 yılı sonu itibarıyla 1.043 adedi güneş, 23 adedi rüzgâr, 20 adedi termik, 13 adedi biyokütle ve 3 adedi hidrolik santral olmak üzere toplam 917,63 MW kurulu gücünde 1.102 adet lisanssız santral işletme halindedir. Sadece 2016 yılında devreye giren lisanslı ve lisanssız santrallerin kaynak bazında dağılımı Şekil 2.14'te verilmiştir [51].



**Şekil 2.14.** Türkiye’de 2016 yılında devreye giren santrallerin kaynak bazında dağılımı

Türkiye’de, 2008 yılından itibaren yenilenebilir enerji kaynaklarıyla elektrik üretimine ait yatırımlar ve özel sektöre yönelik destek ve teşvikler sistematik olarak artmasına rağmen özellikle güneş enerjisiyle elektrik üretimi hak ettiği ilgiyi görememiştir. 2016 yılı içinde devreye alınan santrallere ilişkin kurulu gücün %9’u PV sistemlerle üretilmesine rağmen 2016 yılı sonu itibarıyla Türkiye’deki toplam elektrik enerjisi kurulu gücünün sadece %1,1’i güneş enerjisinden üretilmektedir. Şekil 2.15’te Türkiye’de 2016 yılı sonu itibarıyla kurulu gücün kaynak bazında dağılımı gösterilmiştir [51].



**Şekil 2.15.** Türkiye’de 2016 yılı sonu itibarıyla kurulu gücün kaynak bazında dağılımı

Türkiye, güneş enerjisi potansiyeli bakımından Almanya’dan %60 daha avantajlı bir coğrafyada bulunmaktadır. Sahip olduğu günlük ortalama 7,2 saat güneşlenme süresine rağmen 2015 yılını, Almanya’nın kurulu gücünün binde 6’sına erişen güç değerinde tamamlamıştır. Güneşten elektrik üretiminde, dünya genelinde kurulu güç, 2016 yılında devreye alınan santrallerin sağladığı en az 51 bin MW yeni kurulumla 303 GW’a ulaşmışken, Türkiye’de 249 MW kurulu güç değerine yeni ulaşılmıştır [52].

Türkiye’nin enerji üretiminde dışa bağımlı bir ülke olarak, enerji ihtiyacının yarıdan fazlasını dışarıdan ithal ettiği; ülkenin sahip olduğu fosil kökenli rezervlerin talebi karşılayacak düzeyde olmayıp, kullanılan linyit kömürünün düşük kalorili olması ve yüksek kükürt içermesi; artan enerji talebini karşılamak üzere ithal edilen kaynakların doğurduğu cari açığın ekonomiye verdiği zarar göz önüne alındığında, sahip olduğu yüksek potansiyel nedeniyle başta güneş enerjisi olmak üzere, diğer yerli ve temiz kaynakları kullanmanın önemi daha da anlaşılacaktır [53, 54].

Türkiye’de güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretimi hakkında çalışmalar uzun zamandır yürütülmesine rağmen, devlet kurumları arasındaki koordinasyon eksikliği, özel sektörün yeterince teşvik edilmemesi, toplumun güneş enerjisi hakkında yeterince bilinçlendirilmemesi gibi nedenlerden dolayı, bu alandaki finansal yatırımların tarihi çok yenidir. Ancak, Türk Standartları Enstitüsü’nün (TSE), güneş enerjisi ile ilgili standartları belirlemesinden sonra, bu alandaki ilk kanun 10.05.2005 tarihinde 5346 sayı ile "Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin

Kanun" adı ile çıkarılarak bu alandaki finansal yatırımlara resmi bir kimlik kazandırılmıştır [55]. Özellikle bu tarihten sonra, kamu kurum ve kuruluşlarında, üniversitelerde, konu ile ilgili kurulmuş vakıf ve derneklerde güneş enerjisinden etkin biçimde faydalanmak için çalışmalar sürdürülmektedir. Güneş enerjisi araştırma ve geliştirme konularında, EİE'nin yanında, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) Marmara Araştırma Merkezi ve üniversiteler çalışmalar yapmakta olup bazı üniversiteler ve enstitüler güneş pilleri ile çalışan arabalar tasarlamaktadır [56].



### 3. FOTOVOLTAİK HÜCRELER

#### 3.1. Fotovoltaik Teknolojisi

Fotovoltaikler, güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretimi alanında günümüzdeki en yaygın teknolojidir. Silisyum, germanyum, selenyum, bakır, arsenik, tellür gibi elementlerin saf veya oluşturdukları bileşiklerle üretilen PV hücreler, üzerlerine gelen güneş ışınlarını elektrik enerjisine dönüştürürler. Ürettikleri elektrik enerjisi doğru akım formunda olup, değeri, maruz kaldıkları ışınım miktarıyla orantılıdır. Bir PV hücre, yüksek değerde bir ışınım maruz kalması halinde bile görece düşük bir elektrik enerjisi üretebilir. Bu şekilde üretilen enerji ile ancak hesap makinası, saat gibi düşük enerjiyle çalışan elektronik cihazlar çalıştırılabilmektedir. Büyük miktarda güçler üretebilmek için, PV hücreler bir araya gelerek modülleri, modüller bir araya gelerek panelleri, paneller bir araya gelerek dizileri meydana getirerek, istenilen akım, gerilim ve güç değerlerinde PV sistemler oluşturulur [57].

Fotovoltaik panel üretiminde genel olarak, kristalize silikon, ince film ve bileşik tipindeki özel malzemeler kullanılıyor olsa da, son 30 yıl içinde, fiyat/verim endeksi avantajı nedeniyle en çok tercih edilen panel malzemesi silisyum esaslı kristalize panellerdir. Verimleri düşük olsa da, uygulama açısından sağladığı kolaylıklar ve fiyat avantajı nedeniyle son yıllarda "ince film" teknolojisi barındıran panellerin kullanımı da yaygınlaşmaya başlamıştır. Dünya genelinde artan hücre üretim pazarının sağladığı rekabet sayesinde, PV teknolojisi ile elektrik üretimi artan bir ivmeyle yaygınlaşmaktadır [58, 59].

Hücrelerin ürettiği enerji miktarını en çok etkileyen faktör güneşten gelen ışınım miktarı olup, bu enerjinin değişimi lineer değildir. Panellerin ürettiği güç değeri ile bu panellerden talep edilecek gücün miktarı arasında bir uyumun olması, bu sistemlerin daha verimli kullanılmasını sağlamaktadır. Bu yüzden PV panel üreticileri, ürettikleri panellere ait I-V karakteristiklerini sunmak durumundadırlar. Güç elektroniği elemanları ile gerçekleştirilen MPPT devreleriyle, PV sistemlerin daha verimli kullanılmasını sağlamak üzere, farklı ışınım değerlerinde optimum güç talebi gerçekleştirilmektedir [60, 61].

Fotovoltaiklerden elde edilebilecek elektrik enerjisi, üzerlerine aldıkları ışınım miktarına bağlı olduğundan, panel verimliliklerini arttırmak üzere, güneş izleyici sistemlerle bir arada kullanılabilir. Ürettikleri gücü en çok etkileyen değişken ışınım miktarı iken, yarı iletken yapıları nedeniyle buldukları bölgelerdeki sıcaklık, rüzgâr, nem, açık hava basıncı

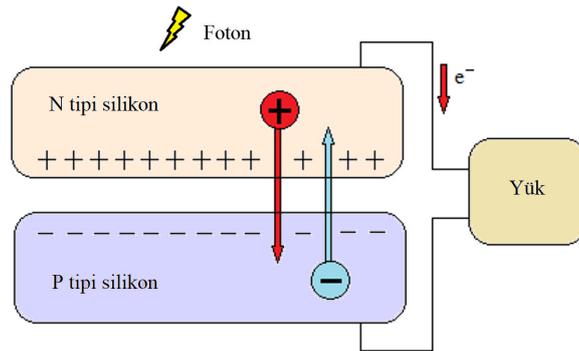
gibi atmosferik ve iklimsel değişkenler de ürettikleri enerji miktarı üzerinde etkilidir. Bu faktörler iyi analiz edilmediğinde, PV sistemler ekonomik olmaktan uzaklaşabilir [62-64].

Fotovoltaik teknolojisiyle elektrik üretimi, genel olarak şebekeye bağlı (On-Grid) ve şebekeden bağımsız (Off-Grid) şeklinde projelendirilirler. Her iki yaklaşımda da, sistemin çalışması için, şarj regülatörleri, inverter, enerji depolama birimleri vb. ekipmanlara ihtiyaç duyulmaktadır. Toplam sistem veriminin artırılması için bu ekipmanların verimlerinin iyileştirilmesi için de çalışmalar sürdürülmektedir [65-67].

### 3.2. Güneş Pillerinin Yapısı

PV hücreleri, elektrik akımı oluşturmak üzere, üzerine düşen fotonlar aracılığıyla, elektronları harekete geçirebilen ışığa duyarlı yarı iletken malzemelerden üretilirler. Fotovoltaik kelimesi Latince de ışık anlamında kullanılan "photo" ve elektriksel bir büyüklük olan gerilimin birimi "volta" kelimelerinden türemiştir [30].

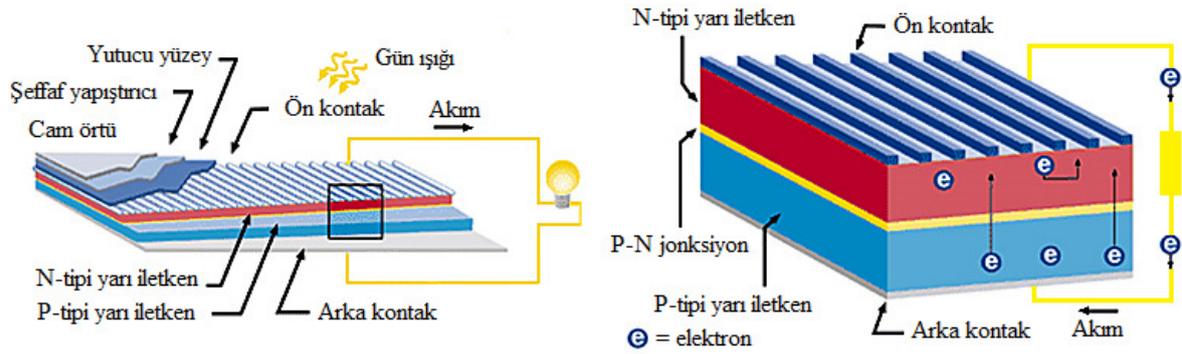
Güneşten gelen ışınım enerjisinin bir fotonu bir silikon atomu tarafından soğurulduğunda bir elektron-çifti boşluğu oluşturulur ve elektron serbest oyukları izleyerek malzeme içinde hareket etme eğilimi gösterir. Buradaki enerjinin, elektronun akışına imkân verecek bir yükü beslemesi durumunda elektrik akımı meydana gelmektedir. Bu prensip üzerine geliştirilen PV hücrelerin çalışma ilkesi Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. PV hücrenin çalışma ilkesi

Daire, kare veya dikdörtgen şeklinde yüzeylere sahip olarak üretilebilmekte olan güneş pillerinin kalınlıkları 0,2 ila 0,4 mm arasında değişebiliyorken yüzey alanları ise 100 cm<sup>2</sup> civarındadır [68, 69].

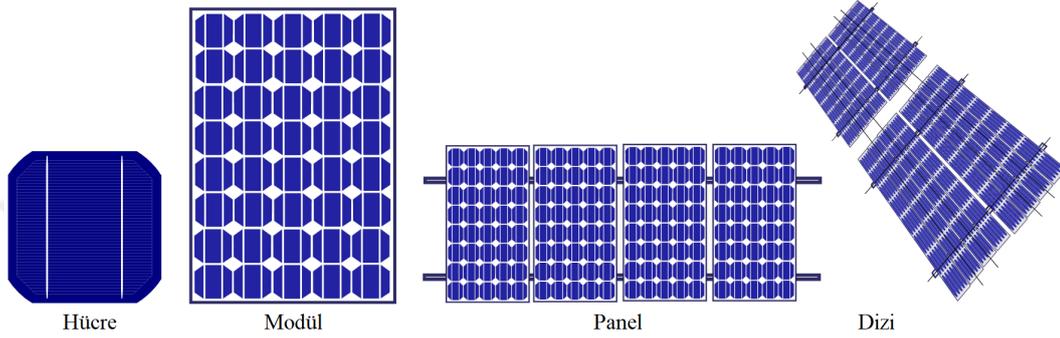
Fotoelektrik etki prensibi üzerine geliştirilen güneş pilleri, valans yörüngesinde 4 elektron bulunan, silisyum, germanyum gibi normal şartlarda yalıtkanlık gösterirken dışardan bir enerji alması halinde iletkenlik gösteren yarı iletken malzemelerden üretilirler. Güneş pilleri, triyak, diyak, transistör, tristör gibi yarı iletkenlerden farklı olarak görece büyük bir P-N jonksiyon ara kesitine sahiptirler [6, 70]. Silikon esaslı tek kristalli bir güneş hücresinin yapısı Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2. Güneş pilinin katmanları

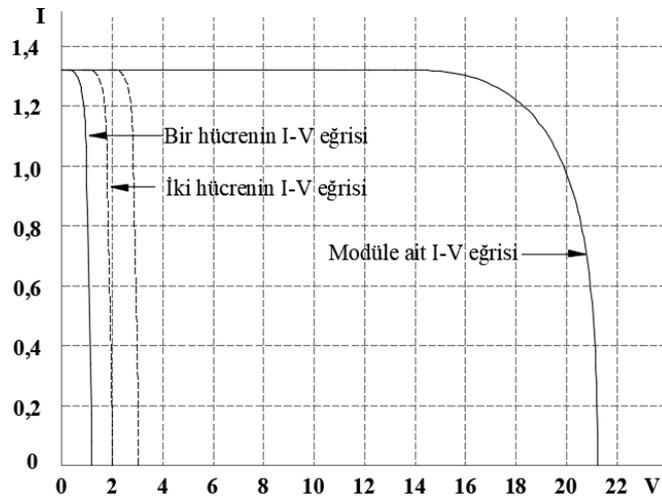
Şekil 3.2’de görüldüğü üzere, bir PV hücre anatomik olarak, farklı görevleri olan katmanların bir araya getirilmesinden oluşmaktadır. Üretim teknolojisinde kullanılan malzemeye göre farklı renklere sahip olabilen PV hücrelerinin ağırlığı 10 gram civarındadır. Bir PV hücrenin en üst yüzeyi, hücrenin iç katmanlarını mekanik darbelerle karşı koruyabilecek cam bir tabaka ile kaplanmıştır. Hücreye gelecek ışınımın yansımalarını önlemek ve yutulmuş enerjiyi optimize etmek üzere kullanılan yutucu yüzey ile cam yüzey arasında "etilen vinil asetat" içerikli, şeffaf bir yapıştırıcı bulunmaktadır. Bu birleşimin hemen altında negatif ve pozitif yarı iletken jonksiyonu bulunmaktadır. N-katmanı, fosfor atomları eklenmiş silisyumdan oluşan ve pilin negatif tarafını oluşturan katmandır. P-katmanı ise, bor atomları eklenmiş silisyumdan oluşmuş, pilin pozitif tarafıdır. Jonksiyon kesitinde meydana gelen elektronların akışını sağlamak üzere, pozitif ve negatif yarı iletken malzemelerin dış kısmında ön ve arka kontaklar kullanılmaktadır. Hücrenin en alt kısmında çekme ve basınç dayanımı yüksek "polivinil florür" esaslı bir tabaka kullanılmaktadır. Polivinil florür tabaka ile pozitif yarı iletken tabaka, "etilen vinil asetat" ile yapıştırılarak bir PV hücrenin genel anatomisi oluşturulmuş olur. Koruyucu cam katman hariç, tüm bu katmanların oluşturduğu kalınlık değeri yaklaşık 200  $\mu\text{m}$  civarındadır.

Güneş pilleri uygulamada, deneysel çalışmalar istisna tutulursa tekil olarak kullanılmazlar. Çünkü tipik bir silikon PV hücre yaklaşık 0,5 V kadar gerilim üretebilirken, bu hücreden elde edilebilecek güç, 1 dm çapındaki bir yapı için yaklaşık 1 Watt'tır. Bundan dolayı, hücreler birbirine seri bağlanarak elde edilen gerilim ve paralel bağlanarak sağlanabilecek akım arttırılmak üzere, PV modüller oluşturulur. Şekil 3.3'te PV gruplar gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Fotovoltaik gruplar

PV modüller, sinyalizasyon, veri kayıt cihazları gibi düşük gerilim ve güç gerektiren uygulamalarda doğrudan kullanılabilir. Ancak daha büyük elektrik enerjisi gerektiren uygulamalarda, modüllerin bir araya getirilmesiyle oluşturulan PV paneller kullanılmaktadır. Özellikle PV santrallerinde büyük değerlerde elektrik enerjisi üretmede, çok sayıda panelin bir araya getirilmesiyle meydana gelen PV dizileri kullanılmaktadır [69, 71, 72]. Şekil 3.4'te bir hücrenin ve bir modülün Akım-Gerilim (I-V) eğrileri verilmiştir.

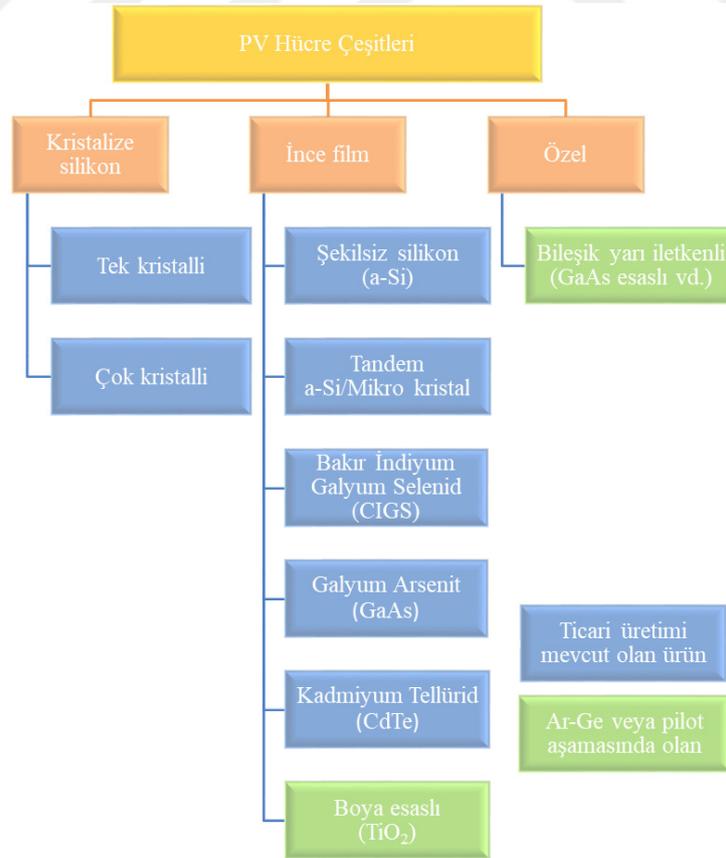


Şekil 3.4. PV hücre ve modüle ait I-V eğrileri

PV'ler, bağ ve bant modellerine göre yarı iletken malzemelerden imal edildikleri için, çalışma karakteristikleri doğrusal değildir ve üretim teknolojilerine göre değişiklik göstermektedirler. Hücre üretici firmalar, ürettikleri ürünlere ait I-V karakteristiklerini sunmak durumundadırlar. Şekil 3.4 incelendiğinde, yaklaşık 0,5 V gerilim üretebilen kristalize silikon hücrelerin seri bağlanmasıyla görece yüksek gerilimli modüllerin oluşturulabildiği görülmektedir [73].

### 3.3. Fotovoltaik Hücre Çeşitleri

Dünya genelinde, PV hücrelerinin üretimi için kullanılan teknolojiler iki farklı kategoride toplanmaktadır. Bunlardan biri kristalize silikon teknolojisi iken, diğeri son yıllarda yaygınlaşmaya başlayan ince film teknolojisidir. Kristalize silikon teknolojisi, sahip olduğu yüksek enerji dönüştürme verimliliği, görece düşük üretim maliyeti nedeniyle küresel üretimin çoğunluğunu oluşturmaktadır. Şekil 3.5, küresel pazarlarda mevcut olan veya geliştirilme sürecinde olan PV hücre üretim teknolojilerine genel bir bakış sunmaktadır.



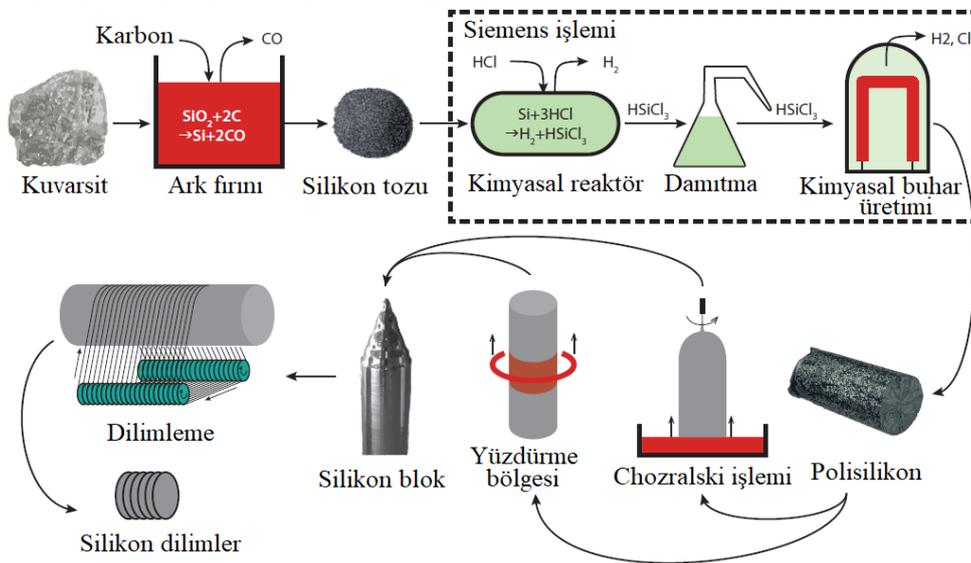
Şekil 3.5. PV hücre üretim teknolojileri

### 3.3.1. Kristalize Silikon Fotovoltaik Hücreler

#### 3.3.1.1. Tek Kristalli Silikon Fotovoltaik Hücreler

Silikon, yerkürede oksijenden sonra en bol bulunan ikinci element olup çoğunlukla, doğada silisyum dioksit ( $\text{SiO}_2$ ) ve silikatlar (silikon ihtiva eden, oksijen, çeşitli metal bileşikleri) olarak bulunur. Kum ve kuvars en yaygın formlarından ikisidir. Kum genellikle silikon haline getirilecek kadar saf değildir, ancak yüksek dereceli kuvarsit yatakları yaklaşık %99 saf silikat içerebilmektedir.

Doğada bulunan  $\text{SiO}_2$  ve diğer silikatların endüstriyel uygulamalarda kullanılabilmesi için %98 ila %99 oranında çok kristalli silikona dönüştürülmesi gerekmektedir. Ancak çok kristalli silikon PV uygulamaları için elverişsizdir. Bundan dolayı çok kristalli yapıya dönüştürülmüş silikon malzemesi, tek kristalli yapıya dönüştürülmek üzere en yaygın kullanılan yöntem olan Czochralski saflaştırma işlemine tabi tutulmaktadır [74]. Şekil 3.6'da, doğada bulunan kuvarsitlerin tek kristalli silikon dilimlerine dönüştürülmesi için gerekli üretim aşamaları blok diyagramı olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Tek kristalli silikon dilimlerinin üretimi

Çok kristalli silikonun saflaştırılmak üzere, yaygın yöntemlerden biri olan Czochralski saflaştırma işlemine tabi tutulması, bu hücrelerin maliyetlerinin görece yüksek olmasına neden olmaktadır. Ancak, laboratuvar şartlarında erişilen %24 ve ticari uygulamalarda

erişilen %15 ila %20 arasındaki yüksek enerji dönüştürme oranları, tek kristalli PV hücrelerin mevcut hücre üretim teknolojileri arasında en popüler olmasını sağlamaktadır. Şekil 3.7’de tek kristalli bir PV hücre gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Tek kristalli bir PV hücre

Tek kristalli PV hücrenin yapısı, yutulumu sağlayan katmanın yapısına göre değişmekle beraber, tek renkli ve koyu bir görünüme sahiptir.

PV paneller, ebatları genellikle 100x100, 125x125, 156x156 mm ölçülerinde standardize edilmiş hücrelerin seri ve paralel bağlanmasıyla oluşturulmaktadır. PV panelin sahip olduğu güç ve gerilim değerine göre, 36, 54, 60 veya 72 hücre içerebilmektedir. Bir panel, gerilimi genellikle 12 V ve 24 V DC olacak şekilde üretilmektedir. Ancak, PV hücrelerin gerilim değerleri, üzerlerine düşen ışınım miktarı ile orantılı olduğundan, paneller sabit bir gerilim üretmezler. 12 V’luk paneller standart test koşullarında, anma yüklerinde genellikle 17 V gerilim üretmekteyken yüksüz durumda 22 V gerilim üretebilmektedirler. 24 V’luk paneller ise, yine standart test koşullarında, anma yüklerinde 33 V gerilim üretmekteyken, yüksüz durumda yaklaşık 44 V gerilim üretmektedirler. Özellikle şebekeye bağlı sistemlerde kullanılacak DA-AA gerilim dönüştürücülerinin çalışma gerilimi aralığına göre, panellerin gerilimlerinin artırılması gerekmektedir. Bunu gerçekleştirmek için seri ve paralel bağlantılar yapılır. Ancak bu işlem yapılırken panellerin maksimum çalışma gerilimleri dikkate alınmalıdır.

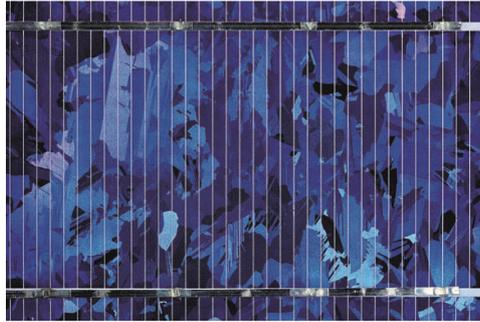
Fotovoltaik sistemler genellikle çatı, arsa, arazi vb. doğa koşullarıyla yüz yüze olan mekânlarda konumlandırıldığından, PV paneller, rüzgâr, dolu, kar vb. etmenlere karşı gerekli mukavemeti sağlamak üzere, korozyona dayanıklı anodize alüminyum çerçeveli olarak üretilmektedirler. Bu özellik aynı zamanda montaj kolaylığı da sağlamaktadır. Farklı

verimlilik faktörleriyle de olsa, -40 °C ve +85 °C sıcaklık değerleri arasında enerji üretebilen paneller, güneş ışınımıyla gelen UV ışınlarına karşı korunaklı olarak üretilmektedirler.

Bir PV panelin küresel pazarlarda geçerliliğinin olabilmesi için IEC 61215 sertifikasında belirtilen niteliklere sahip olması gerekmektedir. Bu sertifikada yer alan önemli niteliklerden biri, üretilen panellerin verimlilik testlerine tabi tutulması ve test sonuçlarının bir etiket olarak panellerle birlikte sunulması zorunluluğudur. Standart koşullarda (STC) gerçekleştirilen bu test, PV panelin 1000 W/m<sup>2</sup> ışınım, 1,5 AM hava kütlesi, 25 °C hava sıcaklığı şartlarında; ürettiği maksimum güç ( $P_{max}$ ), açık devre gerilimi ( $V_{oc}$ ), maksimum gücün elde edildiği gerilim ( $V_{pm}$ ), kısa devre akımı ( $I_{sc}$ ) ve panellerin dizi haline getirilmesiyle oluşturulabilecek maksimum dizi gerilimi vb. değerler, tolerans değeriyle beraber sunulmak zorundadır [75].

### 3.3.1.2. Çok Kristalli Silikon Fotovoltaik Hücreler

Çok kristalli silikon, doğada bulunan kuvarsitlerin tek kristalli silikona dönüştürülmesi sürecinde uygulanan Siemens işlemi ile Czochralski saflaştırma işlemi arasında ortaya çıkan bir ara formu temsil etmektedir. PV hücre üretimi amaçlı kullanılan çok kristalli silikon yapı, elektronik endüstrisinde kullanılan çok kristalli silikon yapılar kadar saf değildir [76]. Şekil 3.8’de çok kristalli bir PV hücre görülmektedir.



Şekil 3.8. Çok kristalli bir PV hücre

Çok kristalli silikon hücreler, saflaştırılmadığı için tek kristalli hücrelerden, içerdikleri kristallerin rastgele dağılımlı olmasından ileri gelen silisyum katmanlarının sebep olduğu değişik renk tonlarından ayırt edilebilirler.

Esasen tek kristalli ve çok kristalli silikon PV hücreler arasındaki fark, tek kristalli silikon hücrelerinde kullanılan malzemenin, Czochralski saflaştırma işlemi sonrası sahip olduğu

saflik derecesidir. Çok kristalli silikon hücrelerde kullanılan materyal bu işleme girmediginden fiyat olarak tek kristalli hücrelerden daha avantajlı durumdayken, uygulamalarda erişilen %14 ve laboratuvar şartlarında erişilen %18'lik enerji dönüştürme oranları ile tek kristalli hücrelerin gerisinde kalmaktadırlar. Çok kristalli PV paneller de, tek kristalli PV paneller gibi, 100x100, 125x125, 156x156 mm ölçülerinde standardize edilmiş hücrelerin seri ve paralel bağlanmasıyla oluşturulmaktadır ve çok kristalli PV paneller sahip olduğu güç ve gerilim değerine göre, 36, 54, 60 veya 72 hücre içerebilmektedir.

### **3.3.2. İnce Film Fotovoltaik Hücreler**

İnce film PV hücrelerinin, kristalize hücrelere göre en önemli avantajı, saydam olan cam ve benzeri yüzeylere uygulanarak üretilebilmesinin yanında, esneklik gerektiren uygulamalarda sağladığı kolaylıklardır. İnce film silikon malzemeler genellikle, kimyasal buhar biriktirme (chemical vapour deposition, CVD) işlemleriyle elde edilir. Bu yöntemle ince film üretimi esnasında, reaksiyona giren elementler, üretim esnasında kullanılan gaz akış hızı, basınç ve sıcaklık değişkenlerine bağlı olarak, farklı elektriksel ve optik parametrelere sahip alaşımlar elde edilir. İnce film PV hücreler, bu alaşımların üretilmesi ve ince film hücre üretimi uygulamalarında yarı iletken malzeme olarak kullanılması durumuna göre, amorf silikon, galyum arsenit, kadmiyum tellürid, bakır indiyum diselenid gibi isimler almaktadır.

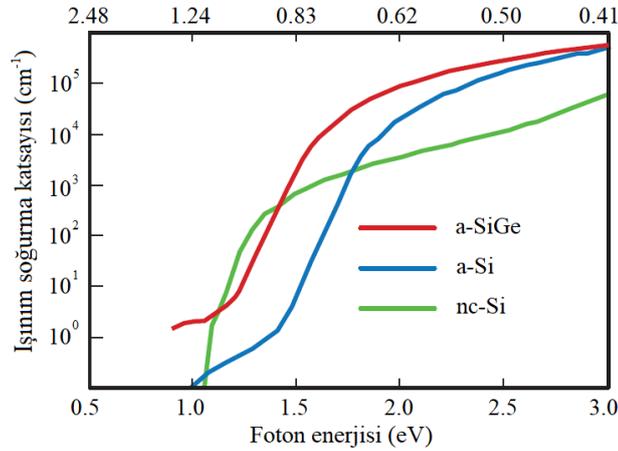
#### **3.3.2.1. Amorf Silikon İnce Film Fotovoltaik Hücreler**

Hidrojen ve silikon elementlerinin sistem girdisi olarak kullanılması durumunda elde edilen alaşımlardan en önemlileri, amorf-silikon (a-Si) ve nanokristalin-silikon (nc-Si) alaşımlarıdır. Burada kullanılan hidrojenin alaşımdaki oranı %5 ila %15 arasında olup, kullanılma amacı alaşımdaki kusurları azaltmaktır. Saf amorf silikon malzeme, yüksek ışınımlarda verim düşüklüğüne sebep olmaktadır [77, 78]. Şekil 3.9'da amorf silikon ince film bir PV modül gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Amorf silikon bir PV modül

Silisyum elementi yerine germanyum elementi kullanılarak benzer şekilde, amorf-germanyum (a-Ge) ve nanokristalin-germanyum (nc-Ge) alaşımları üretilmektedir. Bununla beraber, ince film silikon güneş hücrelerinde, valans elektron sayısı dört olan germanyum ve karbonlu alaşımlar da söz konusudur. Bunlar, amorf silikon-germanyum (a-SiGe), nanokristalin silikon-germanyum (nc-SiGe) ve amorf silisyum karbit (a-SiC) alaşımlarını içermektedir. Şekil 3.10'da a-SiGe, a-Si ve nc-Si alaşımlarıyla yapılmış amorf silikon hücrelerin ışınım soğurma katsayıları verilmiştir.



Şekil 3.10. Farklı türdeki ince film silikon materyallerin soğurma katsayıları

Nanokristalin silikonun bant aralığı, tanelerde bulunan kristal ağ nedeniyle kristalin silikona (~1,12 eV) yakındır. Amorf silikonun malzemenin bant aralığı, silikon ağına dâhil edilen hidrojen miktarı ile değişmek üzere 1,6 ile 1,8 eV arasındadır. Şekil 3.10'da görüldüğü gibi, a-Si'nin soğurganlığı, nc-Si'den daha yüksektir. Ancak foton enerjisinin yaklaşık 1,8 eV'tan yüksek olduğu ışınım miktarlarında nanokristalin silikon malzemenin

soğurganlığının amorf silikondan çok daha iyi olduğu görülmektedir. a-SiGe alaşımıyla üretilmiş ince film materyalin görece bant aralığı düşükken, diğer materyallere göre soğurganlığı en yüksek değerdedir. Farklı ışınım değerlerinde, birbirine göre daha yüksek soğurma katsayılarına sahip olabilen bu materyallerden hangilerinin tercih edileceği, kullanılacakları bölgenin ortalama ışınım miktarı ile ilgilidir [76].

İnce film silikon hücrelerle üretilmiş PV panellerin enerji dönüşüm oranları, laboratuvar ortamlarında %10 civarında iken, uygulamalarda kullanılan panellerin verimi %5 ila %7 arasında değişmektedir. Sahip oldukları esneklik nedeniyle daha çok küçük güç gereksinimi duyan elektronik cihazlarda kullanılan amorf silikon hücrelerin, binalarda elektrik enerjisi üretmek üzere yarı saydam cam materyallerle beraber kullanıldığı uygulamalar da yaygınlaşmaktadır.

### 3.3.2.2. Galyum Arsenit (GaAs) İnce Film Fotovoltaik Hücreler

Galyum Arsenit ince film PV hücreler, tüm ince film teknolojileri içinde, hem standart test koşulları hem de yüksek ışınımlı koşullar altında, en yüksek enerji dönüştürme verimliliğine sahiptirler. Alüminyum (Al), galyum (Ga) veya indiyum (In) gibi valans elektron sayısı üç olan elementler ve fosfor (P) veya arsenik (As) gibi valans elektron sayısı beş olan elementlerle yapılan bileşikler "III-V materyalleri" olarak tanımlanırlar. Bunlardan bazıları, Galyum arsenit (GaAs), galyum fosfit (GaP), indiyum fosfit (InP), indiyum arsenit (InAs) ve daha karmaşık yapılara sahip olan GaInAs, GaInP, AlGaInAs ve AlGaInP yarı iletkenler bileşiklerdir [79]. GaAs bileşiği de III-V materyalleri arasında yer almakta olup ince film hücre üretme teknolojilerinde önemli bir konuma sahiptir. Şekil 3.11'de Galyum-Arsenit bileşiği ile üretilmiş bir PV modül görülmektedir.



Şekil 3.11. Galyum Arsenit bir PV modül

Galyum arsenit bileşiminin ince film hücrelerde tercih edilmesinin birçok gerekçesi vardır. Bunlardan bazıları;

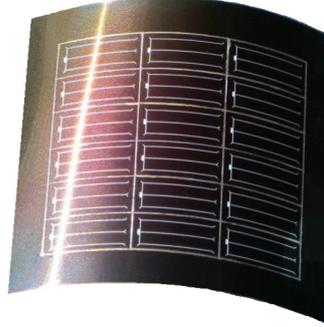
- Bant aralıkları tekil jonksiyonlu güneş pilleri için neredeyse ideal bir değer olan 1,43 eV'tur.
- Işınım soğurma yetenekleri çok yüksek olup, güneş ışığını soğurmak için yalnızca birkaç mikron kalınlıkta bir hücreye ihtiyaç duyarlar. Kristalin silikon hücrelerde bu değer 100 mikrondan daha büyüktür.
- Silikon esaslı hücrelerden farklı olarak, GaAs hücreleri nispeten ısıya duyarlıdır. Bundan dolayı optik yoğunlaştırıcıli fotovoltaik teknolojilerinde kullanıma çok uygundur.
- Alüminyum, fosfor, antimon ve indiyum elementleriyle beraber kullanıldığında hücre tasarımında büyük esneklikler sağlayabilmektedir.
- UV ışınımına karşı çok dirençlidirler. Bu özellik, yüksek enerji dönüşüm verimlilikleri ile birlikte, galyum arsenit ince film hücrelerini uzay uygulamalarında enerji ihtiyacını karşılamak için tercih sebebi haline getirmektedir.

Galyum arsenit bileşiği ile üretilen ince film hücrelerin enerji dönüşüm verimlilikleri, optik yoğunlaştırıcı sistemlerle beraber kullanıldığında, üretici firmaların tolerans değerleri de hesaba katıldığında %25 ila %28 gibi yüksek oranlardadır. Çok eklemlili uygulamalarda, örneğin, galyum indiyum fosfit (GaInP)/GaAs tandem hücrelerinde enerji dönüşüm oranı, optik yoğunlaştırıcı sistemleri kullanılmaksızın %30 civarında olup uzay uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. GaAs ince film hücrelerin yaygınlaşmasının önündeki en büyük neden maliyetlerinin çok yüksek olmasıdır [80-82].

### **3.3.2.3. Kadmiyum Tellürid (CdTe) İnce Film Fotovoltaik Hücreler**

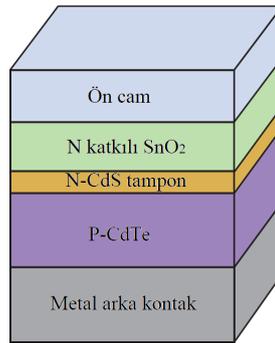
Kadmiyum tellürid bileşiğiyle üretilen çok kristalli PV hücreler, diğer tüm ince film teknolojisi üzerine kurulu hücrelerden, watt başına maliyet açısından başat konumdadır. Kadmiyum tellürid filmler de yarı iletken teknolojisi üzerine kurulu olup, valans elektron sayısı iki olan kadmiyum (Cd) elementi ile valans elektron sayısı altı olan tellür (Te) elementinin oluşturduğu bileşiği içermektedir. Kadmiyum tellürid ince filmlerin enerji bant aralığı 1,44 eV'tur. Bu değer, galyum arsenit ince filmlerin enerji bant aralığına çok yakın olup, tekil jonksiyonlu güneş pilleri için ideal bir değerdir. Bu özellikleri, yüksek değerlerde foton soğurmaları için sadece yaklaşık 2 mikron kalınlığında bir malzemeye ihtiyaç

duyulması avantajını sağlamaktadır [83]. Şekil 3.12’de kadmiyum-tellürid bileşiği ile üretilmiş bir PV modül görülmektedir.



Şekil 3.12. Kadmiyum tellürid bir PV modül

Diğer tüm ince film materyaller gibi, kadmiyum tellürid materyalleri N ve P katkıli alaşımların bir araya getirilmesiyle üretilmektedir. Kadmiyum tellürid bir hücrenin genel yapısında; genellikle şeffaf olacak düzeyde ince N katkıli bir kalay oksit ( $\text{SnO}_2$ ) tabaka ön kontakları oluşturmak üzere, yine şeffaf olan bir cam üzerine biriktirilir. Bu tümleşik yapı, P tipi bir yarı iletken olan CdTe arasında tampon görevi gören kadmiyum sülfid (CdS) katmanını üzerine biriktirilir. Foton enerjisini soğurmak üzere kullanılan P katkıli CdTe tabakası bakır (Cu) arka kontak ile yüzey teması yapacak şekilde tasarlanarak, bir kadmiyum tellürid ince filmin genel yapısı tamamlanmış olur. Şekil 3.13’de CdTe ince film bir hücrenin tabaka yapısı gösterilmiştir.



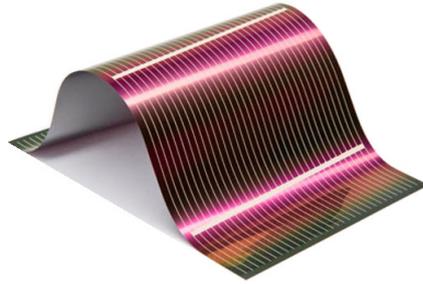
Şekil 3.13. Kadmiyum tellürid ince film tabaka yapısı

Kadmiyum tellürid ince film hücrelerin enerji dönüştürme oranları laboratuvar şartlarında %19’a kadar yükseltilmişse de, küresel pazarlar için üretilen filmlerin verimleri

%7 civarındadır. İnce film hücreler arasında watt başına maliyet açısından en iyi orana sahip olan kadmiyum tellürid materyal fiyatlarının, özellikle ABD ve Almanya'da bulunan bazı üretici firmalar tarafından sürdürülmekte olan araştırmalar sonucunda daha da makul seviyelere ineceği ve küresel pazardaki payının artacağı öngörülmektedir [84].

#### 3.3.2.4. Bakır İndiyum Diselenid (CIS) İnce Film Fotovoltaik Hücreler

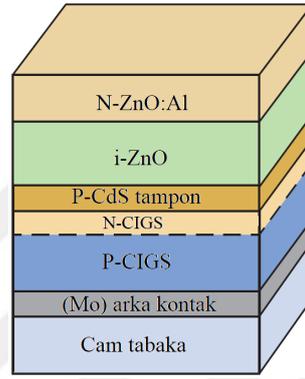
Yıllar önce, yarı iletkenler üzerine yapılan araştırmalarda, 1 ile 2  $\mu\text{m}$  arasında kalınlığa sahip bakır indiyum diselenid ( $\text{CuInS}_2$ , CIS) tabakaların mükemmel bir ışık soğurma yeteneği sağladığı keşfedildi. CIS ve CIS ile ilgili bileşiklerinin elektronik ve kimyasal özellikleri karmaşık diğer ince film hücrelerinde kullanılan malzemelerden daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Silikon esaslı malzemelerden farklı olarak, CIS kendiliğinden bir P-N jonksiyonu oluşturamamaktadır. Jonksiyonun oluşturulması için, kadmiyum sülfid ( $\text{CdS}$ ) gibi başka bir yarı iletken bileşik ile arayüz oluşturmaktadırlar.  $\text{CdS}$  ancak N-tipi malzeme olarak kullanılabilirdiğinden CIS P-tipi olarak katkılamak durumundadır. CIS PV hücrelerinde bulunan katmanlarla metalik temas kurmak için altın elementi etkili olsa da, maliyeti artırdığından tercih edilmeyip bunun yerine görece verimsiz molibden elementi kullanılmaktadır [85]. Şekil 3.14'te bakır indiyum diselenid bileşiği ile üretilmiş bir ince film PV modül görülmektedir.



Şekil 3.14. Bakır İndiyum Diselenid bir PV modül

İnce film PV hücreleri içinde en yaygın kullanım alanı bulan kalkopirit, bakır indiyum diselenid ( $\text{CuInSe}_2$ , CIS) ve bakır galyum diselenid ( $\text{CuGaSe}_2$ , CGS) karışımlarıdır. Bazı araştırma grupları ve üreticiler, bu iki kalkopiritin bir arada bulunduğu bakır indiyum galyum diselenid ( $\text{CuInGaSe}_2$ , CIGS) yapısını da kullanmaktadır. Şekil 3.15'te, cam üzerine biriktirilen tipik bir CIGS güneş pili yapısı gösterilmiştir. Alt kontak olarak, cam üzerine

biriktirilen yaklaşık 500 nm kalınlığındaki molibden (Mo) tabakası kullanılmaktadır. Molibden katmanı üzerine, yaklaşık 2 µm kalınlığında P katkı CIGS karışımı biriktirilir. P katkı CIGS tabakasının üzerine, bakır bakımından daha zengin N katkı bir CIGS alaşımı depolanır. P-N jonksiyon bölgesi, yaklaşık 50 nm kalınlığa sahip ince bir kadmiyum sülfid (CdS) birleşimi ile desteklenmiştir. CdS tampon bölgesi üzerine, önce saf çinko oksit (ZnO), sonra da alüminyum ile katkılandırılmış N-ZnO bileşiği biriktirilerek, tipik bir CIGS PV hücre oluşturulmuş olur [76].



**Şekil 3.15.** Bakır İndiyum Galyum Diselenid ince film tabaka yapısı

CIS PV hücrelerin bant aralığı yaklaşık 1,1 eV iken, indiyum yerine galyum kullanılması durumunda yaklaşık 1,7 eV'a yükseltilebilmektedir. CIGS ince film PV'lerde ise, kullanılan indiyum ve oranları optimize edilerek yarı iletkenler için en uygun bant aralıkları yakalanmaya çalışılmaktadır. İnce film hücrelerin tarihi gelişiminde, optimize edilmiş bakır indiyum galyum diselenid (CIGS) materyallerindeki hücre verimleri istikrarlı bir şekilde artmaktadır. CIS ince film PV hücreler üzerinde yapılan laboratuvar araştırmalarında kaydedilen enerji dönüşüm verimliliği yaklaşık %20 iken, ticari olarak üretilen CIS PV panellerin etkinliği %10 ila %12 arasında değişmektedir.

### 3.3.2.5. Fotovoltaik Hücre Teknolojilerinin Karşılaştırılması

İnorganik kristallerin PV hücre malzemeleri olarak kullanılmasında başarımın sağlanabilmesi için iki temel özelliğe ihtiyaç duyulur. Bunlardan biri, ışık soğurma katsayılarının yüksek olması, diğeri ise enerji altında kalan elektronların hareketinin verimli bir şekilde sağlanması için etkili bir P-N jonksiyon içermeleridir. Ar-Ge aşamasında, PV

hücre üretiminde kullanılan materyallerin geliştirilmesi ile ilgili çalışmalar deney boyutunda olduğundan, araştırmacı kişi ve kuruluşların önemsemeyeceği maliyetler söz konusudur. Ancak ticari uygulamalarda, küresel pazarlarda yer alabilmek için PV panel üreticileri ve tüketicileri, kullanılan materyallere ilişkin ham madde, teknoloji ve patent gibi bir dizi unsuru içeren maliyet analizleri yapmak durumundadır. Yukarıda incelenen PV hücre teknolojileri, kullanılan yarı iletken malzeme, bant aralığı, enerji dönüşüm etkinliği ve fiyat bakımından Tablo 3.1’de karşılaştırılmıştır.

**Tablo 3.1.** PV hücre teknolojilerinin karşılaştırılması

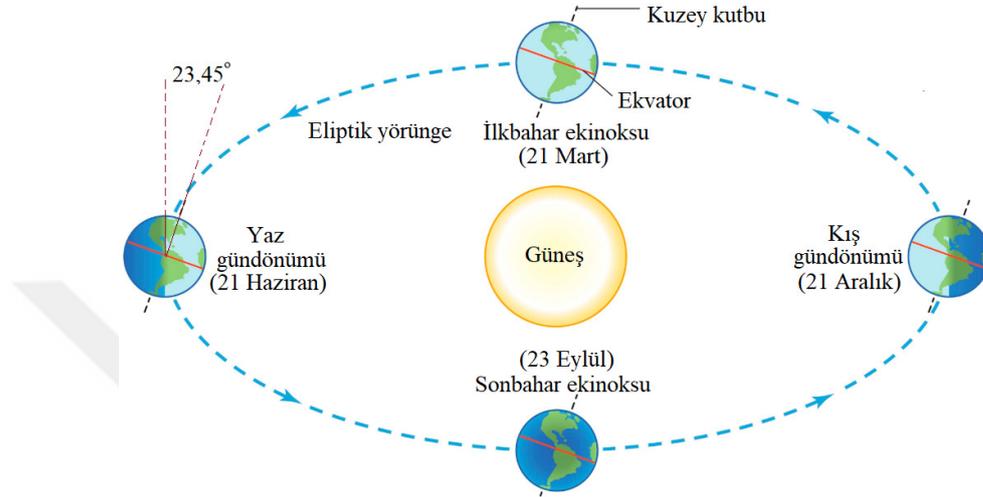
Hücre teknolojisi	Materyal özellikleri	Absorbsiyon değeri	Bant aralığı	Fiyat
<b>Kristalize silikon</b>				
Tek kristalli	Yüksek	Düşük	Orta	Yüksek
Çok kristalli	Orta	Düşük	Orta	Orta
<b>İnce film</b>				
Amorf silikon	Düşük	Yüksek	Orta	Düşük
Çok kristalli ince film (CIS, CGS, CIGS)	Orta	Yüksek	Yüksek	Düşük
Tek kristalli ince film (GaAs, InP)	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek

### 3.4. Güneş Açıları

Dünya dâhil Güneş sisteminde yer alan tüm gezegenlerin enerji kaynağının, yüzey sıcaklığı yaklaşık 5500 °C olan Güneş olduğu bilinmektedir. Bilindiği üzere, ısı enerjisi ışınım ve taşınım yoluyla transfer edilebilmektedir. Güneş ile Dünya atmosferi arasında moleküler bir yapı söz konusu olmadığından, güneş kaynaklı ısı enerjisinin taşınım yoluyla transfer edilmesi mümkün değildir. Bu durumda, güneşten gelen ısı enerjisinin tümü, yerkürenin atmosfer tabakasına kadar ışınım yoluyla transfer edilmektedir. Yaklaşık 10.000 km kalınlığında olduğu kabul edilen Dünya atmosferi dışına kadar gelen bu ışınım enerjisi, ekzosfer, termosfer, mezosfer, stratosfer ve troposfer tabakalarını geçtikten sonra yeryüzüne ulaşmaktadır.

Dünya'nın Güneş etrafında dönüşünün sahip olduğu eliptik form, Dünya ile Güneş arasındaki mesafenin yıl boyunca değişmesine neden olmaktadır. Eliptik izleme şekli, Dünya atmosferi dışına gelen güneş ışınımı değerini değiştirmese de, Dünya'nın kutupsal

ekseni ile eliptik formun düzlemi arasında bulunan yaklaşık 23,45°'lik açı, yeryüzünde bulunan farklı bölgelerin bir yıl boyunca farklı değerlerde güneş ışınımına maruz kalmasına yol açmaktadır [86]. Şekil 3.16'da Dünya'nın Güneş etrafında bir yıl boyunca çizdiği eliptik yörünge gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Dünya eliptik yörüngesi

Yerkürede bulunan bölgelere düşen güneş ışınım enerjisinin hesaplanabilmesi için, yılın farklı günlerinde Güneş ile Dünya arasındaki mesafenin bir değişken olarak kullanılması gerekmektedir. Dünya ile Güneş arasındaki  $d$  mesafesi metre olarak;  $n$ , 1 Ocak tarihi için 1 değerini alarak hesaplanması istenen gün sayısı olmak üzere,

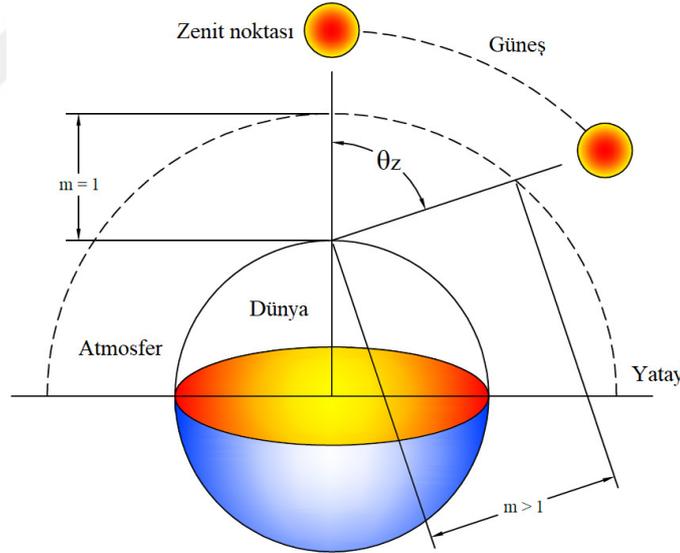
$$d = 1,5 \cdot 10^{11} \left( \frac{1 + 0,017 \sin(360(n - 93))}{365} \right) \quad (3.1)$$

ile hesaplanır.

21 Mart ve 23 Eylül tarihlerinde, Dünya Güneş'e en yakın konumda olup, güneş ışınları ekvatora dik haldedir. 21 Haziran ve 21 Aralık tarihlerinde ise, Dünya Güneş'e en uzak iki konumda olup, güneş ışınları ekvatora 23,45° ve - 23,45° açıyla ulaşmaktadır. Bu belirgin ekinoks ve gündönümü açıları arasında sonsuz sayıda açı bulunmaktadır. Buna bağlı olarak yeryüzünde bulunan tüm bölgelere, eliptik yörünge nedeniyle bir yıl boyunca 6 ayı içeren iki dönem halinde güneşten gelen farklı değerlerde ışınım enerjisi düşmektedir.

Yeryüzüne ulaşan güneş kaynaklı ışınım değeri, Dünya atmosferi dışında her yerde sabit olup yaklaşık  $1353 \text{ W/m}^2$  civarındayken, atmosfer tabakalarında bulunan gazlar bu miktarın %6'sını yansıtmakta ve %16'sını sönmlemektedir. Böylece yeryüzüne ulaşan maksimum ışınım şiddeti  $1100 \text{ W/m}^2$  dolaylarına inmektedir. Güneş enerjisinden faydalanabilen bölgelerde, birim alan başına elde edilebilecek enerji miktarı ise 800 ile 2600 kWh-yıl arasında değişmektedir.

Dünya atmosferine gelen güneş ışınları, yeryüzüne ulaşmadan önce, yeryüzünden itibaren yaklaşık 150 km yüksekliğe kadar uzanan, çoğunluğu oksijen ve azot gazından oluşan hava küreden geçmek durumundadır. Dünya'nın sahip olduğu küresel şekilden ötürü, yeryüzünde bulunan bölgelere göre, güneş ışınlarının kat edeceği havaküre kalınlığı değişmektedir. Bu değişim, yeryüzünde bulunan bölgelerin güneş ışınımı potansiyeli hesaplanırken "hava kütlesi" ( $m$ ) değişkeniyle değerlendirilir. Şekil 3.17'de hava kütlesinin değeri farklı güneş pozisyonlarına göre gösterilmiştir.



Şekil 3.17. Hava kütlesinin gösterimi

Hava kütlesi, özellikle PV hücre üreten firmaların, ürünlerine ait karakteristik özellikleri belirlerken yaptıkları testlerde kullanılan bir değişkendir. Güneş ışınları ile yeryüzü arasında, hava kürenin en ince olduğu bölge, ışınların Dünya'ya dik geldiği, yani zenit açısının  $90^\circ$  olması durumunda, deniz seviyesinde  $m = 1$  değerini almaktadır. Zenit açısının  $60^\circ$  olması durumunda  $m = 2$  değerini almaktadır. PV üretici firmalar, gerçekleştirdikleri testlerde, standart test koşullarından biri olarak görece hava kütlesinin  $m = 1,5$  olduğu değeri

kullanılmaktadırlar. Zenit açısı kuzey ve güney kutbunda, çeşitli bölgelere göre değişmekte olup, görece hava kütlesi zenit açısının bir fonksiyonu olarak ifade edilmek istenirse;  $\theta_z$  derece cinsinden zenit açısı olmak üzere,

$$m = \frac{1}{\cos \theta_z} \quad (3.2)$$

olarak ifade edilir.

Görece hava ağırlığı  $m$  değerinin daha hassas bir şekilde hesaplanması için empirik bir denklem olarak;  $h$ , metre cinsinden ilgili bölgenin enlemi,  $\theta_z$  derece cinsinden zenit açısı olmak üzere,

$$m = \frac{\exp(-0.0001184h)}{\cos(\theta_z) + 0.5057(96.080 - \theta_z)^{-1.634}} \quad (3.3)$$

şeklinde elde edilmiştir [87].

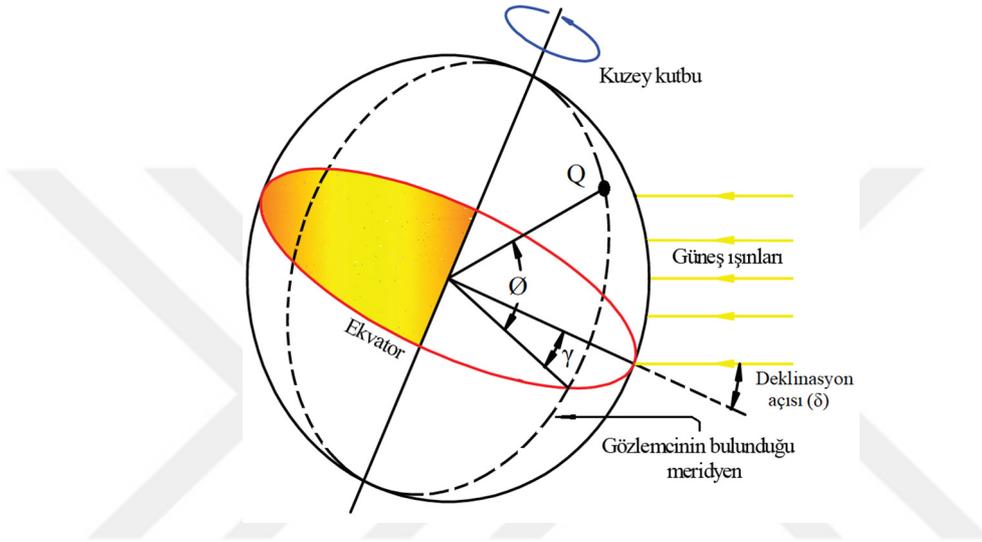
### 3.4.1. Temel Güneş Açıları

#### 3.4.1.1. Enlem Açısı

Yerküre şekilsel olarak ekvator düzlemi sınır olmak üzere, güney ve kuzey olmak üzere iki kutup olarak düşünülmektedir. Enlem değeri ekvatorun kuzey ve güneyinde herhangi bir noktanın, ekvator çizgisine olan mesafesinin açısal bir ifadesidir. Kuzey ve güney enlemleri olarak iki çeşit olup, derece-dakika-saniye cinsinden ifade edilir. Yerküre üzerinde eşit enlem açısına sahip bölgelerin birleştirilmesiyle ortaya çıkan daireler paralel, güney ve kuzey kutup noktalarının birleştirilmesiyle ortaya çıkan daireler boylam (meridyen) olarak tanımlanmakta olup, enlem ve boylamlar yer kürenin her noktasında birbirlerine diktirler. Enlem açısı ( $\emptyset$ ), güney yarım kürede, ekvator çizgisi  $0^\circ$ , güney kutup noktası  $-90^\circ$  olmak üzere ve kuzey yarım kürede, ekvator çizgisi yine  $0^\circ$ , kuzey kutup noktası  $+90^\circ$  olmak üzere  $-90^\circ \leq \emptyset \leq +90^\circ$  arasında değişmektedir. Ekvator 40075 km çevre uzunluğuyla en büyük paralel dairesini teşkil etmektedir.

### 3.4.1.2. Deklinasyon Açısı

Deklinasyon açısı ( $\delta$ ), Güneş'ten yeryüzüne gelen ışınlar ile ekvator düzlemi arasındaki açının derece cinsinden değeridir. Bu açı Dünya'nın kutupsal eksenini ile Güneş sistemi düzlemi arasındaki yaklaşık  $23,45^\circ$ 'lik açıdan ileri gelmektedir. Şekil 3.18'da Güneş ışın doğrultusu ile ekvator düzlemi arasındaki deklinasyon açısı gösterilmiştir.



Şekil 3.18. Deklinasyon açısının yerküre üzerindeki gösterimi

Deklinasyon açısı, bir yıl boyunca, kuzey bölgesi pozitif olmak üzere,  $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$  arasında değişmektedir. Gece ile gündüz sürelerinin eşit olduğu 21 Mart ve 21 Eylül ekinoks tarihlerinde güneş ışınları ekvator düzlemine paralel olup, deklinasyon açısı bu iki tarihte  $0^\circ$ 'dir. 21 Haziran'da yaşanan yaz gündönümünde deklinasyon açısının değeri  $23,45^\circ$ , 22 Aralık'ta yaşanan kış gündönümünde ise  $-23,45^\circ$ 'dir. Zenit kutup noktalarını birleştiren doğruya, zenit açısı ( $\theta_z$ ) güneş ışınlarının doğrultusuyla bu doğru arasındaki açı olarak tanımlanır. Bölgesel saat uygulamalarının doğurduğu zaman dilimlerinin oluşturduğu farklılıklar hesaba katıldığında, Dünya'nın tüm bölgelerinde öğlen saat 12.00'de Güneş en yüksek noktada bulunmaktadır. Güneş'in en yüksek olduğu zamana "güneş saati" denmektedir. Bu durumda Şekil 3.17 irdelendiğinde zenit açısı,  $\theta_z = \delta$  olmaktadır.  $\delta$  açısı, güneş ışınlarının ekvator düzlemiyle yaptığı açı olup, deklinasyon ve enlem açısının eşit olması durumunda, zenit açısı sıfır  $0^\circ$  olmaktadır.

Deklinasyon açısının hesaplanmasında birçok yaklaşım olmakla beraber, Cooper denkleminde yaklaşık olarak elde edilebilir [88].

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(\frac{360 \cdot (284 + n)}{365}\right) (\text{°}) \quad (3.4)$$

Bu denklemde, Ocak ayının 1. günü 1 olmak üzere  $n$ , bir yıl içinde deklinasyon açısı hesaplanmak istenen gün sırasını ifade etmektedir.

Deklinasyon açısı, daha hassas bir şekilde ( $\varepsilon < 0,035^\circ$ ) Spencer'in sunduğu denklem ile,

$$\begin{aligned} \delta = & (180/\pi)(0.006981 - 0.399912 \cos B + 0.070257 \sin B \\ & - 0.0067582B + 0.000907 \sin 2B \\ & - 0.002697 \cos 3B + 0.00148 \sin 3B) (\text{°}) \end{aligned} \quad (3.5)$$

şeklinde hesaplanır [89]. Burada  $B$ ,

$$B = (n - 1) \frac{360}{365} \quad (3.6)$$

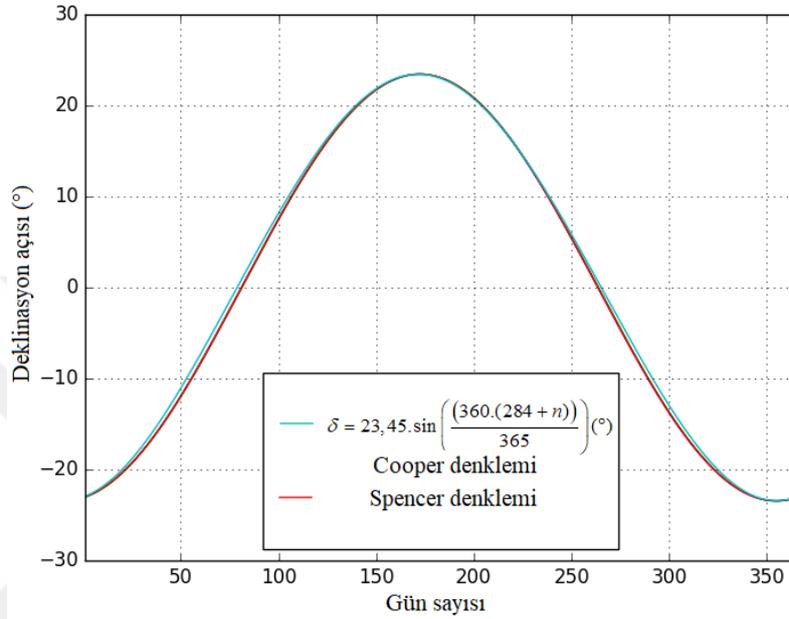
eşitliğiyle bulunmaktadır.

Tablo 3.2'de, farklı günlere ait deklinasyon açıları, (3.5) denklemine göre hesaplanmıştır.

**Tablo 3.2.** Yılın çeşitli günlerinde deklinasyon açısı değerleri

Aylar	$n$ değeri için ayın i. günü	Ayın günü	Yılın günü, $n$	Deklinasyon açısı, $\delta$ (°)
Ocak	i	17	17	-20,9
Şubat	31+i	16	47	-13,0
Mart	59+i	16	75	-2,4
Nisan	90+i	15	105	9,4
Mayıs	120+i	15	135	18,8
Haziran	151+i	11	162	23,1
Temmuz	181+i	17	198	21,2
Ağustos	212+i	16	228	13,5
Eylül	243+i	15	258	2,2
Ekim	273+i	15	288	-9,6
Kasım	304+i	14	318	-18,9
Aralık	334+i	10	344	-23,0

Tablo 3.2'deki veriler Şubat ayının 28 çaktığı kabulüyle düzenlenmiştir. Dolayısıyla, artık yılların hesabında, Mart ayından sonra gelen aylara ait hesaplamalarda  $i$  değeri 1 arttırılmalıdır. Deklinasyon açısının günlük bazdaki değişimi en fazla  $0,4^\circ$  değerinde olup Cooper ve Spencer denklemine göre yıl içindeki değişimi, Şekil 3.19'da verilmiştir [26].



Şekil 3.19. Deklinasyon açısının yıl içindeki değişimi

### 3.4.1.3. Saat Açısı

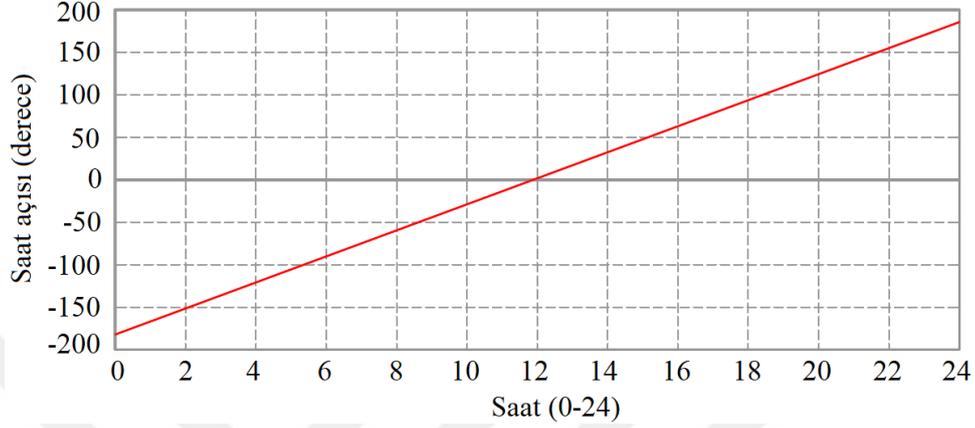
Saat açısı ( $\omega$ ), Dünya'nın kendi eksenini etrafında her saat için  $15^\circ$ lik dönüşünden kaynaklanan, Güneş'in yeryüzü üzerinde herhangi bir bölgeye göre doğu ya da batı yönündeki yer değişiminin açısal ifadesidir. Öğleden önce negatif ve öğleden sonra pozitif değer almak üzere, saat açısının değişimi  $-180^\circ \leq \omega \leq +180^\circ$  arasındadır. Saat açısının, bir günü kapsayan zaman dilimine ait hesabı için,

$$\omega = \frac{(saat.60 + dakika) - 720}{4} \text{ (}^\circ\text{)} \quad (3.7)$$

denklemini kullanılabılır [90].

Yerküre kendi etrafındaki  $360^\circ$ lik dönüşü yaklaşık 24 saatte tamamladığından, saat başına yaklaşık  $15^\circ$ lik bir dönüş söz konusudur. Saat açısının,  $360^\circ$ 'nin  $180^\circ$ lik kısmını

kapsayan öğleden önceki periyot (00.00-12.00) için negatif değerler, diğer 180°'lik kısmı kapsayan öğleden sonraki (12.00-00.00) periyot için pozitif değerler aldığı göz ardı edilmemek şartıyla Denklem (3.7)'ye göre bu değişim, Şekil 3.20'de verilmiştir.



Şekil 3.20. Saat açısının gün içindeki değişimi

### 3.4.2. Türetilmiş Güneş Açıları

#### 3.4.2.1. Eğim Açısı

Eğim açısı ( $\beta$ ), belirli bir yüzeyin doğrultusu ile yerkürenin yatayı arasındaki açının derece cinsinden ifadesidir. Yüzey ile yeryüzü yatayının paralel olması durumunda eğim açısının değeri  $0^\circ$  değerini almakta olup, yeryüzündeki tüm pozisyonlar için  $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$  arasında değişmektedir. Kuzey yarım kürede bulunan bir yüzeye ait eğim açısının  $90^\circ$ 'den büyük olması, yüzeyin güneye eğimli olduğunu ifade etmektedir.

#### 3.4.2.2. Yüzey Azimut Açısı

Yüzey azimut açısı ( $\gamma$ ), yeryüzünde bulunan bir yüzeye ait normalin, yatay düzlemde oluşturduğu izdüşümün güney yönüyle yaptığı yatay açının derece cinsinden ifadesidir. Normale ait izdüşümün tam güney eksenine gelmesi durumunda  $0^\circ$ , doğu yönünde olması durumunda pozitif, batı yönünde olması durumunda negatif olmak üzere,  $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$  arasında değişmektedir.

### 3.4.2.3. Geliş Açısı

Geliş açısı ( $\theta$ ), güneşten gelen direkt ışınımın doğrultusu ile bu ışınımın maruz kalan yüzeyin normali arasındaki açının derece cinsinden ifadesidir.

### 3.4.2.4. Zenit Açısı

Yeryüzünde herhangi bir noktanın zenit açısı ( $\theta_z$ ), ilgili nokta ile yerkürenin merkezinin birleştirilmesiyle meydana gelen doğru ile güneşten gelen direkt ışınımın doğrultusu arasında kalan açı olarak tanımlanır. Diğer güneş açıları gibi derece cinsinden ifade edilir.

Yeryüzünde bulunan herhangi bir yüzeye (PV panel, güneş kolektörü, yansıtıcı aynalar vb.) ait güneş açıları arasında dolaylı bazı trigonometrik ilişkiler söz konusu olup bu açılar birbirlerine dönüştürülebilmektedirler [26]. Örneğin güneş ışınımına ilişkin geliş açısı,

$$\cos \theta = \sin \delta \cdot \sin \phi \cdot \cos \beta - \sin \delta \cdot \cos \phi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma + \cos \phi \cdot \cos \beta \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin \phi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma \cdot \sin \omega \quad (3.8)$$

$$\cos \theta = \cos \theta_z \cdot \cos \beta + \sin \theta_z \cdot \sin \beta \cdot \cos(\gamma_s - \gamma) \quad (3.9)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. Dikey yüzeyler için eğim açısı  $\beta$ ,  $90^\circ$  olduğundan, Denklem (3.8)'deki  $\sin \beta$  değerlerinin yerine 1 değeri yazılıp gerekli sadeleştirmeler yapılırsa, geliş açısı,

$$\cos \theta = (-\sin \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \gamma + \cos \delta \cdot \sin \phi \cdot \cos \gamma \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin \gamma \cdot \sin \omega) \quad (3.10)$$

haline gelecektir. Güneşin geliş açısı  $\theta$ , yatay yüzeyler için eğim açısı  $\beta$ ,  $0^\circ$  değerini alması durumunda zenit açısı  $\theta_z$  ile aynı değerde olmaktadır. Denklem (3.6),  $\beta$  değerleri için  $0^\circ$  tanımlanıp yeniden düzenlenirse azimut açısı,

$$\cos \theta_z = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cdot \cos \omega$$

şeklinde hesaplanabilecektir. Zenit açısı ve güneş yükseklik açısı birbirinin tümleyeni olduğundan Denklem (3.10) yardımıyla güneş yükseklik açısı da hesaplanabilir. Bu durumda güneş yükseklik açısı  $\alpha_s$ ,

$$\alpha_s = 90^\circ - \theta_z \quad (3.11)$$

olarak bulunacaktır. Bu durumda zenit açısı ile güneş yükseklik açısı arasındaki trigonometrik ilişki,

$$\cos \theta_z = \sin \alpha_s \text{ veya } \sin \theta_z = \cos \alpha_s \quad (3.12)$$

olarak en sade şeklini almaktadır.

#### 3.4.2.5. Güneş Yükseklik Açısı

Güneş yükseklik açısı ( $\alpha_s$ ), güneşten yeryüzüne gelen direkt ışınımına ait doğrultu ile yatay düzlem arasındaki açının derece cinsinden karşılığı olup, zenit açısının tümleyenidir ( $\alpha_s + \theta_z = 90^\circ$ ).

#### 3.4.2.6. Güneş Azimut Açısı

Güneş azimut açısı ( $\gamma_s$ ), güneşten gelen ışınımına ait doğrultuya ait yeryüzündeki izdüşüm ile yatay düzlemde bulunan güney kutbu doğrultusu arasındaki açının derece cinsinden ifadesidir. Güneş ışınım doğrultusunun değişimine göre, ilgili izdüşümün güneyle aynı doğrultuda olması durumunda  $0^\circ$  değerini almakla birlikte, diğer pozisyonlar için doğuda olması durumunda negatif, batıda olması durumunda pozitif değer almakta olup  $-180^\circ \leq \gamma_s \leq 180^\circ$  arasında değişmektedir. Güneş azimut açısı,  $23,45^\circ$  ve  $66,45^\circ$  tropikal enlemleri arasında kalan bantta bulunan bölgelerde, 12 saatten daha kısa olan günler için  $+90^\circ$  ile  $-90^\circ$  arasında olmaktadır, 12 saatten daha uzun günlerde bu sınırların dışında değerler alabilmektedir. Güneş azimut açısı şu şekilde hesaplanır [91]:

$$\gamma_s = (C_1 \cdot C_2 \cdot \gamma'_s) + C_3 \left( \frac{1 - C_1 \cdot C_2}{2} \right) \cdot 180 \quad (3.13)$$

$\gamma'_s$  geçici yüzey açısını ifade etmekte olup değeri,

$$\gamma'_s = \frac{\sin \omega \cdot \cos \delta}{\sin \theta_z} \quad (3.14)$$

ve,

$$\cos \omega_{ew} = \frac{\tan \delta}{\tan \phi}$$

şeklinde hesaplanmaktadır.  $\omega_{ew}$  değeri güneşin tam doğuda ve tam batıda bulunması durumuna göre;  $C_1$ ,  $C_2$  ve  $C_3$  değerleri aşağıdaki şartlara bağlı olarak hesaplanmaktadır:

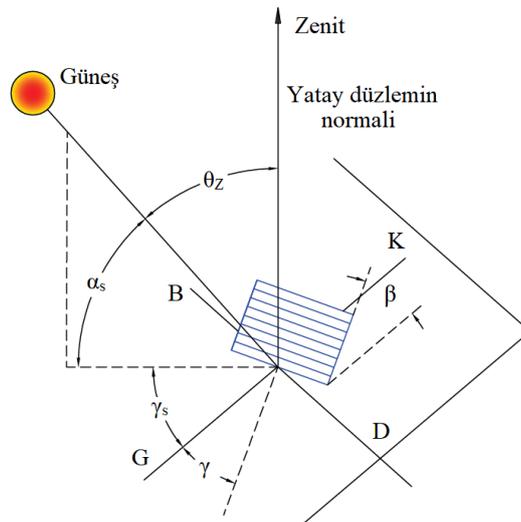
$C_1$  değeri için; eğer  $|\omega| \leq \omega_{ew}$  ise  $C_1 = 1$ , eğer  $|\omega| > \omega_{ew}$  ise  $C_1 = -1$

$C_2$  değeri için; eğer  $|\phi - \delta| \geq 0$  ise  $C_2 = 1$ , eğer  $|\phi - \delta| < 0$  ise  $C_2 = -1$

$C_3$  değeri için; eğer  $\omega > 0$  ise  $C_3 = 1$ , eğer  $\omega < 0$  ise  $C_3 = -1$  değerlerini almaktadır.

Bu değerler, Denklem (3.14)'te yerine konularak güneş azimut açısı hesaplanabilir.

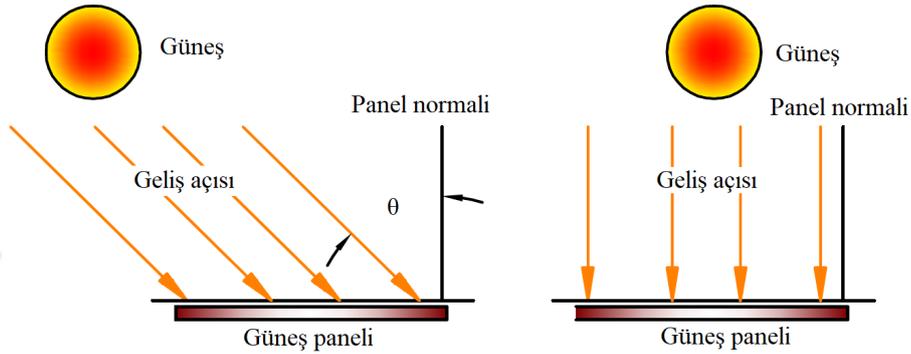
Aralarında trigonometrik bağıntılar olan temel ve türetilmiş güneş açıları olan güneş azimut açısı  $\gamma_s$ , güneş yükseklik açısı  $\alpha_s$ , zenit açısı  $\theta_z$  ve yüzey azimut açısı  $\gamma$ 'nın yerküre üzerinde beraber gösterimi Şekil 3.21'de verilmiştir.



Şekil 3.21. Güneş açılarının yerküre üzerinde gösterimi

### 3.5. Güneş İzleme Sistemleri

Artan enerji talebinin karşılanması için, enerji üretiminde dışa bağımlılığı ortadan kaldıran ve çevreyi kirletmeyen yöntemler odak noktası haline gelmiştir. PV sistemleriyle elektrik enerjisi üretiminde kullanılan panellerin hücre verimliliğini artırmak üzere, farklı coğrafyalarda birçok çalışma yapılmıştır. PV panellerinden elde edilen enerjinin değeri üzerlerine düşen ışınım miktarına doğrudan ve etkili bir şekilde bağlı olduğundan, daha büyük enerjiler elde edebilmek için çeşitli güneş izleme sistemleri kullanılmaktadır. Şekil 3.22’de güneş geliş açısı ile panellerin konumu arasında oluşan açı gösterilmiştir. Verimin artırılması için güneş geliş açısı  $\theta$  ile PV panel yüzeyinin normali arasında oluşan açı kontrol edilmektedir. Verimliliğin artırılması için bu açının sıfıra yaklaştırılması hedeflenmektedir.

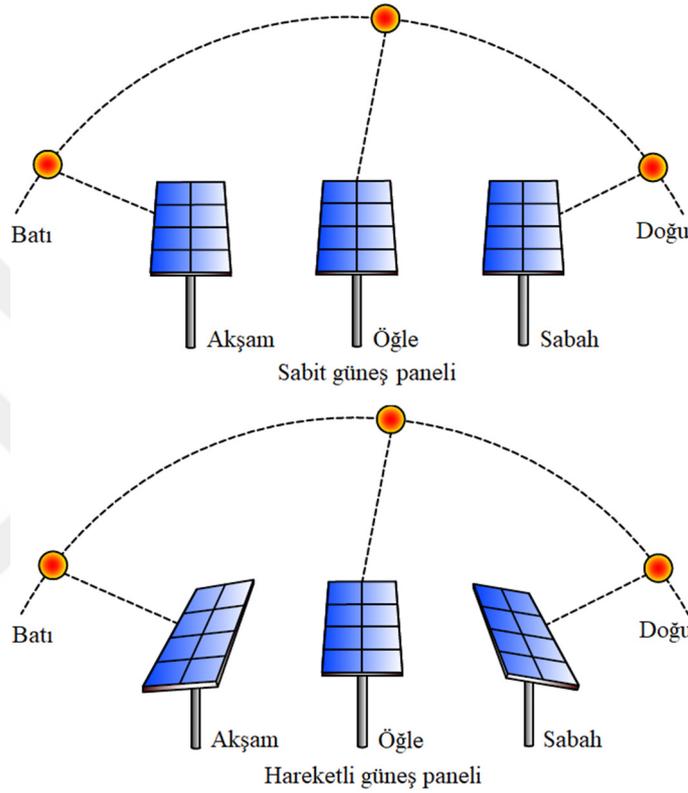


Şekil 3.22. PV panelleri üzerine düşen ışınım

PV uygulamalarında güneş takip sistemleri önemli bir konu olup bu sistemleri gerçekleştirmek, güneş enerjisi parametrelerine ait detaylı ölçümler ve ayrıntılı matematiksel hesaplamalar gerektirmektedir. En önemli parametrelerden biri günlük ortalama güneş ışınımı olup dünya genelinde günlük güneş ışınımı değeri 4 ile 7 kWh/m<sup>2</sup> arasında değişmektedir [26]. Güneş ışınımı değeri aylara, günün saatine, hava koşullarına, coğrafi bölgeye ve güneşin gökyüzündeki konumuna bağlı olarak değişmektedir [92]. Şekil 3.23’te güneşin konumuna göre, sabit ve hareketli sistemlerde güneş panellerinin pozisyonu gösterilmiştir.

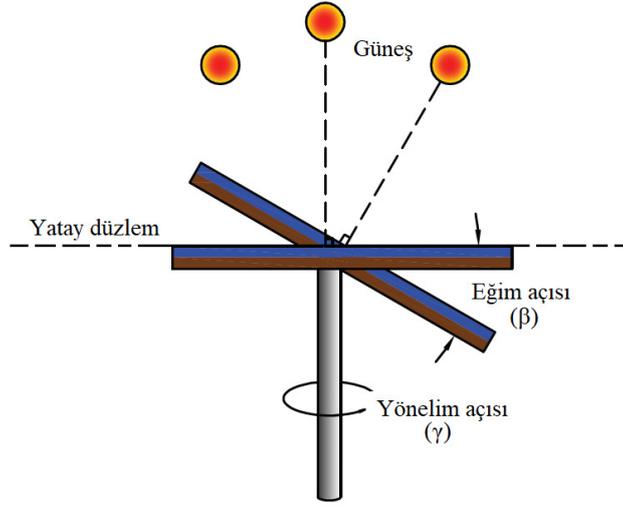
Güneş izleyici sistem uygulamalarında, tasarım ve tesis aşamasında Greenwich saati ve güneş saati gibi çeşitli temel parametrelerden faydalanılır. Greenwich saati, Dünya’nın kendi etrafında bir günde yaptığı dönel harekete bağlı bir zaman ölçüğüdür [93, 94]. Bu ölçük, Dünya’da bulunan farklı bölgelerdeki saatlerin tayin edilmesinde referans olarak kabul

edilen ve Britanya'daki Greenwich kasabasından geçen meridyene dayanılarak belirlenmektedir. Diğer boylamlar, Greenwich sırasındaki pozisyonlarına göre iki kısma ayrılmıştır. Doğu yönündeki meridyenler üzerinde bulunan bölgelerdeki zaman Greenwich zamanına eklemeye yapılarak, batı yönündeki meridyenler üzerinde bulunan bölgelerde ise Greenwich zamanından eksiltme yapılarak hesaplanmaktadır [95].



**Şekil 3.23.** Sabit ve hareketli panellerin gün içinde güneşe göre konumu

PV sistemlerinin tesis edileceği bölgelere ait boylam ve güneş saati parametrelerine ilaveten, panellerin azamî çıkış gücü sunabilmesi için en önemli parametrelerden biri de panellerin eğim açısıdır. Panellerin eğim açısı, enlem açısı  $\theta$  ile direkt ilgilidir. Tesis edilen PV sistemlerin güney veya kuzey yarı kürede buldukları noktaya göre enlem açısı değişmekte olup, sistemde kullanılan panellerin eğim açısı  $\beta$  değerlerinin tayininde enlem açısı önemli bir parametre olarak belirleyicidir. Güneş izleme sistemlerinin yerini ve panellerin yönelim açılarını belirleyen diğer parametreler; deklinasyon açısı, yüzey azimut açısı ve güneş azimut açısıdır. PV panellere ilişkin en önemli iki açı eğim ve yönelim açıları olup Şekil 3.24'te bu açılar güneşin pozisyonuna göre panel üzerinde gösterilmiştir. Panellerin güney-kuzey yönlerinde hareketi, eğim açısı  $\beta$ , doğu-batı yönündeki hareketi ise yüzey azimut açısı  $\gamma$  ile tayin edilmektedir.



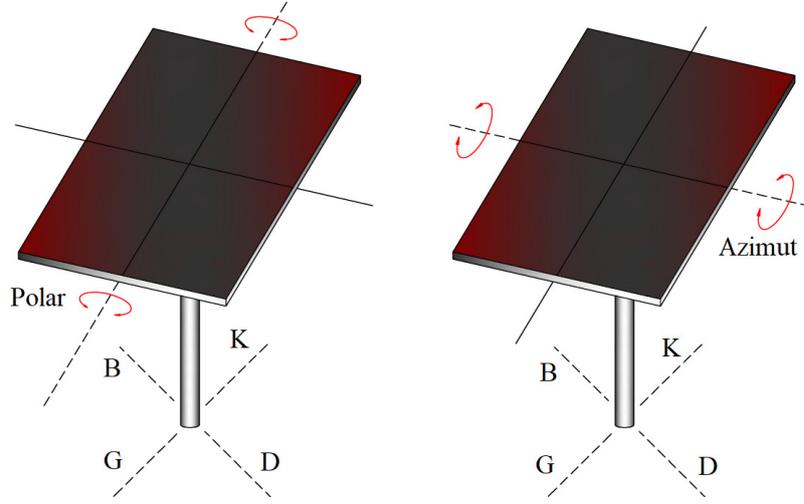
Şekil 3.24. Eğim ve yönelim açılarının panel üzerinde gösterimi

### 3.5.1. Güneş İzleyici Sistemlerin Eksen Sayısına Göre Sınıflandırılması

PV güneş izleme sistemleri, izleme esnasında panellerin hareket şekillerine göre genel olarak tek eksenli ve iki eksenli olarak üretilmektedir. Eksen sayısı ve hareketlerin hangi yönlerde olacağı, kurulan sistemin büyüklüğü, sistemin kurulduğu coğrafi bölgenin güneş ışınım miktarı ve süresi, uygulamada kullanılan PV panel teknolojisi vb. parametrelere bağlıdır.

#### 3.5.1.1. Tek Eksenli Güneş İzleyicileri

Tek eksenli güneş izleyici sistemler iki şekilde tasarlanabilirler. Bunlardan biri doğu-batı (polar eksenli) yönünde izleme yapabilen sistemler, diğeri ise güney-kuzey yönünde izleme yapabilen (azimut eksenli) sistemlerdir. Bu izleyiciler en büyük enerji kazancını, güneşin doğuşundan sonraki ilk 2 saat ve güneş batmadan önceki 2 saatlik zaman diliminde sağlarlar [96]. Tek eksenli izleyicileri tercih etmenin en büyük nedeni sabit eğimli PV uygulamalara göre, sistemin kurulduğu bölgelerin coğrafi özelliklerine bağlı olarak sağladığı %15 ile %20 arasındaki enerji kazancının yanında iki eksenli güneş izleyicilere göre daha basit ve hafif mekanik yapıları ve kontrol sistemlerindeki görece kolaylıktır. Bunun dışında sistemin kurulduğu bölgedeki gölgeleme miktarı ve uygulama alanının kısıtlılığı da bu sistemi tercih sebebi haline getirebilmektedir. Şekil 3.25'te polar ve azimut doğrultusuna göre hareket edebilen tek eksenli güneş izleyicilerinin hareket yönleri gösterilmiştir.



**Şekil 3.25.** Tek eksenli güneş izleyicilerin yönleri

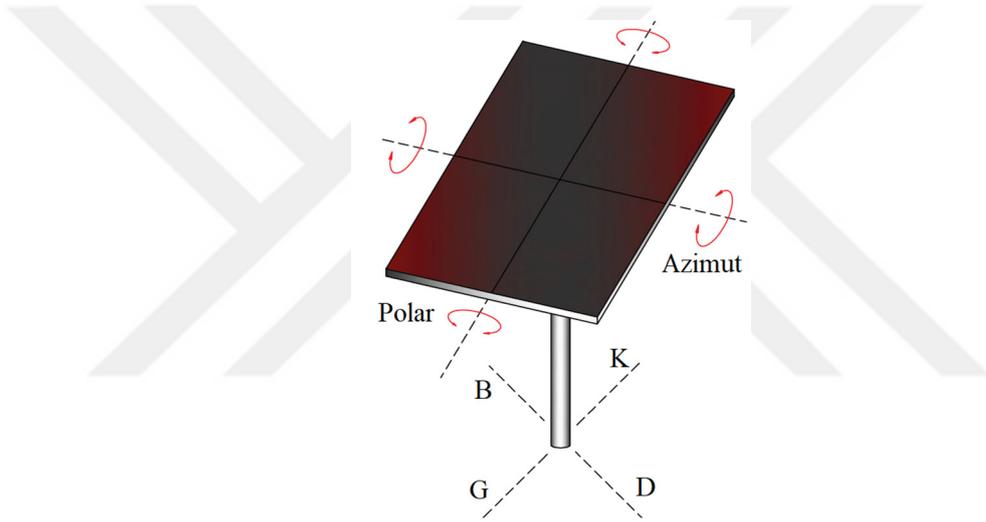
Doğu-batı yönünde izleme yapabilen polar eksenli güneş izleyicileri, kuzey-güney yönünde izleme yapabilen azimut eksenli izleyiciye göre, güneşin izlediği yol ile panellerin hareket şekli arasındaki geometrik ilişkiden dolayı daha büyük enerji kazanımları sunar. Ancak uygulama kolaylığı ve maliyet bakımından azimut eksenli izleyiciler daha avantajlıdır. Şekil 3.26'da 3,5 kW gücünde polar eksenli güneş takip sistemine ait bir uygulama gösterilmiştir.



**Şekil 3.26.** Polar tek eksen izleyicili bir PV uygulaması

### 3.5.1.2. İki Eksenli Güneş İzleyicileri

İki eksenli güneş izleyicileri PV uygulamalarında yeryüzüne direkt veya dolaylı olarak ulaşan güneş ışınım enerjisinden azami düzeyde faydalanmak için tasarlanırlar. Bu sistemler, uygulandıkları panel veya dizileri güneşin doğuşundan batışına kadar, hem kuzey-güney hem de doğu-batı yönünde izleyerek, güneş ışınlarının panel yüzeyine gün boyunca dik gelmesini sağlamaktadırlar. Sabit sistemlere göre sağladıkları %30 ile %40 arasındaki enerji kazancı bu sistemlerin tercih edilmesindeki en büyük etkidir. Şekil 3.27’de aynı anda hem polar hem de azimut doğrultusuna göre hareket edebilen iki eksenli güneş izleyicilerinin hareket yönleri gösterilmiştir.



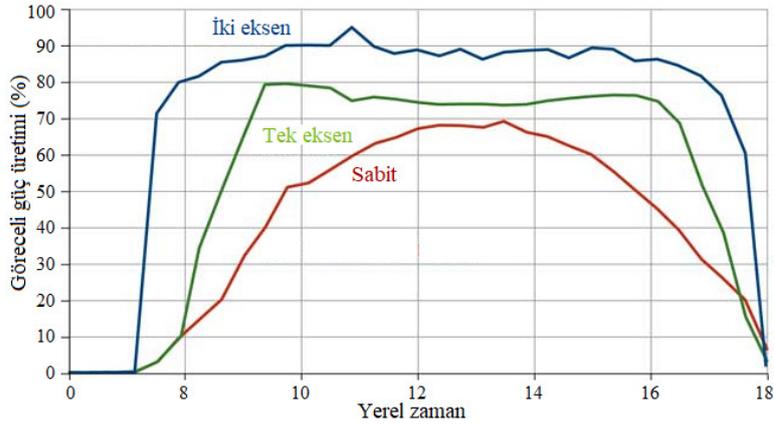
Şekil 3.27. İki eksenli güneş izleyicilerin yönleri

İki eksenli güneş izleyicileri, sağladıkları yüksek enerji dönüşüm kazançlarının yanında, kontrol sistemlerinin karmaşık olması ve özellikle büyük güçlü uygulamalarda karşılaşılan mekanik zorlukların doğurduğu maliyetler yüzünden, müteşebbisler tarafından çok tercih edilmeyen sistemlerdir. Büyük güçlü uygulamalarda, özellikle PV panel fiyatlarındaki düşüşlerden sonra, hareketsiz panel sistemleri veya tesis ve işletme açısından görece düşük maliyet doğuran tek eksenli güneş izleyici sistemler tercih edilmektedir. Bununla beraber, orta ve küçük ölçekli uygulamalarda iki eksenli güneş izleyicileri de yoğun şekilde kullanılmaktadır. Şekil 3.28’de 3 kW gücünde iki eksenli güneş takip sistemine ait bir uygulama gösterilmiştir.



Şekil 3.28. İki eksen izleyicili bir PV uygulaması

Güneş izleyici sistemler sahip oldukları eksen sayılarına göre farklı enerji kazançları sağlarlar. Enerji kazanç oranları tüm uygulamalarda eşit olmayıp, sistemin uygulandığı bölgenin meteorolojik rejimi ve coğrafi konumu, kullanılan PV panellerin hücre teknolojileri vb. parametrelerden dolayı yapılan çalışmalarda literatüre farklı enerji kazanç oranlarının yansımaya neden olmaktadır. Şekil 3.29’da sabit açılı bir sistem ile tek eksenli ve iki eksenli güneş izleyici sistemlerine sahip eşit güçteki üç PV panelin bir gün boyunca ürettikleri güç değerleri verilmiştir.

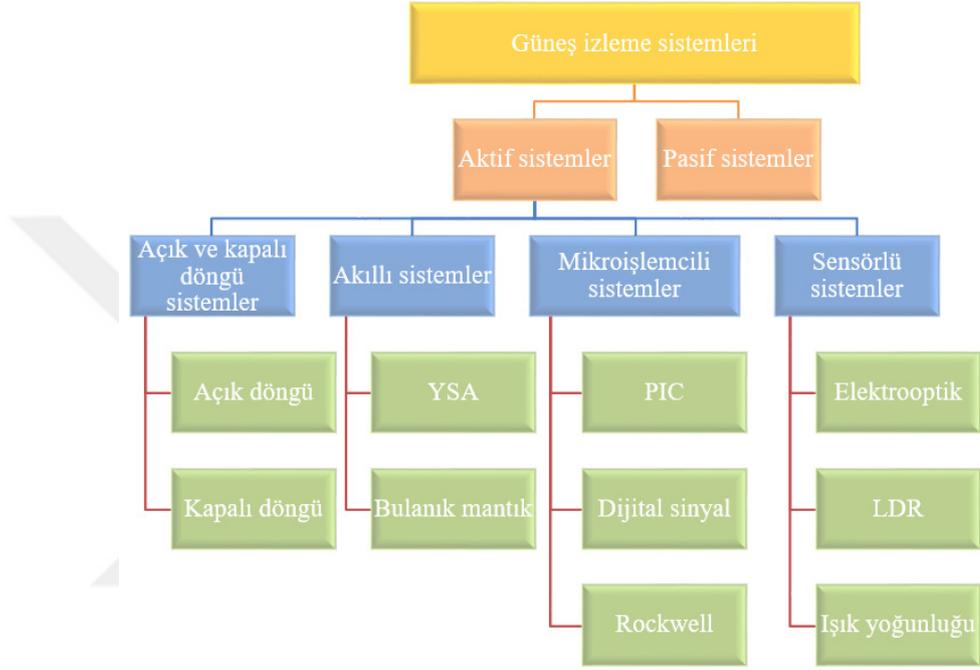


Şekil 3.29. PV panel sistemlerinin güç bakımından karşılaştırılması

### 3.5.2. Güneş İzleyici Sistemlerin Sürücü Yöntemine Göre Sınıflandırılması

Güneş izleme sistemleri kullanılan sürücü yöntemine göre genel olarak aktif ve pasif takip sistemleri olarak iki ana grup altında toplanmaktadır [97]. Aktif sistemler, PV panel

veya dizileri güneşi takip edecek şekilde kontrol etmek üzere motor ve dişli sistemlerini kullanırken, pasif sistemler güneş ışınlarının ısı etkisiyle kaynayabilecek kadar düşük kaynama noktasına sahip sıvılaştırılmış gazlar içeren sistemler üzerine inşa edilmiştir [98, 99]. Şekil 3.30'da güneş izleme sistemleri kullanılan sürücü tekniğine göre sınıflandırılmıştır.



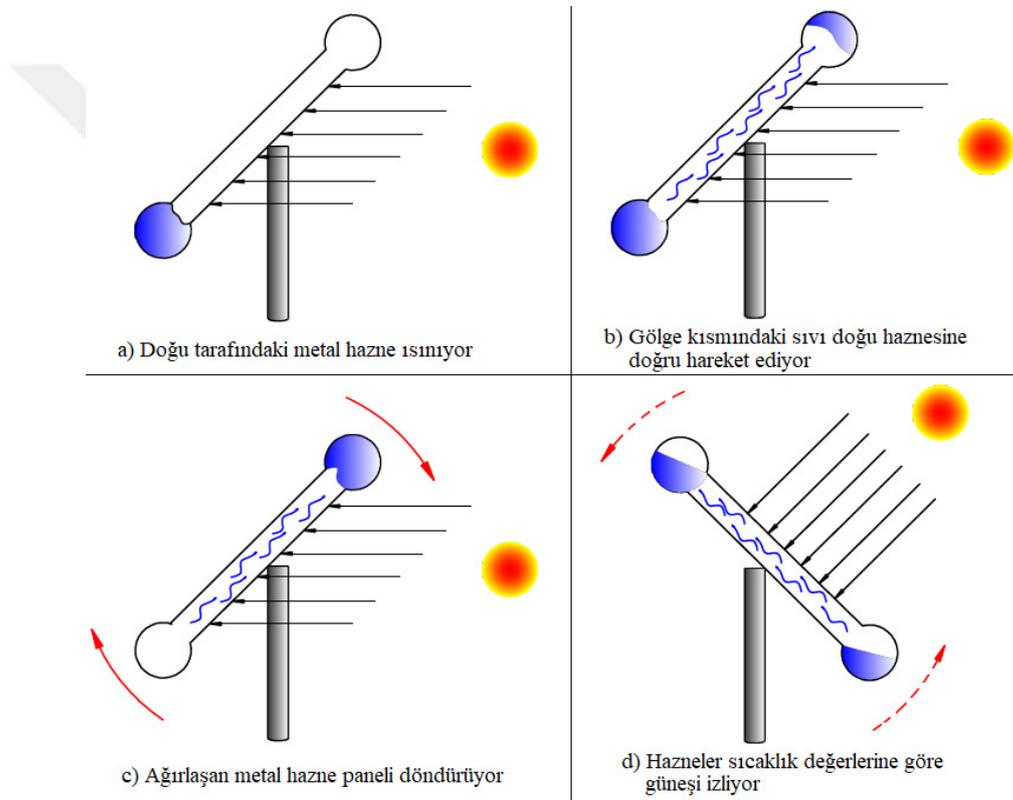
Şekil 3.30. Sürücü tekniğine göre güneş izleme sistemlerinin sınıflandırılması

### 3.5.2.1. Pasif Güneş İzleme Sistemleri

Pasif güneş takip sistemlerinde, panellere monte edilen içinde kaynama noktası düşük bir sıvı barındıran metal haznelere kullanılır. Bu metal hazne içindeki sıvıyı ısıtmak için güneşin ışınım enerjisi kullanılır. Bu sistemlerin çalışma prensibi, ısınan gazların genişmesi üzerinedir. Güneşe maruz kalan gaz genişlerken kendisinden daha ağır sıvıyı gölgede kalan metal hazneye doğru iter, uygun bir mekanizma sayesinde sistemin ağırlık merkezini değiştirmek suretiyle PV sisteminin dönmesi sağlanmaktadır [100]. Şekil 3.31 pasif güneş takip sistemlerinin çalışma sürecini göstermektedir.

Pasif güneş izleme sistemleri elektrik enerjisi kullanmayan hidrolik ya da pnomatik yapılardan oluşmaktadır. Bu sistemlerde kayış, kasnak, redüktör, aktüatör, motor gibi maliyeti artırıcı ekipmanlar kullanılmamaktadır. Bu yöntem ile güneş izleme sistemleri

üreten firmalar, yöntemin maliyet ve enerji kazanım oranı açısından diğer sistemlere göre daha avantajlı olduğunu iddia etmektedirler. Ancak bu sistemler, güneşi hassas bir şekilde takip edememe ve rüzgârdan etkilenecek kadar hassas bir mekanizmaya sahip olmaları başta olmak üzere kararlılık ve hız sorunları barındırmaktadır. Bununla beraber Narendrasinh vd.nin [101] geliştirdiği yeni nesil bir pasif güneş izleyicinin, sabit açılı sistemlere göre yaklaşık %23 enerji kazanımı sağladığı kaydedilmiştir. Araştırmacıların Zomework prensibine dayanarak geliştirdikleri izleyicide bulunan metal haznelerde tiner, etanol ve aseton olmak üzere üç sıvı kullanılmıştır.



Şekil 3.31. Pasif güneş takip sistemlerinin çalışma süreci

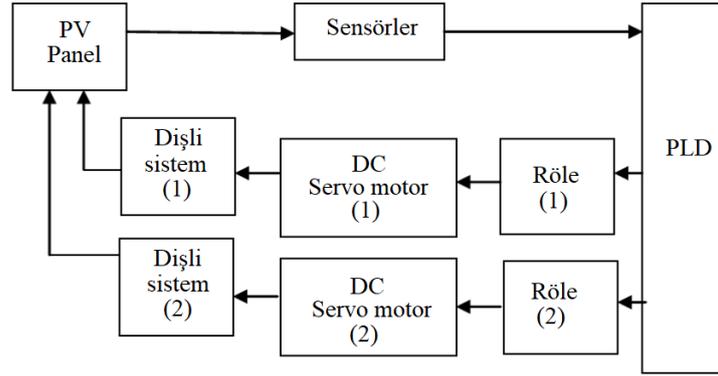
### 3.5.2.2. Aktif Güneş İzleme Sistemleri

Aktif güneş izleme sistemleri, PV panelleri güneşe yönlendirmek için motor, kayış-kasnak, dişli gibi ekipmanları ve bu mekanizmaları kontrol eden denetleyicileri kullanan sistemlerdir. Aktif takip sistemleri; üçgen güneş paneli, dönen hücre, tek eksenli izleme, çift eksenli izleme olmak üzere başlıca dört takip kategorisinde toplanmaktadır. Üçgen güneş paneli izleme sistemlerinde PV modüller, eşit miktarda güneş ışığı alabilecek şekilde zıt

yönlerde konumlandırılmaktadır. Uygulanabilirlik bakımından basit ve ucuz olan tek eksenli izleme sistemleri, sadece yatay ve dikey olarak yönlendirilebildiğinden verimlilikleri düşüktür. İki eksenli izleme sistemlerinde PV modüller yatay ve dikey olarak yönlendirilebilmektedir. Dönen hücre güneş takip sistemlerinde, güneş pilleri konik bir çerçeve üzerine yerleştirilmektedir. Bu sistemler dönel bir yapıya sahip olduğundan, üzerlerinde bulunan PV modüllerinin hareket ettirilmesine gerek yoktur [102]. Verimlilik, uygulanabilirlik, kararlılık ve güvenilirlik bakımından en çok kullanılan aktif güneş izleme sistemleri, tek eksenli ve iki eksenli sistemlerdir. Aktif güneş izleme sistemleri kullandıkları sürücü tekniğine göre, sensörlü, mikrodenetleyicili, akıllı ve açık/kapalı döngü olmak üzere başlıca dört kategoride toplanmaktadır [103].

#### **3.5.2.2.1. Sensörlü Aktif Güneş İzleme Sistemleri**

Foto dedektörleri olarak da bilinen ışık sensörleri, ışık kaynaklarını algılayan ve ışık sinyallerini gerilim veya akıma dönüştürülebilen devre elemanlarıdır. Güneş pilleri soğurdukları ışığı elektrik enerjisine çevirdikleri için yapı olarak foto dedektörlere benzerler. Elektrooptik sensörlerin ışık şiddeti değişimini algılayabilmeleri, birçok endüstriyel uygulamada kullanılan devre elemanları olmalarını sağlamıştır. Optik sensörler, algıladıkları ışık şiddeti miktarını, tetikleme devreleriyle okunabilir bir biçimde ölçebilirler. Bu tetikleyici devreler, optik sensörlerden gelen ışık şiddeti bilgisine göre çıkışlarındaki gerilim değerini arttırıp azaltabilecek şekilde tasarlanırlar. Güneş izleme sistemlerini çalıştırmak için çok sayıda optik sensör kullanılmıştır. Bunlardan en çok kullanılanı ışığa bağımlı dirençlerdir (LDR). LDR'ler, buldukları ortamın aydınlık düzeyine göre direnç değerlerini değiştirmektedirler. Teorik olarak karanlık bir ortamda dirençleri sonsuza yakın bir değerken, aydınlık düzeyinin yüksek olduğu ortamlarda direnç değerleri sıfıra yakın bir değer almaktadır. Optik sensörler, basit elektronik devrelerle beraber kullanılabilirdiği gibi kontrol bakımından daha kararlı çalışan programlanabilir lojik denetleyiciler (PLD) gibi sistemlerle de kullanılabilirler. Şekil 3.32'de 4 adet LDR'den gelen ışık şiddeti bilgisine göre güneşi iki eksenle izleyebilen programlanabilir lojik denetleyicili bir sisteme ilişkin blok diyagramı verilmiştir [104].



Şekil 3.32. PLD tabanlı güneş izleyici blok diyagramı

### 3.5.2.2.2. Mikroişlemcili Aktif Güneş İzleme Sistemleri

Mikroişlemciler ve bilgisayar sistemleri, takip sistemlerinde bulunan mekanik yapıları güneşi izleyecek şekilde rahatlıkla kontrol edebilirler. Sensörlü sistemlerden farklı olarak bu sistemler, güneşin konumunu net bir şekilde belirlemek için çeşitli algoritmalarla elde edilen matematiksel denklemleri kullanmaktadır. Ucuz maliyetleri dolayısıyla Programlanabilir Arabirim Denetleyicisi (PIC) ve Arduino gibi mikroişlemciler çok sayıda sistemde kullanılmaktadır. Mikroişlemcili izleme sistemlerinde, saat ve güneş modu olmak üzere genel anlamda iki yaklaşım söz konusudur. Saat modu yaklaşımında güneşin yeryüzü üzerinde bir yıl boyunca izlediği yörüngeye ait koordinatlar, zamanın bir fonksiyonu olarak değerlendirilmektedir. Güneş modu yaklaşımında ise, optik sensörlerden gelen ışık şiddeti bilgilerinin yine çeşitli algoritmalar aracılığıyla güneşi takip edecek şekilde kullanılması söz konusudur [105].

### 3.5.2.2.3. Akıllı Aktif Güneş İzleme Sistemleri

Yapay zekâ, güneş izleme sistemlerini çalıştırmak için birçok uygulamada kullanılmıştır [106, 107]. Bulanık mantık, yapay sinir ağları ve her ikisinin bir kombinasyonu olarak geliştirilen bulanık sinir ağları vb. çeşitli yapay zekâ teknikleri, güneş izleme sistemlerini kontrol etmek için kullanılmaktadır [103]. Bu teknikler, PV panellerin gün boyunca güneşi izlemesini sağlamak üzere, sistemlere ait mekanizmaları kontrol etmekle birlikte, daha çok PV panellerden azami verim elde etmek amacıyla MPPT sistemlerin temelini teşkil etmektedirler. Yapay zekâ teknikleriyle donatılmış MPPT sistemleri, PV panellere ait I-V

karakteristiklerinden elde edilen veriler ışığında, farklı güneş ışınımı değerlerine göre panellerin en verimli çalıştığı noktayı tespit ve takip ederler [108].

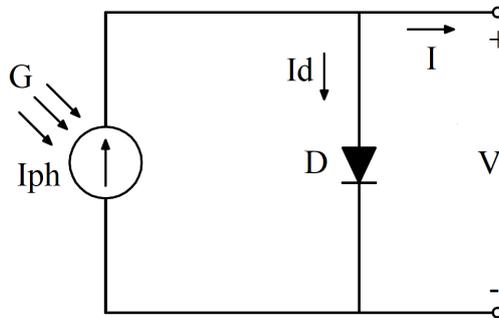
### 3.6. Fotovoltaik Hücrelerin Modellenmesi

Çeşitli çevre koşullarında bir PV hücrenin davranışını tanımlamak üzere, MPPT sistemlerinin ihtiyaç duyduğu akım-gerilim (I-V) ve güç-gerilim (P-V) karakteristik eğrilerini elde edebilmek için güneş hücrelerinin modellenmesi gerekmektedir. Yapılan çalışmalarda, PV hücrelerin matematiksel modellenmesinde ortak yaklaşım, hücrelerin yarı iletken malzemelerden üretilmesinden dolayı, P-N jonksiyonu içeren bir diyodun ışınım kaynaklı bir akım kaynağına paralel bağlanması üzerinde yoğunlaşmıştır [109]. PV hücrelerin veya panellerin farklı sıcaklık ve ışınım değerleri altındaki davranışını belirlemek üzere yapılan benzetim çalışmalarında birçok model sunulmuştur [110-112].

Bu alanda yapılan çalışmalarda literatüre tek diyotlu model, iki diyotlu model, üç diyotlu model, kısmi gölgelemeli model başta olmak üzere birçok parametrik model sunulmuştur. En yaygın olarak kullanılan modeller, I-V ve P-V eğrilerinin elde edilmesinde minimum hata veren ve gerçek bir PV hücrenin farklı koşullar altındaki karakteristiğini daha iyi yansıtan tek diyot ve iki diyotlu modellerdir [109].

#### 3.6.1. İdeal Tek Diyotlu Model

PV hücrelere ilişkin en temel elektriksel model şekil 3.33'te verilmiştir. Kayıpların ihmal edilmesiyle elde edilen bu model, ışınım enerjisinin dönüşümünü ifade eden bir akım kaynağı ve bir diyottan oluşmaktadır.



Şekil 3.33. İdeal tek diyotlu model

Şekil 3.33'teki devreye Kirchhoff'un akımlar kanunu uygulanırsa,

$$I = I_{PH} - I_D \quad (3.15)$$

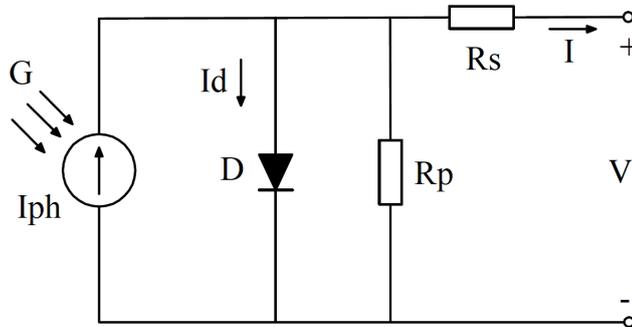
eşitliği elde edilir. Burada  $I$  hücre akımını,  $I_{PH}$  foton akımını,  $I_D$  diyot akımını göstermektedir. Denklem (3.15)'teki  $I_D$  diyot akımı,

$$I_D = I_S \left( e^{\frac{V}{mV_T}} \right) - 1 \quad (3.16)$$

eşitliğiyle sağlanmaktadır. Burada,  $I_S$  diyotun ters yönde doyma akımını,  $V$  hücrenin çıkış gerilimini,  $1 \leq m \leq 2$  olmak üzere  $m$  diyot faktörünü,  $V_T + 25^\circ$  STC halinde 25,7 mV değerini alan termal gerilimi ifade etmektedir.

### 3.6.2. Gerçek Tek Diyotlu Model

Güneş ışınımıyla gelen fotonlar PV hücre içinde elektronları hareket ettirirken kullanılan malzemeye göre çeşitli gerilim düşümleri ve kaçak akımlar meydana gelmektedir. Bu yüzden PV hücreler modellenirken, gerçeğe daha yakın bir sonuç elde edebilmek için bu hususlar göz önünde bulundurulmalıdır. Bu amaçla ideal tek diyotlu modele ilaveten, hücre üzerinde meydana gelen gerilim düşümlerini temsil etmek üzere  $R_S$  ve kaçak akımları temsil etmek üzere  $R_P$  paralel direnci kullanılmaktadır. Şekil 3.34'te gerçek tek diyotlu modelin elektrik eşdeğer devresi verilmiştir.



Şekil 3.34. Gerçek tek diyotlu model

Şekil 3.34'teki devreye Kirchhoff'un akımlar kanunu uygulanırsa,

$$I_{PH} - I_D - I_p - I = 0 \quad (3.17)$$

eşitliği elde edilir. İdeal tek diyotlu modelde kullanılan  $I_D$  diyot akımı Denklem (3.17)'de yerine konulursa,

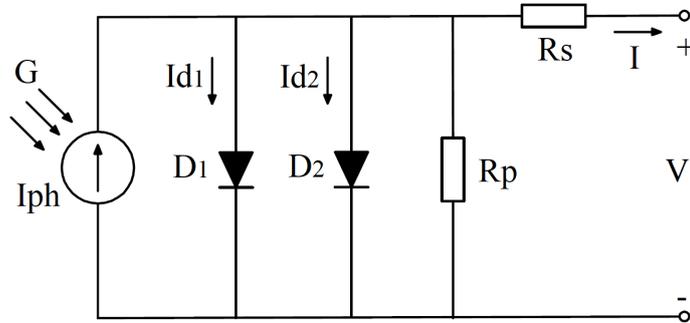
$$I = I_{PH} - I_S \left( \left( e^{\frac{V+I.R_S}{m.V_T}} \right) - 1 \right) - \frac{V + I.R_S}{R_p} \quad (3.18)$$

ifadesi elde edilir.

Denklem (3.18) ile hücre gerilimi ve akımının hesaplanması ideal diyotlu modeldeki gibi basit olmayıp lineer olmayan denklemlerin çözümünde kullanılan nümerik analiz yöntemlerinin kullanılmasını gerektirmektedir [113].

### 3.6.3. İki Diyotlu Model

İki diyotlu modelde, ideal tek diyotlu ve gerçek tek diyotlu modelde bulunmayan ikinci bir diyot kullanılmaktadır. Bu modellerde yerleştirilen ikinci diyotla, diyot faktörü  $m$ 'nin alabileceği değer aralığını genişletmek amaçlanmaktadır. Şekil 3.35'te iki diyotlu modelin elektriksel eşdeğer devresi verilmiştir.



Şekil 3.35. İki diyotlu model

Şekil 3.35'teki devreye Kirchhoff'un akımlar kanunu uygulanırsa,

$$I_{PH} - I_{D1} - I_{D2} - I_p - I = 0 \quad (3.19)$$

eşitliği elde edilir.  $I_{D1}$  ve  $I_{D2}$  diyotlarına ilişkin akım denklemleri Denklem (3.19)'da yerine konulup gerekli sadeleştirmeler yapılırsa,

$$I = I_{PH} - I_{S1} \left( \left( e^{\frac{V+I.R_S}{m_1.V_T}} \right) - 1 \right) - I_{S2} \left( \left( e^{\frac{V+I.R_S}{m_2.V_T}} \right) - 1 \right) - \frac{V + I.R_S}{R_p} \quad (3.20)$$

ifadesi elde edilir.

PV hücre akım ve gerilim ilişkisini belirlemek üzere Denklem (3.20)'ye ilişkin geliştirilen çözüm yöntemleri, iki diyotlu modelde kalite faktörü bilinmeyen iki diyot mevcut olduğundan, tek diyotlu modellere göre daha karmaşıktır.

#### 4. PV PANELLER İLE ÜRETİLEN ENERJİNİN TAHMİN EDİLMESİ

Uluslararası Enerji Birliği'nin (IEA) 2014 yılındaki raporuna göre, son yıllarda PV uygulamalarının hızlı yayılması ve fiyat düşüşlerindeki eğilim, enerji üretimindeki paylarının beklenmedik düzeyde arttığını göstermektedir [114]. Bu rapora göre, son 10 yılda ortalama yıllık büyüme %49 olarak saptanmıştır. Sadece 2013 yılında 30 farklı ülkede toplam 37 GW kapasiteli PV sistem tesis edilerek 2012 yılına göre %35'lik bir yıllık büyüme meydana gelmiştir. IEA bu beklenmedik büyümeyi, enerji politikalarındaki yeni yaklaşımlara ve PV pazarındaki arza bağlı fiyat düşüşlerine bağlamaktadır. IEA'nın 2010'da yayımlanan yol haritasına göre 2050 yılındaki küresel enerji ihtiyacının %11'inin PV sistemler ile sağlanacağı öngörülmektedir [115].

Bir PV sisteminin çıkış gücünün başta ışınım olmak üzere, hava sıcaklığı, rüzgâr, bağıl nem oranı, hücre sıcaklığı gibi çevresel değişkenlere bağlı olduğu çok iyi bilinmektedir [14, 116]. Panel gücü ve bu çevresel değişkenler arasındaki ilişki doğrusal olmayıp, PV panel üretim teknolojilerine göre farklılık göstermektedir. Bundan dolayı, PV panellerin ürettikleri güçleri doğru ve hassas tahmin etmek, enerji sistemlerinin optimizasyonu ve fizibilite çalışmaları için önemli bir çalışmadır [14, 117].

Fotovoltaik sistemlerin enerji dönüştürme verimlilikleri, ışınım ve meteorolojik değişkenlerin büyüklüklerine bağlı olduğundan, üretilen gücün tahmin edilebilmesi, hassas modellerin geliştirilmesini gerekli kılmaktadır. PV hücre veya modüllerin modellenmesi PV araştırmalarında en önemli konulardan biridir. Bunun için maksimum güç tahmininde kullanılan I-V karakteristiklerini elde etmek üzere birçok model geliştirilmiştir. Bunlar genel olarak, belirgin  $I = f(V)$  ve örtük  $I = f(I, V)$  modelleri olmak üzere iki ayrı şekilde sınıflandırılabilir. Belirgin modeller, varsayımlar üzerine kurulu basit analitik ifadeler kullanır ve fazla işlem gerektirmezler. Örtük modeller, belirgin olanlara göre daha doğru sonuçlar verir [15]. Ancak bu modeller; seri direnç,  $R_s$ ; paralel direnç,  $R_{SH}$ ; diyot doyma akımı,  $I_0$ ; foton-kaynaklı akım,  $I_{PH}$ ; diyot faktörü  $m$  gibi üretici firmadan temin edilmesi zor olabilen bir dizi parametreye ihtiyaç duyarlar. Bu parametreler deneysel olarak elde edilebilse bile, fotovoltaik sistem tasarımcıları bu modelleri uygulamada zorluklarla karşılaşır [118]. Ayrıca PV sistemleri kullanarak enerji üretme ile ilgili fizibilite çalışmalarında, kullanılacak panelin karakteristik özelliklerinden daha çok, uygulamanın yapılacağı bölgeye ait güneş enerjisi potansiyeli daha öncelikli bir bilgidir. Bundan dolayı

birçok araştırmacı, fotovoltaik sistemlerle ilgili çalışmalarında, üreticilerin ürün katalog verilerinden bağımsız davranmak isterler. Bunun yerine, tüm PV türleri için geçerli olan çevresel bilgileri kullanan deneysel yöntemleri tercih etmektedirler. Bu yaklaşım nispi olarak daha fazla zaman alsa da, daha uyarlanabilir ve daha doğru sonuçlar vermektedir.

Bu çalışmada tek kristalli silikon bir PV panelin ürettiği enerjiyi tahmin etmek üzere, panel gücü ile meteorolojik parametreler arasındaki ilişkiyi belirlemek üzere YSA tekniği kullanılmıştır. Gerçekleştirilen tahminin doğruluğunun ve hassasiyetinin yüksek olmasını sağlamak üzere, farklı hava koşullarını dikkate alan çeşitli YSA modelleri geliştirilmiş ve test edilmiştir. Kullanılan veri setinin oluşturulmasında, güneş ışınım değerinin 365 gün boyunca günlük değişim grafiği incelenerek, bulutluluk oranına göre 4 gün tipi belirlenmiştir. ışınım değerini dalgalanmasının olmadığı günler "tamamen güneşli", ışınım değerini dalgalanmasının bir günün yarısından az olduğu günler "genellikle güneşli", ışınım değerini dalgalanmasının bir günün yarısından fazla olduğu günler "genellikle bulutlu" ve ışınım değerini dalgalanmasının gün boyunca devam ettiği günler ise "tamamen bulutlu" olarak tayin edilmiştir. Gün tiplerinin belirlenmesinde bir başka yaklaşım da güneş ışınım değerini ortalamasının belirli bir değerinin (genellikle 400 W/m<sup>2</sup>) üstünde veya altında olması durumuna göre "güneşli" veya "bulutlu" olarak sınıflandırmaktır. Ancak bu yaklaşım, aylık veya mevsimlik gibi kısa ve orta vadeyi kapsayan veri setlerinin analizinde başarı kaydetse de, dört mevsimi içeren bir yıla ait veri setlerinin analizinde çok başarılı olamamaktadır.

Geliştirilen YSA modelleri, farklı gün tipleri için birçok denemeye tabi tutulduğunda, en iyi sonucun, gün tiplerinin iki sınıfta toplanıp bunlara ait iki farklı YSA modeli kullanılması durumunda sağlandığı görülmüştür. Sabit açılı ve hareketli panel için bir yılı kapsayacak şekilde "tamamen güneşli" ve "genellikle güneşli" günler için "YSA Model-1 ve YSA Model-3", "genellikle bulutlu" ve "tamamen bulutlu" günler için "YSA Model-2 ve YSA Model-4" olmak üzere toplam dört model geliştirilmesi uygun görülmüştür.

#### **4.1. Materyal**

Bu çalışmada kullanılan deney seti temel olarak üç ünitelerden oluşmaktadır. Çalışma hem sabit hem de hareketli panelleri kapsadığı için, PV panelleri bir yıl boyunca belli bir konumda tutmaya yarayan mekanik bir düzenek ve doğu-batı yönünde hareket edebilen polar eksenli bir güneş izleyici mekanizma tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Güneş ışınım miktarını ölçmeye yarayan piranometre ile birlikte, hava sıcaklığı, bağıl nem oranı, rüzgâr

yönü ve rüzgâr hızını ölçmeye yarayan sensörleri bir arada ve uygun konumlarda tutmak üzere üçüncü bir ünite olan meteoroloji istasyonu tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Sabit açılı ve hareketli PV panellerin ürettiği enerji değerleri ile meteorolojik sensörlerden alınan verileri kaydetmek üzere kullanılan data-logger ve bu cihazı beslemek üzere kullanılan küçük güçlü PV panel de üçüncü ünite olan meteoroloji istasyonuna ait mekanizma üzerine tespit edilmiştir. Çalışma ortamı olarak, harici yapılar tarafından gölgelenmeyen bir yer tercih edilmiştir. Deneysel çalışma için tasarlanıp gerçekleştirilen bu üç ünite tam olarak, 37°54''12.19' kuzey enlemi ve 41°07''46.76' doğu boylamında bulunan Batman Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi binasının üzerine konumlandırılmıştır. Batman ili, Türkiye'nin güneşlenme açısından en iyi olduğu bölgelerden olan Güneydoğu Anadolu bölgesinde bulunup denizden yüksekliği 550 m'dir.

#### **4.1.1. Sabit Açılı Panel**

PV'ler ile elektrik enerjisi üretiminde, özellikle son yıllarda panel fiyatlarının düşmesiyle en yaygın kullanım alanı bulan yöntem, PV panellerin güneş izleyicisi barındırmayan metal yapılar üzerine konumlandırılmasıyla gerçekleştirilen uygulamalardır. Güneş ışınım enerjisinden azami düzeyde faydalanılabilmesi için, araştırmacılar tarafından Dünya üzerinde bulunan tüm bölgelere ilişkin, yıllık, mevsimlik ve aylık optimum güneş açısı değerleri sunulmaktadır. Güneş izleyici herhangi bir sistem barındırmayan metal yapıların üzerine tespit edilen PV dizileri, yıl boyunca sabit bir açıda olabildiği gibi, panel verimliliklerini artırmak üzere uygulamaya dâhil edilen hidrolik, pnomatik veya dişli sistemlerle bu açılar mevsimlik veya aylık olarak değiştirilebilmektedir. Ancak özellikle büyük güçlü PV uygulamalarında karşılaşılabilecek mekanik problemlerden ötürü, yıl boyunca sabit açıda konumlandırılan panel dizileri tercih edilmektedir.

Deneysel çalışmanın birinci ünitesini teşkil eden sabit açılı panel için, daha sonra yapılması düşünülen çalışmalarda kullanılmak üzere eğim açısı ayarlanabilen mekanik bir düzenek tasarlanmışsa da bu çalışmada panele ait eğim açısı bir yıl boyunca hiç değiştirilmemiştir. Şekil 4.1'de, farklı perspektiflerde sabit açılı panele ilişkin görüntüler verilmiştir. Uygulama gerçekleştirilmeden önce, sistemin katı modeli SolidWorks [119] yazılımı ile tasarlanmış olup, uygulamada yer alan bütün bileşenlere ait çizimler ölçeksiz olarak Ek 1'de ve sistemin bütününe ait ölçekli montaj görüntüsü Ek 2'de verilmiştir.



**Şekil 4.1.** Sabit açılı panel uygulaması

Şekil 4.1’de görüldüğü gibi, uygulama kapsamında sadece bir tanesi kullanılacak olan iki adet PV panel eğim açısı ayarlanabilen çelik bir yapı üzerine tespit edilmiştir. Uygulamada fiziksel yapı, panel güney yönüne bakacak şekilde zemine monte edilmiştir. Rüzgâr ve kar yükü düşünülerek gerekli mukavemeti sağlayacak şekilde oluşturulan bu düzeneğin üzerine tespit edilen panellerin eğim açısı, mafsal aracılığıyla bir yıl boyunca değiştirilmemek üzere Batman ili için optimum değer olan  $31^\circ$  olarak ayarlanmıştır [120].

Deneysel çalışmada, STC’de maksimum 90 W güç üretebilen tek kristalli silikon bir PV panel kullanılmıştır. PV panele ilişkin karakteristik özellikler Tablo 4.1’de listelenmiştir.

**Tablo 4.1.** Kullanılan panele ait karakteristik özellikler

Maksimum güç ( $P_{max}$ )	90 W
Optimum işletme akımı ( $I_{oc}$ )	5.233 A
Optimum işletme gerilimi ( $V_{oc}$ )	17.2 V
Kısa devre akımı ( $I_{sc}$ )	5.848 A
Açık devre gerilimi ( $V_{oc}$ )	22 V
Ağırlık	8.5 kg
Ebat	910*670*35 mm
AM= 1.5, E=1000 W/m <sup>2</sup> , Tc=25 C°	

Bağıl hava kütlesi değerinin 1.5, güneş ışınım miktarının 1000 W/m<sup>2</sup> ve hava sıcaklığının 25 C° olduğu koşullarda 90 W güç üretebilen bu PV panel, farklı hava şartlarında genellikle bu değerden daha küçük güçler üretmektedir. Hem sabit açılı panel hem de tek eksen güneş izleyicili panel rezistif bir yüke bağlanmıştır. Şekil 4.2’de tasarlanan rezistif yük gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Rezistif yük

PV panelin ürettiği güç değerini ölçebilmek için panelin yüklenmesi gerekmektedir. Kullanılan PV'ye ait standart koşullarda üretilen güç değeri 90 W olduğundan, optimum işletme gerilimde 90 W güç harcayacak rezistif bir yük tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan rezistif yükte krom nikel CN80 (%80 Ni, %20 Cr) malzemesi kullanılmıştır. Bu malzeme, ısıl direnç katsayısı  $\alpha=0,14$  ( $1/^\circ\text{C}\cdot 10^{-3}$ ) değeriyle en düşük alaşımlardan biridir. Ayrıca bu malzemenin oksijen ile tepkimeye girmeme özelliği, direnç değerinin uzun vadede sabit kalmasını sağlayarak, bir yıl boyunca kaydedilecek verilerin hatasız olmasını temin etmiştir.

Sensörlerden gelecek verilerin kaydedilmesi için kullanılan data-logger 0 ile 5 V arasındaki gerilimleri okumaya elverişlidir. Bunun yanında, Tablo 4.1'de verilen PV karakteristiklerine bakıldığında, ışınım miktarına göre panellerin yaklaşık 0 ile 17 V arasında gerilim ürettiği görülmektedir. Data-logger'ın bu gerilim değerlerini okuması imkânsızdır. Bu gerilim değerinin data-logger'ın gerilim okuma aralıklarına indirilebilmesi için bir gerilim bölücü devre tasarlanmıştır. Şekil 4.3'te tasarlanan gerilim bölücü devre gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Gerilim bölücü devre

Gerilim bölücü devrede, dirençlerden geçen akımın oluşturacağı ısı etkisini azaltmak için pasif soğutucular kullanılmıştır. Sabit açılı ve hareketli panellerin ürettiği enerji önce rezistif yüke bağlanmıştır. Gerilim bölücü devreler, sabit açılı ve hareketli panellerin beslediği yüklerle paralel bağlı olup yaklaşık 0 ile 2500 mV arasında değişen düşük gerilim uçları data-logger'a bağlanmıştır. Yük altındaki panellerin ürettiği gerçek gerilim değeri, gerilim bölücü devrenin dönüştürme katsayısı kullanılarak tespit edilmiştir.

#### **4.1.2. Tek Eksen Hareketli Panel**

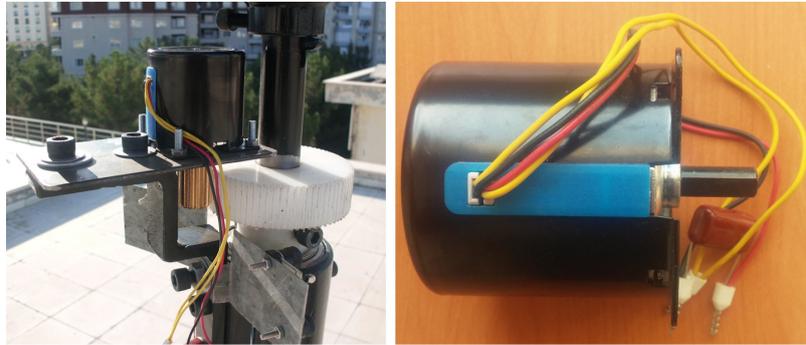
Güneş enerjisi ile elektrik üretimi uygulamalarında, kullanılan panellerin üretebilecekleri enerjinin artırılması için, gün boyunca panel yüzeyleri güneşe yönlendirmek üzere güneş izleyici sistemler kullanılmaktadır. Güneş izleyici sistemler genel olarak tek eksenli ve iki eksenli olarak tasarlanırlar. Dünya genelinde, sahip oldukları görece hafif ve basit mekanik yapıları dolayısıyla tek izleyici sistemler tercih edilmektedir. Tek eksenli izleyicileri tercih etmenin bir diğer nedeni, sabit eğimli PV uygulamalara göre, sistemin kurulduğu bölgelerin coğrafi özelliklerine bağlı olarak sağladığı %15 ile %20 arasındaki enerji kazancıdır. Bunun dışında izleyici sistemlerin kullanılması durumunda, uygulama bölgesindeki gölgelenme miktarı ve alan kısıtlılığı da tek eksenli güneş izleyicilerini tercih sebebi hâline getirebilmektedir.

Çalışma kapsamında, sabit açılı panelin yanında, doğu-batı yönünde güneş izleyicili sistemle hareket ettirilen bir PV panelin üreteceği enerjinin meteorolojik parametrelerle ilişkisi de incelenmiştir. Deneysel çalışmanın ikinci ünitesini teşkil eden hareketli panel için tasarlanan ve gerçekleştirilen güneş izleyicili sistem hem doğu-batı hem de kuzey-güney yönünde güneşi izleyen bir yapıya sahiptir. Ancak çalışma kapsamında, eğim açısı bir yıl için sabit olmak üzere Batman ili için optimum değer olan  $31^\circ$  olarak ayarlanmış olup, düzeneğin kuzey-güney yönünde hareket etmesini sağlayan redüktörlü doğrusal aktüatör devre dışı bırakılmıştır. Şekil 4.4'te, farklı perspektiflerde hareketli panele ait uygulama görüntüleri sunulmuştur. Güneş izleyicili panele ait uygulama gerçekleştirilmeden önce, sistemin katı modeli SolidWorks yazılımı ile tasarlanmış olup, uygulamada yer alan bütün bileşenlere ait çizimler ölçeksiz olarak Ek 3'te ve sistemin bütününe ait ölçekli montaj görüntüsü Ek 4'te verilmiştir.



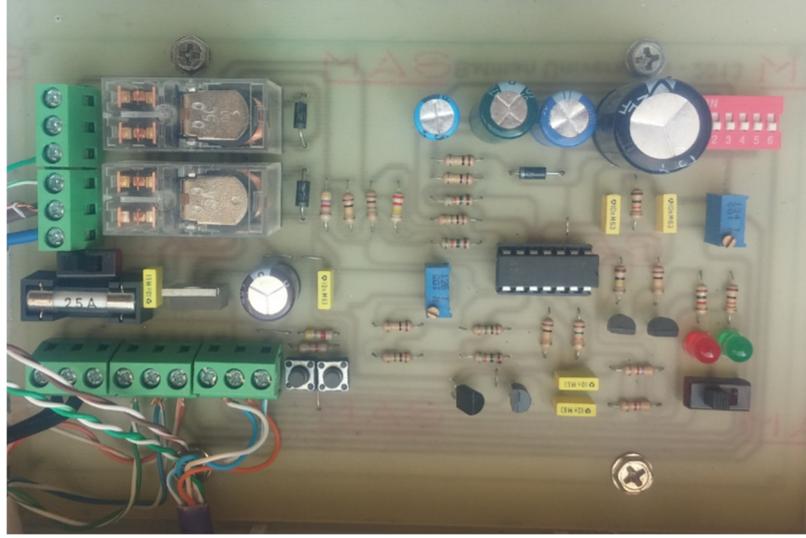
**Şekil 4.4.** Hareketli panel uygulaması

Hareketli sistemde kullanılan PV panel sabit eğimli ünite de kullanılan panel ile aynı karakteristik özelliklere sahiptir. Geliştirilen izleyici sistemin hareket enerjisi, redüktör içeren 220 volt 5 devir/dakika senkron bir alternatif akım motoru ile sağlanmıştır. PV panel hareketinin daha küçük açılarla gerçekleşebilmesi için ayrıca 12/62 oranında bir redüktör sistemi tasarlanmıştır. Hareketli mekanizma için kullanılan senkron motor ve redüktör sistemi Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



**Şekil 4.5.** Hareketli panel için kullanılan motor ve redüktör sistemi

Tek eksenli güneş izleyici sistemin tasarımında, panel hareketini sağlayacak motorun kontrolünde, aktif izleyici sistemler içinde yer alan açık döngü LDR sensörlü yaklaşım tercih edilmiştir. Motorun ileri veya geri yöndeki hareketini sağlamak üzere, LDR'lerin ışınım miktarına göre gösterdikleri farklı direnç değerlerini kullanma esasına göre çalışan bir denetleyici tasarlanmıştır. Uygulaması gerçekleştirilen elektronik kart Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Hareketli panel denetleyicisine ait benzetim devresi Ek 5'te, baskılı devre (PCB) ve üç boyutlu görüntüsü Ek 6'da sunulmuştur.



Şekil 4.6. Hareketli panel denetleyici devresi

LM339N gerilim karşılaştırma entegresi kullanılarak tasarlanan denetleyici devre, güneş izleyici sistemin üzerine konumlandırılmış iki adet LDR'nin üzerine düşen ışık şiddeti farkı esasına göre çalışmaktadır. Doğu ve batı yönünde konumlandırılmış iki adet LDR'nin arasına, güneş batıya doğru hareket ettikçe, doğu yönünde kalan LDR'yi gölgelemeye yarayan bir materyal tespit edilmiştir. Bu durumda LM339N gerilim karşılaştırıcı entegre, PV panelleri taşıyan mekanizmayı hareket ettiren motoru süren transistörü, iki LDR'nin eşit şekilde ışık şiddeti alacağı pozisyona gelinceye kadar tetiklemektedir. Bu şekilde güneş batıncaya veya mekanizma batı yönündeki sınır anahtarına değinceye kadar güneş izlenmektedir. Aydınlık düzeyinin düşmesi hâlinde, her iki LDR yüksek direnç göstermekte ve motor, mekanizma doğu yönündeki sınır anahtarına değinceye kadar ters yönde çalışmaktadır. Böylece sistem bir sonraki gün için park durumuna gelmektedir. Ayrıca bulutlu ve rüzgârlı hava şartlarının sebep olabileceği ani ışınım miktarı değişimlerinin, hareketli mekanizmanın kararlılığına zarar vermemesi için, denetleyici devrenin tepkisi eklenen R-L devreleri sayesinde, 2 ile 10 saniye arasında geciktirilmiştir.

Güneş izleyici sistemin ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisi, yaşanabilecek elektrik kesintilerinden dolayı kesintisiz güç kaynağı üzerinden sağlanmıştır.

#### 4.1.3. Meteoroloji İstasyonu

Çalışma kapsamında, sabit eğimli ve tek eksenli güneş izleyicili panelin tesis edildiği ortama ait güneş ışınımı miktarı, hava sıcaklığı, bağıl nem oranı, rüzgâr hızı ve rüzgâr yönü

değişkenlerini bir yıl boyunca kaydetmek üzere, bu büyüklükleri ölçen sensörlerle beraber elde edilen verileri kaydetmeye yarayan data-logger, gerçekleştirilen metal yapı üzerine uygun şekilde konumlandırılmıştır. Şekil 4.7’de meteoroloji istasyonuna ait uygulama görüntüleri farklı perspektiflerde verilmiştir. Deneysel çalışmanın üçüncü ünitesini teşkil eden meteoroloji istasyonuna ait metal yapı gerçekleştirilmeden önce, katı modeli SolidWorks yazılımı ile tasarlanmış olup, üniteye yer alan bütün bileşenlere ait çizimler ölçeksiz olarak Ek 7’de ve ünitenin bütününe ait montaj görüntüsü ölçekli olarak Ek 8’de sunulmuştur.



Şekil 4.7. Meteoroloji istasyonu uygulama görüntüleri

Meteoroloji istasyonunda güneş ışınımı miktarını ölçmek üzere, Kipp&Zonen firmasının CMP6 piranometresi kullanılmıştır. CMP6 piranometresinin hassasiyeti  $5-20 \mu V/W/m^2$  gibi oldukça tatmin edici bir değerdir. Piranometrenin doğru ölçüm yapmayı sürdürebilmesi için, içindeki algılayıcının nemden etkilenmesini önleyen nem tutucu, özelliğini kaybettiği zaman üreticinin tavsiye ettiği şekilde değiştirilmiştir. Batman ilinde, belirli bazı mevsimlerde havadaki toz oranı yüksek olduğundan piranometrenin üzerindeki cam tabaka 1 hafta aralıklarla temizlenmiştir. Bu işlemden sonra, ölçülen ışınım miktarı ile PV panellerden elde edilen güç büyüklüğü arasındaki ilişkinin sağlıklı kalabilmesi için PV paneller de eş zamanlı olarak temizlenmiştir. CMP6 piranometresinin diğer teknik özellikleri Ek 9’da sunulmuştur.

Hava sıcaklığı ve bağıl nem sensörü olarak Cambell Scientific firması tarafından üretilen HC2S3 probu kullanılmıştır. Ürünün ısı algılayıcısı -40 ile +60 °C, nem algılayıcısı ise 0 ile %100 RH (Relative Humidity) aralığında görev yapabilmektedir. Prob içinde bulunan PT100 RDT sıcaklık sensörünün hassasiyeti  $\pm 0,1$  °C'dir. Probda bağıl nemi ölçmek için  $\pm 0,8$  hassasiyetine sahip Rotronic sensörü kullanılmıştır. HC2S3 probunun diğer teknik özellikleri Ek 10'da sunulmuştur.

Rüzgâr yönü ve rüzgâr hızını ölçmek için NRG Systems tarafından üretilen 40C hız sensörü ve 200P yön sensörü kullanılmıştır. 40C hız sensörü 3 fincan tasarımında olup, 96 m/s'ye kadar ölçüm yapabilmektedir. Dönme hızına bağlı olarak doğrusal bir çıkış gerilimi üreten 40C hız sensörü -55 ile 60 °C sıcaklık aralıklarında çalışabilmektedir. 200P yön sensörü, 360° dönebilen, potansiyometreli mekanik tip bir sensör olup, -55 ile 60 °C işletme sıcaklığı aralığına ve %1 hassasiyete sahiptir. 40C rüzgâr hızı sensörünün ve 200P rüzgâr yönü sensörünün diğer teknik detayları Ek 11 ve Ek 12'de sunulmuştur

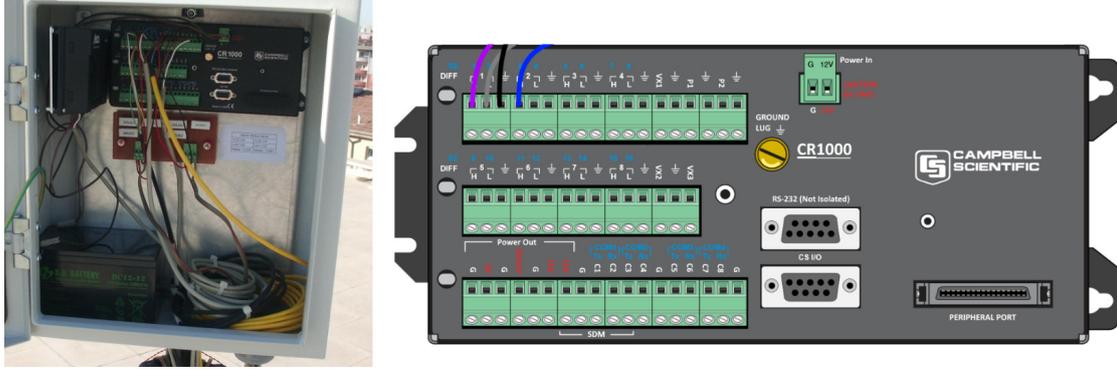
Meteoroloji istasyonunda kullanılan, CMP6 piranometresi, HC2S3 sıcaklık ve bağıl nem probu, 40C anemometresi ve 200P rüzgâr oku Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Meteoroloji istasyonunda kullanılan sensörler

Sabit açılı PV panel, tek eksen hareketli PV panel ve ortam bilgilerini ölçen sensörlerden gelen verilerin kaydedilmesi için Cambell Scientific firmasının CR1000 model data-loggeri kullanılmıştır. Bu data-logger 16 analog ve 8 dijital girişe sahip olup ihtiyacı karşılamıştır. CR1000 ile ilgili diğer teknik özellikler Ek 13'te sunulmuştur. Data-logger ve diğer tüm sensörlerin enerji ihtiyacı, meteoroloji istasyonu olarak tasarlanan metal yapıya tespit edilen

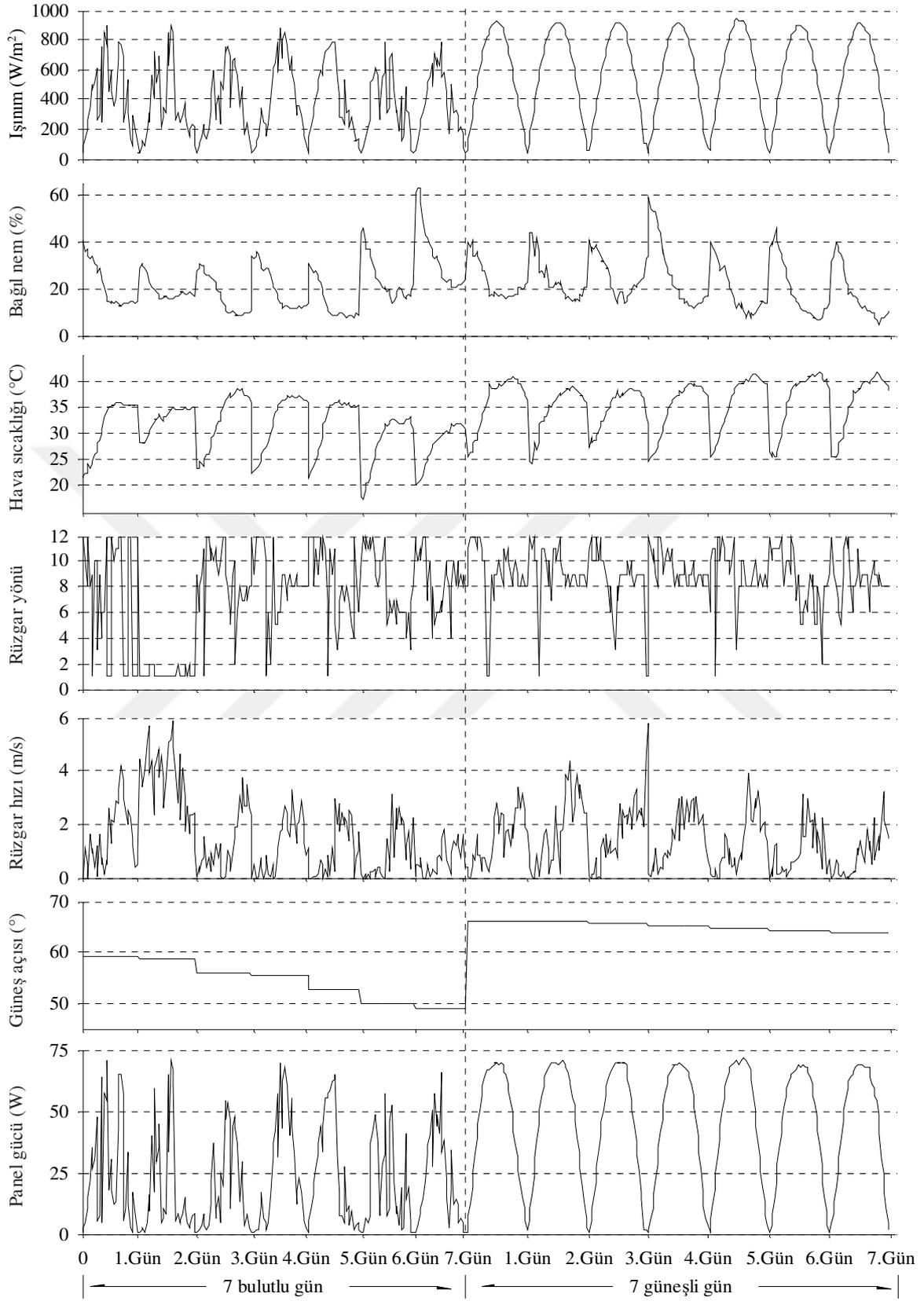
16 W'lık harici bir PV panelin beslediği 12 V'luk bir akü ile sağlanmıştır. Şekil 4.9'da CR1000 data-logger ve meteorolojik sensörlerin bağlantıları verilmiştir.



Şekil 4.9. Data-logger bağlantısı

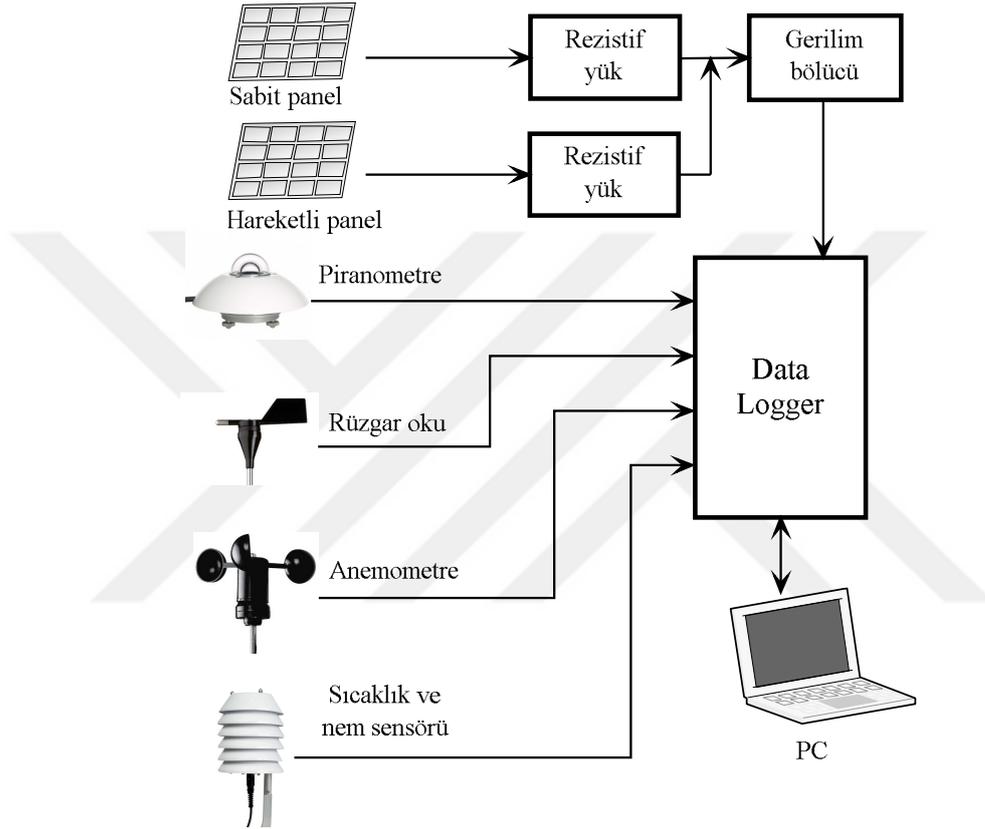
Data-logger'ın, PV panel gerilimlerini ölçmek üzere tasarlanan gerilim bölücü devreden ve sensörlerden elde edilen verileri kaydedilebilmesi için, üretici firma tarafından geliştirilen LoggerNet 4.2.1 yazılımı aracılığıyla programlanmıştır. Kendine has bir programlama dili kullanan cihazın, çalışma kapsamında istenen işleyişi sağlayabilmesi için Ek 14'teki komut kümesi yazılmıştır. Oluşturulan programda rüzgâr, hız ve yön bilgisi vektör, diğer veriler ise skaler olarak tanımlanmıştır. Cihaza ait dâhili hafıza 4 MB'tır. Veri kaybını engellemek için, belirli periyotlarla RS232 portu aracılığıyla data-logger tarafından kaydedilen veriler bir bilgisayara yedeklenmiştir.

Oluşturulan veri seti 15.07.2015 - 19.08.2016 tarihleri arasındaki, PV panellerin güç değerlerini ve meteorolojik sensör bilgilerini kapsamaktadır. Veriler, 5 dakikalık periyotlarla 5 saniyede bir alınan verilerin ortalaması olarak kaydedilmiştir. Güneşin olmadığı gece saatlerinde ve sistemin özellikle karlı havalarda bakıma alındığı günlere ait veriler çıkarıldığında; sabit açılı panel için, 28784 âdeti güneşli, 16272 âdeti bulutlu günlere ait olmak üzere toplam 45056 veri satırı, hareketli panel için ise, 28168 âdeti güneşli, 12263 âdeti bulutlu günlere ait olmak üzere toplam 40431 veri satırı elde edilmiştir. Şekil 4.10'da, 7 bulutlu ve 7 güneşli gün için kaydedilmiş, ışınım, bağıl nem, hava sıcaklığı, rüzgâr yönü, rüzgâr hızı, güneş yükseklik açısı ve PV panel gücünü gösteren grafikler verilmiştir.



**Şekil 4.10.** Ölçülen değerlere ait örnek grafikler

Batman iline ait güneş yükseklik açıları (EA), Ulusal Okyanus ve Atmosfer Dairesi'ne ait web sitesindeki yazılım aracılığıyla tespit edilmiştir [121]. Güneş yükseklik açıları bir güne ait en yüksek açı değeri olarak düşünülmüştür. Batman iline ait güneş yükseklik açıları bir yıl boyunca,  $28,66^\circ$  ila  $75,52^\circ$  arasında değişmektedir. Veri setinin elde edilmesi için kullanılan sistemin tümü, Şekil 4.11'deki blok diyagramında gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Deneysel çalışmaya ait blok diyagram

Çalışma kapsamında elde edilen verilerin analizinde ve YSA modellerinin geliştirilmesinde, "SPSS v.24", "Weka v.3.8" ve içerdiği optimizasyon algoritmalarının zenginliği ve kullanım kolaylığı nedeniyle ağırlıklı olarak "MatLab R2015b" yazılımı kullanılmıştır.

## 4.2. Yöntem

Bu çalışmada, PV panellerden elde edilen "güç" değişkenini etkileyen; "güneş ışınımı", "hava sıcaklığı", "bağıl nem oranı", "rüzgâr hızı", "rüzgâr yönü" ve "yükseklik açısı"

değişkenleri YSA ile modellenmiştir. Modelde yer alan ışıma değişkeni ( $W/m^2$ ), hava sıcaklığı ( $^{\circ}C$ ), bağıl nem oranı (0-%100 RH), rüzgâr hızı (m/s) ve rüzgârın yönü ve güneş yükseklik açısı ( $^{\circ}$ ) olarak tanımlanmıştır. Rüzgârın yönü 360 derece üzerinden 12 dilime ayrılmış;  $0^{\circ}$ - $30^{\circ}$  yönünde esen rüzgâr "1",  $31^{\circ}$ - $60^{\circ}$  yönünde esen rüzgâr "2", ...  $331^{\circ}$ - $360^{\circ}$  esen rüzgâr "12" şeklinde kodlanarak toplam 12 adet rüzgâr yönü belirlenmiştir. Modelde yer alan "güç" bağımlı değişkeni ise "Watt" şeklinde tanımlanmıştır.

Araştırmaya ait veri seti; güneşli ve bulutlu hava koşullarını kapsayacak şekilde oluşturulmuştur. Modelde yer alan "güç" bağımlı değişkenini etkileyen faktörler, sabit ve hareketli paneller için iki hava koşulunda ayrı bir şekilde analiz edilmiştir.

Literatürde, PV hücre ve modüllerin modellenmesinde, PV panellerin ürettikleri gücün tahmininde, I-V karakteristiklerinin saptanması ve MPPT tekniklerinin uygulanmasında sağladığı avantajlar nedeniyle YSA birçok araştırmacı tarafından sıklıkla kullanılmıştır. Bu nedenle, çalışma kapsamında elde edilen veriler İleri Beslemeli Geriye Yayılımlı algoritmayı içeren Yapay Sinir Ağı (FBPANN) yöntemi ile modellenmiştir. Ayrıca, çalışmaya ilişkin model, Çoklu Doğrusal Regresyon (MLR) ile test edilmiştir. Kurulan modele ait performans ölçütleri doğrultusunda en uygun mimari elde edilmeye çalışılmıştır.

#### **4.2.1. İleri Beslemeli Geriye Yayılımlı Yapay Sinir Ağı Yöntemi**

YSA, yüksek karmaşıklığa sahip ve çok boyutlu, doğrusal olmayan stokastik problemlerin çözümlenmesinde kullanılan "paralel-dağılımlı işlem" modelidir [122-124]. YSA, değişkenler arasında ilişki kurabilme, örüntü tanıma, parametre tahminleme, sınıflandırma ve modele ait ağ yapısını optimize etme gibi işlemlerin tümünde güçlü bir istatistiksel süreç olarak kabul edilir [125].

Doğrusal ya da doğrusal olmayan veri yapılarını modelleyen FBPANN, "girdi", "çıkıtı" ve "gizli" katmanlarından oluşmaktadır. Her katmanda değişkenler, ağırlık katsayıları ile ilişki ağını kurar ve bu yolla nöronlar arasında bağlantılar yapılandırılır. Değişkenlere ait ağırlık katsayıları, tahminleme sürecindeki hata miktarı minimum seviyeye düşüncüye kadar bir yinelemeli algoritma tarafından ayarlanır. Girdi katmanında modelde yer alan bağımsız değişkenler bulunmaktadır. Gizli katman ise girdi katmanında yer alan tahminleyiciler arasındaki etkileşimi dikkate alarak ağa ait sinaptik ağırlıkları hesaplamak üzere dağılımın özelliğine göre bazı aktivasyon fonksiyonlarını üretir. Son olarak, çıkıtı katmanı, gizli

katmanın modelde yer alan bağımlı değişkene ait aktivasyon fonksiyonundan hesaplanmış olduğu tahmin değerini dış dünyaya sunar.

FBPANN, geriye yayımlı hata algoritmasını kullanarak yüksek doğrulukla tahminlemeler ya da sınıflandırmalar yapmaktadır. Geriye yayılım algoritması, ağda hesaplanan tüm ağırlıklara ilişkin tahmin edilen hata miktarını küçültmeyi hedeflemektedir. Buna ek olarak, bu algoritma, ağdaki en iyi modeli kurmak üzere değişkenlere ait sinaptik ağırlıkları sistematik bir şekilde güncellemektedir. Bilindiği üzere, geriye yayılım algoritması Denklem (4.1)'de gösterilen hata karelerini (squared error) dikkate alarak modeldeki toplam hatayı tahminlemeye çalışır.

$$E = \frac{1}{2} (p_i - o_i)^2 \quad (4.1)$$

Denklem (4.1)'de yer alan E, modele ait hatayı göstermektedir. Denklemde yer alan " $p_i$ ", YSA'nın tahmin ettiği çıktı değerini, " $o_i$ " ise ilgili değişkenin gerçek değerini göstermektedir. Başka bir deyişle modeldeki hata, tahmin edilen değer ile gerçek değer arasındaki fark olarak da tanımlanabilir. Modelde yer alan her bir çıktı " $O_j$ " Denklem (4.2) ile bir nörona eşleştirilir.

$$O_j = \varphi(\text{net}_j) = \varphi\left(\sum_{k=1}^n w_{kj} x_k\right) \quad (4.2)$$

Bir nörona ait  $\text{net}_j$ , çıktı ağırlıklarının toplamına eşittir. Buna ek olarak,  $w_{kj}$ , k ve j nöronları arasındaki ağırlıktır.

FBPANN'de performans fonksiyonu kullanılarak geriye yayılım algoritmasının ürettiği hata miktarı optimize edilmeye çalışılır. Hataların optimizasyonunu gösteren Denklem (4.3)'te, hata kareler ortalaması kullanılarak hesaplamalar yapılır. Denklem (4.3)'te yer alan performans fonksiyonu, bazı düzeltme yöntemleri ile optimize edilmeye çalışılmaktadır. Bu çalışmada hataya dayalı performans fonksiyonu Levenberg-Marquardt (LM) algoritması ile optimize edilmiştir.

$$E = \frac{1}{n} \left( \gamma \sum_{i=1}^n e_i^2 + (1-\gamma) \sum_{j=1}^n w_j^2 \right) \quad (4.3)$$

Denklem (4.3)'te yer alan  $e_i^2$ , hedef değışkene ait tahmin edilen ( $p_i$ ) değeri ile gerçeki değeri ( $o_i$ ) arasındaki farkların karesi ( $1/2 (p_i - o_i)^2$ ) olarak ifade edilir.  $w_j$  ise, nöronlar arası ağırlık katsayısıdır. Denklem (4.3)'te yer alan  $\eta$ , performans oranı olup, LM'nin ağırlık ve yanlılığı güncellemek için kullandığı bir düzeltme terimidir. FBPANN algoritmasındaki iterasyon, doyum noktasına ulaşmaya değeri MSE'yi minimum değeri düşürür. Modelde yer alan hata terimini küçük seviyelere düşüren LM algoritması, birçok optimizasyon yönteminden daha etkili ve hızlı çalışmaktadır [123].

Bu çalışmada, güç bağımlı değışkenini etkileyen faktörleri YSA ile modelleme sürecinde, gizli katmanlar ve çıktı katmanı için hiperbolik tanjant sigmoid aktivasyon fonksiyonu kullanılmıştır. Bu fonksiyon Denklem (4.4)'te gösterilmiştir.

$$y = \frac{2}{1 + e^{-2\left(\sum_{i=1}^N w_i x_i + b\right)}} - 1 \quad (4.4)$$

Denklem (4.4)'te yer alan ağırlık katsayıları (weight coefficient,  $w_i x_i$ ) ve sapma (bias,  $b$ ) değeri Denklem (4.5)'te yer alan hesaplama ile kendini güncellemektedir.

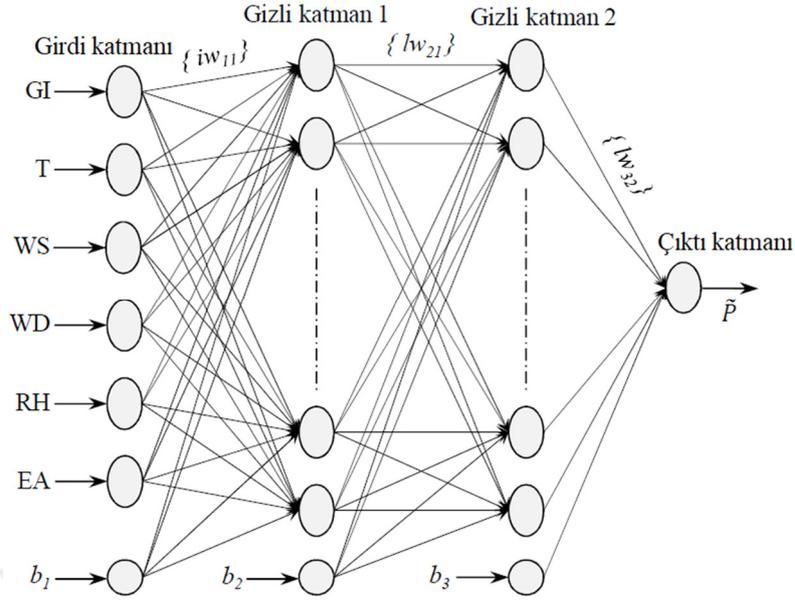
$$X_{k+1} = X_k - (J^T J + \mu I)^{-1} E \quad (4.5)$$

Denklem (4.5)'te yer alan  $J$ , Jacobian matrisini ifade eder. YSA'da kullanılan Jacobian matrisi, ağırlık ve sapmalar dikkate alınarak ağırlık ve sapmaların ilk türevlerini,  $E$  ağırlık ve sapmaların vektörünü ve  $\mu$  Marquardt düzeltme parametresini içermektedir. Böylece, ağırlık ve sapmaların eğitim tamamlanmış olur [15].

Bu çalışmada kullanılan FBPANN modeli Şekil 4.12'de gösterilmiştir. Girdi katmanında; Güneş ışınımı GI, hava sıcaklığı T, rüzgâr hızı WS, rüzgâr yönü WD, bağıl nem oranı RH ve güneş yükseklik açısı EA ile gösterilmiştir.

Şekil 4.12'de, her girdi değışkeni uygun bir katsayı ile ağırlıklandırılır. Girdi değışkenlerine ait toplam ağırlık katsayıları ve sapma değeri, aktivasyon fonksiyonu ( $f$ ) ile şekillenir. Buna bağılı olarak bağımlı değışken ( $y$ ) Denklem (4.6)'daki gibi tanımlanır:

$$y = f(w_i + b) \quad (4.6)$$



Şekil 4.12. Geliştirilen YSA modellerinin mimari yapısı

Denklemdede yer alan  $b$ , nöronlara eklenmiş olan yanlılık değeridir. FBPANN'de yer alan gizli katmanlar ve çıktı katmanı, hiperbolik tanjant sigmoid transfer fonksiyonuna sahiptir. Eğitim sürecinde değişkenler arasındaki ilişkilerin hesabı Denklem (4.7)'deki gibi hesaplanır [123, 126].

$$y_p^k = sgm_p^k \left[ \sum_{i=1}^{N_{k-1}} w_{ip}^{k-1} * y_i^{k-1} - \beta_i^k \right] \quad (4.7)$$

$$p = 1, 2, \dots, N_k; k = 1, 2, \dots, M$$

Denklem (4.7)'de yer alan  $w_{ip}^{k-1}$ ,  $(k-1)$ 'inci katmanda yer alan  $i$ . nöron ile  $k$ . katmanda yer alan  $p$ . nöron arasındaki bağlantı katsayılarını ifade etmektedir.  $k$ . katmanda yer alan  $p$ . nöronun çıktısı olan  $y_p^k$ ,  $k$ . katmandaki  $p$ . nöronun sigmoid aktivasyon fonksiyonunu tanımlamaktadır. Denklemdede yer alan  $sgm_p^k$  ve  $\beta_i^k$ ;  $k$ . katmandaki  $p$ . nöronun eşik değerini göstermektedir [127].

Genel olarak, yapay sinir ağlarında kullanılan bazı ölçütler, ağa ait mimari yapının doğru kurgulanıp kurgulanmadığını test etmeyi amaçlamaktadır. Hata fonksiyonu, en iyi mimariye ulaşmada kullanılan temel yöntemlerden birisidir. Hata Kareleri Toplamı (SSE), FBPANN mimarisinde bir hata fonksiyonu olarak kullanılmaktadır ve bu hata fonksiyonu Denklem (4.8)'deki gibi hesaplanır:

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M [y_j(x_i) - t_{ij}]^2 \quad (4.8)$$

Denklem (4.8)'de yer alan  $y_j(x_i)$ , bağımlı değişkenin tahmin edilen çıktı değerini ve  $t_{ij}$  ise gerçek değerini gösterir. Veri setinde yer alan bağımlı değişkenin gerçek değeri ile FBPANN mimarisinin tahmin ettiği değer arasındaki fark ne kadar küçük hesaplandığına, modele ait hata değeri de o oranda küçülür ve modele ait hata değerinin küçük olması, parametre kestiriminin isabetli olduğunu gösterir.

Ağ mimarisinin performansını sınamada sadece SSE yöntemi kullanılmaz, aynı zamanda Ortalama Karesel Hata (*MSE*), Kök Ortalama Karesel Hata (*RMSE*), Ortalama Mutlak Hata (*MAE*), Bağıl Mutlak Hata (*RAE%*), ve Bağıl Mutlak Hata Karekökü (*RRAE%*) gözlenen değer ile gerçek değer arasındaki korelasyon katsayısı en uygun ağ mimarisini test etmede kullanılan ölçütlerdir. Bu ölçütler Denklem (4.9), (4.10), (4.11), (4.12) ve (4.13) ile hesaplanır.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2 \quad (4.9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2} \quad (4.10)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |P_i - O_i| \quad (4.11)$$

$$RAE = \frac{\sum_{j=1}^n P_{ij} - O_j}{\sum_{j=1}^n |O_j - \bar{O}|} \quad (4.12)$$

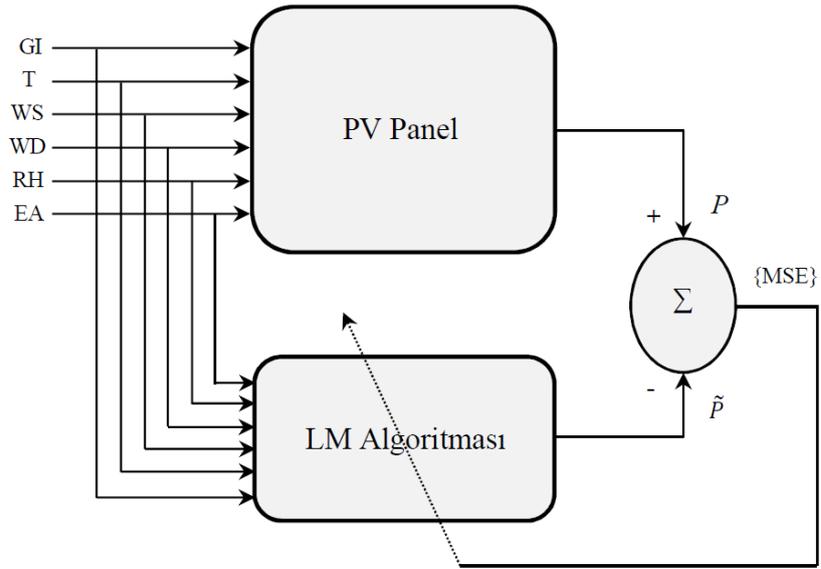
$$RRAE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (P_{ij} - O_j)^2}{\sum_{j=1}^N (O_j - \bar{O})^2}} \quad (4.13)$$

Denklem (4.9), (4.10), (4.11), (4.12) ve (4.13)'te yer alan  $P_i$  ve  $O_i$  sırasıyla tahmin edilen değer ile gerçek değeri ifade eder.  $N$  örneklem sayısını,  $\bar{O}$  ise gözlenen değerlerin aritmetik ortalamasını ifade etmektedir. Matematiksel teoride ideal olarak; MSE, RMSE ve MAE değerlerinin sıfır olması gerekir [128]. Ancak pratikte bu ideal değerlere ulaşmak

imkânsızdır. Bir ağ mimarisinin en uygun seviyeye ulaşma durumu; MSE, RMSE ve MAE'nin sifira ne kadar yaklaştığı ile yorumlanır. FBPANN performansı bahsi edilen bu ölçütlerle test edilecektir ve bu ölçütler vasıtasıyla, eğitsel veriler üzerinde ilgili mimari yapının etkililiği incelenecektir.

#### 4.2.2. Verilerin Analizi

Bu çalışmada kullanılan FBPANN mimarisinde, girdi vektörü olan  $x_i$  "güç ( $y_i$ )" bağımlı değişkenine nöronlarla bağlanmış ve mimari yapı Şekil 4.12'de gösterilmişti. Modelde yer alan girdi vektöründen elde edilen  $i$ . değişkene ait veriler  $x_i = [x_1, x_2, \dots, x_6]$  olarak ağ mimarisine tanıtılmış ve bu girdi vektörü  $T$  nöronları ile gizli katmana bu değişkenlerin hesaplanan ağırlık katsayıları ile bağlanmıştır  $w_{kj}$ ,  $k = 1, 2 \dots T$ . Şekil 4.13'te PV panelin çıkış gücünü tahmin etmek için kullanılan YSA'nın blok diyagramı verilmiştir. Kullanılan YSA'nın girdi katmanı, güneş ışınımı (GI), hava sıcaklığı (T), rüzgâr hızı (WS), rüzgâr yönü (WD), bağıl nem (RH) ve güneş yükseklik açısı (EA) olmak üzere toplam altı bağımsız değişkene sahiptir. Çıktı katmanında ise PV panelden üretilen güç bulunmaktadır. Analizin amacı, deneysel çalışmayla elde edilmiş verilerin uygun bir ağ yapısına uygulanarak girdi katmanındaki değişkenler ile çıktı katmanındaki güç arasında bir ilişki kurmaktır.



Şekil 4.13. Kullanılan YSA'ya ait blok diyagramı

Çalışmada kurgulanan ağ mimarisi işletilmeden önce, modelde kullanılan girdi değişkenleri arasında çoklu bağlantının olup olmadığı test edilmiştir. Çoklu bağlantı analizi, yordayıcı değişkenler arasında yüksek düzeyde bir ilişkinin varlığını araştırır. Çoklu bağlantı analizinde VIF (Variance Inflation Factor) ve tolerans ölçütleri kullanılmıştır. VIF değerinin 10'dan büyük olması ya da tolerans değerinin 0,1'den küçük olması durumunda bağımsız değişkenler arasında yüksek bir ilişkinin olduğu sonucuna varılır ve bu durum sağlıklı parametre kestirimine bir engel teşkil etmektedir [129]. Araştırmada, VIF veya tolerans eşik değerini aşan hiçbir değişkene rastlanmamıştır. Modelde yer alan bağımsız değişkenlerin VIF değerleri 1.073 ile 5.056 arasında değişim göstermiş ve tolerans değer aralığı da 0.198 ile 0.932 arasındadır.

FBPANN mimarisinde öğrenme algoritmasını durdurma kuralı aşağıdaki gibi tasarlanmıştır:

- i) Maksimum eğitim süreci 15 dakika olarak ayarlanmıştır,
- ii) Maksimum eğitim devir sayısı otomatik olarak hesaplanmıştır (varsayılan değer ise 1000'dir),
- iii) Eğitim sürecindeki hata miktarındaki minimum değişim 0,0001 ve hata oranı ise 0,001 olarak düzenlenmiştir. Sıralanmış olan bu özelliklerden biri gerçekleştiğinde, ağ mimarisini yöneten algoritma sonlanır ve elde edilen sonuçlar raporlanır.

FBPANN analizinde verilerin; %70'i eğitim veri seti, %15'i doğrulama ve geriye kalan ise test amaçlı kullanılmıştır. Bu çalışmada, FBPANN analizinin dışında, bağımlı değişken olan gücü etkileyen yordayıcıların etki ve önem düzeyi Çoklu Doğrusal Regresyon (MLR) yöntemi ile de incelenmiştir. MLR, en küçük kareler yöntemi ile parametre tahminlemesi yapan bir yöntemdir.  $Y = f(x)$  gibi bir modelde, güç bağımlı değişkenini etkileyen değişkenlere ait parametre katsayıları aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$Güç = \beta_1*(GI) + \beta_2*(T) + \beta_3*(WS) + \beta_4*(WD) + \beta_5*(RH) + \beta_6*(EA) + sabit \quad (4.14)$$

Denklem (4.14)'te yer alan  $\beta$  katsayıları, ilgili bağımsız değişkenin ağırlık katsayısını göstermektedir.

Ayrıca, araştırmada detayları incelemek üzere Spearman Rho korelasyon analizleri yapılmıştır. Spearman Rho korelasyon analizi, değişkenlere ait dağılımın normal olmadığı durumlarda kullanılan ve parametrik olmayan bir istatistiksel yöntem olarak bilinir.

## 5. BULGULAR

### 5.1. Sabit Açılı Fotovoltaik Panel Uygulaması Bulguları

Sabit açılı PV panel tarafından üretilen bağımlı güç ( $P$ ) değişkeni ve bu değişkeni etkileyen güneş ışınımı ( $GI$ ), hava sıcaklığı ( $T$ ), rüzgâr hızı ( $WS$ ), rüzgâr yönü ( $WD$ ), bağıl nem oranı ( $RH$ ), güneş yükseklik açısı ( $EA$ ) bağımsız değişkenlerine ait betimsel istatistikler Tablo 5.1’de gösterilmiştir.

**Tablo 5.1.** Sabit açılı panel modelinde yer alan değişkenlere ait betimsel istatistikler

Değişkenler	Aritmetik Ortalama		Std. Sapma		En küçük değer		En yüksek değer		N	
	Güneşli	Bulutlu	Güneşli	Bulutlu	Güneşli	Bulutlu	Güneşli	Bulutlu	Güneşli	Bulutlu
GI (W/m <sup>2</sup> )	529.594	347.530	278.397	250.964	30.020	30.010	1129	1180	28784	16272
T (°C)	25.332	18.413	10.718	10.008	-4.674	-17.550	43.620	43.910		
WS (m/s)	1.171	1.220	0.947	1.219	0.000	0.000	6.917	7.44		
WD (°)	8.623	7.622	3.084	3.682	1	1	12	12		
RH (%)	34.329	54.852	21.827	26.472	0.186	0.186	100	100		
EA (°)	59.038	51.232	15.124	15.984	28.660	28.710	75.520	75.520		
Güç (W)	30.305	15.896	23.925	19.527	0.021	0.034	89.192	94.525		

Tablo 5.1’de yer alan tüm değişkenlerin yüksek bir standart sapmaya sahip olması dikkat çekicidir. Bu durum, ölçülen değişkenlerin heterojen bir yapı sergilediğine işaret etmektedir. Değişkenlerin dağılım karakteristikleri, yansız ve sapsız bir istatistiksel yöntem olan ihtiyacı da beraberinde getirmektedir.

Güneşli ve bulutlu günler için modelde yer alan değişkenlerin birbirleriyle olan ilişkisi Spearman Rho Korelasyon yöntemi ile analiz edilmiş ve bulguları Tablo 5.2’de verilmiştir.

**Tablo 5.2.** Sabit açılı panel için değişkenler arasındaki korelasyon katsayıları

Bağımlı Değişken	Güneş Işınımı (W/m <sup>2</sup> )	Hava sıcaklığı (°C)	Rüzgâr hızı (m/s)	Rüzgâr Yönü (°)	Bağıl nem (%)	Güneş açısı (°)
P <sub>Güneşli</sub> (W)	0.958**	0.206**	0.261**	-0.64**	-0.222**	0.043**
P <sub>Bulutlu</sub> (W)	0.982**	0.282**	0.207**	-0.012	-0.349**	0.163**

\*\* :  $p < 0.01$

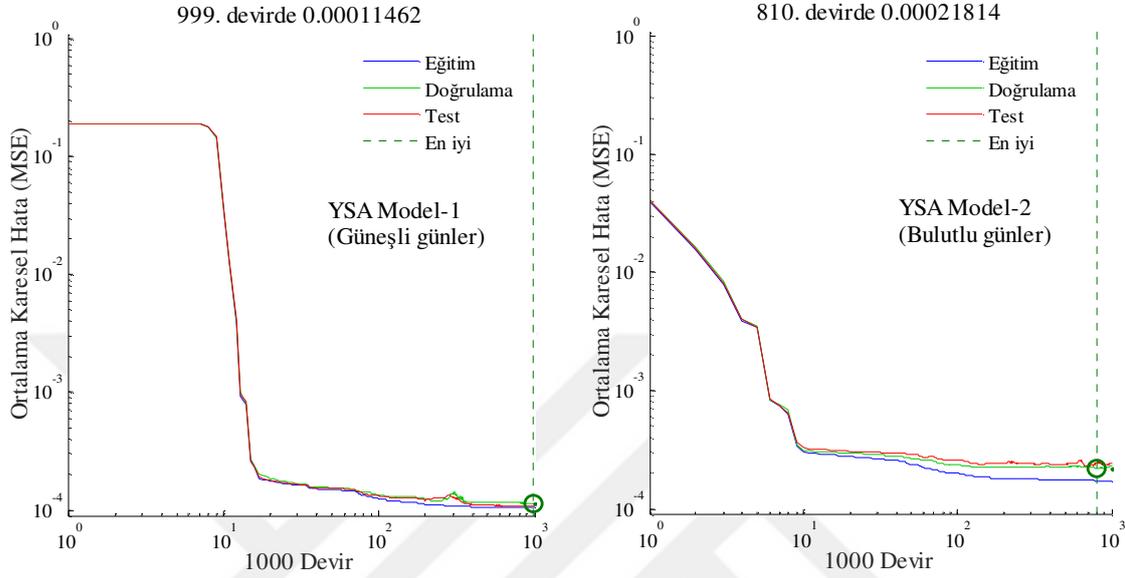
Tablo 5.2 incelendiğinde; güneşli havalarda, tüm bağımsız değişkenlerin "güç" bağımlı değişkeni ile anlamlı bir ilişki içerisinde olduğu görülmektedir ( $p < 0.01$ ). Güç değişkeni ile en yüksek ilişkiye sahip olan bağımsız değişken güneş ışınımı ve en düşük ilişki ise güneş yükseklik açısı olarak tespit edilmiştir. Modelde yer alan güneş ışınımı, hava sıcaklığı, rüzgâr hızı ve güneş yükseklik açısı güç bağımlı değişkeni ile pozitif bir ilişki içerisinde yer almaktadır. Bunun tersi olarak, rüzgâr yönü ve bağıl nem değişkenlerinin güç değişkeni ile negatif bir ilişki içerisinde olduğu tespit edilmiştir. Bulutlu günler dikkate alındığında, güç bağımlı değişkeninin rüzgârın yönü ile anlamlı bir ilişki içerisinde olmadığı görülmüştür ( $p > 0.05$ ). Bunun dışındaki tüm bağımsız değişkenlerin güç ile anlamlı bir ilişki içerisinde olduğu görülmüştür ( $p < 0.05$ ).

YSA'yı test etme sürecinde birçok mimari yapı incelenmiş ve analizler performans ölçütlerine göre detaylı bir şekilde yapılmıştır. En iyi model; 6 bağımsız değişkeninin yer aldığı girdi katmanı, hiperbolik tanjant sigmoid transfer fonksiyonunun yer aldığı 2 gizli katman ve yine hiperbolik tanjant sigmoid transfer fonksiyonu içeren bir çıktı katmanı şeklinde elde edilmiştir. Her bir gizli katman 15'er adet nöron içermektedir. Modelde yer alan bağımlı değişken ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişki Denklem (5.1)'deki gibi hesaplanmıştır.

$$\tilde{P} = \frac{2}{1 + e^{-2 \left[ \sum_{k=1}^{15} w_{3k} \left( \frac{2}{1 + e^{-2 \left[ \sum_{j=1}^{15} w_{2j} \left( \frac{2}{1 + e^{-2 \left[ \sum_{i=1}^6 w_{1i} x_i + b_{1j} \right] - 1} + b_{2k} \right] - 1} + b_{3k} \right] - 1} \right) \right] + b_3}} - 1} \quad (5.1)$$

Denklem (5.1)'de yer alan  $b_1$ ,  $b_2$  ve  $b_3$  sırasıyla 1. gizli katman, 2. gizli katman ve çıktı katman olmak üzere ağa ait sapmaları;  $x_i$ , girdi katmanındaki bağımsız değişkenleri ( $x_1 = GI$ ,  $x_2 = T$ ,  $x_3 = WS$ ,  $x_4 = WD$ ,  $x_5 = RH$ ,  $x_6 = EA$ );  $w_{1i}$ ,  $w_{2j}$ ,  $w_{3k}$  katmanlar arasındaki ağırlık katsayılarını;  $b_{1j}$ ,  $b_{2k}$ ,  $b_3$  ağa ait sapmaları;  $i$ , 1'den 6'ya kadar bağımsız değişken sayısını;  $j$ , 1'den 15'e kadar 1. gizli katmandaki nöron sayısını;  $k$ , 1'den 15'e kadar 2. gizli katmandaki nöron sayısını ve  $P$ , çıktı katmanındaki bağımsız güç değişkenini ifade etmektedir. Geliştirilen YSA modellerine ait ağırlık katsayıları ve sapma değerleri Ek 15'te sunulmuştur.

YSA modellerinin eğitimi sürecinde MSE'ye bağlı hata performans değişimi Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Veri setindeki tüm veriler 0 ile 1 arasında normalize edilmiştir. Bu işlem ağa ait eğitim performansının daha etkili olması amacıyla yapılmıştır.



**Şekil 5.1.** YSA Model-1 ve YSA Model-2'ye ait performans hata değerleri

FBPANN modeli güneşli havalar için kurgulandığında, verinin eğitim sürecinde MSE değeri  $1,146 \cdot 10^{-4}$  olup, bulutlu günlerde MSE'ye ait değer  $2,1811 \cdot 10^{-4}$  olarak hesaplanmıştır. Güneşli ve bulutlu havalar için, eğitim sürecindeki devir sayısı  $10^3$  olarak belirtilmiştir. Şekil 5.1 incelendiğinde, programda öngörülen devir sayısının (1000), en düşük hataya ulaşmada gerekli performansı sergilediği görülmektedir.

Güneşli günler için güç değişkenini etkileyen parametrelere ilişkin FBPANN modeli incelendiğinde, performans ölçütlerinin oldukça iyi düzeyde olduğu görülmektedir. Güç bağımlı değişkenine ait gerçek değer ile tahmini değer arasındaki korelasyon katsayısı 0.99886 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, FBPANN'nin bağımlı değişkeni mükemmel düzeyde tahminlediğini göstermektedir. Sabit açılı PV panel uygulamasına ait güneşli günler için geliştirilen YSA Model-1 ve bulutlu günler için geliştirilen YSA Model-2'ye ait veri setinin eğitim, doğrulama ve test regresyon analizi Ek 16'da ve Ek 17'de verilmiştir.

Bulutlu günler için FBPANN modeli incelendiğinde, güç bağımlı değişkenine ait gerçek değer ile tahmini değer arasındaki korelasyon katsayısı 0.99637 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, gerçek değer ile tahmin edilen değer arasındaki mükemmel uyuma işaret etmektedir.

MLR ile yapılan analiz incelendiğinde; ölçülen değer ile tahmin edilen değer arasındaki korelasyon katsayısı 0.965 olarak elde edilmiştir. MLR'ye ait denklem ise aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$P_{Güneşli} = 8.914 + 0.086*(GI) + 0.040*(T) - 0.220*(WS) - 0.151*(WD) - 0.040*(RH) - 0.375*(EA) \quad (5.2)$$

$$P_{Bulutlu} = -3.334 + 0.077*(GR) + 0.031*(T) + 0.104*(WS) - 0.089*(WD) + 0.015*(RH) - 0.166*(EA) \quad (5.3)$$

MLR'nin hem güneşli hem de bulutlu havalar için kurmuş olduğu her iki denklemde yer alan bağımsız değişkenlere ait etki düzeyleri anlamlı bulunmuştur ( $p < 0.01$ ).

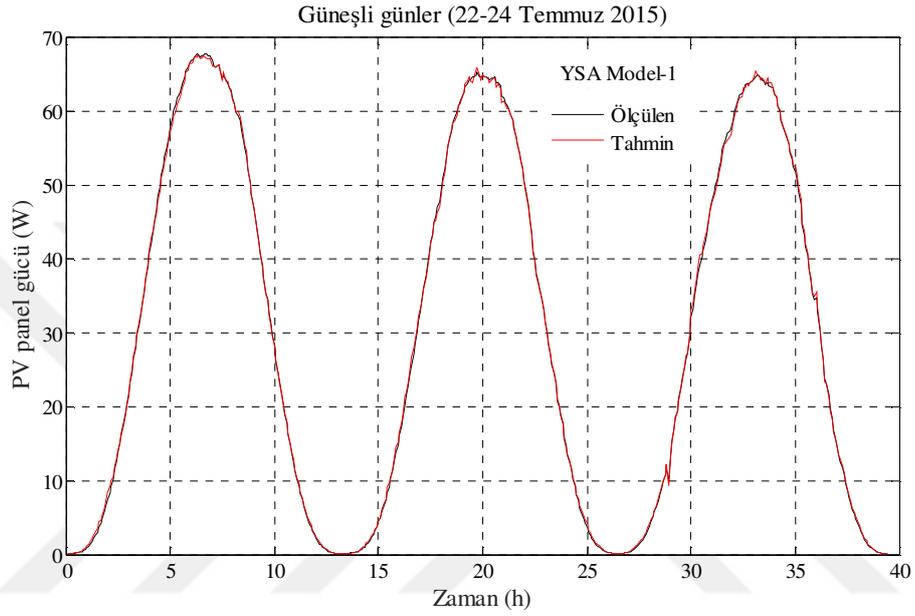
Güneşli ve bulutlu havalar için kurulan FBPANN ve MLR modellerine ait performans ölçüt değerleri Tablo 5.3'te gösterilmiştir.

**Tablo 5.3.** Sabit panel için YSA ve MLR modellerine ait performans ölçüt değerleri

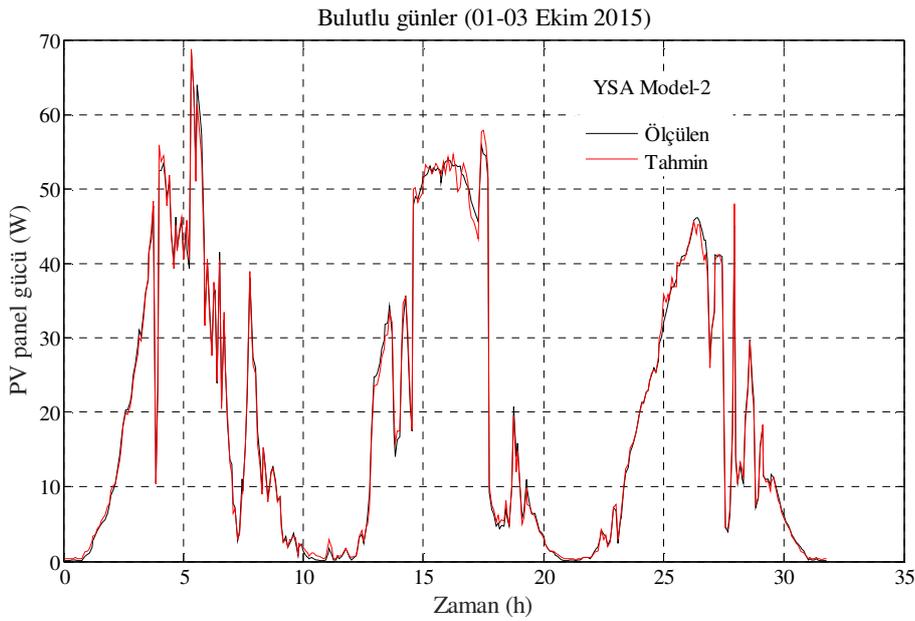
Hava Durumu	MSE	RMSE	MAE	RAE (%)	RRSE (%)	R	R <sup>2</sup>
YSA Model-1	0.000106	0.010296	0.006915	2.902	3.837	0.999	0.998
YSA Model-2	0.000190	0.013801	0.008892	5.359	6.678	0.997	0.994
MLR Model-1	0.004928	0.0702	0.0585	24.563	26.182	0.965	0.931
MLR Model-2	0.003844	0.062	0.051	30.262	29.559	0.955	0.912

Tablo 5.3 incelendiğinde, FBPANN mimarisinde performans ölçütlerinin her iki hava koşulunda da bağımlı güç değerini oldukça iyi düzeyde tahminlendiği görülmektedir. Ancak, güneşli havalarda toplanan verilerin FBPANN mimarisinde daha düşük hata ile modellendiği tespit edilmiştir. FBPANN ile kıyaslandığında, MLR'ye ait modele ait performans ölçütleri FBPANN kadar iyi düzeyde elde edilemediği görülmüştür. İdeal olarak hatasız bir tahminlemede; MSE, RMSE, MAE, RAE ve RRAE sıfır olarak elde edilir. Ancak bu ideal değeri elde etmek neredeyse imkânsız olduğundan, bahsi edilen bu performans ölçütleri sıfıra ne kadar yaklaşıyorsa, modelin o denli hatasız tahminlediği kabul edilir [128]. MLR modelinde özellikle RAE ve RRAE değerleri oldukça yüksek düzeyde elde edildiğinden, modele ait parametre tahminlemedeki tutarlılığı şüpheyle karşılanacaktır.

Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'te bazı güneşli ve bulutlu günlerde, sabit açılı PV panelin ürettiği güç değerleri ile geliştirilen YSA modellerinin PV panelinden üretilen güç değerlerine ait tahmini değerler bir arada gösterilmiştir. Güneşli günler için 22-24 Temmuz 2015 tarihleri, bulutlu günler için 01-03 Ekim 2015 tarihleri arasındaki günler belirlenmiştir. Bu günlere ait veriler, YSA modellerinin eğitimi sürecinde ağı görmemiştir.



Şekil 5.2. YSA Model-1 güneşli 3 gün için tahminler



Şekil 5.3. YSA Model-2 bulutlu 3 gün için tahminler

Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'te görüldüğü gibi, hem güneşli günler için geliştirilen YSA Model-1 hem de bulutlu günler için geliştirilen YSA Model-2, PV panellerinden elden edilen güç değerlerini çok doğru bir şekilde tahmin edebilmiştir. Üretilen gücün tahmin edildiği 6 güne ait istatistik analizi yapılmış ve Tablo 5.4'te sunulmuştur. Tablo 5.4'te, PV panellerin bir gün boyunca ürettiği anlık güç değerleri ve bu ölçülen değerlere ait tahmini değerler arasındaki ilişki incelenerek; RMSE, MAE, RAE, RRSE ve R değerleri bulunmuştur. Ayrıca her güne ait üretilen toplam enerji ve tahmin edilen toplam enerji belirtilmiştir. Yapılan analizlerde, bağımsız ve bağımlı değişkenlere ait tüm veri seti değerleri 0 ile 1 arasında normalize edilmiştir.

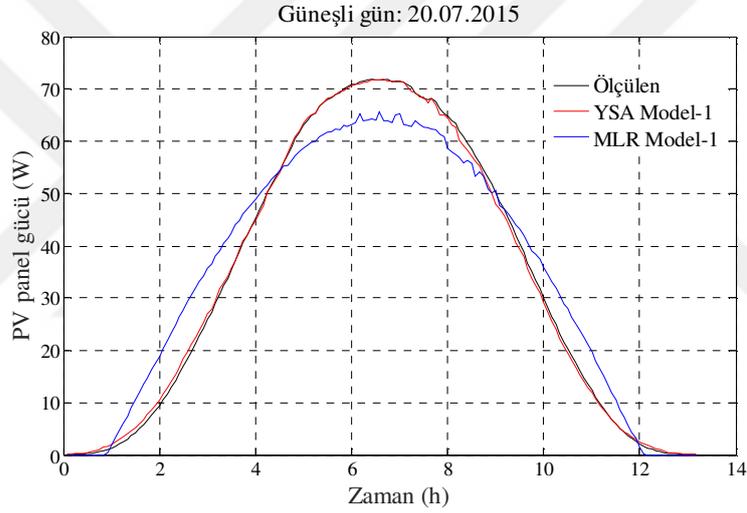
**Tablo 5.4.** Sabit açılı panel için ölçülen ve YSA ile tahmin edilen enerji değerleri

Gün tipi	Günlük ölçülen enerji (Wh)	Günlük tahmin edilen enerji (Wh)	RMSE	MAE	RAE (%)	RRSE (%)	R (%)
Güneşli günler	YSA Model-1						
22.07.2015	412.385	412.492	0.00358	0.00270	1.041	1.258	99.993
23.07.2015	392.810	393.162	0.00569	0.00386	1.560	2.090	99.981
24.07.2015	385.507	386.818	0.00396	0.00292	1.192	1.478	99.992
Bulutlu Günler	YSA Model-2						
01.10.2015	213.683	212.888	0.01210	0.00835	4.891	6.150	99.821
02.10.2015	229.536	229.572	0.01272	0.00938	4.530	5.646	99.841
03.10.2015	176.819	176.752	0.00828	0.00595	4.194	5.093	99.875

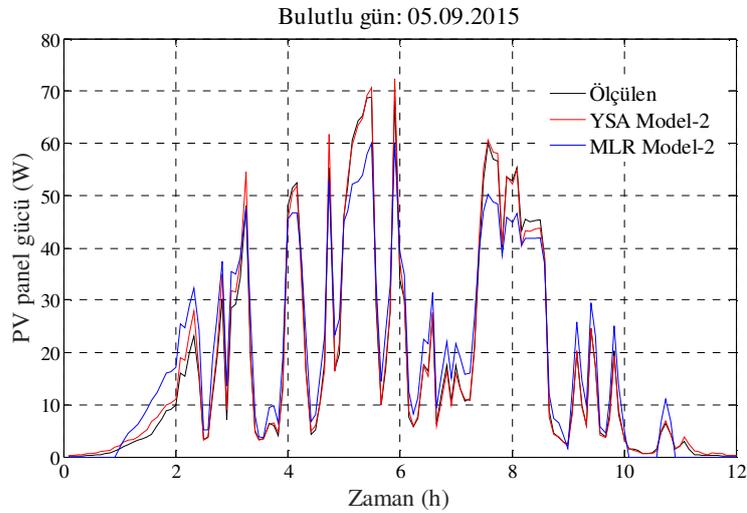
Tablo 5.4 incelendiğinde, güneşli günler için geliştirilen YSA Model-1, ortalama 99,988% korelasyon katsayısı ile çok iyi bir tahminleme yapmıştır. Önemli bir ölçüt olan RAE değeri ortalama 1,264% bulunmuştur. Bulutlu günler için geliştirilen YSA Model-2'nin de, ortalama 99,845% korelasyon katsayısı ile yine çok iyi bir tahminleme gerçekleştirdiği görülmektedir. RAE değeri ortalama 4,538% olarak tespit edilmiştir. Her iki YSA modeli için de, PV modülden elde edilen enerji değeri ile bu enerji değerine ait olan tahmin, birbirine son derece yakın bulunmuştur. Tabloda yer alan tüm sonuçlar geliştirilmiş olan YSA modellerinin, bağımsız ve bağımlı değişkenler arasında sıkı bir ilişkinin kurduğunu ve çok iyi düzeyde bir tahminleme yaptığını ifade etmektedir.

PV panellerin ürettiği enerjiyi tahmin etmede kullanılan yaygın yöntemlerden bazıları, çoklu doğrusal regresyon, polinomal regresyon, tek diyot, iki diyot ve analitik model

yöntemleridir. Bu modeller arasında, özellikle bulutlu şeklinde sınıflandırılan günlerde doğru tahminleme yapan ve yaygın kullanım alanı bulan yöntem çoklu doğrusal regresyon yöntemidir [15]. Veri setinin analiz edilmesi sonucunda, güneşli ve bulutlu günler için elde edilen MLR fonksiyonları denklem (5.2) ve (5.3)'te verilmişti. Geliştirilen YSA modellerinin tahmin yeteneğini göstermek için, mevcut yöntemler arasında iyi sonuçlar üreten MLR yöntemiyle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma güneşli ve bulutlu günler için ayrı ayrı yapılmıştır. Güneşli gün olarak 20 Temmuz 2015, bulutlu gün olarak 05 Eylül 2015 seçilmiş olup bu iki güne ait ölçülmüş gerçek veriler, ağız eğitim sürecinde kullanılmamıştır. Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'te YSA Model-1, YSA Model-2 ve MLR modelleri ile yapılan tahminler, ölçülmüş değerlerle karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.4. YSA ve MLR Model-1'in gerçek değerlerle karşılaştırılması



Şekil 5.5. YSA ve MLR Model-2'nin gerçek değerlerle karşılaştırılması

Grafikler incelendiğinde, hem güneşli gün için geliştirilen YSA Model-1, hem de bulutlu gün için geliştirilen YSA Model-2, ölçülmüş değerlere son derece yakın sonuçlar üretmiştir. Tablo 5.5'te, YSA ve MLR modellerine ait RMSE, RAE ve R değerleri verilmiştir.

**Tablo 5.5.** Sabit panel için YSA ve MLR modellerinin karşılaştırılması

Modeller	Güneşli gün - 20.07.2015			Bulutlu gün - 05.09.2015		
	YSA Model-1 ve MLR Model-1			YSA Model-2 ve MLR Model-2		
	RMSE	RAE (%)	R (%)	RMSE	RAE (%)	R (%)
YSA Modelleri	0.753	2.388	99.967	1.545	6.277	99.726
MLR Modelleri	5.764	19.57	98.316	4.865	24.47	97.457

Tablo 5.5'e göre, geliştirilen YSA modelleri, MLR modellerine göre, hem güneşli hem de bulutlu günlerde çok daha iyi tahmin yapabilmektedir. Güneşli günler için geliştirilen YSA modeli, gerçek değerler üzerinden 0,753 RMSE, 2,388% RAE ve 99,967% R değeri ile mükemmel bir tahminleme yapmıştır. Bulutlu günler için geliştirilen YSA modeli de MSE, RAE ve R değerlerine bakıldığında mükemmel bir tahminleme gerçekleştirmiştir. Güneşli ve bulutlu günler için geliştirilen ve literatürde en doğru tahminleme yapan yöntemlerden biri olduğu belirtilen MLR modelleri de kabul edilebilir bir tahminleme gerçekleştirmiştir. Ancak, YSA modellerinin, MLR modellerine göre bariz bir farkla çok daha hassas bir tahminleme gerçekleştirdiği görülmektedir.

Araştırma kapsamında, FBPANN mimarisinde yer alan bağımsız değişkenlerin önem düzeyi incelenmek istenmiştir. Bağımsız değişkenlerin görece önem düzeyi Denklem (5.4)'te görüldüğü gibi hesaplanmıştır.

$$I_j = \frac{\sum_{i=1}^h \left( \left( |w_{ji}| / \sum_{k=1}^n |w_{ki}| \right) |w_{oi}| \right)}{\sum_{k=1}^n \left\{ \sum_{i=1}^k \left( \frac{|w_{ki}|}{\sum_{k=1}^n |w_{ki}|} \right) \cdot |w_{oi}| \right\}} \quad (5.4)$$

Denklem (5.4)'te yer alan  $I_j$ , modeldeki bağımsız değişkene ait görece önem düzeyini,  $n$  girdi katmanındaki değişken sayısını,  $h$  ise gizli katmandaki nöron sayısını ifade etmektedir.

$w$  girdi katmanı ile gizli katman arasında hesaplanan sinaptik ağırlıkları,  $w_o$  ise gizli katman ile çıktı katmanı arasındaki sinaptik ağırlıkları göstermektedir [130].

Denklem (5.4) dikkate alındığında; FBPANN mimarisinde güneşli ve bulutlu havalar için güç bağımlı değişkeni üzerinde etkili olan tahminleyicilerin önem sıralaması Tablo 5.6'da gösterilmiştir.

**Tablo 5.6.** Sabit açılı panel için bağımsız değişkenlerin önem düzeyi

Önem sıralaması	Güneşli günler	Bulutlu günler
1	Güneş ışınımı	Güneş ışınımı
2	Hava sıcaklığı	Bağıl nem
3	Bağıl nem	Hava sıcaklığı
4	Güneş yükseklik açısı	Güneş yükseklik açısı
5	Rüzgâr hızı	Rüzgâr hızı
6	Rüzgâr yönü	Rüzgâr yönü

Tablo 5.6 incelendiğinde, güneş ışınımı değerinin hem bulutlu hem de güneşli günler için en etkili faktör olduğu görülmektedir. Güneşli günler için ikinci en önemli faktör hava sıcaklığı iken, bulutlu günler için bağıl nem oranı olduğu görülmektedir. Güneşli günler için üçüncü önemli değişken bağıl nem oranı, bulutlu günler için hava sıcaklığıdır. Geriye kalan parametreler önem düzeyine göre sırasıyla güneş yükseklik açısı, rüzgâr hızı ve rüzgâr yönü parametreleri olup güneşli ve bulutlu günler için aynı önem sırasına sahiptirler.

## 5.2. Tek Eksen Hareketli Fotovoltaik Panel Uygulaması Bulguları

Tek eksenli güneş izleyicileri ile kullanılan PV panel tarafından üretilen bağımlı güç değişkeni ve bu değişkeni etkileyen güneş ışınımı, hava sıcaklığı, rüzgâr hızı, rüzgâr yönü, bağıl nem oranı, güneş yükseklik açısı bağımsız değişkenlerine ait betimsel istatistikler, Tablo 5.7'de gösterilmiştir.

**Tablo 5.7.** Hareketli panel modelinde yer alan değişkenlere ait betimsel istatistikler

Değişkenler	Aritmetik Ortalama		Std. Sapma		En küçük değer		En yüksek değer		N	
	Güneşli	Bulutlu	Güneşli	Bulutlu	Güneşli	Bulutlu	Güneşli	Bulutlu	Güneşli	Bulutlu
GI (W/m <sup>2</sup> )	532.213	374.193	278.176	256.902	30.020	30.010	1129	1180	28168	12263
T (°C)	25.564	20.124	10.609	9.833	-3.720	-3.810	43.620	43.910		
WS (m/s)	1.175	1.248	0.941	1.218	0.000	0.000	6.920	6.970		
WD (°)	8.596	7.680	3.094	3.599	1.000	1.000	12.000	12.000		
RH (%)	33.776	50.005	21.390	25.510	0.190	0.190	100	100		
EA (°)	59.289	54.157	14.973	15.496	28.660	28.710	75.520	75.520		
Güç (W)	40.680	21.543	23.665	22.571	0.060	0.060	91.880	97.550		

Tablo 5.7’de yer alan bağımlı ve bağımsız değişkenlerin tümü yüksek bir standart sapma değerine sahiptir. Tüm değişkenlerin yüksek bir standart sapmaya sahip olması dikkat çekicidir. Tablo 5.7 incelendiğinde, güneşli günlere ait maksimum güneş ışıınım değeri 1129 W/m<sup>2</sup>, bulutlu günlere ait değer ise 1180 W/m<sup>2</sup> olarak kaydedilmiştir. Veri seti incelendiğinde, 1180 W/m<sup>2</sup> değeri, yağmurlu bir günde yağmur yağdıktan sonra, güneşli bir anda ölçüldüğü görülmüştür. Yağmurun atmosferi oldukça tozsuz hale getirdiği düşünülmektedir. Araştırmanın yapıldığı Batman ili kurak bir bölge olup, tozluluk oranı yüksektir. Bu olay bir yıl boyunca sadece bir gün gerçekleşmiştir. Bununla beraber güneşli günlere ait solar radyasyon ortalaması 532 W/m<sup>2</sup> iken, bulutlu günlere ait ortalama 374 W/m<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır.

Hareketli panele ait veri setinde bulunan güneşli ve bulutlu günler için modelde yer alan değişkenlerin birbirleriyle olan ilişkisi Spearman Rho Korelasyon yöntemi ile analiz edilmiş ve korelasyon bulguları Tablo 5.8’de verilmiştir.

**Tablo 5.8.** Hareketli panel için değişkenler arasındaki korelasyon katsayıları

Bağımlı Değişken	Güneş Işınımı (W/m <sup>2</sup> )	Hava sıcaklığı (°C)	Rüzgâr hızı (m/s)	Rüzgâr Yönü (°)	Bağıl nem (%)	Güneş açısı (°)
P <sub>Güneşli</sub> (W)	0.983**	0.274**	0.287**	-0.056**	-0.264**	0.219**
P <sub>Bulutlu</sub> (W)	0.977**	0.336**	0.180**	0.014	-0.359**	0.237**

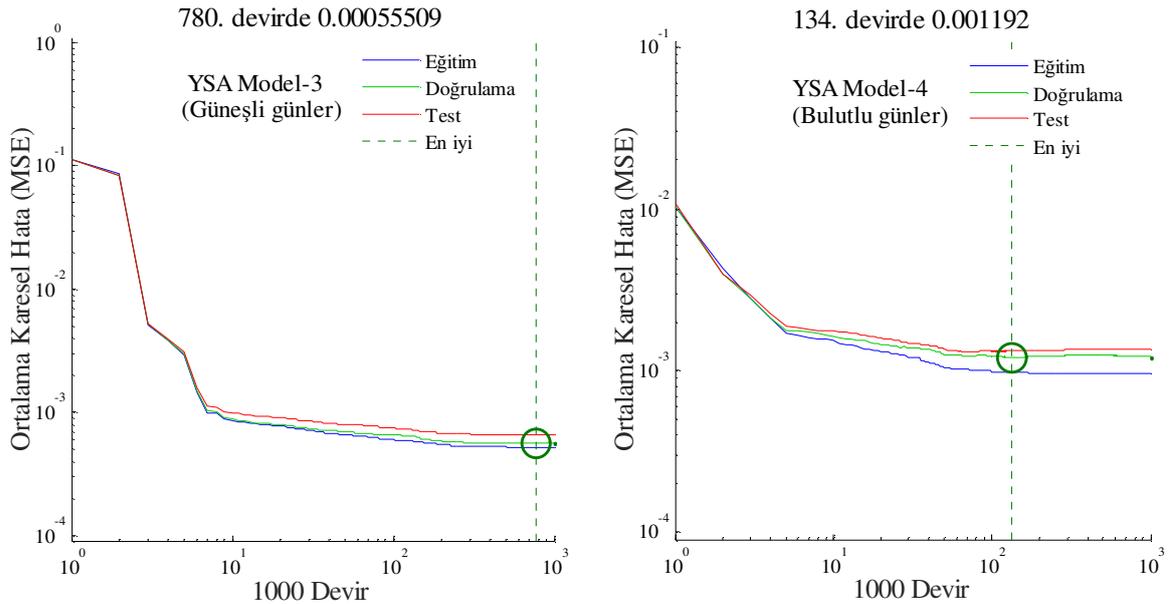
\*\* : p < 0.01

Tablo 5.8’e göre güneşli günler için yapılan Spearman Rho korelasyon analizinde tüm bağımsız değişkenlerin güç değeri üzerinde etkili olduğu görülmektedir (p<0.01). Bağımlı değişken güç ile en yüksek ilişkiye sahip değişken güneş ışıınım miktarı iken, en düşük ilişki

rüzgârın yönü olarak tespit edilmiştir. Modelde yer alan güneş ışıını, hava sıcaklığı, rüzgâr hızı ve güneş yükseklik açısı güç bağımlı değişkeni ile pozitif bir ilişki içerisinde yer almaktadır. Rüzgâr yönü ve bağıl nem değişkenlerinin ise güç değişkeni ile negatif bir ilişki içerisinde olduğu görülmektedir. Veri setinde yer alan bulutlu günler için yapılan analizde, güç bağımlı değişkeninin rüzgârın yönü hariç, diğer tüm bağımsız değişkenlerle anlamlı bir ilişki içerisinde olduğu tespit edilmiştir.

Hareketli panel için en doğru YSA modellerini geliştirmek üzere, veri setindeki değerler üzerinde birçok mimari yapı ve algoritma, performans ölçütlerine göre test edildikten sonra, en iyi modelin sabit panel sistemleri için geliştirilen modele benzer olduğu görülmüştür. YSA modelleri güneşli ve bulutlu günler için; güneş ışıını, hava sıcaklığı, rüzgâr hızı, rüzgâr yönü, bağıl nem oranı ve güneş yükseklik açısının bağımsız değişken olarak kullanıldığı bir girdi katmanı, her birinde 15'er adet nöron bulunan hiperbolik tanjant sigmoid aktivasyon fonksiyonu içeren iki adet gizli katman ve bağımlı güç değişkeninin elde edildiği bir çıktı katmanı şeklinde elde edilmiştir. Modelde yer alan bağımlı değişken ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişki Denklem (5.1)'deki gibi hesaplanmıştır. Geliştirilen YSA modellerine ait ağırlık katsayıları ve sapma değerleri Ek 18'de sunulmuştur.

Güneşli ve bulutlu hava şartları için geliştirilen YSA Model-3 ve YSA Model-4, ağıta eğitim performansının daha etkili olabilmesi için 0 ile 1 arasında normalize edilen veri setine uygulandığında, MSE'ye bağılı hata performans değişimi Şekil 5.6'daki gibi elde edilmiştir.



Şekil 5.6. YSA Model-3 ve YSA Model-4'e ait performans hata değerleri

FBPANN modeli güneşli havalar için kurgulandığında, eğitim sürecinde MSE değeri  $5,555 \cdot 10^{-4}$ , bulutlu günlerde MSE'ye ait değer  $11,92 \cdot 10^{-4}$  olarak hesaplanmıştır. Güneşli günler için güç değişkenini etkileyen parametrelere ilişkin FBPANN modeli incelendiğinde, performans ölçütlerinin oldukça iyi düzeyde olduğu görülmektedir. Güç bağımlı değişkenine ait gerçek değer ile tahmini değer arasındaki korelasyon katsayısı güneşli günler için geliştirilen YSA Model-3'te 0.99511, bulutlu günler için geliştirilen YSA Model-4'te ise 0,98794 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, FBPANN'nin bağımlı değişkeni çok iyi düzeyde tahminlediğini göstermektedir. Tek eksenli hareketli PV panel uygulamasına ait güneşli günler için geliştirilen YSA Model-3 ve bulutlu günler için geliştirilen YSA Model-4'e ait veri setinin eğitim, doğrulama ve test regresyon analizi Ek 19'da ve Ek 20'de verilmiştir.

MLR ile yapılan analiz incelendiğinde; ölçülen değer ile tahmin edilen değer arasındaki korelasyon katsayısı, güneşli günler için geliştirilen MLR Model-3'te 0,9854, bulutlu günler için geliştirilen MLR Model-4'te ise 0.9615 olarak elde edilmiştir. MLR'ye ait denklem ise aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$P_{Güneşli} = 3.8583 + 0.0852 \cdot (GI) - 0.1534 \cdot (T) + 0.0833 \cdot (WS) + 0.0338 \cdot (WD) - 0.0516 \cdot (RH) - 3.1579 \cdot (EA) \quad (5.5)$$

$$P_{Bulutlu} = -8.4568 + 0.0858 \cdot (GR) - 0.1118 \cdot (WS) + 0.0347 \cdot (WD) + 0.0072 \cdot (RH) - 0.0481 \cdot (EA) \quad (5.6)$$

Güneşli günler için bulunan MLR Model-3 denkleminde yer alan tüm bağımsız değişkenlere ait etki düzeyleri anlamlı bulunmuştur ( $p < 0.01$ ). Ancak bulutlu günler için bulunan MLR Model-4'te bağımsız değişken hava sıcaklığına ait etki düzeyi anlamlı bulunmadığından Denklem (5.6)'da hava sıcaklığı bir parametre olarak yer almamaktadır.

Güneşli ve bulutlu havalar için kurgulanan FBPANN ve MLR modellerine ait performans ölçüt değerleri Tablo 5.9'da gösterilmiştir.

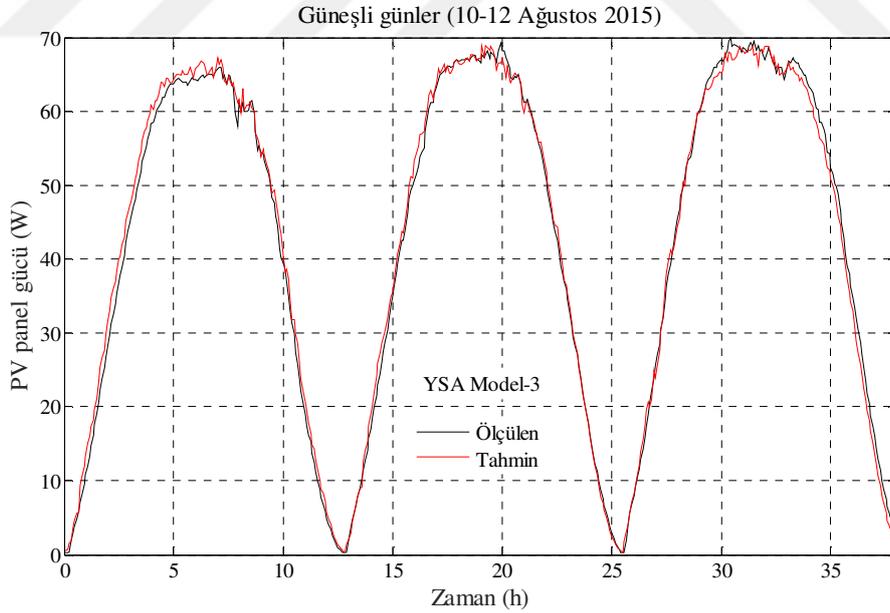
Tablo 5.9 incelendiğinde, hareketli panel uygulaması için kurgulanan FBPANN mimarisinde performans ölçütlerinin her iki hava koşulunda da bağımlı güç değerini oldukça iyi düzeyde tahminlendiği görülmektedir. Ancak, güneşli havalar için geliştirilen YSA Model-3'ün FBPANN mimarisinde daha düşük hata ile modellendiği tespit edilmiştir.

FBPANN ile kıyaslandığında, MLR için geliştirilen modellere ait performans ölçütlerinin iyi düzeyde elde edilemediği görülmektedir.

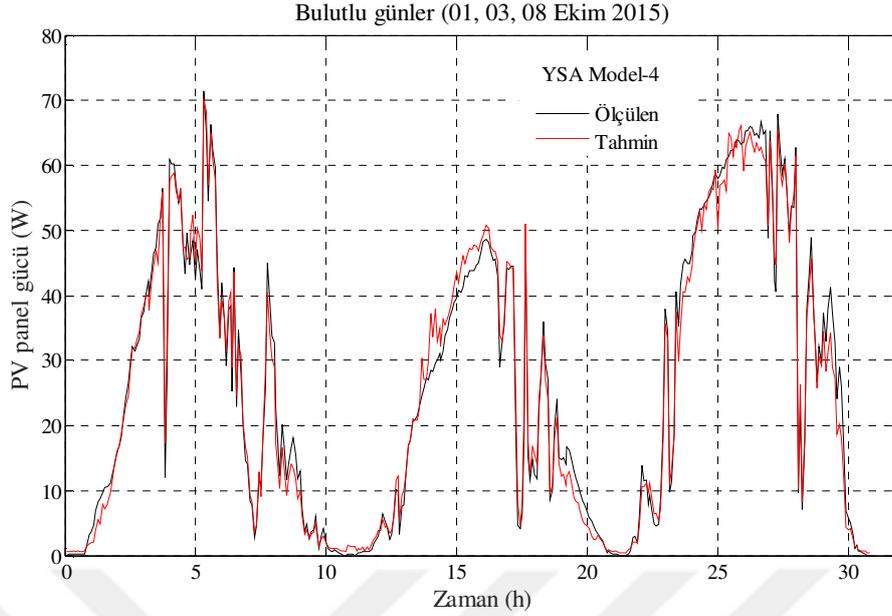
**Tablo 5.9.** Hareketli panel için YSA ve MLR modellerine ait performans ölçüt değerleri

Model	MSE	RMSE	MAE	RAE (%)	RRSE (%)	R	R <sup>2</sup>
YSA Model-3	0.000548	0.0234	0.0155	6.850	9.083	0.995	0.991
YSA Model-4	0.001065	0.03264	0.02241	11.50	14.09	0.990	0.980
MLR Model-3	0.001918	0.0438	0.0335	14.7915	17.0003	0.9854	0.971
MLR Model-4	0,003956	0.0629	0.0529	27.3196	27.4511	0.9615	0.924

Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’de bazı güneşli ve bulutlu günlerde, tek eksen güneş izleyicili PV panelin ürettiği gerçek güç değerleri ile geliştirilen YSA modellerinin tahminine ilişkin değerler bir arada gösterilmiştir. Güneşli günler için 10, 11 ve 12 Ağustos 2015 tarihleri, bulutlu günler için 01, 03 ve 08 Ekim 2015 tarihleri belirlenmiştir. Bu günlere ait veriler, YSA modellerinin eğitimi sürecinde ağı görmemiştir.



**Şekil 5.7.** YSA Model-3 güneşli 3 gün için tahminler



**Şekil 5.8.** YSA Model-4 güneşli 3 gün için tahminler

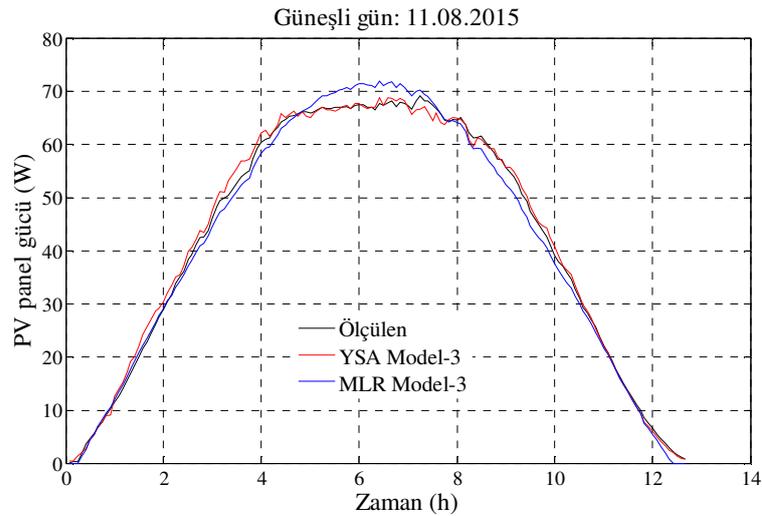
Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’de görüldüğü gibi, hem güneşli günler için geliştirilen YSA Model-3 hem de bulutlu günler için geliştirilen YSA Model-4, PV panellerinden elden edilen güç değerlerini çok doğru bir şekilde tahmin edebilmiştir. Üretilen gücün tahmin edildiği 6 güne ait istatistik analizi yapılmış ve Tablo 5.10’da sunulmuştur. Tablo 5.10’da, PV panellerin bir gün boyunca ürettiği anlık güç değerleri ve bu ölçülen değerlere ait tahmini değerler arasındaki ilişki incelenerek; RMSE, MAE, RAE, RRSE ve R değerleri bulunmuştur. Ayrıca her güne ait üretilen toplam enerji ve tahmin edilen toplam enerji belirtilmiştir. Yapılan analizlerde, bağımsız ve bağımlı değişkenlere ait tüm veri seti değerleri 0 ile 1 arasında normalize edilmiştir.

Tablo 5.10 incelendiğinde, güneşli günler için geliştirilen YSA Model-3, ortalama 99,893% korelasyon katsayısı ile çok iyi bir tahminleme yapmıştır. Önemli bir ölçüt olan RAE değeri ortalama 5,745% bulunmuştur. Bulutlu günler için geliştirilen YSA Model-4’ün de, ortalama 99,52% korelasyon katsayısı ile yine çok iyi bir tahminleme gerçekleştirdiği görülmektedir. RAE değeri ortalama 8,89% olarak tespit edilmiştir. Her iki YSA modeli için de, PV modülden elde edilen enerji değeri ile bu enerji değerine ait olan tahmin, birbirine kabul edilebilir derecede yakın bulunmuştur. Tabloda yer alan tüm sonuçlar geliştirilmiş olan YSA modellerinin, bağımsız ve bağımlı değişkenler arasında sıkı bir ilişkinin kurduğunu ve iyi düzeyde bir tahminleme yaptığını ifade etmektedir.

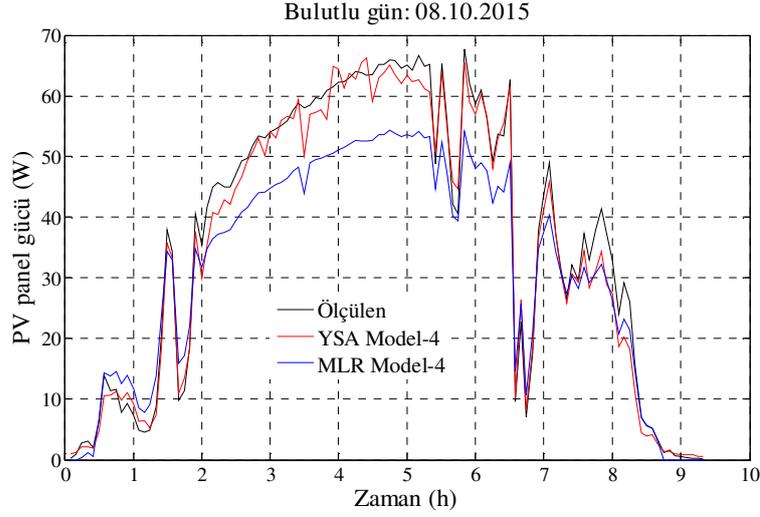
**Tablo 5.10.** Hareketli panel için ölçülen ve YSA ile tahmin edilen enerji değerleri

Gün tipi	Günlük ölçülen enerji (Wh)	Günlük tahmin edilen enerji (Wh)	RMSE	MAE	RAE (%)	RRSE (%)	R (%)
Güneşli günler	YSA Model-3						
10.08.2015	515.088	533.673	0.01876	0.01653	7.473	7.584	99.89
11.08.2015	536.044	541.447	0.01200	0.00974	4.334	4.750	99.92
12.08.2015	576.950	565.922	0.01531	0.01211	5.430	6.083	99.87
Bulutlu Günler	YSA Model-4						
01.10.2015	255.303	250.551	0.02030	0.01618	9.010	9.946	99.54
03.10.2015	205.011	213.445	0.01924	0.01451	9.768	11.446	99.49
08.10.2015	340.300	327.719	0.02376	0.01661	7.906	9.998	99.53

Hareketli panel uygulamasına ait veri setinin analiz edilmesi sonucunda, güneşli ve bulutlu günler için elde edilen MLR fonksiyonları Denklem (5.5) ve (5.6)'te verilmişti. YSA Model-3 ve YSA Model-4'ün tahmin yeteneğini test etmek üzere, belirli günlere ait tahminler MLR Model-3 ve MLR Model 4 ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma güneşli ve bulutlu günler için ayrı ayrı yapılmıştır. Güneşli gün olarak 11 Ağustos 2015, bulutlu gün olarak 08 Ekim 2015 seçilmiş olup bu iki güne ait ölçülmüş gerçek veriler, ağız eğitim sürecinde kullanılmamıştır. Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da YSA Model-3, YSA Model-4 ve MLR modelleri ile yapılan tahminler, ölçülmüş değerlerle karşılaştırılmıştır.



**Şekil 5.9.** YSA ve MLR Model-3'ün gerçek değerlerle karşılaştırılması



**Şekil 5.10.** YSA ve MLR Model-4'ün gerçek değerlerle karşılaştırılması

Şekil 5.9 ve Şekil 5.10 incelendiğinde, güneşli günler için geliştirilen YSA Model-3 ve bulutlu günler için geliştirilen YSA Model-4, ölçülmüş değerlere yakın sonuçlar üretmiştir. Tablo 5.11'de, YSA ve MLR modellerine ait RMSE, RAE ve R değerleri verilmiştir.

**Tablo 5.11.** Hareketli panel için YSA ve MLR modellerinin karşılaştırılması

Modeller	Güneşli gün - 11.08.2015			Bulutlu gün - 08.10.2015		
	YSA Model-3 ve MLR Model-3			YSA Model-4 ve MLR Model-4		
	RMSE	RAE (%)	R (%)	RMSE	RAE (%)	R (%)
YSA Modelleri	1.161	4.286	99.891	2.94	10.65	99.375
MLR Modelleri	1.933	7.598	99.70	7.562	30.53	99.158

Tablo 5.11 incelendiğinde, geliştirilen YSA modelleri MLR modellerine göre, hem güneşli hem de bulutlu günlerde çok daha iyi tahmin yapabilmektedir. Güneşli günler için geliştirilen YSA modeli, gerçek değerler üzerinden 1.161 RMSE, 4,286% RAE ve 99,891% R değeri ile çok iyi bir tahminleme yapmıştır. Bulutlu günler için geliştirilen YSA modelinin de MSE, RAE ve R değerlerine bakıldığında çok iyi bir tahminleme gerçekleştirdiği görülmektedir. Güneşli ve bulutlu günler için geliştirilen MLR modelleri de kabul edilebilir bir tahminleme gerçekleştirmiştir. Ancak, YSA modellerinin MLR modellerine göre çok daha iyi bir tahminleme gerçekleştirdiği görülmektedir.

Denklem (5.4) dikkate alınarak yapılan analizde FBPANN mimarisinde güneşli ve bulutlu havalar için güç bağımlı değişkeni üzerinde etkili olan tahminleyicilerin önem sıralaması Tablo 5.12’de gösterilmiştir.

**Tablo 5.12.** Hareketli panel için bağımsız değişkenlerin önem düzeyi

Önem sıralaması	Güneşli günler	Bulutlu günler
1	Güneş ışınlı	Güneş ışınlı
2	Hava sıcaklığı	Hava sıcaklığı
3	Bağıl nem	Bağıl nem
4	Güneş yükseklik açısı	Güneş yükseklik açısı
5	Rüzgâr hızı	Rüzgâr hızı
6	Rüzgâr yönü	Rüzgâr yönü

Tablo 5.12 incelendiğinde, güneşli ve bulutlu günler için geliştirilmiş her iki YSA modelinde de bağımlı güç değişkeni üzerinde en etkili bağımsız değişken güneş ışınlıdır. Diğer bağımsız değişkenlerin önem sırası aynı olup, her iki model için de önem düzeyi en düşük bağımsız değişken rüzgâr yönü olarak tespit edilmiştir.

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 6.1. Sonuçlar

Fotovoltaik panel uygulamalarındaki en büyük problemlerden biri sahip oldukları yüksek maliyetlerdir. Son yıllarda ciddi düşüşler meydana gelmişse de, bu sistemlerin tesis maliyetlerine karşılık ürettikleri enerji miktarı yüksek değildir. Buna bağlı olarak fotovoltaik hücre verimliliğinin artırılması için birçok çalışma yapılmaktadır. Sistem verimliliğini artırmak için ise fotovoltaik paneller güneş izleyici sistemler ile kullanılmaktadır. Güneş izleyici sistemler tek eksenli ve iki eksenli olarak tasarlanmaktadır, ancak hafif ve basit mekanik yapıları dolayısıyla tek izleyici sistemler daha çok tercih edilmektedir.

Fotovoltaik santraller ile ilgili yatırımlar planlanırken, önemli hususlardan biri tesis edilecek santralin güneş izleyici bir sisteme sahip olup olmayacağına karar vermektir. Sabit açılı veya güneş izleyici sistemlerden hangisinin kullanılacağına karar vermede, santralin tesis edileceği bölgenin güneş enerjisi potansiyelinin bilinmesi son derece önemlidir. Güneş panellerinin ürettiği elektrik enerjisi miktarı, başta güneş ışınımı olmak üzere, hava sıcaklığı, bağıl nem oranı, rüzgâr hızı ve rüzgâr yönü vb. meteorolojik değişkenlere bağlıdır.

Fotovoltaik panel üreticilerinin ürünlerine ait sundukları karakteristikler standart test koşullarını kapsamaktadır. Ancak fotovoltaik paneller birbirinden farklı birçok coğrafyada standart olmayan şartlarda işletildiğinden, fotovoltaik uygulamalarına ilişkin fizibilite çalışmalarında kullanılacak panellerin davranış şekillerini önceden bilmek daha doğru bir maliyet yapılandırması sağlayacaktır. Bunun için panellerin işletileceği bölgeye ait standart olmayan test koşullarını içeren meteorolojik parametrelerin panel gücü üzerindeki etkilerinin saptanması önemlidir.

Çalışma kapsamında, Batman ilinde kurulan meteoroloji istasyonu aracılığıyla güneş ışınımı, hava sıcaklığı, bağıl nem oranı, rüzgâr yönü ve rüzgâr hızı ile sabit açılı ve tek eksen izleyicili panelleri içeren iki adet prototip uygulamadan elde edilen güç değerleri bir yıl boyunca kaydedilmiştir. Oluşturulan büyük veri seti üzerinde yapay sinir ağı tekniği kullanılarak, meteorolojik parametreler ile panel güçleri arasındaki korelasyon belirlenmiştir. Geliştirilen yapay sinir ağı modellerinin, çoklu doğrusal regresyon modelleriyle beraber, ağların eğitimi sürecinde kullanılmamış olan test verileri üzerindeki başarı oranları grafikler ve tablolarla karşılaştırmalı olarak ortaya konulmuştur.

Araştırmadan elde edilen bulgulara göre, farklı hava koşullarına göre geliştirilen yapay sinir ağı modellerinin, hem sabit açılı panel, hem de tek eksen izleyicili panelin ürettiği enerji değerini çok iyi düzeyde tahmin ettiği görülmüştür.

PV alanında, çevresel şartların panel verimliliği üzerindeki etkisi, panel gücü ve çevresel parametreler arasındaki ilişkinin deneysel olarak saptanması vb. çalışmalar uzun ve zahmetli bir süreç gerektirmektedir. Bu olumsuzluk, bu kapsamdaki çalışma sayısının sınırlı kalmasına neden olmuştur. 1 yılı kapsayan veri setimiz üzerinde yaptığımız analizler sonucunda elde ettiğimiz bulgular, literatürde bulunan sınırlı sayıdaki çalışmalara ait bulgularla karşılaştırıldığında:

Hiyama ve Kitabayashi [14] çevresel bilgiler kullanarak sabit açılı bir PV modülünün ürettiği maksimum gücü YSA ile tahmin etmeye çalışmışlardır. Araştırmacılar, çevresel bilgi olarak güneş ışınımı, hava sıcaklığı ve rüzgâr hızını kullanmış olup, PV modülü ile ürettikleri enerjiyi aylık bazda incelemişlerdir. Araştırmacılar, geliştirdikleri YSA modellerinin PV modülünün ürettiği gücü uzun vadede %6 civarında bir hata ile tahmin ettiklerini ifade etmişlerdir. Mellit vd. [15] çevresel bilgilerden güneş ışınımı ve hava sıcaklığını kullanarak, sabit açılı bir PV modülünden elde edilen gücü YSA tabanlı tahmin etmeye çalışmışlardır. Araştırmacılar, güneşli ve bulutlu günleri tayin ederken günlük ortalama güneş ışınımı değerini belirleyici olarak kullanmışlardır: Ortalama güneş ışınımı,  $400 \text{ W/m}^2/\text{gün}$  değerinin üzerinde ise güneşli, altında ise bulutlu olarak tayin etmişlerdir. Araştırmacılar geliştirdikleri YSA modellerini, çoklu doğrusal regresyon, polinomal regresyon, tek diyot ve analitik modeller ile karşılaştırmışlardır. Çalışmalarında, geliştirdikleri YSA modellerinin hem güneşli hem de bulutlu günler için en doğru tahmini yaptığını belirtmişlerdir. Araştırmacılar gün bazında yaptıkları analizlerde, güneşli günlere ilişkin geliştirdikleri YSA modeli için korelasyon katsayısının %96 ile %97 arasında, hata değerinin ise elektriksel kayıplarla beraber %5 civarında olduğunu belirtmişlerdir. Bulutlu günlere ilişkin geliştirdikleri YSA modeli için korelasyon katsayısının %93 ile %97 arasında, hata değerinin ise elektriksel kayıplarla beraber yine %5 civarında olduğunu belirtmişlerdir.

Yaptığımız bu çalışmada sabit açılı güneş paneline ait analizlerde, güneşli günler için geliştirdiğimiz YSA modelinde, korelasyon katsayısı %99,970 ile %99,998 arasında ve hata oranı %1,4 civarındadır. Bulutlu günler için geliştirdiğimiz YSA modelinde ise korelasyon katsayısı %99,637 ile %99,880 arasındayken hata oranı yine %1,4 civarındadır. Tek eksenli güneş izleyici panele ait analizlerde, güneşli günler için geliştirdiğimiz YSA modelinde,

korelasyon katsayısı, %99,87 ile %99,92 arasında ve hata oranı %2,5 civarındadır. Bulutlu günler için geliştirdiğimiz YSA modelinde ise, korelasyon katsayısı %99,49 ile %99,54 arasında olup hata oranı yine %2,5 civarındadır. Geliştirdiğimiz YSA modellerinin önceki çalışmalara göre çok daha iyi bir başarı göstermesinin temel üç sebebi vardır. Bunlardan birincisi, PV panellerin ürettiği enerjinin üzerinde etkili olan çevresel değişkenlerin birçoğunun ele alınmış olması ve modellerin zengin bir veri tabanı üzerinden geliştirilmiş olmasıdır. İkincisi, bulutlu ve güneşli günleri sınıflandırmadaki yaklaşımdır. Üçüncüsü ise, YSA modelleri geliştirilirken ağ eğitimi için seçilen kriterlerin ve modellerle ilgili eğitim algoritmalarının doğru saptanmış olmasıdır.

Batman ili meteorolojik verilerine göre elde edilen yapay sinir ağı modelleri kullanılarak, dünyada herhangi bir bölgeye ait meteorolojik parametreler kullanılarak, tesis edilmek istenen fotovoltaik sistemlere ilişkin enerji üretimi yüksek bir doğrulukla tahmin edilebilecektir.

## 6.2. Öneriler

Tez ile ilgili araştırma sürecinde yapılan analizler ve elde edilen bulgular ışığında, araştırmacıların dikkate alabileceği çeşitli konular aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- Bu çalışmada kullanım alanı oldukça yaygın olan tek kristalli silikon paneller kullanılmıştır. Geliştirilen YSA modellerinin diğer panel çeşitleri üzerindeki başarısı, deneysel olarak veya benzetim yoluyla araştırılabilir.
- PV panellerin ürettiği gücün denetiminde verimi arttırıcı herhangi bir MPPT tekniği kullanmak çalışmanın kapsamı dışında tutulmuştur. MPPT'nin de kullanıldığı durum için deneysel çalışma tekrarlanabilir veya teorik olarak incelenebilir.
- Çevresel değişkenlerin iki eksen izleyicili PV panelin ürettiği güç değeri üzerindeki etkileri deneysel olarak veya benzetim yoluyla araştırılabilir.
- Geliştirilen YSA modellerine ilişkin girdi, gizli ve çıktı katmanlarına ait aktivasyon fonksiyonu ve bu fonksiyondaki ağırlık katsayıları ve sapma değerleri sunulmuştur. Bu bilgiler kullanılarak, herhangi bir bölgeye ait güneş enerjisi potansiyelini belirleyebilecek yazılımlar geliştirilebilir.
- PV panelden elde edilen gücün çevresel değişkenlerle olan korelasyonu yüksek bir doğrulukla ortaya konulmuştur. Bu veriler ışığında PV panellerin verimi, makine öğrenmesi teknikleri kullanılarak artırılabilir. Örneğin; kapalı döngü güneş izleyicili

hareketli panel uygulamalarında, havanın bulutlu olduğu bir anda hareket mekanizmasının sarf edeceği enerji miktarı bir kayıp olarak düşünölüp mekanizmanın izleme yapmaması sağlanabilir. Böylece hareketli mekanizmanın tükettiği enerji ile izleyici sistemin PV panel verimine sağladığı katkı arasında bir optimizasyon yapılabilir.



## KAYNAKLAR

- [1] **Görez, A. ve Alkan, A.**, 2005. Türkiye'nin yenilenebilir enerji kaynakları ve hidroelektrik enerji potansiyeli, *III. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, Antalya, Türkiye, Ekim 2005, s. 21-22.
- [2] **Borhanazad, H., Mekhilef, S., Saidur, R. and Boroumandjazi, G.**, 2013. Potential application of renewable energy for rural electrification in Malaysia, *Renewable Energy*, **59**, 210-219.
- [3] **Juswanto, W. and Ali, Z.**, 2016. Renewable Energy and Sustainable Development in Pacific Island Countries, Adbi Institute, **5**, 1-6.
- [4] **Goldemberg, J. and Bioethanol, S.B.**, 2003. Energy and sustainable development, in *Worlds Apart: Globalization and the Environment*, pp. 53-65, Ed. Speth, J.G., Island Press, Washington.
- [5] **Kaya, M.N., Aksoy, M.H. and Kose, F.**, 2017. Renewable energy in Turkey: potential, current status and future aspects, *Ann Faculty Eng Hunedoara*, **15**, 65.
- [6] **Fahrenbruch, A. and Bube, R.**, 1983. Fundamentals of solar cells: photovoltaic solar energy conversion, Academic Press, New York.
- [7] **Mellit, A., Benghanem, M. and Kalogirou, S.A.**, 2006. An adaptive wavelet-network model for forecasting daily total solar-radiation, *Applied Energy*, **83**, 705-722.
- [8] **Hiyama, T., Kouzuma, S. and Imakubo, T.**, 1995. Identification of optimal operating point of PV modules using neural network for real time maximum power tracking control, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **10**, 360-367.
- [9] **Bahgat, A.B.G., Helwa, N.H., Ahamd, G.E. and El Shenawy, E.T.**, 2004. Estimation of the maximum power and normal operating power of a photovoltaic module by neural networks, *Renewable Energy*, **29**, 443-457.
- [10] **Bahgat, A.B.G., Helwa, N.H., Ahmad, G.E. and El Shenawy, E.T.**, 2005. Maximum power point tracking controller for PV systems using neural networks, *Renewable Energy*, **30**, 1257-1268.
- [11] **Mellit, A., Benghanem, M., Arab, A.H. and Guessoum, A.**, 2005. An adaptive artificial neural network model for sizing stand-alone photovoltaic systems: application for isolated sites in Algeria, *Renewable Energy*, **30**, 1501-1524.
- [12] **Karatepe, E., Boztepe, M. and Colak, M.**, 2006. Neural network based solar cell model, *Energy conversion and management*, **47**, 1159-1178.

- [13] **AbdulHadi, M., Al-Ibrahim, A.M. and Virk, G.S.**, 2004. Neuro-fuzzy-based solar cell model, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **19**, 619-624.
- [14] **Hiyama, T. and Kitabayashi, K.**, 1997. Neural network based estimation of maximum power generation from PV module using environmental information, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **12**, 241-247.
- [15] **Mellit, A., Sağlam, S. and Kalogirou, S.A.**, 2013. Artificial neural network-based model for estimating the produced power of a photovoltaic module, *Renewable Energy*, **60**, 71-78.
- [16] **Fesharaki, V.J., Dehghani, M., Fesharaki, J.J. and Tavasoli, H.**, 2011. The effect of temperature on photovoltaic cell efficiency, *In Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference on Emerging Trends in Energy Conservation – ETEC*, Tehran, Iran, September 2011, 20-21.
- [17] **Radziemska, E.**, 2003. The effect of temperature on the power drop in crystalline silicon solar cells, *Renewable Energy*, **28**, 1-12.
- [18] **Hausler, T. and Rogass, H.**, 2000. Latent heat storage on photovoltaic, *Sixteenth European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Glasgow, UK, October 2000, 2265–2267.
- [19] **Mekhilef, S., Saidur, R. and Kamalisarvestani, M.**, 2012. Effect of dust, humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **16**, 2920-2925.
- [20] **White, W.M.**, 1999. *Geochemistry-Fundamental Concepts of Thermodynamics*, John Hopkins University press, Washington.
- [21] **Frank, N.**, 2005. *Energy Engine and Evolution*, Elsevier Press, Netherlands.
- [22] **Freris, L. and Infield, D.**, 2008. *Renewable Energy in Power Systems*, John Wiley & Sons Inc., Chichester, United Kingdom.
- [23] **Maczulak, A.**, 2009. *Renewable Energy: Sources and Methods*, Infobase Publishing, New York.
- [24] **Kleczeck, J.**, 1985. The Sun as a System of Elementary Particles, *Solar Physics*, **100**, 115-123.
- [25] **Doğan, H., Aktaş, M. ve Menlik, T.**, 2004. Güneş enerjisi sistemlerinde kanatçık yüzeyindeki sıcaklık dağılımının sonlu farklar metodu ile analizi, *Teknoloji Dergisi*, **3**, 407-414.
- [26] **Duffie, J.A. and Beckman, W.A.**, 1991. *Solar Engineering of thermal Process*, Willey-Interscience Publication, New York.

- [27] **Thekaekara, M.P.**, 1976. Solar radiation measurement: techniques and instrumentation, *Solar Energy*, **18**, 309-325.
- [28] **Enarun, D.**, 1987. Bina Tasarım Aşamasında Hacim İçindeki Doğal Işık Dağılımını Belirlemek İçin Bir Model, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [29] **Kılıç, A.**, 1982. Direkt Güneş Işınımı Tayini İçin Yeni Bir Metod, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [30] **Altın, V.**, 2004. Güneş Enerjisinden Yararlanılarak Elektrik Üretimi, *Mimar ve Mühendis Dergisi*, **33**, 28-31.
- [31] **Demirbas, S., Demirtas, M., Sefa, I. and Colak, I.**, 2008. Building of W&S energy system, *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, Naples, Italy, June 2008, 1466-1469.
- [32] **Yu, X. and Qu, H.**, 2010. Wind power in China - Opportunity goes with challenge, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**, 2232-2237.
- [33] **Guler, O.**, 2009. Windenergy status in electrical energy production of Turkey, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **13**, 473-478.
- [34] **Roper, L.D.**, 2012. Future world energy, <http://www.roperld.com/science/energyfuture.htm> 20 Ağustos 2017.
- [35] **British Petroleum**, 2016. Statistical Review of World Energy, <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html> 24 Ağustos 2017.
- [36] **Kannan, N. and Vakeesan, D.**, 2016. Solar energy for future world:-A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **62**, 1092-1105.
- [37] **International Energy Agency**, 2014. International Energy Statistics, <http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/IEDIndex3.cfm> 08 Ağustos 2017.
- [38] **Li, D.H., Cheung, G.H. and Lam, J.C.**, 2005. Analysis of the operational performance and efficiency characteristic for photovoltaic system in Hong Kong, *Energy Conversion and Management*, **46**, 1107-1118.
- [39] **Solar GIS**, 2016. Global Horizontal Irradiation (GHI), <http://solargis.com/assets/graphic/free-map/GHI/Solargis-World-GHI-solar-resource-map-en.png> 18 Ekim 2017.
- [40] **Guebibia, I. and Safi, M.J.**, 2017. Methodology of technico-economical performances evaluation of concentrating solar power (CSP) plants for trigeneration, *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, **12**, 147-157.
- [41] **Ren21**, 2017. Global Status Report, Secretariat Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21), Paris.

- [42] **Weiss, W., Spörk-Dür, M. and Mauthner, F.**, 2017. Solar Heat Worldwide, *IEA Solar Heating & Cooling Programme*, May 2017.
- [43] **IEA PVPS**, 2016. Trends in Photovoltaic Applications, Survey Report of Selected IEA Countries Between 1992 and 2015, Paris, [http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/national/Trends\\_2016\\_-\\_mr.pdf](http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/national/Trends_2016_-_mr.pdf) 24 Eylül 2017.
- [44] **Dincer, F.**, 2011. The analysis on photovoltaic electricity generation status potential and policies of the leading countries in solar energy, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **15**, 713-720.
- [45] **Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü**, <http://www.eie.gov.tr/MyCalculator/Default.aspx> 06 Ağustos 2017.
- [46] **Doğan, H., Aktaş, M. ve Menlik, T.**, 2004. Güneş enerjisi sistemlerinde kanatçık yüzeyindeki sıcaklık dağılımının sonlu farklar metodu ile analizi, *Teknoloji Dergisi*, **3**, 407-414.
- [47] **Şen, Z.**, 2004. Türkiye'nin Temiz Enerji imkânları, *Mimar ve Mühendis Dergisi*, **33**, 6-12.
- [48] **Kılıç, F.Ç.**, 2015. Güneş Enerjisi, Türkiye'deki Son Durumu ve Üretim Teknolojileri, *Mühendis ve Makine Dergisi*, **56**, 28-40.
- [49] **TMMOB Makina Mühendisleri Odası**, 2014. Türkiye'nin Enerji Görünümü, Yayın No: MMO/2014/616, Ankara.
- [50] **Kılıç, F.Ç.**, 2011. Türkiye'deki Yenilenebilir Enerjilerde Mevcut Durum ve Teşviklerindeki Son Gelişmeler, *Mühendis ve Makine Dergisi*, **52**, 103-115.
- [51] **Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı**, 2017. 2016 Faaliyet Raporu, *Strateji Geliştirme Başkanlığı*, Ankara.
- [52] **Bayraktar, K.**, 2016. Güneş Ülkemizin Enerji Geleceğidir, *Energyworld Dergisi*, **12**, 1-2.
- [53] **Kapluhan, Erol.**, 2014. Enerji Coğrafyası açısından bir inceleme: Güneş enerjisinin Dünyadaki ve Türkiye'deki kullanım durumu, *İstanbul Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Coğrafya Bölümü Coğrafya Dergisi*, **29**, 70-98.
- [54] **Sezal, L.**, 2017. Türkiye'deki güneş enerjisi yatırımlarının davranışsal finans açısından değerlendirilmesi, *Journal of International Social Research*, **10**, 1117-1125.
- [55] **Varınca, K.B. ve Gönüllü, M.T.**, 2006. Türkiye'de güneş enerjisi potansiyeli ve bu potansiyelin kullanım derecesi, yöntemi ve yaygınlığı üzerine bir araştırma, *I. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi*, Eskişehir, Türkiye, Haziran 21-23.

- [56] **Kökden, B.**, 2002. PV temelli enerji sistemleri ve ülkemiz için bir güneş santrali modellenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Gebze.
- [57] **Oparaku, O.U.**, 2002. Assessment of the cost-effectiveness of photovoltaic systems for telecommunications in Nigeria, *International journal of solar energy*, **22**, 123-129.
- [58] **Mathew, X.**, 2009. Photovoltaics, Solar Energy Materials and Thin Films, XVI International Materials Research Congress IMRC 2007, Cancun, Mexico, August 2007, 1-2.
- [59] **Green, M.A.**, 2000. Photovoltaics, technology overview, *Energy Policy*, **28**, 989-998.
- [60] **Kolsi, S., Samet, H. and Amar, M.B.**, 2014. Design analysis of DC-dc converters connected to a photovoltaic generator and controlled by MPPT for optimal energy transfer throughout a clear day, *Journal of Power and Energy Engineering*, **2**, 27-34.
- [61] **De Brito, M.A.G., Galotto, L., Sampaio, L.P., e Melo, G.D.A. and Canesin, C.A.**, 2013. Evaluation of the main MPPT techniques for photovoltaic applications, *IEEE transactions on industrial electronics*, **60**, 1156-1167.
- [62] **Samimi, J., Soleimani, E.A. and Zabihi, M.S.**, 1997. Optimal sizing of photovoltaic systems in varied climates, *Solar Energy*, **60**, 97-107.
- [63] **Saidan, M., Albaali, A.G., Alasis, E. and Kaldellis, J.K.**, 2016. Experimental study on the effect of dust deposition on solar photovoltaic panels in desert environment, *Renewable Energy*, **92**, 499-505.
- [64] **Abderrezek, M. and Fathi, M.**, 2017. Experimental study of the dust effect on photovoltaic panels' energy yield, *Solar Energy*, **142**, 308-320.
- [65] **Keyhani, H. and Toliyat, H.A.**, 2014. Single-stage multistring PV inverter with an isolated high-frequency link and soft-switching operation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **29**, 3919-3929.
- [66] **Bruch, M. and Müller, M.**, 2014. Calculation of the Cost-effectiveness of a PV Battery System, *Energy Procedia*, **46**, 262-270.
- [67] **Eldahab, Y.E.A., Saad, N.H. and Zekry, A.**, 2016. Enhancing the design of battery charging controllers for photovoltaic systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **58**, 646-655.
- [68] **Canan, F.**, 2003. Mimaride fotovoltaik panel uygulamaları, *Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi*, Kayseri, Türkiye, Ekim 2003, 43-52.
- [69] **Carstensen, J., Popkirov, G., Bahr, J. and Föll, H.**, 2003. Cello: An advanced LBIC measurement technique for solar cell local characterization, *Solar Energy Materials and Solar Cell*, **76**, 599-611.
- [70] **Sutton, G.W.**, 1966. Direct Energy Conversion, Mcgraw-Hill, New York.

- [71] **Batman, M.A.**, 2001. Elektrik üretimi için güneş pillerinin kullanımında verimi artırıcı yeni bir yöntem, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul.
- [72] **Markvart, T.**, 1994. Solar Electricity, John Wiley & Sons Inc., New York,
- [73] **Batchheller, P.**, 1993. Microprocessor controlled maximum power point tracker for photovoltaic system, Ms thesis, Devry Institute of Technology, Alberta.
- [74] **Cook, G.**, 1995. Photovoltaic Fundamentals, Solar Energy Research Institute Press, Washington.
- [75] **Yılmaz M.**, 2013. Güneş takip sistemi ile güneş enerjisinden elektrik enerjisi elde etme yöntemleri ve optimum verimin belirlenmesi, *Doktora Tezi*, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [76] **Jäger, K., Isabella, O., Smets, A.H., Van Swaaij, R.A.C. and Zeman, M.**, 2014. Solar energy fundamentals, technology and systems, Delft University of Technology Press, Netherland.
- [77] **Street, R.A.**, 1991. Hydrogenated amorphous silicon, Cambridge University Press, Cambridge.
- [78] **Poortmans, J. and Arkhipov, V.**, 2006. Thin Film Solar Cells: Fabrication, Characterization and Applications, John Wiley & Sons Inc., Hoboken, NJ, USA.
- [79] **Tanaka, A.**, 2004. Toxicity of indium arsenide, gallium arsenide, and aluminium gallium arsenide, *Toxicology and applied pharmacology*, **198**, 405-411.
- [80] **Friedman, D.J., Kurtz, S.R., Bertness, K.A., Kibbler, A.E., Kramer, C., Olson, J.M. and Snyder, J.K.**, 1995. Accelerated publication 30.2% efficient GaInP/GaAs monolithic two-terminal tandem concentrator cell, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, **3**, 47-50.
- [81] **Gee, J.M. and Virshup, G.F.**, 1988. A 31%-efficient GaAs/silicon mechanically stacked, multijunction concentrator solar cell, *In Photovoltaic Specialists Conference, Conference Record of the Twentieth IEEE*, September 1988, 754-758.
- [82] **Kayes, B.M., Zhang, L., Twist, R., Ding, I.K. and Hignashi, G.S.**, 2014. Flexible thin-film tandem solar cells with > 30% efficiency, *IEEE Journal of Photovoltaics*, **4**, 729-733.
- [83] **Wu, X.**, 2004. High-efficiency polycrystalline CdTe thin-film solar cells. *Solar Energy*, **77**, 803-814.
- [84] **Green, M.A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W. and Dunlop, E.D.**, 2015. Solar cell efficiency tables (Version 45), *Progress in photovoltaics: research and applications*, **23**, 1-9.

- [85] **Lynn, P.A.**, 2011. Electricity from sunlight: an introduction to photovoltaics, John Wiley & Sons Inc., Chichester, United Kingdom.
- [86] **Messenger, R. and Abtahi, A.**, 2017. Photovoltaic systems engineering, CRC press, London.
- [87] **Kasten, F. and Young, A.T.**, 1989. Revised optical air mass tables and approximation formula, *Applied Optics*, **28**, 4735-4738.
- [88] **Cooper, P.I.**, 1969. The absorption of radiation in solar stills, *Solar Energy*, **12**, 333-346.
- [89] **Spencer, J.W.**, 1971. Fourier series representation of the position of the sun, *Search*, **2**, 172-172.
- [90] **Şenpınar A.**, 2005. Bağımsız Güneş Pili Sistemlerinin Bilgisayar İle Kontrolü, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [91] **Braun, J.E. and Mitchell, J.C.**, 1983. Solar geometry for fixed and tracking surfaces, *Solar Energy*, **31**, 439-444.
- [92] **Al-Soud, M.S. and Hrayshat, E.S.**, 2009. A 50MW concentrating solar power plant for Jordan, *Journal of Cleaner Production*, **17**, 625-635.
- [93] **Makhloufi, M.T., Khireddine, M.S., Abdessemed, Y. and Boutarfa, A.**, 2014. Tracking Power Photovoltaic System using Artificial Neural Network Control Strategy, *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, **6**, 17.
- [94] **Goswami, D.Y., Kreith, F. and Kreider, J.F.**, 2000. Principles of solar engineering, CRC Press, London.
- [95] **Kalogirou, S. and Sencan, A.**, 2010. Artificial intelligence techniques in solar energy applications, In Solar Collectors and Panels, Theory and Applications, InTech Press, Slavka Krautzeka.
- [96] **Hersch, P. and Zweibel, K.**, 1982. Basic photovoltaic principles and methods, Golden Press, Colorado.
- [97] **Tudorache, T. and Kreindler, L.**, 2010. Design of a solar tracker system for PV power plants. *Acta Polytechnica Hungarica*, **7**, 23-39.
- [98] **Chong, K.K. and Wong, C.W.**, 2010. General formula for on-Axis sun-tracking system, In Solar Collectors and Panels, Theory and Applications, InTech Press, Slavka Krautzeka.
- [99] **Sözen, A., Arcaklioğlu, E. and Özalp, M.**, 2004. Estimation of solar potential in Turkey by artificial neural networks using meteorological and geographical data. *Energy Conversion and Management*, **45**, 3033-3052.

- [100] **Anderson, E., Dohan, C. and Sikora, A.**, 2003. Solar panel peak power tracking system, *Worcester Polytechnic Institute*, **12**, 28-30.
- [101] **Parmar, N.J., Parmar, A.N. and Gautam, V.S.**, 2015. Passive solar tracking system, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, **5**, 138-145.
- [102] **Saini, S. and Kumat, K.**, 2015. Solar Tracking: An efficient method of improving solar plant efficiency, *International Journal of Electrical and Electronics Engineers*, **7**, 199-203.
- [103] **Nadia, A.R., Isa, N.A.M. and Desa, M.K.M.**, 2017. Advances in solar photovoltaic tracking systems: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, In press.
- [104] **Assaf, E.M.**, 2014. Design and implementation of a two axis solar tracking system using plc techniques by an inexpensive method, *International Journal of Academic Scientific Research*, **2**, 54-65.
- [105] **Roth, P., Georgiev, A. and Boudinov, H.**, 2005. Cheap two axis sun following device, *Energy conversion and management*, **46**, 1179-1192.
- [106] **Usta, M.A., Akyazi, O. and Altas, I.H.**, 2011. Design and performance of solar tracking system with fuzzy logic controller, *In Sixth International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, Elazig, Turkey, May 16-18.
- [107] **Kiyak, E. and Gol, G.**, 2016. A comparison of fuzzy logic and PID controller for a single-axis solar tracking system, *Renewables: Wind, Water, and Solar*, **3**, 1-12.
- [108] **Altas, I.H. and Sharaf, A.M.**, 2008. A novel maximum power fuzzy logic controller for photovoltaic solar energy systems, *Renewable Energy*, **33**, 388-399.
- [109] **Tamrakar, V., Gupta, S.C. and Sawle, Y.**, 2015. Study of characteristics of single and double diode electrical equivalent circuit models of solar PV module, *In International Conference on Energy Systems and Applications, IEEE*, Pune, India, October 2015.
- [110] **Saloux, E., Teyssedou, A. and Sorin, M.**, 2011. Explicit model of photovoltaic panels to determine voltages and currents at the maximum power point, *Solar Energy*, **85**, 713-722.
- [111] **Ishaque, K., Salam, Z. and Taheri, H.**, 2011. Simple, fast and accurate two-diode model for photovoltaic modules, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **95**, 586-594.
- [112] **Tsai, H.L.**, 2010. Insolation-oriented model of photovoltaic module using Matlab/Simulink, *Solar Energy*, **84**, 1318-1326.
- [113] **Volker, Q.**, 2005. Understanding Renewable Energy Systems, Earthscan Press, Kanada.
- [114] **International Energy Association**, 2014. *Technology roadmap: solar photovoltaic energy*, Paris, France.

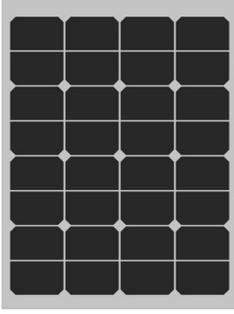
- [115] **International Energy Association**, 2010. Annual Report Technology roadmap: solar photovoltaic energy, IEA Press, Fribourg, Switzerland.
- [116] **Bhandari, R. and Stadler, I.**, 2009. Grid parity analysis of solar photovoltaic systems in Germany using experience curves, *Solar Energy*, **83**, 1634-1644.
- [117] **Karatepe, E. and Hiyama, T.**, 2009. ANN based real-time estimation of power generation of different PV module types, *IEEE Transactions on Power and Energy*, **129**, 783-790.
- [118] **Massi Pavan, A., Mellit, A., De Pieri, D. and Lughì, V.**, 2014. A study on the mismatch effect due to the use of different photovoltaic modules classes in large-scale solar parks, *Progress in photovoltaics: research and applications*, **22**, 332-345.
- [119] **Solidworks**, 2010. Dassault Systèmes SolidWorks Corp., Massachusetts, USA.
- [120] **PVGIS**, 2016. Photovoltaic Geographical Information System, <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php> 13 Ekim 2016
- [121] **National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)**, 2015. Earth System Research Laboratory, 09 Haziran 2015, [http://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/NOAA\\_Solar\\_Calculations\\_year.xls](http://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/NOAA_Solar_Calculations_year.xls)
- [122] **Gomes, H.M. and Awruch, A.M.**, 2004. Comparison of response surface and neural network with other methods for structural reliability analysis, *Structural safety*, **26**, 49-67.
- [123] **Kayri, M.**, 2015. An intelligent approach to educational data: Performance comparison of the multilayer perceptron and the radial basis function artificial neural networks, *Educational Sciences: Theory&Practice*, **15**, 1247-1255.
- [124] **Santos, R.B., Rupp, M., Bonzi, S.J. and Filetia, A.M.F.**, 2013. Comparison between multilayer feedforward neural networks and a radial basis function network to detect and locate leaks in pipelines transporting gas, *Chemical Engineering Transactions*, **32**, 1375-1380.
- [125] **Yadav, A.K. and Chandel, S.S.**, 2014. Solar radiation prediction using Artificial Neural Network techniques: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **33**, 772-781.
- [126] **Yilmaz, A.S. and Özer, Z.**, 2009. Pitch angle control in wind turbines above the rated wind speed by multi-layer perceptron and radial basis function neural networks, *Expert Systems with Applications*, **36**, 9767-9775.
- [127] **Kasiri, H., Momeni, H.R. and Kasiri, A.**, 2012. Optimal intelligent control for wind turbulence rejection in WECS using ANNs and genetic fuzzy approach, *International Journal of Soft Computing and Software Engineering*, **2**, 16-34.

- [128] **Mustafa, M.R., Rezaur, R.B., Rahardjo, H. and Isa, M.H.**, 2012. Prediction of pore-water pressure using radial basis function neural network, *Engineering Geology*, **135**, 40-47.
- [129] **Keller, P.S., El-Sheikh, M., Granger, D.A. and Buckhalt, J.A.**, 2012. Interactions between salivary cortisol and alpha-amylase as predictors of children's cognitive functioning and academic performance, *Physiology & behavior*, **105**, 987-995.
- [130] **Bui, D.T., Pradhan, B., Lofman, O., Revhaug, I. and Dick, O.B.**, 2012. Landslide susceptibility assessment in the Hoa Binh province of Vietnam: a comparison of the Levenberg–Marquardt and Bayesian regularized neural networks. *Geomorphology*, **171**, 12-29.

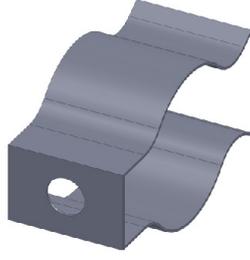


## EKLER

### Ek 1. Sabit Açılı Panel Sistem Bileşenleri



(a)



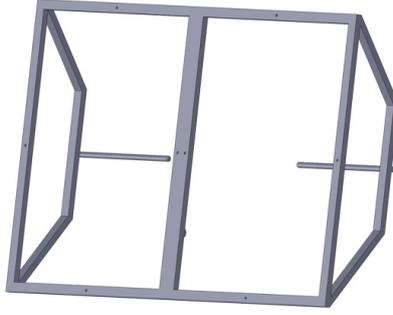
(b)



(c)



(d)



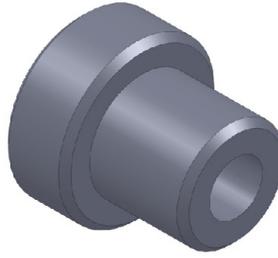
(e)



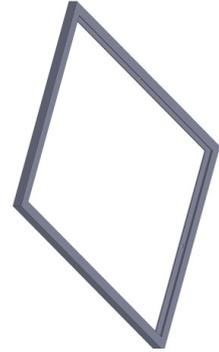
(f)



(g)



(h)



(i)

(a) PV panel

(b) Yük tespit klipsi

(c) Rezistif yük

(d) Açılı mafsal silindiri

(e) Panel taşıyıcı

(f) Açılı mafsal pistonu

(g) Platform

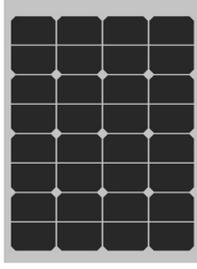
(h) Yatak

(i) Çerçeve

## Ek 2. Sabit Açılı Panel Sistemi Montaj Görüntüsü



### Ek 3. Hareketli Panel Sistem Bileşenleri



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



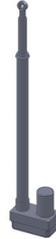
(g)



(h)



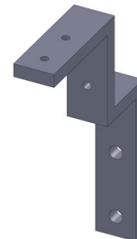
(i)



(j)



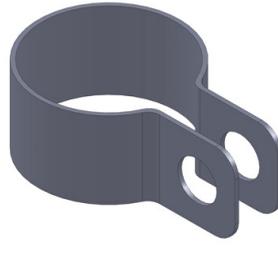
(k)



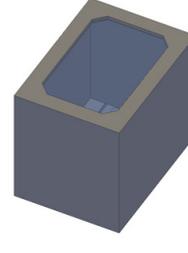
(l)



(m)



(n)



(o)



(p)

(a) PV panel

(g) Dişli yatağı

(m) Büyük dişli

(b) Yük tespit klipsi

(h) Yatay taşıyıcı

(n) Aktüatör klipsi

(c) Rezistif yük

(i) Panel taşıyıcı

(o) LDR muhafazası

(d) Küçük dişli

(j) Dikey aktüatör

(p) Motor

(e) Üst flanş

(k) Platform

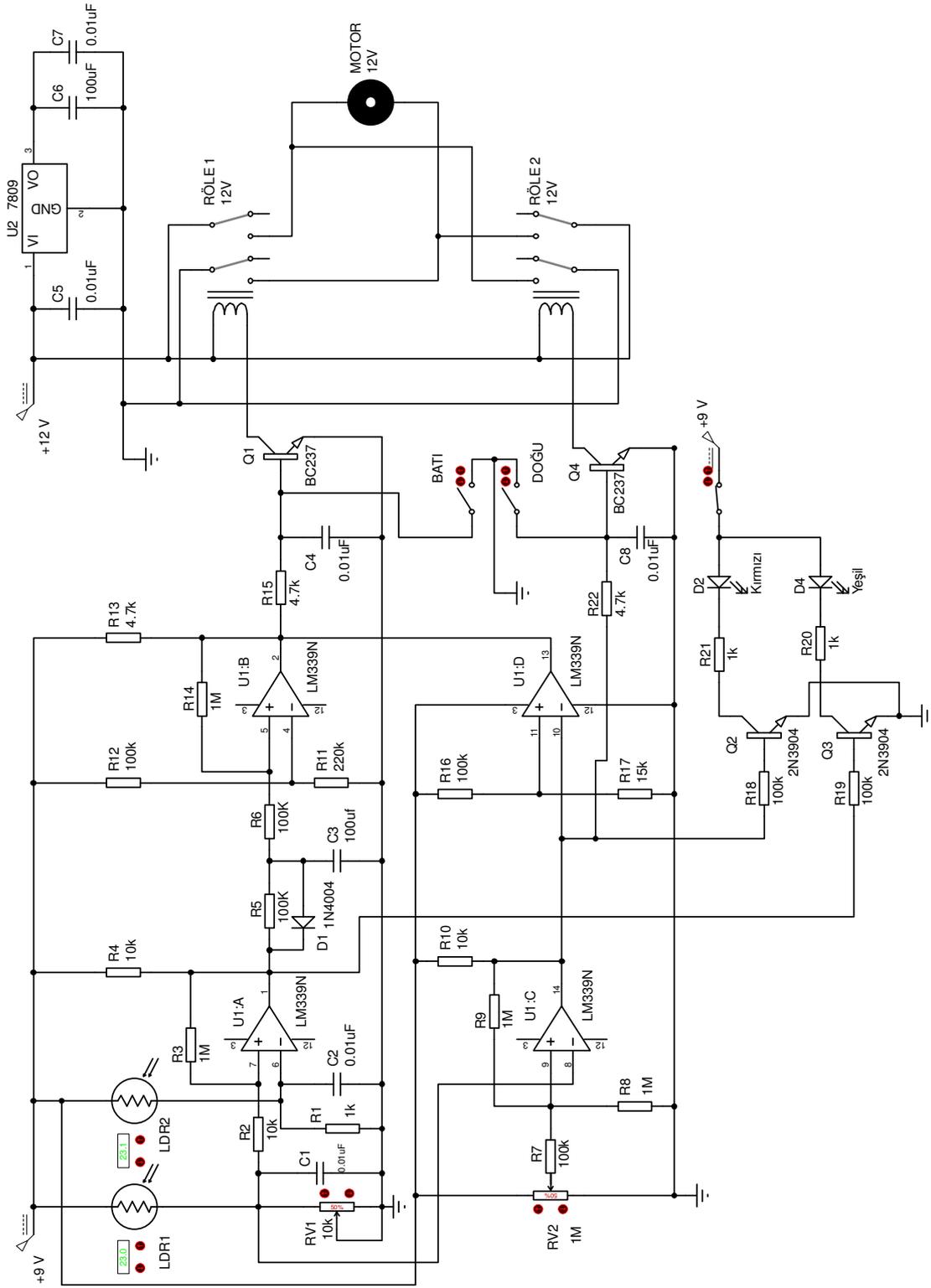
(f) Alt flanş

(l) Motor taşıyıcı

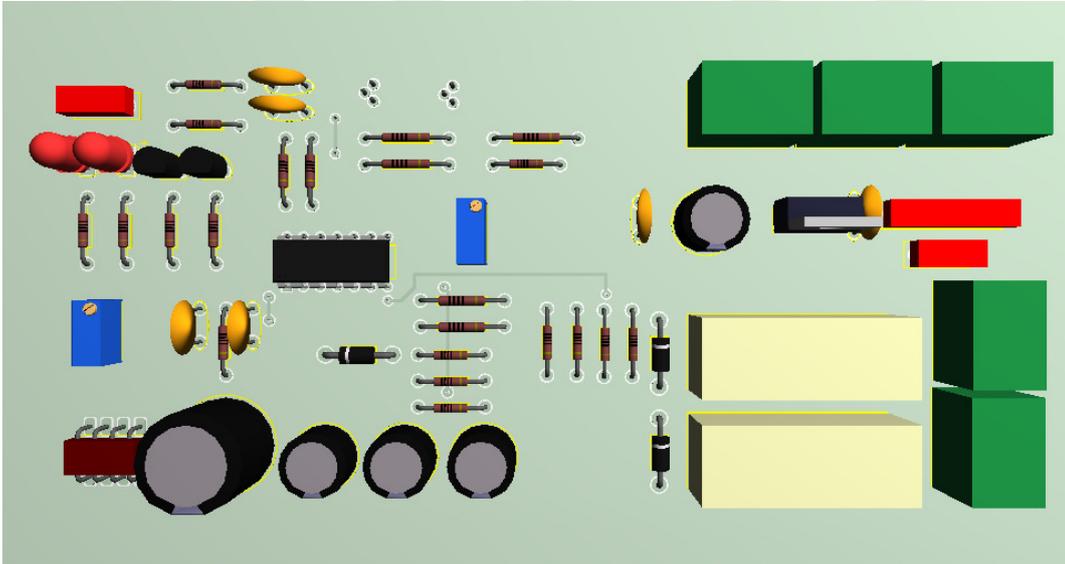
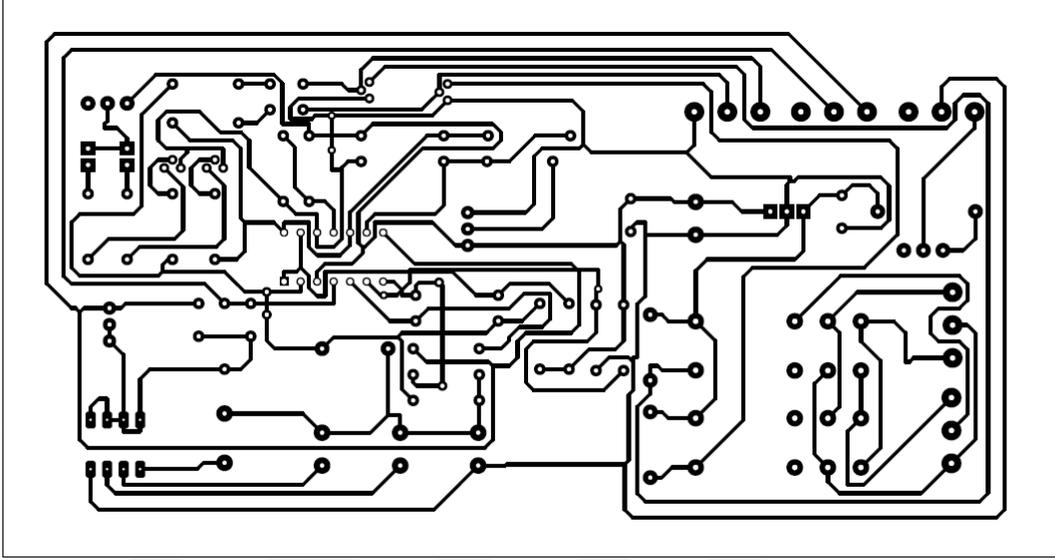
#### Ek 4. Hareketli Panel Sistemi Montaj Görüntüsü



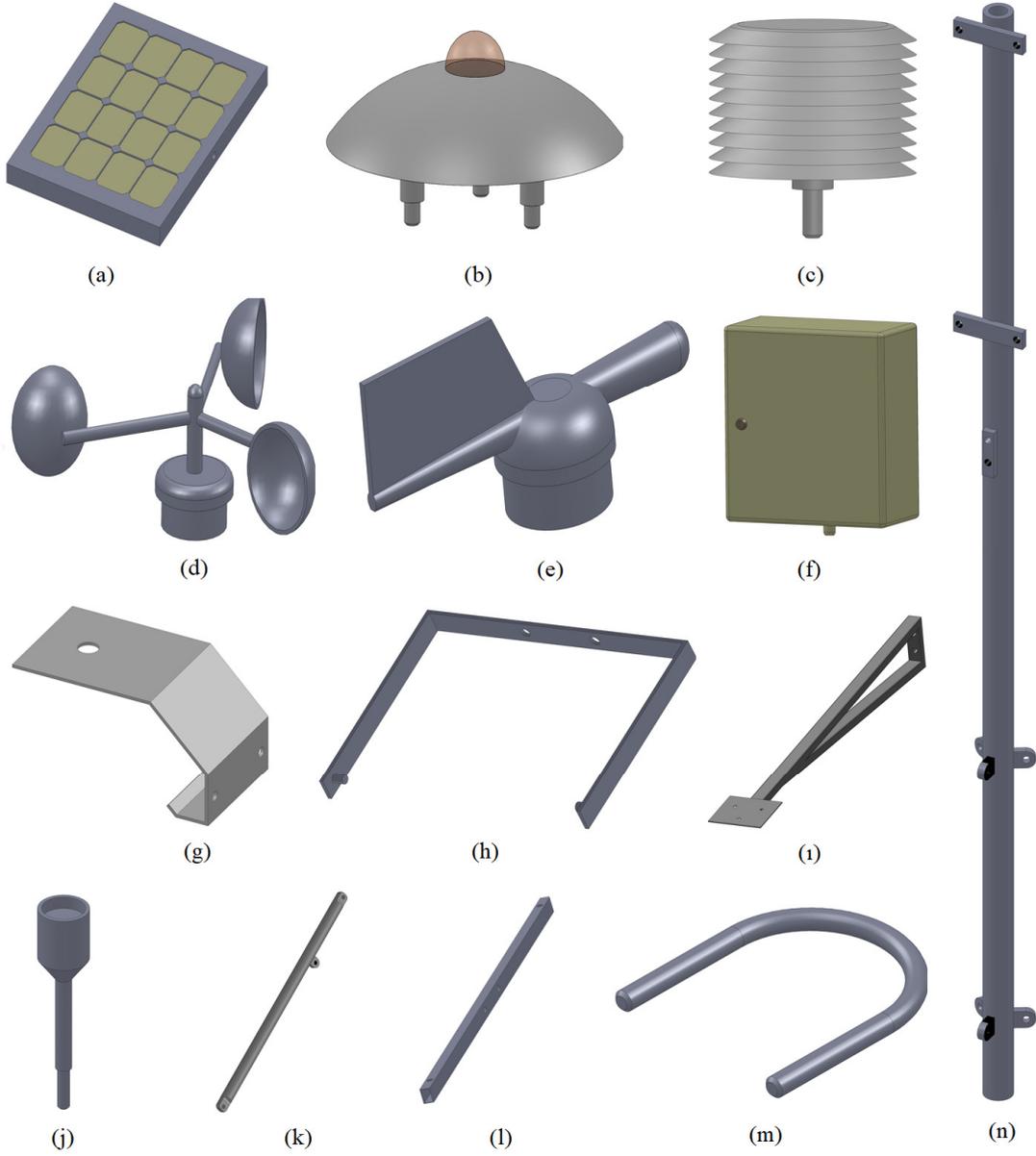
## Ek 5. Hareketli Panel Denetleyicisi Benzetim Devresi



## Ek 6. Hareketli Panel Denetleyisi Baskılı Devresi



## Ek 7. Meteoroloji İstasyonu Sistem Bileşenleri



(a) PV panel

(b) Piranometre

(c) Sıcaklık-nem sensörü

(d) Rüzgar hızı sensörü

(e) Rüzgar yönü sensörü

(f) Data-logger

(g) Sıcaklık sensörü taşıyıcısı

(h) PV panel mafsalı

(i) Piranometre taşıyıcısı

(j) Sensör tutucu

(k) Platform destek

(l) T profil

(m) Data-logger tutucu

(n) Taşıyıcı direk

## Ek 8. Meteoroloji İstasyonu Montaj Görüntüsü



## Ek 9. CMP6 Piranometre Teknik Özellikleri

Özellikler	CMP6
Uygulamalar	Meteoroloji istasyonları, Saha testleri
ISO 9060:1990 sınıflandırma	1. Sınıf
Hassasiyet	5 ~ 20 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$
Empedans	20 ~ 200 $\Omega$
Çıkış gerilimi	0 to 30 mV (0 ~ 1500 $\text{W}/\text{m}^2$ aralığında)
Maksimum işletme ışıması	2000 $\text{W}/\text{m}^2$
Tepki süresi (%63)	< 6 s
Tepki süresi (%95)	< 18 s
Spektral aralık (%20)	285 ~ 3000 nm
Spektral aralık (%50)	300 ~ 2800 nm
Uzun vade kararlılığı	< %1 ( $\text{W}/\text{m}^2/\text{yıl}$ )
Doğrusallık	< %1,5 (100 ~ 1000 $\text{W}/\text{m}^2$ )
Yön tepkisi (1000 $\text{W}/\text{m}^2$ 'de 80°'ye kadar)	< 20 $\text{W}/\text{m}^2$
Spektral seçicilik	< %3 (350 ~ 1500 nm)
Eğim tepkisi	< %1 (0° ~ 90°, 1000 $\text{W}/\text{m}^2$ )
Sıcaklık tepkisi	< % 5 (-10 °C ~ +40 °C)
Görüş alanı	180°
Kabarcık seviye hassasiyeti	< 0,2°
Sensör türü	Termo-pil
İşletme sıcaklık aralığı	-40 °C ~ +80 °C
İşletme bağıl nem aralığı	0 ~ %100 RH
Arızalar arasındaki süre	> 10 yıl
Giriş koruma sınıfı	67

## Ek 10. HC2S3 Sıcaklık ve Nem Sensörü Teknik Özellikleri

Genel bilgiler	
Filtre açıklaması	Polietilen (standart), Teflon (opsiyonel)
Akım tüketimi	< 4.3 mA (@ 5 Vdc) < 2.0 mA (@ 12 Vdc)
Gerilim kaynağı	5 ~ 24 Vdc
Başlama zamanı	1,5 s
Maksimum başlama akımı	< 50 mA
Analog çıkışlar	±3 mV
Ebat	15x85 mm (Çap, Uzunluk)
Ağırlık	10 g
Hava sıcaklığı	
Sensör tipi	PT100 RTD, IEC 751 1/3 Class B
Ölçüm aralığı	-40° ~ +60°C (varsayılan) -50° ~ +100°C (mümkün)
Çıkış sinyali aralığı	0 ~ 1 Volt
Hassasiyet	±0,1 °C (standart yapılandırma, 23°C)
Uzun vade kararlılığı	< 0.1 °C/yıl
Sensör zaman sabiti Standart PE filtre	≤ 22 s
Sensör zaman sabiti Opsiyonel teflon filtre	≤ 30 s
Bağıl nem	
Sensör tipi	Rotronic® Higrometre IN-1
Ölçüm aralığı	0 to %100 RH (yoğuşmasız)
Çıkış sinyali aralığı	0 ~ 1 Volt
Hassasiyet	±%0,8 RH (standart yapılandırma, 23°C)
Uzun vade kararlılığı	< %1 RH (her yıl için)
Sensör zaman sabiti Standart PE filtre	≤ 22 s
Sensör zaman sabiti Opsiyonel teflon filtre	≤ 30 s

## Ek 11. NRG 40C Anemometre Teknik Özellikleri

Genel bilgiler	
Sensör tipi	3 kupa sensör
Uygulamalar	Rüzgâr kaynağı tayini Meteorolojik çalışmalar Çevresel izleme
Ölçüm aralığı	1 m/s ~ 96 m/s (kaydedilmiş en yüksek değer)
Uyumluluk	Bütün NRG data-loggerlar
Çıkış sinyali	
Sinyal türü	AC sinüs dalgası (frekans hız ile doğrusal değişmektedir)
Transfer fonksiyonu	$m/s = (Hz \times 0,765) + 0,35$
Hassasiyet	0.1 m/s (5 m/s ila 25 m/s hızları arasında)
Kalibrasyon	Her anemometre ayrı ayrı kalibre edilir
Çıkış sinyali aralığı	0 Hz ila 125 Hz (kaydedilmiş en yüksek değer)
Tepki karakteristiği	
Eşik değeri	0,78 m/s
Mesafe sabiti	3.0 m
Atalet momenti	68 x 10 <sup>-6</sup> S-ft <sup>2</sup>
Rotor tarama çapı	190 mm
Kurulum	
Montaj	13 mm çaplı vidalı pim
Gerekli araçlar	13 mm lokma anahtar, yağ, izolasyon bandı
Çevresel	
İşletme sıcaklık aralığı	-55 °C ~ 60 °C
İşletme nem aralığı	0 ~ %100 RH
Fiziksel	
Bağlantı	4-40 piriç altıgen somun
Ağırlık	0,14 kg
Ebat	81 mm
Materyal	
Kupalar	Tek parça enjeksiyon kalıplı siyah polikarbonat
Gövde	Siyah ABS plastik
Şaft	Sertleştirilmiş berilyum bakır
Rulman	Modifiye teflon
Mıknatıs	Indox 1, 25 mm çap, 13 mm uzunluk, 4 kutuplu
Sarım	4100 tur tek bobin

## Ek 12. NRG 200P Rüzgâr Oku Teknik Özellikleri

<b>Genel bilgiler</b>	
Sensör tipi	Potansiyometrik sürekli dönüş
Uygulamalar	Rüzgâr kaynağı tayini Meteorolojik çalışmalar Çevresel izleme
Ölçüm aralığı	360° mekanik açı
Uyumluluk	Bütün NRG data-loggerlar
<b>Çıkış sinyali</b>	
Sinyal türü	Potansiyometreden sağlanan DC gerilim, 10 KΩ
Transfer fonksiyonu	Oransal gerilim
Hassasiyet	Potansiyometre doğrusalığı, %1
Ölü bölge	Maksimum 8°, tipik 4°
Çıkış sinyali aralığı	0 V ~ Uyarım gerilimi
<b>Tepki karakteristiği</b>	
Eşik değeri	1 m/s
<b>Güç ihtiyacı</b>	
Gerilim arzı	1 V to 15 V DC
<b>Kurulum</b>	
Montaj	13 mm çaplı vidalı pim
Gerekli araçlar	13 mm lokma anahtar, yağ, izolasyon bandı
<b>Çevresel</b>	
İşletme sıcaklık aralığı	-55 °C ~ 60 °C
İşletme nem aralığı	0 ~ %100 RH
İşletme ömrü	50 milyon devir (2 ~6 yıl)
<b>Fiziksel</b>	
Bağlantı	4-40 piriç altıgen somun
Ağırlık	0,14 kg
Ebat	21x12 cm, 27 cm tarama çapı
<b>Materyal</b>	
Kupalar	UV stabilize enjeksiyon plastik
Gövde	UV stabilize anti-statik plastik
Şaft	Paslanmaz çelik
Rulman	Paslanmaz çelik

### Ek 13. CR1000 Data-logger Teknik Özellikleri

Özellik	CR1000
İşletme sıcaklık aralığı	-55° to +85°C
Maksimum tarama hızı	100 Hz
Hafıza	4 MB
Analog giriş sayısı	16
İletişim/Veri/Depolama portları	1 CS I/O 1 RS-232 1 paralel
Anahtarlı 12 V	1
Dijital portlar	8 I/O veya 4 RS-232 COM
Giriş gerilimi aralığı	0 ~ ±5 Vdc
Analog gerilim hassasiyeti	± %0.06 (Okunan değer, 0° - 40°C)
Çıkış sinyali aralığı	0 V ~ Uyarım gerilimi
Analog çözünürlük	0.33 µV
A/D Bitleri	13
Güç kaynağı	9.6 to 16 Vdc
Gerçek zamanlı saat hassasiyeti	±3 min. (Her yıl)
Desteklenen protokoller	PakBus, Modbus, DNP3, FTP, HTTP, XML, POP3, SMTP, Telnet, NTCIP, NTP, SDI-12, SDM
Ebat	23.8 x 10.1 x 5.4 cm
Ağırlık	1 Kg

## Ek 14. Data-logger Program Komutlari

```
'CR1000
'Created by Short Cut (3.0)
'Declare Variables and Units
Public BattV
Public PTemp_C
Public Ruz_Yon
Public Ruz_Hiz
Public Hav_Sic
Public Hav_Nem
Public Glob_Rad
Public SolarkJ
Public Bat_1
Public Bat_2
Public Temp_C1
Public Temp_C2

Units BattV=Volts
Units PTemp_C=Deg C
Units Ruz_Yon=degrees
Units Ruz_Hiz=meters/second
Units Hav_Sic=Deg C
Units Hav_Nem=%
Units Glob_Rad=kW/m^2
Units SolarkJ=kJ/m^2
Units Bat_1=mV
Units Bat_2=mV
Units Temp_C1=Deg C
Units Temp_C2=Deg C

'Define Data Tables
DataTable(Table1,True,-1)
  DataInterval(0,5,Min,10)
  WindVector (1,Ruz_Hiz,Ruz_Yon,FP2,False,0,0,0)
  FieldNames("Ruz_Hiz_S_WVT,Ruz_Yon_D1_WVT,Ruz_Yon_SD1_WVT")
  Average(1,Hav_Sic,FP2,False)
  Sample(1,Hav_Nem,FP2)
  Average(1,Glob_Rad,FP2,False)
  Totalize(1,SolarkJ,IEEE4,False)
  Average(1,Bat_1,FP2,False)
  Average(1,Bat_2,FP2,False)
  Average(1,BattV,FP2,False)
  Average(1,PTemp_C,FP2,False)
  Average(1,Temp_C1,FP2,False)
  Average(1,Temp_C2,FP2,False)
EndTable

DataTable(Table2,True,-1)
  DataInterval(0,1440,Min,10)
  Minimum(1,BattV,FP2,False,False)
  WindVector (1,Ruz_Hiz,Ruz_Yon,FP2,False,0,0,0)
  FieldNames("Ruz_Hiz_S_WVT,Ruz_Yon_D1_WVT,Ruz_Yon_SD1_WVT")
  Maximum(1,Hav_Sic,FP2,False,True)
  Minimum(1,Hav_Sic,FP2,False,True)
  Maximum(1,Hav_Nem,FP2,False,True)
  Minimum(1,Hav_Nem,FP2,False,True)
  Totalize(1,SolarkJ,IEEE4,False)
  Maximum(1,Bat_1,FP2,False,True)
  Minimum(1,Bat_1,FP2,False,True)
  Maximum(1,Bat_2,FP2,False,True)
  Minimum(1,Bat_2,FP2,False,True)
  Maximum(1,Temp_C1,FP2,False,True)
  Minimum(1,Temp_C1,FP2,False,True)
  Maximum(1,Temp_C2,FP2,False,True)
```

```

        Minimum(1,Temp_C2,FP2,False,True)
    EndTable

'Main Program
BeginProg
'Main Scan
    Scan(5,Sec,1,0)
        'Default Datalogger Battery Voltage measurement 'BattV'
        Battery(BattV)
        'Default Wiring Panel Temperature measurement 'PTemp_C'
        PanelTemp(PTemp_C,_60Hz)
        'NRG #200P Wind Direction Sensor measurements 'Ruz_Yon'
        BrHalf(Ruz_Yon,1,mV2500,1,1,1,2500,True,0,_60Hz,360,0)
        If Ruz_Yon>=360 Or Ruz_Yon<0 Then Ruz_Yon=0
        'NRG #40 Wind Speed Sensor measurements 'Ruz_Hiz'
        PulseCount(Ruz_Hiz,1,1,1,1,0.752,0.38)
        If Ruz_Hiz<0.39 Then Ruz_Hiz=0
        'HC2S3 (constant power) Temperature & Relative Humidity Sensor measurements 'Hav_Sic' and
'Hav_Nem'
        VoltSE(Hav_Sic,1,mV2500,2,0,0,_60Hz,0.1,-40)
        VoltSE(Hav_Nem,1,mV2500,3,0,0,_60Hz,0.1,0)
        If Hav_Nem>100 And Hav_Nem<103 Then Hav_Nem=100
        'CMP3/CMP6/CMP11 Pyranometer measurements 'SolarkJ' and 'Glob_Rad'
        VoltDiff(Glob_Rad,1,mV250,3,True,0,_60Hz,1,0)
        If Glob_Rad<0 Then Glob_Rad=0
        SolarkJ=Glob_Rad*0.295858
        Glob_Rad=Glob_Rad*59.1716
        'Generic Single-Ended Voltage measurements 'Bat_1'
        VoltSE(Bat_1,1,mV5000,4,True,0,_50Hz,1,0)
        'Generic Single-Ended Voltage measurements 'Bat_2'
        VoltSE(Bat_2,1,mV5000,7,True,0,_50Hz,1,0)
        'Type K (chromel-alumel) Thermocouple measurements 'Temp_C1'
        TCDiff(Temp_C1,1,mV2_5C,5,TypeK,PTemp_C,True,0,_60Hz,1,0)
        'Type K (chromel-alumel) Thermocouple measurements 'Temp_C2'
        TCDiff(Temp_C2,1,mV2_5C,6,TypeK,PTemp_C,True,0,_60Hz,1,0)
        'Call Data Tables and Store Data
        CallTable(Table1)
        CallTable(Table2)
    NextScan
EndProg

```

## Ek 15. YSA Model-1 ve YSA Model-2'ye Ait Ağırlık Katsayıları ve Sapma Değerleri

### YSA Model-1

$iw_{[1,1]}$ : Ağırlıklar	$lw_{[3,2]}$ : Ağırlıklar	$b_{[1]}$ : Sapmalar	$b_{[2]}$ : Sapmalar	$b_{[3]}$ : Sapma
-0,2122 -0,0848 -1,3168 -4,0455 1,2704 1,3421	-0,3325 <sup>T</sup>	0,1652	0,5534	
-0,4234 0,0178 0,0639 5,4904 4,9070 0,5378	10,0390	1,8238	-0,0824	
0,1279 -0,0368 0,7877 -0,5364 -0,1683 -3,3848	-1,9512	1,8220	0,0384	
0,0143 0,0131 0,4152 0,7129 0,2097 -0,2813	-0,0508	0,2240	26,1190	
0,3355 0,1014 -16,5401 6,2407 -1,7980 -2,3779	1,6624	12,7302	0,9777	
0,4931 -0,0292 0,1185 -2,5583 -2,2415 -0,4758	-5,0952	-0,8694	3,6921	
-0,3737 -0,0072 0,5090 -0,4073 -0,4213 -0,0144	-1,7939	-0,0523	-1,2296	
-0,3022 0,0075 0,7197 -0,0402 -0,0215 -0,0489	-7,8351	-0,0657	2,9798	
-0,0471 0,0087 -0,0354 0,3910 0,1023 0,6157	0,0313	0,1641	18,0381	[ -7,9727 ]
-0,1050 0,0518 5,4750 -5,8396 -2,2938 1,5264	-0,8864	-0,5569	4,5861	
0,3814 -0,0105 -3,3135 3,4480 -1,5505 -0,5904	0,5928	0,0201	-0,3440	
0,1135 0,0035 -2,0864 3,3955 -0,7333 -0,9375	0,0968	-0,8863	2,3647	
0,0124 -0,0101 -1,8185 2,5162 -0,4806 -0,8035	-0,5512	-0,7242	-1,8518	
0,5037 2,0814 -1,4448 -0,2618 -2,5653 1,4348	0,2714	0,9895	9,6455	
-0,0711 0,0114 -2,4126 0,7886 0,6754 1,3870	-17,1411	-1,9601	-0,5780	

### $lw_{[2,1]}$ : Ağırlıklar

1,6038 -0,8456 -0,3448 2,7165 0,4937 -1,1058 1,8844 -2,8774 -0,9135 1,4977 -0,0433 4,2187 -3,2237 -0,0766 3,6014
-0,0449 -0,0038 1,9191 -0,3601 0,0561 0,0620 0,8362 -1,6981 4,1938 0,0834 0,0795 0,2796 -0,7931 -0,0295 -1,3420
-0,6602 -0,2576 0,0441 -0,7347 -0,3701 -0,5778 -0,6811 1,0382 -0,0108 -0,1122 0,3048 -0,7235 0,7443 0,0259 -1,0828
-1,8689 -5,8246 -1,0861 -3,6429 -1,3507 -15,6448 2,1914 -18,4227 -13,9455 12,1039 -5,4879 -8,9063 26,4131 0,8432 12,6605
0,5514 0,2847 0,0072 0,7729 0,5011 0,7343 0,6904 -1,4460 0,6870 -0,0206 -0,2401 2,2599 -2,2282 -0,0272 -0,1614
-0,0166 0,9685 0,0856 -1,8360 1,2584 1,7974 -2,3639 2,6997 0,0116 0,5654 -0,6987 2,9157 -2,0626 -0,0235 -0,3564
-0,1736 -0,6102 -0,1619 4,5113 0,2230 -1,3210 4,6004 -6,7845 -0,3202 0,4667 -0,0369 -0,1865 0,4770 0,0489 1,8089
0,3380 0,5156 0,2084 -3,3637 -1,4764 0,6741 -2,2490 4,2407 -0,7026 -0,6233 0,1820 0,4903 -0,1064 0,0497 -2,4677
-2,5471 -0,2187 -0,6654 -3,5493 -0,9025 5,4154 6,3377 1,5861 -3,5841 2,9098 -1,1618 22,5282 -24,8154 -0,1346 21,5829
-0,5067 0,9538 -0,0236 -8,7415 -1,9288 1,7493 -8,2217 11,5963 -0,4264 -0,3403 -0,5965 -1,0996 0,8650 -0,0426 -2,7730
-0,2577 0,4493 0,4952 -3,0582 0,2781 0,1413 -2,2083 4,4751 -0,4471 -0,4864 0,6358 0,9625 -0,4494 0,0508 -0,8281
22,6811 -2,3287 -0,5328 -3,0172 0,2027 -5,9126 10,2670 -12,7368 -4,8910 -1,0567 -1,0294 1,1923 -3,1220 0,3083 -23,8564
0,5755 0,0793 1,3027 5,5089 0,6838 0,8249 4,0518 -4,8147 1,3379 -0,4728 1,0735 2,7883 -6,2375 -0,1774 -0,7505
1,5483 0,8548 -0,0086 2,0414 -3,3602 0,8150 5,6378 -6,7301 -1,6010 0,6512 -1,5408 2,6799 -1,5168 0,1078 5,2739
0,0854 0,0618 0,0497 0,0529 0,0742 0,1097 0,0075 0,0497 -0,1397 -0,0183 -0,0290 0,1358 -0,1236 -0,0014 0,1105

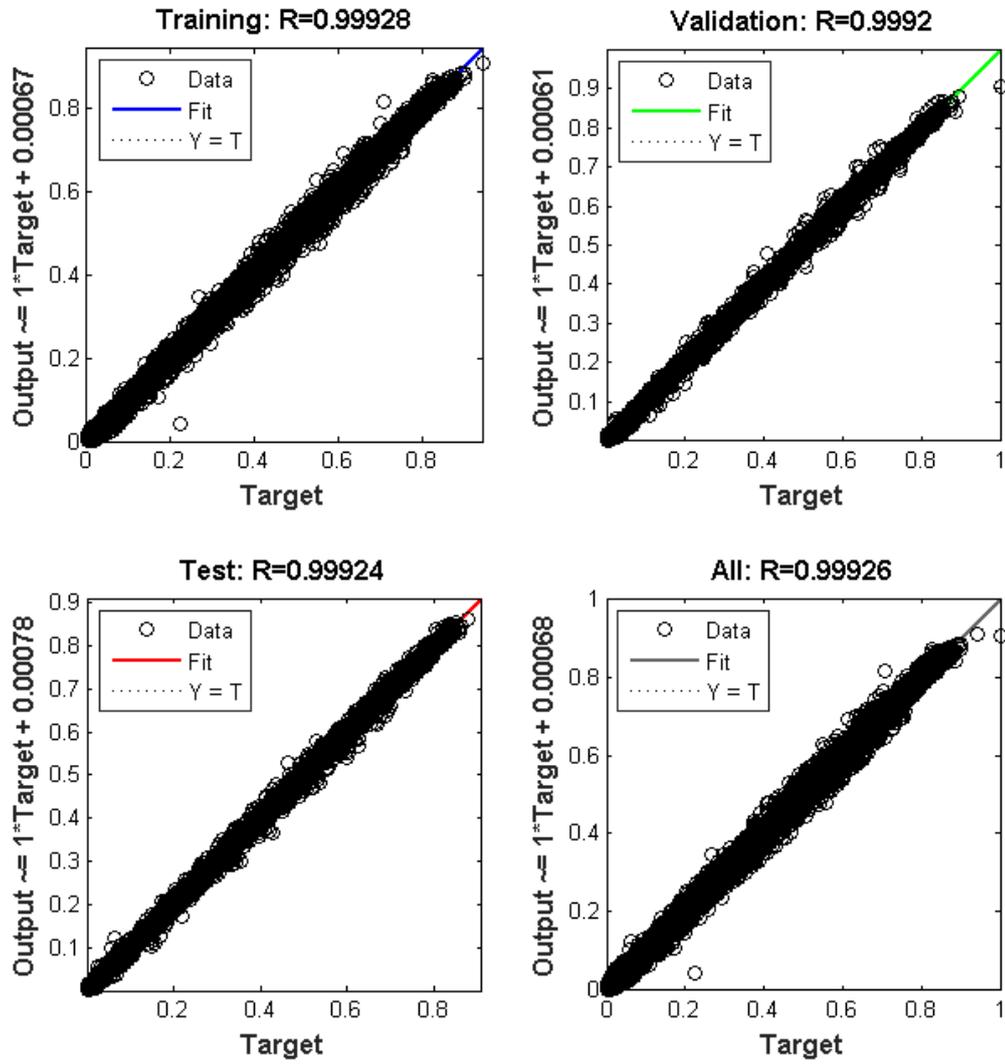
### YSA Model-2

$iw_{[1,1]}$ : Ağırlıklar	$lw_{[3,2]}$ : Ağırlıklar	$b_{[1]}$ : Sapmalar	$b_{[2]}$ : Sapmalar	$b_{[3]}$ : Sapma
0,0394 0,6843 0,3002 0,7415 1,8282 0,4872	-0,0486 <sup>T</sup>	-0,0486	-13,9919	
-0,0104 -0,0086 0,1266 -0,2945 0,0046 -0,5199	0,1699	0,1699	-3,7368	
-0,8718 0,0644 -0,7026 -2,9806 3,0167 1,0382	0,0434	0,0434	9,2321	
0,1427 -0,8378 0,8129 -3,8789 -0,9794 -1,5327	-0,0597	-0,0597	-7,8083	
-0,0575 1,3674 -3,7205 -2,1434 -2,9449 -0,4754	0,2023	0,2023	10,1681	
-0,5412 0,1611 -1,9941 -2,1656 -4,6377 0,5809	-0,3640	-0,3640	8,5247	
-0,0095 0,0161 -0,5446 -1,1073 -0,4990 0,4428	0,0798	0,0798	-16,4663	
-0,1024 0,0125 1,1641 -0,7193 -0,0665 -0,0825	-9,4843	-9,4843	1,1922	
-0,1324 -0,0296 1,4301 -0,0296 0,5294 0,7299	-2,2022	-2,2022	4,1141	
-0,4864 0,6386 0,0070 0,3443 -2,3861 0,2306	2,3720	2,3720	4,2646	
3,0718 -0,7979 1,5522 0,4078 0,1836 -0,3021	0,0346	0,0346	15,4563	
5,0403 1,0896 1,9156 0,2594 -4,6151 1,1972	0,0694	0,0694	6,1436	
-0,7667 0,0704 0,2136 -1,6425 -0,9098 -0,7891	17,2293	17,2293	3,7290	
3,9422 4,3922 3,6768 -3,0845 -0,5984 -8,5479	0,0937	0,0937	13,7646	
-0,9579 2,9345 2,4674 -23,8099 -10,3570 2,9910	-0,0336	-0,0336	2,5347	

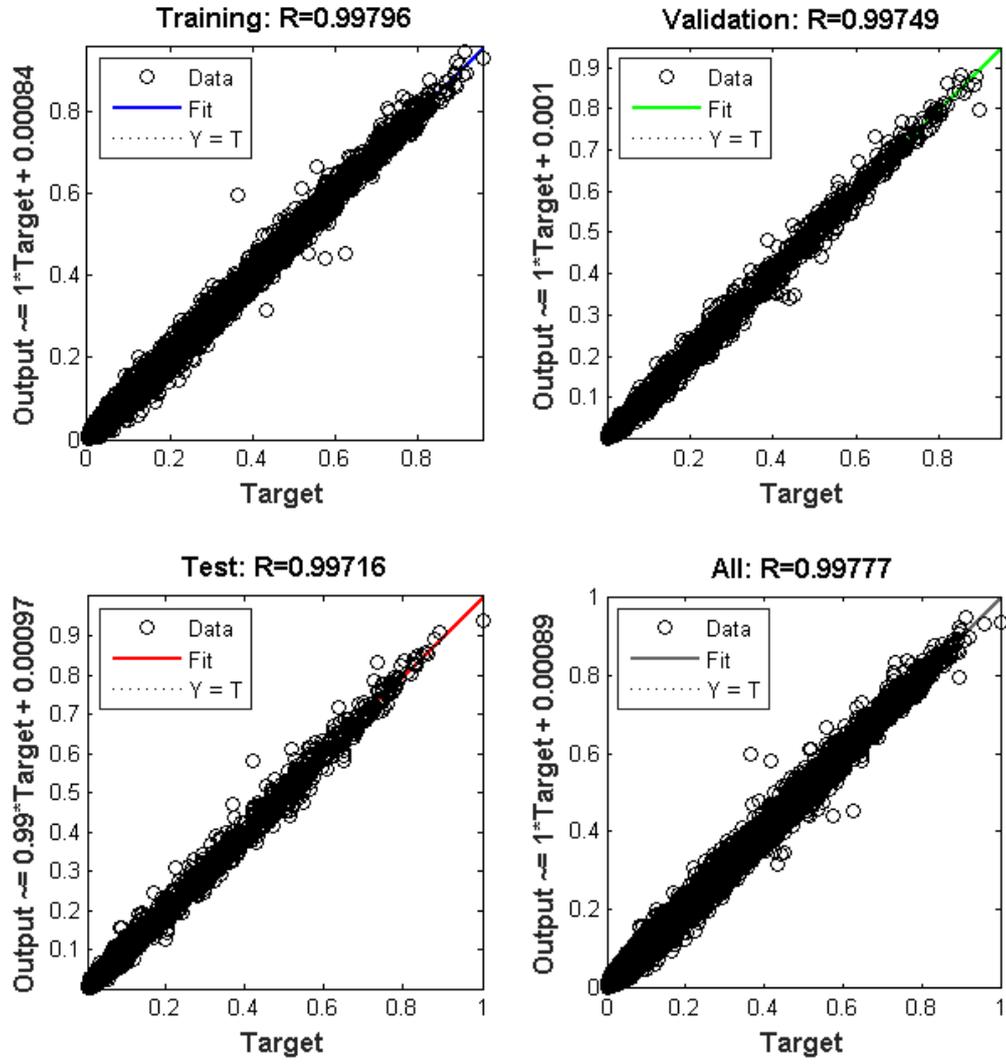
### $lw_{[2,1]}$ : Ağırlıklar

0,4258 -6,7278 6,7819 -6,7687 6,8667 12,0072 -10,8527 -2,1385 0,8758 -10,0033 8,1571 -7,6520 16,1927 0,8148 -4,2622
-1,3745 -6,2957 -1,3505 -0,1153 1,2733 0,6026 -2,1440 8,4887 -4,2298 -2,3577 0,0571 1,1714 -0,0264 -0,3644 -0,0369
-3,8018 -7,6229 2,9046 -11,1181 3,8291 6,3959 4,8403 6,5858 -27,1529 -4,3913 -1,5703 -0,9873 0,6197 5,4938 0,4574
-6,1016 -10,4670 -10,5599 7,6599 6,5563 -7,0539 -3,6651 20,2742 -5,9290 4,0883 -0,8053 12,9763 -8,2380 -5,8335 1,9475
-0,5200 13,2903 2,2004 3,4619 1,2266 -7,5024 7,9256 -0,2248 8,0516 6,4966 -1,3897 -6,2241 -7,9704 0,4737 0,4177
2,8985 0,0494 0,8251 2,8473 1,3363 -2,6093 2,2158 1,4155 -0,4964 2,6154 -0,9964 -4,4583 -4,9059 0,3551 1,5629
-6,7666 10,8484 -6,4566 -5,3019 -20,3307 0,3704 -13,1007 -10,1212 -14,6419 -14,9793 1,5366 -7,8874 -0,7401 -0,9714 -2,8365
0,0295 0,5809 0,0483 0,0747 0,0542 0,0479 -0,4467 -0,1695 -0,0195 0,0027 0,0149 -0,0034 0,0328 -0,0021 0,0242
0,6498 2,2991 -0,1706 0,0443 -0,4063 0,0222 1,2822 -5,5152 2,8440 0,8192 0,3373 -0,1673 1,3357 -0,2385 -0,0494
0,7328 2,0090 -0,0516 0,1982 -0,3957 0,0285 0,9652 -5,6736 2,8584 0,8395 0,3379 -0,1861 1,2697 -0,2150 -0,0055
4,3523 17,6487 -9,6726 -1,0394 1,7270 10,3625 11,4584 -14,7375 11,7611 2,9700 2,9140 -3,6026 -5,2201 -6,4611 -1,0599
5,6359 11,2166 0,9981 2,5489 3,9849 -2,1459 15,3658 9,4867 1,4542 5,2985 -2,1978 5,5279 -1,3195 1,5936 5,4611
-0,0214 -3,6234 0,0929 0,0050 0,0235 -0,0038 0,5261 0,5309 0,1486 -0,0353 -0,0130 -0,0322 -0,0880 -0,0816 -0,0267
7,7415 -1,2618 0,1763 0,3192 5,8702 -9,2734 10,9882 2,1636 0,8399 5,5631 -0,1413 -4,2506 -5,0280 1,2561 2,8848
3,0231 -0,5002 -4,9097 -2,7565 -5,5582 7,6258 7,5800 -2,8262 -1,3532 6,5784 6,2770 1,6460 -3,5772 1,0524 -1,4003

## Ek 16. YSA Model-1 Regresyon Analizi Sonuçları



## Ek 17. YSA Model-2 Regresyon Analizi Sonuçları



## Ek 18. YSA Model-3 ve YSA Model-4'e Ait Ağırlık Katsayıları ve Sapma değerleri

### YSA Model-3

$iw_{[1,1]}$  : Ağırlıklar

$lw_{[3,2]}$  : Ağırlıklar  $b_{[1]}$  : Sapmalar  $b_{[2]}$  : Sapmalar  $b_{[3]}$  : Sapma

0,1831	-0,0169	-1,3158	-3,3782	-0,0812	0,1731	-1,7633	2,4876	1,9155
-0,0802	0,0066	0,3890	2,4750	-0,4031	0,0058	0,1333	-1,3710	9,7816
-0,7359	-0,2019	7,3453	7,1744	6,0628	-2,7110	-1,3875	4,5761	-0,1531
0,0082	0,0004	0,0489	0,2508	0,1653	-0,6037	-1,3049	-0,5892	2,1383
-0,9866	2,4972	-4,3554	-0,7748	-0,4992	0,6780	1,4608	4,2761	2,1177
-0,0221	0,0282	-5,2063	10,2380	1,1471	-1,3693	-0,2978	1,8500	17,8019
0,0845	-0,0293	-0,2697	-3,5915	-2,3548	-0,1215	-9,7824	0,5704	-2,1433
0,0474	0,0064	0,7592	-0,2748	-0,6442	-0,4128	-5,6437	0,0925	-1,1361
0,0030	-0,0028	1,1495	-0,2755	-0,6785	-0,1686	0,3128	-0,4010	-6,4156
0,2112	-0,0352	6,4399	-3,3019	-2,7146	-0,0203	0,3600	-0,3011	-3,5770
0,4879	0,0497	-3,0626	3,0758	-1,4444	-0,0037	15,5929	0,6107	-0,5888
-0,1278	0,0143	2,1151	3,6912	2,6993	-0,3987	0,2002	-0,9586	8,1014
-0,0040	0,0032	-0,2721	-0,1312	0,0441	-0,5082	-5,5130	-0,2179	1,1198
-0,4256	3,2965	-4,5308	-0,8559	-1,8052	0,5116	0,2871	4,7970	1,1220
-0,4336	-0,0548	1,8544	-3,1589	2,1117	1,5796	1,2081	-0,6352	-1,2135

[-3,3278]

$lw_{[2,1]}$  : Ağırlıklar

0,1896	0,0762	0,4651	-0,5888	0,3087	-0,5253	0,4420	1,9848	-2,9570	0,3902	0,3210	1,0502	0,2197	-0,3520	-0,3877
-9,9099	-4,4984	-0,4340	4,3012	-1,4620	2,2843	-1,0140	12,8379	-16,2332	4,9797	-2,5063	-3,3100	-10,4766	-4,3197	1,9761
2,8267	2,2808	0,3978	0,0347	0,7856	-0,0600	0,8186	3,4317	-2,8855	-0,0760	0,5569	1,4826	-0,6699	-0,7977	-0,0182
-6,1837	-8,8834	5,5037	-8,4587	0,7817	-1,1282	-5,3051	-0,3232	1,4658	1,9443	2,7154	-4,8836	12,0632	-0,8708	0,0340
-0,7377	0,1584	0,0185	-0,9960	-0,4778	-0,6240	-0,7069	-3,4925	2,4739	0,2389	0,2176	-0,6842	2,4771	0,4643	0,0541
-0,4135	-1,7660	-5,3005	-5,7053	-1,1974	6,4195	-0,7701	-6,2469	6,0284	-2,4584	4,0760	-0,1333	7,9903	1,1721	1,2027
-0,2131	-0,1703	-0,1213	3,7139	-0,1598	0,0170	0,0398	0,2708	0,6415	-0,0662	-0,1135	-0,0292	3,3182	0,1193	-0,0294
0,6489	3,8787	1,1624	-1,7305	-1,8882	2,0358	7,6840	7,5072	-13,4971	-4,6789	-3,0042	3,3422	-2,3807	2,0182	1,4884
-0,2876	-0,8641	-0,3010	-2,8466	-1,8554	0,9151	-0,2763	0,7682	-0,2196	-0,3850	-0,5164	-2,0766	-5,5170	1,8455	0,4287
3,0241	1,0534	0,7769	-4,5852	1,6410	-0,6518	-0,0565	3,4597	-0,9785	-0,7540	-0,1508	2,6609	2,8152	-1,5781	0,2580
0,0654	0,0219	0,0288	-0,0051	0,0444	0,0450	0,1046	0,4928	-0,4947	0,0088	0,0017	0,1106	-0,3298	-0,0470	-0,0401
4,0185	1,3508	0,4862	-1,1927	-2,6078	10,2736	1,1782	-5,4311	3,7029	1,4143	1,1769	0,4898	2,3755	2,6022	1,5368
-0,7232	-3,9087	-1,1692	1,4588	1,8760	-2,1024	-7,8450	-7,7767	13,8277	4,9608	3,0771	-3,4010	2,8183	-2,0458	-1,5490
1,8306	-0,0041	0,4034	-17,4378	0,5331	-1,1830	-2,1974	-12,4239	11,6765	0,2711	-1,2929	-0,7543	21,4338	-0,4839	-1,5208
-0,6131	-0,7521	0,3523	-1,4100	0,5379	-0,8075	0,2144	-0,6890	-0,3885	0,3926	0,9835	0,9150	1,9059	-0,5540	0,2509

### YSA Model-4

$iw_{[1,1]}$  : Ağırlıklar

$lw_{[3,2]}$  : Ağırlıklar  $b_{[1]}$  : Sapmalar  $b_{[2]}$  : Sapmalar  $b_{[3]}$  : Sapma

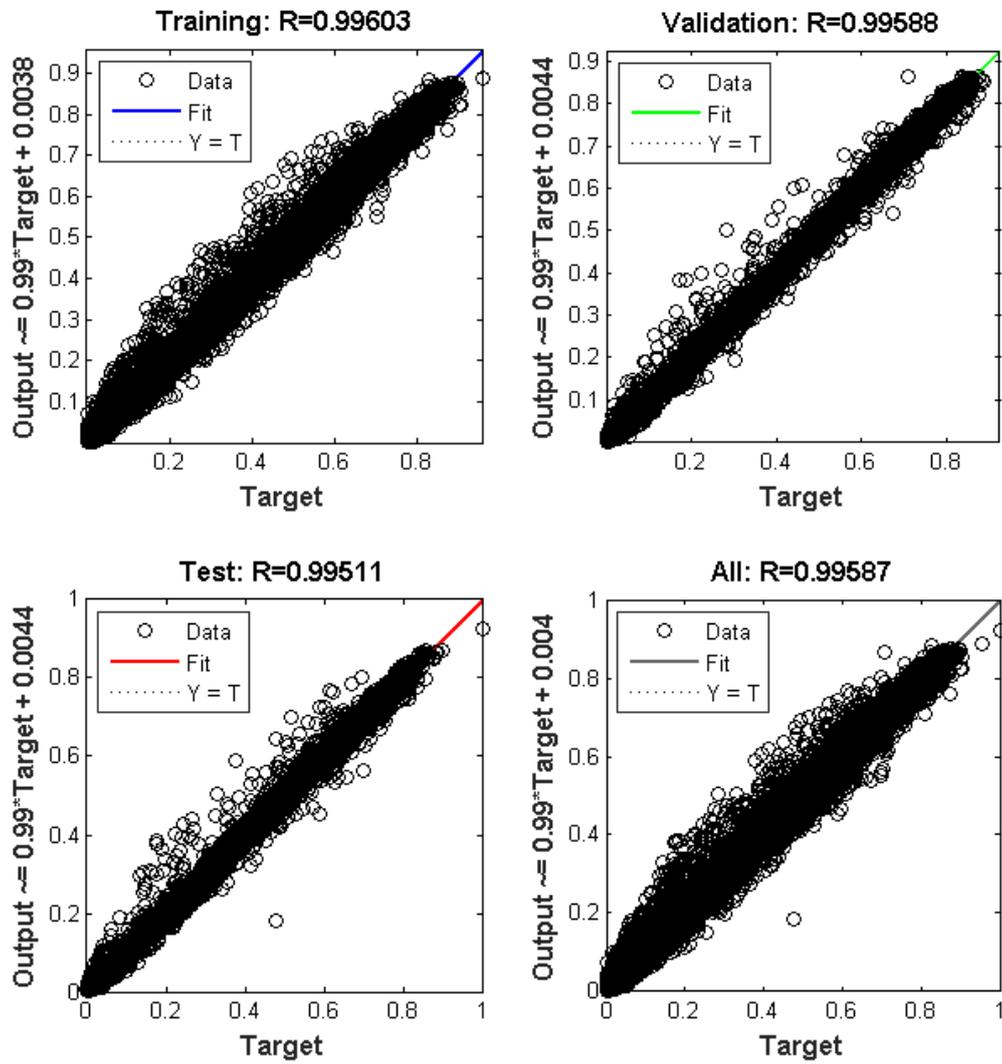
-2,1799	-1,3517	-2,1117	-1,7711	3,7632	2,0815	-0,1476	3,1799	-4,2154
0,9001	0,6830	-1,5507	3,0465	2,0934	0,1441	-0,0409	1,0601	3,2150
-0,5207	1,2743	-0,2296	-2,0124	-1,0234	1,6403	0,2122	1,3779	-2,8239
0,1093	-0,0477	-0,1825	0,3051	0,5257	-2,0906	0,2249	-2,1114	-0,4087
-0,4356	1,5183	-2,1885	1,1635	0,7759	-0,5315	4,8086	0,7094	0,1723
-0,0457	-0,4958	-0,9310	-1,8000	-2,0999	-0,5694	0,1146	-0,2837	4,3198
0,5296	0,0617	-0,3934	-0,7259	-1,2858	0,3884	-0,1573	-0,0897	-3,1026
-3,4249	0,1685	4,2763	1,3084	0,9046	-1,7318	-0,1098	-2,9163	-1,3548
-0,2772	-0,3431	0,8784	-0,1676	0,5637	1,6714	0,0986	0,8236	-1,8300
-0,4394	0,6785	0,1514	3,1616	0,8997	1,7024	-0,1075	-1,2113	2,9388
3,4398	-0,4076	-0,8625	2,6223	0,5115	0,5274	3,4674	2,5775	0,1100
2,2687	-0,0744	0,3708	2,2690	-1,5857	-1,1105	-0,1064	1,1456	3,7942
-0,3995	-1,4632	-3,0808	-0,0978	1,3408	-0,6147	-0,3255	-2,6661	-3,0499
0,6758	1,5575	0,1303	2,8362	1,5668	-0,9132	-0,1552	1,2390	1,1755
-0,6134	-0,0143	-0,0400	0,2165	0,6073	0,8810	0,0625	-0,6559	-6,0025

[-2,9469]

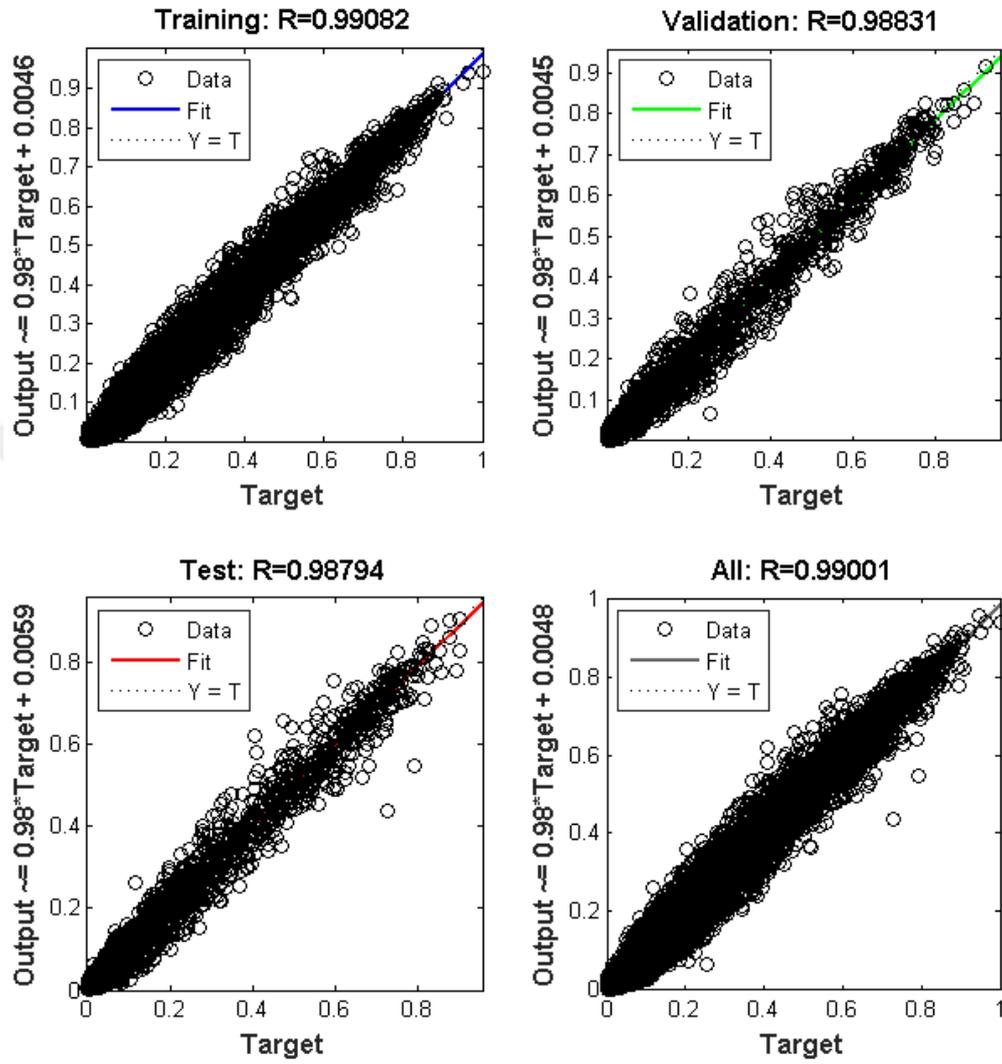
$lw_{[2,1]}$  : Ağırlıklar

-3,2066	-1,2894	-4,7337	-9,4605	1,3279	0,1203	-2,2147	-0,2688	-5,6257	0,2635	1,2735	-5,9693	1,4428	-0,8818	2,9538
-1,1231	5,0502	-3,1049	-0,8385	-0,1416	3,4504	-4,5173	0,3698	-6,7413	-6,9387	-0,4450	1,5576	1,7775	1,7343	-1,3238
3,4258	1,6200	-1,0825	-1,7030	1,4378	-2,8715	1,6446	-0,1069	0,1156	-1,6950	-1,0535	1,3844	1,8065	-2,5112	0,5942
4,3481	0,4548	-1,4646	-1,2063	0,3313	-1,8807	2,4842	0,4506	-4,4874	-0,0450	0,0068	-0,2664	1,0474	-1,6431	5,4369
0,0635	0,2262	-0,1745	-0,3007	0,0305	-0,1781	0,0227	0,1076	0,0227	-0,1075	-0,0231	-0,1945	-0,1762	-0,0950	0,0795
-0,0177	-3,8712	3,1353	0,8576	3,8159	-2,0455	3,8359	1,8900	-0,0854	1,1886	0,1902	-0,0375	5,1490	-0,8459	-2,7443
-1,7419	2,2927	-0,4789	1,4440	-4,7200	2,0581	-4,8024	-1,3339	1,0020	-2,2029	-1,2108	0,4558	0,3811	1,5923	2,3152
1,5266	1,8078	3,0620	-4,4324	-0,5565	-3,2256	-4,5638	-1,3061	-5,8384	-0,3384	1,5985	-3,3121	0,4822	-1,3871	-4,0084
-0,6670	1,5275	2,1740	1,6073	1,3074	-3,5483	-2,8833	-2,4128	-2,0997	1,8289	-1,8030	1,4506	-1,9548	-2,5863	-3,0950
-0,5848	-0,3387	-2,2439	-0,0992	1,5659	-0,3756	-1,3968	1,1502	-3,9492	0,6323	0,7982	-2,0211	-3,5342	0,1168	0,1222
-0,0554	-0,3197	0,1540	-0,1155	-0,0231	0,2609	-0,1536	-0,1641	0,1164	0,1835	0,0721	0,0933	0,1590	0,2300	-0,0301
1,1740	-3,3250	-1,2415	-5,2138	2,5570	4,9534	-1,4714	1,0175	0,2944	2,5127	0,8278	-4,1923	5,9889	2,1272	-4,6100
2,7527	-0,2819	1,4708	1,2484	0,5955	-0,7071	-0,6418	-0,6803	0,9475	1,0796	-0,7701	-0,6552	1,5556	-0,5822	-3,9528
-1,4053	1,3017	-1,4010	-2,7389	0,9722	0,9095	0,3568	0,0333	-3,0422	-1,8178	-0,4185	1,0971	-1,4555	0,9952	2,1199
1,0270	-0,7634	0,8102	-2,2754	2,9335	2,3816	-1,7762	-2,0104	-2,5334	0,2721	-2,7437	-0,8526	1,3778	1,8971	1,5594

## Ek 19. YSA Model-3 Regresyon Analizi Sonuçları



## Ek 20. YSA Model-4 Regresyon Analizi Sonuçları



## ÖZGEÇMİŞ

### İsmail KAYRI

Batman Üniversitesi  
Teknik Eğitim Fakültesi  
Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı

Batman

444 9 072 – 3671

[ismail.kayri@batman.edu.tr](mailto:ismail.kayri@batman.edu.tr)

- 1978 : Batman’da doğdu.
- 1992-1995 : Batman Teknik Lise ve Endüstri Meslek Lisesi Elektrik Bölümü’nden mezun oldu.
- 1996-2000 : Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Öğretmenliği Bölümü’nden mezun olarak lisans eğitimini tamamladı.
- 2000 : Batman Eğitim Araçları Merkezi’nde öğretmen olarak iş hayatına başladı.
- 2000 : Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans eğitimine başladı.
- 2000 : Batman Teknik Lise ve Endüstri Meslek Lisesi’nde Elektrik Öğretmeni olarak göreve başladı.
- 2003 : Batman Teknik Lise ve Endüstri Meslek Lisesi Bilgisayar Bölümü’ne bölüm şefi olarak atandı.
- 2003 : Yüksek lisans eğitimini tamamladı.
- 2007 : Batman Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı’nda Öğretim Görevlisi olarak göreve başladı ve hâlen bu görevine devam etmektedir.
- 2009 : Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda doktora eğitimine başladı.