

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İKİ EKSEN GÜNEŞ İZLEYEN HAREKETLİ GÜNEŞ SİSTEMİ VE EN  
UYGUN YILLIK EĞİM AÇISI İLE KONUMLANDIRILMIŞ SABİT  
GÜNEŞ SİSTEMİNİN GERÇEK ZAMAN KARŞILAŞTIRMASI

DOKTORA TEZİ

Ceyda AKSOY TIRMIKÇI

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK ELEKTRONİK  
MÜHENDİSLİĞİ  
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Cenk YAVUZ

Mart 2018

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İKİ EKSEN GÜNEŞ İZLEYEN HAREKETLİ GÜNEŞ SİSTEMİ VE EN  
UYGUN YILLIK EĞİM AÇISI İLE KONUMLANDIRILMIŞ SABİT  
GÜNEŞ SİSTEMİNİN GERÇEK ZAMAN KARŞILAŞTIRMASI

DOKTORA TEZİ

Ceyda AKSOY TIRMIKÇI

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK-ELEKTRONİK  
MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 26 / 03 /2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.



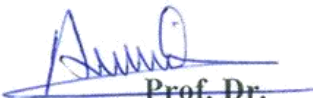
Prof. Dr.  
M. Ali YALÇIN  
Jüri Başkanı




Prof. Dr.  
Ertan YANIKOĞLU  
Üye



Prof. Dr.  
Önder GÜLER  
Üye



Prof. Dr.  
Ali ÖZTÜRK  
Üye



Doç. Dr.  
Cenk YAVUZ  
Üye

## BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Ceyda Aksoy Tirmikçi

26.03.2018



## TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar t¼m aşamalarında yardımlarını esirgemeyen değerli danışman hocam Doç. Dr. Cenk YAVUZ'a teőekk¼rlerimi sunarım.

Çalışmanın planlama aşamasından yazılım aşamasına kadar t¼m aşamalarında sevgi ve hořg¼r¼ ile yanımdayan, teővik eden ve bunun yanında sanayi desteği sağlayan sevgili eşim ve meslektaşım Erkan Tırmıkçı'ya teőekk¼r ederim.

Çalışmanın mekanik tasarım ve elektronik yazılım aşamalarında uygulama sırasında ortaya çıkan hayati hataların giderilmesinde bilgi ve deneyimlerini paylaşan, kıymetli zamanlarını ayıran sevgili meslektaşlarım G¼rkan Tırmıkçı'ya ve Ahmet Boz'a teőekk¼r¼ bir borç bilirim.

Ayrıca bu çalışmanın maddi açıdan desteklenmesine olanak sağlayan Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığına (Proje No: 2015-50-02-028) teőekk¼r ederim.

# İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	vii
TABLOLAR LİSTESİ .....	ix
ÖZET .....	xi
SUMMARY .....	xii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2.	
MEVCUT ÇALIŞMALARIN İNCELENMESİ .....	4
2.1. Bölgesel Dağınık Güneş Işınması Tahmini.....	4
2.2. Bölgesel Dağınık Güneş Işınımına Bağlı Olarak En Uygun Bölgesel Eğim Açısının Belirlenmesi .....	10
2.3. İki Eksen Güneş İzleyen Hareketli Güneş Sistemleri .....	16
BÖLÜM 3.	
EN UYGUN EĞİM AÇILARININ BELİRLENMESİ.....	23
3.1. Yeni Dağınık Güneş Işınımı Denklemlerinin Geliştirilmesi.....	23
3.2. Dağınık Güneş Işınımı Denklemlerinin Doğruluğunun Araştırılması .....	28
3.3. Bir Güneş Yüzeyinin En Uygun Eğim Açısının Hesaplanması .....	30

## BÖLÜM 4.

SABİT GÜNEŞ SİSTEMİ TASARIMI .....	33
4.1. Mekanik Aksam Tasarımı ve Uygulaması .....	33
4.2. Elektronik Kart Tasarımı .....	34

## BÖLÜM 5.

HAREKETLİ GÜNEŞ SİSTEMİ TASARIMI .....	36
5.1. Güneş Denklemlerinin Belirlenmesi .....	36
5.2. Mekanik Aksam Tasarımı ve Uygulaması .....	39
5.2.1. Mekanik aksam biriminin belirlenmesi .....	39
5.2.1.1. Hareket biriminin belirlenmesi .....	39
5.2.1.2. Güneş panelinin belirlenmesi .....	40
5.2.2. Mekanik aksam tasarımı .....	41
5.2.2.1. Mekanik aksam tasarımının Sakarya hava koşulları altındaki dayanıklılığı .....	42
5.2.2.2. Eksenlerin hareket sınırlarının güneşin Sakarya'daki konumunu izlemedeki yeterliliği .....	44
5.2.3. Mekanik aksam uygulaması .....	45
5.2.3.1. Malzemelerin belirlenmesi .....	45
5.2.3.2. Mekanik aksam kurulumu .....	46
5.3. Elektronik Kart Tasarımı .....	48

## BÖLÜM 6.

ÖLÇÜLEN VERİLERİN BİLGİSAYAR ORTAMINDA KAYDEDİLMESİ ....	51
6.1. Güneş Sistemleri ve Bilgisayarın Haberleşmesi .....	51
6.2. Bilgisayar Arayüz Yazılımının Geliştirilmesi .....	52

## BÖLÜM 7.

ÇALIŞMA BULGULARI .....	53
7.1. Yeni Dağınık Güneş Işınımı Denklemleri .....	53
7.2. Dağınık Güneş Denklemlerinin Doğruluğunun Araştırılması .....	54
7.3. Günlük ve Aylık En Uygun Eğim Açılarının Belirlenmesi .....	54

7.4. Mevsimsel, Yarıyıllık ve Yıllık En Uygun Eğim Açıları.....	63
7.5. En Uygun Eğim Açılırl ile Konumlandırılmış Yüzeylerde Elde Edilen Günlük Toplam Güneş Işınımının Aylık Ortalaması.....	64
7.6. Sistemlerden Elde Edilen Elektriksel Bulgular .....	64
7.7. Sistemlerin Kurulum Maliyetleri .....	73
BÖLÜM 8.	
SONUÇ VE ÖNERİLER .....	78
KAYNAKLAR .....	81
EK A.....	91
EK B.....	92
EK C.....	94
EK D.....	94
ÖZGEÇMİŞ .....	95

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	: Amper
alt	: Yükseklik
azi	: Azimut
bs	: bit saniye
$\beta$	: Eğim açısı
$\delta$	: Güneş deklinasyonu
EEPROM	: Silinip programlanabilir salt okunur bellek
$\phi$	: Enlem derecesi
$G_{sc}$	: Güneş sabiti
GPRS	: Radyo paketi genel servisi
GPS	: Küresel konumlama sistemi
H	: Günlük evrensel güneş ışınımının aylık ortalaması
$H_0$	: Günlük uzay dışı güneş ışınımının aylık ortalaması
$H_b$	: Günlük direkt güneş ışınımının aylık ortalaması
$H_d$	: Günlük dağınık güneş ışınımının aylık ortalaması
$H_t$	: Günlük toplam güneş ışınımının aylık ortalaması
HRA	: Saat açısı
$K_d$	: Dağınıklık kesri
$K_n$	: Güneşlenme kesri
$K_t$	: Açıklık kesri
kg	: Kilogram
km/h	: Kilometre/saat
LCD	: Likit kristal gösterge
$m^2$	: Metrekare
MABE	: Ortalama mutlak eğilim hatası
MAPE	: Ortalama mutlak yüzde hatası

MBE	: Ortalama eğilim hatası
MHz	: Megahertz
mm/s	: Milimetre/saniye
N	: Newton
$n_{\text{gün}}$	: Yılın gününün numarası
OECD	: Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü
PID	: Oransal-İntegral-Türevsel
$R^2$	: Kararlılık katsayısı
$R_b$	: Direkt güneş ışıınımı için eğim katsayısı
$R_d$	: Dağınık güneş ışıınımı için eğim katsayısı
RMSE	: Ortalama hata kareleri toplamı kökü
$\rho_g$	: Zemin yansıtma katsayısı
S	: Güneşlenme süresi
$S_0$	: En yüksek güneşleme süresi
t	: t-istatistik
tep	: ton eşdeğer petrol
V	: Volt
$w_s$	: Yatay yüzeyler için gündeğumu saat açısı
$w_s'$	: Eğimli yüzeyler için gündeğumu saat açısı
Wh	: Watt saat

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1.	Matlab ortamında hazırlanan programın akış diyagramı .....	32
Şekil 4.1.	En uygun yıllık eğim açısı ile konumlandırılmış sabit güneş sistemi	33
Şekil 4.2.	Sabit sistem elektronik kartı .....	35
Şekil 5.1.	Azimut ve yükseklik açılarının tanımı .....	37
Şekil 5.2.	Deklinasyon açısının tanımı .....	38
Şekil 5.3.	Saat açısının tanımı .....	38
Şekil 5.4.	Güneş izleyen sistem için Solidworks ortamında mekanik aksam tasarımı .....	41
Şekil 5.5.	Güneş izleyen sistem mekanik aksam kurulumu .....	46
Şekil 5.6.	Güneş izleyen sistem mekanik aksam son hali .....	47
Şekil 5.7.	Güneş izleyen sistem elektronik kartı.....	50
Şekil 6.1.	Bilgisayar arayüz yazılımı.....	52
Şekil 7.1.	Ocak ayı günlük ve aylık en uygun eğim açıları (birim:°).....	57
Şekil 7.2.	Şubat ayı günlük ve aylık en uygun eğim açıları (birim:°) .....	57
Şekil 7.3.	Mart ayı günlük ve aylık en uygun eğim açıları (birim:°).....	58
Şekil 7.4.	Nisan ayı günlük ve aylık en uygun eğim açıları (birim:°) .....	58
Şekil 7.5.	Mayıs ayı günlük ve aylık en uygun eğim açıları (birim:°) .....	59
Şekil 7.6.	Haziran ayı günlük ve aylık en uygun eğim açıları (birim:°).....	59
Şekil 7.7.	Temmuz ayı günlük ve aylık en uygun eğim açıları (birim:°) .....	60
Şekil 7.8.	Ağustos ayı günlük ve aylık en uygun eğim açıları (birim:°) .....	60
Şekil 7.9.	Eylül ayı günlük ve aylık en uygun eğim açıları (birim:°).....	61
Şekil 7.10.	Ekim ayı günlük ve aylık en uygun eğim açıları (birim:°).....	61

Şekil 7.11.	Kasım ayı günlük ve aylık en uygun eğim açıları (birim:°) .....	62
Şekil 7.12.	Aralık ayı günlük ve aylık en uygun eğim açıları (birim:°) .....	62
Şekil 7.13.	Mevsimsel, yarıyıllık ve yıllık en uygun eğim açıları (birim:°) .....	63
Şekil 7.14.	Sistemlerin uygun bir çatıya konumlandırılması .....	65
Şekil 7.15.	01.06.2017-Tüm gün güneşli bir günde sistemlerin üretimi.....	69
Şekil 7.16.	09.06.2017-Tüm gün kapalı hava bir günde sistemlerin üretimi.....	70
Şekil 7.17.	20.06.2017-Parçalı bulutlu bir günde sistemlerin üretimi .....	70
Şekil 7.18.	18.07.2017-Parçalı bulutlu bir günde sistemlerin üretimi .....	70
Şekil 7.19.	27.08.2017- Tüm gün güneşli bir günde sistemlerin üretimi.....	71
Şekil 7.20.	09.09.2017- Tüm gün güneşli bir günde sistemlerin üretimi.....	71
Şekil 7.21.	14.10.2017- Sağanak yağışlı bir günde sistemlerin üretimi .....	71
Şekil 7.22.	11.11.2017- Tüm gün güneşli bir günde sistemlerin üretimi.....	72
Şekil 7.23.	Aylık toplam üretim değerleri .....	73
Şekil Ek A.1.	L298.....	91

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1.	Mevcut dağınık güneş ışınımı denklemleri .....	24
Tablo 3.2.	Yatay yüzeyler için günlük evrensel güneş ışınımının aylık ortalaması $H$ (birim: kWh/m <sup>2</sup> -gün), yatay yüzeyler için günlük uzay dışı güneş ışınımının aylık ortalaması $H_0$ (birim: kWh/m <sup>2</sup> -gün), güneşlenme süreleri $S$ (birim: saat), en yüksek güneşlenme süreleri $S_0$ (birim:saat) .....	27
Tablo 4.1.	Sabit güneş sisteminde kullanılan güneş panelinin özellikleri .....	34
Tablo 5.1.	Güneş izleyen sistem mekanik aksamı için seçilen güneş panelinin özellikleri .....	40
Tablo 5.2.	Sakarya ili rüzgar istatistikleri .....	42
Tablo 5.3.	Sakarya ili aylık ortalama yağış miktarı [kg/m <sup>2</sup> ] .....	42
Tablo 5.4.	Güneş izleyen sistem mekanik aksam tasarımı rüzgar dayanıklılık testi sonuçları .....	43
Tablo 5.5.	Güneş izleyen sistem mekanik aksam tasarımı yağmur dayanıklılık testi sonuçları .....	43
Tablo 5.6.	Sakarya iline ait her mevsim için seçili bir günde kaydedilen azimut ve yükseklik açıları (°) .....	44
Tablo 5.7.	Güneş izleyen sistem mekanik aksam civatalarının teknik özellikleri..	46
Tablo 6.1.	RS 485 standardının teknik özellikleri .....	51
Tablo 7.1.	Sakarya ili için üç grupta geliştirilen yeni dağınık güneş ışınımı denklemleri .....	53
Tablo 7.2.	Mevcut denklemler (1-17) ve yeni denklemler (25-33) için $MBE$ (birim: MJ/m <sup>2</sup> ), $MAPE$ (birim: %), $MABE$ (birim: MJ/m <sup>2</sup> ), $RMSE$ (birim: MJ/m <sup>2</sup> ), $R^2$ ve $t$ değerleri .....	54

Tablo 7.3.	Sakarya ili için günlük dağınık güneş ışınımının aylık ortalamasının en uygun denklem ile hesaplanan değerleri.....	54
Tablo 7.4.	Günlük, aylık, mevsimsel, yarıyıllık ve yıllık en uygun eğim açıları ile konumlandırılmış yüzeyler için günlük toplam güneş ışınımının aylık ortalaması (birim: MJ/m <sup>2</sup> -gün).....	56
Tablo 7.5.	Farklı hava koşulları ve farklı aylar için seçilmiş günlük saatlik güç değerleri.....	64
Tablo 7.6.	Aylık toplam üretim değerleri .....	73
Tablo 7.7.	Sistemlerin kurulum maliyetleri .....	74
Tablo 7.8.	Sistemlerin gerçek üretim maliyetleri .....	75
Tablo 7.9.	1 kW sistemlerin kurulum maliyetleri.....	76
Tablo 7.10.	1 kW sistemlerin yıllık üretim değerleri ve geri ödeme süreleri.....	77
Tablo Ek B.1.	JN3 GPS biriminin özellikleri.....	92
Tablo Ek C.1.	E50S8-360-3-T-1 enkoder teknik özellikleri.....	93
Tablo Ek D.1.	SCA100T inklinometre sensörünün teknik özellikleri.....	94

## ÖZET

Anahtar kelimeler: En uygun eğim açısı, iki eksen güneş izleyen hareketli güneş sistemi, azimut, yükseklik, inklinometre, enkoder

Bu çalışmada, en uygun yıllık eğim açısı ile konumlandırılmış sabit bir güneş sistemi ve iki eksen güneşi izleyen hareketli bir güneş sistemi gerçek zamanlı olarak karşılaştırılmıştır. En uygun yıllık eğim açısı toplam güneş ışıını ve eğim açısı ilişkisi ile belirlenmiştir. Güneş ışıını ölçümü yapılmayan dağınık güneş ışıını bileşenin tahmini için regresyon analizi ile mevcut denklemlerden faydalanılarak yeni dağınık güneş ışıını denklemleri geliştirilmiştir.

İki eksen güneş izleyen hareketli güneş sisteminde sistemin konumu her saat başı güneşin azimut ve yükseklik açıları ile eşitlenmiştir. Sistemin konumu azimut ekseninde artırımı bir enkoder ve yükseklik ekseninde bir inklinometre sensörü ile belirlenmiştir. Güneşin konumu mevcut güneş matematiği denklemleri ve coğrafi konum bilgileri ile hesaplanmıştır. Sistemin mekanik aksam tasarımı ve benzetimleri mekanik tasarım paket programı olan Solidworks ortamında gerçekleştirilmiştir. Sistem hareketinin kontrolü PIC18F4620 mikrodenetleyicisi ile hazırlanan bir elektronik kart ile sağlanmıştır.

Sistemlerden 2017 yılının son 6 ayı boyunca 08:00-20:00 saatleri arasında 10 dakika aralıklarla elektriksel veri toplanmış ve bu veriler Visual Studio ortamında hazırlanan bir arayüz programı ile bilgisayarda kaydedilmiştir. Kaydedilen veriler günlük ve aylık olarak ilgili zaman aralığının hava koşulları ve en uygun eğim açıları göz önünde bulundurularak analiz edilmiştir. Sistemlerin elektriksel performansı belirlendikten sonra ikinci karşılaştırma ölçütü olan kurulum maliyetleri belirlenmiştir.

Sonuçlar iki eksen güneş izleyen sistemin her durumda en uygun yıllık eğim açısı ile konumlandırılmış sisteme göre daha verimli olduğunu ancak uygulama aşamasının daha zor ve pahalı olduğunu göstermiştir.

# **REAL TIME COMPARISON OF A TWO AXIS SOLAR TRACKING SYSTEM AND AN OPTIMALLY TILTED FIXED SOLAR SYSTEM FOR YEARLY ADJUSTMENT**

## **SUMMARY**

Keywords: Optimum tilt angle, two axis solar tracking system, azimuth, elevation, encoder, inclinometer

In this study, an optimally tilted fixed solar system for yearly adjustment and a two axis solar tracking system are designed and compared. The yearly optimum tilt angle is determined by the correlation of the total solar radiation and tilt angle. For this purpose new diffuse solar radiation equations are developed based on existing equations by regression analysis.

Two axis solar tracking system equals the position of the system to the sun's azimuth and elevation angles hourly. Azimuth angle and elevation angle of the system are calculated by an incremental encoder and inclinometer sensor respectively. The position of the sun is determined using the existing solar equations and geographical location. The mechanical design of the system is performed by mechanical packaged software, Solidworks. The control of the axis movement of the system is provided by an electronic control unit with PIC18F4620.

Systems are observed between the hours of 08.00 and 20.00 for the last six months in 2017. The electrical measurements of the systems are recorded by a computer interface unit developed by Visual Studio every ten minutes. The recorded data is analysed daily and monthly considering the weather conditions and optimum tilt angles of the related period. After determining the electrical performance of the systems, the second comparison criterion, setup cost of the systems, are calculated.

The results show that two axis solar tracking system is more efficient than the optimally tilted fixed solar for yearly adjustment. However the application of the solar tracking system is more complicated and expensive than the fixed solar system.

## BÖLÜM 1. GİRİŞ

Günümüzde enerji sürdürülebilir bir sosyal ve ekonomik gelişmenin hayati koşullarından biri olarak öne çıkmaktadır [1]. Nüfus ve sanayileşmedeki büyümenin bir sonucu olarak enerjiye olan talep hızla artmaktadır. Türkiye 80,810.525 milyon nüfusu ile bu artışa önemli bir katkı sağlayan gelişmekte olan ülkelerden biridir [2]. Ülkenin birincil enerji talebi 2015 yılında 123,9 milyon ton eşdeğer petrol (tep) olarak kaydedilmiştir [3]. Bu miktarın kaynaklara dağılımında en büyük payı fosil kaynaklar almaktadır: %29,2 kömür, %32,5 doğal gaz ve %28,5 petrol [3]. Ülkedeki fosil yakıt rezervleri toplam talebi karşılamak için yeterli olmadığından kömür talebi %64 oranında, doğal gaz talebi %99,2 oranında ve petrol talebi %93,6 oranında ithal edilerek karşılanmaktadır [3,4].

Enerji talebinin karşılanmasında ithal fosil kaynaklara olan bağımlılık ülke ekonomisine zarar verdiği gibi çevreye de zarar vermektedir. Fosil yakıt kullanımı ile açığa çıkan CO<sub>2</sub> gazı dünya atmosferindeki CO<sub>2</sub> gazının %73'ünü oluşturmaktadır [5 ve 6]. Küresel ısınma ve iklim değişikliğine yol açan sera gazı etkisi, son yıllarda dünya çapında öncelik verilen konulardan biri durumuna gelmiştir. CO<sub>2</sub>, sera gazı etkisine %55 oranında katkı yapan başlıca sera gazlarından biridir [5,7,8]. Türkiye'deki sera gazı salınımları 1990 ve 2015 yılları arasında %124 artış göstermiş ve CO<sub>2</sub> salınımı 475,1 milyon metrik tona ulaşmıştır [2]. Bu salınımın önemli bir bölümü fosil yakıt kullanımı kaynaklıdır. 2015 yılında Türkiye'nin enerji kaynaklı CO<sub>2</sub> salınımı 340 milyon metrik ton olarak kaydedilmiştir [2]. Bu miktar dünyadaki toplam salınımın %0,91'ini, OECD (Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü) ülkelerindeki salınımın %2,32'sini oluşturmaktadır [2]. Bu salınımların azalması için yenilenebilir enerji kaynaklarının birincil enerji talebindeki payını artırmak bir zorunluluk haline gelmiştir [9].

Türkiye avantajlı coğrafi konumu sayesinde yılda en az 495 TWh değerinde çok büyük bir yenilenebilir enerji kaynağı potansiyeline sahiptir [10,11]. Bu potansiyele biyokütle enerjisi 196,7 TWh, hidroelektrik enerji 125 TWh, güneş enerjisi 102,3 TWh, rüzgar enerjisi 50 TWh, jeotermal enerji 22,4 TWh değerlerinde katkı sağlamaktadır [10,11]. Bu umut verici rakamlar Türkiye'nin enerji politikasını değiştirerek yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını artırması ile enerji talebinin karşılanmasında ithal fosil kaynaklara olan bağımlılığın azaltılabileceğini göstermektedir.

Türkiye 3,6 kWh/m<sup>2</sup>-gün yıllık ortalama güneş radyasyonu ve 2640 saat yıllık ortalama güneşlenme süresi ile önemli bir güneş enerjisi potansiyeline sahiptir [10, 12-17]. Ülke bu potansiyeli ısı uygulamalarda verimli bir şekilde kullanmaktadır. Sıcak su ısıtmada 8 GW kurulu kapasitesi ile dünyanın en büyük üçüncü kurulu kapasitesine sahiptir [18]. Ancak enerji üretiminde güneşten faydalanma yok denecek kadar azdır. Çalışmalar Türkiye'de güneşin enerji üretiminde kullanılmasının artması için devletin farklı güneş politikaları uygulaması, güneş yatırımlarında etkili teşviklerin geliştirmesi ve araştırma fonlarının artırması gerektiğini göstermektedir [18-20].

Güneş enerjisinden en yüksek verim ile faydalanabilmek adına yapılan bu çalışmada, Sakarya ili için en uygun eğim açısı ile konumlandırılmış sabit bir güneş sistemi ile iki eksen güneş izleyen hareketli bir güneş sistemi gerçek zamanlı olarak karşılaştırılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında Sakarya için en uygun eğim açıları aylık, mevsimsel, yarıyıllık ve yıllık olarak belirlenmiştir. Eğim açılarının belirlenmesinde eğim açısı-toplam güneş ışınımı ilişkisi yöntemi kullanılmıştır. Sakarya ili için güneş ışınımının tüm bileşenlerinin ölçülmüş verileri bulunmadığından toplam güneş ışınımı tahmininde kullanılmak üzere mevcut güneş ışınımı denklemlerinden faydalanılarak yeni güneş ışınımı denklemleri geliştirilmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında güneşi iki eksenle izleyen hareketli bir güneş sistemi tasarımı yapılmıştır. Bu aşamada ilk olarak güneşin konumunu hesaplamak için

mevcut güneş denklemleri incelenerek bu çalışma için en uygun denklemler belirlenmiştir. Daha sonra belirlenen denklemler ile hesaplanan açılar en doğru şekilde izleyen mekanik aksam tasarımı ve benzetimi yapılmıştır. Tasarımı ve benzetimi yapılan aksamın montaj resimleri oluşturulmuş ve sistemin mekanik aksam uygulaması gerçekleştirilmiştir. Mekanik aksam uygulaması tamamlandıktan sonra sistemin ve güneşin konumlarını belirleyen, karşılaştıran ve eşitleyen kontrol birimleri belirlenmiş ve bu birimlerle elektronik kart tasarımı ve benzetimi yapılmıştır. Bundan sonra elektronik kart için gerekli yazılım geliştirilmiştir. Son olarak bütün birimleri tamamlanan güneş izleyen sistemin çalışması izlenmiş, hatalar giderilmiştir.

Çalışmanın bir sonraki aşamasında uygulamaları tamamlanan sabit güneş sistemi ve güneş izleyen hareketli sistem için bir haberleşme arayüzü oluşturulmuştur. Sistemlerin çalışması hazırlanan arayüz üzerinden 2017 yılının son 6 ayı boyunca izlenmiştir. Çalışmanın sonunda;

- Sakarya ili için dağınık güneş radyasyonu modeli önerisi yapılmıştır.
- Sakarya ili için en uygun günlük, aylık, mevsimsel, yarıyıllık ve yıllık güneş eğim açıları belirlenmiştir.
- Güneş izleyen sistemler için açı, mekanik aksam ve konum geri besleme sensörleri ilişkilendirilmiş, konum geri besleme seçimi ile ilgili öneriler sunulmuştur.
- Sabit güneş sistemi ve güneş izleyen hareketli güneş sisteminin 6 aylık ölçüm verileri ve çalışmanın ilk bölümünde hesaplanan en uygun eğim açıları kullanılarak Sakarya ili için ekonomik, verimli ve uygulanabilir sistem önerileri yapılmıştır.

## **BÖLÜM 2. MEVCUT ÇALIŞMALARIN İNCELENMESİ**

Bu bölümde güneş ışınımı modellemesi, en uygun güneş eğim açısı hesaplanması ve hareketli güneş sistemleri ile ilgili öne çıkmış olan mevcut çalışmalar incelenmiştir. Yapılan incelemenin ışığında tezin amacı, kapsamı ve yöntemi belirlenmiştir.

### **2.1. Bölgesel Dağılık Güneş Işınması Tahmini**

Çin’de yapılan çalışmada Çin’in sekiz meteorolojik istasyonuna ait günlük güneş ışınımının aylık ortalamasının tahmin edilmesi için en uygun denklem belirlenmiştir. Tahmin edilen değerler ile ölçülen değerler ortalama yüzde hatası (MPE), ortalama etki hatası (MBE), karekök ortalama hatası (RMSE) gibi istatistiksel hata denklemleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Bütün modellerin ölçülen ve tahmin edilen değerleri birbirini sağlamıştır. Bu modellerin evrensel güneş ışınımı ve güneşlenme saatleri verileri ile birlikte dağılık güneş ışınımının günlük toplamının aylık ortalamasının tahmin edilmesinde kullanılabileceği söylenmiştir [19].

2006 yılında yapılan çalışmada, Türkiye’nin İç Anadolu Bölgesine ait (Afyon, Ankara, Çankırı, Çorum, Eskişehir, Kayseri, Kırşehir, Konya, Nevşehir, Niğde, Sivas ve Yozgat) günlük dağılık güneş ışınımının aylık ortalamasını tahmin eden yeni hibrit modeller geliştirilmiştir. Dağılık güneş ışınımını tahmin etmek için önerilen önceki modeller incelenmiştir. Evrensel güneş ışınımı ve güneşlenme zamanı Türkiye Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü tarafından 1964 yılından itibaren ölçülmesine rağmen, dağılık güneş ışınımı ölçümü henüz yapılmamıştır. İç Anadolu Bölgesi’nde dağılık ışınımının günlük toplamının aylık ortalamasının tahmini için geliştirilen 12 yeni hibrit model onaylanmıştır ve gerçek değere en çok yakınsayan model gelecek projelere rehberlik yapması için seçilmiştir [20].

Ülgen ve Hepbaşlı tarafından yapılan çalışmada, Türkiye'nin nüfus yoğunluğu en fazla olan üç şehri (İstanbul, Ankara ve İzmir) için günlük dağınıklık kesrinin aylık ortalaması ve günlük dağınıklık katsayısının aylık ortalaması ile günlük açıklık kesrinin aylık ortalaması ve/veya günlük güneşlenme kesrinin aylık ortalamasının ilişkilendirilmesi için deneysel bağıntılar geliştirilmiştir [21].

Hindistan'ın seçilmiş bölgeleri için beş yıllık (2001-2005) ölçüm değerleri kullanılarak, dağınık güneş ışınımının günlük toplamının aylık ortalamasının tahmini ile ilgili ayrıntılı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmada ülkenin değişken hava koşullarını temsil eden dört önemli şehrin (Jodhpur, Calcutta, Bombay ve Pune) verileri kullanılmıştır. Seçilen her şehir ve Hindistan'ın bütün şehirleri için gerileme analizi yöntemi kullanılarak dağınıklık kesri ve güneşlenme kesri bağıntıları geliştirilmiştir. Yazarlar bu bağıntıları Bütün Hindistan Bağıntıları (AIC) adlandırmaktadır. AIC'dan elde edilen sonuçlar ölçülen değerlerle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmaların yanı sıra karekök ortalama hatası (RMSE), etki ortalama hatası (MBE) ve yüzde ortalama hatası (MPE) gibi istatistiksel testler de gerçekleştirilmiştir. Buna göre AIC'nın Hindistan'ın herhangi bir bölgesinde dağınık güneş ışınımı tahmininde kullanılabileceği söylenmiştir [22].

Türkiye'de 2005 yılında yapılan çalışmada, Karadeniz Bölgesi'ne ait beş şehir (Amasya, Çorum, Ordu, Samsun ve Tokat) için güneş ışınımının bileşenleri incelenmiştir. Yapılan çalışmada evrensel güneş ışınımının ve güneşlenme sürelerinin ölçülmüş değerleri kullanılarak günlük evrensel güneş ışınımının aylık ortalamasını tahmin eden ikinci dereceden polinomal bir eşitlik geliştirilmiştir. Bununla birlikte seçilen mevcut modellerden elde edilen tahminler kullanılarak günlük dağınık ve direkt güneş ışınımının aylık ortalama değerleri tahmin edilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar istatistiksel olarak test edilmiş ve elde edilen sonuçların bölgede yapılacak olan güneş çalışmalarında kullanılabileceği görülmüştür [23].

Brezilya'da Machado ve Soares tarafından yapılan çalışmada evrensel ve dağınık güneş ışınımının ölçülmüş verileri kullanılarak doğrusal regresyon yöntemi ile yatay yüzeylerde dağınık güneş ışınımının saatlik, günlük ve aylık değerlerini tahmin eden

dağınık ışınım modelleri geliştirilmiştir. Yeni modeller, farklı bölgeler için geliştirilmiş mevcut modeller ile karşılaştırılmış ve sonuçlardaki farklılık modellerin geliştirildiği bölgelerin yükseklik farkı ile ilişkilendirilmiştir [24].

Kıbrıs'ta yapılan çalışmada ilk olarak Liu ve Jordan'ın geliştirdiği dağınık güneş ışınımını evrensel güneş ışınımı ile ilişkilendiren eşitlik [25] kullanılarak saatlik dağınıklık kesri ile saatlik açıklık kesri arasında ilişki kuran denklemler geliştirilmiştir. Çalışmada dağınık güneş ışınımının ve evrensel güneş ışınımının ölçülmüş değerleri kullanılmıştır. Geliştirilen denklemler farklı bölgeler için geliştirilmiş mevcut denklemler ile karşılaştırılmış ve denklemlerin bölgesel olarak daha iyi sonuç verdiği görülmüştür [26].

Türkiye'de 1996 yılında yapılan çalışmada Gebze şehri için 1988-1992 yılları arasında ölçülen değerler kullanılarak, güneş ışınımının bileşenlerini güneşlenme süresi ile ilişkilendiren denklemler geliştirilmiştir. Denklemlerden elde edilen sonuçların güvenilirliği istatistiksel göstergeler ile test edilmiştir. Çalışmanın sonunda bölgenin güneş bileşenlerinin her biri için en uygun model belirlenmiştir [27].

Aras ve arkadaşları tarafından Türkiye'de yapılan çalışmada Türkiye'nin İç Anadolu Bölgesi'nde bulunan 12 şehri için dağınık güneş ışınımı modellenmesi yapılmıştır. Çalışmada geliştirilen 12 yeni model dağınıklık kesrini güneşlenme kesri ve/veya açıklık kesri ile ilişkilendirilmiştir. Modellerin sonuçları belirleme katsayısı ( $R^2$ ) kullanılarak karşılaştırılmış ve bölge için en iyi sonucu veren model belirlenmiştir [28].

Türkiye'de yapılan çalışmada mevcut denklemlerden seçilen 15 denklem kullanılarak Türkiye'nin belirli şehirleri için yatay bir yüzeyin günlük dağınık güneş ışınımının aylık ortalamasını tahmin eden yeni denklemler geliştirilmiştir. Denklemlerde dağınıklık kesri, açıklık kesri ve/veya güneşlenme kesri ile ilişkilendirilmiştir. Yapılan istatistiksel testler açıklık kesri ve güneşlenme kesrinin üçüncü dereceden birlikte kullanıldığı denklemin en iyi sonuçları verdiğini göstermiştir [29].

Elminir tarafından Mısır'da yapılan çalışmada mevcut dağınık güneş ışınımı denklemlerinden en yaygın kullanılan 8 tanesi seçilmiş ve seçilmiş 5 meteorolojik istasyon için farklı istatistiksel göstergeler ile test edilmiştir. Çalışmanın sonunda Mısır bölgesi için en uygun denklemlerin dağınıklık kesrini açıklık kesri ve güneşlenme kesri ile birlikte ilişkilendiren denklemler olduğu görülmüştür [30].

2007 yılında Mısır'da yapılan çalışmada dağınıklık kesrini belirleyen bir yapay sinir ağı denklemi geliştirilmiş ve geliştirilen model mevcut regresyon denklemleri ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları Mısır bölgesi için yeni yapay sinir ağı denkleminin, seçilen regresyon denklemlerinden daha uygun olduğunu göstermiştir [31].

Çin'de yapılan çalışmada evrensel güneş ışınımı bileşenini içeren ve içermeyen dağınık güneş ışınımı denklemleri seçilen 8 farklı meteorolojik istasyon için karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonunda dağınık güneş ışınımı bileşeninin ölçülmüş değerlerinin mevcut olmadığı seçili istasyonlar için evrensel güneş ışınımı içermeyen dağınık güneş ışınımı denklemlerinin daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür [32].

2010 yılında Suudi Arabistan'da yapılan bir çalışmada evrensel ve dağınık güneş ışınımlarının yatay bileşenlerinin, güneşlenme süresinin, günlük ortalama sıcaklığın, en yüksek ve en düşük sıcaklıkların, bağıl nemin ve bulutluluk oranının 12 yıllık ölçülmüş değerleri alınarak iki veri grubu oluşturulmuştur. İlk veri grubu ile evrensel güneş ışınımı ve dağınık güneş ışınımı denklemleri oluşturulmuş, ikinci veri grubu ile bu denklemlerin kesinliği test edilmiştir. Elde edilen sonuçlarla eğimli yüzeylerin toplam güneş ışınımı farklı eğim açıları için Liu ve Jordan'ın izotropik modeli [25] ve Klutcher'in izotropik olmayan modelleri [33] ile ayrı ayrı hesaplanmıştır. Yapılan çalışmanın sonunda izotropik modelin izotropik olmayan modelden daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür [34].

Al-Mohamad tarafından Suriye'de yapılan çalışmada Liu ve Jordan'ın eşitliği [25] ve Klein'in eşitliği [35] temel alınarak dağınık güneş ışınımı tahmini yapan bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Geliştirilen programdan elde edilen sonuçlar ile

ölçülen değerler istatistiksel göstergeler kullanılarak karşılaştırılmış ve programın güvenilirliği test edilmiştir. Çalışmanın sonunda program ile elde edilen sonuçların en kötü durumda  $\pm\%3$  oranında hatalı olduğu görülmüştür [36].

Hindistan'da yapılan çalışmada 23 istasyon için ölçülmüş veriler kullanılarak dağınık güneş ışınımını güneşlenme süresi, sıcaklık ve bağıl nem ile ilişkilendiren 7 deneysel eşitlik geliştirilmiştir. Geliştirilen eşitliklerden elde edilen sonuçların doğruluğu farklı istatistiksel göstergeler ile test edilmiş ve mevcut eşitliklerden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonunda yeni eşitliklerin mevcut eşitliklerden daha doğru sonuçlar verdiği görülmüştür [37].

2016 yılında Shamshirband ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada destekçi vektör makinesi ve dalgacık dönüşümü algoritması birlikte kullanılarak yatay yüzeyler için dağınık güneş ışınımını tahmin eden yeni bir model geliştirilmiştir. Modelde dağınıklık kesri yalnızca açıklık kesri ile ilişkilendirilmiştir. Model İran'ın güneşli bir bölgesinde yer alan Kerman şehrinin ölçülmüş evrensel ve dağınık güneş ışınımı verileri ile test edilmiş ve modelin mevcut modellerden daha kesin sonuçlar verdiği görülmüştür [38].

Pakistan'da yapılan çalışmada mevcut güneşlenme saatleri verileri ile evrensel güneş ışınımı ve dağınık güneş ışınımı analizi yapılmıştır. Çalışmanın ilk bölümünde regresyon analizi ile evrensel güneş ışınımı tahmin edilmiştir. Elde edilen sonuçlar sık kullanılan üç dağınık güneş ışınımı modelinde kullanılmıştır: Liu ve Jordan [25], Hawas ve Muneer [39], Page [40]. Çalışmanın sonunda modeller ile elde edilen tahmini dağınık güneş ışınımı değerleri uydu temelli değerler ile karşılaştırılmış ve bölge için en uygun modelin Hawas ve Muneer modeli olduğu görülmüştür [41].

2007 yılında Uganda'da yapılan çalışmada mevcut 17 dağınık güneş ışınımı modeli ile Kampala şehri için dağınık güneş ışınımı tahmini yapılmıştır. Modellerin başarısı kök ortalama kare hatası ve mutlak ortalama sapma hatası göstergeleri ile sıralanmış ve şehir için en uygun modellerin dağınıklık çarpanının güneşlenme süresi ile ilişkilendirildiği modeller olduğu görülmüştür [42].

Namrata ve arkadaşları tarafından Hindistan'da yapılan çalışmada Kreith [43], Gupta [44], Liu ve Jordan [25] ve Page [40] tarafından geliştirilen toplam güneş ışınımı denklemleri kullanılarak dağınık güneş ışınımı tahmini yapılmıştır. Denklemlerin başarısı yüzde hatası ile belirlenmiş ve Kreith denkleminin bölge için en uygun denklem olduğu görülmüştür [45].

Tayvan'da yapılan çalışmada dağınıklık kesrinin hesaplanması amacıyla 2011 ve 2012 yılları arasında 5 farklı güneşlenme süresi için Uluslararası Cheng Kung Üniversitesi kampüsünde dağınık güneş ışınımı ve evrensel güneş ışınımı ölçümleri yapılmıştır. Yapılan çalışmada gündeşümü ve günbatımı arasında dağınıklık kesrinin ortalama değerinin 0,543 olduğu görülmüştür [46].

Ülgen ve Hepbaşı tarafından Türkiye'de yapılan çalışmada İzmir şehri için dağınıklık kesrini açıklık kesri ile ilişkilendiren deneysel eşitlikler geliştirilmiştir. Çalışmada elde edilen eşitliklerin ve mevcut eşitliklerden seçilen 16 eşitliğin başarıları istatistiksel göstergelerle belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır. Sonuçlar yeni geliştirilen eşitliklerden dağınıklık kesrini açıklık kesri ile birinci dereceden ve üçüncü dereceden ilişkilendiren kesirlerin şehir için en uygun eşitlikler olduğunu göstermiştir [47].

Yunanistan'da yapılan çalışmada evrensel ve dağınık güneş ışınımının 1996 ve 1998 yılları arasında kaydedilmiş değerleri kullanılarak dağınıklık ve açıklık kesri ilişkilendirilmiştir. Çalışmanın amacı Liu ve Jordan tarafından geliştirilen dağınık güneş ışınımı eşitlikleri [25] gibi sık kullanılan eşitliklerin Atina için başarı oranı yüksek bir uygulamasını gerçekleştirmektir. Çalışmanın sonunda yeni geliştirilen bölgesel eşitliğin karekök ortalama hatasını %10-20 oranında azalttığı görülmüştür [48].

## 2.2. Bölgesel Dağılık Güneş Işınımına Bağlı Olarak En Uygun Bölgesel Eğim Açısının Belirlenmesi

Pakistan'ın güney bölgesi olan Sind'de yapılan çalışmada dağılık güneş ışınım modelleri belirlenmesi ve bulunan olası bir konum için en uygun eğim açısının elde edilmesi amaçlanmıştır. Önceden ölçülmüş dağılık güneş ışınımı verisi bulunmadığından, yerel ajanslardan alınan bilgilere ve var olan modellerden elde edilen değerlere dayanan dokuz yeni model belirlenmiştir. İstatiksel göstergelere göre yapılan test sonuçlarına göre en iyi sonucu veren model seçilmiştir. En uygun eğim açısı aylık, mevsimlik, yarıyıllık ve yıllık olarak belirlenmiştir. En uygun eğim açısının  $0^\circ$  ile  $49^\circ$  arasında değiştiği gözlenmiştir. Yıllık en uygun eğim açısı  $23^\circ$  olarak bulunmuştur. En uygun açıyla eğim verilmiş yüzey ve yatay yüzey için dağılık güneş ışınımının toplamının aylık ortalaması hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Yapılan hesaplamalarda yıllık güneş enerjisi kazanımıyla aylık veya mevsimlik kazanımlar arasında önemli bir fark gözlenmediğinden bu çalışmada yarıyıllık en uygun eğim açısının en uygun eğim açısı olarak seçilmesi önerilmiştir [49].

Khorasanizadeh ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada Tabas kentinin güney bölgeleri için aylık, mevsimsel, yarıyıllık ve yıllık en uygun eğim açıları hesaplanmıştır. Önceden ölçülmüş dağılık güneş ışınımı verisi bulunmadığından, yatay dağılık ışınımını tahmin edebilmek için üç farklı kategoriden dokuz dağılık modeli geliştirilmiştir. İstatiksel göstergelere göre açıklık indeksi ve güneşlenme zamanının değişken olduğu üç derece modeli en iyi sonuçları vermiştir. Araştırma yapılan bölgede aylık en uygun eğim açısı  $0^\circ$  ile  $64^\circ$  arasında değişirken yıllık en uygun açı  $32^\circ$  olarak belirlenmiştir. Aylık, mevsimsel, yarıyıllık ve yıllık eğim açısı ile konumlandırılmış yüzeylerin yatay olarak konumlandırılmış yüzeylere göre ilave yıllık enerji kazanımının sırasıyla  $23,15\%$ ,  $21,55\%$ ,  $21,23\%$  ve  $13,76\%$  daha fazla olduğu görülmüştür. Bu sonuçlara göre ılık dönem için  $10^\circ$  ve soğuk dönem için  $55^\circ$  olan yarıyıllık eğim açıları önerilmiştir [50].

2012 yılında Türkiye’de yapılan çalışmada güneş enerjisi uygulamalarında kullanılan güneş panellerine ait en uygun eğim açısının hesaplanması amaçlanmıştır. Uygunlaştırma işlemi Türkiye’nin sekiz büyük şehirden alınan güneş ışınımı ölçüm verileri ile gerçekleştirilmiştir. Eğimli yüzeyler için en uygun eğim açısı hesaplanırken, eğim açısı değeri  $0^\circ$  ile  $90^\circ$  arasında  $1^\circ$  artırılmış ve güneş ışınım değerinin günlük toplamını en fazla yapan eğim açısı değeri en uygun değer olarak kabul edilmiştir. Hesaplamalar Türkiye’de en uygun eğim açısının  $0^\circ$  ile  $65^\circ$  arasında değiştiğini göstermiştir. Haziran ve Temmuz aylarında en uygun eğim açısının  $0^\circ$  olduğu ve günlük toplam ışımanın aylık ortalamasının bu açıda genellikle maksimum olduğu görülmüştür. Bununla beraber kış aylarında en uygun eğim açısı artmış ve Aralık ayında maksimum değerine ulaşmıştır. Türkiye için en uygun eğim açısının en doğru tahmininin yapılması için bu açılara istatistiksel hata testleri uygulanmış ve bazı bağıntılar geliştirilmiştir [51].

Sırbistan’da yapılan çalışmada Belgrad şehri için yıllık, yarıyıllık, mevsimsel, aylık, iki haftalık ve günlük en uygun eğim açıları belirlenmiştir. Çalışmada en uygun eğim açısı kolektör belirlene zaman aralığında yüzeyindeki toplam güneş ışınımını en yüksek yapan açı olarak belirlenmiştir [52]. Toplam güneş ışınımı Liu ve Jordan’ın dağınık güneş ışınımını toplam güneş ışınımı ile ilişkilendiren eşitlik [25] ile hesaplanmıştır. Farklı senaryolar için en uygun eğim açısı belirlenmiş ve bu açılar için metre kare başına toplanan enerji hesaplanmıştır. Hesaplamalar yıllık, mevsimsel ve aylık eğim açıları için enerji artışının sırasıyla %5,98, %13,55 ve %15,42 olduğunu göstermiştir [52].

Amerika’da yapılan çalışmada 43,2 kW şebeke bağlantılı fotovoltaik bir sistem için Klein ve Beckman tarafından geliştirilen yazılım kullanılarak  $22^\circ$  ve  $48^\circ$  arasındaki bütün eğim açısı değerleri için üretilen elektrik enerjisi hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar  $30^\circ$  eğim açısının Carbondale için en uygun açı olduğunu göstermiştir [53]. Böylelikle bir bölge için en uygun eğim açısının o bölgenin enlemi olduğu sonucuna varan çalışmanın [54] her bölge için doğru olmadığı görülmüştür.

2013 yılında Abu Dabi’de yapılan çalışmada bölge için yıllık ve aylık en uygun eğim açıları hesaplanmıştır [55]. Çalışmada öncelikle dağınık güneş ışınımı verisi mevcut olmadığından Erbs modeli [56] kullanılarak günlük dağınık güneş ışınımının aylık ortalaması hesaplanmıştır. Elde edilen verilerle Klein ve Theilacker [56] modeli kullanılarak farklı eğim açıları için toplam güneş ışınımı hesaplanmış, en yüksek ışınım değerini sağlayan açı belirlenmiştir. Çalışmanın sonunda bölge için en uygun yıllık eğim açısı  $22^\circ$  olarak belirlenmiştir. En uygun aylık eğim açılarının ise Haziran ve Aralık arasında  $-9^\circ$ ’den  $52^\circ$ ’ye artarak değiştiği görülmüştür [57].

Arabistan’da yapılan çalışmada Liu ve Jordan tarafından geliştirilen toplam güneş ışınımı eşitliği [25] kullanılarak Medine için aylık, mevsimsel ve yıllık en uygun eğim açıları hesaplanmıştır. Çalışmada evrensel güneş ışınımı ve dağınık güneş ışınımı bileşenlerinin ölçülen değerleri kullanılmıştır. Çalışmanın sonunda bölge için en uygun eğim açıları yaz mevsimi için  $12^\circ$ , ilkbahar mevsimi için  $17^\circ$ , sonbahar mevsimi için  $28^\circ$ , kış mevsimi için  $37^\circ$ , bir yıl için  $23,5^\circ$  olarak hesaplanmıştır [58].

Avusturalya’da Corrada ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada güneş enerjisi ile ısıtma ve soğutma yapan sistemlerde güneş panellerinin en uygun eğim açısı ile konumlandırılmasının kurulum maliyetine etkisi araştırılmıştır. Çalışmada en uygun eğim açısı toplam güneş ışınımını eğim açısı ile ilişkilendiren izotropik olmayan bir eşitlikle hesaplanmıştır. Sonuçlar aylık en uygun eğim açısı ile konumlandırılan panellerle sistemin ısıtma/soğutma kapasitesinin en yüksek değerine ulaştığını göstermiştir. Bu durumda panel sayısının ve kurulum maliyetinin azaltılabileceği görülmüştür [59].

Brunei Darusselam’da yapılan çalışmada evrensel güneş ışınımı ve dağınık güneş ışınımının 1992 yılı için ölçülmüş değerleri kullanılarak günlük, aylık, mevsimsel ve yıllık en uygun eğim açıları hesaplanmıştır. Çalışmada toplam güneş ışınımını en yüksek yapan eğim açısı değeri en uygun eğim açısı olarak belirlenmiştir. Sonuçlar eğim açısının aylık olarak değiştirilmesinin enerji üretimine katkısının günlük olarak değiştirildiği durumda elde edilen katkıya yakın olduğunu göstermiştir. Aylık en

uygun eğim açısı ile konumlandırılan sistemlerde sabit sistemlere göre yıllık güneş ışınlamını kazanımının %4,5 olduğu görülmüştür [60].

Çin’de Tang ve Wu tarafından yapılan çalışmada dağınık güneş ışınlamı ölçümü yapılan şehirler için mevcut dağınık güneş ışınlamı değerleri ile ölçüm yapılamayan şehirler için dağınık güneş ışınlamı tahmini ile 182 farklı bölge için en uygun eğim açısı hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler ile ülke için yıllık en uygun eğim açısı haritası oluşturulmuştur [61]. Çalışmanın ilk bölümünde Rabl tarafından geliştirilen, dağınıklık kesrini açıklık kesri ile ilişkilendiren eşitlik [62] kullanılarak ölçülen değerleri mevcut olmayan bölgeler için dağınık güneş ışınlamı tahmini yapılmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde ise elde edilen tahmini değerler ve mevcut ölçülen değerler ile her bölge için toplam güneş ışınlamını en yüksek yapan yıllık en uygun eğim açısı hesaplanmıştır [61].

Kıbrıs’ta yapılan çalışmada evrensel güneş ışınlamının mevcut ölçülmüş verileri kullanılarak bölge için mevsimsel en uygun eğim açıları yapılmıştır. Çalışmada ilk olarak direkt güneş ışınlamı ve dağınık güneş ışınlamı için mevcut modeller kullanılarak tahmin yapılmıştır. Elde edilen değerler ile  $0^\circ$  ile  $90^\circ$  arasındaki eğim açısı değerleri için toplam güneş ışınlamı hesaplanmış ve toplam güneş ışınlamını en yüksek yapan açılar en uygun açılar olarak belirlenmiştir. Çalışmanın sonunda kış mevsimi için en uygun eğim açısının  $48^\circ$ , yaz mevsimi için en uygun eğim açısının  $14^\circ$  olduğu görülmüştür [63].

Farklı enlemler üzerindeki bölgeler için Stanciu ve Stanciu tarafından yapılan çalışmada güneş ışınlamı yoğunluğu üç farklı model için incelenmiş ve elde edilen sonuçlarla her model için yıllık en uygun eğim açısı formülü geliştirilmiştir [64]. En basit model olan Hottel ve Woertz modeli [65] için yıllık en uygun eğim açısı enlem ile deklinasyon açısının farkı olarak hesaplanmıştır. Liu ve Jordan modeli [25] ile Hay-Davis-Klucker-Reindl [66] modeli için ise Hottel ve Woertz modeli için hesaplanan açı değerinin (enlem–deklinasyon $\pm 10^\circ$ ) olduğu görülmüştür [64].

Mısır'da 2006 yılında yapılan çalışmada Helvan bölgesi için aylık en uygun eğim açıları hesaplanmıştır [67]. Çalışmada öncelikle mevcut üç model arasından bölge için en uygun güneş ışıını modeli seçilmiş ve izotropik olmayan Perez modelinin [68] bölge için en uygun model olduğu görülmüştür. Perez modeli ile elde edilen güneş ışıını verileri ile bölge için en uygun aylık eğim açıları belirlenmiştir. Çalışmanın sonunda Helvan bölgesi için en uygun eğim açısının (enlem $\pm$ 15°) genellemeninin doğru olduğu görülmüştür [67].

Yunanistan'da yapılan çalışmada bölge için sıcak ve soğuk mevsimler için en uygun eğim açıları hesaplanmış ve elde edilen sonuçlarla iyileştirme çalışması yapılmıştır. Çalışmada öncelikle farklı istatistiksel göstergeler ile mevcut dağılık güneş ışıını modellerinden bölge için en uygun model belirlenmiştir. Belirlenen model, Liu ve Jordan modeli [25], ile eğimli yüzeylerdeki evrensel güneş ışıınıının 0° ile 90° arasındaki eğim açıları için ortalama değerleri belirlenmiştir. Elde edilen değerler çalışmanın bir sonraki aşamasında evrensel güneş ışıınıının ortalama değerini ve varyans değerini eğim açısı ile ilişkilendiren iyileştirme modellerin geliştirilmesinde kullanılmıştır. Yeni modeller lineer regresyon yöntemi ve yapay sinir ağı algoritması kullanılarak oluşturulmuştur. Çalışmanın sonunda sıcak ve soğuk dönemlerde en uygun eğim açısı ile konumlandırmanın üretilen enerji miktarını artırarak sistem verimini iyileştirdiği görülmüştür [69].

Türkiye'de Günerhan ve Hepbaşı tarafından yapılan çalışmada İzmir bölgesi için aylık en uygun eğim açıları hesaplanmıştır. Çalışmada toplam güneş ışıınıını en yüksek yapan eğim açısı en uygun eğim açısı olarak seçilmiştir [70]. Belirlenen eğim açıları İzmir'in de içerisinde olduğu bir enlem kuşağı için Nijegorodov ve arkadaşlarının önerdiği aylık en uygun eğim açısı denklemleriyle [71] elde edilen açı değerleri ile karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonunda sonuçların birbiriyle örtüştüğü görülmüştür [70].

Ürdün'de yapılan çalışmada bir güneş su ısıtıcısı için yıllık güneş kesri kullanılarak bir bilgisayar programı ortamında yıllık en uygun eğim açısı hesaplanmıştır.

Çalışmada güneş kesrini en yüksek yapan en uygun eğim açısının (enlem) ile (enlem+20°) arasında değiştiği gözlenmiştir [72].

Akdeniz’de Darhmaoui ve Lahjouji tarafından yapılan çalışmada evrensel güneş ışınımının mevcut 4 yıl boyunca ölçülmüş değerleri kullanılarak bölgenin toplam güneş ışınımını en yüksek yapan en uygun eğim açısı için matematiksel model geliştirilmiştir. Çalışmada öncelikle mevcut güneş denklemleri ile direkt güneş ışınımı ve dağınık güneş ışınımı değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen değerlerle bilgisayar ortamında regresyon analizi yapılarak en uygun eğim açısı enlem ile ilişkilendirilmiştir. Çalışmanın sonunda bölge için en uygun eğim açısının enlemin ikinci dereceden regresyon modeli olarak tanımlanması gerektiği sonucuna varılmıştır [73].

Malezya’da yapılan çalışmada direkt güneş ışınımı ve dağınık güneş ışınımı bileşenleri kullanılarak bölge için en uygun eğim açısı belirlenmiştir. Çalışmada dağınık güneş ışınımı mevcut izotropik modeller kullanılarak hesaplanmıştır. Çalışmanın sonunda en uygun eğim açısı belirli zaman aralıkları için genel bir eşitlik olarak verilmiştir [74].

Türkiye’de 2004 yılında yapılan çalışmada Şanlıurfa bölgesi için aylık ve mevsimsel en uygun eğim açıları belirlenmiş, bu açılarla elde edilen toplam güneş ışınımı değerleri bölgenin enlem derecesi ile elde edilen toplam güneş ışınımı değerleri ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada dağınık güneş ışınımı ve direkt güneş ışınımı değerleri, evrensel güneş ışınımı ve güneş saatlerinin ölçülmüş değerleri kullanılarak mevcut güneş eşitlikleri ile hesaplanmıştır. Elde edilen değerler ile toplam güneş ışınımını en yüksek yapan aylık ve mevsimsel en uygun eğim açıları belirlenmiştir. Çalışmanın sonunda en verimli durumun aylık en uygun eğim açısı ile konumlandırma olduğu görülmüştür [75].

İspanya’da yapılan çalışmada Burgos bölgesi için 1981-1986 yılına mevcut saatlik evrensel güneş ışınımı verileri kullanılarak farklı açılarla konumlandırılmış yüzeyler için toplam güneş radyasyonu analizi yapılmıştır [76]. Çalışmada dağınık güneş

ışınımı Liu ve Jordan [25], Page [40], L alas [77] ve Iqbal [78] modelleri ile hesaplanmış, yapılan istatiks el başarı analizi ile bölge için en uygun model Page modeli olarak belirlenmiştir. Çalışmanın sonunda bölge için aylık en uygun eğim açılarının Haziran ve Aralık ayları arasında 2°'den 80°'ye kadar artarak değiştiği görülmüştür [78].

Suriye'de Skeiker tarafından yapılan çalışmada günlük uzay dışı toplam güneş ışı nımını en yüksek yapan eğim açısı en uygun eğim açısı olarak belirlenmiştir. Çalışmada aylık en uygun eğim açıları hesaplanmış, bu açılarla elde edilen ışı nım kazanımının günlük en uygun eğim açıları ile elde edilen ışı nım kazanımına yakın olduğu görülmüştür. Çalışmada günlük konumlandırmanın uygulanabilirliğinin daha zor olmasına vurgu yapılmış, aylık konumlandırma önerilmiştir [79].

### **2.3. İki Eksen Güneş İzleyen Hareketli Güneş Sistemleri**

Brezilya'da Roth ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada güneş ölçer ile iki eksen güneş izleyen düşük maliyetli bir sistem tasarımı yapılmıştır. Çalışmada kontrol birimi olarak mikro işlemci kullanılmış, eksenlerin hareketi ise iki adet step motor ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonunda tasarlanan düşük maliyetli sistemin verimi, iki eksen güneş izleyen başka bir sistemin verimi ile karşılaştırılmış, iki sistemin benzer verimler ile çalıştığı gözlemlenmiştir [80].

Cezayir'de 2010 yılında yapılan çalışmanın ilk bölümünde foto diyotlar ile iki eksen güneş izleyen bir sistem tasarımı yapılmıştır. Sistemde foto diyotların gerilimindeki değişime göre LM 324 opampı ile sinyal üretilmiş ve güneş takibi üretilen sinyal ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın bir sonraki bölümünde yeni sistem ile sabit bir güneş sistemi karşılaştırılmış, hareketli sistemin %28 daha verimli çalıştığı gözlenmiştir [81].

Türkiye'de Eke ve Şentürk tarafından yapılan çalışmanın uygulama bölümünde iki eksen güneş izleyen bir sistem ile sabit bir sistemin çalışmaları bir yıl boyunca gözlenmiş ve sistemlerin elektriksel çıktıları analiz edilmiştir. Bir yılın sonunda

hareketli sistemin sabit sisteme göre %30,79 daha verimli çalıştığı görülmüştür. Çalışmanın benzetim bölümünde sistemlerin performansları bilgisayar ortamında karşılaştırılmış ve uygulama bölümünde elde edilen sonuçlar tekrarlanmıştır [82].

İtalya'da 2011 yılında yapılan çalışmada güneşin konumunu güneş matematiği ile iki eksende izleyen bir sistem tasarımı yapılmıştır. Çalışmada bölgenin konumu GPS ile alınmış, sistem kontrolü ise CS012 kartı ile sağlanmıştır. CS012 kartı ile belirlenen sistemin konumu, güneş matematiği ile hesaplanan güneşin konumu ile karşılaştırılmış, konumları eşitleyecek şekilde motorlara hareket verilmiştir [83].

Wang ve Lu tarafından 2013 yılında yapılan çalışmada iki eksen güneş izleyen bir sistem ile sabit bir sistemin çalışmaları günlük olarak karşılaştırılmıştır. Çalışmada güneş izleme foto sensörlerden alınan ışınım bilgisi ile gerçekleşmiştir. Sistem hareketi çift eksenli bir AC motor ile sağlanmış, motorların kontrolü op-amp ve röleler ile yapılmıştır. Çalışmanın sonunda sistemlerin çalışması bulutlu bir günde izlenmiş, hareketli sistemin %28,31 daha verimli olduğu gözlenmiştir [84].

Türkiye'de yapılan çalışmada iki eksen güneş izleyen bir sistemden elde edilen elektriksel güç ile aynı koşullarda sabit bir güneş sisteminden elde edilen elektriksel güç karşılaştırılmıştır. Çalışmanın ilk bölümünde güneşin konumu ilgili bölge için bir yıllık olarak belirlenmiştir. Belirlenen konum ile sistem konumu bir PLC ünitesi ile karşılaştırılmış ve sistem konumlar eşitlenene kadar gerekli yönde hareket ettirilmiştir. Çalışmanın sonunda hareketli sistemin sabit sisteme göre %42,6 daha fazla elektriksel güç sağladığı görülmüştür [85].

Ürdün'de 2011 yılında yapılan çalışmada iki eksen güneş izleyen bir güneş fırını tasarımı yapılmıştır. Çalışmada güneş fırını olarak ortasında tava sabitlenmiş güneş ışınımını emen bir tabak kullanılmıştır. Çalışmanın sonunda fırının hareket etmesi durumunda en yüksek sıcaklığın 32° olduğu bir günde, tava sıcaklığı en düşük 93° olarak ölçülmüştür [86].

Duarte ve arkadaşları tarafından Portekiz’de yapılan çalışmada güneşin konumunun güneş haritaları ile belirlenmiş ve iki eksenle takip edilmiştir. Çalışmanın ilk bölümünde bir mikroişlemci ortamında güneş haritalarından elde edilen verilerle belirli aralıklar için güneşin konumunu sağlayan eşitlikler oluşturulmuştur. Sistem hareketi iki adet AC motor ile sağlanmış, motorların güvenli bir şekilde çalışabilmesi için eksen hareketleri dört adet sensör ile sınırlanmıştır [87].

Romanya’da 2011 yılında yapılan çalışmada farklı eksenlerde güneş izleyen sistemler karşılaştırılmıştır. Çalışmada bir eksen ekvatorial güneş izleyen sistem, bir eksen azimut güneş izleyen sistem, iki eksen ekvatorial güneş izleyen sistem ve iki eksen azimut güneş izleyen sistem tasarımı yapılmıştır. Çalışmanın sonunda sistem seçiminin sistemlerin gücüne göre yapılması gerektiği görülmüş, küçük güçler için bir eksen ekvatorial güneş izleyen sistem ve büyük güçler için iki eksen azimut güneş izleyen sistem önerilmiştir [88].

Barker ve arkadaşları tarafından 2013 yılında yapılan çalışmada eş düzlemlili ve birbirine dik iki lineer aktüatör içeren iki eksen güneş izleyen bir sistem tasarımı yapılmıştır. Güneş takibi sıcaklığı ölçen bir konkav aynadan alınan veriye göre gerçekleştirilmiştir. Çalışmada yeni geometri ile sistemin mekanik aksamının oldukça dayanıklı ve hatasız olduğu görülmüştür [89].

Burhan ve arkadaşları tarafından 2016 yılında yapılan çalışmada izleme hatası  $\pm 0.3^\circ$  olan iki eksen güneş izleyen sistem tasarımı yapılmıştır. Çalışmada hem güneş denklemlerinden hem de optik sensörlerden faydalanılmıştır. Güneş açıları güneş denklemleri ile hesaplanmış, izleme kesinliği çift lens bir güneş geri besleme sensörü ile belirlenmiştir. Çalışmanın sonunda birden fazla izleyici için izleme bilgilerinin bir izleyici ile belirlenmesi ve verinin diğer izleyiciler kablosuz bağlantı ile paylaşılması önerilmiştir. Böylelikle büyük güneş alanlarında maliyet önemli oranda azaltılabilmektedir [90].

Fathabadi tarafından 2016 yılında yapılan çalışmada biri sensörlü diğeri sensörsüz olmak üzere iki adet iki eksen güneş izleyen sistem tasarımı yapılmış ve sistemlerin

elektriksel çıktıları aynı koşullar için karşılaştırılmıştır. Güneş matematiği temelli sensörsüz sistem  $0,43^\circ$  izleme hata oranı ile sensörlü sistem ise  $0,14^\circ$  izleme hata oranı ile mevcut çalışmaların içerisinde öne çıkmaktadır. Çalışmanın sonunda sensörlü sistemin elde edilen ortalama günlük güneş enerjisini daha fazla artırdığı, sensörsüz sistemin ise daha az maliyetli olduğu görülmüştür [91].

Amerika'nın doğu bölgesinde yapılan çalışmada bölgeye ait 24 aylık meteoroloji verileri ile farklı hava koşulları için en uygun eksen açılarını hesaplayan bir eşitlik geliştirilmiş ve bu eşitlik ile güneşi iki eksende izleyen bir sistem tasarımı yapılmıştır. Çalışmanın sonunda bulutlu havalarda izleme açılarının özelleştirilmesiyle sistem veriminin saatlik olarak %50'ye kadar, 24 aylık bir dönemde ise %2,3 oranında arttığı gözlenmiştir [92].

2016 yılında yapılan çalışmada iki eksen güneş izleyen sistemlerin eksen sınırları incelenmiştir. Çalışmada azimut ve yükseklik güneş açıları direkt olmayan izleme yöntemi kullanılarak güneş denklemleri ile belirlenmiştir. Çalışmanın sonunda yükseklik ekseninde izlemenin  $0^\circ$  ve  $90^\circ$  arasında sorunsuz yapılabildiği, azimut ekseninde ise hareketin  $-9^\circ$  ve  $9^\circ$  arasında sınırlandığı görülmüştür [93].

Yunanistan'da yapılan çalışmada en yüksek güç noktasını bulma yöntemi ile güneşi iki eksende izleyen sensörsüz bir güneş sistemi yapılmıştır. Çalışmada azimut ve yükseklik açıları üretilen enerjinin en yüksek olduğu açılar olarak belirlenmiştir. Çalışmanın sonunda sistemin hata oranının  $0,11^\circ$  ile mevcut hareketli sistemlerden daha az olduğu ve sistem veriminin mevsime bağlı olarak %28,8 - %43,6 oranında değiştiği görülmüştür [94].

Pekin'de yapılan çalışmada yaz ayları ve kış ayları için farklı eksenlerde güneşi izleyen bir sistem tasarlanmıştır. Çalışmada 300 kW bir parabolik güneş toplayıcısı kullanılmıştır. Toplayıcı yaz aylarında en fazla ışınımın ölçüldüğü 2 Haziran ve 24 Haziran günlerinde, kış aylarında en fazla ışınımın ölçüldüğü 2 Kasım ve 5 Kasım günlerinde güneşi izlemiştir. Yaz aylarında ışınım geliş açısı oldukça küçük olduğundan sadece azimut ekseninde izleme yapılmıştır. Çalışmanın sonunda kış

aylarında iki eksenle izleme ile elde edilen güneş enerjisinin %43 - %48 oranında arttığı gözlemlenmiştir [95].

Nijerya'da yapılan çalışmada iki eksen güneş izleyen bir sistem için sistem performans oranı, mevsimsel ve yıllık enerji üretim potansiyeli ve enerji üretim potansiyelindeki iyileşme oranı için matematiksel eşitlikler yardımı ile tahmin yapılmıştır. Çalışmada açıklık kesrine bağlı mevcut güneş modelleri ile eğimli yüzeyler için toplam güneş ışımasını tahmini yapılmış, ışıma ve ortam sıcaklığına bağlı eşitliklerle de verim hesabı yapılmıştır. Çalışmanın sonunda en yüksek verim iyileşmesinin %32 - %62 oranında kış aylarında olduğu görülmüştür [96].

2017 yılında Malezya'da yapılan çalışmada açık çevrim iki eksen güneş izleyen bir sistem tasarımı yapılmış ve sabit bir güneş sistemi ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada güneşin konumu güneş denklemleri ile azimut ve yükseklik açısı olarak hesaplanmıştır. Bölgenin konumu Küresel Konumlama Sistemi (GPS) sensörü ve sistemin konumu bir enkoder ile belirlenmiştir. Kontrol ünitesi olarak bir mikrodenetleyici seçilmiş, kullanılan enerjiyi azaltmak için bir Oransal-Integral-Türevsel (PID) kontrol ünitesi ilave edilmiştir. Çalışmanın sonunda tasarlanan sistem, aynı koşullarda sabit bir sistem ile karşılaştırılmış ve hareketli sistemin açık bir günde %26,9, kapalı bir günde %12,8 daha verimli olduğu görülmüştür [97].

2017 yılında Slovenya'da yapılan çalışmada açık çevrim iki eksen güneş izleyen bir sistemin doğruluk derecesi araştırılmıştır. Çalışmada güneş denklemleri ile hesaplanan azimut ve yükseklik açılarının değerleri ile foto sensörler sayesinde takip edilen azimut ve yükseklik açıları karşılaştırılmıştır. Bir haftalık analiz sonunda hesaplanan ve ölçülen değerlerin birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Bir sonraki aşamada sistem aynı koşullarda sabit bir sistem ile birlikte izlenmiş, hareketli sistemin %27 daha verimli çalıştığı kaydedilmiştir [98].

Away ve Ikhsan Tarafından Endonezya'da yapılan çalışmada ışığa bağlı direnç değeri değişen bir sensör ile iki eksen güneş izleyen bir sistem tasarımı yapılmış ve mevcut sensör temelli hareketli sistemler ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada iki eksenle

hareket özel bir üç taraflı piramit geometri kullanılarak sağlanmıştır. Bu geometri sayesinde güneş izlemedeki hata bir ışık kaynağı ile  $1,67^\circ$ , birden fazla ışık kaynağı ile  $5,4^\circ$  olarak ölçülmüştür. Sistem hareketinin kesinliği diğer çalışmalar ile karşılaştırılmış, sistemin mevcut çalışmalardan daha güvenilir olduğu görülmüştür [99].

Fathabadi tarafından 2016 yılında yapılan çalışmada güneş denklemleri ile iki eksen güneş izleyen bir sistem tasarımı yapılmıştır. Çalışmada güneşin konumu herhangi bir geri besleme sinyali kullanılmadan güneş denklemleri ile hesaplanmıştır. Yeni sistemin çalışması mevsimsel olarak izlenmiş, sistemin sabit bir sisteme göre mevsimsel olarak %19,1 - %30,2 daha verimli olduğu ve sistem hatasının en yüksek  $0,43^\circ$  olduğu görülmüştür. Çalışmanın en önemli katkıları benzer özellikler taşıyan mevcut sistemlerden daha az hata ile izleme yapması ve geri besleme sinyali gerekmediğinden ortam koşullarından etkilenmemesi olarak belirlenmiştir [100].

2017 yılında yapılan çalışmada aşağı enlemlerde bulunan 21 ülke için güneş sistemlerinin verimleri karşılaştırılmıştır [101]. Çalışmada Perez [68] ve Koronakis [102] dağınık güneş modelleri kullanılarak eğimli yüzeyler için üretilen enerji hesaplanmıştır. Çalışmada her ülke için en verimli sistemin iki eksen güneş izleyen sistem olduğu görülmüştür. İki eksen güneş izleyen sistemi en uygun yıllık eğim açısı ile konumlandırılmış doğu-batı veya güney-kuzey yönde tek eksen güneş izleyen sistemler takip etmiştir [101].

Yılmaz ve arkadaşları tarafından Türkiye’de yapılan çalışmada Kahramanmaraş bölgesi için güneş sistemi parametreleri incelenmiş ve iki eksen güneş izleyen sistem tasarımı yapılmıştır. Çalışmanın ilk bölümünde mevcut güneş açısı denklemleri ve toplam güneş ışınımı denklemleri ile bölge için azimut ve yükseklik açıları belirlenmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde iki adet foto direnç (LDR) ile güneşi azimut ve yükseklik eksenlerinde izleyen bir sistem tasarlanmıştır. Tasarlanan sistem sabit bir güneş sistemi ile karşılaştırılmış ve hareketli sistemin daha verimli olduğu görülmüştür [103].

2017 yılında Güney Afrika'da yapılan çalışmada iki eksen güneş izleyen bir sistem tasarımı yapılmış ve şebekeye bağlanmıştır. Çalışmada bir mikrodnetleyici kontrolünde LDR sensörleri ile güneş azimut ve yükseklik eksenlerinde izlenmiştir. Tasarlanan sistemden elde edilen enerji Elektrik Hattı Üzerinden Haberleşme (PLC) ile şebekeye verilmiş veya depolanmıştır. Böylelikle güneş enerjisinden en yüksek verimle faydalanılmıştır [104].



## **BÖLÜM 3. EN UYGUN EĞİM AÇILARININ BELİRLENMESİ**

Bu bölümde Sakarya için güneş ışınımı modellenmesi yapılmış ve aylık ortalama toplam güneş ışınımı tahmin edilmiştir. Elde edilen sonuçlarla en uygun günlük, aylık, mevsimsel, yarıyıllık ve yıllık eğim açıları ve bu açılar ile konumlandırılmış yüzeylerin toplam güneş ışınımı değerleri belirlenmiştir.

### **3.1. Yeni Dağınık Güneş Işınımı Denklemlerinin Geliştirilmesi**

Güneş enerjisi sistemlerinin tasarımında ve analizinde güneş verilerinin ölçümlerinin kesinliği hayati önem taşımaktadır [45]. Günümüzde birçok ülkede evrensel güneş ışınımı bölgesel olarak kolaylıkla kaydedilmektedir. Ancak dağınık güneş ışınımı ölçümü sadece birkaç ülkede yapılabilmektedir. Dağınık güneş ışınımı verisi güneş enerjisi sistemlerinin performansı ile ilgili bilgi veren eğimli yüzeylerdeki toplam güneş ışınımının hesaplanmasında kullanılmaktadır [105]. Bu nedenle ölçümü mümkün olmayan bölgelerde matematiksel denklemler ile dağınık güneş ışınımı tahmini yapılmaktadır. Tez çalışmasının bu bölümünde Sakarya bölgesi için 9 yeni dağınık güneş ışınımı denklemi geliştirilmiştir. Bu amaçla en sık kullanılan 17 mevcut dağınık güneş ışınımı denklemi kullanılmıştır. Denklemler 3 grupta incelenmiştir:

- Grup 1: dağınıklık kesrinin açıklık kesrinin fonksiyonu olduğu denklemler
- Grup 2: dağınıklık kesrinin güneşlenme kesrinin fonksiyonu olduğu denklemler

- Grup 3: dağınlık kesrinin açıklık kesri ve güneşlenme kesrinin fonksiyonu olduğu denklemler.

Tablo 3.1. Mevcut dağınlık güneş ışınımı denklemleri

Grup 1: dağınlık kesrinin ( $H_d/H$ ) açıklık kesrinin ( $H/H_0$ ) fonksiyonu olduğu denklemler

$$3.1. \quad \frac{H_d}{H} = 1,00 - 1,13 \times \left( \frac{H}{H_0} \right) \quad [40]$$

$$3.2. \quad \frac{H_d}{H} = 1,0212 - 1,1672 \times \left( \frac{H}{H_0} \right) \quad [28]$$

$$3.3. \quad \frac{H_d}{H} = 0,6772 - 0,4841 \times \left( \frac{H}{H_0} \right) \quad [21]$$

$$3.4. \quad \frac{H_d}{H} = 1,1244 - 1,5582 \times \left( \frac{H}{H_0} \right) + 0,3635 \left( \frac{H}{H_0} \right)^2 \quad [28]$$

$$3.5. \quad \frac{H_d}{H} = 0,9885 - 1,4276 \times \left( \frac{H}{H_0} \right) + 0,5679 \times \left( \frac{H}{H_0} \right)^2 \quad [23]$$

$$3.6. \quad \frac{H_d}{H} = 1,027 - 1,6582 \times \left( \frac{H}{H_0} \right) + 1,1018 \times \left( \frac{H}{H_0} \right)^2 - 0,4019 \times \left( \frac{H}{H_0} \right)^3 \quad [23]$$

Grup 2: dağınlık kesrinin ( $H_d/H$ ) güneşlenme kesrinin ( $S/S_0$ ) fonksiyonu olduğu denklemler

$$3.7. \quad \frac{H_d}{H} = 0,6603 - 0,5272 \times \left( \frac{S}{S_0} \right) \quad [106]$$

$$3.8. \quad \frac{H_d}{H} = 0,663 - 0,4883 \times \left( \frac{S}{S_0} \right) \quad [28]$$

$$3.9. \quad \frac{H_d}{H} = 0,791 - 0,635 \times \left( \frac{S}{S_0} \right) \quad [107]$$

$$3.10. \quad \frac{H_d}{H} = 0,7434 - 0,8203 \times \left( \frac{S}{S_0} \right) + 0,2454 \times \left( \frac{S}{S_0} \right)^2 \quad [106]$$

Tablo 3.1. (Devamı)

Grup 2: dağınıklık kesrinin ( $H_d/H$ ) güneşlenme kesrinin ( $S/S_0$ ) fonksiyonu olduğu denklemler

$$3.11. \quad \frac{H_d}{H} = 0,6492 - 0,4323 \times \left(\frac{S}{S_0}\right) - 0,0512 \times \left(\frac{S}{S_0}\right)^2 \quad [28]$$

$$3.12. \quad \frac{H_d}{H} = 0,5562 + 0,1536 \times \left(\frac{S}{S_0}\right) - 1,2027 \times \left(\frac{S}{S_0}\right)^2 + 0,7122 \times \left(\frac{S}{S_0}\right)^3 \quad [28]$$

$$3.13. \quad \frac{H_d}{H} = 1,194 - 0,838 \times \left(\frac{H}{H_0}\right) - 0,446 \times \left(\frac{S}{S_0}\right) \quad [108]$$

Grup 3: dağınıklık kesrinin ( $H_d/H$ ) açıklık kesri ( $H/H_0$ ) ve güneşlenme kesrinin ( $S/S_0$ ) fonksiyonu olduğu denklemler

$$3.14. \quad \frac{H_d}{H} = 1,00 - 0,858 \times \left(\frac{H}{H_0}\right) - 0,235 \times \left(\frac{S}{S_0}\right) \quad [56]$$

$$3.15. \quad \frac{H_d}{H} = 0,945 - 0,675 \times \left(\frac{H}{H_0}\right) - 0,166 \times \left(\frac{H}{H_0}\right)^2 - 0,173 \times \left(\frac{S}{S_0}\right) - 0,079 \times \left(\frac{S}{S_0}\right)^2 \quad [19]$$

$$3.16. \quad \frac{H_d}{H} = 0,747 - 1,502 \times \left(\frac{H}{H_0}\right) - 4,956 \times \left(\frac{H}{H_0}\right)^2 + 3,321 \times \left(\frac{H}{H_0}\right)^3 - 1,004 \times \left(\frac{S}{S_0}\right) \\ + 1,747 \times \left(\frac{S}{S_0}\right)^2 - 1,226 \times \left(\frac{S}{S_0}\right)^3 \quad [19]$$

$$3.17. \quad \frac{H_d}{H} = 0,9593 - 0,8713 \times \left(\frac{H}{H_0}\right) + 0,29191 \times \left(\frac{H}{H_0}\right)^2 - 0,0979 \times \left(\frac{H}{H_0}\right)^3 \\ - 0,28419 \times \left(\frac{S}{S_0}\right) + 0,02653 \times \left(\frac{S}{S_0}\right)^2 - 0,02083 \times \left(\frac{S}{S_0}\right)^3 \quad [50]$$

Burada dağınıklık kesri ( $K_d$ ) dağınık güneş ışınımının ( $H_d$ ) evrensel güneş ışınımına oranı ( $H$ ), açıklık kesri ( $K_t$ ) evrensel güneş ışınımının ( $H$ ) uzay dışı güneş ışınımına ( $H_0$ ) oranı ve güneşlenme kesri ( $K_n$ ) güneşlenme süresinin ( $S$ ) en yüksek güneşlenme süresine ( $S_0$ ) oranı olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmada bölgesel evrensel güneş ışınımı ve güneşlenme süresi verileri Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlasından (GEPA) alınmıştır [109]. Uzay dışı güneş ışınımı mevcut çalışmalarda sıklıkla kullanılan ve uzay dışı güneş

ışınımını enlem ile ilişkilendiren matematiksel bir denklem ile hesaplanmıştır [66, 78 ve 110]:

$$H_0 = \frac{24 \times 3600}{\pi} \times G_{sc} \times \left( 1 + 0,33 \times \cos \frac{360 \times n_{gün}}{365} \right) \times \left( \cos \phi \times \cos \delta \times \sin w_s + \frac{\pi \times w_s}{180} \times \sin \phi \times \sin \delta \right) \quad (3.18)$$

Verilen denklemde  $G_{sc}$ ,  $n_{gün}$ ,  $\phi$ ,  $\delta$  ve  $w_s$  sırasıyla güneş sabiti, yılın gününün numarası, enlem, güneş deklinasyonu ve yatay yüzeyler için gündeğümü saat açısıdır. Güneş sabiti,  $G_{sc}$ , atmosferin en üstündeki toplam güneş ışıdır ve  $1360,8 \pm 0,5 \text{ W/m}^2$  olarak belirlenmiştir [111]. Güneş deklinasyonu ve yatay yüzeyler için gündeğümü saat açısı şöyle tanımlanmaktadır [66, 78 ve 110]:

$$\delta = 23,45 \times \sin \left( \frac{(n_{day} + 284)}{365} \times 360 \right) \quad (3.19)$$

$$w_s = \cos^{-1} (-\tan(\phi) \times \tan(\delta)) \quad (3.20)$$

Yatay yüzeyler için gündeğümü saat açısı ile en yüksek güneşlenme süresi aşağıdaki gibi hesaplanmıştır [66, 78 ve 110]:

$$S_0 = \frac{2}{15} \times w_s \quad (3.21)$$

Tablo 3.2 yatay yüzeyler için evrensel güneş ışıdır ve güneşlenme sürelerinin ölçülmüş değerleri ile yatay yüzeyler için uzay dışı güneş ışıdır ve en yüksek güneşlenme sürelerinin hesaplanmış değerlerini göstermektedir.

Tablo 3.2. Yatay yüzeyler için günlük evrensel güneş ışınımının aylık ortalaması  $H$  (birim: kWh/m<sup>2</sup>-gün), yatay yüzeyler için günlük uzay dışı güneş ışınımının aylık ortalaması  $H_0$  (birim: kWh/m<sup>2</sup>-gün), güneşlenme süreleri  $S$  (birim: saat), en yüksek güneşlenme süreleri  $S_0$  (birim: saat)

	$\underline{H}$	$\underline{H_0}$	$\underline{S}$	$\underline{S_0}$
Ocak	1,42	4,10	3,2	9,44
Şubat	2,29	5,50	4,23	10,42
Mart	3,28	7,50	5,01	11,72
Nisan	4,41	9,53	6,33	13,10
Mayıs	5,64	10,96	8,39	14,27
Haziran	6,01	11,54	9,72	14,86
Temmuz	5,84	11,23	10,35	14,58
Ağustos	5,27	10,04	9,56	13,57
Eylül	4,19	8,18	8,01	12,23
Ekim	2,86	6,08	5,53	10,85
Kasım	1,69	4,41	4,05	9,69
Aralık	1,23	3,68	3,09	9,13

Tablo 3.2 ile verilen  $H$ ,  $H_0$ ,  $S$  ve  $S_0$  değerleri Tablo 3.1 ile verilen mevcut denklemlerde kullanılmış ve her bir denklem ile günlük dağılık güneş ışınımının aylık ortalaması hesaplanmıştır. Elde edilen dağılık güneş ışınımı değerlerinin ortalaması alınmış ve çalışmanın bundan sonraki bölümlerinde ölçülmüş dağılık güneş ışınımı verileri olarak kabul edilmiştir. Tablo 3.2 ile verilen ölçülmüş veriler ve hesaplanan dağılık güneş ışınımı verileri aşağıda verilen denklemlerde kullanılarak Sakarya ili için yeni dağılık güneş ışınımı denklemleri oluşturulmuştur:

$$\frac{Hd}{H} = c_0 + c_1 \times \left( \frac{H}{H_0} \right) + c_2 \times \left( \frac{H}{H_0} \right)^2 + c_3 \times \left( \frac{H}{H_0} \right)^3 \quad (3.22)$$

$$\frac{Hd}{H} = c_0 + c_1 \times \left(\frac{S}{S_0}\right) + c_2 \times \left(\frac{S}{S_0}\right)^2 + c_3 \times \left(\frac{S}{S_0}\right)^3 \quad (3.23)$$

$$\frac{Hd}{H} = c_0 + c_1 \times \left(\frac{H}{H_0}\right) + c_2 \times \left(\frac{H}{H_0}\right)^2 + c_3 \times \left(\frac{H}{H_0}\right)^3 + c_4 \times \left(\frac{S}{S_0}\right) + c_5 \times \left(\frac{S}{S_0}\right)^2 + c_6 \times \left(\frac{S}{S_0}\right)^3 \quad (3.24)$$

Bu denklemlerde  $c_0$ ,  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$ ,  $c_4$ ,  $c_5$  ve  $c_6$  MATLAB ortamında hazırlanan bir programda regresyon analizi ile belirlenen regresyon katsayılarını ifade etmektedir.

### 3.2. Dağınık Güneş Işınımı Denklemlerinin Doğruluğunun Araştırılması

Çalışmanın bu bölümünde Tablo 3.1 ile verilen mevcut dağınık güneş ışınımı denklemleri ile Tablo 3.3 ile verilen Sakarya ili için geliştirilen yeni dağınık güneş ışınımı denklemlerinin farklı istatistiksel göstergeler kullanılarak bölge için doğruluğu araştırılmıştır. İstatistiksel gösterge olarak ortalama eğilim hatası (*MBE*), ortalama mutlak yüzde hatası (*MAPE*), ortalama mutlak eğilim hatası (*MABE*), ortalama hata kareleri toplamı kökü (*RMSE*), kararlılık katsayısı ( $R^2$ ) ve t-istatistik (*t*) kullanılmıştır.

*MBE* modelin uzun dönem performansı ile ilgili bilgi vermektedir. Negatif değerleri tahminin altında kaldığını, pozitif değerleri tahminin üzerine çıktığını göstermektedir:

$$MBE = \frac{1}{x} \sum_{i=1}^x (EV_i - MV_i) \quad (3.25)$$

*MAPE* hesaplanan ve ölçülen değerler arasındaki ortalama mutlak yüzde sapma ile bilgi vermektedir:

$$MAPE = \frac{1}{x} \sum_{i=1}^x \left| \frac{EV_i - MV_i}{MV_i} \right| \quad (3.26)$$

*MABE* ise eğilim hatasının mutlak değerini vermektedir. *MBE* ile bazı gözlemlerin pozitif değerleri, diğer gözlemlerin negatif değerlerini yok edebilirken *MABE* ile böyle bir hatanın olması söz konusu değildir:

$$MABE = \frac{1}{x} \sum_{i=1}^x |EV_i - MV_i| \quad (3.27)$$

*RMSE* modellerin kısa dönem performansı ile ilgili bilgi vermektedir. *RMSE* değeri her zaman pozitiftir ve hesaplanan değerler ile ölçülen değerler arasındaki gerçek sapmanın her bir terim için karşılaştırmasını yapar:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{x} \sum_{i=1}^x (EV_i - MV_i)^2} \quad (3.28)$$

$R^2$  göstergesi hesaplanan ve ölçülen değerler arasındaki lineer ilişkiyi test etmek için kullanılır.  $R^2$  -1 ile 1 arasında değerler alır. Bu değer -1 veya 1'e yakın ise ölçülen ve hesaplanan değerler arasında mükemmel bir lineer ilişki var denir ve eğer bu değer sıfıra yakınsa lineer ilişki yok denir:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^x (EV_i - EV_a)(MV_i - MV_a)}{\sqrt{\left[ \sum_{i=1}^x (EV_i - EV_a)^2 \right] \left[ \sum_{i=1}^x (MV_i - MV_a)^2 \right]}} \quad (3.29)$$

$t$  göstergesi MBE ve RMSE göstergelerini birleştiren yeni bir istatistiksel göstergedir.  $t$ 'nin değeri ne kadar küçükse modelin performansı o kadar iyidir:

$$t = \sqrt{\frac{(n-1)MBE^2}{RMSE^2 - MBE^2}} \quad (3.30)$$

Verilen denklemlerde  $EV_i$  ve  $MV_i$  i'nci tahmin edilen ve ölçülen değerleri,  $EV_a$  ve  $MV_a$  tahmin edilen ve ölçülen değerlerin ortalamasını ve  $n$  bağımsızlık derecesini ifade etmektedir.

### 3.3. Bir Güneş Yüzeyinin En Uygun Eğim Açısının Hesaplanması

Çalışmanın bu bölümünde eğim açısı-toplam güneş ışınımı bağıntılarından faydalanılarak Sakarya ili için günlük, aylık, mevsimsel, yarıyıllık ve yıllık en uygun eğim açıları hesaplanmıştır. Bu çalışmada faydalanılan eğim açısı-toplam güneş ışınımı denklemi şöyledir [78]:

$$H_t = H_b \times R_b + H_d \times R_d + H \times \rho_g \times \left( \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \quad (3.31)$$

$$H_b = H - H_d \quad (3.32)$$

$R_b$  direkt güneş ışınımı için eğim katsayısıdır ve enleme bağlı olarak hesaplanmaktadır [66, 78 ve 110]:

$$R_b = \frac{\cos(\phi - \beta) \times \cos(\delta) \times \sin(w_s') + \frac{\pi}{180} \times w_s' \times \sin(\phi - \beta) \times \sin(\delta)}{\cos(\phi) \times \cos(\delta) \times \sin(w_s) + \frac{\pi}{180} \times w_s \times \sin(\phi) \times \sin(\delta)} \quad (3.33)$$

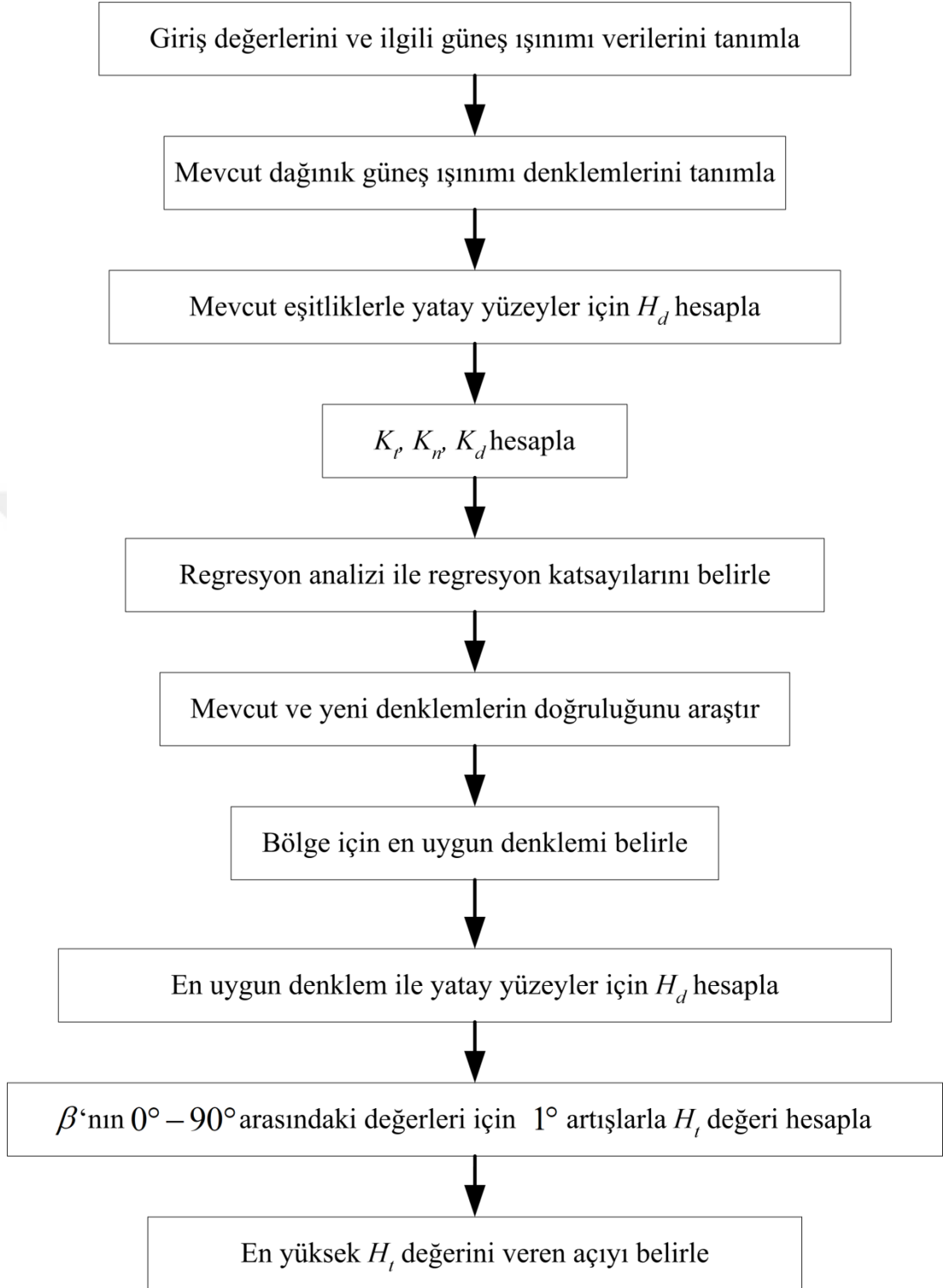
Burada  $w_s$  ' eğimli yüzeyler için gündeğümü saat açısıdır [66, 78 ve 110]:

$$w_s' = \min \left[ \begin{array}{l} a \cos(-\tan(\phi) \times \tan(\delta)) \\ a \cos(-\tan(\phi - \beta) \times \tan(\delta)) \end{array} \right] \quad (3.34)$$

$R_d$  dağınık güneş ışıınıımı için eğim katsayısıdır ve enleme bağılı olarak hesaplanmaktadır [66, 78 ve 110]:

$$R_d = \frac{H_b}{H_0} \times R_b + \left( 1 - \frac{H_b}{H_0} \right) \times \left( 1 + \frac{\cos(\beta)}{2} \right) \times \left[ 1 + \sqrt{\frac{H_b}{H}} \times \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)^3 \right] \quad (3.35)$$

(3.31)-(3.35) eşitlikleri kullanılarak MATLAB ortamında bir program oluşturulmuştur. Programda  $\beta$  1°'lik artışlarla 0° ile 90° arasında değiştirilmiş, en yüksek toplam güneş ışıınıımı değerini veren  $\beta$  değeri en uygun eğim açısı olarak seçilmiştir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Matlab ortamında hazırlanan programın akış diyagramı

## BÖLÜM 4. SABİT GÜNEŞ SİSTEMİ TASARIMI

Bu bölümde Bölüm 3'te hesaplanan en uygun yıllık eğim açısı ile konumlandırılmış sabit bir güneş sistemi tasarımı ve uygulaması yapılmıştır. Bu amaçla sırasıyla mekanik aksam tasarımı ve elektronik kart tasarımı yapılmıştır.

### 4.1. Mekanik Aksam Tasarımı ve Uygulaması

Bölüm 3'te mevcut dağınık güneş denklemleri ile Sakarya ili için yeni dağınık güneş denklemleri geliştirilmiş ve toplam güneş ışınlamı tahmini yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar toplam güneş ışınlamı-eğim açısı ilişkisi yöntemi ile en uygun eğim açısının günlük, aylık, mevsimsel, yarıyıllık ve yıllık olarak hesaplanmasında kullanılmıştır. Çalışmanın bu bölümünde hesaplanan en uygun yıllık eğim açısı ile konumlandırılmış sabit bir güneş sistem tasarımı yapılmıştır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. En uygun yıllık eğim açısı ile konumlandırılmış sabit güneş sistemi

Sistemde kullanılan güneş panelinin özellikler Tablo 4.1 ile verilmiştir.

Tablo 4.1. Sabit güneş sisteminde kullanılan güneş panelinin özellikleri

Panel boyutu	668mm(en)x89mm(yükseklik)x34mm(boy)
Ağırlık	7,6kg
En yüksek güç	80W
Açık devre gerilimi	21,5V
Kısa devre akımı	5,1A
Güç ayırma aralığı	%5
En yüksek güç gerilimi	17,5V
En yüksek sistem akımı	4,58A
En yüksek sistem gerilimi	700V <sub>DC</sub>
Hücre sayısı	36

#### 4.2. Elektronik Kart Tasarımı

Çalışmanın bu bölümünde uygulaması gerçekleştirilen en uygun yıllık eğim açısı ile konumlandırılmış sabit güneş sisteminden elde edilen akım ve gerilim değerlerini 10 dakika aralıklar ile ölçen ve bilgisayar ile haberleşerek ölçülen verilerin kaydedilmesini sağlayan bir elektronik kart tasarımı yapılmıştır. Bu amaçla öncelikle gerekli elektronik kart birimleri belirlenmiş ve ilgili birimlerin Proteus ortamında benzetimleri yapılmıştır. Kontrol birimi PIC18F4620 olarak seçilen elektronik kartta gerçekleşmesi beklenen işlemler sırası ile sistemden elde edilen akım değerinin okunması, gerilim değerinin okunması ve bu verilerin bilgisayar ortamına aktarılmasıdır. Bu işlemlerin gerçekleşmesi için Proteus ortamında besleme devresi, akım ve gerilim ölçüm devresi ve haberleşme devresi tasarımı yapılmıştır. Haberleşme devresinde haberleşme standardı olarak RS-485 standardı kullanılmıştır. Devrelerin benzetim çalışmaları tamamlandıktan sonra kart basımı gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. Sabit sistem elektronik kartı

Son olarak kartın kontrol biriminde gerçekleşmesi gerekli olan işlem adımları belirlenmiş ve bilgisayar ortamında bu adımları sağlayan elektronik yazılım oluşturulmuştur. Yazılım MPLAB IDE ortamında CCS derleyicisi ile yapılmıştır. Yazılımda yapılan işlemler sırasıyla aşağıdaki gibidir:

1. Akım ve gerilim ölçme devresinden mikrodenetleyicinin ADC birimi ile 100 $\mu$ s veri alınmaktadır. Alınan verilerin ortalaması, sırasıyla akım ve gerilim değerlerine çevrilmektedir.
2. RS 485 haberleşme devresi ile mikrodenetleyici ve bilgisayar haberleşmesi sağlanmaktadır.
3. Gerekli haberleşme protokolü sağlandıktan sonra ilk adımda belirlenen akım ve gerilim değerleri 10 dakikada bir bilgisayara gönderilmektedir ve döngü başa dönmektedir.

## **BÖLÜM 5. HAREKETLİ GÜNEŞ SİSTEMİ TASARIMI**

Bu bölümde güneş matematiği ile güneşi iki ekseninde izleyen hareketli bir güneş sistemi tasarımı yapılmıştır. Bu amaçla öncelikle mevcut güneş denklemleri ve coğrafi konum bilgileri kullanılarak güneşin konumu saatlik olarak belirlenmiştir. Daha sonra güneşin konumunu belirlemek için kullanılan eksenlerde izlemeyi en doğru şekilde yapan mekanik aksam tasarımı ve benzetimleri yapılmıştır. Bu aşamada mekanik tasarım paket programı olan Solidworks programından faydalanılmıştır. Tasarımı ve benzetimleri tamamlanan aksamın Solidworks ortamında montaj resimleri oluşturulmuş ve bu resimlere uygun olarak aksamın uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bir sonraki aşamada mekanik uygulaması gerçekleştirilen sistemin hareketini sağlayan ve sistemden elde edilen akım ve gerilim değerlerini ölçüp bilgisayar ortamına aktaran elektronik kart tasarımı yapılmıştır.

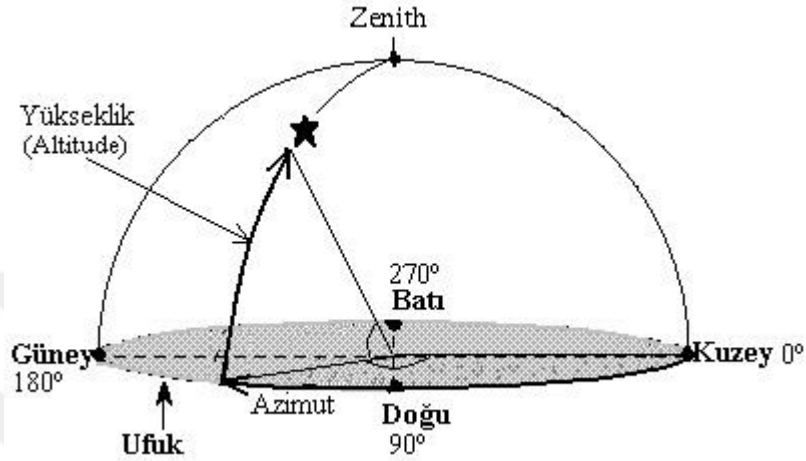
### **5.1. Güneş Denklemlerinin Belirlenmesi**

Bu çalışmada güneşin konumu azimut ve yükseklik açıları ile belirlenmiş ve hareketli sistem bu açıları izleyecek şekilde tasarlanmıştır. Azimut açısı kuzey vektörü ile güneşin ufuk çizgisi üzerindeki izdüşümü arasındaki açı, yükseklik açısı ise ufuk çizgisi ile güneş arasındaki açı olarak tanımlanmaktadır [113].

Azimut açısı kuzey vektörü referans seçilerek saat yönünde  $0^{\circ}$  ile  $360^{\circ}$  arasında ölçülmektedir. Azimut açısı referans olarak seçilen kuzeyde  $0^{\circ}$ , doğuda  $90^{\circ}$ , güneyde  $180^{\circ}$  ve batıda  $270^{\circ}$  olarak belirlenmiştir. Yükseklik açısı ise  $0^{\circ}$  ile  $90^{\circ}$  arasında ölçülmektedir. Mevcut çalışmalarda azimut ve yükseklik açılarının belirlenmesi için farklı denklemler önerilmiştir. Bu çalışmada kullanılan denklemler şöyledir [113]:

$$azi = \cos^{-1} \left( \frac{\cos(\phi) \times \sin(\delta) - \cos(\delta) \times \sin(\phi) \times \cos(HRA)}{\cos(alt)} \right) \quad (5.1)$$

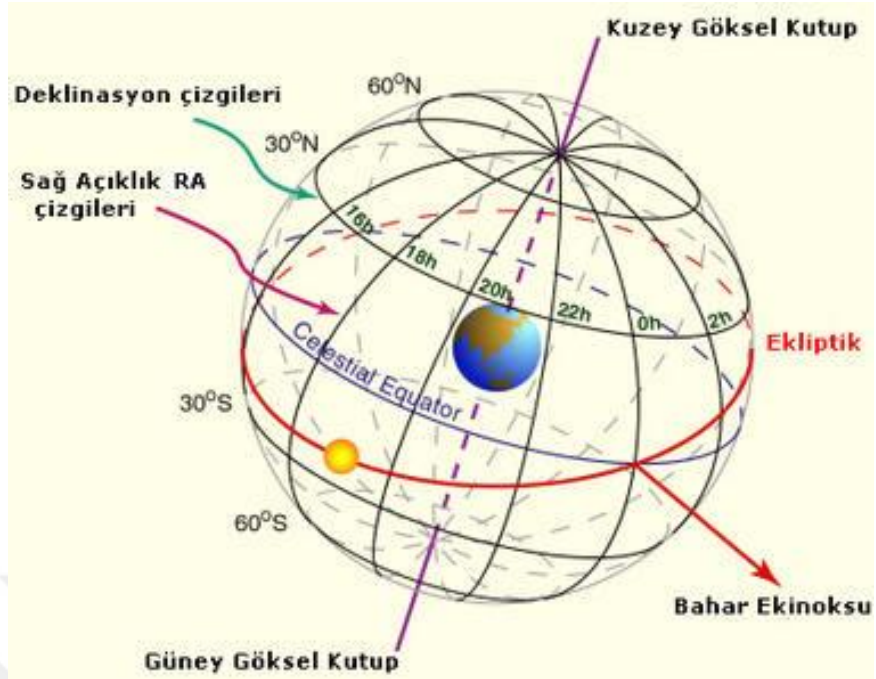
$$alt = \cos^{-1} (\sin(\delta) \times \sin(\phi) + \cos(\delta) \times \cos(\phi) \times \cos(HRA)) \quad (5.2)$$



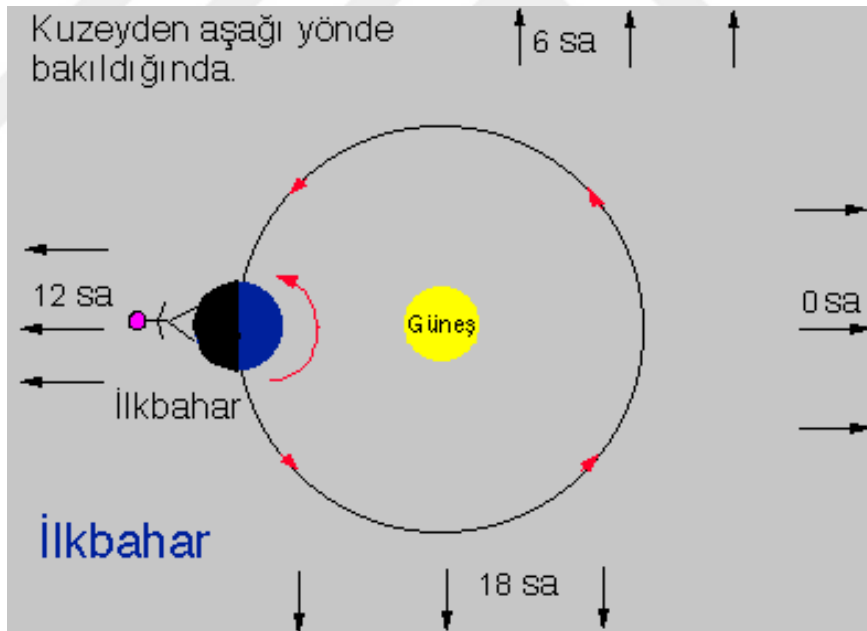
Şekil 5.1. Azimut ve yükseklik açılarının tanımı

Verilen denklemlerde “*azi*” azimut açısını, “*alt*” yükseklik açısını, “ $\phi$ ” enlem derecesini, “ $\delta$ ” deklinasyon açısını ve “*HRA*” saat açısını ifade etmektedir. Deklinasyon açısı ekliptik ile ekvator arasındaki açı, saat açısı ise yerel güneş saati ile güneşin tam dik olduğu öğle saati arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır (Şekil 5.2 ve Şekil 5.3). Bu çalışmada deklinasyon açısı Bölüm 3’te verilen Denklem 3.19 ile hesaplanmıştır. Saat açısı ise aşağıda verilen denklem ile belirlenmiştir [113]:

$$HRA = 15 \times (saat - 12) \quad (5.3)$$



Şekil 5.2. Deklinasyon açısının tanımı



Şekil 5.3. Saat açısının tanımı

## 5.2. Mekanik Aksam Tasarımı ve Uygulaması

Çalışmanın bu bölümünde azimut ve yükseklik açılarını izleyen güneş sistemin mekanik aksam tasarımı yapılmıştır. Bu aşamada mekanik tasarım paket programı olan Solidworks programından faydalanılmıştır. Solidworks ortamında oluşturulan tasarımın farklı koşullar için benzetimleri yapılmış ve elde edilen sonuçlara göre gerekli iyileştirmeleri yapılmıştır. Son olarak yine Solidworks ortamında tasarımın montaj resimleri oluşturulmuş ve bu resimlere uygun olarak uygulaması yapılmıştır.

### 5.2.1. Mekanik aksam birimlerinin belirlenmesi

#### 5.2.1.1. Hareket biriminin belirlenmesi

Güneş izleyen sistem için tasarlanan mekanik aksamda yükseklik ve azimut eksenlerinin hareketini sağlayacak birim olarak lineer aktüatör seçilmiştir. Lineer aktüatörler düşük voltaj bir motorun dönme hareketini doğrusal harekete dönüştürme prensibi ile çalışmaktadır. Bu cihazlar aşağıda sıralanan özellikleri nedeni ile son yıllarda güneş uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır:

- Sessiz çalışır.
- Mekanik durdurma özelliği ile güvenli bir hareket sağlar.
- Enerji tasarrufu sağlar.
- Güç aktarımı sağlam metal dişliler ile yapılıdır.
- Limit switch özelliği ile motorun hareketini sınırlayarak zorlanmaları önler.
- Değişik ağırlıktaki yükler için seçenekler sunar.
- Zorlu hava şartlarına dayanıklıdır.
- Uzun süre bakım yapılmadan çalışabilir ve bakım maliyeti düşüktür.
- Uygulaması ve kontrolü kolaydır.

### 5.2.1.2. Güneş panelinin belirlenmesi

Güneş izleyen sistem tasarımında sabit güneş sistemi tasarımında kullanılan güneş paneli ile aynı özelliklere sahip bir güneş paneli kullanılmıştır (Tablo 5.1). Çalışmanın sonunda sistemlerden elde edilen akım, gerilim ve güç değerleri kaydedilip karşılaştırılacağından panellerin aynı özelliklere sahip olması gerekmektedir.

Tablo 5.1. Güneş izleyen sistem mekanik aksamı için seçilen güneş panelinin özellikleri

Panel boyutu	668mm(en)x89mm(yükseklik)x34mm(boy)
Ağırlık	7,6kg
En yüksek güç	80W
Açık devre gerilimi	21,5V
Kısa devre akımı	5,1A
Güç ayırma aralığı	%5
En yüksek güç gerilimi	17,5V
En yüksek sistem akımı	4,58A
En yüksek sistem gerilimi	700V <sub>DC</sub>
Hücre sayısı	36

### 5.2.2. Mekanik aksam tasarımı

Hareket birimleri ve güneş paneli belirlenen güneş izleyen sistemin mekanik aksam tasarımı ve benzetimleri yapılmıştır. Tasarım aşamasında güneş paneli ve lineer aktüatörler aşağıda verilen standartlara uygun bir biçimde birleştirilmiştir (Şekil 5.4):

- EN 1991-1-3-Kar Yükleri
- EN 1991-1-4-Rüzgar Hareketleri
- IN 1990- Yapısal Hesaplamalar

- EN 1993-1-8- Birleşme Yerleri



Şekil 5.4. Güneş izleyen sistem için Solidworks ortamında mekanik aksam tasarımı

Tasarımın aşağıda verilen parametreler için benzetimleri gerçekleştirilmiştir:

- Mekanik aksamın Sakarya hava koşulları altındaki dayanıklılığı
- Eksenlerin hareket sınırlarının güneşin Sakarya'daki konumunu izlemedeki yeterliliği

#### **5.2.2.1. Mekanik aksam tasarımının Sakarya hava koşulları altındaki dayanıklılığı**

Sakarya ili  $40^{\circ}47'20''$  kuzey ve  $30^{\circ}24'21''$  doğu koordinatları ile Türkiye'nin Marmara bölgesinde yer almaktadır. Sakarya doğudan Düzce ili, batıdan Kocaeli ili, güneyden Bilecik ili ve kuzeyden Karadeniz ile çevrilmiştir. Bu nedenle bölgede hem

Karadeniz iklimi hem de Marmara tipi Akdeniz iklimi görülmektedir. Sakarya'nın kuzey kesimleri Karadeniz ikliminin etkisi ile daha soğuk ve yağışlı iken güney kesimleri Akdeniz ikliminin ılıman etkisi ile daha kuru, daha ılık ve daha az nemlidir.

Tablo 5.2 ve Tablo 5.3 sırası ile Sakarya iline ait bir yıllık rüzgar istatistikleri verilerini ve yağış miktarı verilerini göstermektedir.

Tablo 5.2. Sakarya ili rüzgar istatistikleri

Aylar	Rüzgar Olasılığı (%)	Ortalama Rüzgar Hızı (km/h)
Ocak	6	9,26
Şubat	5	9,26
Mart	8	11,11
Nisan	8	11,11
Mayıs	5	11,11
Haziran	6	11,11
Temmuz	8	12,96
Ağustos	8	11,11
Eylül	9	11,11
Ekim	3	9,26
Kasım	3	7,41
Aralık	2	7,41

Tablo 5.3. Sakarya ili aylık ortalama yağış miktarı [ $\text{kg/m}^2$ ]

Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
93,6	75,4	75,9	59,1	49,9	69,6	48,6	45,2	54,0	79,6	77,8	105,9

Çalışmanın bu aşamasında bir önceki aşamada tamamlanan güneş izleyen sistemin mekanik aksam tasarımı Tablo 5.2 ve Tablo 5.3 ile verilen fiziksel koşullar altında Solidworks ortamında benzetimlerle test edilmiştir. Benzetim sonuçları mekanik aksamın Sakarya iline ait en yüksek rüzgar hızına maruz bırakıldığında konumunu koruduğunu, en yüksek yağış miktarına maruz bırakıldığında ise en fazla 0.04 mm hareket ettiğini göstermiştir (Tablo 5.4 ve Tablo 5.5).

Tablo 5.4. Güneş izleyen sistem mekanik aksam tasarımı rüzgar dayanıklılık testi sonuçları

Rüzgar hızı [ $km/h$ ]	Yer değiştirme [ $mm$ ]
7	0,00
8	0,00
9	0,00
10	0,00
11	0,00
12	0,00
13	0,00
14	0,00
15	0,00
20	0,00
25	0,01
30	0,02

Tablo 5.5. Güneş izleyen sistem mekanik aksam tasarımı yağmur dayanıklılık testi sonuçları

Ağırlık [ $kg/m^2$ ]	Yer değiştirme [ $mm$ ]
30,00	0,00
40,00	0,01
50,00	0,02
60,00	0,02
70,00	0,02
80,00	0,03
90,00	0,03
100,00	0,04
120,00	0,04

#### 5.2.2.2. Eksenlerin hareket sınırlarının güneşin Sakarya'daki konumunu izlemede yeterliliği

Güneş izleyen sistemlerde eksenlerin hareket sınırları sistem performansını belirleyen önemli parametrelerden biri olarak öne çıkmaktadır. Tablo 5.6'da Sakarya

iline ait her mevsim için seçili bir günde sabah 07:00 ve akşam 18:00 saatleri arasında kaydedilen azimut ve yükseklik açıları verilmiştir [114].

Tablo 5.6. Sakarya iline ait her mevsim için seçili bir günde kaydedilen azimut ve yükseklik açıları (°)

Saat	19.06.2016		19.10.2016		19.01.2016		19.04.2016	
	Yükseklik	Azimut	Yükseklik	Azimut	Yükseklik	Azimut	Yükseklik	Azimut
07:00	15,1	71,9	-3,5	100,4	-	-	7,9	81,8
08:00	26,1	80,7	7,6	110,3	-4,1	113,6	19,2	91,4
09:00	37,4	89,9	17,7	121,3	6,0	123,5	30,5	101,9
10:00	48,7	100,7	26,7	133,9	14,8	134,7	41,3	114,2
11:00	59,5	115,5	33,8	149,0	21,9	147,4	50,9	130,4
12:00	68,6	139,6	38,1	166,4	26,8	161,9	58,0	152,7
13:00	72,7	180,1	38,9	185,3	28,8	177,6	60,6	181,3
14:00	68,6	220,6	36,0	203,6	27,7	193,5	57,6	209,5
15:00	59,5	244,7	30,1	219,7	23,7	208,5	50,7	231,3
16:00	48,7	259,3	21,8	233,3	17,1	221,7	40,4	247,0
17:00	37,4	270,1	12,1	244,9	8,8	233,3	29,6	259,2
18:00	26,1	279,4	1,7	255,2	-1,0	243,6	18,3	269,5

Solidworks ortamında yapılan benzetim çalışmaları tasarımı yapılan mekanik aksamın hareket sınırlarının yükseklik eksenini için  $6^\circ$  ve azimut eksenini için  $260^\circ$  olduğunu göstermiştir. Bu durumda Tablo 5.7’de verilen değerlere göre sistem yaz ve sonbahar mevsimlerinde sabah 08:00 ile akşam 17:00 arasında, kış ve ilkbahar mevsimlerinde sabah 07:00 ve akşam 17:00 arasında güneş izleme işlemini gerçekleştirebilmektedir.

### **5.2.3. Mekanik aksam uygulaması**

#### **5.2.3.1. Malzemelerin belirlenmesi**

Tasarımı ve benzetimleri gerçekleştirilen mekanik aksamının alt gövdesi için malzeme olarak sıcak daldırma galvaniz kullanılmıştır. Sıcak daldırma galvaniz işlemi üç aşamada gerçekleşmektedir. İlk aşama temizleme aşamasıdır. Galvaniz işlemi sadece temiz yüzeylerde gerçekleşebileceğinden temizleme aşamasında metal bütün pas, yağ ve kirden arındırılmaktadır. Temizlenen metal galvaniz aşamasında  $460^\circ\text{C}$  sıcaklığındaki erimiş çinkonun içine batırılmaktadır. Galvaniz aşaması tamamlandıktan sonra metal bir soğutma tankında soğutulmaktadır. Son olarak metalürjik aşamada metale çinko kaplaması yapılmaktadır. Sıcak daldırma galvaniz işlemi ilave paslanmaz çelik maliyeti olmaksızın metalin korozyon direncini artırmaktadır. Bununla beraber uygulaması kolaydır ve uzun ömürlüdür.

Üst gövde olan güneş paneli çerçevesi için malzeme olarak özel bir alüminyum çerçeve kullanılmıştır. Kullanılan çerçevenin esnek bir malzemedен yapılmış olması ve bağlantı için ek malzeme gerektirmemesi hem kurulum zamanını kısaltmış hem de maliyeti azaltmıştır. Bununla beraber çerçevenin olumsuz hava koşullarında herhangi bir boyama veya bakım işlemi gerekmeksizin uzun süre bozulmadan kalabilmesi sistemin dayanıklılığına ve estetik görünümüne katkı sağlamıştır.

Alt ve üst gövdenin birleştirilmesinde TS EN ISO 898-1 yönetmeliği ile uyumlu vida somunları ve cıvatalar kullanılmıştır. Tablo 5.7 kullanılan cıvataların tipini ve belirlenmiş deney yükünü göstermektedir.

Tablo 5.7. Güneş izleyen sistem mekanik aksam cıvatalarının teknik özellikleri

Tip	Belirlenmiş deney yükü (kg)
M6	1,160
M8	2,120
M10	3,370
M16	9,100

### 5.2.3.2. Mekanik aksam kurulumu

Çalışmanın bu aşamasında belirlenen tüm alt birimler ve elemanlar birleştirilmiş, mekanik aksam kurulumu gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.5).



Şekil 5.5. Güneş izleyen sistem mekanik aksam kurulumu

Benzetim ortamında doğru ve güvenilir hareket ettiği gözlenen mekanik aksamın gerçek hareketi çalışmanın bir sonraki aşamasında tasarlanan elektronik kart ile aşağıdaki parametreler için sırası ile test edilmiştir:

1. Elektronik birimlerde ölçülen sistem azimut ve yükseklik açılarının doğruluğu
2. Mekanik aksamın hareketinin sınırları

Bu aşamada yapılan testler sonunda lineer aktüatörlerin aksamın hareketini sınırladığı ve yetersiz kaldığı görölmüştür. Bununla birlikte lineer aktüatörlerin sağladığı hareketin panel konumunu belirlemek için kullanılan inklinometre sensörünün çalışma prensibine aykırı olduğu sonucuna varılmıştır. Bu sorunları gidermek için kullanılan lineer aktüatörlerin itici milleri sökölümüş ve redüktörlü motora dönüştürölmüştür (şekil 5.6).



şekil 5.6. Güneş izleyen sistem mekanik aksam son hali

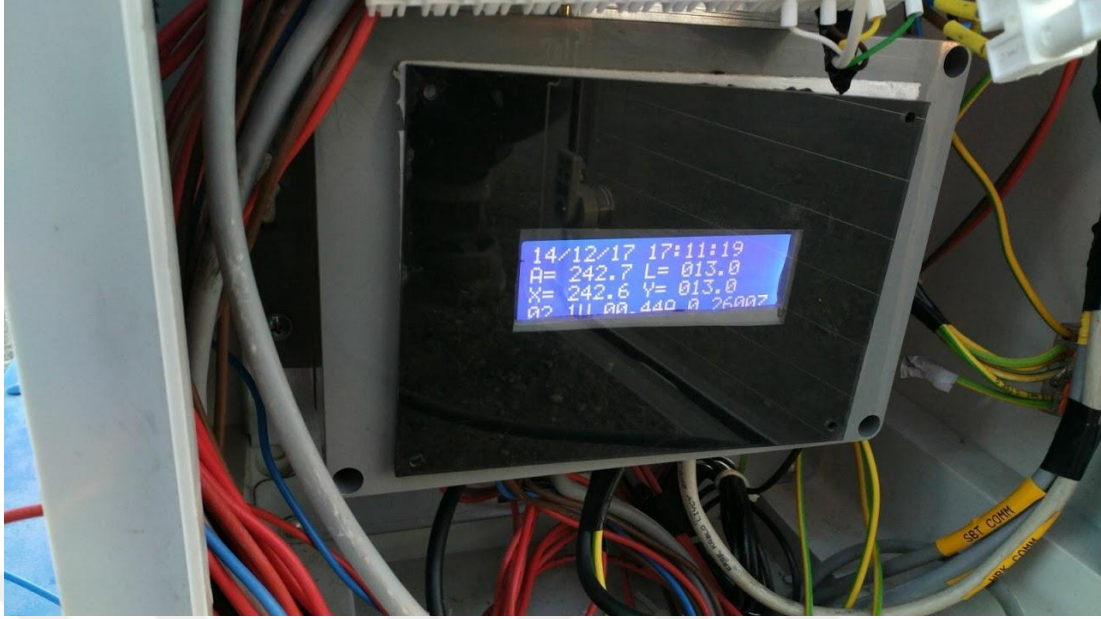
### 5.3. Elektronik Kart Tasarımı

Çalışmanın bu bölümünde mekanik aksam uygulaması gerçekleştirilen güneş izleyen sisteminin hareketini sağlayan, sistemden elde edilen akım ve gerilim değerlerini ölçen ve ölçülen verilerin kaydedilmesini sağlayan bir elektronik kart tasarımı yapılmıştır. Bu amaçla öncelikle gerekli elektronik kart birimleri belirlenmiş ve ilgili birimlerin Proteus ortamında benzetimleri yapılmıştır.

Kontrol birimi PIC18F4620 olarak seçilen elektronik kartta gerçekleşmesi beklenen işlemler sırası ile güneşin konumunun belirlenmesi, sistemin konumunun belirlenmesi, sistemin konumunun güneşin konumu ile eşitlenmesi, sistemden elde edilen akım ve gerilim değerlerinin okunması ve bu değerlerin bilgisayar ortamına aktarılmasıdır. Bu işlemlerin gerçekleşmesi için Proteus ortamında besleme devresi, motor sürücü devresi, akım ve gerilim ölçüm devresi, GPS devresi, GPRS devresi, haberleşme devresi, enkoder devresi ve inklinometre sensörlü kart tasarımı yapılmıştır.

Motor sürücü devresinde sürücü birimi olarak L298 ve GPS devresinde GPS birimi olarak TELIT JN3 kullanılmıştır (Ek A, Ek B). Haberleşme devresinde haberleşme standardı olarak RS 485 standardı kullanılmıştır. Enkoder devresinde enkoder olarak E50S8-360-3-T-1 artırımı enkoderi seçilmiştir (Ek C). Enkoder devresi ile güneş panelinin azimut açısı belirlenmiştir. Güneş panelinin yükseklik açısını ölçmek için bir inklinometre sensörü kullanılmıştır (Ek D). İnklinometre sensörü ile ilgili mevcut çalışmalar taranmış ve güneş izleyen sistemlerde bir örneğine rastlanmamış, yalnızca bir kez bir robot tasarımında kullanıldığı görülmüştür [114]. İnklinometre sensörünün kontrolü ve güneş izleyen sistem elektronik kartı ile haberleşmesi PIC16F687 mikrodenetleyicisi ile sağlanmıştır.

Devrelerin benzetim çalışmaları tamamlandıktan sonra kart basımı gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.7).



Şekil 5.7. Hareketli sistem elektronik kartı

Son olarak kartın kontrol biriminde gerçekleşmesi gerekli olan işlem adımları belirlenmiş ve bilgisayar ortamında bu adımları sağlayan elektronik yazılım oluşturulmuştur. Yazılım MPLAB IDE ortamında CCS derleyicisi ile yapılmıştır. Yazılımda yapılan işlemler sırasıyla aşağıdaki gibidir:

1. GPS'ten konum, tarih ve saat bilgisi alınır.
2. Gelen saat bilgisi kontrol edilir. Gelen bilgi 08:00-20:00 saatleri arasında ise bir sonraki adıma geçilir.
3. Gelen tarih ve saat bilgisi kullanılarak yılın kaçınıcı günü olduğu hesaplanır.
4. Yılın kaçınıcı günü bilgisi kullanılarak deklinasyon açısı hesaplanır.
5. Deklinasyon açısı ve konum bilgisi kullanılarak azimut ve eğim açıları hesaplanır.
6. Enkoder ile haberleşme sağlanır. Sistemin azimut açısı belirlenir.
7. İnklinometre sensörü ile haberleşme sağlanır. Sistemin eğim açısı belirlenir.
8. Sistemin azimut açısı değeri, hesaplanan azimut açısı ile karşılaştırılır. Açılar birbirine eşit olana kadar azimut motoru gerekli yönde hareket ettirilir. Açılar eşitse bir sonraki adıma geçilir.

9. Sistemin eğim açısı değeri, hesaplanan eğim açısı ile karşılaştırılır. Açılar birbirine eşit olana kadar eğim motoru gerekli yönde hareket ettirilir. Açılar eşitse bir sonraki adıma geçilir.
10. Akım ve gerilim ölçme devrelerinden 100 us'de bir 100 defa ADC ile alınan verilerin ortalaması, sırasıyla akım ve gerilim değerlerine çevrilirler.
11. Bilgisayar haberleşmesi için gerekli ayarlamalar yapılır.
12. Saat bilgisi kontrol edilir:
  - *Saat başıysa*; akım ve gerilim değerleri önce EEPROMA yazılır. Daha sonra bilgisayara gönderilir ve döngü başa döner.
  - *Saat başı değilse*; her 10 dakikada bir hesaplanan akım gerilim değerleri bilgisayara gönderilir. Her göndermede saat bilgisi tekrar kontrol edilir ve saat başında döngü başa döner.

## BÖLÜM 6. ÖLÇÜLEN VERİLERİN BİLGİSAYAR ORTAMINDA KAYDEDİLMESİ

Çalışmanın bu bölümünde önceki bölümlerde uygulaması gerçekleştirilen en uygun yıllık eğitim açısı ile konumlandırılmış sabit güneş sistemi ve iki eksen güneşi izleyen sistem elektronik kartları ile bilgisayar haberleşmesi sağlanmış, kartlardan alınan verilerin bilgisayar ortamında işlendiği, okunduğu ve saklandığı bir arayüz yazılımı hazırlanmıştır.

### 6.1. Güneş Sistemleri ve Bilgisayarın Haberleşmesi

Güneş sistemleri ve bilgisayar haberleşmesi için RS 485 standardından faydalanılmıştır. RS-485 uzun mesafeli iletişim için hazırlanmış bir veri iletim standardıdır. RS-485 standardında veriler iki ucu dengelenmiş iki kablo ile RX ve TX üzerinden iletilir. Tablo 6.1 RS 485 standardının teknik özelliklerini göstermektedir.

Tablo 6.1. RS 485 standardının teknik özellikleri

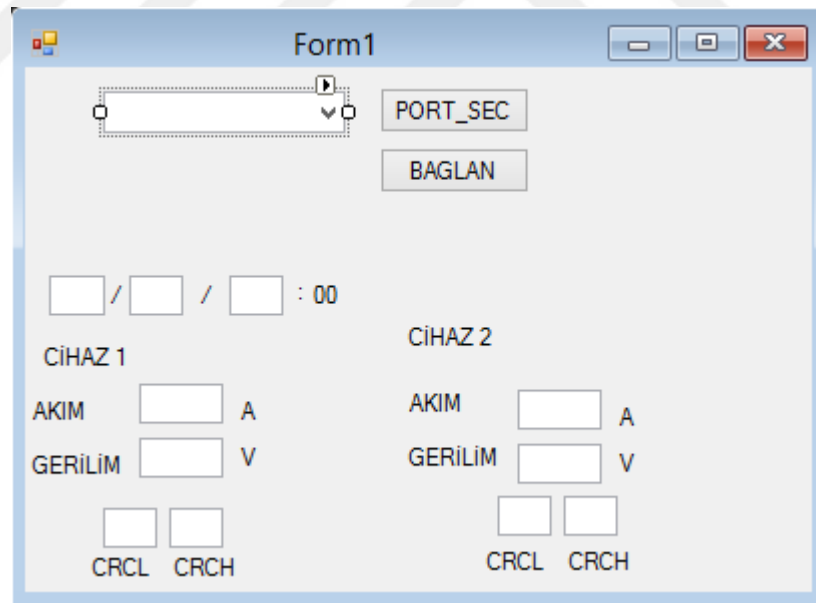
En fazla sürücü sayısı	32
En fazla alıcı sayısı	32
Çalışma şekli	Yarı çift yönlü
Network yapısı	Çok noktalı bağlantı
En uzun çalışma mesafesi	1200m
12m kablo uzunluğundaki hız	35Mbs
1200m kablo uzunluğundaki hız	100kbs
Alıcı giriş direnci	12kohm
Sürücü yük empedansı	54ohm

Tablo 6.1.(Devamı)

Alıcı giriş hassasiyeti	$\pm 200\text{mV}$
Alıcı giriş aralığı	$-7\text{V} \dots +12\text{V}$
En fazla sürücü çıkış gerilimi	$-7\text{V} \dots +12\text{V}$
En düşük sürücü giriş gerilimi (yükte)	$\pm 1,5\text{V}$

## 6.2. Bilgisayar Arayüz Yazılımının Geliştirilmesi

RS 485 haberleşme standardı uygulaması tamamlandıktan sonra sistemlerden alınan verilerin okunup saklandığı bir arayüz programı geliştirilmiştir. Yazılım Microsoft Visual Studio 2015 ortamında C sharp dilinde hazırlanmıştır. Yazılım sistemlerden gelen akım ve gerilim bilgisinin anlık olarak görüntülenmesini ve 10 dakikada bir kaydedilmesini sağlamaktadır (Şekil 6.2).



Şekil 6.2. Bilgisayar arayüz yazılımı

## BÖLÜM 7. ÇALIŞMA BULGULARI

### 7.1. Yeni Dağılık Güneş Işınımı Denklemleri

Bölüm 3'te dağılıklık kesrinin açıklık ve/veya güneşlenme kesrinin fonksiyonu olduğu mevcut güneş denklemleri kullanılarak regresyon analizi yöntemi ile Matlab ortamında 9 yeni güneş denklemi geliştirilmiştir (Tablo 7.1).

Tablo 7.1. Sakarya ili için üç grupta geliştirilen yeni dağılık güneş ışınımı denklemleri

Grup 1: dağılıklık kesrinin ( $H_d/H$ ) açıklık kesrinin ( $H/H_0$ ) fonksiyonu olduğu denklemler

$$7.1. \frac{H_d}{H} = 0,9585 - 1,0931 \times \left( \frac{H}{H_0} \right)$$

$$7.2. \frac{H_d}{H} = 0,4678 + 1,2143 \times \left( \frac{H}{H_0} \right) - 2,6488 \times \left( \frac{H}{H_0} \right)^2$$

$$7.3. \frac{H_d}{H} = 2,6949 - 14,6948 \times \left( \frac{H}{H_0} \right) + 34,6621 \times \left( \frac{H}{H_0} \right)^2 - 28,7784 \times \left( \frac{H}{H_0} \right)^3$$

Grup 2: dağılıklık kesrinin ( $H_d/H$ ) güneşlenme kesrinin ( $S/S_0$ ) fonksiyonu olduğu denklemler

$$7.4. \frac{H_d}{H} = 0,7485 - 0,5523 \times \left( \frac{S}{S_0} \right)$$

$$7.5. \frac{H_d}{H} = 0,9799 - 1,4895 \times \left( \frac{S}{S_0} \right) + 0,8887 \times \left( \frac{S}{S_0} \right)^2$$

$$7.6. \frac{H_d}{H} = 0,9909 - 1,5581 \times \left( \frac{S}{S_0} \right) + 1,0259 \times \left( \frac{S}{S_0} \right)^2 - 0,0884 \times \left( \frac{S}{S_0} \right)^3$$

Tablo 7.1. (Devamı)

Grup 3: dağımlık kesrinin ( $H_d/H$ ) açıklık kesri ( $H/H_0$ ) ve güneşlenme kesrinin ( $S/S_0$ ) fonksiyonu olduğu denklemler

$$7.7. \frac{H_d}{H} = 0,8694 - 0,5887 \times \left( \frac{H}{H_0} \right) - 0,2710 \times \left( \frac{S}{S_0} \right)$$

$$7.8. \frac{H_d}{H} = 0,8784 - 0,6429 \times \left( \frac{H}{H_0} \right) + 0,0645 \times \left( \frac{H}{H_0} \right)^2 - 0,2611 \times \left( \frac{S}{S_0} \right) - 0,0107 \times \left( \frac{S}{S_0} \right)^2$$

7.9.

$$\frac{H_d}{H} = 0,8675 - 0,5392 \times \left( \frac{H}{H_0} \right) - 0,1645 \times \left( \frac{H}{H_0} \right)^2 + 0,1660 \times \left( \frac{H}{H_0} \right)^3 - 0,2877 \times \left( \frac{S}{S_0} \right) + 0,0404 \times \left( \frac{S}{S_0} \right)^2 - 0,0314 \times \left( \frac{S}{S_0} \right)^3$$

## 7.2. Dağımlık Güneş Denklemlerinin Doğruluğunun Araştırılması

Tablo 7.2 mevcut ve yeni dağımlık güneş ışınımı denklemlerinin *MBE*, *MAPE*, *MABE*, *RMSE*,  $R^2$  ve *t* istatistiksel göstergelerine göre test sonuçlarını göstermektedir.

Tablo 7.2. Mevcut denklemler (1-17) ve yeni denklemler (25-33) için *MBE* (birim: MJ/m<sup>2</sup>), *MAPE* (birim: %), *MABE* (birim: MJ/m<sup>2</sup>), *RMSE* (birim: MJ/m<sup>2</sup>),  $R^2$  ve *t* değerleri

Denklem	<i>MBE</i>	<i>MAPE</i>	<i>MABE</i>	<i>RMSE</i>	$R^2$	<i>t</i>
<i>Grup 1</i>						
3.1	-0,9552	16,5429	0,9552	1,0535	0,9909	7,1314
3.2	-0,6234	11,2734	0,6234	0,6705	0,9966	8,3760
3.3	-0,0452	3,4621	0,2254	0,2879	0,9903	0,5274
3.4	-0,9653	16,4020	0,9652	1,0787	0,9901	6,6500
3.5	-0,6137	11,1350	0,6137	0,6608	0,9964	8,3100
3.6	-0,6257	11,2213	0,6257	0,6832	0,9953	7,5602
7.1	0,0041	2,4811	0,1523	0,1864	0,9958	0,0735
7.2	-0,0045	1,3675	0,0891	0,1321	0,9979	0,1135

Tablo 7.2. (Devamı)

<i>Denklem</i>	<i>MBE</i>	<i>MAPE</i>	<i>MABE</i>	<i>RMSE</i>	<i>R<sup>2</sup></i>	<i>t</i>
7.3	-0,0048	1,2482	0,0822	0,1219	0,9982	0,1299
<i>Grup 2</i>						
3.7	-0,3135	8,9358	0,4119	0,4767	0,9890	0,4176
3.8	0,3732	6,6175	0,3732	0,4440	0,9959	5,1450
3.9	0,1858	8,4815	0,4841	0,5859	0,9876	1,1088
3.10	0,3756	6,9618	0,3756	0,4336	0,9961	5,7503
3.11	0,0499	3,5338	0,2213	0,2820	0,9931	0,5959
3.12	0,1337	3,4029	0,2305	0,3315	0,9929	1,4619
7.4	0,0207	2,6005	0,1491	0,1782	0,9965	0,3874
7.5	0,0100	0,9920	0,0484	0,0610	0,9996	0,5534
7.6	0,0101	0,9932	0,0486	0,0609	0,9996	0,5566
<i>Grup 3</i>						
3.13	1,3713	25,4202	1,3713	1,4203	0,9974	12,2965
3.14	0,2808	5,5730	0,2808	0,2842	0,9998	21,1741
3.15	0,3150	6,1402	0,3150	0,3212	0,9997	16,6793
3.16	0,3059	6,0169	0,3059	0,3122	0,9997	16,2656
3.17	0,1057	2,1523	0,1057	0,1075	1,0000	18,2732
7.7	-0,0001	0,0253	0,0016	0,0023	1,0000	0,1268
7.8	0,0000	0,0047	0,0003	0,0003	1,0000	0,0806
7.9	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000	2,1602

Test sonuçlarına göre yeni geliştirilen denklemler mevcut denklemlere göre daha iyi bir performans ile çalışmıştır. Yeni geliştirilen denklemler içerisinde ise en iyi sonuçlar denklem 7.8 ile elde edilmiştir.

Tablo 7.3 denklem 7.8 ile hesaplanan günlük dağınık güneş ışınımının aylık ortalama değerlerini göstermektedir.

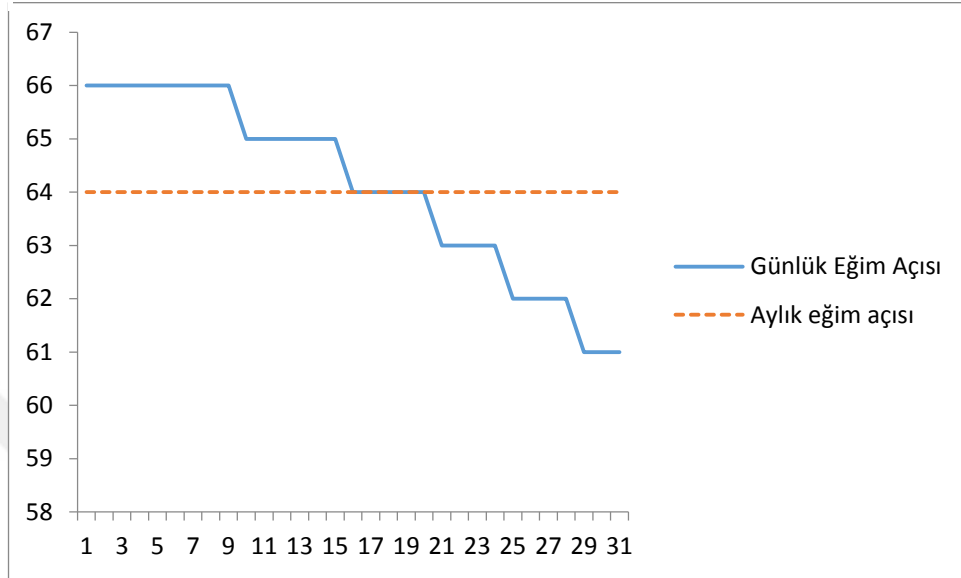
Tablo 7.3. Sakarya ili için günlük dağınık güneş ışınımının aylık ortalamasının en uygun denklem ile hesaplanan değerleri

Ay	$H_d$
Ocak	0,8149
Şubat	1,1776
Mart	1,6268
Nisan	2,0553
Mayıs	2,2981
Haziran	2,3192
Temmuz	2,1657
Ağustos	1,9463
Eylül	1,6351
Ekim	1,2996
Kasım	0,8963
Aralık	0,7148

### 7.3. Günlük ve Aylık En Uygun Eğim Açılarının Belirlenmesi

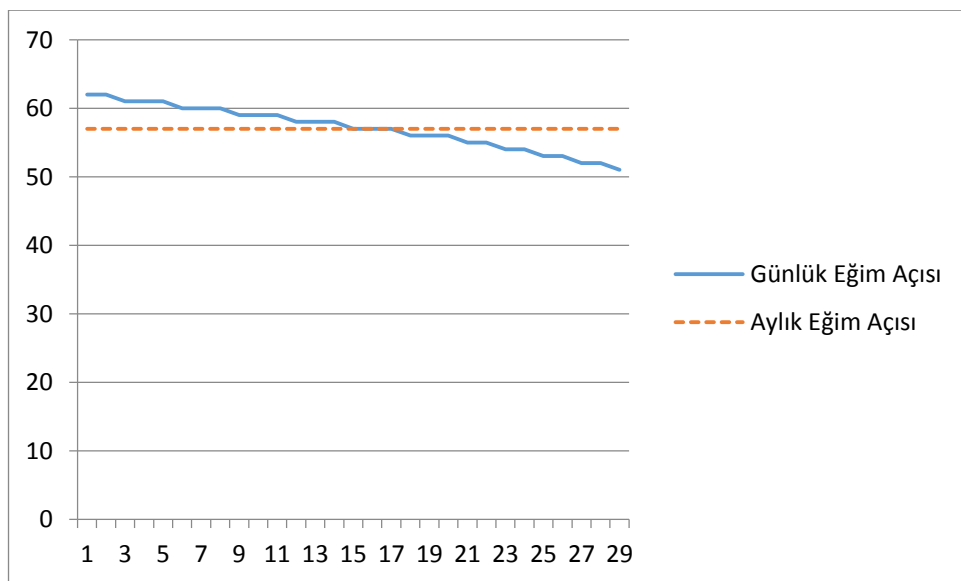
Bölüm 3'te geliştirilen, Şekil 3.1 ile akış diyagramı verilen bilgisayar programı ile Sakarya ili için en uygun eğim açıları günlük ve aylık olarak belirlenmiştir.

Ocak ayı için günlük en uygun eğim açısının  $61^{\circ}$ - $66^{\circ}$  arasında değiştiği, aylık en uygun eğim açısının ise  $64^{\circ}$  olduğu görülmüştür (Şekil 7.1).



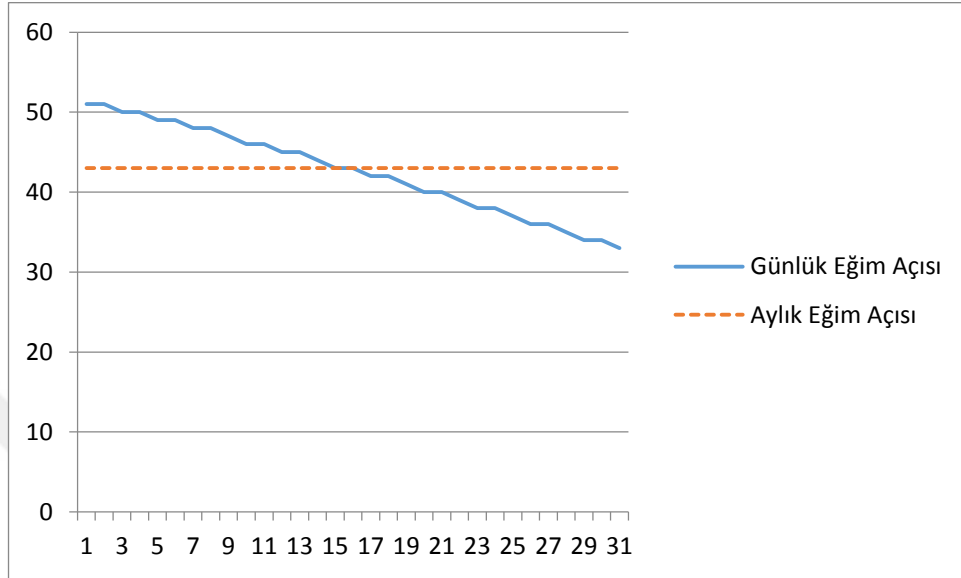
Şekil 7.1. Ocak ayı günlük ve aylık en uygun eğim açıları (birim:°)

Şubat ayı için günlük en uygun eğim açısının  $51^{\circ}$ - $62^{\circ}$  arasında değiştiği, aylık en uygun eğim açısının ise  $57^{\circ}$  olduğu görülmüştür (Şekil 7.2).



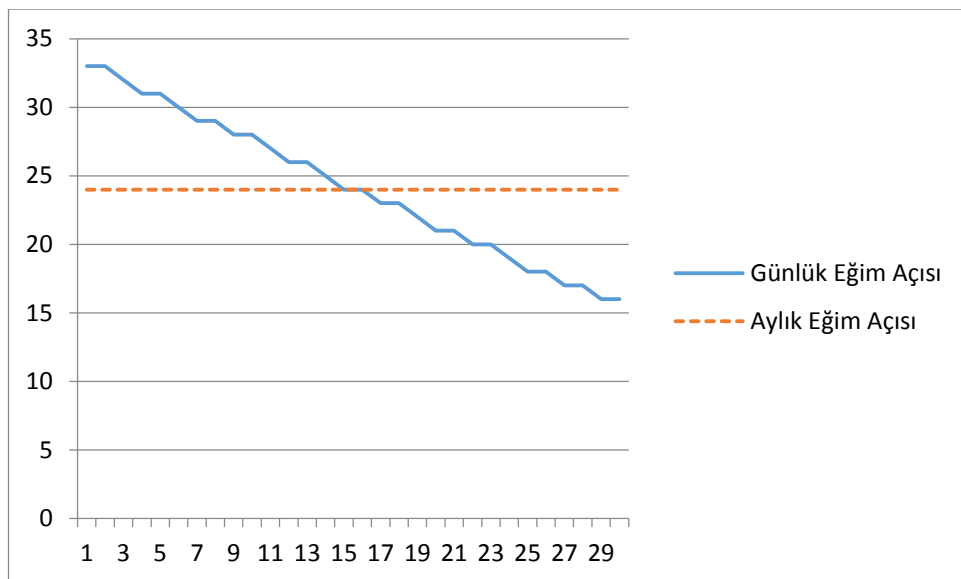
Şekil 7.2. Şubat ayı günlük ve aylık en uygun eğim açıları (birim:°)

Mart ayı için günlük en uygun eğim açısının  $33^{\circ}$ - $51^{\circ}$  arasında değiştiği, aylık en uygun eğim açısının ise  $43^{\circ}$  olduğu görülmüştür (Şekil 7.3).



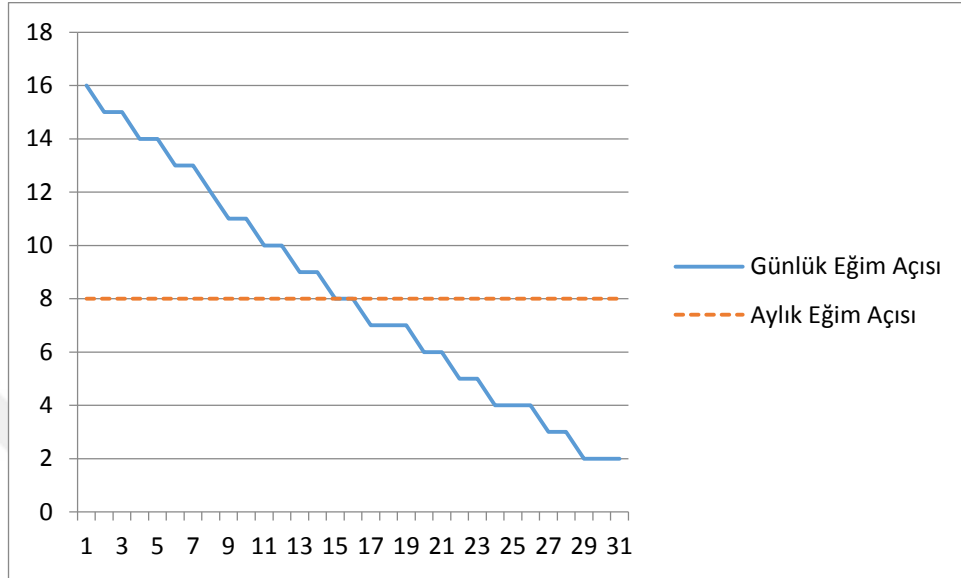
Şekil 7.3. Mart ayı günlük ve aylık en uygun eğim açıları (birim:°)

Nisan ayı için günlük en uygun eğim açısının  $16^{\circ}$ - $33^{\circ}$  arasında değiştiği, aylık en uygun eğim açısının ise  $24^{\circ}$  olduğu görülmüştür (Şekil 7.4).



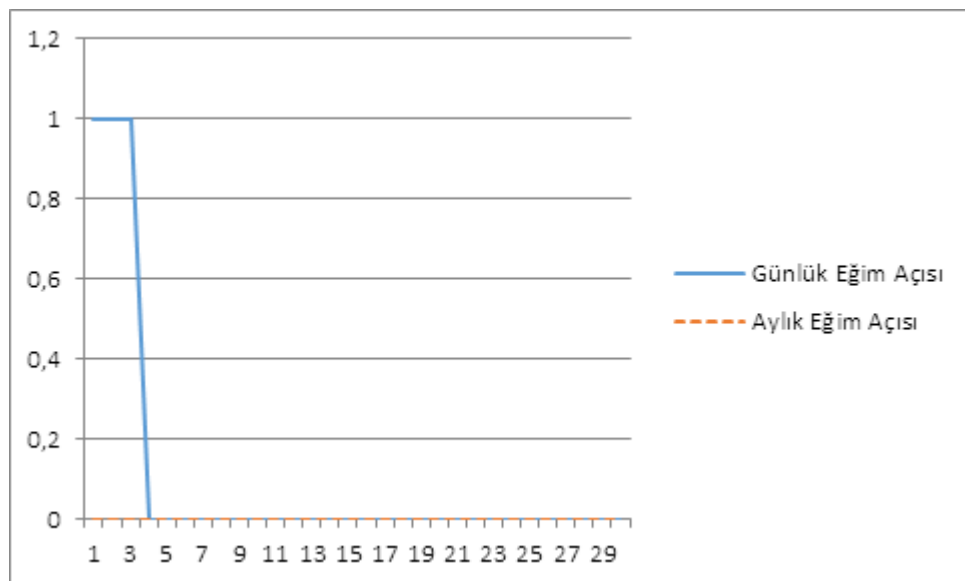
Şekil 7.4. Nisan ayı günlük ve aylık en uygun eğim açıları (birim:°)

Mayıs ayı için günlük en uygun eğim açısının  $2^{\circ}$ - $16^{\circ}$  arasında değiştiği, aylık en uygun eğim açısının ise  $8^{\circ}$  olduğu görülmüştür (Şekil 7.5).



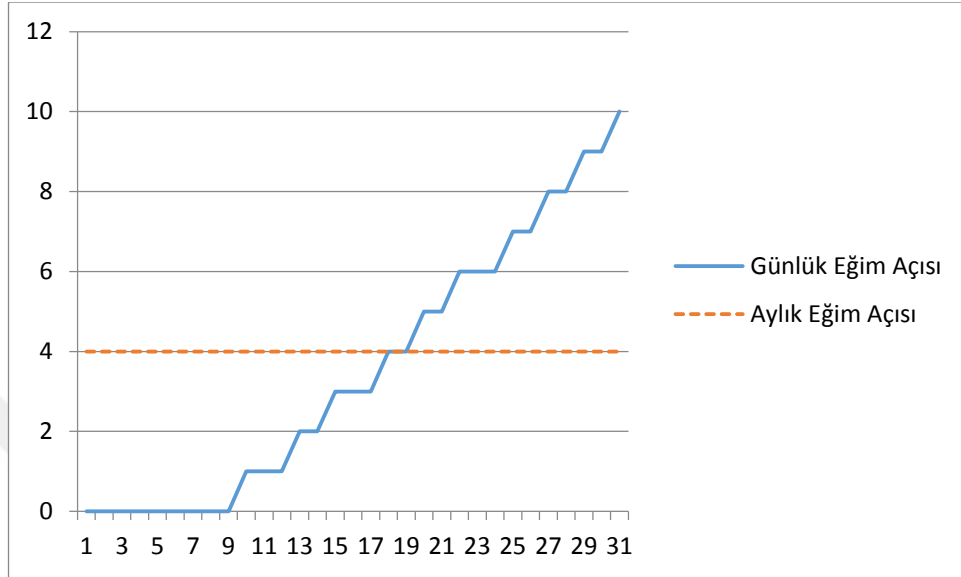
Şekil 7.5. Mayıs ayı günlük ve aylık en uygun eğim açıları (birim:°)

Haziran ayı için günlük en uygun eğim açısının  $0^{\circ}$ - $1^{\circ}$  arasında değiştiği, aylık en uygun eğim açısının ise  $0^{\circ}$  olduğu görülmüştür (Şekil 7.6).



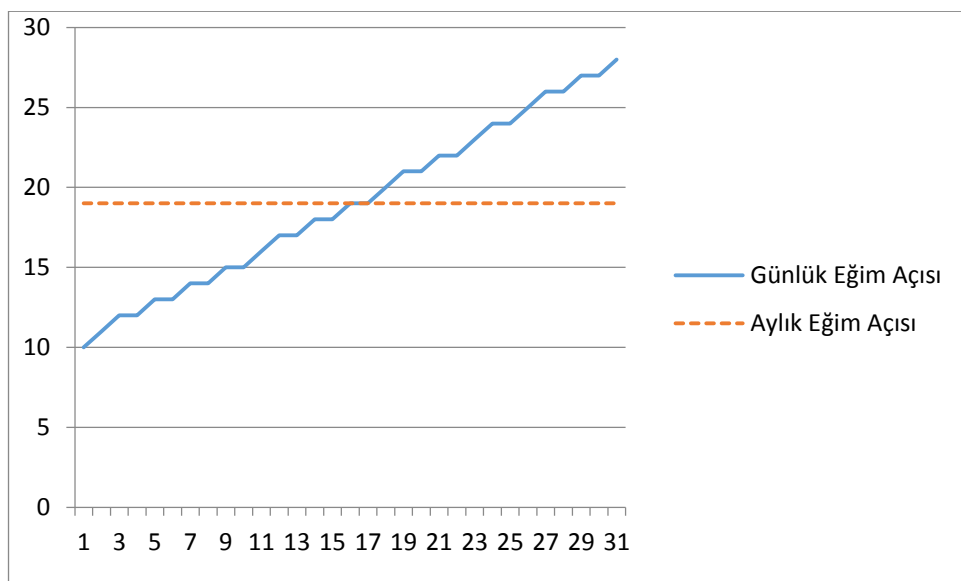
Şekil 7.6. Haziran ayı günlük ve aylık en uygun eğim açıları (birim:°)

Temmuz ayı için günlük en uygun eğim açısının  $0^{\circ}$ - $10^{\circ}$  arasında değiştiği, aylık en uygun eğim açısının ise  $4^{\circ}$  olduğu görülmüştür (Şekil 7.7).



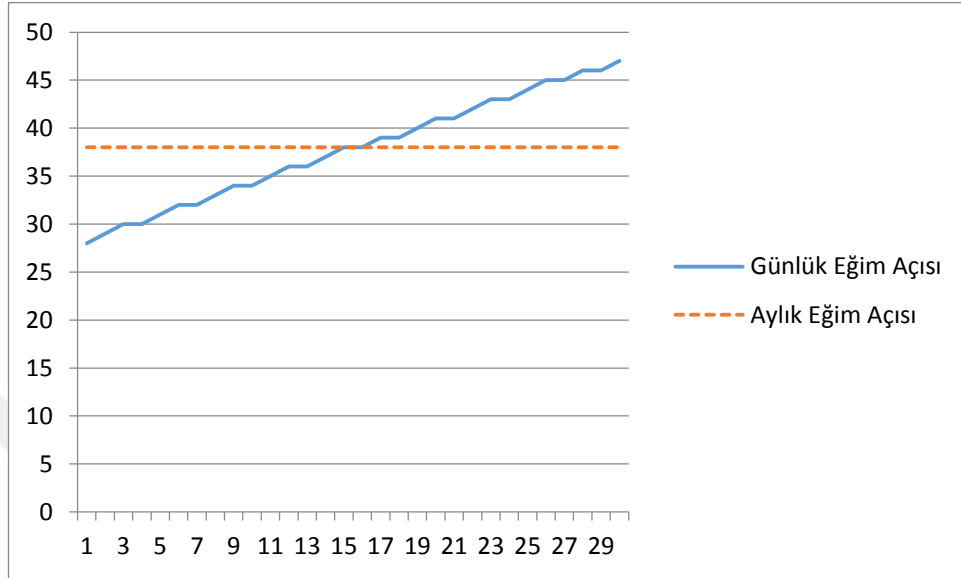
Şekil 7.7. Temmuz ayı günlük ve aylık en uygun eğim açıları (birim:°)

Ağustos ayı için günlük en uygun eğim açısının  $10^{\circ}$ - $28^{\circ}$  arasında değiştiği, aylık en uygun eğim açısının ise  $19^{\circ}$  olduğu görülmüştür (Şekil 7.8).



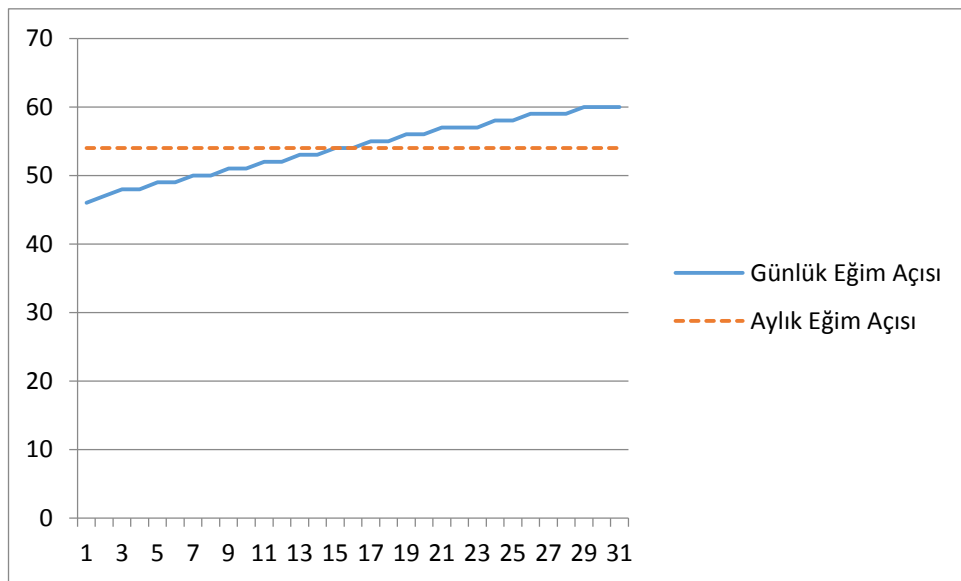
Şekil 7.8. Ağustos ayı günlük ve aylık en uygun eğim açıları (birim:°)

Eylül ayı için günlük en uygun eğim açısının  $28^{\circ}$ - $47^{\circ}$  arasında değiştiği, aylık en uygun eğim açısının ise  $38^{\circ}$  olduğu görülmüştür (Şekil 7.9).



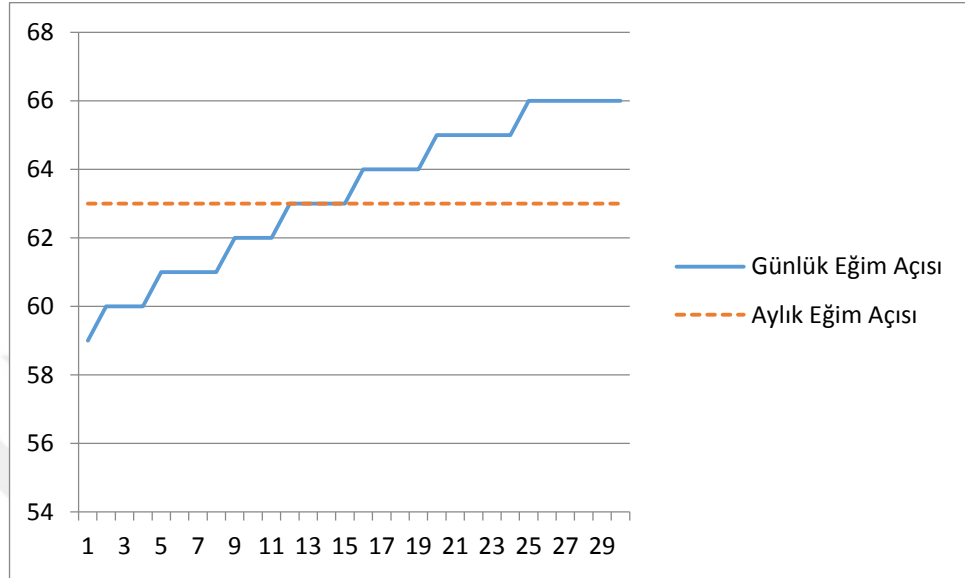
Şekil 7.9. Eylül ayı günlük ve aylık en uygun eğim açıları (birim:°)

Ekim ayı için günlük en uygun eğim açısının  $46^{\circ}$ - $60^{\circ}$  arasında değiştiği, aylık en uygun eğim açısının ise  $54^{\circ}$  olduğu görülmüştür (Şekil 7.10).



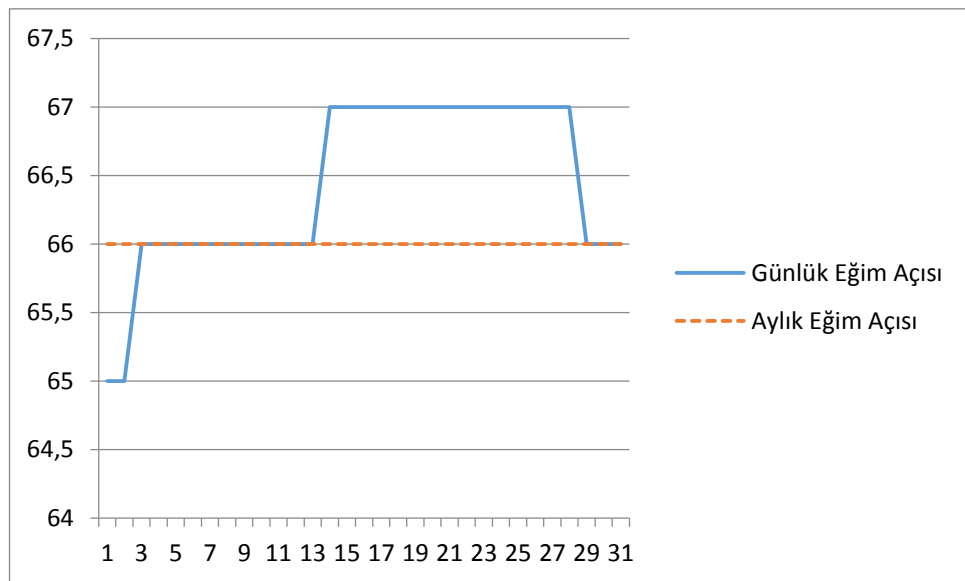
Şekil 7.10. Ekim ayı günlük ve aylık en uygun eğim açıları (birim:°)

Kasım ayı için günlük en uygun eğim açısının  $59^{\circ}$ - $66^{\circ}$  arasında değiştiği, aylık en uygun eğim açısının ise  $63^{\circ}$  olduğu görülmüştür (Şekil 7.11)



Şekil 7.11. Kasım ayı günlük ve aylık en uygun eğim açıları (birim:°)

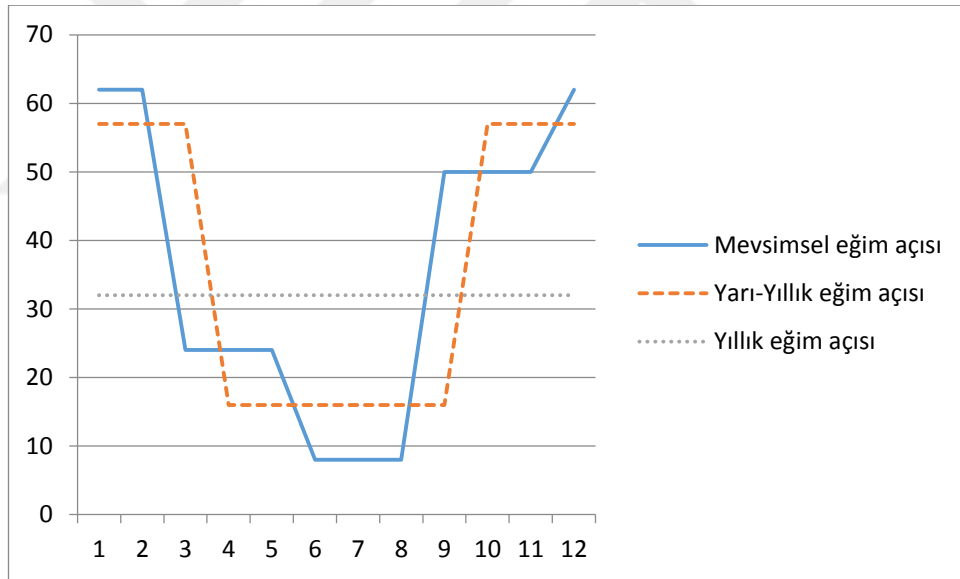
Aralık ayı için günlük en uygun eğim açısının  $65^{\circ}$ - $66^{\circ}$  arasında değiştiği, aylık en uygun eğim açısının ise  $66^{\circ}$  olduğu görülmüştür (Şekil 7.12).



Şekil 7.12. Aralık ayı günlük ve aylık en uygun eğim açıları (birim:°)

#### 7.4. Mevsimsel, Yarıyıllık ve Yıllık En Uygun Eğim Açıları

Bölüm 3'te geliştirilen, Şekil 3.1 ile akış diyagramı verilen bilgisayar programı ile Sakarya ili için mevsimsel, yarıyıllık ve yıllık en uygun eğim açıları belirlenmiştir. Sonbahar mevsimi (Eylül-Kasım) için en uygun eğim açısının  $50^\circ$ , kış mevsimi (Aralık-Şubat) için en uygun eğim açısının  $62^\circ$ , ilkbahar mevsimi (Mart-Mayıs) için en uygun eğim açısının  $24^\circ$  ve yaz mevsimi (Haziran-Ağustos) için en uygun eğim açısının  $8^\circ$  olduğu görülmüştür. Soğuk yarıyıl (Ekim-Mart) için en uygun eğim açısının  $57^\circ$ , ılık yarıyıl (Nisan-Eylül) için en uygun eğim açısının  $16^\circ$  olduğu görülmüştür. Yıllık en uygun eğim açısının  $32^\circ$  olduğu görülmüştür.



Şekil 7.13. Mevsimsel, yarıyıllık ve yıllık en uygun eğim açıları (birim:°)

### 7.5. En Uygun Eğim Açılı ile Konumlandırılmış Yüzeylerde Elde Edilen Günlük Toplam Güneş Işınımının Aylık Ortalaması

Sakarya ili için belirlenen günlük, aylık, mevsimsel, yarıyıllık ve yıllık en uygun eğim açıları ile konumlandırılmış yüzeylerde elde edilen günlük toplam güneş ışınımının aylık ortalaması şöyledir:

Tablo 7.4. Günlük, aylık, mevsimsel, yarıyıllık ve yıllık en uygun eğim açıları ile konumlandırılmış

yüzeyler için günlük toplam güneş ışınımının aylık ortalaması (birim: MJ/m <sup>2</sup> -gün)					
	<i>Günlük</i>	<i>Aylık</i>	<i>Mevsimsel</i>	<i>YarıYıllık</i>	<i>Yıllık</i>
Ocak	2,5029	2,5023	2,4008	2,4866	2,2050
Şubat	3,5224	3,5182	3,5095	3,5182	3,2600
Mart	4,0645	4,0518	3,8960	3,9679	3,9989
Nisan	4,7062	4,6930	4,6930	4,6589	4,6671
Mayıs	5,6872	5,5677	5,5497	5,6475	5,3858
Haziran	6,0100	6,0100	5,9683	5,8623	5,4567
Temmuz	5,8529	5,8466	5,8369	5,7667	5,4247
Ağustos	5,5008	5,4846	5,4105	5,4783	5,3923
Eylül	5,0214	5,0037	4,9250	4,7236	4,9814
Ekim	4,2463	4,2375	4,2276	4,2342	3,9882
Kasım	2,9789	2,9771	2,9124	2,9662	2,6335
Aralık	2,2976	2,2976	2,2923	2,2733	1,9844

### 7.6. Sistemlerden Elde Edilen Elektriksel Bulgular

Tasarım ve uygulama aşamaları Bölüm 4 ve Bölüm 5'te detaylı olarak açıklanan en uygun yıllık eğim açısı ile konumlandırılmış sabit güneş sistemi ve iki eksen güneş izleyen hareketli güneş sistemi Şekil 7.14'te görüldüğü gibi uygun bir çatıya konumlandırılmıştır.



Şekil 7.14. Sistemlerin uygun bir çatıya konumlandırılması

Sistemlerin çalışması 6 ay boyunca 06:00-20:00 saatleri arasında izlenmiş ve elde edilen elektriksel bulgular 10 dakika aralıklarla bilgisayar ortamında kaydedilmiştir. Bu süre boyunca sistemler birer adet 3,3 ohm 100W alüminyum direnci beslemiş ve direnç üzerinde ölçülen akım ve gerilim değerleri RS 485 standardı ile bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Bu değerlerin ortalamaları öncelikle ortalama saatlik değerler, ortalama saatlik değerlerin ortalaması ile ortalama günlük değerler elde edilmiştir. Daha sonra ortalama günlük değerler kullanılarak aylık ve ortalama aylık değerler oluşturulmuştur. Tablo 7.5, Şekil 7.15 - Şekil 7.22 ile farklı hava koşulları ve farklı aylar için ölçülen günlük saatlik akım, gerilim ve güç değerleri görülmektedir.

Tablo 7.5. Farklı hava koşulları ve farklı aylar için seçilmiş günlük saatlik güç değerleri

Hava Durumu	Tarih	Saat	Sabit Üretim [Wh]	Panel Hareketli Üretim [Wh]	Panel Üretim [Wh]
Tüm Gün Güneşli	01.06.2017	06:00	00,32	03,24	
		07:00	05,90	36,24	
		08:00	12,45	61,18	
		09:00	17,30	65,24	
		10:00	46,23	70,12	
		11:00	56,13	72,40	

Tablo 7.5. (Devamı)

Hava Durumu	Tarih	Saat	Sabit Üretim [Wh]	Panel Hareketli Üretim [Wh]	Panel
Tüm Gün Güneşli	01.06.2017	12:00	64,55	76,80	
		13:00	68,24	76,40	
		14:00	69,44	75,80	
		15:00	64,80	73,22	
		16:00	51,17	71,18	
		17:00	40,23	68,24	
		18:00	31,25	66,26	
		19:00	12,93	48,12	
		20:00	03,39	05,12	
Tüm Gün Kapalı	09.06.2017	06:00	00,00	00,65	
		07:00	00,06	04,28	
		08:00	02,42	14,45	
		09:00	04,41	16,65	
		10:00	05,99	16,33	
		11:00	06,00	17,65	
		12:00	10,55	20,36	
		13:00	04,80	10,12	
		14:00	19,35	24,18	
		15:00	15,36	22,66	
		16:00	14,00	20,48	
		17:00	03,95	11,22	
		18:00	09,48	17,31	
19:00	02,63	10,48			
20:00	04,97	08,24			
Parçalı Bulutlu	20.06.2017	06:00	00,53	00,77	
		07:00	04,49	36,42	
		08:00	16,76	63,25	
		09:00	33,83	67,94	
		10:00	47,30	74,12	
		11:00	58,61	76,18	
		12:00	54,66	74,22	
		13:00	34,31	36,18	
14:00	09,23	23,77			

Tablo 7.5. (Devamı)

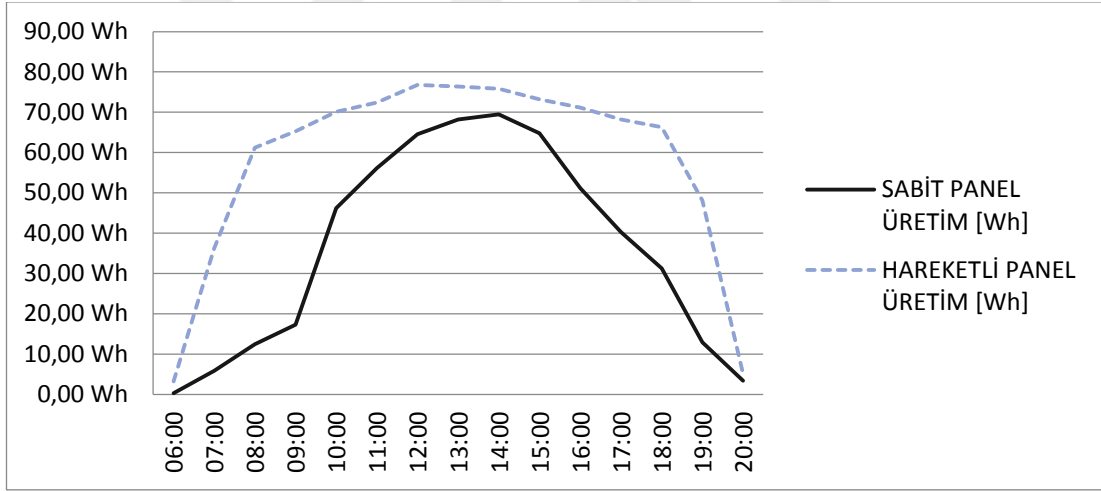
Hava Durumu	Tarih	Saat	Sabit Üretim [Wh]	Panel Hareketli Üretim [Wh]	Panel
Parçalı Bulutlu	20.06.2017	15:00	06,39	23,08	
		16:00	09,68	24,61	
		17:00	51,39	68,54	
		18:00	32,81	56,24	
		19:00	23,09	44,62	
		20:00	05,18	23,46	
Parçalı Bulutlu	18.07.2017	06:00	02,14	03,24	
		07:00	06,86	26,70	
		08:00	13,84	58,26	
		09:00	33,48	63,15	
		10:00	25,69	46,24	
		11:00	39,49	66,10	
		12:00	43,40	66,32	
		13:00	51,79	76,40	
		14:00	41,74	75,80	
		15:00	20,41	46,12	
		16:00	20,16	52,14	
		17:00	21,55	68,24	
		18:00	07,00	58,24	
		19:00	04,45	27,54	
20:00	00,00	04,86			
Tüm Gün Güneşli	27.08.2017	06:00	00,00	03,18	
		07:00	01,18	24,12	
		08:00	11,76	56,15	
		09:00	30,91	62,18	
		10:00	49,93	67,33	
		11:00	64,14	72,40	
		12:00	73,40	76,80	
		13:00	74,76	76,99	
		14:00	68,88	74,65	
		15:00	50,12	72,18	
16:00	37,41	70,21			
17:00	23,62	67,24			
18:00	12,90	57,18			

Tablo 7.5. (Devamı)

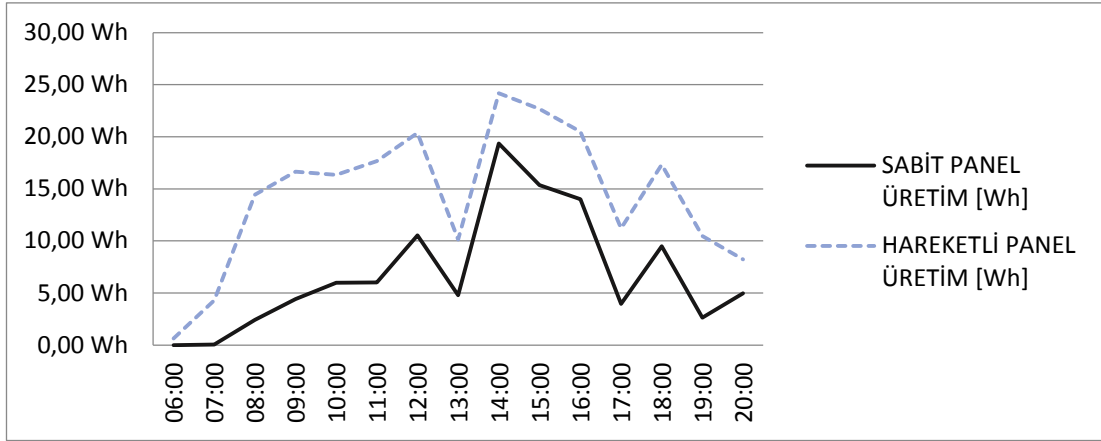
Hava Durumu	Tarih	Saat	Sabit Üretim [Wh]	Panel Hareketli Üretim [Wh]	Panel
Tüm Gün Güneşli	27.08.2017	19:00	06,46	27,65	
		20:00	01,69	04,74	
Tüm Gün Güneşli	09.09.2017	06:00	00,00	00,00	
		07:00	00,00	12,00	
		08:00	04,60	29,32	
		09:00	14,86	44,24	
		10:00	27,61	59,24	
		11:00	52,61	64,24	
		12:00	63,69	67,24	
		13:00	67,58	69,10	
		14:00	66,96	68,12	
		15:00	60,59	66,24	
		16:00	50,24	62,12	
		17:00	35,30	60,24	
		18:00	15,50	48,24	
		19:00	03,10	27,65	
20:00	00,00	02,12			
Sağanak Yağışlı	14.10.2017	06:00	00,00	07,24	
		07:00	00,00	16,16	
		08:00	02,53	48,14	
		09:00	17,73	53,12	
		10:00	40,23	56,23	
		11:00	33,30	38,14	
		12:00	23,25	28,22	
		13:00	05,43	20,14	
		14:00	03,30	16,51	
		15:00	12,48	38,24	
		16:00	29,45	51,58	
		17:00	16,38	53,22	
18:00	06,60	47,21			
19:00	01,10	17,35			
20:00	00,00	04,74			
Güneşli	11.11.2017	06:00	00,00	03,24	
		07:00	00,00	06,24	

Tablo 7.5. (Devamı)

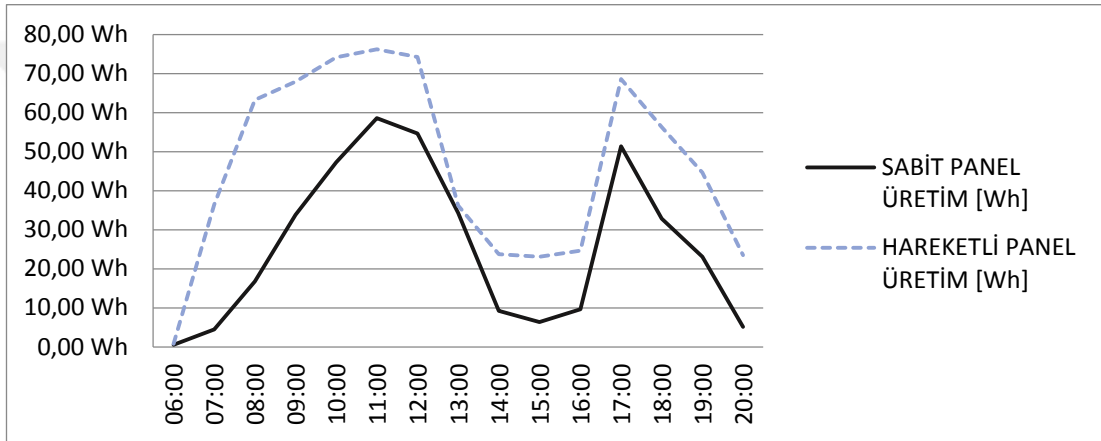
Hava Durumu	Tarih	Saat	Sabit Üretim [Wh]	Panel Hareketli Üretim [Wh]	Panel Üretim [Wh]
Güneşli	11.11.2017	08:00	02,90	24,36	
		09:00	12,65	48,12	
		10:00	38,10	60,21	
		11:00	62,35	66,22	
		12:00	68,00	68,50	
		13:00	67,45	68,20	
		14:00	50,75	67,10	
		15:00	31,00	56,12	
		16:00	14,13	34,28	
		17:00	02,23	08,12	
		18:00	00,00	00,00	
		19:00	00,00	00,00	
20:00	00,00	00,00			



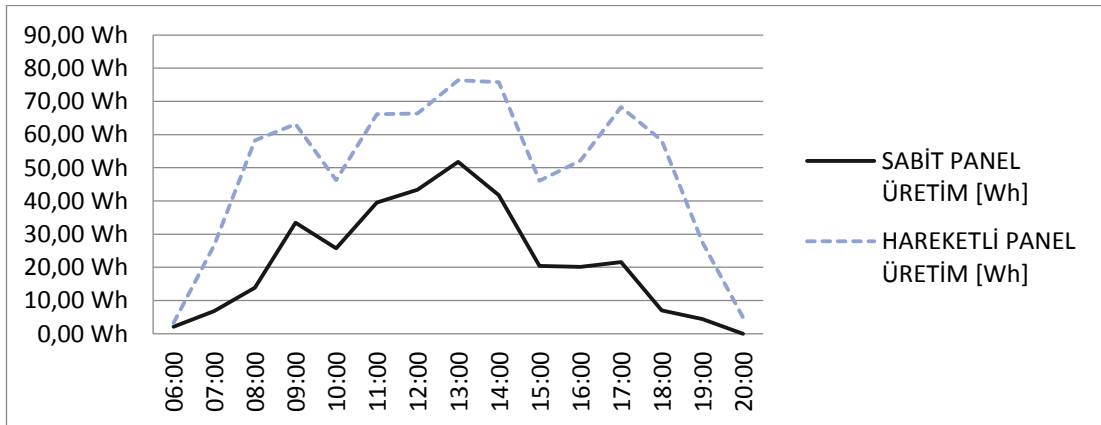
Şekil 7.15. 01.06.2017-Tüm gün güneşli bir günde sistemlerin üretimi



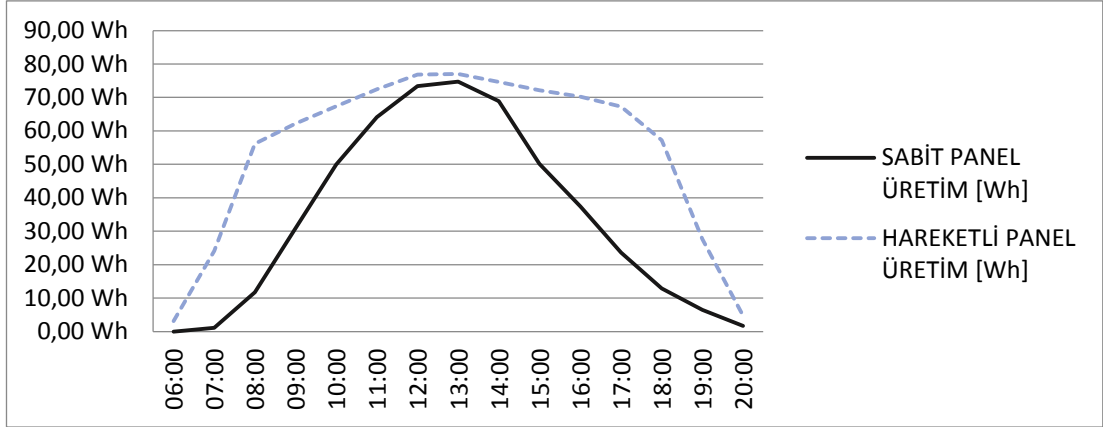
Şekil 7.16. 09.06.2017-Tüm gün kapalı hava bir günde sistemlerin üretimi



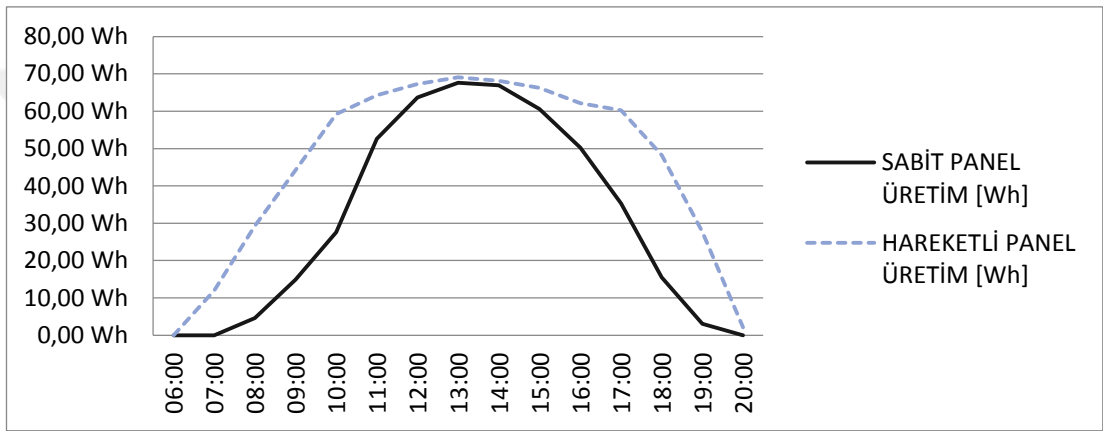
Şekil 7.17. 20.06.2017-Parçalı bulutlu bir günde sistemlerin üretimi



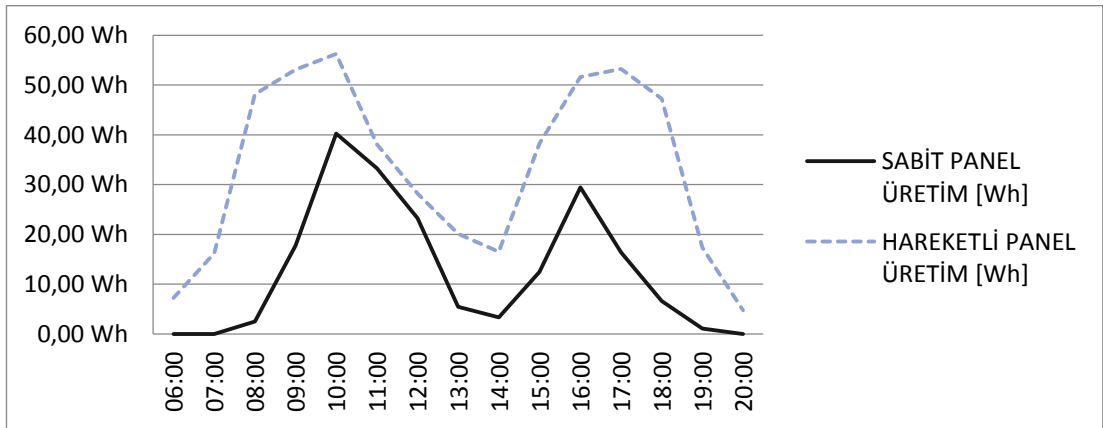
Şekil 7.18. 18.07.2017-Parçalı bulutlu bir günde sistemlerin üretimi



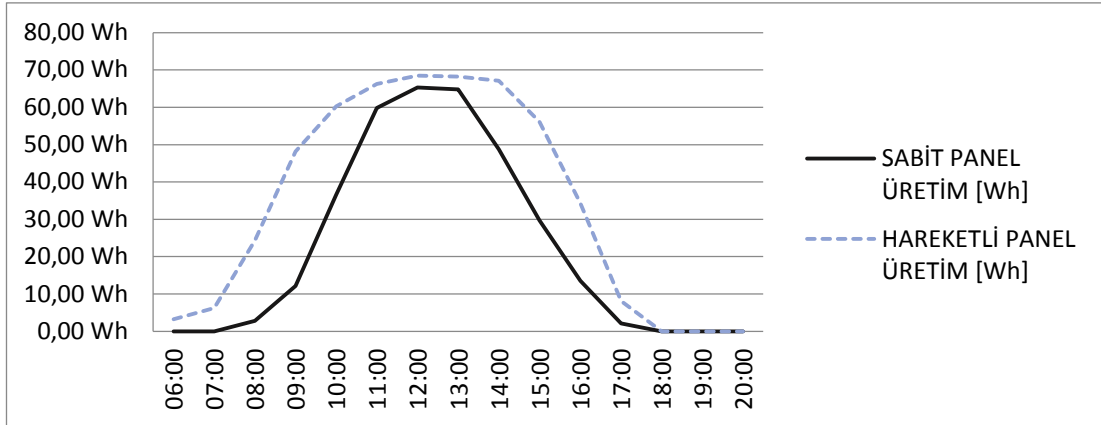
Şekil 7.19. 27.08.2017- Tüm gün güneşli bir günde sistemlerin üretimi



Şekil 7.20. 09.09.2017- Tüm gün güneşli bir günde sistemlerin üretimi



Şekil 7.21. 14.10.2017- Sağanak yağışlı bir günde sistemlerin üretimi



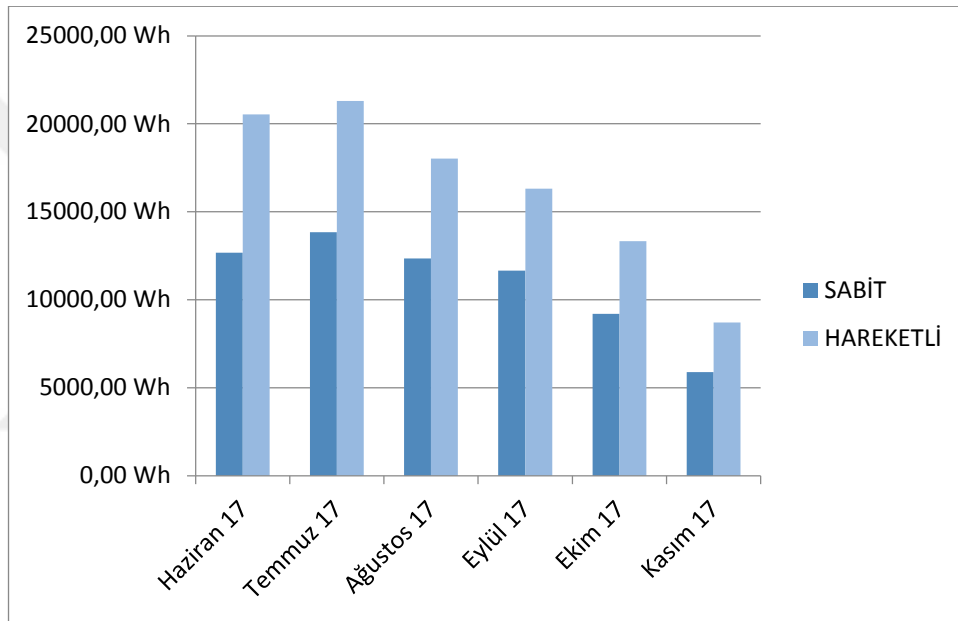
Şekil 7.22. 11.11.2017- Tüm gün güneşli bir günde sistemlerin üretimi

Farklı hava koşulları ve farklı aylar için ölçülen günlük saatlik akım, gerilim ve güç değerlerine göre:

- Tüm gün güneşli günlerde hareketli sistem sabahın erken saatlerinden itibaren en yüksek üretim değerine ulaşmış ve akşamın erken saatlerine kadar en yüksek değeri üretmeye devam etmiştir.
- Parçalı bulutlu ve tüm gün kapalı günlerde sistemlerin üretim eğrileri benzer karakterde oluşmuştur.
- Hareketli sistem üretim değerleri her koşulda sabit sistem üretim değerlerinden fazla ölçülmüştür.
- Her ayın farklı bir günü için belirlenen sabit sistem eğrileri kendi arasında karşılaştırıldığında en yüksek sistem veriminin mevcut eğim açısının en uygun aylık eğim açısına eşit olduğu Eylül ayının ilk günlerinde (Şekil 7.20) elde edildiği görülmüştür.

Sistemlerin aylık toplam üretim değerleri ve karşılaştırmalı grafiği aşağıdaki gibidir:

Tarih	Sabit Sistem Üretim [Wh]	Hareketli Sistem Üretim [Wh]
Haziran 2017	12675,15	20533,74
Temmuz 2017	13832,32	21301,77
Ağustos 2017	12342,00	18019,32
Eylül 2017	11646,00	16304,40
Ekim 2017	9196,00	13334,20
Kasım 2017	5880,00	8702,40



Şekil 7.23. Aylık toplam üretim değerleri

Tablo 7.6 ve Şekil 7.23 incelendiğinde hareketli sistemin sabit sisteme göre; Haziran ayında %62, Temmuz ayında %54, Ağustos ayında %46, Eylül ayında %54, Ekim ayında %45, Kasım ayında %48 daha verimli olduğu gözlenmiştir.

### 7.7. Sistemlerin Kurulum Maliyetleri

Bu çalışmada en uygun yıllık eğim açısı ile konumlandırılmış sabit bir güneş sistemi ve iki eksen güneşi izleyen hareketli güneş sistemi tasarımı ve uygulaması yapılmıştır. Sistemlerin tasarım ve uygulama aşamaları Bölüm 4 ve Bölüm 5'te detaylı olarak anlatılmıştır. Sistemlerin kurulum maliyetleri Tablo 7.7 ile verilmiştir.

Tablo 7.7. Sistemlerin kurulum maliyeti

	Sabit Güneş Sistemi	Hareketli Güneş Sistemi
Elektronik kart, komponent,		
LCD ekran, plastik kutu	1500	3000
Güneş paneli	320	320
Enkoder	0	700
İnklinometre Kontrol Kartı	0	1600
DC motorlar	0	600
Motor sürücü kartı	0	160
Sabit yük direnç	60	60
Kablo, pano, sarf malzemesi	120	600
Elektriksel ve mekanik montaj	300	1200
Metal karkas ve statik boya	400	600
Alüminyum panel taşıyıcı	0	125
Dişli sistemi, pirinç malzeme ve		
torna işçiliği	0	500
Tekerlekler	60	60
Nakliye, tedarik, ulaşım		
maliyetleri	500	500
Toplam	3260	10025

Sistemlerin kurulumu sırasında öngörülemeyen hatalar ve arızalar oluşmuştur. Bu hatalar ve arızalar aşağıda verilen adımların bir veya daha fazlasının uygulanması ile giderilmiştir:

- Elektronik kart elemanlarının değişimi
- Elektronik kart hatlarının yenilenmesi
- Enkoder değişimi
- Mekanik malzeme değişimi

– Mekanik montaj değişimi

Çalışmada tasarımı ve uygulaması gerçekleştirilen sistemlerin ilk örnek olması nedeniyle oluşmuş olan öngörülemeyen hata ve arıza maliyetleri kurulum maliyetlerinden çıkarıldığı zaman sistemlerin gerçek üretim maliyetleri hesaplanabilir (Tablo 7.8).

Tablo 7.8. Sistemlerin gerçek üretim maliyeti

	Sabit Güneş Sistemi	Hareketli Güneş Sistemi
Elektronik kart, komponent, LCD		
ekran, plastik kutu	650	1400
Güneş paneli	320	320
Enkoder	0	350
İnklinometre Kontrol Kartı	0	400
DC motorlar	0	600
Motor sürücü kartı	0	40
Sabit yük direnç	30	30
Kablo, pano, sarf malzemesi	75	320
Elektriksel ve mekanik montaj	200	300
Metal karkas ve statik boya	400	600
Alüminyum panel taşıyıcı	0	125
Dışlı sistemi, pirinç malzeme ve torna işçiliği	0	150
Tekerlekler	60	60
Toplam	1735	4695

Çalışmada tasarımları ve analizi gerçekleştirilen 80 W sabit ve iki eksen güneş izleyen güneş sistemlerinden elde edilen elektriksel ve ekonomik veriler 1 kW şebekeye bağlı bataryasız sabit ve hareketli güneş sistemleri için kurulum maliyetlerinin ve geri ödeme sürelerinin hesaplanmasında kullanılmıştır (Tablo 7.9, Tablo 7.10).

Tablo 7.9. 1 kW sistemlerin kurulum maliyeti

	Sabit Güneş Sistemi	Hareketli Güneş Sistemi
Elektronik kart, komponent, LCD		
ekran, plastik kutu	0	0
Güneş paneli	2255	2255
Enkoder	0	350
İnklinometre ve İnklinometre		
Kontrol Kartı	0	400
DC motorlar	0	1600
Motor sürücü kartı	0	300
Kablo, pano, sarf malzemesi	600	600
Elektriksel ve mekanik montaj	1500	3750
Metal karkas ve statik boya	0	1600
Alüminyum panel taşıyıcı	250	250
Dişli sistemi, pirinç malzeme ve		
torna işçiliği	0	350
İnvertör	1650	1650
Toplam	6655	14105

Tablo 7.10. 1 kW sistemlerin yıllık üretim değerleri ve geri ödeme süreleri

	Sabit Güneş Sistemi	Hareketli Güneş Sistemi
Yıllık üretim [kWh]	1885,83	2678,45
Yıllık getiri [TL]	926,52	1313,97
Geri ödeme süreleri [yıl]	7,18	10,73

Sistemlerin geri ödeme süreleri yıllık üretim değerleri, kurulum maliyetleri ve hareketli sistemin hareket birimlerinin enerji tüketim değerleri ile mevcut elektrik birim fiyatı üzerinden belirlenmiştir. Hareketli sistemin hareket birimlerinin yıllık enerji tüketimi 3,431 kWh olarak hesaplanmıştır. Bu değer yıllık üretim miktarının %0.128'ini oluşturduğundan net getiri hesaplamalarında ihmal edilebilir.

1 kW bir güneş enerjili sistemin ortalama ömrü boyunca (yaklaşık 20 yıl) üretim ile elde edilen getiriden kurulum maliyetleri düşüldüğünde hareketli sistem ile elde edilen net getirinin 12.180,50 TL, sabit sistem ile elde edilen getirinin 11.877,98 TL olduğu görülmektedir. Adı geçen sistemlerin bir konut (daire) için kullanılması durumunda 3-10 kW arası bir kurulum gerçekleşeceği için hareketli sistem mali açıdan daha avantajlı bir seçenek olacaktır. Bu da hareketli sistemin küçük ve orta

büyükteki yüklerde daha avantajlı bir tercih olduğunu gösteren somut bir hesaplama olarak ön plana çıkmaktadır.



## BÖLÜM 8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada eğim açısı Sakarya ili için özel olarak belirlenmiş sabit bir güneş sistemi tasarımı ve güneşi iki eksen izleyen bir hareketli güneş sistemi tasarımı yapılmıştır. Sabit güneş sistemi için en elverişli açı toplam güneş ışıınımı ve eğim açısı ilişkisi kullanılarak belirlenmiştir. Bu aşamada toplam güneş ışıınımının bileşenlerinden dağınık güneş ışıınımının tahmini için dağınıklık kesrinin açıklık ve/veya güneşlenme kesrinin fonksiyonu olduğu mevcut denklemler kullanılarak 9 adet yeni denklem geliştirilmiştir. Yeni denklemler ve bu denklemlerin geliştirilmesi için kullanılan mevcut denklemler istatistiksel göstergelerle test edilmiştir. Test sonuçları yeni denklemlerin performansının mevcut denklemlerin performansından daha iyi olduğunu göstermiştir (Tablo 7.2). En iyi sonuçlar dağınıklık kesrinin açıklık ve güneşlenme kesrinin fonksiyonu olduğu denklemlerden oluşan grup 3'te elde edilmiştir (Tablo 7.2). Bu grupta  $t$  göstergesi dışında diğer göstergeler neredeyse eşit olduğundan,  $t$  göstergesi belirleyici gösterge olarak kullanılmıştır. Buna göre en küçük  $t$  değerine sahip olan denklem 7.8 Sakarya ili için en uygun dağınık güneş denklemi olarak belirlenmiştir (Tablo 7.2).

Belirlenen en uygun dağınık güneş denklemi ile günlük dağınık güneş ışıınımının aylık ortalaması tahmin edilmiştir (Tablo 7.3). Elde edilen tahmini değerler ve GEPA'dan alınan evrensel güneş ışıınımının ölçülmüş değerleri denklem 3.32'de günlük direkt güneş ışıınımı bileşenin yatay yüzeyler için aylık ortalamasının hesaplanmasında kullanılmıştır. Güneş ışıınımının yatay yüzeyler için tüm bileşenleri belirlendikten sonra toplam güneş ışıınımını eğim açısı ile ilişkilendiren denklem 3.31 ile Matlab ortamında toplam güneş ışıınımını en yüksek yapan eğim açısının hesaplandığı bir program oluşturulmuştur. Programın ilk adımında toplam güneş ışıınımını günlük, aylık, mevsimsel, yarıyıllık ve yıllık olarak en yüksek yapan eğim açıları belirlenmiştir (Şekil 7.1-Şekil 7.13). Bir sonraki adımda her bir eğim açısı

için günlük toplam güneş ışınımının aylık ortalaması belirlenmiştir (Tablo 7.4). Elde edilen veriler günlük en uygun eğim açısı ile konumlandırma durumunda güneş ışınımından en verimli şekilde faydalandığını göstermiştir. Böylelikle güneş sistemlerinde eğim açısının konumlandırma sıklığının artmasının sistemin elektriksel performansını olumlu yönde etkilediği görülmüştür.

En uygun yıllık eğim açısı ile konumlandırılmış sabit güneş sisteminin ve iki eksen güneşi izleyen hareketli güneş sistemin çalışmaları 06:00-20:00 saatleri arasında 6 ay boyunca izlenmiştir. İncelemenin sonunda hareketli sistemin her koşulda sabit sisteme göre daha verimli çalıştığı görülmüştür. Bununla beraber sabit sistemin Ağustos ayının son günlerinde ve Eylül ayının ilk günlerinde en yüksek verim ile çalıştığı gözlenmiştir (Şekil 7.20). Ağustos ayının son günleri ve Eylül ayının ilk günleri için Bölüm 3'te hesaplanan en uygun günlük eğim açılarının, sabit sistemin konumlandırılmasında kullanılan en uygun yıllık eğim açısına yakın değerler olması sistem performansının iyileşmesini sağlamıştır (Şekil 7.8 ve Şekil 7.9).

Sistemlerin elektriksel performansları karşılaştırıldıktan sonra kurulum maliyetleri ve gerçek üretim maliyetleri çıkarılmıştır (Tablo 7.7 ve Tablo 7.8). Sistemlerin ilk örnek olması nedeniyle oluşan hata ve arızalardan kaynaklanan maliyetler kurulum maliyetlerini artırmıştır. Gerçek üretimde bu hata ve arızaların ikinci defa oluşması söz konusu olmadığından, gerçek üretim maliyetleri kurulum maliyetlerden daha düşük olmalıdır. Bu nedenle sistem maliyetleri karşılaştırılırken gerçek üretim maliyetleri dikkate alınmalıdır. Buna göre bu çalışmada tasarlanan hareketli güneş sistemi uygulaması sabit güneş sistemi uygulamasına göre 2,7 kat daha pahalıdır (Tablo 7.8).

Çalışmanın sonunda sistemlerden elde edilen elektriksel ve ekonomik sonuçlar ile sistemlerin şebekeye bağlı bataryasız 1 kW uygulamaları için kurulum maliyetlerini geri ödeme süreleri hesaplanmıştır (Tablo 7.10). Hareketli sistem için geri ödeme süresi, sabit sistem için geri ödeme süresinin 1,49 katı olarak belirlenmiştir.

Bu sonuçlar ışığında güneş sistemleri tasarımları ve uygulamaları hakkında aşağıdaki öneriler sunulabilir:

- Sakarya için önerilen dağınık güneş ışıınımı denklemi Türkiye’de Doğu Marmara Bölgesi’nde bulunan herhangi bir il ve dünyada Sakarya ile benzer enlem değerlerine sahip herhangi bir bölge için kullanılabilir.
- Elektriksel performans bakımından oldukça üstün ancak uygulaması zor ve maliyetli olan iki eksen güneş izleyen hareketli güneş sistemlerinden az sayıda güneş paneli kullanımının yeterli olduğu düz çatılı alanlarda faydalanılabilir. Çoklu güneş panelinin kullanıldığı alanlarda sisteme üstünlük sağlayan güneş takibi gölgeleme etkisinden dolayı sistem verimi azaltıcı bir etkene dönüşebilir.
- İki eksen güneş izleyen hareketli sistemden elde edilen veriler ve Bölüm 3’te hesaplanan en uygun eğim açıları için toplam güneş ışıınımı verileri eğim açısının değişme sıklığının artması ile sistem veriminin arttığını göstermiştir. Bu durumda maliyetin ve gölgeleme etkisinin önemli olduğu çoklu uygulamalarda yalnızca mekanik müdahalelerle en uygun aylık eğim açıları ile konumlandırılabilen bir güneş sistemi uygulaması önerilebilir. Bu sistem iki eksen güneş izleyen hareketli güneş sistemine göre daha az maliyetli ve daha uygulanabilir olduğu gibi elektriksel bakımdan en uygun yıllık eğim açısı ile konumlandırılmış sisteme göre daha verimlidir.

## KAYNAKLAR

- [1] Martínez, C.I.P., Energy and sustainable development in cities: A case study of Bogota. doi:10.1016/j.energy.2015.02.003
- [2] www.tuik.gov.tr, Erişim Tarihi: 31.03.2018.
- [3] www.enerji.gov.tr, Erişim Tarihi: 31.03.2018.
- [4] www.eie.gov.tr, Erişim Tarihi: 31.03.2018.
- [5] Nicoletti, G., Arcuri, N., Nicoletti, G., Bruno, R., A technical and environmental comparison between hydrogen and some fossil fuels. Energy Conversion and Management, 89, 205–13, 2015. doi:10.1016/j.enconman.2014.09.057
- [6] Weimer, T., Comparison of CO<sub>2</sub> sources for fuel synthesis. Fuel Energy, 38, 118, 1997. doi:10.1016/S0140-6701(97)84326-3
- [7] Report Kyoto Protocol: Status of Ratification, United Nations Framework Convention on Climate Change, 2009.
- [8] Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L., Climate change 2007: the physical science basis. New York: Cambridge University Press, 2007.
- [9] Ozbugday, F.C., Erbas, B.C., How effective are energy efficiency and renewable energy in curbing CO<sub>2</sub> emissions in the long run? A heterogeneous panel data analysis. Energy, 82, 734-45, 2015. doi:10.1016/j.energy.2015.01.084
- [10] Evrendilek, F., Ertekin, C., Assessing the potential of renewable energy sources in Turkey. Renewable Energy, 28, 2303–15, 2003. doi:10.1016/S0960-1481(03)00138-1
- [11] Erdem, Z.B., The contribution of renewable resources in meeting Turkey's energy-related challenges. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14, 2710–22, 2010. doi:10.1016/j.rser.2010.07.003

- [12] Kaygusuz, K., Sarı, A., Renewable energy potential and utilization in Turkey. *Energy Conversion and Management*, 44, 459–78, 2003. doi:10.1016/S0196-8904(02)00061-4
- [13] Keleş, S., Bilgen, S., Renewable energy sources in Turkey for climate change mitigation and energy sustainability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 5199- 206, 2012. doi:10.1016/j.rser.2012.05.026
- [14] Irmak, E., Ayaz, M.S., Gok, S.G., Sahin, A.B., A survey on public awareness towards renewable energy in Turkey. 3rd International Conference on Renewable Energy Research and Applications, 932-937, USA, 2014.
- [15] Gok, S.G., Kavasoglu, R., The renewable energy policy of Turkey. 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 1334-1339, Istanbul, 2013.
- [16] Dincer, F., Overview of the photovoltaic technology status and perspective in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 3768–79, 2011. doi:10.1016/j.rser.2011.06.005
- [17] Benli, H., Potential of renewable energy in electrical energy production and sustainable energy development of Turkey: performance and policies. *Renewable Energy*, 50, 33-46, 2013. doi:10.1016/j.renene.2012.06.051
- [18] Topkaya, S.O., A discussion on recent developments in Turkey’s emerging solar power market. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 3754–65, 2012. doi:10.1016/j.rser.2012.03.019
- [19] Jiang, Y., Estimation of monthly mean daily diffuse radiation in China. *Applied Energy*, 86, 1458–64, 2009.
- [20] Aras, H., Balli, O., Hepbasli, A., Estimating the horizontal diffuse solar radiation over the Central Anatolia Region of Turkey. *Energy Conversion and Management*, 47, 2240–2249, 2006.
- [21] Ulgen, K., Hepbaslı , A., Diffuse solar radiation estimation models for Turkey’s big cities”, *Energy Conversion and Management*. 50, 149–156, 2009.
- [22] Pandey , C.K., Katiyar , A.K., A comparative study to estimate daily diffuse solar radiation over India. *Energy*, 34, 1792–1796, 2009.
- [23] Tarhan, S., Sarı, A., Model selection for global and diffuse radiation over the Central Black Sea (CBS) region of Turkey. *Energy Conversion and Management*, 46, 605–613, 2005.

- [24] Machado, A.J., Soares, J., Correlation models of diffuse solar-radiation applied to the city of Saõ Paulo, Brazil, *Applied Energy*, 71, 59–73, 2002.
- [25] Liu, B., Jordan, R., Daily insolation on surfaces tilted towards the equator. *Trans ASHRAE*, 67, 1962.
- [26] Jacovides, C.P., Tymvios, F.S., Assimakopoulos, V.D., Kaltsounides, N.A., Comparative study of various correlations in estimating hourly diffuse fraction of global solar radiation, *Renewable Energy*, 31, 2492–2504, 2006.
- [27] Tırıs, M., Tırıs, Ç., Türe, İ.E., Correlations of monthly-average daily global, diffuse and beam radiations with hours of bright sunshine in Gebze, Turkey, *Energy Convers. Mgmt*, 37, 9, 1417-1421, 1996.
- [28] Aras, H., Ballı, O., Hepbaşlı, A., Estimating the horizontal diffuse solar radiation over the Central Anatolia Region of Turkey, *Energy Conversion and Management*, 47, 2240–2249, 2006.
- [29] Bakırcı, K., Models for the estimation of diffuse solar radiation for typical cities in Turkey, *Energy*, 82, 827-838, 2015.
- [30] Elminir, H.K., Experimental and theoretical investigation of diffuse solar radiation: Data and models quality tested for Egyptian sites, *Energy*, 32, 73–82, 2007.
- [31] Elminir, H.K., Azzam, Y.A., Younes, F.I., Prediction of hourly and daily diffuse fraction using neural network, as compared to linear regression models, *Energy*, 32, 1513–1523, 2007.
- [32] Li, H., Bu, X., Long Z., Zhao, L., Ma, W., Calculating the diffuse solar radiation in regions without solar radiation Measurements, *Energy*, 44, 611-615, 2012.
- [33] Klucher, T.M., Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces, *Solar Energy*, 23, 111–114, 1979.
- [34] El-Sebaıı, A.A., Al-Hazmi, F.S., Al-Ghamdi, A.A., Yaghmour, S.J., Global, direct and diffuse solar radiation on horizontal and tilted surfaces in Jeddah, Saudi Arabia, *Applied Energy*, 87, 568–576, 2010.
- [35] Klein, S.A., Calculation of monthly average insulations on tilted surfaces, *Solar Energy*, 19, 325–329, 1977.
- [36] Al-Mohamad, A., Global, direct and diffuse solar-radiation in Syria, *Applied Energy*, 79, 191–200, 2004.
- [37] Karakoti, I., Das, P.K., Singh, S.K., Predicting monthly mean daily diffuse radiation for India, *Applied Energy*, 91, 412–425, 2012.

- [38] Shamshirband, S., Mohammadi, K., Khorasanizadeh, H., Yee, P.L., Lee, M., Petković, D., Zalnezhad, E., Estimating the diffuse solar radiation using a coupled support vector machine–wavelet transform model, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 428–435, 2016.
- [39] Hawas, M.; Muneer, T., Study of diffuse and global radiation characteristics in India, *Energy Convers.*, 24, 143, 1984.
- [40] Page, J.K., The estimation of monthly mean value of daily short wave irradiation on vertical and inclined surfaces from sunshine records for latitudes 60° N to 40° S, In: BS32. Department of Building Science, University of Sheffield, UK, 1977.
- [41] Abbasi, A.A., Qureshi, M.S., Estimating global, diffuse solar radiation for Chhor and validation with satellite-based data, *Arab J Sci Eng*, 39, 175–179, 2014.
- [42] Mubiru, J., Banda, E.J.K.B., Performance of empirical correlations for predicting monthly mean daily diffuse solar radiation values at Kampala, Uganda, *Theor. Appl. Climatol.*, 88, 127–131, 2007.
- [43] Kreith, F., Kreider, J.F., *Principles of Solar Engineering*, New York: McGraw\_Hill, 1978.
- [44] Gupta, C.L., Usha Rao, K., Reddy, T.A., Radiation design data for solar energy applications, *Energy Manag.*, 3, 299, 1979.
- [45] Namrata, K., Sharma, S.P., Seksena, S.B.L., Comparison of different models for estimation of diffuse solar radiation in Jharkhand (India) region, *Applied Solar Energy*, 51(3), 219–224, 2015.
- [46] Kuo, C.W., Chang, K.C., In-situ measurements of solar diffuse fraction in southern Taiwan, *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 38(6), 723-730, 2015. doi: 10.1080/02533839.2015.1016880
- [47] Ulgen, K., Hepbash, A., Comparison of the diffuse fraction of daily and monthly global radiation for Izmir, Turkey, *Energy Sources*, 25(7), 637-649, 2003.
- [48] Karatasou, S., Santamouris, M., Geros, V., Analysis of experimental data on diffuse solar radiation in Athens, Greece, for building applications. *International Journal of Sustainable Energy*, 23(1-2), 1-11, DOI: 10.1080/0142591031000148597, 2003.

- [49] Khahro, S.F., Tabbassum, K., Talpur, S., Alvi, M.B., Liao, X., Dong L., Evaluation of solar energy resources by establishing empirical models for diffuse solar radiation on tilted surface and analysis for optimum tilt angle for a prospective location in southern region of Sindh, Pakistan, *Electrical Power and Energy Systems*, 64, 1073–1080, 2015.
- [50] Khorasanizadeh, H., Mohammadi, K., Mostafaeipour, A., Establishing a diffuse solar radiation model for determining the optimum tilt angle of solar surfaces in Tabass, Iran, *Energy Conversion and Management*, 78, 805–814, 2014.
- [51] Bakirci, K., General models for optimum tilt angles of solar panels: Turkey case study, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 6149–615, 2012.
- [52] Despotovic, M., Nedic, V., Comparison of optimum tilt angles of solar collectors determined at yearly, seasonal and monthly levels, *Energy Conversion and Management*, 97, 121–131, 2015.
- [53] Gong, X., Kulkarni, M., Design optimization of a large scale rooftop photovoltaic system. *Solar Energy*, 78, 362–374, 2005.
- [54] Buresch, M., *Photovoltaic Energy Systems*, McGraw-Hill Book Company, ISBN 0-07-008952-3, 1983.
- [55] Jafarkazemi, F., Saadabadi, S.A., Optimum tilt angle and orientation of solar surfaces in Abu Dhabi, UAE. *Renewable Energy*, 56, 44-49, 2013.
- [56] Erbs, D.G., Klein, S.A., Duffie, J.A., Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily, and monthly average global radiation, *Solar Energy*, 28, 293, 1982.
- [57] Klein, S.A., Theilacker, J.C., An algorithm for calculating monthly average radiation on inclined surface, *Journal of Solar Energy Engineering-Transactions of the ASME*, 103, 29, 1981.
- [58] Benghanem, M., Optimization of tilt angle for solar panel: Case study for Madinah, Saudi Arabia, *Applied Energy*, 88, 1427–1433, 2011.
- [59] Corrada, P., Bell, J., Guan, L., Motta, N., Optimizing solar collector tilt angle to improve energy harvesting in a solar cooling system, *Energy Procedia* 48, 806 – 812, 2014.
- [60] Yakup, M.A.H.M., Malik, A.Q., Optimum tilt angle and orientation for solar collector in Brunei Darussalam, *Renewable Energy*, 24, 223–234, 2001.
- [61] Tang, R., Wu, T., Optimal tilt-angles for solar collectors used in China, *Applied Energy*, 79, 239–248, 2004.

- [62] Rabl, A., Active solar collectors and their applications, Oxford: Oxford University Press, 1985.
- [63] Ibrahim, D., Optimum tilt angle for solar collectors used in Cyprus, *Renewable Energy*, 6(7), 813-819, 1995.
- [64] Stanciu, C., Stanciu, D., Optimum tilt angle for flat plate collectors all over the World – A declination dependence formula and comparisons of three solar radiation models, *Energy Conversion and Management*, 81, 133–143, 2014.
- [65] Hottel, H.C., Woertz, B.B., Performance of flat plate solar heat collectors, *Trans ASME*, 64, 91, 1942.
- [66] Duffie, J., Beckman, W., Solar engineering of thermal processes, John Wiley & Sons Inc., 2006.
- [67] Elminir, H.K., Ghitas, A.E., El-Hussainy, F., Hamid, R., Beheary, M.M., Abdel-Moneim, K.M., Optimum solar flat-plate collector slope: Case study for Helwan, Egypt, *Energy Conversion and Management*, 47, 624–637, 2006.
- [68] Perez R, Stewart R, Arbogast C, Seals J, Scott J. An anisotropic hourly diffuse radiation model for sloping surfaces: description, performance validation, site dependency evaluation. *Solar Energy* 1986;36.
- [69] Mehleri, E.D., Zervas, P.L., Sarimveis, H., Palyvos, J.A., Markatos, N.C., Determination of the optimal tilt angle and orientation for solar photovoltaic arrays, *Renewable Energy*, 35, 2468-2475, 2010.
- [70] Gunerhan, H., Hepbasli, A., Determination of the optimum tilt angle of solar collectors for building applications, *Building and Environment*, 42, 779–783, 2007.
- [71] Nijegorodov, N., Devan, K.R.S., Jain, P.K., Carlsson, S., Atmospheric transmittance models and an analytical method to predict the optimum slope on an absorber plate, variously orientated at any latitude, *Renewable Energy*, 4, 529, 1994.
- [72] Shariah, A., Al-Akhras, M.A., Al-Omari, I.A., Optimizing the tilt angle of solar collectors, *Renewable Energy*, 26, 587–598, 2002.
- [73] Darhmaoui, H., Lahjouji, D., Latitude based model for tilt angle optimization for solar collectors in the Mediterranean Region, *Energy Procedia*, 42, 426 – 435, 2013.
- [74] Bari, S., Optimum slope angle and orientation of solar collectors for different periods of possible utilization. *Energy Conversion & Management*, 41, 855-860, 2000.

- [75] Kacira, M., Simsek, M., Babur, Y., Demirkol, S., Determining optimum tilt angles and orientations of photovoltaic panels in Sanliurfa, Turkey, *Renewable Energy*, 29, 1265–1275, 2004.
- [76] De Miguel, A., Bilbao, J., Diez, M., Solar radiation incident on tilted surfaces in Burgos, Spain: Isotropic models, *Energy Convers.Mgmt*, 36(10), 945-951, 1995.
- [77] Lalas, D.P., Pissimanis, D.K., Notaridou, V.A., *Technica Chronica.*, 2, 129, 1982.
- [78] Iqbal, M., *An introduction to solar radiation*, Academic Press, New York, 1983.
- [79] Skeiker, K., Optimum tilt angle and orientation for solar collectors in Syria, *Energy Conversion and Management*, 50, 2439–2448, 2009.
- [80] Roth, P., Georgiev, A., Boudinov, H., Cheap two axis sun following device, *Energy Conversion and Management*, 46, 1179–1192, 2005.
- [81] Rebhi, M., Sellam, M., Belghachi, A., Kadri, B., Conception and realization of sun tracking system in the south-west of Algeria, *Applied Physics Research*, 2(1), 66-75, 2010.
- [82] Eke, R., Senturk , A., Performance comparison of a double-axis sun tracking versus fixed PV system, *Solar Energy*, 86, 2665–2672, 2012.
- [83] Visconti, P., Ventura, V., Tempesta, F., Romenallo, D., Cavalera, G., Electronic system for improvement of solar plant efficiency by optimized algorithm implemented in biaxial solar trackers, *IEEE*, 978-1-4244-8782, 2011.
- [84] Wang, J., Lu, C., Design and implementation of a sun tracker with a dual-axis single motor for an optical sensor-based photovoltaic system, *Sensors*, 13, 3157-3168, 2013.
- [85] Sungur, C., Multi-axes sun-tracking system with PLC control for photovoltaic panels in Turkey, *Renewable Energy*, 34, 1119-1125, 2009.
- [86] Abu-Molah, R., Abdallah, S., Muslih, I.M., Design, construction and operation of spherical solar cooker with automatic sun tracking system, *Energy Conversion and Management*, 52, 615–620, 2011.
- [87] Duarte, F., Gaspar, P.D., Gonçalves, L.C., Two axes solar tracker based on solar maps controlled by a low-power microcontroller, *Journal of Energy and Power Engineering*, 5, 671-676, 2011.

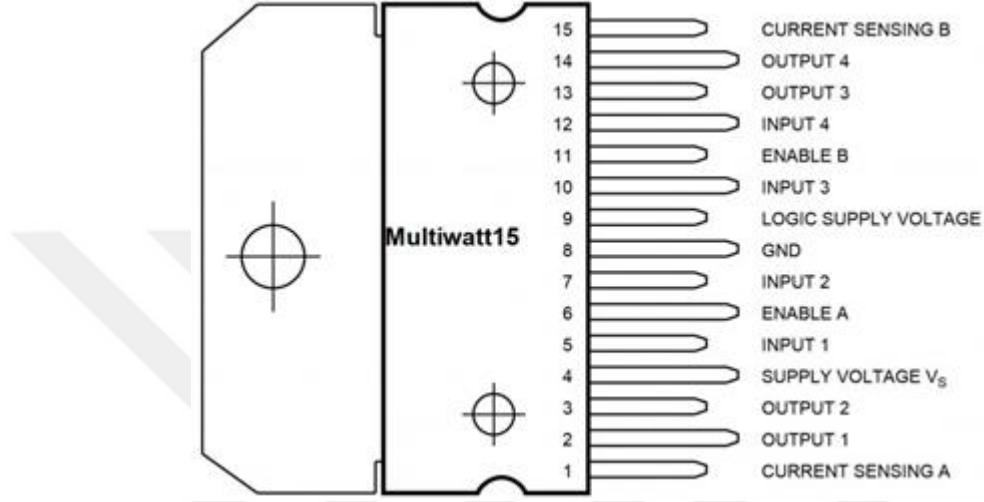
- [88] Vataşescu, M., Diaconescu, D., Clean energy response of PV systems with azimuth and pseudo-equatorial tracking, *Environmental Engineering and Management Journal*, 10(9), 1395-1406, 2011.
- [89] Barker, L., Neber, M., Lee, H., Design of a low profile two-axis solar tracker, *Solar Energy*, 97, 569-576, 2013. doi: 10.1016/j.solener.2013.09.014
- [90] Burhan, M., Oh, S.J., Chua, K.J.E, Ng, K.C., Double lens collimator solar feedback sensor and master slave configuration: Development of compact and low cost two axis solar tracking system for CPV applications, *Solar Energy*, 137, 352–363, 2016.
- [91] Fathabadi, H., Comparative study between two novel sensorless and sensor based dualaxis solar trackers, *Solar Energy*, 138, 67–76, 2016.
- [92] Quinn, S.W., Energy gleaning for extracting additional energy and improving the efficiency of 2-axis time-position tracking photovoltaic arrays under variably cloudy skies, *Solar Energy*, 148, 25–35, 2017.
- [93] Honga, T., Jeongb, K., Banc, C., Ohc, J., Kood, C., Kimb, J., Lee, M., A preliminary study on the 2-axis hybrid solar tracking method for the smart photovoltaic blind, *Energy Procedia*, 88, 484 – 490, 2016.
- [94] Fathabadi, H., Novel high accurate sensorless dual-axis solar tracking system controlled by maximum power point tracking unit of photovoltaic systems, *Applied Energy*, 173, 448–459, 2016.
- [95] Qu, W., Wang, R., Hong, H., Sun, J., Jin, H., Test of a solar parabolic trough collector with rotatable axis tracking, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.05.114
- [96] Njoku, H.O., Upper-limit solar photovoltaic power generation: Estimates for 2-axis tracking collectors in Nigeria. *Energy*, 95, 504-516, 2016.
- [97] Sidek, M.H.M., Azis, N., Hasan, W.Z.W, Ab Kadir, M.Z.A., Shafie, S., Radzi, M.A.M., Automated positioning dual-axis solar tracking system with precision elevation and azimuth angle control, *Energy*, 124, 160-170, 2017.
- [98] Seme, S., Srpcic, G., Kavsek, D., Bozicnik, S., Letnik, T., Praunseis, Z., Stumberger, B., Hadziselimovic, M., Dual-axis photovoltaic tracking system-Design and experimental investigation, doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.153
- [99] Away, Y., Ikhsan, M., Dual-axis sun tracker sensor based on tetrahedron geometry, *Automation in Construction*, 73, 175–183, 2017.
- [100] Fathabadi, H., Novel high efficient offline sensorless dual-axis solar tracker for using in photovoltaic systems and solar concentrators, *Renewable Energy* 95, 485-494, 2016.

- [101] Bahrami, A., Okoye, C.O., Atikol, U., Technical and economic assessment of fixed, single and dual axis tracking PV panels in low latitude countries, 10.1016/j.renene.2017.05.095
- [102] Koronakis, P.S., On the choice of the angle of tilt for south facing solar collectors in the Athens basin area, *Sol Energy*, 36, 217–225, 1986.
- [103] Yilmaz, S., Ozcalik, H.R., Dogmus, O., Dincer, F., Akgol, O., Karaaslan, M., Design of two axes sun tracking controller with analytically solar radiation calculations, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 997–1005, 2015.
- [104] Aziz S, Hassan S., On improving the efficiency of a solar panel tracking system, *Procedia Manufacturing*, 7, 218-224, 2017.
- [105] Yadav, P., Chandel, S.S., Comparative analysis of diffused solar radiation models for optimum tilt angle determination for Indian locations, *Applied Solar Energy*, 50(1), 53–59, 2014.
- [106] Barbaro, S., Cannata, G., Coppolino, S., Leone, C., Sinagra, E., Diffuse solar radiation statistics for Italy, *Solar Energy*, 26, 429-435, 1981. doi:10.1016/0038-092X(81)90222-X
- [107] Iqbal, M., Correlation of average diffuse and beam radiation with hours of bright sunshine, *Solar Energy*, 23(2), 169-173, 1979. doi: 10.1016/0038-092X(79)90118-X
- [108] Gopinathan, K.K., Computing the monthly mean daily diffuse radiation from clearness index and percent possible sunshine, *Sol Energy*, 41(4), 379–385, 1988. doi: 10.1016/0038-092X(88)90034-5
- [109] [www.eie.gov.tr](http://www.eie.gov.tr), Erişim Tarihi: 01.02.2015.
- [110] Cooper, P.I., The absorption of solar radiation in solar stills, *Solar Energy* 12(3), 333–346, 1969. doi:10.1016/0038-092X(69)90047-4
- [111] Kopp, G., Lean, J.L., A new, lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance, *Geophysical Research Letters* 38, L01706, 2011. doi:10.1029/2010GL045777
- [112] <http://320volt.com>, Erişim Tarihi: 01.04.2015.
- [113] Szokolay, S., *Solar geometry*, Queensland: PLEA (Passive and Low Energy Architecture International), 2007.
- [114] <http://aa.usno.navy.mil>, Erişim Tarihi: 01.01.2015.

- [115] Park, K.H., Jo, J., Kim, J.H., Balance control of humanoid robot using the inclinometer, Proceedings of 1st International Conference on Sensing Technology Palmerston North, New Zealand, 72- 77, 2005.



## EK A



Şekil Ek A.1. L298

L298 A ve B köprüleri olmak üzere 2 adet H köprüsü ve toplam 15 adet bacak bulunmaktadır. Bunlardan IN1, IN2, OUT1, OUT2, ENA, SENSE A köprüsünün bacakları ve IN3, IN4, OUT3, OUT4, ENB, SENSE B köprüsünün bacaklarıdır. ENA bacağı +5V ile beslenip SENSE A bacağı toprağa bağlanırsa A köprüsü aktif hale gelmektedir. Benzer şekilde ENB bacağı +5V ile beslenip SENSE B bacağı toprağa bağlanırsa B köprüsü aktif hale gelmektedir. A köprüsü aktifken IN1 5V ve IN2 0V olursa motor 1 ileri yönde, IN1 0V ve IN2 5V olursa motor 1 geri yönde dönmektedir. İki girişin de 0V olması durumunda motor 1 durmaktadır. B köprüsü aktifken IN3 5V ve IN4 0V olursa motor 2 ileri yönde, IN3 0V ve IN4 5V olursa motor 2 geri yönde dönmektedir. İki girişin de 0V olması durumunda motor 2 durmaktadır. OUT1 ve OUT2 A köprüsünün motor 1'e giden çıkış bacakları, OUT3 ve OUT4 B köprüsünün motor 2'ye giden çıkış bacaklarıdır.

## EK B

Tablo Ek B.1. JN3 GPS biriminin özellikleri

Frekans bandı	GPS L1 Bandı, C/A
Standartlar	NMEA ve OSP
Mimari	48 kanal GPS mimarisi
Konumsal doğruluk	Otonom konumsal hata<2,5m
Boyutlar	16x12,2x2,4 mm
Ağırlık	1,8g
Sıcaklık aralığı	-40°C+85°C
Güç kaynağı	2,8V-3,6V
Akım Tüketimi	Uyku modu: 40µA, Düşük güç modu: 10mA, Tam güç modu: 32mA
Hassasiyet	Yakalama: -147dBm, Yön bulma: -160 dBm, İzleme: -163 dBm
Arayüzler	UART, I2C

## EK C

Tablo Ek C.1. E50S8-360-3-T-1 enkoder teknik özellikleri

Çap	50 mm
Şaft çapı	8 mm
İzin verilen devinim	Max. 5000 rpm
Birim ağırlık	275 g
Akım tüketimi	Max. 80 mA
Ortam nemi	35 ~% 85 RH, Depolama: 35 ~ 90% RH
Ortam sıcaklığı	-10 ~ 70 ° C , Saklama: -25 ~ 85 ° C
Mil pozisyon sapması	Radyal: Max. 0.1mm, Thrust: Max. 0.2mm
Dielektrik dayanım	750 VAC 50/60
İzolasyon direnci	Min. 100 MQ (500 VDC)
Rotor eylemsizlik	Max 80 g-cm <sup>2</sup>
Model	50 mm Şaft Tipi Artımlı Rotary Encoder
Çıkış faz farkı	A ve B faz arasındaki çıkışı: $T / 4 \pm T / 8$
Koruma	IP50 (IEC standardı)
Tepki süresi	Max 1ms.
Güç kaynağı	5 VDC

## EK D

Tablo Ek D.1. SCA100T inklinometre sensörünün teknik özellikleri

Boyut	11,31x5,08x15,58mm
Eksen	X, Y
Ölçüm aralığı	$\pm 90^\circ$
Hassasiyet	2V/g
Bant genişliği	8-28Hz
Anma gerilimi	4,75~5,25V
Çıkış tipi	Gerilim
Haberleşme standardı	SPI
İşlem sıcaklığı	-40°C~125°C

## ÖZGEÇMİŞ

Ceyda Aksoy Tırmıkçı, 02.11.1988'de Denizli'de doğdu. İlköğretim ve lise eğitimini İzmir'de tamamladı. 2006 yılında Çeşme Anadolu Lisesinden mezun oldu. 2006 yılında girdiği Ege Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünü 2011 yılında tamamladı. Aynı yıl Sakarya Üniversitesi, Elektrik -Elektronik Mühendisliği Bölümünde yüksek lisans eğitimine başladı. 2013 yılında yüksek lisans eğitimini tamamladı ve aynı yıl doktora eğitimine başladı. 2012 yılından bu yana Sakarya Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.