

**KARABÜK VE CİVARI İÇİN GÜNEŞ ENERJİSİ
ÖLÇÜMLERİ VE SPEKTRUM ANALİZLERİ İÇİN
SİSTEM VE YÖNTEM TASARIMI**

**2011
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

Mustafa GÖKDAĞ

**KARABÜK VE CİVARI İÇİN GÜNEŞ ENERJİSİ ÖLÇÜMLERİ VE
SPEKTRUM ANALİZLERİ İÇİN SİSTEM VE YÖNTEM TASARIMI**

Mustafa GÖKDAĞ

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında

Yüksek Lisans Tezi

Olarak Hazırlanmıştır

KARABÜK

Haziran 2011

Mustafa GÖKDAĞ tarafından hazırlanan “KARABÜK VE CİVARI İÇİN GÜNEŞ ENERJİSİ ÖLÇÜMLERİ VE SPEKTRUM ANALİZLERİ İÇİN SİSTEM VE YÖNTEM TASARIMI” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Haldun ABDULLAH

Tez Danışmanı, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 21/06/ 2011

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Haldun ABDULLAH (KBÜ)



Üye : Prof. Dr. Erzat ERDİL (KBÜ)



Üye : Yrd. Doç. Dr. Murat TEKELİOĞLU (KBÜ)



...../...../2011

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Nizamettin KAHRAMAN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Mustafa GÖKDAĞ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KARABÜK VE CİVARI İÇİN GÜNEŞ ENERJİSİ ÖLÇÜMLERİ VE SPEKTRUM ANALİZLERİ İÇİN SİSTEM VE YÖNTEM TASARIMI

Mustafa GÖKDAĞ

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Haldun ABDULLAH

Haziran 2011, 79 sayfa

Bu çalışmada, LED ve fotodiyot tabanlı radyometrenin tasarımı gerçekleştirilerek yeryüzüne düşen solar radyasyonun tüm spektrumda, temel spektrum (morötesi, görünür ve kızılötesi) bölgelerinde ve mavi, yeşil, kırmızı renkleri kapsayan spektrum bölgelerinde bulunan radyasyon miktarları, tüm spektruma olan oranları ve bunların hava kütlesi değerlerine göre değişimleri araştırılmıştır. Bu amaçla spektral olarak seçici olan LED'leri ve fotodiyotları dedektör olarak kullanan ve bu dedektörlerin çıkışlarını değerlendiren bir mikrodenetleyici ve ilgili gömülü yazılımı içeren radyometre tasarlanmıştır. Bu dedektörlerin çıkış değerleri, spektrumu güneş spektrumuna benzeyen ve çıkış değeri bilinen standart bir "güneş simülatörüne" göre kalibre edilmiştir. Kalibrasyon işlemi ile dedektör çıkışları W/m^2 cinsinden ifade edilebilir hale gelmiştir. Tasarlanan radyometre ile günlük ölçümler alınmaya başlanmış ve bu ölçümlerin sonuçları çizelge ve grafiklerle gösterilerek yorumlanmıştır. Karabük Üniversitesi Yenilenebilir Enerji Mühendisliği Araştırma

ve Uygulama Merkezi'nde bulunan 1 kW'lık fotovoltaik sistemin veri edinim cihazının vermiş olduğu günlük toplam amper-saat bilgisinden metrekareye düşen solar radyasyon yoğunluğunu hesap etmek için bir yaklaşım uygulanmıştır.

Anahtar Sözcükler : Güneş spektrumu, radyasyon ölçümü, radyometre, LED ve fotodiyot tabanlı radyometre.

Bilim Kodu : 905.1.038

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

SYSTEM AND METHOD DESIGN FOR SOLAR ENERGY MEASUREMENTS AND SPECTRUM ANALYSIS FOR KARABUK AREA

Mustafa GÖKDAĞ

Karabük University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical-Electronics Engineering

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Haldun ABDULLAH

June 2011, 79 pages

In this study, the irradiation rates present in the entire spectrum, in the main spectral (ultraviolet, visible and infrared) regions and in the spectral regions covering the blue, green and red colors of the solar radiation falling on to earth's surface, and the percentages of these irradiations to the entire spectrum, and the variation of these irradiations against the air mass were investigated for the Karabuk areas implementing the design of the LED and photodiode based radiometer. For this aim, a radiometer that uses the spectrally selective LEDs and photodiodes as sensors and that includes a microcontroller and embedded software evaluating the outputs of the sensors was designed. The output values of the sensors were calibrated using a standard "sun simulator" whose spectrum matches the solar spectrum and whose output values are known. By the calibration process the outputs of the sensors were made capable of be determined in terms of W/m^2 . Daily measurements were taken using the designed radiometer and the measurement results were interpreted and

displayed by tables and graphics. An approach is applied to calculate solar irradiation values from the daily total ampere-hours knowledge given by data logger device of the photovoltaic system of 1 kW in the Karabuk University Renewable Energy Engineering Research and Application Center.

Key Words : Solar spectrum, irradiation measurement, radiometer, LED and photodiode based radiometer.

Science Code : 905.1.038

TEŞEKKÜR

Bu alıőmanın oluşmasında, yönlendirilmesinde ve yürütülmesinde ilgi ve desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım sayın hocalarım Prof. Dr. Haldun ABDULLAH ve Prof. Dr. Erzat ERDİL'e sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Tasarlanan cihazın mekanik kısımlarının gerçekleştirilmesinde yardımlarını esirgemeyen, dayım Remzi KONUKSAL'a, cihazın kalibrasyonu için ODTÜ Güneş Enerjisi Araştırma Merkezi'nde bulunan güneş simülatörünün kullanılmasında yardımcı olan ODTÜ Fizik Bölümü Arő. Gör. Fırat ES'e teőekkürü bir borç bilirim.

Sevgili aileme manevi hiçbir yardımcı esirgmeden yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvii
BÖLÜM 1.	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	4
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	4
2.1. SPEKTRAL ÖLÇÜMLER İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR.....	4
2.2. RADYOMETRE YAPIMI İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR	6
BÖLÜM 3.	8
GÜNEŞ ENERJİSİ	8
3.1. GÜNEŞ SPEKTRUMUNUN TEMEL BÖLGELERİ	8
3.2. YERYÜZÜNE ULAŞAN SOLAR RADYASYON MİKTARINI ETKİLEYEN FAKTÖRLER	9
3.2.1. Mevsimsel ve Atmosferik Değişiklikleri Anlamak	11
3.3. SOLAR RADYASYONUN YERYÜZÜNE ULAŞAN PARÇALARI.....	12
3.4. SOLAR RADYASYONUN ÖLÇÜMÜ YAPILAN BİLEŞENLERİ.....	13
3.5. SOLAR RADYASYON VERİLERİ.....	15
3.6. SOLAR RADYASYONU KULLANAN TEKNOLOJİLER	15
3.7. SOLAR RADYASYON VERİLERİNE İHTİYAÇ DUYULMASI.....	16

3.8. SOLAR ENERJİ POTANSİYELİ AÇISINDAN TÜRKİYE VE KARABÜK'ÜN DURUMU.....	17
BÖLÜM 4.	20
RADYOMETRE TASARIMI	20
4.1. GÜNEŞ RADYASYON YOĞUNLUĞU ÖLÇME PRENSİBİ	20
4.2. RADYOMETRE TASARIMI.....	21
4.2.1. Dedektörlerin Seçimi	22
4.2.1.1. Seçilen Fotodiyotlar	23
4.2.1.2. Seçilen LED'ler	25
4.2.2. Dedektörlere Sıcaklık Etkisi	27
4.2.3. Transempedans (Akımdan Gerilime) Kuvvetlendirici	27
4.2.3.1. İşlemsel Kuvvetlendiricinin Seçimi	29
4.2.3.2. Geri Besleme Direnci (R_F) ve Kapasite (C_F)'nin Seçimi.....	29
4.2.4. Yükseltici Çıkışının Ölçülmesi.....	30
4.2.5. Sistemin İncelenmesi	30
4.2.5.1. Elektronik Donanım.....	31
4.2.5.2. Gömülü Yazılım.....	31
4.2.5.3. Mekanik Donanım	32
4.3. RADYOMETRENİN KISIMLARI VE ÇALIŞMASI.....	35
BÖLÜM 5.	36
RADYOMETRE KALİBRASYONU	36
5.1. DEDEKTÖR DUYARLILIĞI	36
5.2. KALİBRASYON CİHAZI.....	37
5.3. KALİBRASYON İŞLEMİ.....	39
5.3.1. Morötesi Bölge Dedektör Kalibrasyonu	41
5.3.2. Görünür Bölge Dedektör Kalibrasyonu.....	42
5.3.3. Kızılötesi Bölge Dedektör Kalibrasyonu.....	43
5.3.4. Tüm Spektral Bölge Direkt Radyasyon Ölçümü (280-2500 nm) Dedektör Kalibrasyonu	44
5.3.5. Mavi Bölge Dedektör Kalibrasyonu.....	45
5.3.6. Yeşil Bölge Dedektör Kalibrasyonu.....	46

	<u>Sayfa</u>
5.3.7. Kırmızı Bölge Dedektör Kalibrasyonu	47
5.3.8. Tüm Spektral Bölge Toplam Radyasyon Ölçümü (200-2500 nm) Dedektör Kalibrasyonu	48
BÖLÜM 6.	50
VERİLER VE VERİLERİN ANALİZİ	50
6.1. RADYOMETRE İLE ALINAN VERİLERİN ANALİZİ	50
6.1.1. Spektrum Analizi	50
6.1.1.1. Karabük İçin Aylık Spektrum Analizi	51
6.1.1.2. Spektrum Analizinin Literatürdeki Verilerle Karşılaştırılması.....	54
6.1.2 Radyasyon Yoğunluğu Miktarlarının Günlük Değişimlerinin Takibi.....	57
6.1.2.1. Direkt-normal, Toplam ve Difüz Radyasyonların Günlük Değişimlerinin Takibi	57
6.1.3. Aerosol Optik Kalınlığının Ölçülmesi.....	59
6.1.3.1. Aerosol Optik Kalınlığı.....	60
6.1.3.2. Aerosol Optik Kalınlığının Hesaplanması	60
6.2. KARABÜK ÜNİVERSİTESİ YENİLENEBİLİR ENERJİ ARAŞTIRMA VE UYGULAMA MERKEZİNDE BULUNAN 1 KW'LIK FOTOVOLTAİK SİSTEMİN ÇIKIŞ AKIM VE GERİLİM DEĞERLERİNİN ANALİZİ.....	63
6.2.1. Birinci Yaklaşım: Modül Kısa Devre Akımlarından Solar Radyasyon Yoğunluğunun Hesaplanması	64
6.2.1.1. Radyometrenin Piranometre Ölçümlerinin IEC 61215 Standartlarına Göre Özellikleri Belirlenen Bir PV Dizinin Çıkışı İle Kıyaslanması	66
6.2.1.2. Fotovoltaik Sistemin Veri Toplayıcısından Alınan Verilerin Birinci Yaklaşımına Göre Solar Radyasyon Değerlerine Dönüştürülmesi	67
6.2.2. İkinci Yaklaşım: Modül Kısa Devre Akımlarından ve Açık Devre Gerilimlerinden Solar Radyasyon Yoğunluğunun Hesaplanması.....	69
6.2.3. Birinci ve İkinci Yaklaşımdan Elde Edilen Değerlerin Karşılaştırılması	71
BÖLÜM 7.	72
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	72

	<u>Sayfa</u>
KAYNAKLAR	75
ÖZGEÇMİŞ	79

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1. Kuzey yarım küre için güneş pozisyonunun yıllık değişimi.....	9
Şekil 3.2. Açık ve kapalı bir kış günü 60° eğimli fotovoltaik dizinin çıkış akımı ...	10
Şekil 3.3. Açık havada yere gelen güneş ışığının soğurulması ve dağılması.....	11
Şekil 3.4. Zenit açısı ve hava kütlesinin değişimi	12
Şekil 3.5. Farklı hava kütlesi değerleri için standart spektrumlar	14
Şekil 3.6. Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli atlası	17
Şekil 3.7. Karabük'ün güneş enerjisi potansiyeli atlası	18
Şekil 3.8. Karabük 50 m rüzgar enerjisi potansiyeli atlası.....	19
Şekil 4.1. Farklı dedektörlerin standart spektruma karşı spektral cevapları	21
Şekil 4.2. HLMP-D600 Yeşil LED için spektral cevap (solda) ve spektral yayılım bantları.....	22
Şekil 4.3. Morötesi fotodiyot spektral cevap.....	23
Şekil 4.4. Görünür bölge fotodiyot bağıl spektral duyarlılık	24
Şekil 4.5. Kızılötesi bölge fotodiyot bağıl spektral duyarlılık	24
Şekil 4.6. Tüm spektral bölge fotodiyot spektral duyarlılık.....	25
Şekil 4.7. Kırmızı LED yayılım spektrumu	26
Şekil 4.8. Yeşil LED yayılım spektrumu	26
Şekil 4.9. Mavi LED yayılım spektrumu	27
Şekil 4.10. Foto-akımı şönt dirençle gerilime çevirme	28
Şekil 4.11. Transempedans kuvvetlendirici	28
Şekil 4.12. Elektronik donanım blok diyagramı.....	30
Şekil 4.13. Elektronik devre şeması.....	31
Şekil 4.14. Gömülü yazılım akış diyagramı.....	32
Şekil 4.15. Dedektörlerin yerleştirildiği kaide	33
Şekil 4.16. Radyometrenin güneşe hizalayıcı kısmı	35
Şekil 4.17. Radyometrenin genel görünümü.....	35
Şekil 5.1. Newport güneş simülatör cihazı.....	38
Şekil 5.2. AM 1,5 G Filtreli 91192 simülatörün çıkış spektrumu	38

Sayfa

Şekil 5.3. Newport 69920 güç kaynağı	39
Şekil 5.4. Newport PVM 354 Referans fotovoltaik pil ve 91150 referans pil metre	40
Şekil 5.5. Güç kaynağı kontrolünde 16 saat için simülatör çıkışının değişimi	40
Şekil 5.6. Simülatör açılmadan önce ve sonra kalibrasyon anı	41
Şekil 5.7. Morötesi fotodiyot için uygulanan radyasyon değerine karşılık ÖSD değeri.....	42
Şekil 5.8. Görünür bölge fotodiyot için uygulanan radyasyon değerine karşılık ÖSD değeri.....	43
Şekil 5.9. Kıızılötesi fotodiyot için uygulanan radyasyon değerine karşılık ÖSD değeri.....	44
Şekil 5.10. Tüm spektral bölge fotodiyot için uygulanan radyasyon değerine karşılık ÖSD değeri.....	45
Şekil 5.11. Mavi LED için uygulanan radyasyon değerine karşılık ÖSD değeri.....	46
Şekil 5.12. Yeşil LED için uygulanan radyasyon değerine karşılık ÖSD değeri.....	47
Şekil 5.13. Kırmızı LED için uygulanan radyasyon değerine karşılık ÖSD değeri... ..	48
Şekil 5.14. Tüm spektral bölge fotodiyot için uygulanan radyasyon değerine karşılık ÖSD değeri.....	49
Şekil 6.1. 09.02.2011’de Karabük için güneşlenme eğrileri	57
Şekil 6.2. Yeşil dalgaboyu için Langley çizimi.....	61
Şekil 6.3. KBÜ Yenilenebilir Enerji Merkezi’nde bulunan 1 kW’lık sistem.....	64
Şekil 6.4. 10.05.2011’de piranometre ile modül çıkış değerlerinin kıyaslanması ...	66
Şekil 6.5. Veri edinim sisteminin ekran görüntüsü	67
Şekil 6.6. Mayıs ayı için günlük toplam solar radyasyon enerjisi miktarları.....	69

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 4.1. Morötesi fotodiyot optik özellikleri.....	23
Çizelge 4.2. Görünür bölge fotodiyot optik özellikleri.....	24
Çizelge 4.3. Kızılötesi bölge fotodiyot optik özellikleri.....	24
Çizelge 4.4. Tüm spektral bölge fotodiyot optik özellikleri.....	25
Çizelge 4.5. Kırmızı LED optik özellikleri.....	25
Çizelge 4.6. Yeşil LED optik özellikleri.....	26
Çizelge 4.7. Mavi LED optik özellikleri.....	27
Çizelge 5.1. 91192 Simülatör için spektral aralıkların tüm spektruma oranı.....	39
Çizelge 5.2. Morötesi fotodiyot kalibrasyon ölçümleri.....	41
Çizelge 5.3. Morötesi fotodiyot için kalibrasyon katsayıları.....	41
Çizelge 5.4. Görünür bölge fotodiyot kalibrasyon ölçümleri.....	42
Çizelge 5.5. Görünür bölge fotodiyot için kalibrasyon katsayıları.....	43
Çizelge 5.6. Kızılötesi bölge fotodiyot kalibrasyon ölçümleri.....	43
Çizelge 5.7. Kızılötesi bölge fotodiyot için kalibrasyon katsayıları.....	44
Çizelge 5.8. Tüm spektral bölge fotodiyot kalibrasyon ölçümleri.....	45
Çizelge 5.9. Tüm spektral bölge fotodiyot için kalibrasyon katsayıları.....	45
Çizelge 5.10. Mavi bölge LED için kalibrasyon ölçümleri.....	46
Çizelge 5.11. Mavi bölge LED için kalibrasyon katsayıları.....	46
Çizelge 5.12. Yeşil bölge LED için kalibrasyon ölçümleri.....	47
Çizelge 5.13. Yeşil bölge LED için kalibrasyon katsayıları.....	47
Çizelge 5.14. Kırmızı bölge LED için kalibrasyon ölçümleri.....	48
Çizelge 5.15. Kırmızı bölge LED için kalibrasyon katsayıları.....	48
Çizelge 5.16. Tüm spektral bölge fotodiyot kalibrasyon ölçümleri.....	49
Çizelge 5.17. Tüm spektral bölge fotodiyot için kalibrasyon katsayıları.....	49
Çizelge 6.1. Şubat ayını temsil eden ortalama bir güneşli gün için spektrum analizi.....	51
Çizelge 6.2. Şubat ayı ölçüm zamanlarında karşılaşılan zenit açısı ve hava kütlesi değerlerinin minimum ve maksimum değerleri.....	51

Çizelge 6.3. Mart ayını temsil eden ortalama bir güneşli gün için spektrum analizi	52
Çizelge 6.4. Mart ayı ölçüm zamanlarında karşılaşılan zenit açısı ve hava kütlesi değerlerinin minimum ve maksimum değerleri.....	52
Çizelge 6.5. Nisan ayını temsil eden ortalama bir güneşli gün için spektrum analizi	52
Çizelge 6.6. Nisan ayı ölçüm zamanlarında karşılaşılan zenit açısı ve hava kütlesi değerlerinin minimum ve maksimum değerleri.....	52
Çizelge 6.7. Mayıs ayını temsil eden ortalama bir güneşli gün için spektrum analizi	53
Çizelge 6.8. Mayıs ayı ölçüm zamanlarında karşılaşılan zenit açısı ve hava kütlesi değerlerinin minimum ve maksimum değerleri.....	53
Çizelge 6.9. Spektral aralıklardaki radyasyonun tüm spektrumdaki (200-2500nm) radyasyona oranları	54
Çizelge 6.10. Tüm ölçüm zamanlarında karşılaşılan zenit açısı ve hava kütlesi değerlerinin minimum ve maksimum değerleri.....	54
Çizelge 6.11. 1977-1983 verileri için Jakovides vd. sonuçları	55
Çizelge 6.12. 1984-1990 verileri için Jakovides vd. sonuçları	55
Çizelge 6.13. Jakovides vd. kendi çalışmaları ile literatürdeki çalışmaların kıyaslanması.....	55
Çizelge 6.14. 09.02.2011 global, direkt ve difüz radyasyon miktarları	58
Çizelge 6.15. IBC PolySol 130 GC modül karakteristikleri	64
Çizelge 6.16. Mayıs ayı için farklı günlerde yapılan ölçümlerden birinci yaklaşıma göre hesaplanan solar radyasyon değerleri	65
Çizelge 6.17. Bir haftalık günlük toplam fotovoltaik dizin akımları ve solar enerji miktarları	68
Çizelge 6.18. Mayıs ayı için farklı günlerde yapılan ölçümlerden ikinci yaklaşıma göre hesaplanan solar radyasyon değerleri	70

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

KISALTMALAR

ASTM	: American Society for Testing and Materials
AOD	: Aerosol Optical Deepth (Aerosol Optik Kalınlığı)
DMİ	: Devlet Meteoroloji İşleri
EİE	: Elektrik İşleri Etüt İdaresi
IEC	: International Electrotechnical Commission
ISO	: International Standards Organization
NIST	: National Institute of Standards and Technology
NOAA	: National Oceanic and Atmospheric Administration
NREL	: National Renewable Energy Laboratory
ÖSD	: Örneksele Sayısal Dönüştürücü
TOE	: Ton-petrol Eşdeğeri

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Güneş enerjisinin karasal uygulamalardaki artışı dünyanın birçok bölgesinde bu enerjinin varlığı ile ilgili çalışmalara hız vermiştir. Elektrik üretimi için fotovoltaik pillerde, termal kolektörlerde ve tarım meteorolojisi ile çevresel araştırmalardaki pratik uygulamalarda kullanılan soğurucular gibi spektral olarak seçici cihazların kullanımının artışı güneş enerjisi ile ilgili çalışmaların sadece yeryüzüne ulaşan güneş enerjisinin toplam miktarı ile ilgili değil aynı zamanda onun spektral içeriği ile ilgili alana da kaymasına sebep olmuştur. Yatay bir yüzey üzerindeki direkt ve difüz (yayılan) radyasyonların bileşkesi olarak ölçülen toplam (global) radyasyon astronomik, coğrafik, fiziksel ve meteorolojik pek çok faktöre bağlıdır. Yeryüzündeki solar enerjinin dalgaboyu bölgeleri arasındaki dağılımı solar zenit açısına, atmosfer bulanıklığına (aerosol içeriği, kompozisyonu ve boyut dağılımı) soğurucu gazların (ozon, su buharı ve karbondioksit) atmosferik içeriğine, bulutluluk ve yüzey yansıtmasına bağlı olduğu bilinmektedir. Yeryüzüne ulaşan güneş radyasyon miktarını etkileyen en önemli faktörlerden birinin atmosferdeki aerosol parçacıkları olduğu da bilinmektedir. Havadan taşınan katı parçacıklar ve gaz halindeki kirleticiler yere düşen güneş enerjisini, toplam enerjiyi azaltmak ve dolayısıyla direkt ve difüz radyasyonun birbirine kıyasla miktarını değiştirmek suretiyle iki şekilde değiştirir. Doğal ve insan yapımı aerosoller solar radyasyonun hem spektral dağılımı hem de yoğunluğu üzerinde farklı etkilere sahiptir [1].

Bu çalışmalar dünyanın birçok bölgesi için yapılmasına rağmen Türkiye’de daha çok Akdeniz ve Ege denizi bölgelerinde sınırlı olarak yapılsa da Karadeniz bölgesinde ve özellikle endüstriyel hava kirliliğinin etkin olduğu Karabük bölgesinde henüz yapılmamıştır.

Karabük Üniversitesi kampusunun özel konumu, Karabük ve Safranbolu bölgelerini saran dağlar toplam ve spektral güneş enerjisinin incelenmesinde bilimsel açıdan daha da önem kazandırmıştır. Ayrıca bilindiği üzere, Türkiye’de bol güneşli bölgelerde kuvvetli rüzgar oluşması fotovoltaik (güneş enerjisini elektrik enerjisine çevirme) çalışmalarına ciddi rekabet oluşturmuştur. Karabük bölgesinde ciddi miktarda rüzgar enerjisi bulunmadığından [2] doğrudan güneş enerjisini elektrik veya ısı enerjisine çevirme çalışmalarına diğer yenilenebilir enerji türleri rekabet oluşturmayacaktır. Bu durumda Karabük için yenilenebilir enerji kaynakları açısından güneş enerjisi en önemli seçenek olabilir.

Elektrik İşleri Etüt İdaresi tarafından 2008 yılında yapılan çalışma ile Türkiye’nin güneş haritası çıkarılmıştır. Ancak bu harita sınırlı sayıdaki ölçüm istasyonundan alınan veriler ile çıkarılmış olup $\pm 10\%$ hata payına sahip olduğu belirtilmektedir [3]. EİE’nin yaptığı bu çalışma ile Türkiye’nin güneş enerjisi potansiyeli daha önceki çalışmaya kıyasla $20-25\%$ fazla çıkmıştır. Bu haritaya göre Karabük için öngörülen güneş enerjisi değerleri tamamen modelleme ile elde edilmiştir [4]. Dolayısıyla belirtilen hata sınırları Karabük için daha fazla olması beklenebilir. Çünkü Karabük’te güneş enerjisi ile ilgili DMI ve EİE’nin yapmış olduğu ölçümler bulunmamaktadır. Karabük için şimdilik tek seçenek olarak görünen güneş enerjisi potansiyelini uygulamalarda optimum şekilde kullanabilmek için Karabük’te toplam ve spektral güneş enerjisi ölçümleri yapılmalıdır.

Bu çalışmada solar radyasyonun farklı spektral bölgelerindeki enerji miktarları üzerinde durulmuştur. Farklı spektral bölgelerdeki direkt solar radyasyon ve tüm spektrumdaki (200-2500 nm) toplam global solar radyasyon ölçümleri Karabük için yapılmıştır. Çeşitli spektral bantlardaki direkt radyasyon ve tüm spektruma ilişkin toplam solar radyasyon arasındaki bağıntı incelenmiştir. Bu ölçümler dünyada yüksek maliyetli kompleks cihazlar ile yapılabilmektedir. Kurulmuş olan Karabük Üniversitesi Yenilenebilir Enerji Mühendisliği Araştırma ve Uygulama Merkez’inde bulunması gereken bu cihazların alımı henüz tamamlanmadığından bu ölçümleri yapabilmek için kullanımı kolay, ekonomik ve taşınabilir bir radyometre cihazı ve sistemi tasarlanarak gerçekleştirilmiş ve kalibre edilmiştir. Bu sistemden kaydedilen veriler analize tabi tutulup kıyaslamalar yapılmıştır. Karabük Üniversitesi

Yenilenebilir Enerji Mühendisliği Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde bulunan 1 kW'lık fotovoltaik sistemin veri edinim sistemi tarafından depolanan günlük toplam amper-saat bilgisinden metrekareye düşen günlük toplam solar enerji miktarını hesaplamak üzere bir yaklaşım uygulanmıştır. Böylece Karabük'e düşen solar enerji miktarının yıllık değişimi izlenmeye başlanmış olup ileride Karabük'te yapılabilecek fotovoltaik sistem uygulamalarının fizibilite çalışmalarında kullanılabilir.

Bu alışma sırasıyla konuyla ilgili literatürde var olan çalışmaların incelenmesi, yeryüzündeki güneş enerjisini etkileyen faktörler ve Türkiye ve Karabük'n güneş enerjisi potansiyeli, radyometre tasarımı ve kalibrasyonu, verilerin analizi, sonuç ve öneriler bölümlerinden oluşmaktadır.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. SPEKTRAL ÖLÇÜMLER İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Jacovides vd. (1993), Atina’da yapılan toplam solar radyasyon ölçümlerinin 14 yıllık veri setini kullanarak çeşitli dalgaboyu bantları (mavi 380-525nm, yeşil-turuncu 525-630nm, kırmızı 630-710nm, fotosentetik olarak aktif radyasyon (PAR) 380-710nm ve toplam radyasyon 300-2400nm) üzerindeki radyasyon enerjisi dağılımlarını belirlemeye çalışmışlardır. Spektral aralıklardaki radyasyon oranlarının aylık ortalama değerlerini geniş bir coğrafi alan üzerindeki farklı bölgeler için literatürdeki verilerle kıyaslamışlardır. Radyasyon oranlarının yerel hava kütesindeki değişimlere ek olarak mevsimsel değişiklikler gösterdiğini belirtmişlerdir. Değişik spektral bantlardaki radyasyon enerjisinin toplam solar radyasyon miktarına oranlarının hava koşulları “açıktan” “parçalı bulutluya” değişirken arttığını gözlemişlerdir. Sonuç olarak gözlenen geniş bant spektral enerji dağılımının mevsimsel bağımlılığı ilgili yıllarda ölçüm sahasındaki hava kütlesi (bulanıklık, havadan taşınan kirleticiler, bulutlar) kompozisyonundaki değişimlerden kaynaklandığını belirtmişlerdir. 1977-1983 ve 1984-1990 zaman dilimlerine ait verileri ayrı ayrı analiz etmişlerdir. Özellikle mavi ve görünür dalagaboylarında büyük bir değişim gözlemlemişlerdir [1].

Shaltout vd. (1994), Mısır üzerindeki morötesi solar radyasyonu Eppley morötesi solar radyometre ile yapılan 3 yıllık ölçümleri kullanmak suretiyle incelemişlerdir. Aynı zamanda aynı süre için iki farklı şehirde global solar radyasyonu kaydetmişlerdir. Bütün meteorolojik şartlar bu iki şehir için toplanmıştır. Morötesi radyasyonun global radyasyona oranı Kahire (30°enlem) için kışın %2,7’den yazın %3,4 aralığında, Aswan (23.5° enlem) için Kahire’dekine göre ters bir davranışla

morötesi radyasyonun kışın %3,9'dan yazın %3,5'e değiştiğini gözlemlemişlerdir [5].

Thuillier vd. (1998), 200-3000 nm solar spektral radyasyonu ölçme için SOLSPEC cihazını yapmışlardır. Bu cihaz morötesi, görünür ve kızılötesi bölgelerde bulunan solar radyasyonu ölçmek için üç spektrometreden oluşmuş ve ATLAS I uydusu ile Mart 92'de uçmuştur. Bu çalışmada solar spektrumun görünür bölgesi ile ilgili incelemeler yapmışlardır. Son verilerle olan kıyaslamalar gösterilmiş ve 450 nm altındaki farklar tartışılmıştır [6].

Gueymard vd. (2002), 1982'de ASTM tarafından fotovoltaik performans uygulamalarına standart spektrum (standart spektrum solar radyasyonun teorik etkilerini hesaplamak için temel sağlamak ve simülasyon tasarımı için almak üzere geliştirilen bir standarttır.) sağlamak için kabul edilen (ASTM E891-82, E892-82) ve 1987'de revize edilen referans spektrum üzerinde çalışmalar yapmışlardır. ISO ve IEC tarafından da referans spektrum olarak belirlenen bu spektrumlar 2002'de güncellenmesine karşın bu spektrumların oluşmasında 1980'lerin verilerinin kullanıldığını belirtmişlerdir. Referans spektrumu kullanan çeşitli teknolojilerin mevcut ve gelecekteki ihtiyaçlarını karşılamak üzere modern spektral radyasyon modellerini, atmosfer fiziği ile ilgili daha güncel bilgi ve verileri ve hakim radyometrik nicelikleri kullanarak referans spektrumunda çeşitli iyileştirmeler önermektedirler. Mevcut standart spektrumda 500 nm'de 0,27 kabul edilen aerosol kalınlığı değerinin çoğu atmosferik durum için tanımlayıcı olmadığını ve belirtilen değerin 500 nm'de 0,084 olmasının bir çok atmosferik durum için daha temsil edilebilir olduğunu belirterek yaptıkları önermelerin global radyasyona ilişkin referans spektrum için küçük değişimler içerirken, direkt radyasyonu daha çok etkileyen aerosol kalınlığındaki farktan ötürü direkt referans spektrum için önerilen değişimler daha fazladır [7].

Thuillier vd. (2003), spektrumun morötesi, görünür ve kızılötesi bölgelerini gözlemek için üç spektrometreden oluşan SOLSPEC ve SOSP spektrometrelerini kullanmışlardır. Bu çalışma ve daha önce yaptıkları çalışmaları birleştirerek morötesi, görünür ve kızılötesi spektrumu (200-2400nm) kapsayan tek bir solar

radasyon spektrumu çıkarmışlardır. Farklı spektral bantlar için elde ettikleri sonuçları literatürdeki değerlerle kıyaslayarak sunmuşlardır [8].

Myers çalışmasında (2009), çok eklemli ve ince film fotovoltaik teknolojilerinin solar enerjinin farklı spektral bölgelerine farklı cevaplar verdiğinden hareket ederek fotovoltaik cihaz ve sistem tasarımcılarının belirli fotovoltaik teknolojileri üzerinde spektral değişimin etkilerini göz önüne almaları gerektiğini belirtmiştir. Spektral dağılım verilerinin nadir, pahalı ve zor elde edildiğinden saatlik geniş bant yatay global (toplam) radyasyonu ve direkt solar radyasyonu temsili spektral dağılıma dönüştürmek için mevcut deneysel spektral dönüşüm modelini değiştirmiştir. Ortalama saatlik global radyasyon ve direkt solar radyasyon verileri model giriş verileridir. Varsayılan veya saptanmış atmosferik aerosol ve su buharı miktarları muhtemel girişlerdir. Saatlik, aylık ve yıllık ortalama spektral dağılımları belirli eğime sahip bir yüzey için hesaplamıştır. Spektral aralık olarak 300-1400 nm aralığını kullanmıştır. Çok farklı şartlar için NREL tarafından yapılan spektral dağılım ölçümleri, makbul spektral doğruluğun yaklaşık $\% \pm 20$ elde edilebilir olduğunu göstermiştir [9].

2.2. RADYOMETRE YAPIMI İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Mims çalışmasında (1992), ışık yayan diyotların (LED) spektral seçici dedektör olarak kullanılabilmesini belirtmiştir. Böylece atmosferik bulanıklık ve çökebilir su miktarını ölçen altı kanallı minyatür ve ekonomik bir güneş fotometresi tasarlayarak LED'lerin dedektör olarak kullanılabilmesinden ilk defa bahsetmiştir. Bu amaçla yaptığı el cihazı ile gerçekleştirdiği ilk ölçümlerin LED fotoakımlarının logaritmalarının hava kütlelerinin geniş bir değer aralığına karşı çizilmesi ile elde edilen Langley (Abbon ve Fowle tarafından tanımlandığı şekliyle, 1908) çizimlerinin lineer değiştiğini göstermiştir. Bu durum LED'lerin güneş fotometresinde dedektör olarak kullanılabilmesi için ön şarttır. Yaptığı bu cihazın uzun dönemli ölçüm sonuçlarının interferans filtre kullanan standart fotometrelerle kıyaslanacağını ve sonuçların daha sonra yayımlanacağını belirtmiştir [10].

Mims daha sonraki çalışmasında (2002), gerçekleştirmiş olduğu LED tabanlı güneş fotometresi cihazı ile yapılmış 12 yıllık ölçümler ile optik filtreler kullanan standart cihazların ölçüm sonuçlarını karşılaştırmış ve LED metodunun uzun dönemli trendlerin ve günlük değişikliklerin ölçülmesinde uygun olduğu sonucuna varmıştır. LED'lerin geleneksel güneş fotometrelerinde kullanılan interferans filtrelerine göre daha iyi uzun süreli stabilizasyona sahip ve ekonomik olduğunu belirtmiştir [11].

Chaundri ve Sen çalışmalarında (2009), LED'lerin minyatür-çoklu spektral bir radyometrenin optik dedektörü olarak uygunluğunu çalışmak için bir yöntem sunmuşlardır. Üç farklı dalgaboyuna sahip ticari olarak mevcut olan üç LED'in optoelektronik özellikleri, LED'ler üzerine düşen radyasyonun farklı dalga boyları ve farklı ışık yoğunlukları altında açık devre gerilimleri ve kısa devre akımlarını ölçmek suretiyle standartlaştırılmıştır. Fotoakım (photoconductive) ölçümün uygun optik cevabı elde etmede daha yararlı olduğunu bulmuşlar ve fotoakım modunu uygun dedektör modu olarak önermişlerdir. Dedektör performanslarının hem solar fotometre hem de yüzey yansıtma ölçümleri için uygun olduğunu göstermişlerdir. LED'lerin solar radyasyon ve yüzey yansıtmaları için iyi performans sergiledikleri sonuçlarına varmışlardır [12].

Martinez vd. (2009), spektrumun görsel bölgesindeki radyasyonu ölçmek için bir piranometre tasarlamışlardır. Bu piranometre; doğruluk, kolay bağlantı, gürültü sinyaline karşı bağımsızlık, uzaktan programlanabilme ve işletme, iç sıcaklık regülasyonu ve en önemlisi kosinüs hatasının minimize edilmesi gibi literatürde bahsedilen zorluklara çözüm getiren ve yaptıkları testler ile bunu gösteren düşük maliyetli bir cihazdır. Kosinüs hatasını minimize etmeyi dedektör üzerinde bulunan teflon yayıcıya verdikleri özel bir şekil sayesinde başarmışlardır. Bu ürün ile İspanya Patent Ofisinden patent almışlardır [13].

BÖLÜM 3

GÜNEŞ ENERJİSİ

İnsanoğlu ilk çağlardan itibaren enerji ihtiyacını çeşitli şekillerde karşılamaktadır. Sanayi devrimi ile birlikte teknolojinin hızla gelişmesi ve dünya nüfusundaki hızlı artış enerjiye olan gereksinimi hiç olmadığı kadar artırmıştır. Yirminci yüzyılın ortalarına kadar insanoğlu bu enerji ihtiyacını çoğunlukla fosil yakıtlardan karşılamış, halen de karşılamaktadır. Günümüzde, geleneksel enerji kaynaklarının tedarik güvenliği ile ilgili endişeler, artan fiyatlar, sınırlı rezervler ve bununla beraber iklim değişikliği ile ilgili artan bilinç, alternatif ve özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının hızlı bir biçimde gelişmesi ile sonlandığı bilinmektedir.

Güneş çok yüksek potansiyeli ile alternatif enerji kaynakları arasında öne çıkmaktadır. Güneş her yıl Dünya'daki kara parçalarına 19000 milyon ton petrol eşdeğeri (TOE) ışık enerjisi gönderir. Bu enerjinin sadece küçük bir parçası 9 milyon TOE dünyanın mevcut enerji ihtiyacını karşılayacaktır. Diğer bir deyişle 20 dakikada Dünya'ya düşen solar enerji miktarı dünyayı bir yıl enerjilendirmek için yeterlidir. Solar enerji, yüksek yoğunluklu radyasyon (ışınım, ışık enerjisi) olarak Dünya'ya ulaşır. Solar enerji yeryüzüne düştükçe herhangi bir yüzey veya malzeme (bunlar atmosfer, toprak, binalar ve hatta pencere önündeki bir mobilya bile olabilir) tarafından ısıya dönüşür. Bu ısı; rüzgar, yağmur ve akarsu akışı gibi Dünya'nın hava sistemlerini sürer. Aslında nükleer, jeotermal ve gelgit ile ilgili dalga enerjileri hariç bütün enerji formları güneş kaynaklıdır [14].

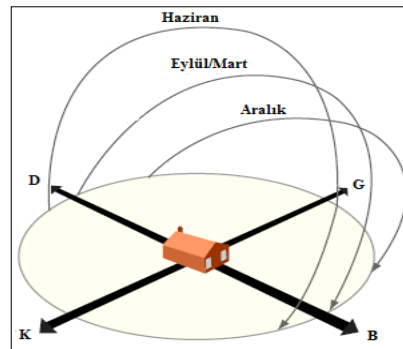
3.1. GÜNEŞ SPEKTRUMUNUN TEMEL BÖLGELERİ

Güneş'ten yeryüzüne ulaşan radyasyonun bu spektral dağılımı 100 nm'den 10^6 nm'ye kadardır. Dalgaboyunun artışına (veya frekanslarına) göre bu spektrum kabaca 3 bölgeye ayrılır [15].

- 100-400 nm Morötesi bölge olarak adlandırılır. Morötesi bölge kendi arasında UVC(100-280 nm), UVB (280-315 nm) ve UVA (315-400 nm) olmak üzere 3 bölgeye ayrılır.
- 400-700 nm Görünür bölge; buradaki radyasyon insan gözü tarafından dalgalılarına bağlı olarak farklı renklerde görünür [16].
 - Mor : 400-446 nm
 - Mavi : 446-500 nm
 - Yeşil : 500-578 nm
 - Sarı : 578-592 nm
 - Turuncu: 592-620 nm
 - Kırmızı : 620-700 nm
- 700 nm – 1 mm Kızılötesi Bölge

3.2. YERYÜZÜNE ULAŞAN SOLAR RADYASYON MİKTARINI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

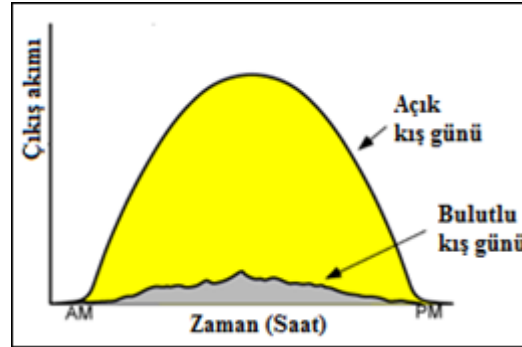
Atmosferin dış yüzeyine ulaşan solar radyasyon miktarı solar sabit olarak tanımlanmıştır. Yeryüzüne ulaşan solar radyasyon miktarı ise atmosferik koşulların değişmesinden ve hem gün hem de yıl boyunca Şekil 3.1’de gösterildiği gibi güneşin değişken pozisyonundan dolayı önemli miktarda değişir. Bulutlar yere ulaşan solar radyasyon miktarını belirleyen baskın atmosferik koşuldur. Sonuç olarak bulutlu iklime sahip bölgeler bulutsuz iklimli bölgelere göre daha az solar radyasyon alır. Verilen herhangi bir bölge için, yeryüzüne ulaşan solar radyasyon bulutlanmanın artmasıyla azalır [17].



Şekil 3.1. Kuzey yarımküre için güneş pozisyonunun yıllık değişimi [18].

Dağlar, okyanus, deniz ve geniş göller gibi lokal coğrafik özellikler bulut oluşumunu etkiler. Bu yüzden bu bölgeler tarafından alınan solar radyasyon komşu bölgeler tarafından alınandan farklı olabilir. Örneğin dağlar komşu dağ eteklerinden ve kısa mesafede bulunan ovalardan daha az solar radyasyon alırlar. Dağlara karşı esen rüzgarlar havanın bir kısmını kaldırarak şekilde iter ve havadaki nem soğurken bu nemden bulutlar oluşur. Sahiller de daha iç bölgelere göre farklı miktarda solar radyasyon alır. Büyük ovalar gibi coğrafi değişikliklerin az olduğu yerlerde solar radyasyon miktarı daha az değişim gösterir [17].

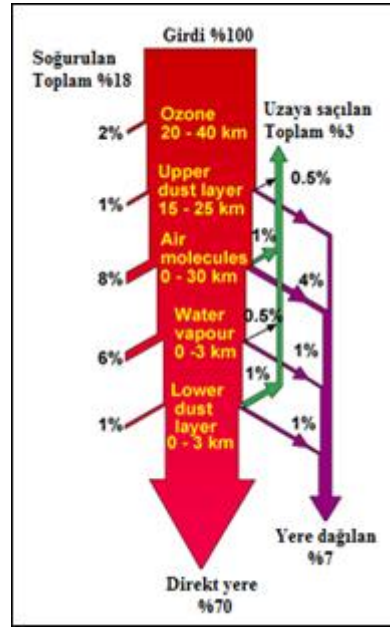
Solar radyasyon miktarı Şekil 3.2'deki gibi gün içindeki zamana ve mevsime bağlı olarak da değişir. Genelde gün ortası boyunca daha fazla solar radyasyon mevcuttur. Gün ortasında güneş gökyüzünde yüksekte pozisyon alır ve yeryüzü atmosferi boyunca güneş ışınlarının yol alacağı mesafe kısalır. Sonuç olarak daha az solar radyasyon dağılmaya ve soğurulmaya uğrar ve yeryüzüne daha fazla solar radyasyon ulaşır. Aynı zamanda kuzey yarım küre için yazın daha fazla güneşlenme saati mevcut olduğundan kışa nazaran daha fazla solar radyasyon beklenir. Bu durum daha çok yüksek enlemler için telaffuz edilir [17].



Şekil 3.2. Açık ve kapalı bir kış günü 60° eğimli fotovoltaik dizinin çıkış akımı [19].

Hem insan yapımı hem de doğal olarak oluşan olaylar yeryüzündeki solar radyasyon miktarını sınırlayabilir. Kentsel hava kirliliği, orman yangınlarından kaynaklanan dumanlar ve volkanik aktivitelerden sonuçlanan ve havadan taşınan küller solar radyasyonun soğurulması ve dağılmasını artırarak Şekil 3.3'te gösterildiği gibi solar kaynağı azaltır. Bu durumun güneşten direkt gelen radyasyon üzerinde toplam (Global=Direkt+Difüz) solar radyasyona göre daha büyük etkisi vardır. Direkt

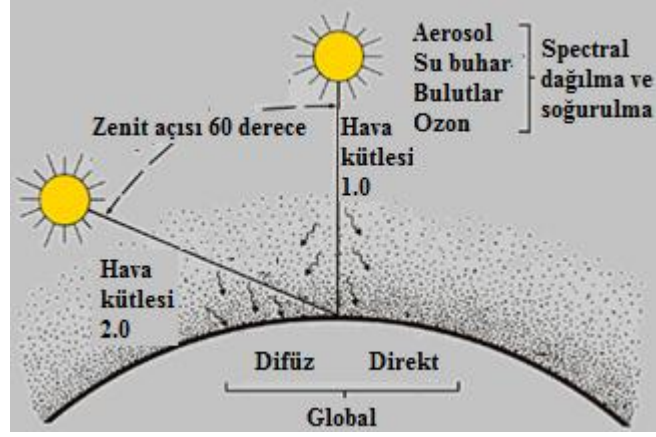
demetindeki radyasyonun bir kısmı yere doğru saçılır ve difüz radyasyon olarak adlandırılır. Ciddi kirliliğin mevcut olduğu bir günde, global solar radyasyon %15'den %25'e kadar azalırken direkt radyasyon %40 azalabilir. Büyük bir volkanik patlama dünyanın geniş bir parçası üzerinde 6 aydan 2 yıla kadar bir zamanda direkt radyasyonu %20 ve global solar radyasyonu yaklaşık %10 azaltabilir. Volkanik küller atmosferin dışına atıldıkça bu etki azalır. Ancak küllerin tamamen ortadan kalkması birkaç yıl alabilir [17].



Şekil 3.3. Açık havada yere gelen güneş ışığının soğurulması ve dağılımı [19].

3.2.1. Mevsimsel ve Atmosferik Değişiklikleri Anlamak

Ufuk üzerinde güneşin yükselim (elevasyon) açısı veya tersi olan normalden güneş açısı olan zenit, hava kütlesi olarak isimlendirilen değeri (air mass) belirler. Güneş gökyüzünde alçak pozisyonda iken hava kütlesi değerleri daha yüksektir. Örneğin, Şekil 3.4'te gösterildiği gibi güneş tam tepede iken hava kütlesi değeri 1 ve zenit açısı 0°'dir. Bu açı 60° olduğunda hava kütlesi değeri 2'dir. Belirli bir zamandaki hava kütlesi değeri enleme, gün içindeki saate ve yıl içindeki güne bağlıdır [17].



Şekil 3.4. Zenit açısı ve hava kütlesinin değişimi [17].

Solar radyasyonun geçtiği atmosfer oldukça değişkendir. Önemli değişkenler atmosferik bulanıklık (toz gibi aerosollerden kaynaklanan sislilik), su buharı ve bulutlardır. Dolayısıyla atmosferin solar radyasyon üzerinde tam olarak etkisi basitçe solar radyasyonu soğuran ve dağıtan dinamik bir filtre gibi davranmasıdır. Böylece atmosfer solar radyasyonda, çalışır haldeki solar enerji dönüşüm sistemleri üzerindeki etkileri bakımından tanımlanması veya karakterize edilmesi gereken coğrafik, geçici (saatlik, günlük) ve spektral (dalga boyu) değişiklikler oluşturur [17].

Hava kütlesi değeri direkt güneş radyasyonunun yeryüzüne ulaşırken atmosferde aldığı yol veya karşılaştığı hava kütlesi miktarının göreceli bir ifadesidir. Hava kütlesi değeri zenit açısının fonksiyonu olarak Denklem 3.1 ile hesaplanır [20].

$$m = 1,0 / \left[\cos(z) + 0,50572 * (96,07995 - z)^{-1,6364} \right] \quad (3.1)$$

Burada m : Hava kütlesi

z : Zenit açısı

3.3. SOLAR RADYASYONUN YERYÜZÜNE ULAŞAN PARÇALARI

Bir toplayıcıya (veya alıcıya) düşen toplam veya global solar radyasyon iki bileşkeye sahiptir; direkt radyasyon ve difüz radyasyon.

Adından da anlaşılacağı üzere direkt radyasyon güneşten düz bir hatta gelir. Açık gökyüzünün olduğu güneşli günler için solar radyasyonun çoğu direkt radyasyondur. Kapalı günlerde, güneş bulutlarla engellenir ve direkt radyasyon sıfırdır. Difüz radyasyon direkt radyasyonun moleküller, aerosoller ve bulutlar tarafından dağılması ile oluşur. Toplam solar radyasyonun difüz olan kısmı açık havalar için %10'dan %20'ye kadar değişirken bulutlu havalar için %100'e kadar çıkar [17].

$$\text{Toplam (global) radyasyon} = \text{Direkt radyasyon} + \text{Difüz radyasyon} \quad (3.2)$$

Bir yüzeye ulaşan direkt, difüz ve yerden yansıyan radyasyonların toplamı global veya toplam solar radyasyon olarak adlandırılır ve Denklem 3.2 ile ifade edilir.

3.4. SOLAR RADYASYONUN ÖLÇÜMÜ YAPILAN BİLEŞENLERİ

Bütün bir solar radyasyon izleme istasyonu şu üç büyüklüğü ölçmek üzere enstrümanlara sahiptir:

- Yatay bir yüzeydeki toplam veya global radyasyon
- Yatay bir yüzeydeki difüz radyasyon
- Direkt radyasyon

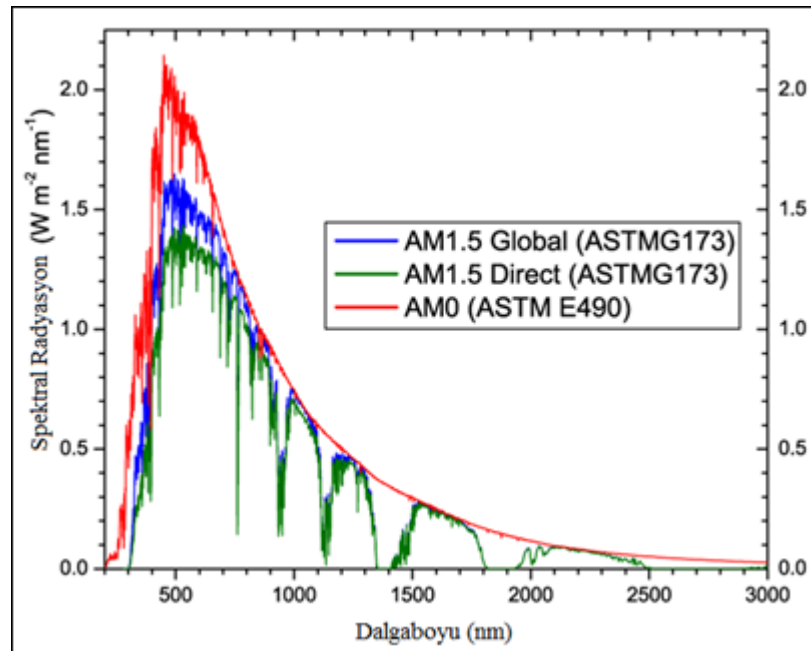
Bu üç büyüklüğü ölçmek solar kaynağı anlamak ve verileri değerlendirmek için genelde yeterli bilgiyi sağlar. Bu büyüklüklerden herhangi ikisini ölçmek suretiyle, bu ölçümlerden üçüncü değer kabul edilebilir doğrulukla hesaplanabilir. Pek çok izleme istasyonu eğimli ve takip edici yüzeyler üzerindeki solar radyasyonu ve ortam sıcaklığı, bağıl nem ve rüzgar hızı-yönü gibi meteorolojik parametreleri ölçmek için ekipmanlara sahiptir.[17]

Tarihsel olarak çoğu istasyon sadece yatay bir yüzeydeki toplam radyasyonu ölçmüştür. Bu hem difüz hem de direkt solar radyasyonu hesaplamayı gerektirir. Bu durumda elde edilen değerler bu değerlerin ölçülme durumuna göre daha az doğrudur. Herhangi bir solar radyasyon ölçümünün eksikliğinde, solar radyasyonu tahmin etmek için bulutluluk ve güneşlenme süresi gibi meteorolojik verilerden

yararlanan modeller kullanılır. Çok daha az doğruluğa sahip olmasına rağmen solar radyasyonun ölçülmediği yerler için bu çoğunlukla tek seçenektir.

Bulutluluk verisi eğitilmiş bir meteorolojist tarafından yapılan gözlemlerle bulut örtüsünü 10 üzerinden değerlendirmek suretiyle tahmin edilmesiyle elde edilir. Güneşlenme süresi ise güneş bulutlar tarafından engellenmediği gün süresini ölçen bir enstrümanla ölçülür. Dünya Meteoroloji Organizasyonu'na göre, verilen bir periyot için güneşlenme süresi toplam (global) radyasyonun 120 W/m^2 'yi geçen alt periyotlarının toplamı olarak ifade edilir [21].

Solar radyasyonun ölçülen bir diğer niceliği ise yeryüzüne düşen solar radyasyonun spektral yoğunluğudur. Atmosferden kaynaklanan soğurma ve saçılmadan dolayı, solar radyasyonun atmosfer dışındaki spektral dağılımı Şekil 3.5'deki gibi yeryüzündekine göre önemli ölçüde değiştiğinden spektral verilerde ölçülür. Aynı zamanda yeryüzündeki spektral dağılımda gün ve yıl boyunca bölge, iklim ve atmosferik koşullardan etkilenir. Sonuç olarak morötesi, görünür ve yakın kızılötesinde mevcut olan enerji yüzdeleri de bölge, gün ve yıl içindeki zamanla değişir.



Şekil 3.5. Farklı hava kütlesi değerleri için standart spektrumlar [19].

Belirli teknolojiler için, solar radyasyonun spektral veya dalgaboyu dağılımı da bilinmelidir. Örnek olarak fotovoltaik cihazlar öncelikli olarak spektrumun görünür ve yakın kızılötesindeki dalgaboylarına cevap verirken, solar detoksifikasyon morötesi bölgesindeki enerjiyi kullanır. Bölge, iklim ve atmosferik koşullar solar radyasyonun spektral dağılımını etkiler.

3.5. SOLAR RADYASYON VERİLERİ

Solar radyasyon verileri belirli bir süre boyunca dünyada bir bölgedeki yüzeye ne kadar güneş enerjisinin düştüğü ile ilgili bilgi sağlar. Veriler birim alandaki enerji değerini verir. Günler, aylar ve yıllar dizisi üzerinde solar radyasyon miktarında doğal olarak oluşan değişimleri göstermek sureti ile bu veriler bir bölge için solar radyasyon potansiyelini belirler. Ölçümler radyasyon yoğunluğu olarak birim alandaki güç değeri W/m^2 cinsinden verilir. Enerji yoğunluğu olarak da ölçümlerin birimleri metrekareye düşen kilowatt-saat (kWh/m^2) veya megajoule (MJ/m^2) olarak ifade edilir [17].

3.6. SOLAR RADYASYONU KULLANAN TEKNOLOJİLER

Dünya radyasyon formunda güneşten çok büyük miktarda enerji alır. Çeşitli solar enerji teknolojileri güneş enerjisini toplamak için geliştirilmektedir. Bunlar solar elektrik (fotovoltaik: güneş ışığını doğrudan elektriğe çevirme), solar ısı (termal: endüstriyel ve evsel kullanım için su ısıtma), solar termal elektrik (elektrik üreten türbinleri çalıştıracak buhar üretme), solar yakıt teknolojileri (bitkiler, ekinler, ağaçlar gibi biyokütleyi yakıt ve ürünlerine dönüştürme), pasif solar (binaları aydınlatmak ve ısıtmak için), solar detoksifikasyon (konsantre edilmiş güneş ışığı ile zararlı atıkları yok etme) olarak sıralanabilir [17].

Bu teknolojilerden güneş ışığını doğrudan elektriğe çeviren fotovoltaik teknolojisi üçüncü nesil güneş pillerini geliştirmektedir. Üçüncü nesil fotovoltaik teknolojilerden biride boya duyarlılıklı güneş (Dye-sensitized solar cell) pilleridir. Bunların verimleri silikon temelli güneş pillerinin seviyesine (%13-15) henüz çıkarılamamasına rağmen maliyetlerinin düşük olması bu teknolojinin geleceğinin

parlak olduğunu göstermektedir. Bu güneş pillerinin öne çıkan bir özelliği ise güneş spektrumunun düşük dalgaboylu morötesi ve mavi bölgelerine duyarlı olmasıdır. Boya duyarlılıklı güneş pillerinin yeni versiyonları ise kırmızı ve kızılötesi ışığa kadar duyarlı genişletilmiş bir spektrum cevabına sahiptirler [22].

3.7. SOLAR RADYASYON VERİLERİNE İHTİYAÇ DUYULMASI

Solar kaynağı daha doğru bilmek, sistemleri daha iyi optimize etmeyi sağlar. Bu yüzden doğruluğu yüksek solar radyasyon verileri solar sistem dizaynında önemli bir faktördür [17].

Bu teknolojilerin ekonomisi; ekipman ve işletme giderlerine, istenilen enerji ürününe dönüştürülebilen solar radyasyonun yüzdesine ve mevcut solar radyasyon miktarına bağlıdır. Bu teknolojilerin kullanıcıları yüksek kaliteli solar radyasyon verilerine ihtiyaç duyar. Bir bölge için asıl solar radyasyon mevcut verilerle belirtilenden daha az ise sistem için performans ve ekonomik hedefler karşılanmayacaktır. Diğer taraftan bir bölgedeki solar radyasyon verilerle belirtilenden daha yüksek ise performans ve ekonomik öngörüler çok aşırı olabilir ve uygun bir teknolojinin kullanılmasını engelleyebilir [17].

Enerji tüketimini minimize etmek için, ısıtma ve iklimlendirme (havalandırma) mühendisleri bina konfigürasyonlarını, yönlendirmelerini ve havalandırma sistemlerini seçmek için solar radyasyon verilerini de kullanır. Enerji giderleri bina sahipleri için kayda değer bir pahalılıkta olduğundan, enerji verimlilikli bir dizayn bir binanın yaşam çevrim maliyetini anlamlı biçimde azaltabilir [17].

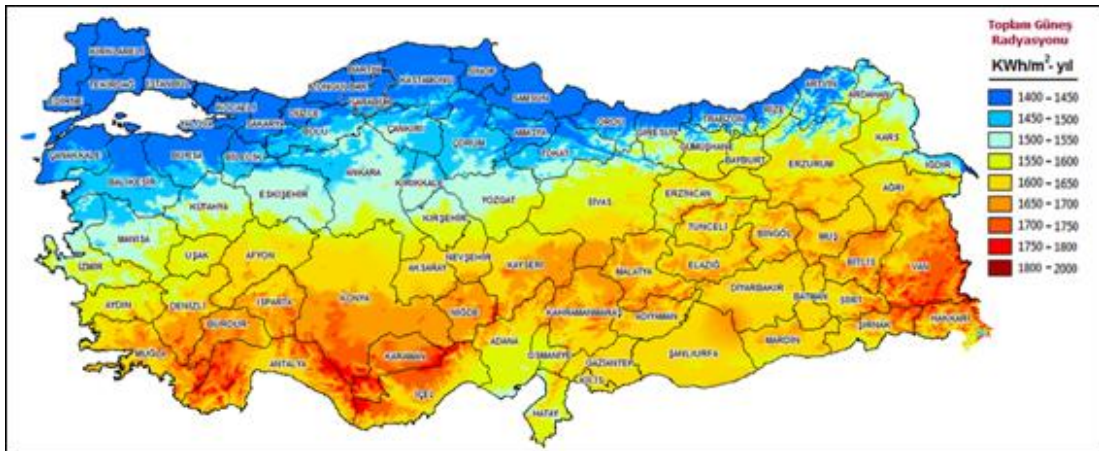
Yere ulaşan solar radyasyon miktarı hava düzeni ve güneşin pozisyonunun değişiminden dolayı gün ve yıl boyunca değişir ve solar radyasyon verileri bu değişkenliği yansıtır. Değişkenliğin bilinmesi suretiyle depolama sistemleri boyutlandırılabilir ve dolayısıyla gece ve bulutlu periyotlar boyunca enerji sağlayabilirler. Enerji depolamasız teknolojiler için yük tarafından gereksinim duyulan bir enerji profili ile gün boyunca mevcut solar radyasyon profilini kıyaslamak sureti ile uygun yük hesaplanabilir. Solar radyasyon verileri aynı

zamanda solar enerji teknolojileri için en iyi coğrafik bölgeleri belirlemede de yardımcı olur. Diğer faktörlerin benzer olarak, daha fazla solar radyasyon alan bir bölge için daha ekonomik bir sonuç alınacaktır [17].

3.8. SOLAR ENERJİ POTANSİYELİ AÇISINDAN TÜRKİYE VE KARABÜK'ÜN DURUMU

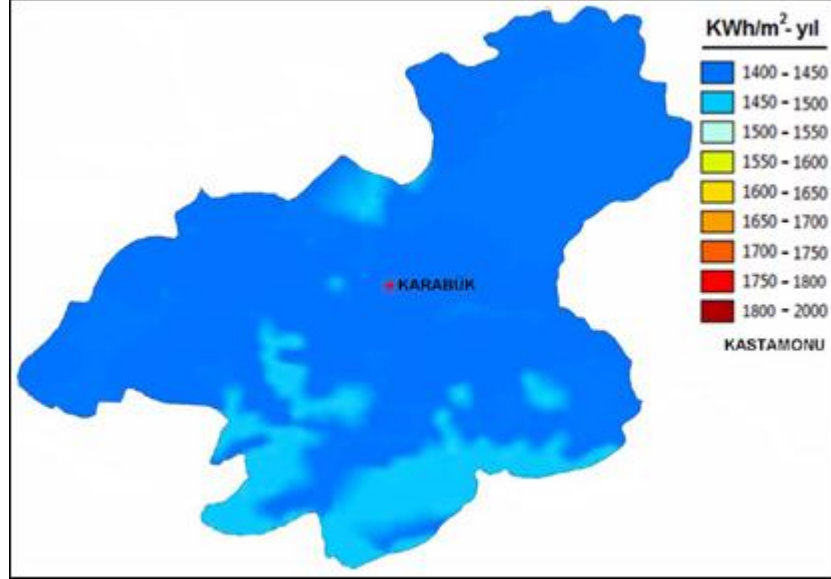
1985 ile 2006 yılları arasında EİE ve DMİ tarafından gerçekleştirilmiş ölçüm çalışmaları ile parametreleri kalibre edilen “ESRI Solar Radiation Model” kullanılarak Şekil 3.6'daki Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası oluşturulmuştur.

Coğrafi konumu nedeniyle sahip olduğu güneş enerjisi potansiyeli yüksek olan Türkiye'nin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2640 saat (günlük toplam 7,2 saat), ortalama toplam ışınım şiddeti 1311 kWh/m²-yıl (günlük toplam 3,6 kWh/m²) olduğu tespit edilmiştir. Güneş Enerjisi potansiyeli; tesis alanı olarak kullanılabilir alan oranının %25 ve elektrik enerjisi dönüşüm veriminide %20 kabul ederek 380 milyar kWh/yıl olarak hesaplanmıştır [3, 23]. Bu potansiyel Türkiye'nin mevcut elektrik üretiminin iki katıdır. Bu potansiyel yerleşim bölgeleri, orman ve tarım arazileri, sulak alanlar, 3 dereceden büyük eğimli yerler, özel ve çevre koruma alanları, karayolları, demiryolları, limanlar çıkarılarak hesaplanmıştır. Ayrıca atlasın yüzde 10 hata payı ile hazırlandığı belirtilmektedir [3].



Şekil 3.6. Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli atlası [24].

Karabük'ün ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2407 saat (günlük toplam 6,6 saat), ortalama toplam ışınım şiddeti 1372 kWh/m²-yıl (günlük toplam 3,7 kWh/m²) olduğu tespit edilmiştir [4]. Karabük'e ait güneş enerjisi potansiyeli atlası Şekil 3.7'de verilmiştir.

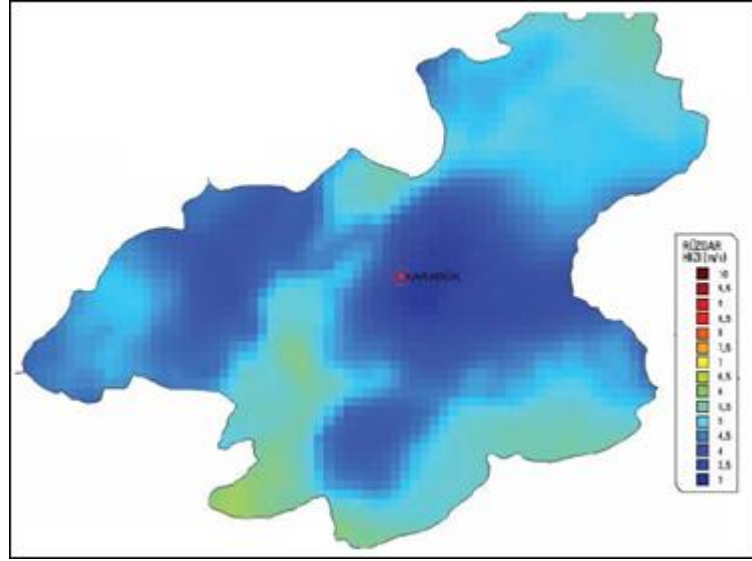


Şekil 3.7. Karabük'ün güneş enerjisi potansiyeli atlası [4].

Bu veriler EİE (8 adet) ve DMİ istasyonlarında 1985-2006 yılları arası 22 yıllık yapılan ölçümler ile parametreleri kalibre edilen ESRI Solar Radiation Model kullanılarak çıkarılmıştır. Bu son çalışma ile daha önce yapılan ve 1966-1982 verilerine dayanılarak çıkarılan potansiyele göre güneş enerjisi potansiyelinin %20-25 fazla çıktığı belirtilmiştir. Ayrıca atlasın %10 hata payı içerdiği belirtilmektedir [3, 24, 25]. Atlastaki bazı illere ait verilerin ise tamamen model tahminine dayandığı bilinmektedir. Bu illerden biride Karabük'tür. Karabük için DMİ ve EİE'nin yaptığı güneş enerjisi ölçümü bulunmamaktadır. NREL'in belirttiklerine göre en iyi uygulama ile bile saha ölçümlerindeki hata %±5'dir [26]. Bu durumda Karabük gibi kendisine has coğrafi ve endüstriyel şartlara sahip bir il için kendisini temsil eden hiçbir veri bulunmadan model vasıtasıyla elde edilen verilerin hata payının daha fazla olacağı aşikardır.

Türkiye'de rüzgar enerjisi yatırımları genellikle Ege ve Akdeniz kıyılarında bulunan bölgelerde yapılmıştır. Türkiye için rüzgar enerjisi potansiyelini belirten rüzgar

atlasına EİE'nin internet sitesinden ulaşılabilir. Yine EİE'nin verdiği bilgilere göre ekonomik rüzgar enerji santrali için 7 m/s veya üzerinde rüzgar hızı gerekmektedir. EİE tarafından Şekil 3.8'de verilen Karabük rüzgar potansiyeli atlasına göre Karabük'te 7 m/s rüzgar potansiyeline sahip bir bölge bulunmamaktadır [27]. Bu durumda rüzgar potansiyeli az olduğundan ileride yapılabilecek güneş enerjisi projelerinde fizibilite çalışmalarına ön ayak olabilmesi için yerinde ölçümler yapılmalıdır.



Şekil 3.8. Karabük 50 m rüzgar enerjisi potansiyeli atlası [27].

BÖLÜM 4

RADYOMETRE TASARIMI

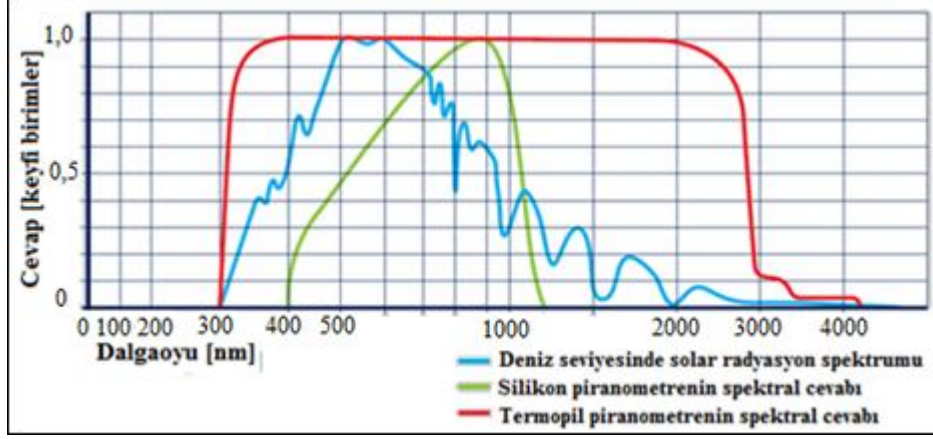
Radyometri; radyasyon enerjisinin ayrıık dalgaboyları veya geniş bir dalgaboyu bandı üzerinde ölçülmesi ve radyasyonun soğurma, yansıtma ve emisyon yolları ile maddelerle etkileşimini ölçme ve belirlemedir [28]. Güneş enerjisi ölçümleri, genel isimlendirme ile, radyometre denilen cihazlar ile gerçekleştirilmektedir. Global radyasyon piranometre ile, direkt normal radyasyon pirheliometre ile ve spektral dağılım spektrometre adı verilen cihazlar ile ölçülür. Bu bölümde tez kapsamında tasarlanan ve oluşturulan radyometre; ölçüm prensibi, elemanların seçimi, elektronik donanım, gömülü yazılım ve mekanik donanım başlıkları altında anlatılacaktır.

4.1. GÜNEŞ RADYASYON YOĞUNLUĞU ÖLÇME PRENSİBİ

Radyometre cihazlarının ölçüm prensipleri genellikle şu iki temele dayanır. Bunlardan birincisi termopil dedektörlerdir. Bu dedektörler iki metal + ısı = elektrik akımı prensibine dayanır. İki ayrı birleşim noktasından birbirine bağılı iki farklı metalden oluşan bu dedektörler sıcaklık farkı ile bir elektromotor kuvvetinin (emk) oluşmasına yol açar. Bu elektromotor kuvvet kapalı devrede bir akım akmasına sebep olur. Bu dedektörler birinci sınıf standartlarda olup pahalıdır. Bununla birlikte Şekil 4.1'de gösterildiğı gibi düz bir spektral cevaba sahip olup geniş bir spektral aralıktaki güneş ışığına eşit duyarlılıktadırlar. Ancak tepki süreleri yavaştır [26].

Radyometre cihazlarında kullanılan ikinci tip dedektör ise fotodiyotlardır. Fotodiyotlar, barındırdıkları pn yarıiletken malzemesine fotonlar çarptığında yani ışığa maruz bırakıldıklarında oluşan serbest elektronların ve bu elektronların ayrıldıkları yerde ortaya çıkan boşlukların pn eklemesinde bulunan elektriksel alan etkisi ile eklemnin karşı taraflarına hareket etmesiyle elektrik akımının oluşması

prensibine dayanır. Fotodiyotlar spektral olarak seçici olup ışık spektrumunun belirli bir aralığı için Şekil 4.1'deki gibi düz olmayan bir spektral cevaba sahiptirler. Bu spektral cevabı fotodiyotun yapımında kullanılan malzemeler ve yarıiletkenlerin kalınlıkları gibi bazı özel parametreler belirler.



Şekil 4.1. Farklı dedektörlerin standart spektruma karşı spektral cevapları [29].

Fotodiyotların ürettikleri akımlar üzerlerine düşen ışığa veya radyasyon gücüne orantılıdır [30]. Dolayısıyla çıkış değerlerini dedektörlerin duyarlılıklarına oranlamak sureti ile üzerlerine düşen güneş şiddeti (W/m^2) değerleri elde edilir.

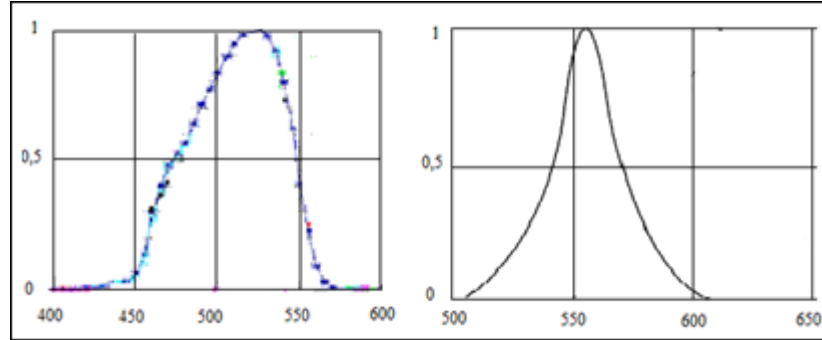
4.2. RADYOMETRE TASARIMI

Detayları bu başlıkta verilecek olan radyometre, yerel ölçümlerde kullanılmak üzere ergonomik, maliyeti düşük, taşınabilir ve ölçüm değerlerini sayısal bir ekran vasıtasıyla harici bir ekipmana ihtiyaç duymaksızın anında verebilecek şekilde tasarlanmıştır. Bu radyometre ile tüm dalgaboyundaki direkt radyasyonu (200-2500 nm), direkt radyasyondaki morötesi radyasyonu (280-400 nm), görünür bölge radyasyonunu (400-700 nm), yakın kızılötesi radyasyonu (700-1100nm), görünür bölgedeki temel renkler olan kırmızı (620-700 nm), yeşil (500-578 nm) ve mavi (446-500 nm) dalgaboylarındaki radyasyonu ve yatay bir yüzeydeki global radyasyonu (200-2500 nm) olmak üzere 8 farklı ölçüm yapmak mümkündür.

4.2.1. Dedektörlerin Seçimi

Termopil dedektörler spektral cevapları bakımından fotodiyotlara karşı avantajı olmakla beraber oldukça pahalıdır. Bu durum kullanılacak dedektör olarak fotodiyotları ve LED'leri ön plana çıkarır.

Radyometrede kullanılacak dedektörler ölçümü yapılmak istenen bölgelere duyarlı olan fotodiyotlar ve LED'lerden seçilmiştir. Fotodiyotların genel amaç olarak zaten ışığı dedekte etmek için üretildiği bilinmektedir. Ancak LED'lerin üretim amacı ışık yaymaktır. Bununla beraber LED'in spektral yayılım bandına –tipik olarak bu değerler maksimumun yarısında 25-35nm- benzer bir spektral bant geçirgenliği ile ışık dedektörü olarak fonksiyon görebileceği belirtilmektedir [10, 12]. LED'lerin cevap spektrumu daima yayılım spektrumundan (üretici bu bilgiyi katalogda verir) dalgaboyu olarak daha geridedir ve şekil olarak tam uyuşmaz [12, 31]. LED'lerin cevap spektrumu ile yayılım spektrumu arasındaki bağıntı birinden diğerini tahmin etmeye yetecek şekilde anlaşılamamıştır [32]. Bununla beraber tepe cevap spektrumu Şekil 4.2'deki gibi tepe yayılım spektrumundan dalgaboyu cinsinden daha geridedir.



Şekil 4.2. HLMP-D600 Yeşil LED için spektral cevap (solda) ve spektral yayılım (sağda) bantları [32].

LED'ler optik olarak kararlı cihazlardır [31]. LED'lerin fotodiyotlara nazaran düşük maliyet, küçük boyut ve dış koşullardaki uygulamalar için dayanıklılık gibi teknik bazı avantajları vardır. LED'ler dalgaboyu seçiciliği için filtre gibi aksesuarlara ihtiyaç duymaz. Optik bir kaynağın yerine LED'in dalgaboyu seçici optik dedektör olarak kullanılması henüz çok popüler olmasada yenilikçi bir ters mühendisliktir [12].

4.2.1.1. Seçilen Fotodiyotlar

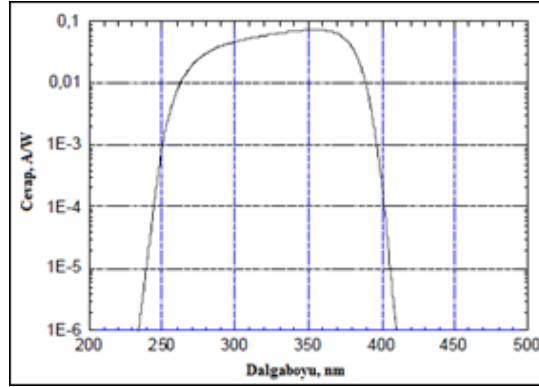
Tüm spektrumdaki direkt radyasyonu ve temel spektral bölgeler olan morötesi, görünür ve kızılötesinde bulunan direkt radyasyon ile yatay yüzeydeki toplam radyasyonu ölçmek üzere kullanılacak olan dedektörler fotodiyotlardan seçilmiştir.

Morötesi bölge fotodiyot

Bu fotodiyot morötesi bölgesinde yüksek spektral duyarlılığa sahip olup morötesi radyasyon ölçümlerine uygundur. Bu fotodiyotun spektral özellikleri Çizelge 4.1’de ve spektral cevabı Şekil 4.3’te yer almaktadır.

Çizelge 4.1. Morötesi fotodiyot optik özellikleri [33].

Marka/Model	λ_p (nm)	$\lambda_{0,01}$ (nm)	$\Delta\lambda_{0,5}$ (nm)	$\lambda_{0,5}$ (nm)
EPIGAP/EPD-365-0/1.4	365	245-400	85	294-379



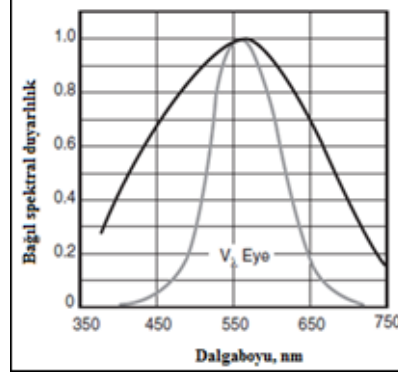
Şekil 4.3. Morötesi fotodiyot spektral cevap [33].

Görünür bölge fotodiyot

Bu fotodiyot yüksek spektral duyarlılığa sahip olup geniş bir radyasyon şiddeti aralığında doğrusal davranış gösterir. Renk düzeltme filtresi ile yapılmış fotodiyotun spektral cevabı gözün spektral cevabına oldukça yakın olup sadece görünür bölgeye duyarlıdır. Bu fotodiyotun spektral özellikleri Çizelge 4.2’de ve spektral cevabı Şekil 4.4’te yer almaktadır.

Çizelge 4.2. Görünür bölge fotodiyot optik özellikleri [33].

Marka/Model	λ_p (nm)	$\lambda_{0,3}$ (nm)	$\Delta\lambda_{0,5}$ (nm)	$\lambda_{0,5}$ (nm)
VISHAY/BPW21R	565	385-725	255	420-675



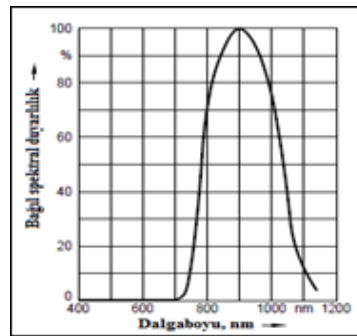
Şekil 4.4. Görünür bölge fotodiyot bağıl spektral duyarlılık [33].

Kızılötesi bölge fotodiyot

Bu fotodiyot özel plastik kaplamasıyla kızılötesi bölgeye duyarlıdır. Düz tepe yapısına sahip olması fotodiyotun çıkışının sıcaklıktan etkilenmesini azaltır. Bu fotodiyotun spektral özellikleri Çizelge 4.3'te ve spektral cevabı Şekil 4.5'te yer almaktadır.

Çizelge 4.3. Kızılötesi bölge fotodiyot optik özellikleri [33].

Marka/Model	λ_p (nm)	$\lambda_{0,1}$ (nm)	$\Delta\lambda_{0,5}$ (nm)	$\lambda_{0,5}$ (nm)
OSRAM/SFH203PFA	900	750-1100	270	770-1040



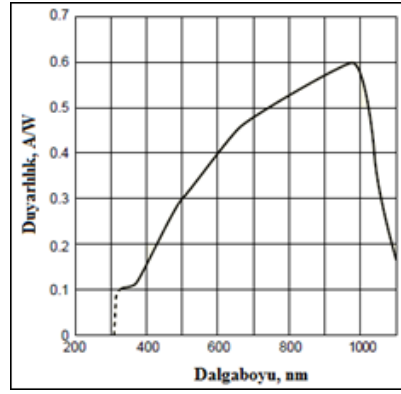
Şekil 4.5. Kızılötesi bölge fotodiyot bağıl spektral duyarlılık [33].

Tüm spektral bölge (200-2500 nm) ölçümü için fotodiyot

Bu fotodiyot görünür bölgeden yakın kızılötesine kadar yüksek duyarlıklı spektral bir cevaba sahiptir. Optik ölçümlerine uygun ve silikon tabanlı bir fotodiyottur. Bu fotodiyotun spektral özellikleri Çizelge 4.4'te ve spektral cevabı Şekil 4.6'da yer almaktadır.

Çizelge 4.4. Tüm spektral bölge fotodiyot optik özellikleri [33].

Marka/Model	λ_p (nm)	$\lambda_{Min-Mak}$ (nm)	$\Delta\lambda_{0,5}$ (nm)	$\lambda_{0,5}$ (nm)
HAMAMATSU/S1223	960	320-1100	560	500-1060



Şekil 4.6. Tüm spektral bölge fotodiyot spektral duyarlılık [33].

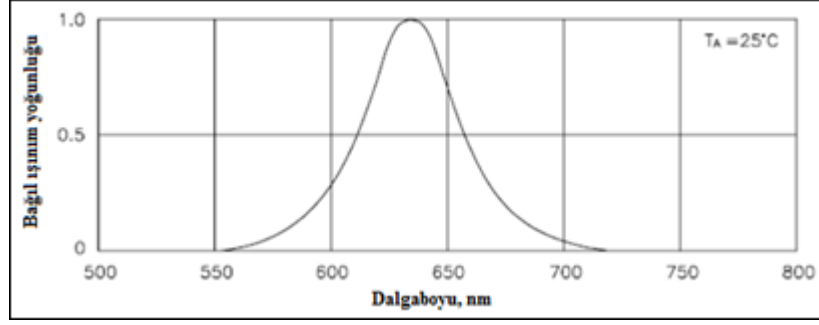
4.2.1.2. Seçilen LED'ler

Kırmızı LED

Spektrumun görünür bölgesinde bulunan kırmızı dalga boyu aralığını (620-700 nm) ölçmek için kırmızı LED kullanılabilir. Kırmızı bölgenin ölçümü için yüksek verimlilikli LED tercih edilmiştir. Bu LED'in yayılım bandına ilişkin optik özellikleri Çizelge 4.5'te ve spektral cevabı Şekil 4.7'de yer almaktadır.

Çizelge 4.5. Kırmızı LED optik özellikleri [33].

Marka/Model	λ_p (nm)	$\lambda_{Min-Mak}$ (nm)	$\Delta\lambda_{0,5}$ (nm)	$\lambda_{0,5}$ (nm)
KINGBRIGHT/L-483IDT	627	555-720	45	615-660



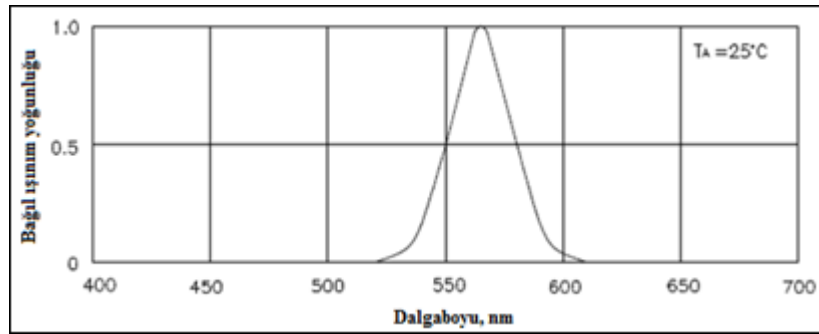
Şekil 4.7. Kırmızı LED yayılım spektrumu [33].

Yeşil LED

Spektrumun görünür bölgesinde bulunan yeşil dalga boyu aralığını (500-578 nm) ölçmek için yeşil LED kullanılabilir. Bu LED'in yayılım bandına ilişkin optik özellikleri Çizelge 4.6'da ve spektral cevabı Şekil 4.8'de yer almaktadır.

Çizelge 4.6. Yeşil LED optik özellikleri [33].

Marka/Model	$\lambda_p(\text{nm})$	$\lambda_{\text{Min-Mak}}(\text{nm})$	$\Delta\lambda_{0,5}(\text{nm})$	$\lambda_{0,5}(\text{nm})$
KINGBRIGHT/L-483GDT	565	525-610	30	550-580



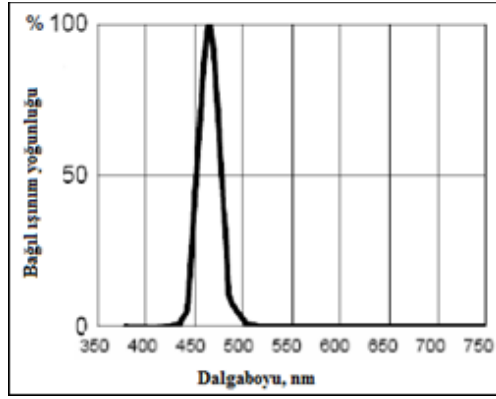
Şekil 4.8. Yeşil LED yayılım spektrumu [33].

Mavi LED

Spektrumun görünür bölgesinde bulunan mavi dalga boyu aralığını (446-500 nm) ölçmek için mavi LED kullanılabilir. Bu LED'in yayılım bandına ilişkin optik özellikleri Çizelge 4.7'de ve spektral cevabı Şekil 4.9'da yer almaktadır.

Çizelge 4.7. Mavi LED optik özellikleri [33].

Marka/Model	λ_p (nm)	$\lambda_{Min-Mak}$ (nm)	$\Delta\lambda_{0,5}$ (nm)	$\lambda_{0,5}$ (nm)
OPTEK/OVLLB8C7	466	430-505	25	450-475



Şekil 4.9. Mavi LED yayılım spektrumu [33].

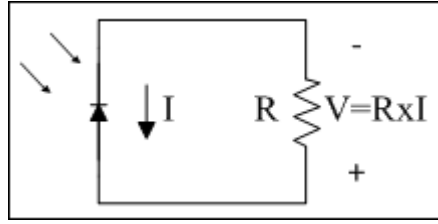
4.2.2. Dedektörlere Sıcaklık Etkisi

Ortam sıcaklığının değişimi, duyarlılığı ve karanlık akımı ciddi biçimde etkilemez. Sen ve Chaundri (2009), yaptıkları çalışmada bir deney düzeneği ile LED'in bulunduğu ortam sıcaklığını doğal değişimleri simüle etmek için 10 °C'den 50 °C'ye kadar artırmışlar ve fotoakımda fark edilebilir bir değişim gözlemlenemediklerini belirtmişlerdir [12]. Aynı şekilde Mims yaptığı çalışmada gerçekleştirdiği güneş fotometre cihazını 10 °C'den 34 °C'ye kadar ısıtmış ve kabul edilebilir düzeyde düşük sıcaklık katsayısına sahip olduğunu belirtmiştir [11]. Seçilen LED ve fotodiyotlar için bu küçük etkiden daha da uzaklaşabilmek için tepesi düz olan dedektörler tercih edilmiştir. Çünkü mantar başlıklar böyle dedektörlerde güneş ışığını dedektöre daha fazla yoğunlaştıracak ve böylece dedektörün daha çabuk ısınmasına yol açacaktır [32].

4.2.3. Transempedans (Akımdan Gerilime) Kuvvetlendirici

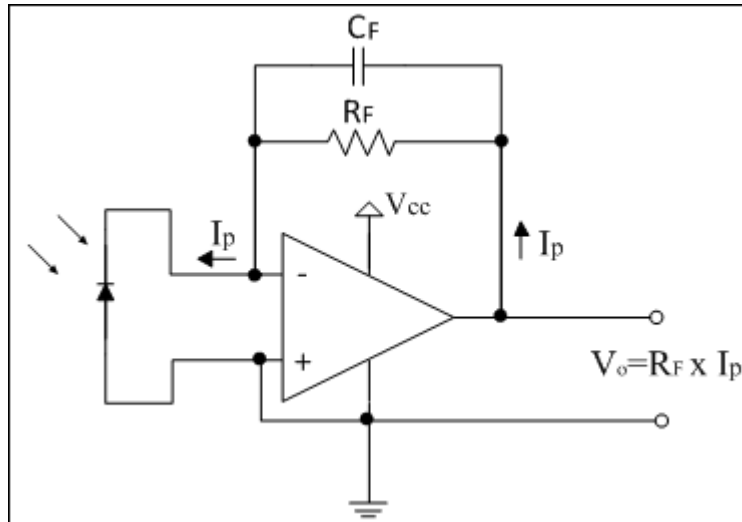
Fotodiyotlar ve LED'ler ışığa maruz kaldıklarında ışık yoğunluğunun artmasıyla beraber katottan anoda doğru akan doğrusal bir fotoakım üreticidirler. Kullanılan ölçme devresi sadece gerilim ölçebildiğinden bu fotoakım kendisiyle doğrusal

orantıya sahip olan bir gerilime çevrilmelidir. Bu iş fotodiyota paralel bağlanan bir dirençle Şekil 4.10'daki devreyle yapılabilir. Ancak bu devrede üretilen gerilimin dedektör üzerine düşen ışık yoğunluğunun logaritmik bir fonksiyonu olması ve fotodiyot ve LED'lerin eşdeğer devrelerinde bulunan şönt direncin değerinin logaritmik olarak değişmesi gibi dezavantajları nedeniyle tercih edilemeyeceği ortaya çıkar [34].



Şekil 4.10. Foto-akımı şönt dirençle gerilime çevirme.

Düşen ışık yoğunluğu ile doğrusal değişen fotoakımı amaca uygun şekilde değerlendirmenin bir yolu bu fotoakımı işlemsel bir kuvvetlendiricinin sanal toprağına Şekil 4.11'de olduğu gibi bağlamaktır. Transimpedans kuvvetlendirici olarak adlandırılan bu devre doğrusal bir cevaba sahip ve kaçak akımın neredeyse tamamen elimine edilmesinden dolayı düşük gürültü verir [34].



Şekil 4.11. Transimpedans kuvvetlendirici [30, 34, 35].

4.2.3.1. İşlemsel Kuvvetlendiricinin Seçimi

Tek besleme kaynağına ihtiyaç duyması, geniş besleme aralığı (4,75-16V), düşük kayma gerilimi, düşük gürültü, harici elemanlara ihtiyaç duymama ve çift kanallı özelliklere sahip olan yüksek doğruluklu LTC1051CN8 işlemsel kuvvetlendirici seçilmiştir.

4.2.3.2. Geri Besleme Direnci (R_F) ve Kapasite (C_F)'nin Seçimi

Devredeki doğru akım kazancını belirleyen R_F geri besleme direnci olup kuvvetlendirici çıkışı $V_o = I_P * R_F$ olmaktadır. R_F direncinin değeri; maksimum radyasyonda oluşacak kuvvetlendirici çıkışı gerilimi, ölçme devresinin analog sayısal çevirici girişinin izin verdiği sınırdaki (+5VDC) olacak şekilde belirlenir. Her bir dedektör için belirlenen geri besleme direnci değeri 5. bölümde belirtilmiştir. Devrenin kazanç ve bant genişliği doğrudan R_F direnci tarafından belirlenir.

Kuvvetlendirici devresinin stabilizesini artırmak için geri besleme direnci R_F 'ye paralel bir kapasite (C_F) bağlanmıştır. Geri besleme kapasitansı frekans cevabını sınırlandıracak ve kazancın tavan yapma durumunu önleyecektir. C_F kapasitansının bu fonksiyonu yerine getirebilmesi için değeri Denklem 4.1'deki eşitliği sağlayacak şekilde seçilmelidir [30].

$$\sqrt{\frac{GBP}{2\pi R_F (C_J + C_F + C_A)}} > \frac{1}{2\pi R_F C_F} \quad (4.1)$$

Burada GBP : İşlemsel kuvvetlendiricinin Kazanç Bant genişliği çarpımı

C_A : İşlemsel kuvvetlendiricinin giriş kapasitansı

C_J : Dedektörlerin eklem kapasitansı

C_F : Geri besleme kapasitansı

R_F : Geri besleme direnci

Tüm spektrumdaki global radyasyonu ölçen fotodiyot için $C_J = 70$ pF, $R_F = 1,49$ k Ω ve devredeki işlemsel kuvvetlendirici için GBP=2,5 MHz ve $C_A=12$ pF'tır. $C_F = 220$

pF olarak seçildiğinde Denklem 4.1'deki kıstası sağladığı görülmüştür. Tüm fotodiyot ve LED'ler için Denklem 4.1'deki seçim kriterini sağlayacak şekilde $C_F = 220$ pF'lık kondansatörün uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

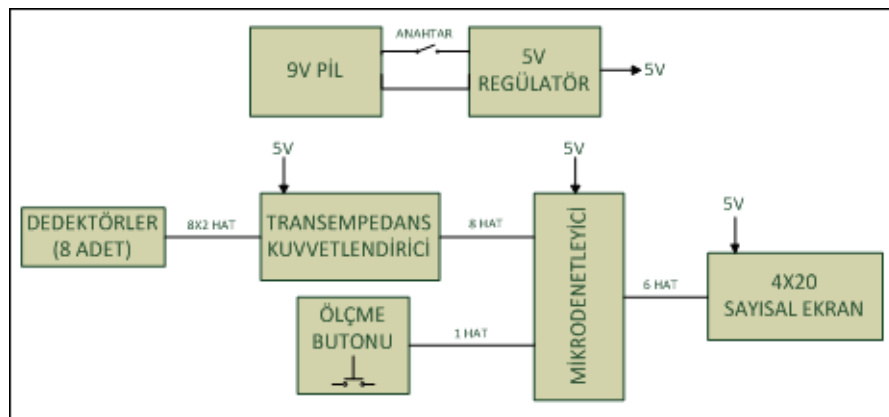
4.2.4. Yükseltici Çıkışının Ölçülmesi

Dedektör üzerine düşen radyasyon yoğunluğu ile doğrusal değişen fotoakım ve bu fotoakımla doğrusal bir gerilim üreten transempedans kuvvetlendiricinin çıkışı analog sayısal çevirici modülüne sahip olan bir mikrodenetleyici ile ölçülebilir.

Bu amaçla Microchip firmasının PIC18 serisi mikrodenetleyicilerinden 18f2553 mikrodenetleyici kullanılmıştır. 18f2553 mikrodenetleyici 12-bit analog sayısal dönüşüm yapabilen 10 kanala sahip olması dolayısıyla tercih edilmiştir.

4.2.5. Sistemin İncelenmesi

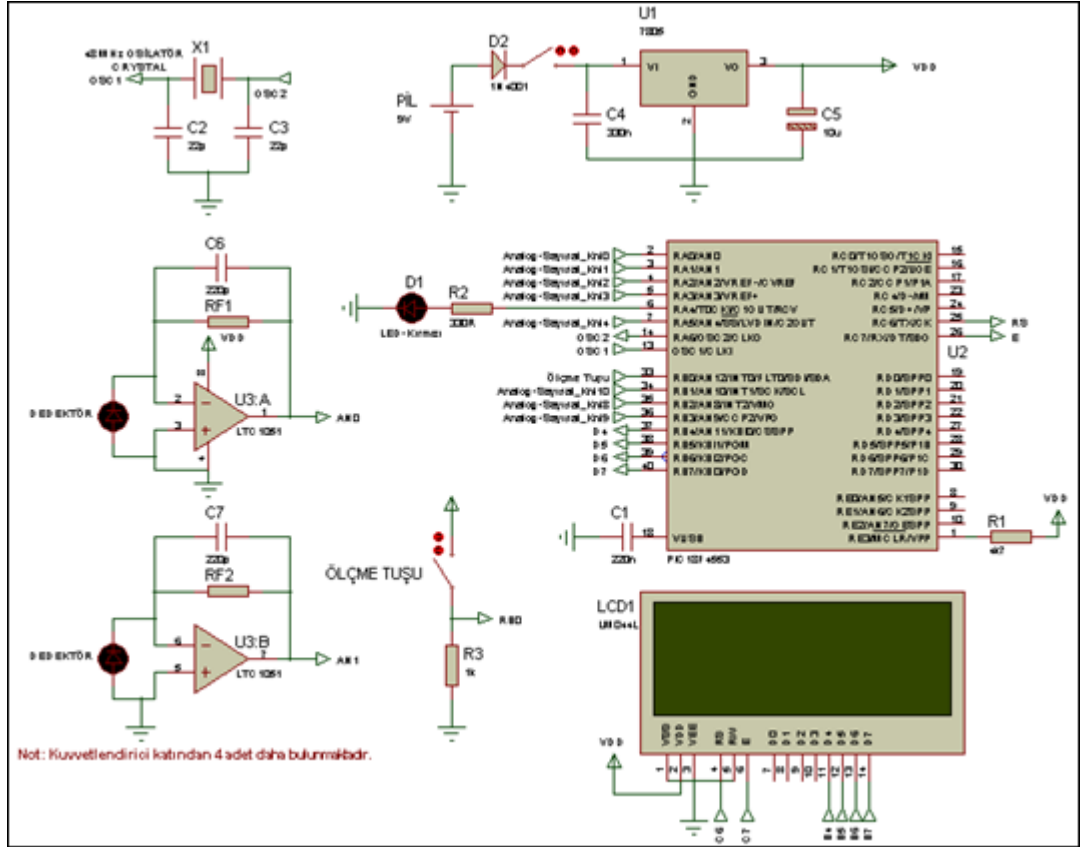
Tasarlanan radyometre temel olarak elektronik donanım, gömülü yazılım ve mekanik donanım olmak üzere üç ana bölümden oluşmaktadır. Elektronik donanım ve gömülü yazılım güneş radyasyon yoğunluğunun ölçülmesi ve sayısal bir ekranda gösterilmesini sağlarken mekanik donanım cihazın güneş ışınlarına dik tutulmasını ve dedektörlerin sadece direkt radyasyonu ölçmesi için gerekli olan sınırlı görüş açısını sağlamaktadır. Sonraki bölümlerde bu üç başlık anlatılacaktır. Sistemin blok şeması Şekil 4.12'de gösterilmektedir.



Şekil 4.12. Elektronik donanım blok diyagramı.

4.2.5.1. Elektronik Donanım

Elektronik donanım, güneş radyasyon yoğunluğu ile doğrusal bir şekilde fotoakım üreten dedektörlerden, bu akımı kuvvetlendirerek gerilime dönüştüren yükseltici katından, bu gerilimi analog sayısal dönüştürücü kanalları ile ölçen mikrodenetleyiciden, bu ölçümleri gösteren bir ekrandan ve kuvvetlendirici katının, sayısal ekranın, mikrodenetleyicinin gerek duyduğu gerilimi sağlayacak pil ve regülötör katından oluşmaktadır. Şekil 4.13'te elektronik donanıma ait devre şeması görülmektedir.



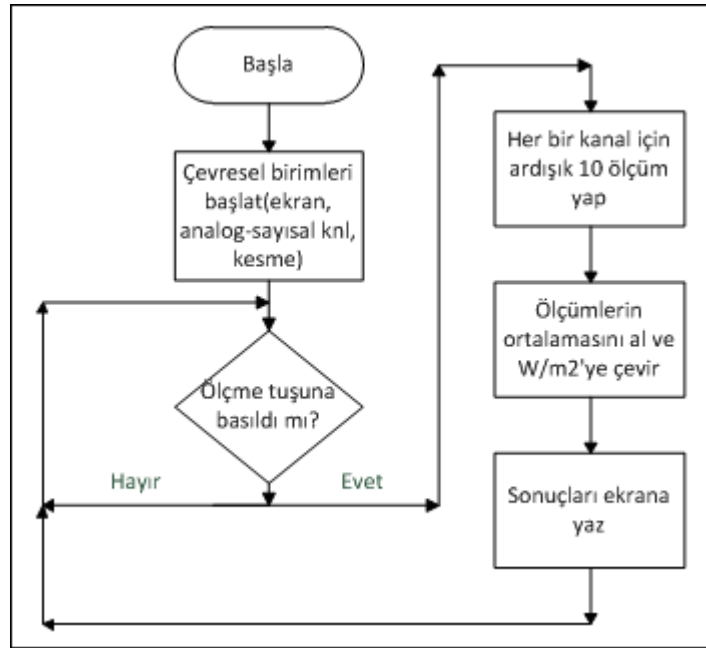
Şekil 4.13. Elektronik devre şeması.

4.2.5.2. Gömülü Yazılım

Tasarlanan radyometrede ölçümler merkezi kontrol ünitesi olan mikrodenetleyici tarafından yapılmaktadır. Mikrodenetleyiciler içlerinde işlemci, program hafızası, geçici hafıza, kalıcı hafıza ve çevresel birimler bulunduran mini bilgisayarlar olarak

tanımlanabilir. Bu iç donanım ve çevresel birimler kullanıcı tarafından yazılan program ile ihtiyaca yönelik olarak kullanılır. Mikrodenetleyici, mikroişlemci gibi entegre devrelerde yürütülen yazılımlara gömülü yazılım denilmektedir [36].

Mikrodenetleyiciye ilişkin gömülü yazılım CCS firmasına ait olan PIC C programlama dilinde yazılmıştır. Yazılımda mikrodenetleyicinin analog sayısal dönüştürücü kanalları sırayla aktif edilerek her bir kanala bağlı olan dedektör çıkışları için ardışık 10 ölçüm yapılır. Bu ölçümlerin aritmetik ortalaması alınarak ilgili kanallara ilişkin değerler matematiksel işlemlerle güneş radyasyon yoğunluğu W/m^2 'ye çevrilir ve sayısal ekranda yazdırılır. Yazılıma ilişkin akış diyagramı Şekil 4.14'te gösterilmektedir.



Şekil 4.14. Gömülü yazılım akış diyagramı.

4.2.5.3. Mekanik Donanım

Direkt güneş radyasyonu ile ilgili verileri ölçen pirheliometre, güneş fotometresi ve gökyüzü radyometresi gibi cihazlar güneşten gelen direkt radyasyonun ölçülmesi ve yansıyan radyasyonun katkısını önlemek için sınırlı “görüş açısı” na sahiptirler. Böylece güneşten düz bir huzmede gelen direkt radyasyon cihazın dedektörlerine

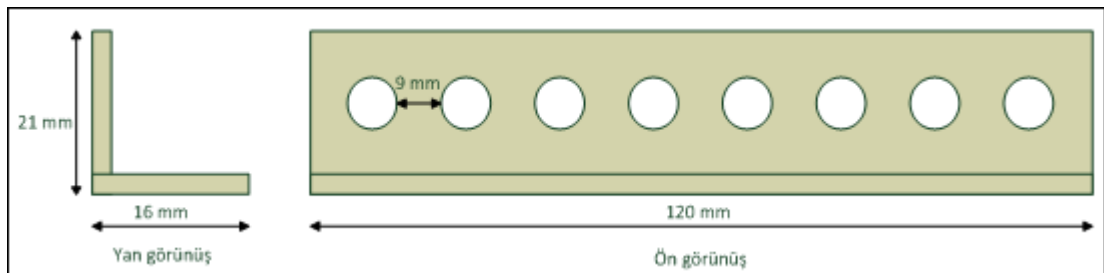
ulaşarak ölçülür ve atmosferik saçılmadan dolayı bütün yönlerden gelen difüz radyasyonun dedektöre ulaşması engellenerek sadece direkt radyasyon ölçülmüş olur. Bu nedenle direkt radyasyon ölçümünde kullanılacak cihazların mekanik aksamı sınırlı görüş açısına sahip olacak şekilde tasarlanır.

Sınırlı görüş açısından kasıt cihazın mümkün olduğunca dar bir görüş açısına sahip olmasıdır [37]. Bununla beraber mekanik kısıtlamalar ve yönlendirme zorlukları nedeniyle pirheliometre cihazları 5° , güneş fotometre cihazları 2° , gökyüzü radyometreleri 1° görüş açısına sahiptirler [38]. Bu sınırlı görüş açıları hassas ön açıklığa ve dedektör dizaynına sahip olan yönlendirme tüpü ile gerçekleştirilir.

Mims yaptığı güneş fotometre cihazında dedektörleri $<3^\circ$ görüş açısı veren bir açıklığa sahip olacak şekilde tasarlamıştır [10]. Shaw vd. $<5^\circ$ görüş açısına sahip cihazlarda bir çok atmosferik şartta yansıyan radyasyonun toplam sinyale katkısının küçük ($<12\%$) olduğunu göstermişlerdir. Brooks vd. 2° gibi küçük bir görüş açısına sahip bir cihazın el yordamıyla güvenilir bir biçimde güneşe hedeflendirilebildiğini göstermişlerdir [32].

Bu bilgiler ışığında radyometre yaklaşık 3° görüş açısına sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Aşağıda anlatılan tasarım aşamalarında $100\ \mu\text{m}$ hassasiyete sahip olan elektronik kumpas, milimetrik ayar kabiliyetine sahip olan freze tezgahı, torna tezgahı ve tezgah tipi matkap kullanılmıştır.

Bu amaçla ilk olarak dedektörlerin yerleştirileceği mekanizma tasarlanmıştır. L-profilden üretilen bu parçanın ölçüleri Şekil 4.15'te görülmektedir.



Şekil 4.15. Dedektörlerin yerleştirildiği kaide.

L profile; fotodiyot ve LED'lerin yerleştirilebilmesi için piyasada bulunan standart 5 mm'lik LED yuvaları kullanılmıştır. Bu standartta olmayan 6,5 mm'lik fotodiyotlar için benzer yuvalar fotodiyot ölçülerine uyacak şekilde 6 mm'lik vidalardan torna tezgâhında işlenerek elde edilmiştir.

Hedeflenen görüş açısının hassas ön açıklık ve dedektör tasarımıyla gerçekleştirileceği belirtilmişti. İstenilen görüş açısını sağlaması amacıyla cihaz kutusunun ön yüzeyine dedektörlerin çapıyla eşit olan 5 mm çaplı dairesel açıklıklar gerekli ölçümler yapılarak açılmıştır.

Brooks vd. (1998), dedektörlerin ön açıklıklar vasıtasıyla sahip oldukları görüş açılarının yaklaşık olarak geometrik görüş açısına eşit olduğunu belirtmişlerdir [32]. Geometrik görüş açısı Denklem 4.1'deki eşitlik ile hesaplanır [37].

$$\text{Görüş açısı} = \arctan(R/d) \quad (4.1)$$

Burada R : Cihaz ön açıklık çapı

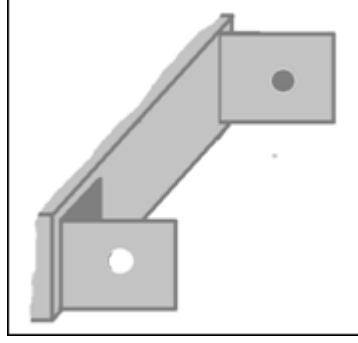
d : Dedektörlerin açıklığa olan uzaklığı

$$3^\circ = \arctan\left(\frac{5}{d}\right)$$

$$d = 95,4 \text{ mm}$$

Dedektörler için yapılan kaide, 3°'lik görüş açısını elde edebilmek için ön açıklıktan yaklaşık 95 mm geriye yerleştirilmiştir.

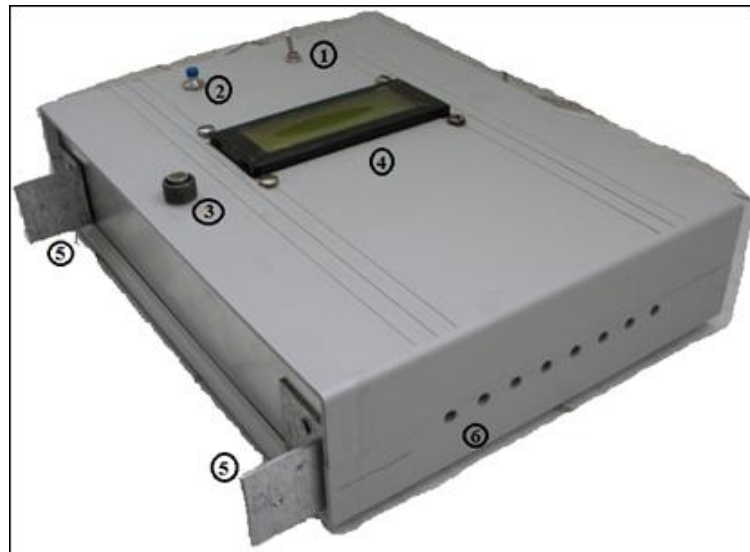
Mekanik tasarımda son olarak cihazın güneşe dik tutulduğunu anlamak amacıyla L profilden iki parça kesilerek bu profillerden birinin önüne 5 mm'lik dairesel açıklık oluşturulmuş ve diğer parçayada ön açıklığa karşılık gelecek şekilde işaret konulmuştur. Böylece Şekil 4.16'da gösterildiği üzere öndeki profilde bulunan açıklıktan geçen güneş ışığı arkada bulunan profilde işaretlenen yere düştüğünde cihazın güneşe dik tutulduğu anlamına gelir [31].



Şekil 4.16. Radyometrenin güneşe hizalayıcı kısmı.

4.3. RADYOMETRENİN KISIMLARI VE ÇALIŞMASI

Radyometre ile 8 farklı ölçüm yapıldığı belirtilmiştir. Radyometre Şekil 4.17’de gösterilen 1 nolu “Aç-Kapa” anahtarı ile açıldıktan sonra kullanıma hazırdır. Yatay yüzeydeki global radyasyon ölçülmek isteniyorsa cihaz yere yatay tutulmak suretiyle 2 nolu ölçme tuşuna basılır ve 3 nolu dedektör aracılığıyla yapılan ölçüm 4 nolu ekranda radyasyon yoğunluğu W/m^2 olarak belirtilir. Toplam direkt radyasyon ve farklı spektral bölgelerdeki direkt radyasyon miktarları ölçülmek isteniyorsa cihaz 5 nolu aparatlar vasıtasıyla güneşe dik tutulur ve 2 nolu ölçme tuşuna basılarak 6 nolu ön açıklıklar aracılığıyla sadece direkt radyasyona maruz kalan dedektörlerden gelen ölçümler 4 nolu ekranda W/m^2 olarak belirtilir.



Şekil 4.17. Radyometrenin genel görünümü.

BÖLÜM 5

RADYOMETRE KALİBRASYONU

Optik kalibrasyon standartları, optik dedektör ve cihazların fotometrik ve radyometrik ışık ölçme uygulamalarında kullanılan aydınlık veya radyasyon, aydınlık veya radyasyon yoğunluğu gibi optik özelliklerini kalibre etmek için kullanılır. Optik kalibrasyon standartları ışık kaynaklarını, lambaları, ışık dedektörlerini ve yansıtıcı yüzeyleri içerir. Sertifikasyon laboratuvarları (NIST gibi) birincil optik kalibrasyon standartlarını belirler. Transfer standartları; bu birincil değerleri ikincil kalibrasyon olanaklarına transfer etmek veya karşılaştırmak için kullanılır. Referans standartlar veya çalışan standartlar daha sonra optik elemanları ve cihazları kalibre etmek için kullanılır. Optik kalibrasyon standartlarının bir çok çeşidi vardır. Bu kategoriler lamba kalibrasyon standartlarını, spektroskopi standartlarını ve fotometre standartlarını içerir. Lamba kalibrasyon standartlarının iki temel tipi mevcuttur. Bunlar kalibre edilmiş radyasyon kaynaklarını ve spektral kalibrasyon lambalarını kapsar. Kalibre edilmiş radyasyon kaynakları optik özelliği bilinmek istenen numuneyi, bilinen bir radyasyon yoğunluğu ile ışımaya tabi tutmak için kullanılır [39].

Bu çalışmada gerçekleştirilen radyometrenin kalibrasyonu çıkış radyasyon yoğunluğu bilinen standart lamba ile gerçekleştirilmiştir. Bölüm 5.2 ve 5.3'te kalibrasyon işleminin nasıl gerçekleştirildiği belirtilmiştir.

5.1. DEDEKTÖR DUYARLILIĞI

Bu çalışmada Güneş spektrumunun farklı dalga boyları üzerindeki radyasyon değerleri ölçülmüştür. Bu ölçümlerin gerçekleştirilebilmesi için dedektör ve dolayısıyla kuvvetlendirici çıkışındaki gerilimin radyasyon yoğunluğu (W/m^2) cinsinden karşılığını bulmaya yönelik olarak çıkış yoğunluğu ve bunun spektral

bileşenleri bilinen bir kaynağa göre dedektörlerin duyarlılıklarını belirlemek gerekir. Dedektör duyarlılığından kasıt dedektörün W/m^2 başına ne kadar akım ürettiğinin tespit edilmesidir. Dedektörler üzerlerine düşen radyasyon yoğunluğu ile doğrusal orantılı akım üretmektedirler. Bu akım transempedans kuvvetlendirici ile yükseltılarak gerilime dönüştürülmektedir. Bu gerilimde mikrodenetleyicinin örneksel sayısal dönüştürücü (ÖSD) kanalı ile sayısallaştırılmaktadır. Bu durumda dedektörlerin duyarlılıklarını $A/(W/m^2)$ veya $V/(W/m^2)$ veya $ÖSD/(W/m^2)$ cinsinden belirleyerek çıkışı bilinen standart bir cihaza göre kalibrasyon gerçekleştirilmiş olur.

Duyarlılıklar bu şekilde belirlendikten çıkış değerinin radyasyon yoğunluğu (W/m^2) olarak neye karşılık geldiği Denklem 5.1'deki eşitlik ile hesaplanabilir [38].

$$E_{Güneş} = U/S \quad (5.1)$$

Burada $E_{Güneş}(W/m^2)$: Radyasyon yoğunluğu

$U(V)$: Çıkış gerilimi

$S(V/W/m^2)$: Duyarlılık

5.2. KALİBRASYON CİHAZI

Dedektör duyarlılıklarını belirlemek için güneş spektrumuna çok yakın spektral çıkış veren güneş simülatörleri kullanılabilir. Bu cihazların ürettikleri çıkış radyasyon yoğunlukları cihazı süren güç kaynağı tarafından kontrol edilebilir. Cihaz çıkışlarına konulan filtreler vasıtasıyla farklı hava kütlesi (m_0 , m_1 , $m_{1,5D}$, $m_{1,5G}$ ve m_2 gibi) değerleri için yeryüzündeki farklı spektral durumlar için güneş spektrumuna daha iyi yakınsama yapılır. Bu cihazların katalog bilgilerinde farklı hava kütlesi değerleri için spektrumun farklı aralıklarında bulunan radyasyon oranı değerleri verilmektedir.

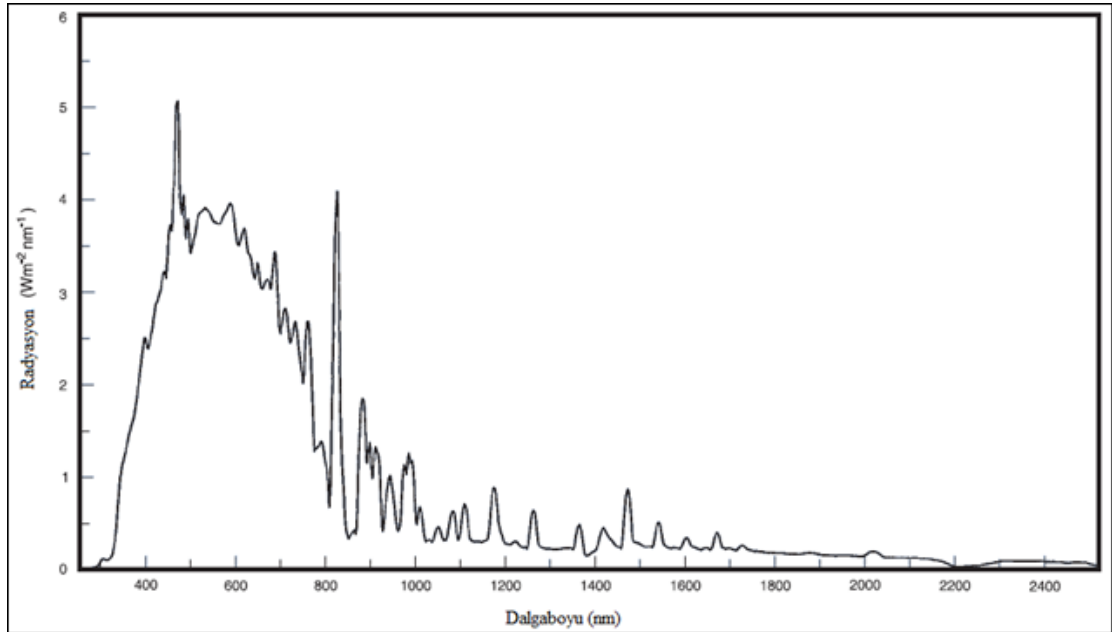
Yapılan araştırmada güneş simülatörü cihazının ve cihaz için gerekli diğer ekipmanların ODTÜ Güneş Enerjisi Araştırma Merkezi (GÜNAM) karakterizasyon laboratuvarında bulunduğu bilgisi edinilmiştir. Newport firmasına ait olan sistemin kısımları Şekil 5.1'de numaralandırılarak gösterilmiştir.

Şekil 5.1’de 1 ile gösterilen 91192 tipi güneş simülatörü, 2 ile gösterilen güneş simülatörünü süren 69920 güç kaynağı ve 3 ile gösterilen PVM354 referans fotovolttaik pil ve 91150 referans pil metre cihazlarıdır [40].



Şekil 5.1. Newport güneş simülatör cihazı.

91192 güneş simülatörü cihazı için m 1,5 G filtrelili çıkış spektrumu Şekil 5.2 ve bu spektrumun farklı dalgaboyları üzerindeki radyasyon miktarının tüm radyasyon (200-2500 nm) miktarına oranı Çizelge 5.1’de yüzde olarak verilmektedir.



Şekil 5.2. AM 1,5 G Filtrelili 91192 simülatörün çıkış spektrumu [40].

Çizelge 5.1. 91192 Simülâtör için spektral aralıkların tüm spektruma oranı [40].

Spektrum Bileşeni	Aralık (nm)	% 200-2500 nm üzerinden
UV C	<280	0
UV B + UV A	280 - 400	5,4
Görünür	400 - 700	54,7
Kızılötesi	700 - 1100	25,5
Mavi	446 - 500	11,081
Yeşil	500 - 578	15,37
Kırmızı	620 - 700	13,225

5.3. KALİBRASYON İŞLEMİ

Dedektörlerin duyarlılıklarını belirlemek için asıl cihazda bulunan kuvvetlendirme katı, sayısal ekran ve mikrodenetleyiciden oluşan devre Şekil 5.7’de gösterildiği üzere bord üzerine kurulmuştur. Kullanılan işlemsel kuvvetlendirici iki kanallı olduğundan aynı anda iki dedektörün ölçümleri yapılabilmektedir. İkişerli dedektör çiftleri için sırayla aşağıdaki işlemler uygulanarak kalibrasyon ölçümleri sayısal ekran üzerinden örneksel sayısal dönüştürücü (ÖSD) değeri olarak alınmıştır.

İlk olarak her bir dedektör için geri besleme (kazanç) direncinin değeri dedektör çıkışları “1 Güneş” değeri altında 1-4 V arasında olacak şekilde seçilmiştir. Seçilen direnç değerleri dedektörler için verilen kalibrasyon grafiklerinde belirtilmiştir.

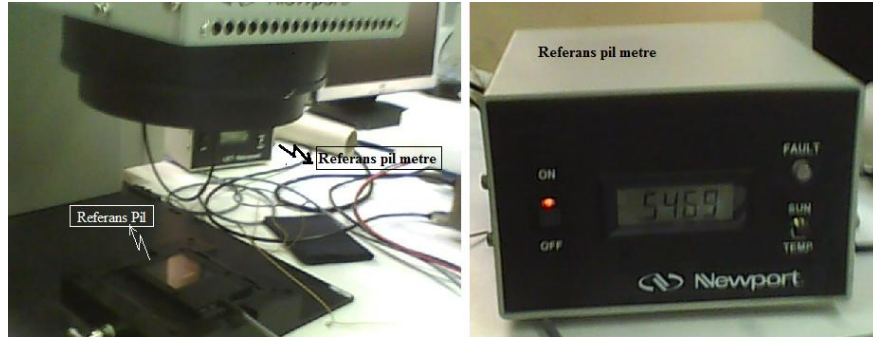


Şekil 5.3. Newport 69920 güç kaynağı [40].

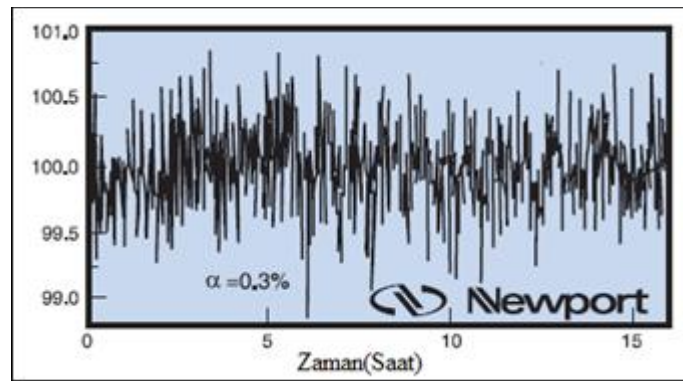
İkinci olarak her bir dedektör için belirlenen direnç, geri besleme direnci olarak bağlandıktan sonra Şekil 5.3’te görülen güç kaynağı değeri ayarlanarak 5 farklı güneş radyasyon yoğunluğu altında sırasıyla dedektörlerin çıkışları gözlenmiştir. Burada güç kaynağının ayarı “Watt” olarak ayarlanmakta olup bu değer radyasyon

yoğunluğu karşılığı Şekil 5.4'te görülen “referans fotovoltaiik pil” ve bu pilin çıkışını ölçen “referans pil metre” kullanılarak ölçülmüştür. Bu ölçümler güç kaynağı ayarının radyasyon yoğunluğu karşılığını bulmak ve Şekil 5.5'te görülen simülatör çıkışında mevcut olan titreşimin dedektör çıkışına olan etkisini minimize etmek için her bir dedektör çiftinin yerleşmesinden sonra yapılmıştır.

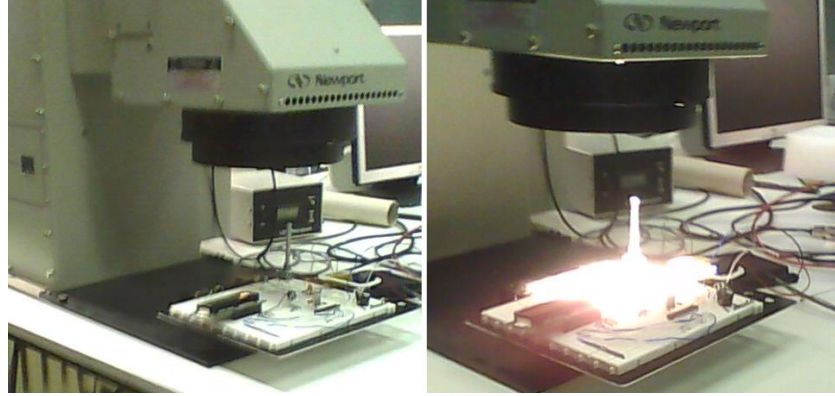
Dedektörler her bir aşamada simülatör altındaki numune koyma alanına simülatörden çıkan ışık huzmesine dik olacak şekilde Şekil 5.6'da görülen haliyle yerleştirilmiştir. Her ölçümde dedektörlerin aynı noktaya gelmesi için işaretler konulmuştur. Böylece numune koyma alanı için katalogta tanımlanan eş dağılımsızlıktan etkilenme minimize edilmeye çalışılmıştır.



Şekil 5.4. Newport PVM 354 Referans fotovoltaiik pil ve 91150 referans pil metre.



Şekil 5.5. Güç kaynağı kontrolünde 16 saat için simülatör çıkışının değışimi [40].



Şekil 5.6. Simülatör açılmadan önce ve sonra kalibrasyon anı.

Sekiz dedektörün çıkışı yukarıda anlatılanlar ışığında 5 farklı radyasyon yoğunluğu için ölçülmüş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

5.3.1. Morötesi Bölge Dedektör Kalibrasyonu

Morötesi fotodiyot için geri besleme direnci değeri 1,598 MΩ'dur. Kalibrasyonu 280-400 nm arasını ölçecek şekilde yapılmıştır. UVC bölgesinin (<280 nm) neredeyse tamamı ozon tabakası tarafından emilir [40]. Çizelge 5.2'deki sütunlarda soldan sağa doğru sırasıyla; uygulanan 5 farklı radyasyon yoğunluğu, bu radyasyonda ki morötesi miktarı, mikrodenetleyicinin ürettiği ÖSD değeri ve bundan türetilen gerilim, akım, ve birim yoğunluk başına üretilen ÖSD, gerilim ve akım değerleri bulunmaktadır. Bu ölçümlere göre aritmetik ortalama ile elde edilen kalibrasyon katsayıları Çizelge 5.3'te verilmiştir.

Çizelge 5.2. Morötesi fotodiyot kalibrasyon ölçümleri.

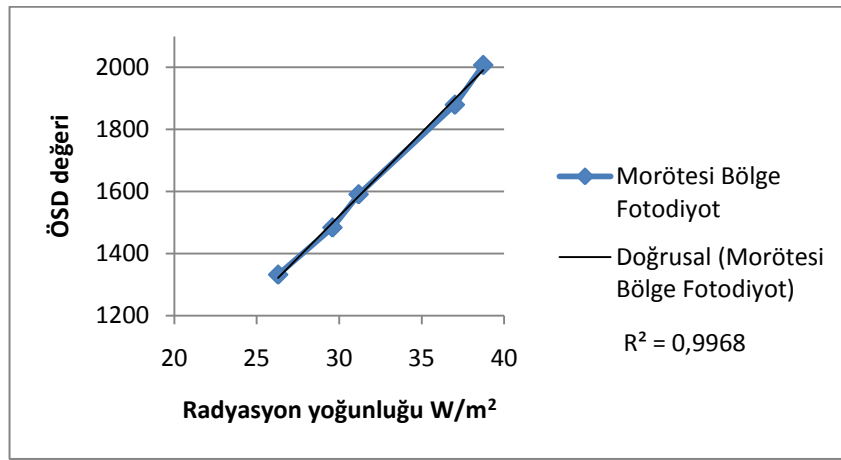
W/m ²	0,054*W/m ²	ÖSD	Gerilim(V)	Akım(µA)	ÖSD/(W/m ²)	mV/(W/m ²)	nA/(W/m ²)
487,1	26,3	1332	1,626	1,018	50,640	61,816	38,683
548,1	29,6	1484	1,812	1,134	50,140	61,206	38,301
577,4	31,2	1591	1,942	1,215	51,027	62,289	38,979
685,5	37,0	1880	2,295	1,436	50,787	61,996	38,796
717,3	38,7	2008	2,451	1,534	51,840	63,282	39,601

Çizelge 5.3. Morötesi fotodiyot için kalibrasyon katsayıları.

ÖSD/(W/m ²)	mV/(W/m ²)	nA/(W/m ²)	(mW/m ²)/ÖSD
50,887	62,118	38,872	19,651

Şekil 5.7’de bu ölçümler sonucunda çizilen grafik en küçük kareler yöntemine göre doğrusallaştırıldığında çizilen eğrinin ve eğriye ilişkin denklemin noktaları karşılama değerinin 1’e oldukça yakın olduğu görülür.

Çizelge 5.3’e göre bu fotodiyot 1,598 MΩ’luk geri besleme direnci ve 12 bitlik örneksel sayısal dönüştürücü ile morötesi radyasyon ölçümü için en küçük ölçme sınırı 19,65 mW/m²’dir.



Şekil 5.7. Morötesi fotodiyot için uygulanan radyasyon değerine karşılık ÖSD değeri.

5.3.2. Görünür Bölge Dedektör Kalibrasyonu

Görünür bölgeye duyarlı fotodiyot için geri besleme direnci 3,242 kΩ’dur. Kalibrasyonu 400-700 nm arası ölçecek şekilde yapılmıştır. Çizelge 5.4’te görünür bölge fotodiyot kalibrasyon ölçümleri bulunmaktadır. Kalibrasyon katsayıları Çizelge 5.5’te verilmiştir.

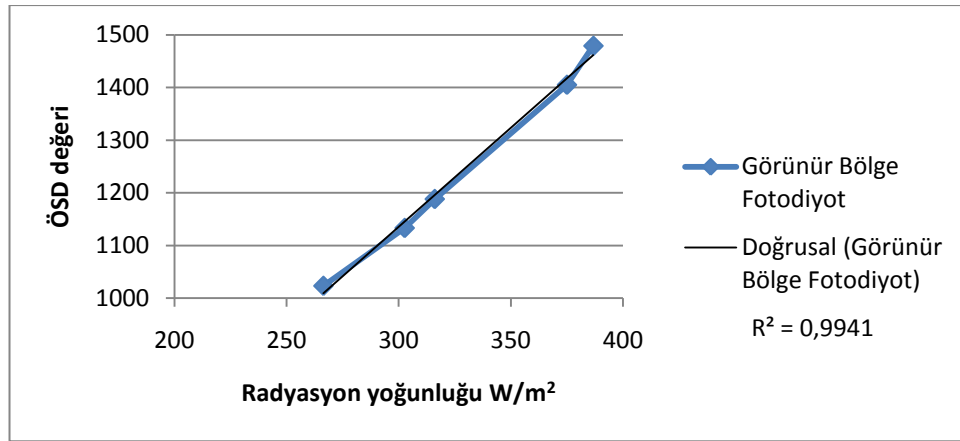
Çizelge 5.4. Görünür bölge fotodiyot kalibrasyon ölçümleri.

W/ m ²	0,547*W/m ²	ÖSD	Gerilim(V)	Akım(mA)	ÖSD/(W/ m ²)	mV/(W/ m ²)	µA/(W/ m ²)
487,1	266,4	1023	1,249	0,385	3,840	4,687	1,446
553,3	302,7	1133	1,383	0,427	3,744	4,570	1,410
577,8	316,0	1188	1,450	0,447	3,759	4,588	1,415
685,5	374,9	1405	1,715	0,529	3,747	4,574	1,411
707,1	386,8	1479	1,805	0,557	3,824	4,668	1,440

Çizelge 5.5. Görünür bölge fotodiyot için kalibrasyon katsayıları.

ÖSD/(W/m ²)	mV/(W/m ²)	µA/(W/m ²)	(W/m ²)/ÖSD
3,783	4,617	1,424	0,264

Şekil 5.8’de kalibrasyon eğrisi görülmektedir. Çizelge 5.5’e göre bu fotodiyot 3,242 kΩ’luk geri besleme direnci ve 12 bitlik örneksel sayısal dönüştürücü ile görünür bölge radyasyon ölçümü için en küçük ölçme sınırı 0,264 W/m²’dir.



Şekil 5.8. Görünür bölge fotodiyot için uygulanan radyasyon değerine karşılık ÖSD değeri.

5.3.3. Kızılötesi Bölge Dedektör Kalibrasyonu

Kızılötesi bölgeye duyarlı fotodiyot için geri besleme direnci 5,892 kΩ’dur. Kalibrasyonu 700-1100 nm arasını ölçecek şekilde yapılmıştır. Çizelge 5.6’da görünür bölge fotodiyot kalibrasyon ölçümleri bulunmaktadır. Kalibrasyon katsayıları Çizelge 5.7’de verilmiştir.

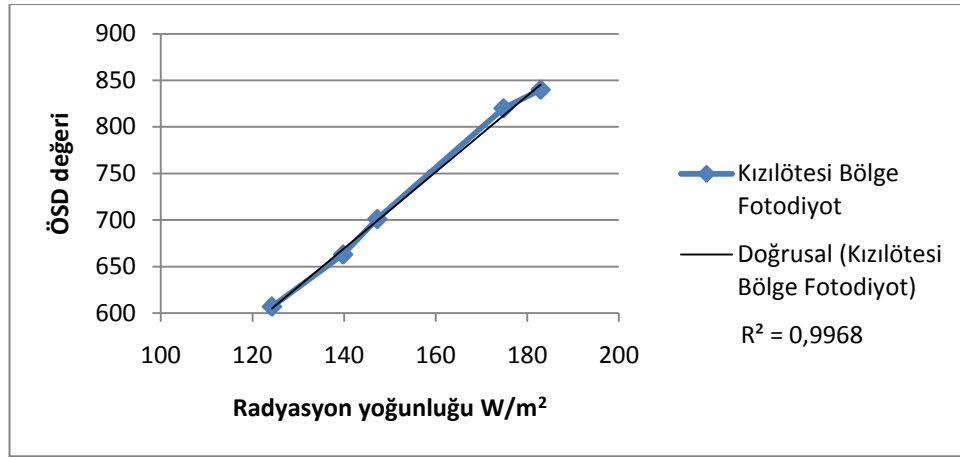
Çizelge 5.6. Kızılötesi bölge fotodiyot kalibrasyon ölçümleri.

W/m ²	0,255*W/m ²	ÖSD	Gerilim(V)	Akım(mA)	ÖSD/(W/m ²)	mV/(W/m ²)	µA/(W/m ²)
487,1	124,2	607	0,741	0,126	4,887	5,9654	1,012
548,1	139,8	663	0,810	0,137	4,744	5,7906	0,983
577,4	147,2	701	0,856	0,145	4,761	5,8118	0,986
685,5	174,8	820	1,001	0,170	4,691	5,7263	0,972
717,3	182,9	840	1,025	0,174	4,592	5,6059	0,952

Çizelge 5.7. Kızılötesi bölge fotodiyot için kalibrasyon katsayıları.

ÖSD/(W/m ²)	mV/(W/m ²)	µA/(W/m ²)	(W/m ²)/ÖSD
4,735	5,780	0,981	0,211

Şekil 5.9’da kalibrasyon eğrisi görülmektedir. Çizelge 5.7’e göre bu fotodiyot 5,892 kΩ’luk geri besleme direnci ve 12 bitlik örneksel sayısal dönüştürücü ile kızılötesi bölge radyasyon ölçümü için en küçük ölçme sınırı 0,211 W/m²’dir.



Şekil 5.9. Kızılötesi fotodiyot için uygulanan radyasyon değerine karşılık ÖSD değeri.

5.3.4. Tüm Spektral Bölge Direkt Radyasyon Ölçümü (280-2500 nm) Dedektör Kalibrasyonu

Tüm spektral bölgeyi ölçmek için kullanılan fotodiyotun kalibrasyonu 280-2500 nm arasını ölçecek şekilde yapılmıştır. Tüm spektral bölgeyi ölçen “pyrheliometer” cihazları 280-4000 nm arasını ölçecek şekilde kalibre edilir. Güneş simülatörünün 280-2500 nm arası spektrum çıkışına sahip olması bu şekilde kalibrasyonu mecburi kılmıştır. Bununla beraber cihaz kataloğundaki bilgiler ışığında güneşten gelen radyasyonunun %96,3’ü 200-2500 nm arasında ve geri kalan %3,7’lik miktar ise daha uzun dalgalarda bulunmaktadır [29]. Tüm spektral bölgeye duyarlı fotodiyot için geri besleme direnci 0,997 kΩ’dur. Çizelge 5.8’de tüm spektral bölge için kullanılan fotodiyot kalibrasyon ölçümleri bulunmaktadır. Kalibrasyon katsayıları Çizelge 5.9’da verilmiştir.

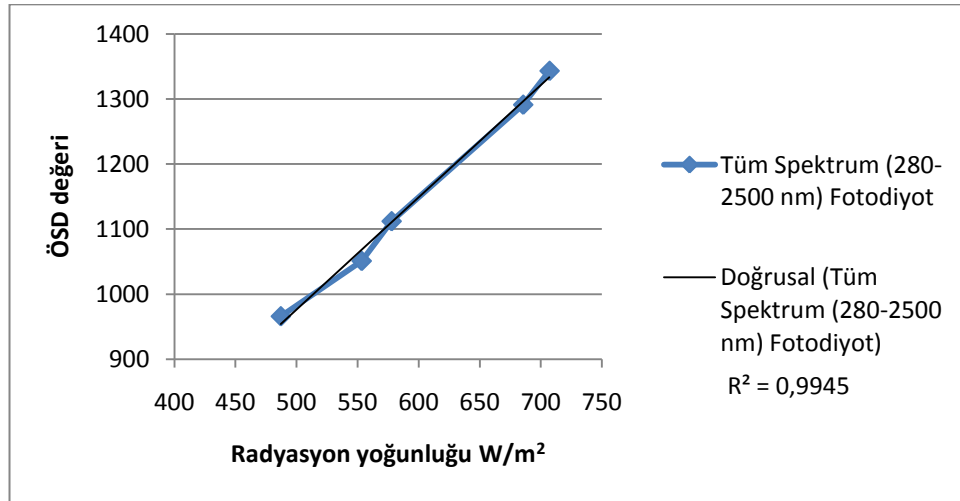
Çizelge 5.8. Tüm spektral bölge fotodiyot kalibrasyon ölçümleri.

W/m ²	1*W/m ²	ÖSD	Gerilim(V)	Akım(mA)	ÖSD/(W/m ²)	mV/(W/m ²)	µA/(W/m ²)
487,1	487,1	966	1,179	1,183	1,983	2,4209	2,428
553,3	553,3	1051	1,283	1,287	1,899	2,3187	2,326
577,8	577,8	1112	1,357	1,362	1,925	2,3493	2,356
685,5	685,5	1291	1,576	1,581	1,883	2,2989	2,306
707,1	707,1	1343	1,639	1,644	1,899	2,3185	2,325

Çizelge 5.9. Tüm spektral bölge fotodiyot için kalibrasyon katsayıları.

ÖSD/(W/m ²)	mV/(W/m ²)	µA/(W/m ²)	(W/m ²)/ÖSD
1,918	2,341	2,348	0,521

Şekil 5.10'da kalibrasyon eğrisi görülmektedir. Çizelge 5.9'a göre bu fotodiyot 0,997 kΩ'luk geri besleme direnci ve 12 bitlik örneksel sayısal dönüştürücü ile kızılötesi bölge radyasyon ölçümü için en küçük ölçme sınırı 0,521 W/m²'dir.



Şekil 5.10. Tüm spektral bölge fotodiyot için uygulanan radyasyon değerine karşılık ÖSD değeri.

5.3.5. Mavi Bölge Dedektör Kalibrasyonu

Mavi bölgeye duyarlı LED için geri besleme direnci 1,575 MΩ'dur. Kalibrasyonu mavi renk bölgesi 446-500 nm arası olduğu için bu aralığı ölçecek şekilde yapılmıştır. Çizelge 5.10'da mavi bölge LED için kalibrasyon ölçümleri bulunmaktadır. Kalibrasyon katsayıları Çizelge 5.11'de verilmiştir.

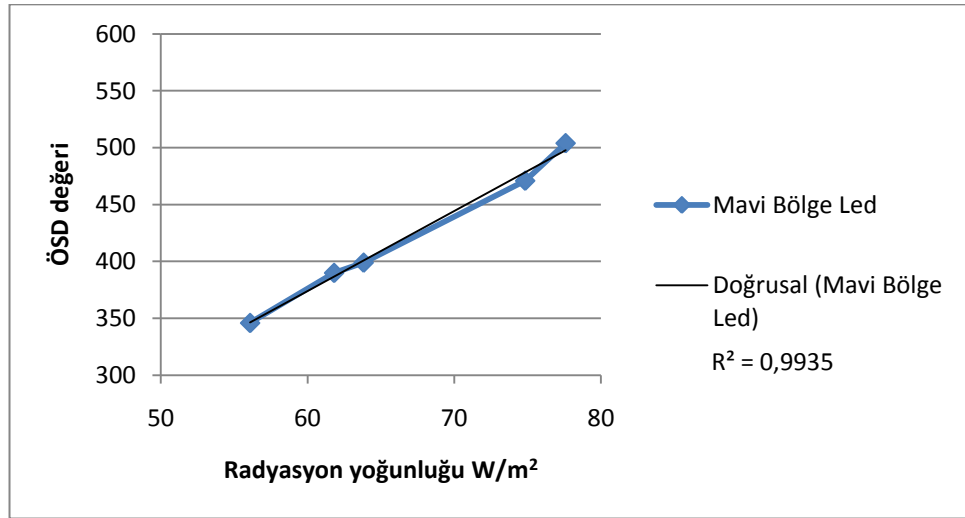
Çizelge 5.10. Mavi bölge LED için kalibrasyon ölçümleri.

W/m ²	0,1108*W/m ²	ÖSD	Gerilim(V)	Akım(μA)	ÖSD/(W/m ²)	mV/(W/m ²)	nA/(W/m ²)
506,1	56,1	346	0,422	0,268	6,170	7,531	4,782
557,8	61,8	390	0,476	0,302	6,310	7,702	4,890
576	63,8	399	0,487	0,309	6,251	7,631	4,845
675,4	74,8	471	0,575	0,365	6,293	7,682	4,878
700,3	77,6	504	0,615	0,391	6,495	7,928	5,034

Çizelge 5.11. Mavi bölge LED için kalibrasyon katsayıları.

ÖSD/(W/m ²)	mV/(W/m ²)	nA/(W/m ²)	(W/m ²)/ÖSD
6,304	7,695	4,886	0,158

Şekil 5.11’de kalibrasyon eğrisi görülmektedir. Çizelge 5.11’e göre bu LED 1,575 MΩ’luk geri besleme direnci ve 12 bitlik örneksel sayısal dönüştürücü ile mavi bölge radyasyon ölçümü için en küçük ölçme sınırı 0,158 W/m²’dir.



Şekil 5.11. Mavi LED için uygulanan radyasyon değerine karşılık ÖSD değeri.

5.3.6. Yeşil Bölge Dedektör Kalibrasyonu

Yeşil bölgeye duyarlı LED’in geri besleme direnci 4,269 MΩ’dur. Kalibrasyonu yeşil renk bölgesi 500-578 nm arası olduğu için bu aralığı ölçecek şekilde yapılmıştır. Çizelge 5.12’de yeşil bölge LED için kalibrasyon ölçümleri bulunmaktadır. Kalibrasyon katsayıları Çizelge 5.13’te verilmiştir.

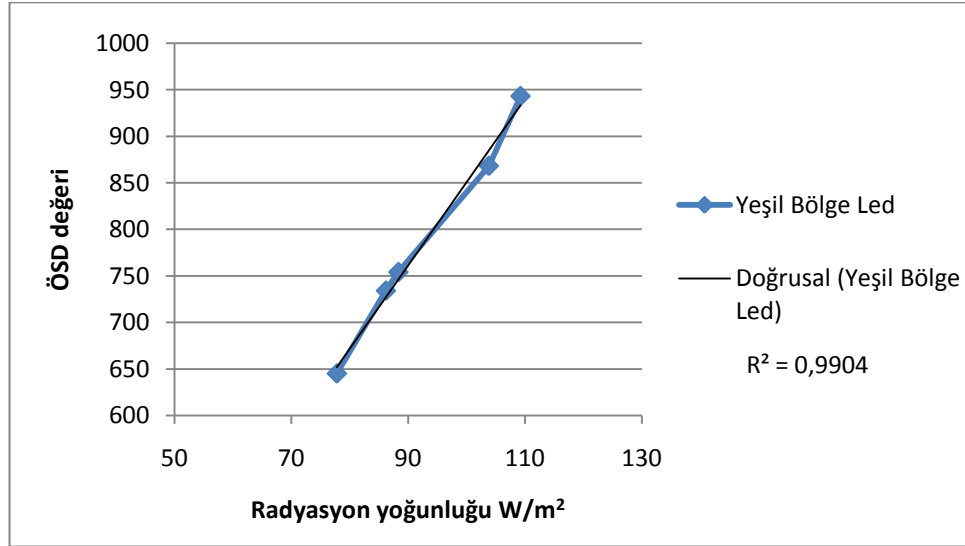
Çizelge 5.12. Yeşil bölge LED için kalibrasyon ölçümleri.

W/m ²	0,153*W/m ²	ÖSD	Gerilim(V)	Akım(µA)	ÖSD/(W/m ²)	mV/(W/m ²)	nA/(W/m ²)
506,1	77,9	645	0,787	0,184	8,292	10,12	2,371
560,8	86,2	734	0,896	0,210	8,515	10,39	2,435
574,7	88,3	754	0,920	0,216	8,536	10,42	2,441
675,4	103,8	868	1,059	0,248	8,361	10,21	2,391
710,7	109,2	943	1,151	0,270	8,633	10,54	2,469

Çizelge 5.13. Yeşil bölge LED için kalibrasyon katsayıları.

ÖSD/(W/m ²)	mV/(W/m ²)	nA/(W/m ²)	(W/m ²)/ÖSD
8,468	10,336	2,421	0,118

Şekil 5.12’de kalibrasyon eğrisi görülmektedir. Çizelge 5.13’e göre bu LED 4,269 MΩ’luk geri besleme direnci ve 12 bitlik örneksel sayısal dönüştürücü ile yeşil bölge radyasyon ölçümü için en küçük ölçme sınırı 0,118 W/m²’dir.



Şekil 5.12. Yeşil LED için uygulanan radyasyon değerine karşılık ÖSD değeri.

5.3.7. Kırmızı Bölge Dedektör Kalibrasyonu

Kırmızı bölgeye duyarlı LED’in geri besleme direnci 5,244 MΩ’dur. Kalibrasyonu kırmızı renk bölgesi 620-700 nm arası olduğu için bu aralığı ölçecek şekilde yapılmıştır. Çizelge 5.14’te kırmızı bölge LED için kalibrasyon ölçümleri bulunmaktadır. Kalibrasyon katsayıları Çizelge 5.15’te verilmiştir.

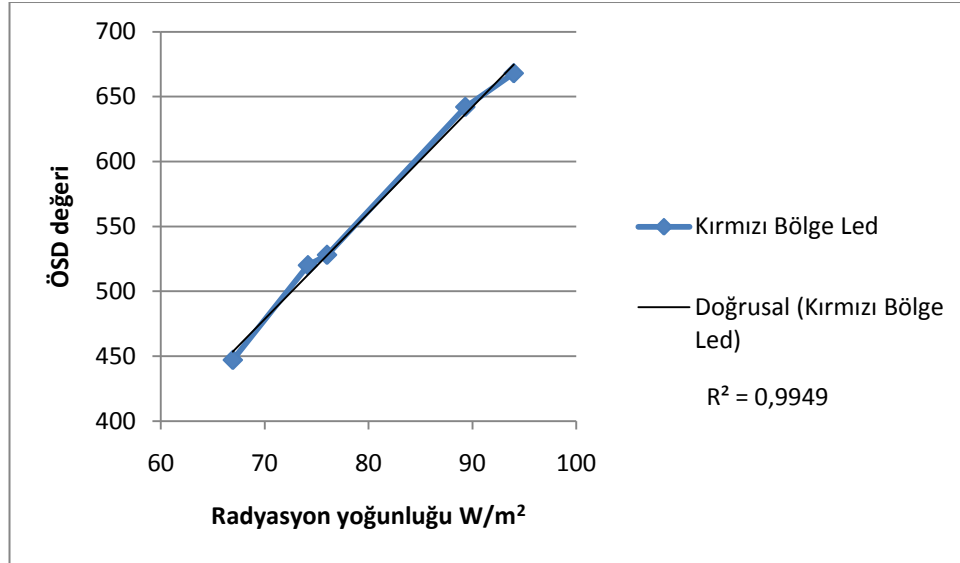
Çizelge 5.14. Kırmızı bölge LED için kalibrasyon ölçümleri.

W/m ²	0,132*W/m ²	ÖSD	Gerilim(V)	Akım(μA)	ÖSD/(W/m ²)	mV/(W/m ²)	nA/(W/m ²)
506,1	66,9	447	0,546	0,104	6,678	8,152	1,555
560,8	74,2	520	0,635	0,121	7,011	8,559	1,632
574,7	76,0	528	0,645	0,123	6,947	8,480	1,617
675,4	89,3	642	0,784	0,149	7,188	8,774	1,673
710,7	94,0	668	0,815	0,155	7,107	8,676	1,654

Çizelge 5.15. Kırmızı bölge LED için kalibrasyon katsayıları.

ÖSD/(W/m ²)	mV/(W/m ²)	nA/(W/m ²)	(W/m ²)/ÖSD
6,986	8,528	1,626	0,143

Şekil 5.13'te kalibrasyon eğrisi görülmektedir. Çizelge 5.15'e göre bu LED 5,244 MΩ'luk geri besleme direnci ve 12 bitlik örneksel sayısal dönüştürücü ile mavi bölge radyasyon ölçümü için en küçük ölçme sınırı 0,143 W/m²'dir.



Şekil 5.13. Kırmızı LED için uygulanan radyasyon değerine karşılık ÖSD değeri.

5.3.8. Tüm Spektral Bölge Toplam Radyasyon Ölçümü (200-2500 nm) Dedektör Kalibrasyonu

Tüm bölgeye bölgeye duyarlı fotodiyotun geri besleme direnci 1,49 kΩ'dur. Kalibrasyonu 200-2500 nm arasını ölçecek şekilde yapılmıştır. Çizelge 5.16'da tüm

spektral bölge fotodiyot için kalibrasyon ölçümleri bulunmaktadır. Kalibrasyon katsayıları Çizelge 5.17’de verilmiştir.

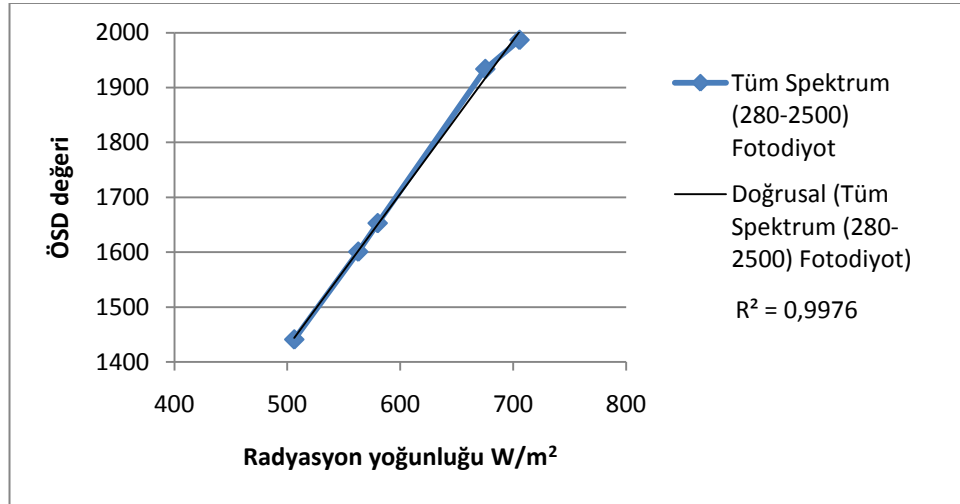
Çizelge 5.16. Tüm spektral bölge fotodiyot için kalibrasyon ölçümleri.

W/m ²	I*W/m ²	ÖSD	Gerilim(V)	Akım(mA)	ÖSD/(W/m ²)	mV/(W/m ²)	nA/(W/m ²)
506,1	506,1	1441	1,759	1,181	2,847	3,476	2,333
562,8	562,8	1601	1,954	1,312	2,845	3,473	2,331
580	580	1653	2,018	1,354	2,850	3,479	2,335
675,4	675,4	1934	2,361	1,584	2,863	3,496	2,346
705,7	705,7	1987	2,426	1,627	2,816	3,437	2,307

Çizelge 5.17. Tüm bölge fotodiyot için kalibrasyon katsayıları.

ÖSD/(W/m ²)	mV/(W/m ²)	nA/(W/m ²)	(W/m ²)/ÖSD
2,844	3,472	2,330	0,352

Şekil 5.14’te kalibrasyon eğrisi görülmektedir. Çizelge 5.17’e göre bu fotodiyot 1,49 kΩ’luk geri besleme direnci ve 12 bitlik örneksel sayısal dönüştürücü ile kızılötesi bölge radyasyon ölçümü için en küçük ölçme sınırı 0,352 W/m²’dir.



Şekil 5.14. Tüm spektral bölge fotodiyot için uygulanan radyasyon değerine karşılık ÖSD değeri.

BÖLÜM 6

VERİLER VE VERİLERİN ANALİZİ

Radyometre ile alınan verilerin analizi spektrum analizi, yeryüzüne düşen global, direkt ve difüz radyasyon yoğunluğunun takibi ve aerosol optik kalınlığının hesaplanması şeklinde yapılmıştır. İkinci olarak Yenilenebilir Enerji Merkezi'nde bulunan 1 kW'lık fotovoltaik sistemin veri edinim cihazının vermiş olduğu günlük toplam amper-saat bilgilerinden yeryüzüne düşen günlük toplam solar radyasyon enerjisini hesaplamak üzere bir yaklaşım yapılmıştır.

Ölçümler 41,2188 enlemi 32,6681 boylamında yapılmıştır. Radyometre ile direkt radyasyon ölçümleri gölge oluşumunun kaybolmadığı ve radyometrenin güneşe hizalanmasının mümkün olduğu durumlarda yapılmıştır. NREL'in verdiği bilgiler doğrultusunda güneş bulutların arkasında olduğunda direkt radyasyon miktarı yaklaşık sıfırdır [17]. Global radyasyon ölçümü ise her durumda yapılmıştır.

6.1. RADYOMETRE İLE ALINAN VERİLERİN ANALİZİ

6.1.1. Spektrum Analizi

Spektrum analizinde Karabük'e düşen direkt radyasyon yoğunluğu miktarının spektrumun farklı dalgaboyları üzerindeki miktarları çalışılmıştır.

Spektrumun yeşil (500-578 nm), kırmızı (620-700 nm), mavi (446-500 nm), morötesi (280-400 nm), görünür (400-700 nm) ve yakın kızılötesi (700-1100) dalgaboyu bölgelerinde bulunan enerji miktarlarının tüm spektrum üzerindeki direkt radyasyon miktarına oranları ve bunların aylara göre değişimi çalışılmıştır. Bu amaçla Şubat ayından Mayıs ayına kadar her ayın güneşli bir gününde gün ortasının 2 saat öncesi ve 2 saat sonrasını kapsayacak şekilde saat 10:00 ile 14:00 arasında (yaz saati

uygulaması için 11:00 ile 15:00 arası) yapılan ölçümler değerlendirilmiştir. Analizlerde bu saatler içerisinde Karabük için oluşan maksimum ve minimum zenit açısı değerleri de NOAA tarafından sağlanan güneş pozisyonu hesaplama programına Karabük'e ait bilgiler girilmek suretiyle hesaplanmış ve kaydedilmiştir [41]. Hava kütlesi değerleri ise Denklem 3.1'de verilen eşitlik ile hesaplanmıştır.

6.1.1.1. Karabük İçin Aylık Spektrum Analizi

Aşağıda çizelgeler halinde verilen spektrum analizleri belirli dalgaboylarındaki radyasyonun tüm spektrumda bulunan direkt radyasyona oranlarının ortalama (Ort), standart sapma (SS) ve değişim katsayısı (DK) değerleri verilerek yapılmıştır. Değişim katsayısı Denklem 6.1'deki eşitlikten hesaplanmıştır. Çizelge 6.1'de ve Çizelge 6.2'de sırasıyla şubat ayı için spektrum analizi ve zenit açısı ile hava kütlesi değerlerinin ölçüm zamanları için aldığı minimum ve maksimum değerleri gösterilmektedir. Aynı analizler sırasıyla Çizelge 6.3 ve Çizelge 6.4'te Mart, Çizelge 6.5 ve Çizelge 6.6'da Nisan ve Çizelge 6.7 ve Çizelge 6.8'de Mayıs ayları için yapılmıştır.

$$DK = SS/Ort \quad (6.1)$$

Çizelge 6.1. Şubat ayını temsil eden ortalama bir güneşli gün için spektrum analizi.

	Dalgaboyu	Ort	SS	DK
Şubat	Yeşil	0,109	0,003	0,026
	Kırmızı	0,106	0,004	0,038
	Mavi	0,062	0,003	0,052
	Morötesi	0,019	0,002	0,087
	Görünür	0,368	0,006	0,015
	Kızılötesi	0,361	0,011	0,029

Çizelge 6.2. Şubat ayı ölçüm zamanlarında karşılaşılan zenit açısı ve hava kütlesi değerlerinin minimum ve maksimum değerleri.

Zenit Açısı (°)		Hava Kütlesi	
Maks.	Min.	Maks.	Min.
63,902	57,162	2,264	1,84

Çizelge 6.3. Mart ayını temsil eden ortalama bir güneşli gün için spektrum analizi.

	Dalgaboyu	Ort	SS	DK
Mart	Yeşil	0,112	0,002	0,015
	Kırmızı	0,111	0,003	0,03
	Mavi	0,067	0,001	0,021
	Morötesi	0,024	0,001	0,03
	Görünür	0,376	0,003	0,007
	Kızılötesi	0,357	0,01	0,028

Çizelge 6.4. Mart ayı ölçüm zamanlarında karşılaşılan zenit açısı ve hava kütlesi değerlerinin minimum ve maksimum değerleri.

Zenit Açısı (°)		Hava Kütlesi	
Maks.	Min.	Maks.	Min.
54,566	47,311	1,721	1,473

Çizelge 6.5. Nisan ayını temsil eden ortalama bir güneşli gün için spektrum analizi.

	Dalgaboyu	Ort	SS	DK
Nisan	Yeşil	0,12	0,013	0,106
	Kırmızı	0,114	0,01	0,09
	Mavi	0,066	0,004	0,064
	Morötesi	0,026	0,003	0,097
	Görünür	0,373	0,01	0,026
	Kızılötesi	0,346	0,015	0,045

Çizelge 6.6. Nisan ayı ölçüm zamanlarında karşılaşılan zenit açısı ve hava kütlesi değerlerinin minimum ve maksimum değerleri.

Zenit Açısı (°)		Hava Kütlesi	
Maks.	Min.	Maks.	Min.
43,107	32,973	1,368	1,191

Çizelge 6.7. Mayıs ayını temsil eden ortalama bir güneşli gün için spektrum analizi.

	Dalgaboyu	Ort	SS	DK
Mayıs	Yeşil	0,12	0,003	0,028
	Kırmızı	0,114	0,005	0,045
	Mavi	0,074	0,004	0,051
	Morötesi	0,03	0,001	0,031
	Görünür	0,389	0,007	0,018
	Kızılötesi	0,345	0,013	0,037

Çizelge 6.8. Mayıs ayı ölçüm zamanlarında karşılaşılan zenit açısı ve hava kütlesi değerlerinin minimum ve maksimum değerleri.

Zenit Açısı (°)		Hava Kütlesi	
Maks.	Min.	Maks.	Min.
35,144	24,167	1,222	1,096

Aylık spektrum analizi değerlerine bakıldığında Şubat ayından Mayıs ayına doğru güneş ışınlarının karşılaştığı hava kütlesi değerleri azalmakta ve buna bağlı olarak yeşil, kırmızı ve mavi dalgaboyu bölgeleri ve görünür dalgaboyunun tamamında direkt radyasyona oranlar artım eğilimi göstermektedir. Zenit açısı ve hava kütlesi değerinin azalması ile beraber yeryüzüne ulaşan morötesi radyasyon miktarı ise diğer dalgaboylarındaki yüzde değişime oranla daha dikkat çekici bir artış göstermektedir. Kızılötesi dalgaboyunda bulunan radyasyon miktarının tüm spektrumdaki miktara oranı ise hava kütlesi değerinin azalması ile beraber azalma eğilimindedir.

Çizelge 6.9’da aylık yapılan ölçümlerin tamamı değerlendirilmek sureti ile farklı spektral bölgelerde bulunan direkt radyasyon miktarlarının tüm spektral bölgedeki (200-2500nm) direkt radyasyon miktarına oranları çıkarılmıştır. Çizelge 6.10’da gösterildiği üzere bu ölçümlerin yapıldığı maksimum ve minimum zenit açısı değerleri ve hava kütlesi değerinin maksimum ve minimum değerleri gösterilmektedir.

Çizelge 6.9. Spektral aralıklardaki radyasyonun tüm spektrumdaki (200-2500nm) radyasyona oranları.

	Ort	SS	DK
Yeşil	0,116	0,009	0,078
Kırmızı	0,113	0,01	0,088
Mavi	0,068	0,006	0,088
Morötesi	0,024	0,004	0,167
Görünür	0,385	0,025	0,065
Kızılötesi	0,366	0,028	0,077

Çizelge 6.10. Tüm ölçüm zamanlarında karşılaşılan zenit açısı ve hava kütlesi değerlerinin minimum ve maksimum değerleri.

Zenit Açısı (°)		Hava Kütlesi	
Maks.	Min.	Maks.	Min.
63,902	24,167	2,264	1,096

Çizelge 6.9'daki verileri şu şekilde okuyabiliriz. Yeşil dalga boyunun tüm spektrumdaki direkt radyasyondaki miktarı %11,6'dır. Bu değer m (hava kütlesi) 2,26 ile 1,09 arasındaki ölçümlerdeki standart sapması %0,9'dur. Değişim katsayılarının morötesinden kızılötesi dalgaboyu bölgesine doğru gittikçe değerlerine bakıldığında bir azalma eğilimi olduğu görülmektedir. Bunun sebebi m 1'e yaklaştıkça spektrumun maksimum değer aldığı noktanın mavi spektrum bölgesine doğru kaymasıdır. Buda morötesindeki günlük değişimin en fazla ve bu değer spektrumun uzun dalgaboylu taraflarına gittikçe azalma eğiliminde olduğunu göstermektedir.

6.1.1.2. Spektrum Analizinin Literatürdeki Verilerle Karşılaştırılması

Jakovides vd. (1993), Atina'da 1977 ile 1990 arasında çeşitli spektral aralıklardaki radyasyon miktarının tüm spektrumdaki radyasyon miktarına oranlarını veri setini 1977-1983 (Çizelge 6.11) ve 1984-1990 (Çizelge 6.12) olmak üzere iki parçaya bölerek analiz etmişler ve literatürdeki verilerle (Çizelge 6.13) kıyaslamışlardır [1]. Bu veriler pahalı ve kompleks cihazlar olan "pirheliometre" ve spektral seçici optik filtreler kullanmak sureti ile alınmıştır.

Çizelge 6.11. 1977-1983 verileri için Jakovides vd. sonuçları [1].

Spektral Aralık(nm)	Ort	SS	DK
380-525 (Mavi)	0,204	0,060	0,295
525-630 (Yeşil-Turuncu)	0,160	0,041	0,259
630-710 (Kırmızı)	0,091	0,021	0,231
380-710 (PAR)	0,455	0,042	0,092

Çizelge 6.12. 1984-1990 verileri için Jakovides vd. sonuçları [1].

Spektral Aralık(nm)	Ort	SS	DK
380-525 (Mavi)	0,246	0,038	0,155
525-630 (Yeşil-Turuncu)	0,166	0,019	0,114
630-710 (Kırmızı)	0,089	0,018	0,204
380-710 (PAR)	0,501	0,032	0,064

Çizelge 6.13. Jakovides vd. kendi çalışmaları ile literatürdeki çalışmaların kıyaslanması [1].

Referans	Mavi 380-525 nm	Yeşil-Turuncu 525-630 nm	Kırmızı 630-710 nm	Görsel (PAR) 380-710 nm	Bölge
Goldberg ve Klein (1977)	-	-	-	0,450	Kudüs Rockville Barrow
Blackburnve Proctor (1983)	-	-	-	0,470 0,450 0,540	Guelph, Canada
Kvifte vd. (1983)	0,207 0,179	0,215 0,200	0,146 0,094	0,460 0,48	Nordic Ülkeleri
Rodjsker (1983)	-	-	0,080 -	0,457 0,473	Utuna, İsveç
Rao (1984)	0,222	0,149	0,086	0,457	Corvallis, Oregon
Jakovides vd. (1977-1983)	0,218	0,163	0,092	0,473	Atina, Yunanistan
Jakovides vd. (1984-1990)	0,254	0,168	0,091	0,513	Atina, Yunanistan

Bu çizelgelere göre Karabük için çıkarılan veriler ile literatürdeki verilerden kırmızı ve görünür bölgedeki verileri kıyaslayabiliriz. Çizelge 6.9'a göre Karabük'te yapılan ölçümlerde kırmızı dalga boyunun ortalama oranı, standart sapması ve değişim katsayısı sırasıyla %11,3, %1,0, %8,8'dir. Atina için yapılan ölçümlerin sonuçları ise sırasıyla 1977-1983 verileri için %9,1, %2,1 ve %23,1 ve 1984-1990 verileri için sırasıyla %8,9, %1,8 ve %20,4'dir. Ortalama değerlerde bulunan farklılığın temel sebebi olarak her iki ölçümdeki 10 nm'lik spektral kayma, Atina'da yapılan

ölçümlerde sadece saat 11:20 ve 14:20'deki verilerin esas alınması ve güneşin daha tepe noktalarda bulunduğu öğle saatlerinde veriler alınmaması, deniz seviyesinden yükseklik, her iki şehrin bulunduğu mikroiklim ve hava kirliliği şartları düşünülebilir. Bunların yanı sıra oranlamanın Atina için yapılan ölçümlerde 300-2800 nm dalgaboyu aralığına göre, Karabük için yapılan ölçümlerde ise 280-2500 nm'ye göre yapılması Karabük'teki oranların biraz daha yüksek çıkmasına sebep olmaktadır.

Görünür bölge için Karabük'te yapılan ölçümlerin sonuçları ortalama değer standart sapma ve değişim katsayısı olarak sırasıyla %38,5, %2,5 ve %6,5'dir. Jakovides vd. ise 1977-1983 tarihlerini kapsayan veri seti için sırasıyla %45,5, %4,2 ve %9,2 ve 1984-1990 tarihlerini kapsayan veri seti için %50,1, %3,2 ve %6,4'tür [1].

Shaltout vd. (1994), morötesi solar radyasyonu ölçmüşler ve 30° enlemdeki Kaire için morötesi radyasyonun toplam radyasyona oranının kışın %2,7 ve yazın %3,4'e değiştiğini ve 23,5° enlemindeki Aswan için bu durumun tersine kışın %3,9'dan yazın %3,5'e düştüğünü belirtmişlerdir [5]. Karabük için yapılan ölçümlerde morötesi miktarı %2,4 olarak ölçülmüştür. Ayrıca güneş'in gökyüzünde daha tepede olduğu zamanlar için bu miktarın %3,0'a kadar çıktığı ölçülmüştür.

Hansen yaptığı çalışmada (1984), 59,7° enlemindeki bir bölge için mavi spektrum(385-495 nm) bölgesini kış mevsimi için %14 olarak belirtmiştir. Karabük için mavi bölge (446-500nm) için ölçülmüş ve %6,8 olarak ölçülmüştür. Yeşil-turuncu spektrum bölgesini (495-630nm) Mart ayı için %21,8 olarak belirtmiştir [42]. Bu oran içinde sadece yeşil dalgaboyunun miktarı doğrusal orantı ile yaklaşık %12,42'dir. Karabük için yapılan ölçümlerde bu miktar %11,6 olarak bulunmuştur. Kızılötesi spektrum miktarını 695-2800 nm aralığı için Mart ayına ilişkin olarak %52,9 olarak vermiştir. Karabük için yakın kızılötesi spektrum miktarı 700-1100 nm arası için ölçülmüş ve oranı %36,6 olarak bulunmuştur.

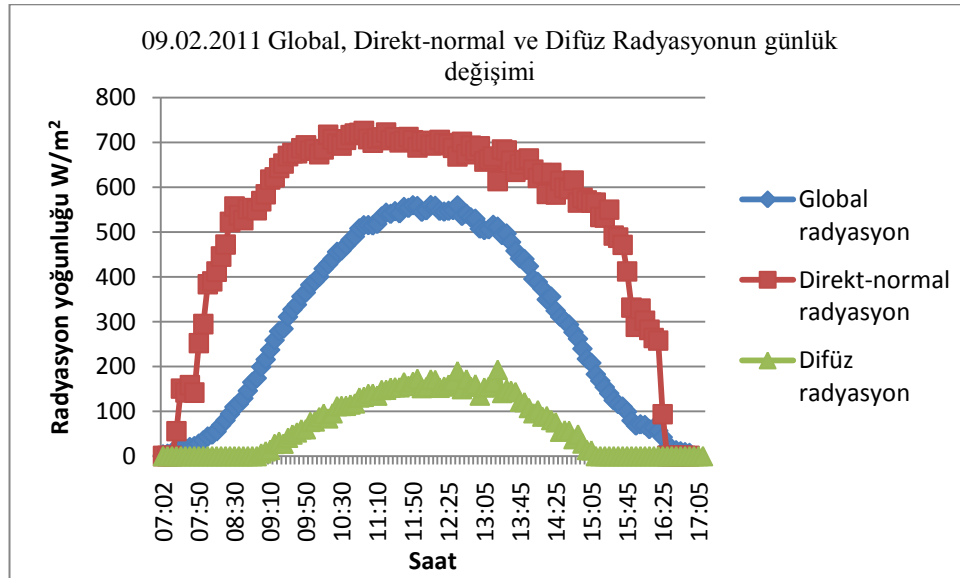
Tek kristal silikon fotovoltaik piller spektrumun 300-1100 nm arasına duyarlıdır. 300-1100 nm arasındaki ölçümleri topladığımızda güneşten gelen enerjinin %75,1'nin bu aralıkta olduğu sonucu ortaya çıkar.

6.1.2. Radyasyon Yoğunluğu Miktarlarının Günlük Değişimlerinin Takibi

Radyometre ile yapılan günlük ölçümler ile farklı dalgaboylarındaki radyasyon yoğunluğu miktarları, tüm spektrumdaki direkt radyasyon yoğunluğu miktarının ve global radyasyon yoğunluğu miktarının günlük değişimlerini takip etmek mümkündür.

6.1.2.1. Direkt-normal, Toplam ve Difüz Radyasyonların Günlük Değişimlerinin Takibi

Çok küçük bulutlanmalar dışında güneşin önüne gün boyunca bulutların gelmediği 9 Şubat 2011 gününe ilişkin toplam, direkt-normal ve difüz radyasyon miktarlarının gün boyu değişimleri 5 dakikada bir yapılan ölçümler ile çıkarılmış olup Şekil 6.1'deki gibidir.



Şekil 6.1. 09.02.2011'de Karabük için güneşlenme eğrileri.

Radyometre ile difüz radyasyon ölçümü yapılamamaktadır. Ancak Denklem 6.2'deki eşitlikle direkt-normal ve global radyasyon değerlerinden hesaplanarak elde edilmiştir.

$$E_{Difüz} = E_{Global} - E_{DirektNormal} * \cos Z \quad (6.2)$$

Çizelge 6.14. 09.02.2011 global, direkt ve difüz radyasyon miktarları.

Saat	m	Zenit(°)	Global(W/m ²)	Direkt-Normal(W/m ²)	Difüz(W/m ²)	Difüz/Global
10:00	2,18	62,80	395,04	686,43	81,31	0,21
10:05	2,14	62,29	405,17	675,42	91,07	0,22
10:10	2,11	61,79	423,25	686,11	98,89	0,23
10:15	2,08	61,31	433,52	718,59	88,50	0,20
10:20	2,05	60,84	445,07	708,18	100,03	0,22
10:25	2,02	60,40	461,19	698,70	116,03	0,25
10:30	1,99	59,97	464,36	694,70	116,68	0,25
10:35	1,97	59,56	475,42	707,48	116,99	0,25
10:40	1,95	59,17	487,97	718,03	120,02	0,25
10:45	1,93	58,81	495,99	721,05	122,53	0,25
10:50	1,91	58,46	514,00	722,63	135,97	0,26
10:55	1,89	58,13	521,24	726,77	137,52	0,26
11:00	1,87	57,83	521,56	708,97	144,04	0,28
11:05	1,86	57,54	520,81	701,02	144,58	0,28
11:10	1,85	57,28	524,34	710,69	140,19	0,27
11:15	1,83	57,04	540,99	713,06	153,05	0,28
11:20	1,82	56,82	549,59	723,70	153,55	0,28
11:25	1,81	56,63	546,95	706,65	158,24	0,29
11:30	1,81	56,46	552,94	712,59	159,18	0,29
11:35	1,80	56,31	548,20	701,53	159,03	0,29
11:40	1,79	56,18	562,46	704,14	170,58	0,30
11:45	1,79	56,08	560,36	713,38	162,28	0,29
11:50	1,78	56,00	566,35	706,46	171,34	0,30
11:55	1,78	55,95	564,67	690,43	178,09	0,32
12:00	1,78	55,92	551,59	703,72	157,25	0,29
12:03	1,78	55,91	554,94	705,11	159,76	0,29
12:05	1,78	55,91	566,63	695,40	176,90	0,31
12:10	1,78	55,93	565,10	695,40	175,55	0,31
12:15	1,78	55,97	553,76	707,20	158,02	0,29
12:20	1,79	56,04	552,01	700,23	160,84	0,29
12:25	1,79	56,13	553,8	697,35	165,13	0,30
12:30	1,80	56,24	555,47	689,08	172,55	0,31
12:35	1,80	56,38	566,17	670,17	195,08	0,34
12:40	1,81	56,54	542,28	702,60	154,86	0,29
12:45	1,82	56,72	547,02	674,72	176,78	0,32
12:50	1,83	56,93	538,93	693,87	160,26	0,30
12:55	1,84	57,15	535,93	682,81	165,59	0,31
13:00	1,85	57,40	513,61	693,08	140,25	0,27
13:05	1,87	57,68	510,36	658,74	158,14	0,31
13:10	1,88	57,97	511,97	663,39	160,15	0,31
13:15	1,90	58,29	522,13	669,94	169,98	0,33
13:20	1,92	58,62	517,92	614,92	197,77	0,38
13:25	1,94	58,98	499,06	685,55	145,79	0,29
13:30	1,96	59,36	502,55	683,37	154,28	0,31
13:35	1,98	59,76	483,37	660,51	150,70	0,31
13:40	2,00	60,17	463,61	635,46	147,56	0,32
13:45	2,03	60,61	446,39	652,84	126,01	0,28
13:50	2,06	61,07	444,96	662,04	124,66	0,28
13:55	2,09	61,54	428,74	665,38	111,63	0,26
14:00	2,12	62,03	400,1	640,57	99,66	0,25

Şekil 6.1'e bakıldığında global radyasyon direkt radyasyon ve difüz radyasyonun toplamı olduğu halde direkt-normal radyasyonun nasıl global radyasyondan büyük olduğu sorulabilir. Burada iki farklı terim söz konusudur. Global radyasyona etki eden direkt radyasyon, direkt-normal radyasyon ile zenit açısının kosinüsünün çarpımına eşittir. Direkt-normal radyasyon takip edici dedektörlerle ölçülürken, global radyasyonu ölçen cihazlar ise direkt radyasyonun normali ile belirli bir açıda bulunur. Dolayısıyla zenit açısının yıllık değişimine bağlı olarak direkt normal radyasyon zaman zaman global radyasyondan küçük iken zaman zamanda büyük olabilir. Şekil 6.1'de görüldüğü üzere radyometre ile global, direkt-normal ve difüz radyasyonların değişiminin günlük takipleri yapılabilmektedir.

Çizelge 6.14'te 09.02.2011 tarihinde saat 10:00 ile 14:00 arasında yapılan direkt ve global radyasyon ölçümleri verilmiştir. Bu zaman dilimi için saatte ortalama 510 W-h/m² enerji global radyasyon olarak, takip edici yüzeyler için direkt radyasyon olarak 691,2 Wh/m² enerji ve difüz radyasyon olarak 145,2 W-h/m² enerji yeryüzüne ulaşmaktadır.

6.1.3. Aerosol Optik Kalınlığının Ölçülmesi

Radyometrenin tasarımı sırasında faydalanılan ve Mims tarafından yapılan güneş fotometre cihazı aerosol optik kalınlığının (AOD) ölçümü için tasarlanmıştır. Bu cihaz ile ilgili tasarım, kalibrasyon ve AOD ölçümü için gerekli bilgiler kaynaklar [10, 11, 43] ve AOD'in değişiminin Dünya çapında izlenmesi için oluşturulan GLOBE programı tarafından ölçümlere ilişkin protokol kaynak [44]'te bulunabilir.

Tezin amacı güneş enerjisi ve spektral radyasyon miktarlarının ölçülmesi olmakla beraber cihaz tarafından yapılan yeşil, kırmızı ve mavi dalgaboyundaki ölçümlerden ilgili dalgaboylarındaki AOD'nin hesaplanması mümkündür. Karabük Üniversitesi Yenilenebilir Enerji Mühendisliği Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde yapılacak çalışmalarda kullanılabilmesi için örnek bir hesaplama bu bölüme konulacaktır.

6.1.3.1. Aerosol Optik Kalınlığı

Atmosfer gaz moleküllerinden, aerosol olarak adlandırılan ve havada asılı halde bulunan katı ve sıvı parçacıklardan oluşur. Aerosoller rüzgârın sürdüğü yüzey toprağından, kum fırtınalarından, volkan patlamalarından doğal olarak oluşabileceğı gibi biyokütle ve fosil yakıtların yakımından kaynaklanan insanoğlu kaynaklıda oluşabilir. Su buharı donduğunda veya yoğunlaştığında oluşan buz kristalleri ve su damlları da aerosoldür. Aerosoller yeryüzüne ulaşan güneş ışığı miktarını etkilediğinden hava ve iklim şartlarımızı etkiler. Diğer atmosferik ölçümler ile beraber aerosol ölçümleri atmosfer kimyasını anlamak ve iklimi daha iyi anlayıp tahmin edebilmek için bilim adamlarına yardım eder. Aerosol optik kalınlığının ölçümü atmosfer boyunca güneş ışığının geçişini etkileyen aerosollerin boyutunun ölçümüdür. Belirli bir dalgaboyundaki daha geniş AOD, bu dalgaboyunda yeryüzüne ulaşan daha az radyasyon demektir. Birden çok dalgaboyunda AOD'nin ölçümü atmosferdeki aerosollerin değışkenliğı, boyut dağılımı ve konsantrasyonu hakkında önemli bilgi verir. Bu bilgiler aerosollerin değışimi ve dünya üzerindeki dağılımını anlamak ve iklim çalışmaları için önemlidir [44].

6.1.3.2. Aerosol Optik Kalınlığının Hesaplanması

Bir dalgaboyundaki aerosol optik kalınlığının ölçümü Denklem 6.3'te verilen eşitlikle hesaplanır [44].

$$AOD = \frac{\ln\left(\frac{E_0}{R^2}\right) - \ln(E) - a_R\left(\frac{p}{p_0}\right)m}{m} \quad (6.3)$$

Burada AOD : Aerosol optik kalınlığı (Rayleigh moleküler saçılmayı içermeyen)

E_0 : İlgili dalgaboyunda atmosfer dışındaki radyasyon yoğunluğu (W/m^2)

R : Dünya-Güneş mesafesi (AU)

E : Gözlemci tarafından ilgili dalgaboyunda yeryüzünde ölçülen radyasyon yoğunluğu (W/m^2)

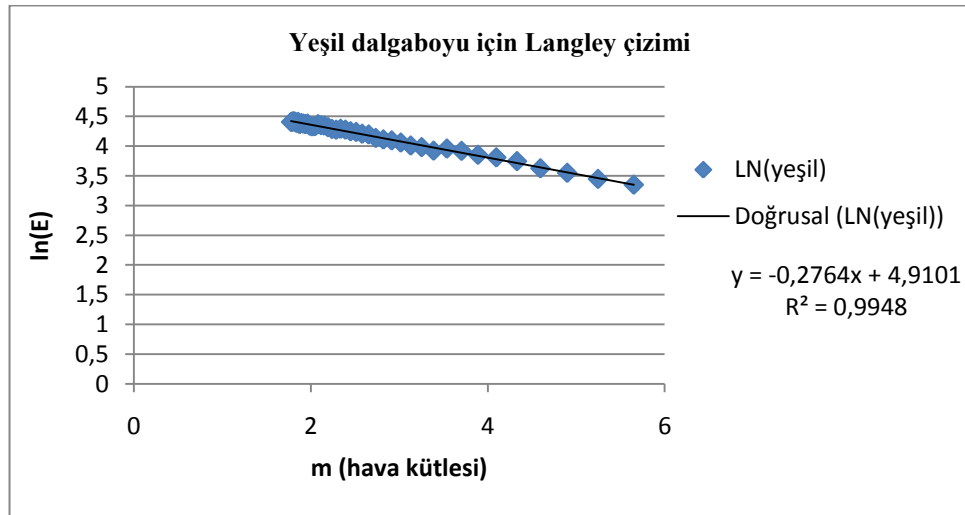
a_R : Rayleigh optik kalınlığı (ilgili dalgaboyundaki moleküler saçılma, yeşil dalgaboyu için $a_R=0,13813$ 'dir.)

- p : Gözlemcinin ölçüm yaptığı bölge için basınç (mbar)
 p₀ : Deniz seviyesindeki basınç (1013,25 mbar)
 m : Hava kütlesi

E₀ atmosfer dışı sabiti belirlemek için standart yaklaşım Langley metodudur (Abbon ve Fowle tarafından tanımlandığı haliyle Denklem 6.4, 1908). Bu metoda göre ilgili dalgaboyunda ölçüm yapan dedektör çıkışlarının logaritması nisbi hava kütlesinin bir fonksiyonu olarak çizilir [44].

$$\ln(E) = \ln\left(\frac{E_0}{R^2}\right) - a_\lambda m \quad (6.4)$$

Langley çizimi hava kütlesi değerlerinin belirli bir aralığında (genellikle m<6) temiz bir gökyüzünün (renk olarak mavi olan, kızılık ve açık maviye çalan beyaz rengin bulunmadığı bir bulutsuz gökyüzü) bulunduğu bir günde sabahtan öğlene veya öğleden akşama kadar yapılan ölçümlerle yapılır. Bu verilerin lineer regresyonu ile elde edilen çizginin eğimi toplam atmosferik optik kalınlığı (a_λ) ve hava kütlesi değerinin m=0 olduğu durumda dikey eksenle kesiştiği nokta atmosfer dışı sabitin ölçüm günündeki Dünya-Güneş mesafesi için ln(E₀/R²) logaritmasını verir [43].



Şekil 6.2. Yeşil dalgaboyu için Langley çizimi.

Langley çiziminin yapılabilmesi için temiz bir gökyüzü kullanılmış ve 12 Şubat 2011’de tarif edilen hava şartlarına uygun bir günde sabahtan öğlene kadar ilgili ölçümler yapılarak Şekil 6.2’de olduğu gibi yeşil dalgaboyu için Langley çizimi yapılmış ve E_0 değeri çıkarılmıştır.

Ölçüm gününe ilişkin Dünya-Güneş mesafesinin AU cinsinden değeri Denklem 6.5’te verilmiştir.

$$R = \frac{1 - \varepsilon^2}{[1 + \varepsilon \cos (360 \cdot \frac{d}{365})]} \quad (6.5)$$

Burada ε : Eksantrik kayma ($\varepsilon = 0,0167$)
 d : Ölçüm gününün sayısı

Denklem 6.5’e göre R hesaplandığında $R=0,9875$ olarak bulunur. Atmosfer dışı sabit ise $\ln(E_0/0,9875) = 4,9101$ ’den $E_0 = 132,28 \text{ W/m}^2$ olarak bulunur.

Örnek bir hesabı yeşil dalgaboyu için Denklem 6.3’ü kullanarak yapabiliriz. 9 Şubat 2011’de gün ortasında (saat 12:03) yeşil dalgaboyunda $E=75,6 \text{ W/m}^2$ olarak ölçülmüştür. Saat 12:00 için Karabük’teki basınç değeri Devlet Meteoroloji İşlerinin internet sayfasından bakılmış ve 1017,2 mb olarak okunmuştur. Saat 12:03 için $m=1,78047$ olarak hesaplanmıştır. İlgili değerleri Denklem 6.3’de yerine koyduğumuzda;

$$AOD = \frac{\ln\left(\frac{132,28}{0,9875}\right) - \ln(75,604) - 0,13813 \left(\frac{1017,2}{1013,25}\right) 1,78047}{1,78047}$$

$$AOD = 0,1902$$

olarak hesaplanmıştır. GLOBE protokolü tarafından verilen tabloya göre yeşil dalgaboyunda hesaplanan bu AOD değeri “Biraz puslu” olarak sınıflandırılan değerler arasındadır.

Mims tarafından geliştirilen ve GLOBE programıyla standartlaştırılan bu ölçümlerin yapıldığı LED tabanlı güneş fotometre cihazı yeşil ve kırmızı dalgaboylarındaki AOD ölçümünde kullanılır. Fark edilebilir puslu bir gökyüzü, yeşil dalgaboyunda daha yüksek aerosol optik kalınlığına sahiptir. Kırmızı dalgaboyu ise daha geniş aerosollere daha duyarlıdır. Tek bir dalgaboyundan alınan veriler bu dalgaboyundaki AOD'nin hesaplanmasını mümkün kılmakla beraber, bu durum aerosollerin boyut dağılımı hakkında bilgi vermez. Birden çok dalgaboyunda veriler almak boyut dağılımı hakkında bilgi verir. Boyut dağılımını bilmekte aerosollerin kaynağını tanımlamada yardımcı olur. Açık havada görünür ışık için AOD tipik değeri kabaca 0,1'dir. Çok açık bir gökyüzü yeşil ışık dalgaboyunda yaklaşık 0,05 veya daha az AOD değerine sahiptir. Çok puslu gökyüzü AOD 0,5 veya daha büyük değerler alabilir [44].

GLOBE programı Dünya genelinde aerosol dağılımını ve yıllık değişimini tespit etmek amacıyla solar gün ortasında yıllar boyu yapılan ölçümlerin alınmasını hedeflemektedir.

6.2. KARABÜK ÜNİVERSİTESİ YENİLENEBİLİR ENERJİ ARAŞTIRMA VE UYGULAMA MERKEZİNDE BULUNAN 1 KW'LIK FOTOVOLTAİK SİSTEMİN ÇIKIŞ AKIM VE GERİLİM DEĞERLERİNİN ANALİZİ

Karabük Üniversitesi Yenilenebilir Enerji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nin çatısında yer alan Şekil 6.3'te görülen 1 kW'lık her biri 2 modüle sahip olan 4 dizinden oluşan 8 adet modüle sahip olan fotovoltaik sistemden alınan ölçümlerin analizi aşağıda anlatılacağı şekliyle yapılmıştır.

Modüllerin IEC 61215 standartlarına göre hava kütlesi 1,5, 25 °C, 1000 W/m² şartlarında belirlenmiş değerleri Çizelge 6.15'te gösterilmektedir. Bu çizelgedeki bilgilerden yola çıkarak iki tane yaklaşım ile modüller üzerine düşen solar radyasyon miktarları ölçülmüştür. Bu yaklaşımlar modül kısa devre akım ve/veya açık devre gerilim değerlerini kullanarak modül üzerine düşen solar radyasyon miktarını hesaplamaya dayanır. Bu amaçla dört dizinden oluşan sistemden birbirine seri olan

iki modül içeren bir dizin tüm sistemden ayrılmış ve bu dizinin kısa devre akım ve gerilim değerleri 7 gün boyunca saat 9-15 arası yarım saatlik periyotlarla ve 2 gün boyunca da 5 dakikalık periyotlarla ölçülmüştür. Bu ölçümlerden 40° eğimli güneşe bakan 1 m²'lik bir yüzeye düşen solar radyasyon miktarları hesaplanmıştır.



Şekil 6.3. KBÜ Yenilenebilir Enerji Merkezi'nde bulunan 1 kW'lık sistem.

Çizelge 6.15 IBC PolySol 130 GC modül karakteristikleri.

Maksimum Güç P_{MP} (W)	130
Açık Devre Gerilimi V_{OC} (V)	21,9
Kısa Devre Akımı I_{SC} (A)	7,90
Maksimum Güçteki Gerilim V_{MP} (V)	18,0
Maksimum Güçteki Akım I_{MP} (A)	7,23
Modül Verimi	%12,94
Doldurma Faktörü (FF)	%75,22
Güç Toleransı	%±2,5
Hücre Tipi	Çok kristal
Hücre Sayısı	36
Boyutlar	150x67 cm ²
Panel Boyutu	1 m ²
Aktif Hücre Boyutu	0,8649 m ²

6.2.1. Birinci Yaklaşım: Modül Kısa Devre Akımlarından Solar Radyasyon Yoğunluğunun Hesaplanması

Bu yaklaşıma göre IEC 61215 test standartlarında modül için belirlenmiş kısa devre akımından radyasyon yoğunluğu miktarı (W/m²) türetilmiştir. Standart test şartlarında modül için verilen kısa devre akımı $I_{SC} = 7,90$ A olarak ölçülmüştür. Bir modülün aktif alanı 0,8649 m²'dir. Buna göre modülün duyarlılığı (S) aşağıdaki şekilde belirlenebilir.

$$1000 \frac{W}{m^2} \text{ radyasyonda} \quad 0,8649 \text{ m}^2 \text{ aktif alan} \quad I_{SC} = 7,90 \text{ A verirse}$$

$$1 \frac{W}{m^2} \text{ radyasyonda} \quad 1 \text{ m}^2 \text{ aktif alan} \quad S$$

$$S = 9,134 \text{ mA}/(W/m^2)$$

olarak bulunmuş olur. Dolayısıyla modül için ölçülen kısa devre akımları verilen Denklem 5.1'de bulunan ifadedeki S değerine bölünmek sureti ile modül yüzeyine ulaşan global radyasyon yoğunluğu miktarı hesap edilir. Örnek bir hesap burada belirtilecek olursa; modül kısa devre akımı 2 Mayıs'ta saat 12'de $I_{SC}=7,79 \text{ A}$ olarak ölçülmüştür. Bu durumda anlık solar radyasyon Denklem 5.1'den $E_{Güneş} = 7,79/0,009134 = 852,8 \text{ W/m}^2$ olarak hesaplanır. Çizelge 6.16'da Mayıs ayındaki 9 gün boyunca saat 9-15 arası yapılan ölçümlerden hesaplanan değerler sunulmaktadır.

Çizelge 6.16. Mayıs ayı için farklı günlerde yapılan ölçümlerden birinci yaklaşıma göre hesaplanan solar radyasyon değerleri.

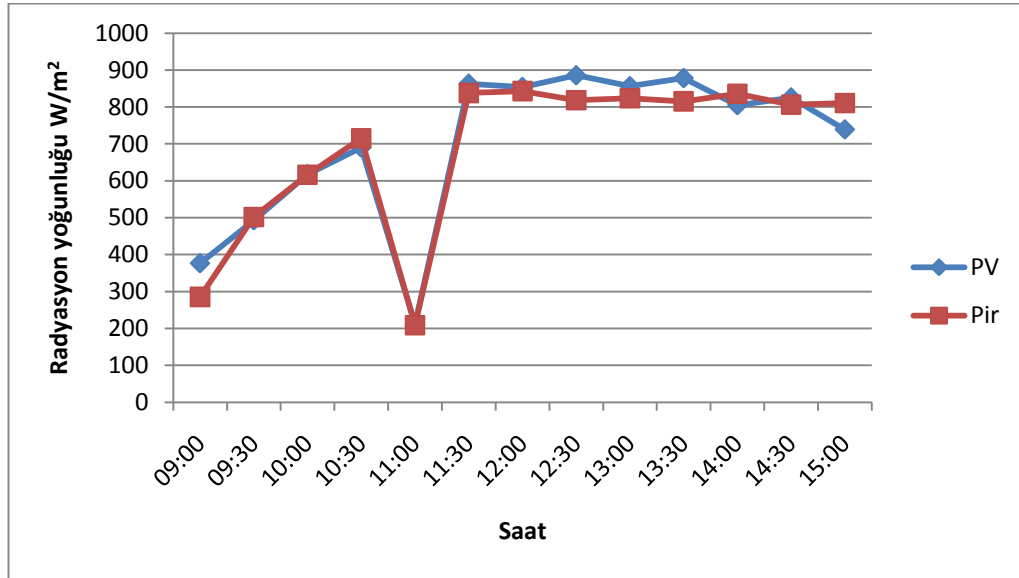
Tarih	Ortalama I_{SC} (A)	9-15 arası toplam solar enerji (kWh/m^2)	Hava Durumu
02.05.2011	4,625	3,143	Öğlene kadar güneşli, öğleden sonra kapalı
03.05.2011	4,192	2,851	Parçalı bulutlu
04.05.2011	3,325	2,202	Bulutlu
05.05.2011	1,675	1,153	Tüm gün bulutlu
06.05.2011	0,802	0,524	Tüm gün bulutlu
10.05.2011	6,390	4,268	Tüm gün güneşli
11.05.2011	4,178	2,863	Öğlene kadar güneşli, öğleden sonra parçalı bulutlu
25.05.2011	5,478	3,599	Öğlene kadar güneşli, öğleden sonra parçalı bulutlu
26.05.2011	5,090	3,369	Öğlene kadar güneşli, öğleden sonra parçalı bulutlu

Çizelge 6.16'nın üçüncü sütununda 9-15 arası 40° eğimli güneye bakar bir yüzeye düşen toplam solar radyasyon enerjisi miktarları bulunmaktadır. Bu değerler saat 9-15 arası belirli periyotlarla ölçülen I_{SC} değerlerinden yukarıda anlatıldığı şekliyle hesaplanan solar radyasyon değerlerinin integre edilmesiyle hesaplanmıştır.

6.2.1.1. Radyometrenin Piranometre Ölçümlerinin IEC 61215 Standartlarına Göre Özellikleri Belirlenen Bir PV Dizinin Çıkışı İle Kıyaslanması

Radyometrenin piranometre (toplam radyasyon) ölçümlerinin güvenilirliğini tespit etmek amacıyla; 7 gün boyunca saat 09:00 ile 15:00 arasında yarım saatlik periyotlar ile ölçülen kısa devre akımlarından birinci yaklaşıma göre türetilmiş radyasyon yoğunluğu değerleri ile radyometrenin piranometre kısmıyla ölçülen radyasyon yoğunluğu ölçümleri kıyaslanmıştır.

Yedi gün boyunca belirtilen zaman dilimleri içerisinde yapılan 94 ölçüm sonucunda piranometre ölçümlerinin modül kısa devre akımlarından türetilen radyasyon değerlerine ortalama farkları %1 ve bu ortalamanın standart sapması %7,1'dir. Bu farkın sebebini fotovoltaik sistem ile piranometre dedektörünün açılmal ve spektral cevaplarının tamamen aynı olmaması gösterilebilir. Bu ölçümlerden bir güne ait olan veriler Şekil 6.4'te grafik olarak verilmiştir.



Şekil 6.4. 10.05.2011'de piranometre ile modül çıkış değerlerinin kıyaslanması.

6.2.1.2. Fotovoltaik Sistemin Veri Toplayıcısından Alınan Verilerin Birinci Yaklaşımına Göre Solar Radyasyon Değerlerine Dönüştürülmesi

Fotovoltaik sistemden gelen enerjinin akülere depolanmasını sağlayan CX40N şarj kontrolör aynı zamanda veri toplayıcı fonksiyonuna sahiptir.

Day1 is the latest:	Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Day 5	Day 6	Day 7
Max Battery Voltage	29,5	29,3	26,8	28,9	29	29,3	29,1
Min Battery Voltage	25,4	25,1	24,5	24,5	24,6	25	24,9
State Of Battery Charge in % morning	79	73	40	40	40	79	59
State Of Battery Charge in % evening	92	99	86	73	73	59	100
Used PV Amperehours	11	24	29	56	59	24	21
PV Excess Amperehours	72	3	0	32	83	99	133
max PV current in A	25,6	12,5	9,4	22,5	21,9	21,9	21,2
max Load current in A	0	0	0,6	1,2	0,6	0,6	0

Şekil 6.5. Veri edinim sisteminin ekran görüntüsü.

Bu veri toplayıcı Şekil 6.5'te gösterilen ekran çıktısına sahip olup fotovoltaik dizinlerden gelen akım değerini Fazlalık (Excess) ve Kullanılan (Used) olarak iki sütunda günlük bazda Ah cinsinden vermektedir. Bu iki değer toplamından 40° eğimli yüzeye düşen solar radyasyon miktarının birinci yaklaşıma göre hesabı yapılabilir.

Bu amaçla dokuz gün boyunca yapılan ölçümlerde kısa devre akımlarının ölçüldüğü anlarda şarj kontrolörün değerleri de okunarak kaydedilmiştir. Kısa devre akımı değerleri ile şarj kontrolörün değerleri arasındaki ilişki aranmış ve yapılan 243 ölçüm sonucunda şarj kontrolörün verdiği akım değerlerinin kısa devre akımlarının ortalama olarak 2,712 katı olduğu görülmüştür. Bu katsayı içim hesaplanan standart sapma 0,25'dir. Çizelge 6.17'de şarj kontrolörün veri toplayıcısından alınan değerlerden; birinci sütunda "Fazlalık fotovoltaik akımı", ikinci sütunda "Kullanılan fotovoltaik akımı" ve üçüncü sütunda ise ilk iki sütundaki değerden birinci yaklaşım kullanılarak elde edilen Denklem 6.6'ya göre hesaplanan 40° eğimli yüzeye günlük düşen toplam solar radyasyon enerjisi miktarları verilmiştir.

Çizelge 6.17. Bir haftalık günlük toplam fotovoltaik dizin akımları ve solar enerji miktarları.

Tarih	Fazlalık Akım (Ah)	Kullanılan Akım (Ah)	Toplam solar enerji (kWh/m ²)	Hava Durumu
10 Mayıs	13	131	5,814	Gün boyu güneşli
11 Mayıs	29	51	3,23	Sabahtan Güneşli, öğleden sonra yağmurlu ve bulutlu
12 Mayıs	80	13	3,755	Kapalı ve yağmurlu
13 Mayıs	21	24	1,817	Gün boyu kapalı, bulutlu
14 Mayıs	35	35	2,826	14'e kadar kapalı, sonra güneşli
15 Mayıs	99	29	5,168	Parçalı bulutlu
16 Mayıs	133	21	6,217	Gün boyu güneşli

$$E_{Güneş} = (I_{Fazlalık} + I_{Kullanılan}) / (2,712 * S) \quad (6.6)$$

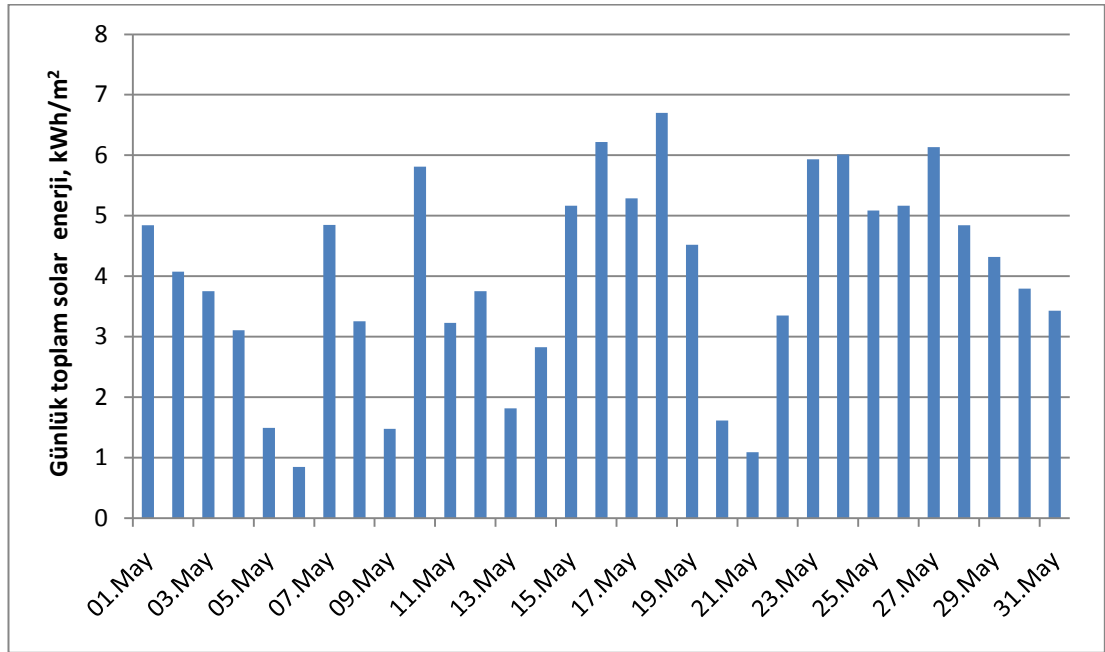
Burada $I_{Fazlalık}$: Veri toplayıcı tarafından verilen günlük toplam Fazlalık (Fotovoltaik dizinler bu akımı üretiyor ancak şarj kontrolör bu akımı aküleri şarj etmede kullanmıyor) fotovoltaik dizin akımı (Ah)

$I_{Kullanılan}$: Veri toplayıcı tarafından verilen günlük toplam Kullanılan fotovoltaik dizin akımı (Ah)

S : Fotovoltaik modüllerin duyarlılığı $S=0,009134 \text{ A/(W/m}^2\text{)}$

Bu yaklaşımla şarj kontrolör tarafından sağlanan fotovoltaik dizin akımı değerlerinden 40° eğimli güneşe bakan 1 m²'lik bir yüzeydeki günlük toplam solar radyasyon enerjisi miktarlarının hesaplanması mümkün olmuştur. Bu şekilde yıllar boyu alınan veriler daha sonra değerlendirilerek ileride Karabük'te yapılacak fotovoltaik güneş enerjisi yatırımcıları için fizibilite çalışmalarında yardımcı olunabilecektir. Bölüm 2.9'da Karabük için EİE tarafından çıkarılan verilerin tamamen modelleme ile çıkarıldığını belirtmiştik. Ayrıca bu veriler piranometrik verilerdir. Yani spektrumun geniş bir aralığında (300-3000 nm) düz bir spektrum cevabına sahip ve genellikle yere yatay yerleştirilmiş piranometre ile ölçülen yeryüzündeki yatay bir yüzeye düşen solar radyasyon enerjisi miktarlarıdır. Hâlbuki silikon fotovoltaik hücreler 300-1100 nm arasında düz olmayan bir spektrum cevabına sahiptirler ve yere düşen solar radyasyon enerjisi miktarlarının doğrudan bu spektruma cevap veren bir fotovoltaik sistemden türetilerek verilmesi daha avantajlı

olabilir. Başka bir avantajı ise modüller Karabük'ün enlem değerine yakın şekilde (40°) eğimlendirildiğinden doğrudan bu yüzeye düşen solar radyasyon enerjisi değerinin verilmesi de EİE tarafından sağlanan piranometrik verilere göre ileride Karabük'e yapılacak fotovoltaik yatırımları için daha doğru bilgi sağlayacaktır. Şekil 6.6'da yaklaşık olarak 14 günü gün boyu bulutlu ve/veya yağışlı geçen mayıs ayı için bu şekilde türetilmiş veriler bulunmaktadır.



Şekil 6.6. Mayıs ayı için günlük toplam solar radyasyon enerjisi miktarları.

Mayıs ayı için 40° eğimli güneşe bakan bir yüzeydeki ortalama günlük solar radyasyon enerjisi miktarı $3,995 \text{ kWh/m}^2\text{-gün}$ 'dür.

6.2.2. İkinci Yaklaşım: Modül Kısa Devre Akımlarından ve Açık Devre Gerilimlerinden Solar Radyasyon Yoğunluğunun Hesaplanması

İkinci yaklaşıma göre IEC 61215 test standartlarında modül için belirlenmiş ve Çizelge 6.15'te belirtilen doluluk faktörü ve modül verimi değerleri kullanılarak ölçülen açık devre gerilimi ve kısa devre akımı değerlerinden radyasyon yoğunluğu miktarı (W/m^2) türetilmiştir. Bu yaklaşımda Denklem 6.7 kullanılmıştır.

$$E_{Güneş} = (V_{OC} * I_{SC} * FF)/(ME * 2) \quad (6.7)$$

Burada V_{OC} : Dizin üzerinde ölçülen açık devre gerilimi

I_{SC} : Dizin üzerinde ölçülen kısa devre gerilimi

FF : Doluluk faktörü FF=0,752

ME : Modül verimi ME=0,129

2 : Paydadaki “iki” değeri açık devre gerilimleri birbirine seri bağlı olan iki modül üzerinde ölçüldüğünden kullanılmıştır.

İkinci yaklaşımda modülün sabit bir verimle (%12,9) ve maksimum güç noktasında (FF=%75,2) çalıştığı kabul edilmektedir.

Örnek bir hesap burada belirtilecek olursa; 2 Mayıs'ta saat 12'de $V_{OC}=39,42$ V, $I_{SC}=7,79$ A olarak ölçülmüştür. Bu durumda anlık solar radyasyon Denklem 6.7'ye göre $E_{Güneş}= 892,5$ W/m² olarak hesaplanır. Çizelge 6.18'te Mayıs ayındaki 9 gün boyunca saat 9-15 arası yapılan ölçümlerden ikinci yaklaşıma göre hesaplanan değerler sunulmaktadır.

Çizelge 6.18. Mayıs ayı için farklı günlerde yapılan ölçümlerden ikinci yaklaşıma göre hesaplanan solar radyasyon değerleri.

Date	Ortalama V_{OC} (V)	Ortalama I_{SC} (A)	9-15 arası toplam solar enerji (kWh/m ²)	Hava Durumu
02.05.2011	39,39	4,625	3,311	Öğlene kadar güneşli, öğleden sonra kapalı
03.05.2011	39,73	4,192	3,001	Parçalı bulutlu
04.05.2011	39,96	3,325	2,342	Bulutlu
05.05.2011	40,79	1,675	1,255	Tüm gün bulutlu
06.05.2011	40,21	0,802	0,561	Tüm gün bulutlu
10.05.2011	40,7	6,39	4,608	Tüm gün güneşli
11.05.2011	40,02	4,178	3,042	Öğlene kadar güneşli, öğleden sonra parçalı bulutlu
25.05.2011	39,17	5,478	3,725	Öğlene kadar güneşli, öğleden sonra parçalı bulutlu
26.05.2011	39,44	5,09	3,524	Öğlene kadar güneşli, öğleden sonra parçalı bulutlu

Çizelge 6.18'in dördüncü sütununda 9-15 arası 40° eğimli güneşe bakan bir yüzeye düşen toplam solar radyasyon enerjisi miktarları bulunmaktadır. Bu değerler saat 9-15 arası belirli periyotlarla ölçülen V_{OC} ve I_{SC} değerlerinden yukarıda anlatıldığı şekliyle hesaplanan solar radyasyon değerlerinin entegre edilmesiyle hesaplanmıştır.

6.2.3. Birinci ve İkinci Yaklaşımdan Elde Edilen Değerlerin Karşılaştırılması

İkinci yaklaşımdan elde edilen değerlerin genellikle birinci yaklaşıma göre elde edilen değerlerden daha büyük olduğu gözlenmiştir. Aradaki yüzde fark Denklem 6.8'e göre bulunmuştur.

$$\% \text{ Fark} = 100 * (\text{İkinci yak.} - \text{birinci yak.}) / \text{birinci yak.} \quad (6.8)$$

Denklem 6.8'e göre 243 ölçüm sonucunda iki yaklaşım arasındaki fark ortalama %5,2 ve bu farkın standart sapması %2,3'tür.

BÖLÜM 7

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yeryüzündeki solar radyasyon enerjisi ve spektral içeriği bölgelere göre değişim göstermektedir. Solar enerji uygulamalarının daha verimli bir şekilde uygulanabilmesi için o bölgede sürekli olarak ölçüm yapılarak potansiyel ortaya konulmalıdır. Bu çalışmada Karabük ve civarı için güneş enerjisi ölçümleri ve spektrum analizleri yapmak için sistem ve yöntem tasarlanmıştır. Çeşitli spektral bantlardaki direkt-normal radyasyon ve global radyasyon enerjilerinin takibini yapabilmek için bir radyometre tasarlanarak gerçekleştirilmiştir. Bu radyometrenin dedektörlerinin standart güneş simülatörü altında duyarlılıkları tespit edilerek kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir.

Radyometre ile ölçümler 41,21 enlem ve 32,66 boylam noktasında yapılmıştır. Direkt radyasyon ölçümleri cihazın güneşe hedeflenebildiği durumlarda ve global radyasyon ölçümü ise her durumda yapılmıştır. Karabük için yapılan ölçümlerle bu bölgede direkt solar radyasyon enerjisinin spektral bant çözünürlüğü ve bunların aylık değişim değerleri izlenmeye başlanmıştır. Sonuçların literatürdeki verilerle kıyaslanması yapılmıştır. Ölçümler LED'leri spektral seçici dedektör olarak kullanan radyometre ile yapılmış ve literatürdeki değerlere yakın sonuçlar elde edilmiştir. Böylece LED'leri dedektör olarak kullanan yenilikçi ters mühendisliğe örnek bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Ayrıca LED'lerin spektral seçici dedektör olarak uygulamasının yapıldığı bu çalışmada LED performanslarının yeryüzündeki solar radyasyonun spektral bileşenlerini takip etmede kullanılabileceğinin uygun ve ekonomik bir yöntem olduğu sonucunu çıkarmıştır.

Direkt radyasyon ve direkt radyasyonun çeşitli spektral (yeşil, kırmızı, mavi, morötesi, görünür, yakın kızılötesi) bölgelerinde bulunan radyasyon yoğunluğu miktarlarının ve global radyasyon yoğunluğunun günlük değişimlerinin takip

edilebileceği gösterilmiştir. Dolayısıyla cihaz bir otomasyon sistemine bağlandığında sürekli ölçüm alınarak Karabük'teki doğal değişimleri gösteren günlük, aylık ve yıllık eğriler elde edilebilecektir.

Karabük Üniversitesi Yenilenebilir Enerji Mühendisliği Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde bulunan fotovoltaik sistemin veri edinim cihazı tarafından kaydedilen günlük toplam amper-saat bilgileri Bölüm 6.2.1'de belirtilen yaklaşımla günlük toplam solar radyasyon enerjisi ($\text{kWh/m}^2\text{-gün}$) miktarına dönüştürülmüştür. Böylece yıllar boyu alınacak ölçümler ileride Karabük'te yapılacak fotovoltaik sistem uygulamalarının fizibilite çalışmalarında kullanılabilir. Ayrıca bu verilerin doğrudan doğal şartlar altında çalışan solar dizinlerin ürettiği akım bilgisinden türetilmesinin fotovoltaik sistem potansiyelini ortaya koyması açısından daha avantajlı olduğu düşünülmektedir.

Bu sonuçlar çerçevesinde ileride yapılacak çalışmalara ışık tutması açısından araştırmacılara aşağıda listelenen önerilerin yardımcı olacağı düşünülmektedir.

- Benzer ölçüm cihazlarını gerçekleştirmek isteyen araştırmacılara kalibrasyon esnasında mümkün olduğunca fazla noktada ölçüm alınması gerektiğini ve ölçümleri birkaç kez tekrarlayarak daha doğru kalibrasyon katsayıları elde etmelerinin daha uygun olacağı söylenilebilir.
- Tasarlanan radyometrenin güneş takip edici bir cihazın üzerine yerleştirilmesi radyometrenin hem tüm spektrumdaki direkt radyasyonu ölçen bir "pirheliometre" cihazı olarak, hem de farklı spektral bantlardaki direkt radyasyonu ölçen "güneş fotometre cihazı" olarak kullanılabilmesini sağlar. Dış ortamda sürekli kullanıma hazır hale getirilmesi için dijital ekran bulunan üst kapağını değiştirmek, ön panele tüm spektrumun (200-2500 nm) geçişine izin veren kuvars cam koymak yeterlidir. Böyle bir uygulama ile cihazdan sürekli ölçümleri alabilmek için USB haberleşme ara yüzünü kullanan ara devre hazırdır. Takip edici üzerine yerleştirilen radyometreden ara yüz devre ve bir veri tabanı ile sürekli ölçüm almak mümkün olur. Belirtilen takip

ediciyi ve kayıt otomasyon sistemini kurarak Karabük'te sürekli ölçüm almak mümkün olacaktır.

- Radyometre ile atmosferde dikey kolonda yeşil, kırmızı ve mavi dalgaboylarındaki aerosol miktarını hesaplamak mümkündür. Radyometre vasıtasıyla böyle bir uygulama yapmak isteyen araştırmacılar için yeşil dalgaboyundaki aerosol optik kalınlığını hesap eden örnek bir uygulama bölüm 6.3'te konulmuştur. Daha fazla farklı dalgaboylarında var olan aerosol miktarını hesap etmek isteyen ve böylece atmosferdeki aerosollerin boyut dağılımı ve kaynağı hakkında araştırma yapmak isteyen araştırmacılar radyometre tasarımında verilen bilgilerden yararlanabilirler. Örnek olarak böyle bir uygulamanın endüstriyel hava kirliliğinin mevcut olduğu Karabük'te yapılmasının önemli olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Jacovides, C. P., Kallaos, G. B. and Steven, M. D., “Spectral band resolution of solar radiation in Athens, Greece”, *International Journal of Climatology*, 13 (495): 689-697 (1993).
2. İnternet: Elektrik İşleri Etüt İdaresi “Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Ve Enerji Profilimizdeki Yeri” http://130.226.17.201/extra/web_docs/turkey/TurkishWindData.pdf (17.05.2011).
3. İnternet: Depar Solar “Türkiye’nin Güneş Enerjisi Potansiyeli” <http://www.deparsolar.com/sdetay.asp?id=683&did=40> (17.05.2011).
4. İnternet: Elektrik İşleri Etüt İdaresi “Karabük İli Güneş Kaynak Bilgileri” <http://www.eie.gov.tr/duyurular/YEK/gepa/KARABUK-GEPA.pdf> (17.05.2011).
5. Shaltout, M. A. M., Ghonim, M. M., Trabea A. A. and Allam, H., “Ultraviolet solar radiation over Egypt”, *Renewable Energy*, 5 (5): 1506-1508 (1994).
6. Thuillier, G., Herse, M., Simon, P. C., Labs D., Mandel, M., Gillotay, D. and Foujols, T., “The visible solar spectral irradiance from 350 to 850 nm as measured by the SOLSPEC spectrometer during the Atlas I mission”, *Solar Physics*, 177: 41–61 (1998).
7. Gueymard, C. A., Myers, D. And Emery, K., “Proposed reference irradiance spectra for solar energy systems testing”, *Solar Energy*, 73 (6): 443–467 (2002).
8. Thuillier, G., Herse, M., Labs, D., Foujols, T., Peetermans, W., Gillotay D. Simon P. C. and Mandel M., “The solar spectral irradiance from 200 to 2400 nm as measured by the SOLSPEC spectrometer from the ATLAS and EURECA mission”, *Solar Physics*, 214: 1–22 (2003).
9. Myers, D. R., “Terrestrial solar spectral distributions derived from broadband hourly solar radiation data”, *Optical Modeling and Measurements for Solar Energy Systems III: Proceedings of SPIE Conference*, San Diego, CA, August 2-4 (2009).
10. Mims, F. M. III, “Sun photometer with light-emitting diodes as spectrally selective detectors”, *Applied Optics*, 31 (33): 6965-6967 (1992).
11. Mims, F. M. III, “An inexpensive and stable LED sun photometer for measuring the water vapor column over South Texas from 1990 to 2001”, *Geophysical Research Letters*, 29 (13): 1-4 (2002).

12. RayChaudhuri, B. and Sen, C., "Light emitting diode as sensor for miniature multispectral radiometer", *Applied Physics B*, 2009 (95): 141-144, (2009).
13. Martinez, M. A., Andujar, J. M. and Enrique, J. M., "A new and inexpensive pyranometer for the visible spectral range", *Sensors*, 2009 (9): 4615-4634, (2009).
14. İnternet: Pembina Institute "Energy Source: Solar Energy" <http://www.pembina.org/re/sources/solar> (17.05.2011).
15. İnternet: Windows to The Universe Community "The Multispectral Sun" http://www.windows2universe.org/sun/spectrum/multispectral_sun_overview.html (17.05.2011).
16. İnternet: Russian Space Reserach Institute "Blackbody Radiation" http://www.iki.rssi.ru/asp/pub_sha1/Sharch01.pdf (17.05.2011).
17. İnternet: National Renewable Energy Laboratory "Shining on: A Primer on Solar Radiation" <http://rredc.nrel.gov/solar/pubs/shining/chap3.html> (17.05.2011).
18. İnternet: MIT Open Courseware "Fundamentals of Photovoltaics" <http://ocw.mit.edu/courses/mechanical-engineering/2-626-fundamentals-of-photovoltaics-fall-2008/lecture-notes/lecture1.pdf> (17.05.2011).
19. İnternet: PV Education "Atmospheric Effects" <http://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/atmospheric-effects#ref1> (17.05.2011).
20. Kasten, F. and Young, A. T., "Revised optical air mass tables and approximation formula", *Applied Optics*, 28 (22): 4735-4738 (1989).
21. İnternet: World Meteorological Organization "Measurement Of Sunshine Duration" <http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/CIMO-Guide/CIMO%20Guide%207th%20Edition,%202008/Part%20I/Chapter%208.pdf>. (17.05.2011).
22. Gratzel, M., "Dye-sensitized solar cells", *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 4 (2003): 145-153 (2003).
23. İnternet: Enerji Bakanlığı "Türkiye'nin Güneş Enerjisi Potansiyeli" <http://www.enerji.gov.tr/index.php?dil=tr&sf=webpages&b=gunes&bn=233&hn=&nm=384&id=40695> (17.05.2011).
24. İnternet: Elektrik İşleri Etüt İdaresi "Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası" <http://www.eie.gov.tr/MyCalculator/Default.aspx> (17.05.2011).

25. İnternet: Elektrik İşleri Etüt İdaresi “Solar Energy İn Turkey”
http://www.eie.gov.tr/english/solar/solarTurkey_e.html (17.05.2011).
26. İnternet: NREL “Solar Radiation Measurements”
<http://www.nrel.gov/docs/gen/fy04/36831p.pdf> (17.05.2011).
27. İnternet: Elektrik İşleri Etüt İdaresi “Karabük İli Rüzgar Kaynak Bilgileri”
<http://www.eie.gov.tr/duyurular/YEK/YEKrepa/KARABUK-REPA.pdf>
(17.05.2011).
28. İnternet: Elite A.Ş. “Baseline Surface Radiation Network”
http://www.eliteas.com/files/kipp_tinfo_scientificsolarmonitoringstation_1971.pdf (17.05.2011).
29. İnternet: Kipp and Zonen “SP Lite2 Silicon Pyranometer”
<http://www.kippzonen.com/?product/991/SP+Lite2.aspx> (17.05.2011).
30. İnternet: Arizona Üniversitesi “Photodiode Characteristics”
http://www.optics.arizona.edu/Palmer/OPTI400/SuppDocs/pd_char.pdf
(17.05.2011).
31. Brooks, D. R., “Inexpensive sun photometers for monitoring the atmosphere”,
1st International Conference on Applied Science, National University of Laos,
Vientiane, Lao People’s Democratic Republic, November 5-7 (2006).
32. Brooks, D. R., Mims III, F. M., Nguyen, T. and Bannasch, S., “Characterization
of LED based sun photometers for use as GLOBE instruments”, *3rd Annual
GLOBE Conference*, Snowmass, Colorado, August 3-7 (1998).
33. İnternet: Farnell “Datasheets” <http://tr.farnell.com/> (17.05.2011).
34. İnternet: Farnell “Making The Right Choice”
<http://www.farnell.com/datasheets/319849.pdf> (17.05.2011).
35. İnternet: Texas Instruments “Photodiode Monitoring With Opamps”
<http://focus.ti.com/lit/an/sboa035/sboa035.pdf> (17.05.2011).
36. Yıldırım, T., “Güneş ve rüzgar enerjisi veri toplama sisteminin geliştirilmesi”,
Yüksek Lisans Tezi, *Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara,
60-68 (2008).
37. Brooks, D. R., “Bringing the sun down to earth: Designing inexpensive
instruments for monitoring the atmosphere” Kitabı, *Springer*, PA, 20-59 (2008).
38. İnternet: Kipp Zonen “Kipp Zonen Digital Catalogue”
<http://www.kippzonen.com/?news/137282/Kipp+++Zonen+Digital+Catalogue+2010.aspx> (17.05.2011).

39. Internet: Global Spec “About Optical Calibration Standards”
http://www.globalspec.com/learnmore/test_measurement_equipment/calibration_instruments_standards_reference_sources/optical_calibration_standards (17.05.2011).
40. Internet: Newport “Full Spectrum Solar Simulator”
http://search.newport.com/?q=*%&x2=sku&q2=92192 (17.05.2011).
41. Internet: NOAA “Solar Calculation Details”
<http://www.srrb.noaa.gov/highlights/sunrise/calcdetails.html> (17.05.2011).
42. Hansen V., “Spectral distribution of solar radiation on clear days: A comparison between measurements and model estimates”, *Journal of Applied Meteorology*, 23 (5): 772-780 (1984).
43. Brooks D. R. and Mims, F. M., “Development of an inexpensive handheld LED-based sun photometer for the GLOBE program”, *Journal of Geophysical Research*, 106 (D5): 4733-4740 (2001).
44. Internet: Drexel University “GLOBE Protocol”
http://www.pages.drexel.edu/~brooksdr/DRB_web_page/Aerosols/Aerosols_HTML.htm#Field (2009).

ÖZGEÇMİŞ

Mustafa GÖKDAĞ 1987 yılında Karabük'te doğdu; ilköğretim ve lise öğrenimini aynı şehirde tamamladı. 2005 yılında Fırat Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde lisans öğrenimine başladı. 2007-2008 eğitim-öğretim yılında Erasmus öğrenci değişim programı çerçevesinde İngiltere'nin Coventry Üniversitesi'nde 3. Sınıf eğitimini tamamladı. 2009 yılında lisans eğitimini tamamlayarak aynı yıl Karabük Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği'nde araştırma görevlisi olarak göreve başladı ve halen aynı yerde çalışmaya devam etmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres: Karabük Üniversitesi
Sosyal Bilimler Enstitüsü
Balıklarkayası Mevkii / KARABÜK

Tel: (542) 633 04 16

E-posta: mgokdag@karabuk.edu.tr