

HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FOTOVOLTAİK DESTEKLİ SU POMPASI
SİSTEMLERİNİN ANALİZ ve OPTİMİZASYONU**

131137

Z. Abidin FIRATOĞLU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

2003
ŞANLIURFA

131137

Y.C. YÜKSEK LİSANS TEZİ KURULU

HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FOTOVOLTAİK DESTEKLİ SU POMPASI
SİSTEMLERİNİN ANALİZ ve OPTİMİZASYONU**

Z. Abidin FIRATOĞLU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



Prof. Dr. Abuzer YÜCEL
Fen Bil. Enst. Müdürü

**Bu tez 24/01/2003 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından
değerlendirilerek oy birliği/oy çokluğu ile kabul edilmiştir.**

Prof. Dr. Ö. Erkin PEREMECİ
Makine Müh. A. B. D. Başkanı
(Harran Üni. Müh. Fak.)

Doç. Dr. Orhan BÜYÜKALACA
(Termodinamik A. B. D.)
Çukurova Üni Müh. Fak.

Yrd. Doç. Dr. Bülent YEŞİLATA (Danışman)
Termodinamik. A. B. D.
(Harran Üni. Müh. Fak.)

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

İÇİNDEKİLER

Özet.....	I
Abstract.....	II
Simgeler	III
Kısaltmalar.....	V
Şekiller	VI
Tablolar	VIII
1. Giriş.....	1
1.1. Çalışmanın Önemi ve Amacı.....	1
1.2. Önceki Çalışmalar	5
2. Fotovoltaik Su Pompası Sistemi Bileşenlerinin Teorik Analizi.....	7
2.1. Fotovoltaik Paneller	7
2.1.1. PV hücreler ve çalışma prensipleri	7
2.1.2. PV panellerin matematiksel modelleri	9
2.2. Motor	12
2.2.1. DC motorlar.....	12
2.2.2. Kendinden uyarılı fırçasız DC motor ve matematiksel modeli	14
2.3. Pompa	17
2.3.1. Santrifüj pompanın yük karakteristikleri.....	19
2.3.2. Pompa yük eğrisinin tespiti	20
3. PV Paneller İçin Meteorolojik Data Analizi ve Panel Eğim Açısı Optimizasyonu	23
3.1. Bulanıklık İndisinin ve Direkt-Yayılı Işınım Şiddetlerinin Yıl Boyunca Değişimi.....	25
3.1.1. Yatay yüzeye gelen ışınlm şiddeti.....	25
3.1.2. Atmosfer dışı yatay yüzeye gelen ışınlm şiddeti	26
3.1.3. Bulanıklık indisinin hesaplanması	27
3.1.4. Saatlik ortalama direkt ve yayılı ışınlm şiddeti	29
3.2. Anlık Işınım Şiddeti İçin Matematiksel Model Seçimi	33
3.2.1. Kullanılan matematiksel modeller.....	34

3.2.2. Modellerden elde edilen sonuçlar	35
3.3. PV Panel İçin Optimum Eğim Açılarının Saptanması	42
3.3.1. Güneye dönük eğimli yüzeyler üzerine gelen güneş ışınlam denklemleri	43
3.3.2. Güneye dönük 37° sabit eğimle yerleştirilmiş yüzeye gelen toplam ışınlam.....	44
3.3.3. Güneye dönük optimum aylık ortalama eğimle yerleştirilmiş yüzeylere gelen toplam ışınlam.....	44
3.3.4. Güneye dönük optimum saatlik ortalama eğimle yerleştirilmiş yüzeye gelen toplam ışınlam.....	45
3.3.5. Optimum PV panel eğim açısının seçimi.....	48
3.4. Çevre Sıcaklığı İçin Model Seçimi.....	49
3.4.1. Meteorolojik çevre sıcaklığı değerlerinin analizi.....	50
3.4.2. Çevre sıcaklığı matematiksel modeli.....	50
4. PV Sistem Optimum Tasarımı ve Optimizasyonu.....	55
4.1. Panel Konfigürasyonunun Seçimi	56
4.1.1. Optimum ışınlam aralığının tespiti.....	56
4.1.2 Optimum panel konfigürasyonunun seçimi.....	58
4.2. PV Panel Sisteminin Ürettiği Güç ve Pompa Su Debisi.....	65
4.3. Sistem Çıktısı Bazında Meteorolojik Ölçüm Verileri İle Seçilen Modellerin Uyumu	68
5. Değerlendirme ve Sonuçlar	70
5.1. Meteorolojik Veri Tabanlarının Oluşturulması	70
5.2. Optimum Panel Eğim Açılarının Tespiti	72
5.3. Meteorolojik Verilerin Hesabı için Matematiksel Model Seçimi	72
5.4. Optimum Panel Sayısı-Konfigürasyonunun Seçimi.....	73
6. Kaynaklar	76
7. Ekler.....	81
Ek 1. Optimizasyon İçin Seçilen Sistem Bileşenlerin Teknik Özellikleri.....	81
Ek 2. Kıyaslama Amacıyla Kullanılan PV Panellerin Teknik Özellikleri	82
Özgeçmiş.....	84

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FOTOVOLTAİK DESTEKLİ SU POMPASI SİSTEMLERİNİN ANALİZ ve OPTİMİZASYONU

Z.Abidin FIRATOĞLU

Harran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

2003

Fotovoltaik (PV) destekli su pompası sistemlerinin en yaygın kullanım şekli; PV panellerden elde edilen gücün direkt olarak pompa motoruna aktarıldığı “direkt akupleli” sistemlerdir. Bu tür sistemlerde ilk yatırım maliyetindeki en önemli payı PV paneller oluşturduğundan, gerekli su debisini minimum sayıda panel ile temin etmek optimizasyonun temel hedefidir. Bu hedefe ulaşmak ise, ancak dizaynın yapılacağı bölge için söz konusu ışıınım şiddeti aralığı, panel eğim açısı ve panellerin elektriksel bağlantı (seri, paralel) konfigürasyonlarının doğru optimizasyonu ile mümkündür. Bu çalışmada direkt akupleli PV destekli bir su pompası sistemi için yukarıda sözü edilen parametreleri içeren çok aşamalı bir optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Takip edilen aşamalar şu şekildedir:

- i. Sistemin uygulanacağı yöre olarak seçilen ve gerek ışıınım şiddeti ve gerekse güneşlenme süresi açısından Türkiye'nin en şanslı bölgelerinden olan Şanlıurfa ili için Devlet Meteoroloji İşleri Müdürlüğü'nden temin edilen 16 yıllık (1985-2001) ölçümler ile ışıınım şiddeti ve çevre sıcaklığı için çok kapsamlı elektronik veri tabanı oluşturulması,
- ii. Oluşturulan meteorolojik veri tabanları yardımıyla; dizayn için en uygun ışıınım aralığı, panel eğim açısı ve matematiksel model seçiminin yılın tüm ayları ve günün tüm güneşli saatleri göz önünde bulundurularak yapılması,
- iii. PV panel sayısı ve bağlantı konfigürasyonun sistemin maksimum güç üretebileceği noktalar baz alınarak literatürde kullanılan grafiksel ve nümerik metotlara nazaran daha az bilgisayar zamanı ve işlem yüküne sahip istatistiksel bir metot yardımıyla optimizasyonu,
- iv. Meteorolojik veri için seçilen matematiksel modeller ile yapılan optimizasyonda, ölçüm sonuçlarını kullanma durumuna kıyasla oluşabilecek mutlak hataların belirlenmesi.

Optimizasyon sonrasında hesaplanan PV panel sistemi güç çıktısı, pompa su debisi ve sistem verimi değerlerinin günün ve yılın büyük bir bölümü için sabit ve arzu edilen seviyeye yakın olması, optimizasyonun başarısı adına en olumlu göstergelerden biri olarak kabul edilebilir. Çalışmanın diğer bir önemli özelliği ise, yeryüzündeki herhangi bir bölgede burada sunulan adım ve yöntemler kullanılarak kolayca genelleştirilebilir.

ABSTRACT

Master Thesis

ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF PHOTOVOLTAIC WATER-PUMPING SYSTEMS

Z. Abidin FIRATOĞLU

**Harran University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering**

2003

The most common type of photovoltaic (PV) pumping systems is directly-coupled system, in which power produced from PV panel is directly transferred to pump-motor. In this type of system, cost of PV array covers significant part of investment; therefore, the main concern is to provide desired pump-flow-rate by minimum numbers of panels. Accurate selections and optimizations of local radiation intensity interval, panel-tilt-angle, and configuration of PV array electrical connection (seri, parallel) are necessary to achieve this goal. In this study, a multi-step optimization, which considers the parameters mentioned above, is performed for a directly-coupled system PV pumping system. The steps followed are summarized below:

- i) Formation of detailed meteorological database in electronic format for Sanliurfa, which is selected as application region because of having rich solar energy potential, by long-term (16 years, between 1985-2001) meteorological measurement provided by National Meteorology Center,
- ii) Determination of optimum solar radiation intensity interval, optimum panel-tilt-angle, and the best mathematical model for all months in a year and all sunny hours in a day by using electronic database constructed previously,
- iii) Optimizations of numbers of PV panels and PV array configuration by using a highly accurate statistical method, which provides less computer time and thus less computational cost,
- iv) Evaluation of absolute errors that would result from using the mathematical models for meteorological data instead of using measured ones.

Following to the optimization, calculated values of PV panel power-output, pump water flow-rate, and system efficiency have stayed at almost constant and desired level for most part of the day and year. These results can be considered as a success for the optimization. The method outlined here has also another importance in a way that it can easily be applied to any region in the earth by following similar mathematical procedure given here.

SİMGELER

h'_s	: Eğimli yüzeyin güneş batış açısı
$\mu_{V_{oc}}$	: Açık devre gerilimi sıcaklık katsayısı
$\mu_{I_{sc}}$	: Kısa devre akımı sıcaklık katsayısı
δ	: Deklinasyon açısı
θ	: Manyetik akı
ω	: Motor şaftının açısal hızı
ρ	: Yoğunluk
ϕ	: Kullanabilirlik
β_1	: Pompa kanatçık giriş açısı
β_2	: Pompa kanatçık çıkış açısı
η_h	: Hidrolik verim
A	: Termal gerilim
a	: Tegethoff modelinin regresyon katsayısı
b_1	: Pompa kanatçık giriş yüksekliği
b_2	: Pompa kanatçık çıkış yüksekliği
B_i	: Bulanıklık indisi
E	: Elektro motor kuvvet
E	: Enlem
h	: Güneş saat açısı
h_s	: Güneş batış açısı
I_0	: Karanlık devre akımı
I_a	: Motor armatür akımı
I_D	: Atmosfer dış yatay yüzeyine gelen ışıınım
I_d	: Atmosfer dışına gelen ışıınım
I_{gs}	: Güneş sabiti
I_{mo}	: Matematiksel model verisi
I_{mpp}	: Maksimum çalışma noktasında PV panelin akım çıktısı
I_{ol}	: Meteorolojik ölçüm verisi
I_{sc}	: Kısa devre akımı
I_T	: Yatay yüzeye gelen ışıınım
I_{Td}	: Direkt ışıınım
I_{Te}	: Eğimli yüzey üzerine gelen ışıınım

I_{Ty}	: Yayılı ısıtım
J	: Rotor ve mekaniksel yük ataleti
k_e	: Hız sabiti
k_t	: Tork sabiti
m	: Veri sayısı
MH	: Mutlak hata
M_s	: Pompa torku
n	: Gün
OS	: Ortalama Sapma
Q	: Debi
R_1	: Pompa çarkının giriş çapı
R_2	: Pompa çarkının çıkış çapı
R_a	: Motor armatür direnci
R_d	: Direk ısıtım açısı faktörü
R_s	: Seri direnç
R_{sh}	: Paralel direnç
R_y	: Yayılı ısıtım faktörü
SH	: Standart Hata
T	: Sıcaklık
T_ω	: Rotor torku
$T_{\omega'}$	: Rotorun ivmesinden dolayı meydana gelen tork
t_0	: Gün uzunluğu
T_e	: Elektromanyetik tork
T_L	: Mekanik yük torku
T_{max}	: Maksimum sıcaklık
t_{max}	: Maksimum sıcaklık anı
t_{min}	: Minimum sıcaklık anı
T_{min}	: Minimum sıcaklık
V_m	: Motorun çalışma gerilimi
V_{mpp}	: Maksimum çalışma noktasında PV panelin gerilim çıktısı
V_{oc}	: Açık devre gerilimi
z	: Pompa kanatçık sayısı

KISALTMALAR

<i>DMİ</i>	: Devlet Meteoroloji İşleri
<i>MPP</i>	: Maksimum çalışma noktaları
<i>MPPT</i>	: Maksimum güç noktası izleyicili sistem
<i>PV</i>	: Fotovoltaik
<i>PVDSP</i>	: Fotovoltaik destekli su pompası
<i>SÇE</i>	: Sistem çalışma eğrisi
<i>STK</i>	: Standart test koşulları



ŞEKİLLER

Şekil 2.1. p ve n-tipi yarıiletkenlerin bitişmesi (junction).	8
Şekil 2.2. Fotovoltaik hücrenin genel yapısı.	9
Şekil 2.3. Fotovoltaik hücrenin eşdeğer elektrik devresi.	9
Şekil 2.4. AP 50 PV panelin I-V-η karakteristikleri.	12
Şekil 2.5. AP 50 PV panelin W-R karakteristikleri.	12
Şekil 2.6. DC motor tiplerin eşdeğer elektrik devresi.	14
Şekil 2.7. Kendinden uyarılı fırçasız DC motorun şematik şekli.	17
Şekil 2.8. Su pompalarında statik ve dinamik yüklerin debiye bağılı değişimi.	18
Şekil 2.9. Santrifüj pompanın şematik şekli.	18
Şekil 2.10. Santrifüj pompadaki yük dağılımı.	21
Şekil 2.11. Santrifüj pompanın yük karakteristikleri (yük-debi).	22
Şekil 3.1. Şanlıurfa için DMİ'den elde edilen ışı nım şiddeti verileri ile hesaplanan yıllık ortalamalarının yıl ve gün boyunca dağılımı.	26
Şekil 3.2. Şanlıurfa için bulanıklık indisinin ortalama yıl ve gün boyunca dağılımı.	27
Şekil 3.3. Şanlıurfa için bulanıklık indisinin ortalama yıl boyunca değişimi.	28
Şekil 3.4. Şanlıurfa için bulanıklık indisinin ortalama gün boyunca değişimi.	28
Şekil 3.5. Şanlıurfa için saatlik ortalama meteorolojik ölçüm ve modeller sonucunda elde edilen ışı nım (I_T) verilerinin tüm aylar için gün boyunca değişimi.	37
Şekil 3. 6. Şanlıurfa için meteorolojik ölçüm verilerine göre modeller sonucunda oluşan mutlak hatanın (MH) ortalama tüm aylar için saatlik değişimi.	38
Şekil 3.7. Şanlıurfa için meteorolojik ölçüm verilerine göre modeller sonucunda oluşan mutlak hatanın (MH) ortalama gün boyunca dağılımı.	40
Şekil 3.8. Şanlıurfa için meteorolojik ölçüm verilerine göre modeller sonucunda oluşan standart hatanın (SH) aylık değişimi.	41
Şekil 3.9. Meteorolojik ölçüm verilerine göre modeller sonucunda oluşan ortalama sapmanın (OS) aylık dağılımı.	41
Şekil 3.10. Güneye dönük saatlik ($e_{opt(s)}$) ortalama, aylık ($a_{opt(g)}$) ortalama optimum ve 37 (e_{37}) eğim açılı yüzeyler üzerine gelen toplam günlük ışı nım miktarının ($MJ/m^2_{gün}$) aylara göre değişimi.	49
Şekil 3.11. Şanlıurfa ili için DMİ tarafından saatlik periyotlarda ölçülen, 1985-2001 yıllarına ait çevre sıcaklık verilerinin yıl boyunca değişimi.	52

Şekil 3.12. DMİ tarafından saatlik periyotlarda ölçülen, 1985-2001 yıllarına ait çevre sıcaklığı verilerinin, saatlik ortalama değerlerinin gün boyunca dağılımı.	52
Şekil 3.13. Tegethoff tarafından geliştirilen model sonucunda her ay için oluşan mutlak hatalar.	53
Şekil 4.1. Şanlıurfa için Güneye dönük optimum aylık ortalama eğimli 1*1 (p*s) konfigürasyonundaki AP50 PV panel kullanılabilirliğinin (ϕ) ışıınım seviyelerine göre dağılımı.	57
Şekil 4.2. Konfigürasyonların seçiminin grafiksel gösterimi.	60
Şekil 4.3. 10*5 (p*s) Panel konfigürasyonunun I-V karakteristik eğrileri, MPP; maksimum çalışma eğrisi, SCE; sistemin çalışma eğrisi.	64
Şekil 4. 4. 12*5 (p*s) Panel konfigürasyonunun I-V karakteristik eğrileri, MPP; maksimum çalışma eğrisi, SCE; sistemin çalışma eğrisi.	64
Şekil 4. 5. 12*4 (p*s) Panel konfigürasyonunun I-V karakteristik eğrileri, MPP; maksimum çalışma eğrisi, SCE; sistemin çalışma eğrisi.	65
Şekil 4.6. PV sistemin saatlik güç çıktısının aylara göre değişimi.	66
Şekil 4.7. PV sistemin saatlik veriminin aylara göre değişimi.	67
Şekil 4.8. Pompalanan su debisinin saat ve aylara göre değişimi.	68
Şekil 4.9. Liu-Jordon ve Tegethoff modelleri ile hesaplanan güç değerleri ile meteorolojik ölçüm verileri ile hesaplanan güç değerleri arasındaki farktan kaynaklanan mutlak hata değerleri.	69
Şekil 5.1. Şanlıurfa'nın ortalama aylık maksimum (T_{max}) ve minimum (T_{min}) sıcaklıkların yıl boyunca değerleri.	71
Şekil 5.2. Şanlıurfa'da yatay yüzeye aylık ortalama günlük gelen ışıınım şiddeti değerleri.	72
Şekil 5.3. ASE 50, BP SX120, Siemens SM 110 ve Siemens SM50-H PV panellerin Şanlıurfa ili için Mayıs ayında aylık ortalama günlük kullanılabilirliğinin ışıınım seviyelerine dağılımı.	74
Şekil 5.4. ASE 50, AP50, BP SX120, Siemens SM 110 ve Siemens SM50-H PV panellerin Mayıs ayının optimizasyon aralığında kullanılabilirliklerinin toplam seviyesi.	75
Şekil 5.5. Seçilen sistem veriminin hesaplamalarda kullanılan panelin maksimum çalışma noktalarındaki (MPP) verimine oranının saat ve aylara göre değişimi.	75

TABLOLAR

Tablo 3.1. 37 Enlemi için (Şanlıurfa) deklinasyon açısının (δ), gün uzunluğunun (t_0) ve referans günün (n) aylara göre değişimi.....	25
Tablo 3.2. Şanlıurfa ili için yatay yüzeye gelen saatlik ortalama ışıınım (I_T) değerlerinin aylara göre değişimi.....	30
Tablo 3.3. Şanlıurfa ili için atmosfer dış yatay yüzeyine gelen saatlik ortalama ışıınım (I_D) değerlerinin aylara göre değişimi.....	30
Tablo 3.4. Şanlıurfa ili için ortalama saatlik bulanıklık indisinin (B_i) aylara göre değişimi.....	31
Tablo 3.5. Şanlıurfa ili için atmosfer dış yatay yüzeyine ($\bar{I}_D$) ve yatay yüzeye ($\bar{I}_T$) gelen günlük toplam ışıınım miktarları ve bulanıklık indisinin ($\bar{B}_i$) aylara göre değişimi.....	31
Tablo 3.6. Şanlıurfa ili için aylık ortalama günlük toplam yayılı ($\bar{I}_{Ty}$) ve direkt ($\bar{I}_{Td}$) ışıınım miktarının aylara göre değişimi.....	31
Tablo 3.7. Şanlıurfa ili için aylık ortalama gün boyunca yatay yüzeye gelen saatlik direkt (I_{Td}) ışıınım değerlerinin aylara göre değişimi.....	32
Tablo 3.8. Şanlıurfa ili için yatay yüzeye gelen saatlik ortalama yayılı (I_{Ty}) ışıınım değerlerinin aylara göre değişimi.....	32
Tablo 3.9. Collares-Pereira-Rabl, Garg-Garg, Liu-Jordan ve Kılıç modellerinin meteorolojik ölçüm verilerine göre yıl boyunca oluşan standart hata değerleri.....	40
Tablo 3.10. Collares-Pereira-Rabl, Garg-Garg, Liu-Jordan ve Kılıç modellerinin meteorolojik ölçüm verilerine göre yıl boyunca oluşan ortalama sapma değerleri.....	42
Tablo 3.11. Güneye dönük 37° eğimli bir yüzey için saatlik ortalama direkt aç faktörlerinin (R_d) aylara göre değişimi.....	45
Tablo 3.12. Güneye dönük 37° eğimli bir yüzey üzerine gelen ışıınının (I_{Te}) aylara göre değişimi.....	46
Tablo 3.13. Güneye dönük bir yüzey için aylık ortalama günlük optimum eğim açıları (e) ve bu koşullarda, direkt ($\bar{R}_d$)-yayılı ($\bar{R}_y$) aç faktörleri.....	46
Tablo 3.14. Güneye dönük aylık optimum eğim açılı bir yüzey için saatlik ortalama direkt aç faktörlerinin (R_d) aylara göre değişimi.....	46
Tablo 3.15. Güneye dönük aylık optimum eğimli bir yüzey üzerine gelen saatlik ortalama ışıınım (I_{Te}) değerlerinin aylara göre değişimi.....	47
Tablo 3.16. Güneye dönük bir yüzey için saatlik ortalama optimum eğim açılarının (e) aylara göre değişimi.....	47

Tablo 3.17. Güneye dönük saatlik ortalama optimum eğim açılarındaki yüzey için direkt aç faktörlerinin (R_d) aylara göre değişimi.	48
Tablo 3.18. Güneye dönük saatlik ortalama optimum eğim açılı bir yüzey üzerine gelen saatlik ortalama ışıınım (I_{Te}) değerlerinin aylara göre değişimi.	48
Tablo 3.19. Şanlıurfa ili için saatlik ortalama çevre sıcaklığı (T_c) değerlerinin aylara göre değişimi.	53
Tablo 3.20. Her ay için ortalama günlük maksimum sıcaklık (T_{max}), minimum sıcaklık (T_{min}) ve bu sıcaklıklara ulaşılan anlar (t_{max} , t_{min}) (Şanlıurfa).	54
Tablo 4.1. Şanlıurfa için güneye dönük optimum aylık ortalama eğimli 1*1 (p*s) konfigürasyonundaki AP50 PV panelin kullanılabilirliğinin (ϕ) yılın her ay için ışıınım seviyelerine göre dağılımı.	57
Tablo 4.2. 1*1 (p*s) konfigürasyonundaki AP50 PV panelin kullanılabilirlik (ϕ) bazında optimum ışıınım aralığının aylara göre değişimi.	58
Tablo 4.3. Seçilen 48, 50, 54, 60, 64 adet panelin olası konfigürasyonları.	59
Tablo 4.4. 300-500 W/m ² ışıınım aralığında, 48, 50, 54, 60 ve 64 adet panelin olası konfigürasyonları için maksimum çalışma eğrisi ile sisteminin çalışma eğrisinin örtüşmemesinden oluşan standart hatalar.	60
Tablo 4.5. 500-900 W/m ² ışıınım aralığında, 48, 50, 54, 60 ve 64 adet panelin olası konfigürasyonları için maksimum çalışma eğrisi ile sisteminin çalışma eğrisinin örtüşmemesinden oluşan standart hatalar.	61
Tablo 4.6. 400-700 W/m ² ışıınım aralığında, 48, 50, 54, 60 ve 64 adet panelin olası konfigürasyonları için maksimum çalışma eğrisi ile sisteminin çalışma eğrisinin örtüşmemesinden oluşan standart hatalar.	61
Tablo 4.7. 500-800 W/m ² ışıınım aralığında, 48, 50, 54, 60 ve 64 adet panelin olası konfigürasyonları için maksimum çalışma eğrisi ile sisteminin çalışma eğrisinin örtüşmemesinden oluşan standart hatalar.	62
Tablo 4.8. 500-700 W/m ² ışıınım aralığında, 48, 50, 54, 60 ve 64 adet panelin olası konfigürasyonları için maksimum çalışma eğrisi ile sisteminin çalışma eğrisinin örtüşmemesinden oluşan standart hatalar.	62
Tablo 4.9. 600-800 W/m ² ışıınım aralığında, 48, 50, 54, 60 ve 64 adet panelin olası konfigürasyonları için maksimum çalışma eğrisi ile sisteminin çalışma eğrisinin örtüşmemesinden oluşan standart hatalar.	63
Tablo 4.10. 400-600 W/m ² ışıınım aralığında, 48, 50, 54, 60 ve 64 adet panelin olası konfigürasyonları için maksimum çalışma eğrisi ile sisteminin çalışma eğrisinin örtüşmemesinden oluşan standart hatalar.	63
Tablo 4.11. Seçilen sistem için yıl boyunca saptanan optimum panel konfigürasyonları.	65

Tablo 4.12. PV sistemin saatlik güç çıktı değerlerinin aylara göre değişimi.	66
Tablo 4.13. Pompalanan suyun her ay için günün saatlerine bağlı debi değerleri.	67
Tablo 4.14. Liu-Jordon ve Tegethoff modelleri çerçevesinde yıl boyunca sistem tarafından üretilen güç değerleri.....	69



1. GİRİŞ

1.1. ÇALIŞMANIN ÖNEMİ ve AMACI

Günümüzün vazgeçilmez tüketim araçlarından biri de enerjidir. Ülkelerin gelişmişlik düzeylerinin en önde gelen ölçütlerinin başında, enerji kabul edilmiş ve halen bu ölçü kabul görmektedir. Bugün dünyanın ticari enerji talebi, fosil yakıtlardan, nükleer ve hidrolik enerji kaynaklarından karşılanmaktadır. Enerji ihtiyacının karşılanmasında, fosil yakıtlar nükleer ve hidrolik enerjilere nazaran çok daha büyük oranlarda kullanılmaktadır. Fosil yakıtların büyük oranlarda kullanılmasında iki sorun söz konusudur. Birincisi bu yakıtların yakın bir gelecekte tükenme olasılığı, diğeri ise sanayileşmenin belli yörelerde yoğunlaşması sonucu, büyük oranlarda fosil yakıtların kullanılmasından kaynaklanan çevre kirliliğinin artmasıdır. Bu olumsuzlukların yanı sıra enerji tüketimi durmadan artmakta ve gelecekte de daha büyük bir ivmeyle artacağı görülmektedir. Enerjinin böylesine bir trend izlemesi, alternatif enerji kaynaklarına yönelişi kaçınılmaz kılmaktadır. Alternatif enerji kaynakları halen dünya çapında ticari bir öneme sahip olmamasına karşın, bazı ülkelerde ciddi seviyede kullanım alanı bulmaktadır.

Başlıca alternatif enerji kaynağı, fosil ve hidrolik enerjinin de asıl kaynağı olan ve dünyayı ısıtan güneş enerjisidir. Son yıllarda, enerji dönüşüm teknolojilerinde sağlanan gelişmelere bağlı olarak, güneş enerjisi çok geniş bir uygulama alanı kazanmıştır. Yeryüzüne gelen güneş ışığından ısı ve elektrik üreten güneş enerjisi teknolojileri; tasarım, uygulama alanı ve teknoloji düzeyi bakımından büyük çeşitlilik göstermekle birlikte, güneş enerjisi uygulamaları esas olarak termal sistemler ve fotovoltaik (PV) sistemler olarak ikiye ayrılır.

Güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik sistemler, herhangi bir tüketim maddesine ihtiyaç duymamaları, diğer sistemlerle kolayca birleşebilme yeteneğine sahip olmaları ve tasarım açısından geniş alternatif sunmaları gibi avantajları nedeniyle son yıllarda ön plana çıkan güneş enerjisi uygulamaları arasına girmiştir. Işıktan elektrik enerjisi elde etmek yani fotovoltaik olay, Becquerel tarafından 1839 da, bir elektrolit içine batırılan elektrotlardan biri üzerine ışık düşürüldüğünde bunlar arasında bir potansiyel farkın meydana geldiğini gözlemesinden beridir bilinmesine karşın, ilk modern fotovoltaik hücrenin yapımı

ancak 1954'de Amerika Birleşik Devletleri'nin Bell Laboratuvarı'nda %6 verimle gerçekleştirilmiştir. Uzay araçları için gerekli olan enerjiyi temin etmek amacıyla geliştirilen bu sistemler maliyetlerinin çok yüksek olması nedeniyle, 1970 yıllarına kadar bu sahada sınırlı kalmışlardır [1]. Ancak bu yıllarda ortaya çıkan enerji krizi sebebiyle, güneş enerjisinden yararlanmak suretiyle global enerji ihtiyacına yönelik olarak da kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle son çeyrek asırda verim ve maliyetlerinde görülen ciddi seviyedeki iyileşmeler, fotovoltaik panellerle elektrik üretimini, güneş enerjisi uygulamaları içerisinde önemli bir noktaya getirmiş ve toplam enerji üretimindeki payının hızla genişlemesine sebep olmuştur [2,3]. Bu artışın gelecek yıllarda daha hızlı bir seyir izleyeceği, 1995 yılında dünyada 375.2 MW olan PV sistem gücünün, 2010 yılında 6300 MW olarak planlanmasından açıkça görülmektedir [4,5]. İlk yatırım maliyeti açısından birincil enerji kaynaklarıyla rekabet edebilecek düzeye gelmemesine rağmen, fotovoltaik enerjinin 1974 yılında 200 \$/Watt olan birim fiyatının 2000'li yıllarda 2 \$/Watt seviyelerine inmesi, fotovoltaik enerjiye yönelişin devam edeceğini gösteren önemli bir parametredir [6].

Fotovoltaik sistemlerin en çok kullanılan uygulamaları arasında su pompası sistemleri bulunmaktadır. Bunun nedeni elektrik şebekesinden uzak yerleşim alanlarının yer üstü ve yer altı su teminde, diğer enerji kaynaklarına nazaran fotovoltaik destekli su pompalarının (PVDSP) daha ekonomik ve güvenilir olabilmesidir. Bir diğer önemli faktör ise su ihtiyacı ile güneş ışınım şiddeti arasında doğal bir ilişkinin bulunmasıdır. Sistem sınırları içerisinde; güneş enerjisinin hidrolik enerjiye dönüşüm proseslerinin yaşandığı, fotovoltaik destekli su pompalarının en basit kombinasyonu; pompa sürücüsü olan motorun panellere hiçbir ara düzenleyici olmadan direkt bağlandığı direkt akupleli sistemlerdir. Direkt akupleli sistemlere ek olarak, PV panel ve motor arasına bataryanın yerleştirildiği bataryalı ve panellerin akım-gerilim (I-V) çıktılarını maksimum elektriksel güç teminine uygun olarak düzenleyen bir elektronik kontrol cihazının bulunduğu maksimum güç noktası izleyicili (MPPT) gibi kombinasyonları bulunmaktadır [7]. Bir fotovoltaik destekli su pompası kullanılan kombinasyona göre, aşağıdaki elemanların birkaçını veya hepsini içerir:

- PV paneller: Güneş ışınlamını direkt elektrik enerjisine dönüştüren doğru akım (DC) güç kaynakları olup, pompanın tahriki için gerekli enerjiyi üretirler.
- Motor-Pompa İkili: panel tarafından üretilen elektriksel gücü önce mekaniksel sonra hidrolik güce dönüştüren elemanlardır.
- Batarya: Gece veya güneşin olmadığı anlarda, sistemin çalışmasını temin etmek amacıyla elektrik enerjisinin depolandığı cihazlardır.
- Su deposu: Amaç olarak batarya ile benzer bir görevi görmekle birlikte, bir nevi hidrolik enerjinin depolandığı bir elemandır.
- Maksimum güç noktası izleyicisi (MPPT): Sistemin maksimum noktada çalışmasını sağlayan bir DC-DC dönüştürücüsüdür.
- Kontrol elemanları: Şarj regülatörü, DC-AC dönüştürücüsü gibi elektrik devre elemanları.

Fotovoltaik destekli su pompalarında sistem çıktısı;

- panel alanı,
- panel konfigürasyonu,
- panelin yatay yüzeye yerleştirme açıları,
- panel yüzeyine gelen ışınlam şiddeti,
- panelin karakteristikleri,
- çevre sıcaklığı,
- motor-pompa ikilisinin karakteristikleri,

olmak üzere yedi parametrenin fonksiyonudur. İlk yatırım maliyeti açısından, panellerin sistem içerisindeki payının yaklaşık olarak yüzde altmış [8] olduğu düşünülürse, panel alanının dolayısıyla sayısının ve konfigürasyonları ile bunların yatay yüzeye yerleştirme açılarının optimum seçilmesi, sistem tasarımı açısından kritik bir öneme sahip olacaktır.

Panel sayısı ve konfigürasyonunun seçimi ile ilgili nümerik ve grafiksel bir çok metot bulunmaktadır. Bu metotlar ana hatlarıyla; mevcut olası panel konfigürasyonları içerisinde, motor-pompa ikilisinin yük eğrisine en yakın maksimum çalışma noktalarından (MPP) geçen eğriye sahip konfigürasyonunun seçimi şeklindedir. Geliştirilen metotlardaki temel sorun; sistemi oluşturan bileşenlerin matematiksel modellerinin gayri lineer özellik göstermeleri nedeniyle, tüm sistem için tek bir modelin tanımlanamamasıdır. Sistem tümüyle bir model

çerçevesinde tanımlanamadığından, çok büyük bir matematiksel işlem yükü meydana gelmekte ve optimizasyonların uygulanmasında çok sayıda parametre girdisi olan bilgisayar programlarına gereksinim duyulmaktadır. Ayrıca herhangi bir panel konfigürasyonunun maksimum çalışma eğrisi; düşük ısıtım seviyelerinde gayri lineer yüksek ısıtım seviyelerinde sanki lineer olmak üzere iki farklı karakteristik özellik göstermesi nedeniyle, geliştirilen metotlar yalnızca sistem bazında gerçekleşmekte ve tasarımın yapılacağı bölge açısından yetersiz kalmaktadır.

Bu çalışmada, fotovoltaiik destekli su pompalarında optimum panel sayısı ve konfigürasyonunun seçiminde, bölgesel parametreleri göz önünde bulunduran istatistiksel bir metot örnek bir uygulama çerçevesinde geliştirilmiş ve seçilen uygulama ile ilgili gerekli optimizasyon ve analizler yapılmıştır. Uygulama için fotovoltaiik sistemlerin direkt akupleli kombinasyonları seçilmiştir. Çalışma bu çerçevede dört aşamada ele alınmıştır:

- i. Sistemin uygulanacağı yöre olarak seçilen ve gerek ısıtım şiddeti ve gerekse güneşlenme süresi açısından Türkiye'nin en şanslı bölgelerinden olan Şanlıurfa ili için Devlet Meteoroloji İşleri Müdürlüğü'nden temin edilen 16 yıllık (1985-2001) ölçümler ile ısıtım şiddeti ve çevre sıcaklığı için çok kapsamlı elektronik veri tabanı oluşturulması,
- ii. Oluşturulan meteorolojik veri tabanları yardımıyla; dizayn için en uygun ısıtım aralığı, panel eğim açısı ve matematiksel model seçiminin yılın tüm ayları ve günün tüm güneşli saatleri göz önünde bulundurularak yapılması,
- iii. PV panel sayısı ve bağlantı konfigürasyonunun sistemin maksimum güç üretebileceği noktalar baz alınarak literatürde kullanılan grafiksel ve nümerik metotlara nazaran daha az bilgisayar zamanı ve işlem yüküne sahip istatistiksel bir metot yardımıyla optimizasyonu,
- iv. Meteorolojik veri için seçilen matematiksel modeller ile yapılan optimizasyonlar için ölçüm sonuçlarını kullanma durumuna kıyasla oluşabilecek mutlak hataların belirlenmesi.

Isıtım şiddeti ve çevre sıcaklığı veri tabanları Devlet Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden (DMİ) elde edilen 1985-2001 arası yıllara ait ölçüm verilerinden yararlanılarak oluşturulmuştur. Ham data şeklinde elde edilen veriler geliştirilen bilgisayar programları yardımıyla yeniden düzenlenmiştir. Tüm işlem, optimizasyon,

simülasyon ve analizler geliştirilen bilgisayar programlarıyla yapılmış olup bu çalışma için 50 civarında bilgisayar programı geliştirilmiş ve 400 üzerinde data dosyası oluşturulmuştur.

Güneye dönük bir yüzey için optimum aylık ve saatlik ortalama panel eğim açıları saptanmıştır. Saptanan optimum eğim açıları ve yıl boyunca 37^0 sabit eğim açısında olmak üzere üç farklı eğim açısı için, panel yüzeyine gelen ışınlam şiddetleri de hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda panel yüzeyine gelen günlük toplam ışınlam miktarı açısından en uygun yerleştirme şeklinin optimum saatlik eğim açısı olduğu görülse de, aradaki farkın az olması ve kolay uygulanabilirliği nedeniyle, PV panellerin yatay yüzeye, optimum aylık ortalama eğim açıları ile yerleştirilmeleri daha uygun olacaktır. Ayrıca Şanlıurfa için ışınlam şiddeti ve çevre sıcaklığı modeli seçimi de yapılmış ve çalışmanın sonunda seçilen modellerin seçilen sistem bazında meteorolojik ölçüm verilerine gösterdiği uyum araştırılmıştır.

Seçilen sisteme ait optimum panel konfigürasyonu her ay için saptanmış ve bu koşullarda sistemin elektriksel ve hidrolik güç çıktıları hesaplanmıştır. Optimizasyonlarda panellerin maksimum çalışma eğrilerini tümüyle göz önünde bulundurma yerine, yerel parametreleri dikkate alarak eğrinin belli bir bölümü incelemenin, panel konfigürasyonunun seçiminde, maksimum kullanılabilirlik açısından daha basit ve uygulanabilir olacağı görülmüştür. Optimizasyonlarda nümerik ve grafiksel metot yerine, istatistiksel metot kullanmak, optimizasyonun matematiksel işlem yükünü azaltmakta ve daha basit algoritmaya sahip programlarla, sistem tasarımı gerçekleştirilebilmektedir.

1.2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Fotovoltaik destekli su pompalarının (PVDSP) direkt akupleli kombinasyonlarında; gün boyunca ışınlam şiddetinin gösterdiği sinüzoidal değişime bağlı olarak değişen değerlerde çıkan gerilim ve akım, motora direkt olarak verildiğinden, sistemin çalışması ancak ihtiyaç duyduğu gücü (sistem yükü) sağlayan gerilim ve akım değerlerinin temini ile mümkün olur [9]. Bataryalı sistemlerde; panel ile motor arasındaki batarya, sistemin güneş ışınlam şiddetindeki değişimleri direkt olarak sisteme yansıtmadan sabite yakın bir gerilimde sistemi çalıştırır [10]. Sabit

gerilimin en büyük getirisi ise panel sayısı ve konfigürasyonunda yapılacak bir optimizasyonla, sistemin optimum çalışma noktalarına yakın noktalarda, çalışabilmesidir [7]. Söz konusu bu iki kombinasyona alternatif olarak ortaya çıkan maksimum güç izleyicili (MPPT) sistemlerin, PV panelin her zaman maksimum güce karşılık gelen noktalarda çalışmasını temin etmesinden dolayı performansları daha yüksektir [11,12,13]. Gerek bataryalı ve gerekse MPPT'li kombinasyonların en yaygın dezavantajları ise sistemin ilk yatırım maliyetindeki artıştır.

PVDSP sistemlerin direkt akupleli kombinasyonları çalışma verimi açısından, MPPT ve bataryalı kombinasyonlara nazaran düşük bir verime sahip olmalarına rağmen daha ekonomik ve güvenilir olduklarından yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Bu yaygın kullanımdan dolayı son yıllarda çalışmalar bu kombinasyonlar üzerine yoğunlaşmıştır. DC motor-santrifüjlü pompa ve DC motor-volümetrik pompa ikililerinin üzerinde yapılan ilk çalışmalarda, panel karakteristiklerine en uygun yük eğrilerine, DC motor-santrifüjlü pompa ikilisinin sahip olduğu görülmüştür [14,15]. Daha sonra farklı motor-pompa ikilileri için yapılan araştırmalar bu sonucu değiştirmemiştir [16,17,18]. İlk etapta konvansiyonel DC (seri, şönt, kompunt) motorlar üzerine yoğunlaşan çalışmalar, teknolojiye sağlanan gelişmeler sonucu geliştirilen kendinden uyarılı DC motorlar, üzerine yoğunlaşmış ve yapılan çalışmalar kendinden uyarılı DC motorun konvansiyonel DC motorlara nazaran daha uygun karakteristiklere sahip olduğu görülmüştür [19,20]. Ayrıca sistem tek bir matematiksel model çerçevesinde tanımlanmasına yönelik çalışmalar olmuşsa da [21,22,23], bunlar yalnızca çalışmanın yapıldığı sınırlar içerisinde kalmış ve genelleşememişlerdir.

Son yıllar da ise çalışmalar daha çok sistem tasarımı üzerine yoğunlaşmıştır. Bu çalışmalardaki temel amaç panel alanını olabildiğince azaltmak yani panellerden optimum şekilde yararlanılabilecek tasarım koşullarının saptanmasıdır. Bu amaca yönelik olarak panel sayısı ve konfigürasyonlarının optimum seçimi ile ilgili bir çok çalışma bulunmakta olup [24,25,26], bunların genel yapısı grafiksel veya nümeriksel yöntemlerle çözüme gitmeleridir.

2. FOTOVOLTAİK SU POMPASI SİSTEMİ BİLEŞENLERİNİN TEORİK ANALİZİ

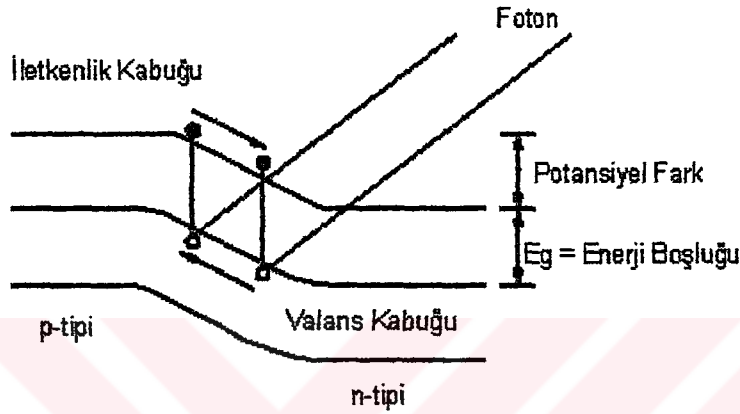
2.1. FOTOVOLTAİK PANELLER

2.1.1. PV Hücreler ve Çalışma Prensipleri

PV paneller ışık enerjisini direkt elektrik enerjisine çeviren, lineer olmayan güç kaynaklarıdır. Işık enerjisinin elektrik enerjisine dönüşmesi, yani fotovoltaiik olay tamamen panellerin temel yapı malzemesi olan yarı iletkenlerin kendilerine has özelliklerinin bir sonucudur. Bu özellik yarı iletkenlerde atomun son kabuğu (valans) ile iletkenlik kabuğu arasındaki enerji boşluğunun yalıtkanlara göre küçük, iletkenlere göre ise büyük olmasıdır. Yarı iletkenlerde valans kabuğu ile iletkenlik kabuğu arasındaki enerji boşluğunun böylesine bir özellik göstermesi nedeniyle; yeterince ışık enerjisiyle uyarılan valans kabuğu elektronları, iletkenlik kabuğuna geçebilirler [27]. İletkenlik kabuğuna geçen elektronlar tekrar eski kararlı durumlarına geçmeden belli bir yönde akışları sağlanırsa, akışın tersi yönünde elektrik akımı oluşur.

Elektron akışının temini; n ve p-tipi yarı iletken maddelerin bitıştırilmeleri (junction) sonucu oluşan yapıyla sağlanır. n-tipi yarı iletken örneği; fotovoltaiik hücrenin temel yapı malzemesi olarak kullanılan silisyum ile arseniğin kimyasal tepkimesi sonucu elde edilen $AsSi^{-1}$ 'dir [28]. Silisyum ile arsenik elementleri tepkimeye sokulduğunda, arsenik ile silisyum atomlarının kurdukları kovalent bağdan arsenik atomunun 1 elektronu açıkta kalır. Bu sayede birleşimde milyonlarca elektron serbest kalmış olur ve böylece oluşan madde negatif özellik kazanır. Bu yapıya donar veya verici de denmektedir. p-tipine örnek ise; valans kabuğunda 3 adet elektron yer alan bor elementinin silisyuma enjekte edilmesiyle meydana gelen birleşiktir. Birleşme sonucunda oluşan kovalent bağlardan biri boşta kalır ve elektron eksikliği meydana gelir. Elektron eksikliği birleşige pozitif özellik kazandırır. Tepkime sonucu elde edilen yapıya asseptor veya alıcı da denmektedir. n ve p-tipi maddelerin bitişmeleri sonucu oluşacak yapı Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Şekil 2.1'de görülen şekliyle elektron akışının sağlanabilmesi için bitişme sonucu meydana gelen potansiyel farkın, elektronları geri çağıran potansiyel farktan daha büyük olması gerekir. Bu koşulu sağlayan yapı yalnızca yarı iletkenlerin bitişmeleri sonucu elde edilebilir [29,30].

Yalıtkan maddelerin hücre yapısında kullanılmama nedeni; valans kabuğu ve iletkenlik kabuğu arasındaki enerji boşluğunun çok büyük olmasından dolayı valans kabuğundaki elektronların atomun yapısını dahi bozabilecek büyüklükte uyarılma enerjisine gereksinim duymalarıdır. İletkenlerin kullanılmamasının sebebi ise enerji boşluğunun çok küçük olmasından dolayı Şekil 2.1'deki gibi bir yapıyı meydana getirilebilmesinin mümkün olmamasıdır [31].

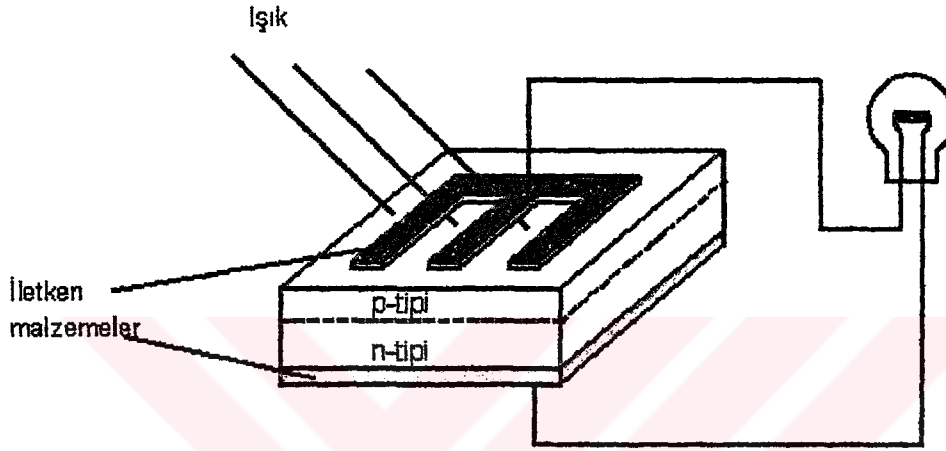


Şekil 2.1. p ve n-tipi yarıiletkenlerin bitişmesi (junction).

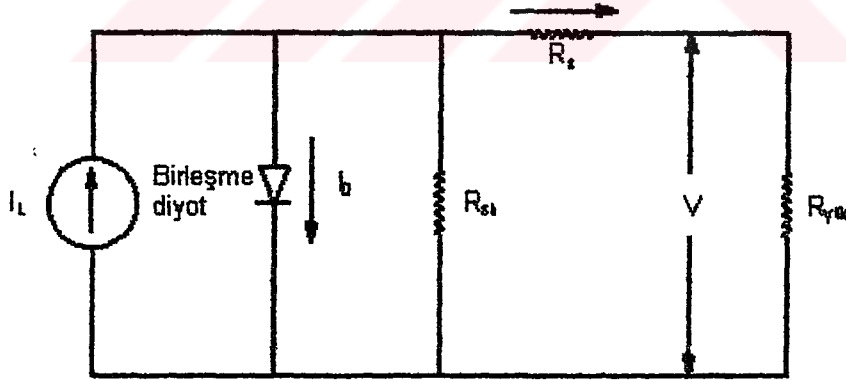
PV hücreler 1 cm^2 'lık bir yüzeye sahip olup, yaklaşık olarak 1-2 W arasında değişen güç çıktılarına sahiptirler. Bir tek PV hücresinin güç çıktısı çok düşük olduğundan PV hücreler modül denen elemanlarda birleştirilirler. Daha büyük güç gerektiren uygulamalarda ise PV modülleri sıralı modüller şeklinde panel denen elemanlarda birleştirilirler. PV hücresinin genel yapısı Şekil 2.2. görüldüğü gibi iki kısımdan meydana gelmektedir. Biri n ve p-tipi yarı iletkenlerinin bitişmeleri sonucu meydana gelen yapı, ikincisi bu yapının alt ve üst kısmında yer alan iletkenlerdir. İletkenlerin üstte olanı ızgara şeklindeyken alttaki iletken tamamen alt kısmı örtmektedir. Genel yapısı Şekil 2. 2'de görülen fotovoltaik hücresinin eşdeğer elektrik devresi Şekil 2.3'de gösterilmiştir [32,33].

Fotovoltaik hücrelerin çalışma prensibi Şekil 2.1 ve Şekil 2.2'de görüldüğü gibi hücresinin n ve p bitişmesi üzerine düşen ışık valans kabuğundaki elektronları uyarabilecek yeterli enerjiye sahipse, elektronlar iletkenlik kabuğına geçip elektron-elektron boşluğu çifti meydana getirirler. Bitişme sonucunda meydana gelen potansiyel tepeden dolayı elektronlar potansiyel tepeden aşağıya n-tipi yarı iletkene

doğru hareket ederken elektron boşlukları ise p-tipi yarı iletkene doğru hareket ederler. Bu hareketler sonucunda bir potansiyel fark meydana gelmekte ve bu potansiyel fark açık devre gerilimi (V_{oc}) olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.2'deki gibi devre tamamlanırsa elektron akışının tersi yönünde bir elektrik akımı meydana gelir. Devreyi tamamlayan bağlantı elemanın direnci ihmal edilerek yapılacak bir akım ölçümünde, ölçülen akım "kısa devre akımı" olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 2.2. Fotovoltaik hücrenin genel yapısı.



Şekil 2.3. Fotovoltaik hücrenin eşdeğer elektrik devresi.

2.1.2. PV Panellerin matematiksel modelleri

Sistemin uzun dönem enerji analizinin yapılabilmesi için ışıınım şiddetinin ve çevre sıcaklığının bir fonksiyonu olan panel karakteristiklerinin matematiksel

modellerle tanımlanması gerekir. Bu çalışmada ticari alanda %60 pazar payına sahip [34] kristal silikon (C-Si) paneller seçilmiştir. Literatürde kristal silikon hücre ile ilgili, geliştirilmiş bir çok model bulunmaktadır. Bu çalışmada panel karakteristiklerin tanımlanmasında, Loferski (1972) tarafından önerilen ve Towsend (1989), Eckstein (1990) ve Al-İbrahim (1996) tarafından $R_{sh} \gg R_s$ varsayımıyla yeniden düzenlenen matematiksel model kullanılmıştır [35,36]. Bu modelin en büyük özelliği, beş olan parametre sayısının dörtte düşürülmesi sonucu üretici firma katalog verileriyle çözüm yapılabilmesidir.

Loferski tarafından önerilen model

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{A}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.1)$$

şeklinde olup, bu denklemedeki I_L yüzeye ışıyım düştüğünde üretilen akımı, I_0 karanlık devre akımı, R_s seri direnci, R_{sh} paralel direnci, A termal voltajı, I ve V sırasıyla çalışma akımını ve voltajını göstermektedir. Towsend, Eckstein ve Al-İbrahim, $R_{sh} \gg R_s$ olması nedeniyle R_{sh} büyüklüğünü ihmal etmiş ve modeli;

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{A}\right) - 1 \right] \quad (2.2)$$

şeklinde düzenlemişlerdir. Towsend, Eckstein ve Al-İbrahim tarafından yapılan bu düzenleme sonucunda parametre sayısı dörtte indirgenmiştir. Kataloglarda da dört parametreyi tanımlayabilecek yeterlilikte veri bulunmaktadır. Bu veriler; standart test şartlarında (1000 W/m^2 ışıyım şiddeti ve 25°C çevre sıcaklığı) maksimum çalışma noktasında çıkış gerilimi ve akımı, kısa devre akımı, açık devre gerilimi ve birim sıcaklık farkı için kısa devre akımında ($\mu_{V_{oc}}$) ve açık devre gerilimindeki ($\mu_{I_{sc}}$) değişimi gösteren büyüklüklerdir. Aşağıdaki bağıntılar yardımıyla katalog bilgileriyle dört parametre hesaplanabilir.

$$I_L^* = I_{sc}^* \quad (2.3)$$

$$A^* = \frac{q_{voc} T_c^* - V_{oc}^* + E_g N_s}{(T_c^* \mu_{I_x} / I_L^*) - 3} \quad (2.4)$$

$$R_s^* = \frac{A^* \ln \left(1 - \frac{I_{mpp}^*}{I_L^*} \right) - V_{mpp}^* - V_{oc}^*}{I_{mpp}^*} \quad (2.5)$$

$$I_0^* = \frac{I_L^*}{\exp(V_{oc}^* / A^*) - 1} \quad (2.6)$$

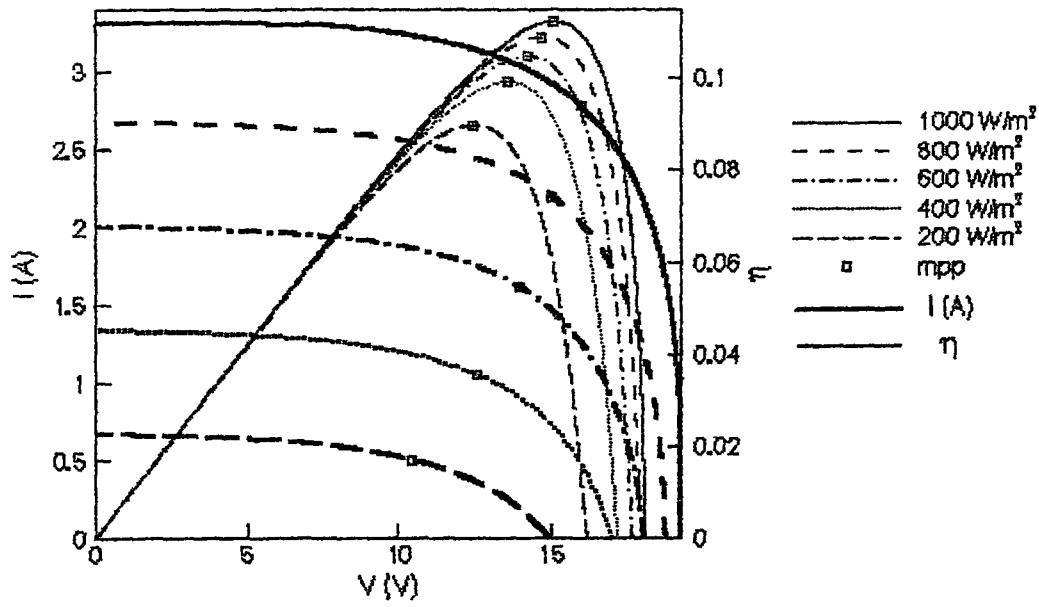
$$R_s = R_s^* \quad (2.7)$$

$$A = A^* \frac{T_c}{T_c^*} \quad (2.8)$$

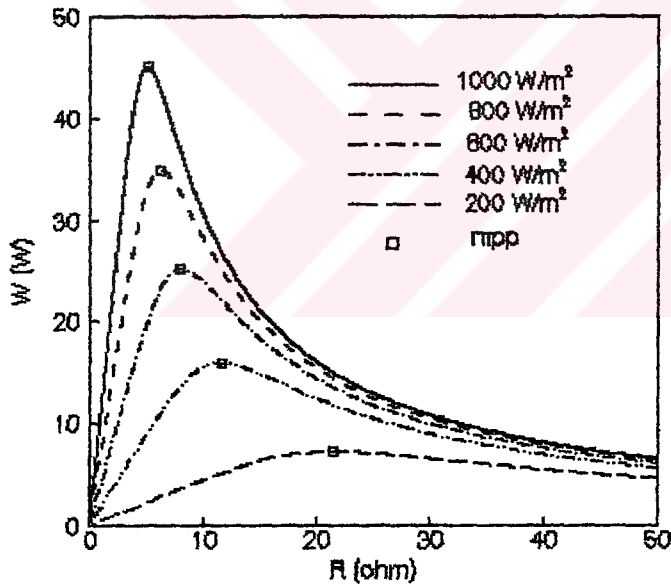
$$I_L = \left(\frac{G}{G^*} \right) [I_L^* + \mu_{isc} (T_c - T_c^*)] \quad (2.9)$$

$$I_0 = I_0^* \left[\frac{T_c}{T_c^*} \right]^3 \exp \left[\left(\frac{N_{sc} E_g}{A} \right) \left(1 - \frac{T_c^*}{T_c} \right) \right] \quad (2.10)$$

Denklem (2.2) ve 2.10 bağıntıları kullanılarak panel olarak seçilen AP50 PV panelin karakteristikleri saptanmıştır. Seçilen panelin saptanan akım-gerilim-verim (I - V - η) karakteristikleri Şekil.2.4'de, güç-direnç (W - R) karakteristikleri ise Şekil 2.5'de gösterilmiştir.



Şekil 2.4. AP50 PV panelin I-V- η karakteristikleri.



Şekil 2.5. AP50 PV panelin W-R karakteristikleri.

2.2. MOTOR

2.2.1. DC Motorlar

Pompalar için gerekli mekaniksel enerjinin elde edilmesinde elektrik motorları, içten yanmalı motorlar, buhar türbinleri gibi birçok tahrik makinesi kullanılabilir. Tahrik makinesi seçiminde, pompa tipi, pompanın gereksinim duyduğu güç aralığı

ve uygulamanın türü gibi faktörler göz önünde bulundurulması gereken parametrelerdir. Az hacim kaplamaları, hafif ve diğer tahrik makinelerine nazaran daha ekonomik olmaları, nedeniyle su pompalarında elektrik motorlarının kullanımı oldukça yaygındır [37].

PVDSP sistemlerinde AC ve DC olmak üzere iki tip elektrik motoru kullanılır. AC motorlar geliştirilmiş en uygun motor tipi olup, yapısının çok basit olmasından dolayı ucuz, dayanıklı ve güvenilir sürücü tipidir [38]. Fakat bu sürücülerin, paneller tarafından üretilecek olan DC gücü, AC güce dönüştürecek bir invertere ihtiyaç duymaları PVDSP sistemlerinde kullanımlarını son derece sınırlamıştır. DC motorlar ise daha karmaşık ve daha pahalı motorlar olup, stator sarımındaki güç kayıpları ve motorun çalışması esnasında rotor üzerindeki akımın yönünü değiştirmek amacıyla kullanılan kayıcı fırçanın stator ile teması sonucu motor ömrünün ve çalışma hızının düşük olması gibi dezavantajları mevcuttur [39]. Son yıllarda elektronik kontrol sistemlerinde ve malzeme teknolojilerinde sağlanan gelişmelerle birlikte DC motorlarda; fırçadan ve statordeki sarımlardan kaynaklanan olumsuzlukları gidermek amacıyla kendinden uyarılı fırçasız DC motorlar geliştirilmiştir. Bu tip motorların çalışma verimlerinin ve ömürlerinin yüksek olması, işletme maliyetlerinin düşük olması ve panel tarafından üretilen gücün direkt kullanılabilirliği açısından PVDSP sistemlerinde kullanımları son derece yaygınlaşmıştır.

DC motorlar uyarılma alanlarına göre; kendinden uyarılı, seri, şönt ve kompunt olmak üzere dört tipte sınıflandırılırlar. Bunların eşdeğer elektrik devreleri Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Tüm DC motorlar için genel gerilim ve moment (tork) bağıntıları:

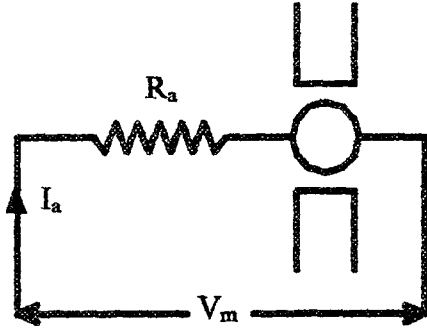
$$V_m = E + I_a R_a \quad (2.11)$$

$$E = k_v \theta n \quad (2.12)$$

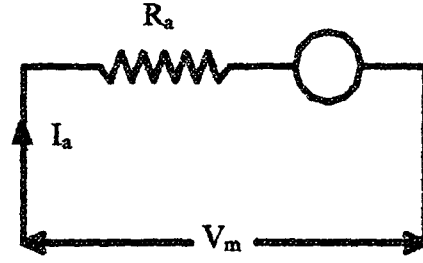
$$T = k_t \theta I_a \quad (2.13)$$

şeklinde tanımlanmaktadır [40]. Denklemlerdeki; V_m motora uygulanan gerilimi, E elektro motor kuvveti, I_a motor armatür akımını, R_a motor armatür direncini, θ

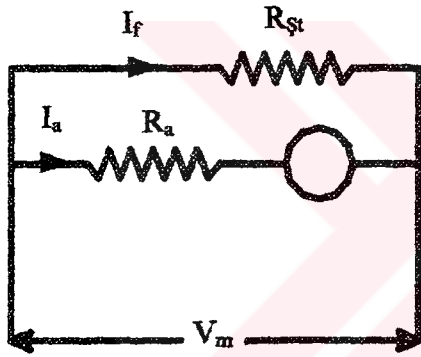
manyetik akıyı, ω motor şaftının açısal hızını, T elektromanyetik torku ve k_v , k_t hız ve tork sabitini göstermektedir.



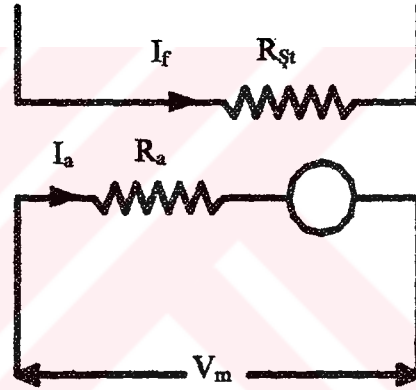
a. Kendinden uyarılı



b. Seri



c. Şönt



d. Kompunt

Şekil 2.6. DC motor tiplerin eşdeğer elektrik devresi.

2.2.2. Kendinden Uyarılı Fırçasız DC Motor ve Matematiksel Modeli

Kendinden uyarılı DC motorun şematik akış şeması Şekil 2.7’de gösterilmiştir. Bu tip motorlarda manyetik alan; statore yerleştirilen elektrik sargıları üzerinden akım geçilerek değil, mıknatıslar vasıtasıyla üretilir ve ayrıca akım değişimini sağlayan fırçalar yerine elektronik bir cihaz kullanılır. Böylece statordaki sarımlardan geçen akım ve fırçalar dolayısıyla meydana gelen kayıplar önlenmiş olur. Bu motorlarda Şekil 2.7’de görülebileceği gibi stator ve rotorun üstlendikleri işlevler konvansiyel DC motorların tam tersidir. Uyarılma işlevini rotordaki mıknatıslar yaparken motor sargıları statore yerleştirilmiştir. Motor için matematiksel

model geliştirmenin amacı; motora uygulanan gerilim ile motorun dönme hızı arasındaki ilişkiyi saptamaktır. Böylece motorun sistem içindeki performansını ölçmek amacıyla motora giren elektriksel güç ile motordan elde edilebilecek mekaniksel güç arasında bir bağıntı elde edilebilir. Elektriksel ve mekaniksel karakteristikler göz önünde bulundurularak iki eşitlik geliştirilebilir.

i) Motorun Elektriksel Karakteristikleri

Motorun elektriksel eşdeğer devresinde motor sarımı gerilim kaynağına zıt, armatür direncine ve endüvi gerilimine seri olan indüktans (L_a) denen bir büyüklük ile tanımlanır. Endüvi gerilimi; rotorun hareketi sonucu manyetik alanda oluşur. Bu gerilim elektro motor kuvveti (emf) olarak da bilinir. Kapalı bir elektriksel devre boyunca Kirchhoff 'un gerilim kanunu kullanılarak matematiksel bir model geliştirilebilir. Kirchhoff 'un gerilim kanununa göre kapalı bir devre boyunca gerilimlerin toplamı sıfırdır:

$$V_a - V_{Ra} - V_{La} - V_e = 0 \quad (2.14)$$

Ohm kanununa göre ise akım; gerilim ile direncin oranına eşit olduğundan:

$$V_{Ra} = I_a R_a \quad (2.15)$$

Denklemdaki I_a armatür akımını göstermektedir. Endüvi gerilimi motor sarımı üzerinden geçen akımının zamanla değişimine eşittir ve;

$$V_{La} = L_a \frac{d}{dt} I_a \quad (2.16)$$

şeklinde gösterilebilir. Elektro motor kuvveti ise

$$V_e = k_v \omega_a \quad (2.17)$$

bağıntısıyla ifade edilir. Bu bağıntıdaki k_v hız sabiti; motorun manyetik akı yoğunluğuna, mekanik yapısına ve motor sarım sayısına bağlı değişen bir büyüklüğü ve ω_a armatürün açısal hızını göstermektedir. Denklem (2.15), (2.16) ve (2.17)'deki

büyüklikler Denklem (2.14)'de yerine konulursa motorun elektriksel karakteristiklerinin matematiksel modeli;

$$V_a - i_a R_a - L_a \frac{d}{dt} i_a - k_v \omega_a = 0 \quad (2.18)$$

şeklinde tanımlanır.

ii) Motorun Mekaniksel Karakteristikleri

Sistem üzerindeki enerji dengesi dolayısıyla motor üzerindeki torkların toplamı sıfır olması nedeniyle motorun enerji dengesi;

$$T_e - T_{\omega^2} - T_{\omega} - T_L = 0 \quad (2.19)$$

şeklinde olur. T_e elektromanyetik torku, T_{ω^2} rotorun ivmesinden dolayı meydana gelen torku, T_{ω} rotor hızı dolayısıyla meydana torku ve T_L mekanik yük torkunu göstermektedir. Elektromanyetik tork motor sarımı üzerinden geçen akım ile orantılı olduğundan:

$$T_e = k_t I_a \quad (2.20)$$

Denklemdeki k_t tork sabiti olup hız sabiti gibi motorun akı yoğunluğuna, mekaniksel yapısına ve sarım sayısına bağlıdır. T_{ω} motor rotasyon hızının zamana bağlı değişimine eşittir ve;

$$T_{\omega} = J \frac{d}{dt} \omega_a \quad (2.21)$$

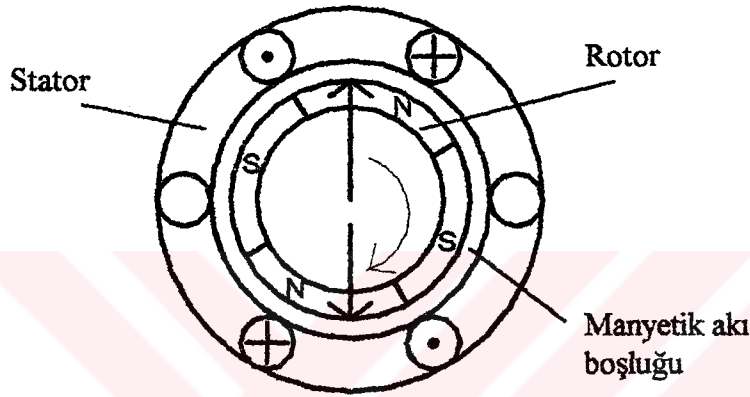
şeklinde gösterilebilir. Buradaki J rotor ve mekaniksel yük ataletidir. Rotorun açısal hızı sonucu üretilen tork:

$$T_{\omega} = B \omega_a \quad (2.22)$$

Denklemdaki B mekaniksel rotasyona bağı olarak değişen bir büyüklüktür. Denklem (2.20), (2.21) ve (2.22)'deki büyüklükler Denklem (2.19)'de yerine konulursa motorun mekaniksel karakteristiklerinin matematiksel modeli;

$$k_t i_a - J \frac{d}{dt} \omega_a - B \omega_a - T_L = 0 \quad (2.23)$$

şeklinde tanımlanabilir.



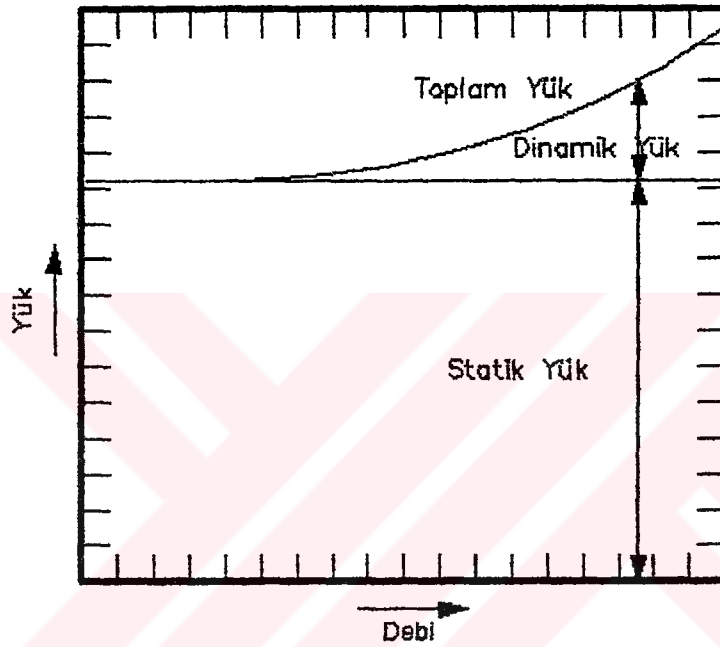
Şekil 2.7. Kendinden uyarılı fırçasız DC motorun şematik şekli.

2.3. POMPA

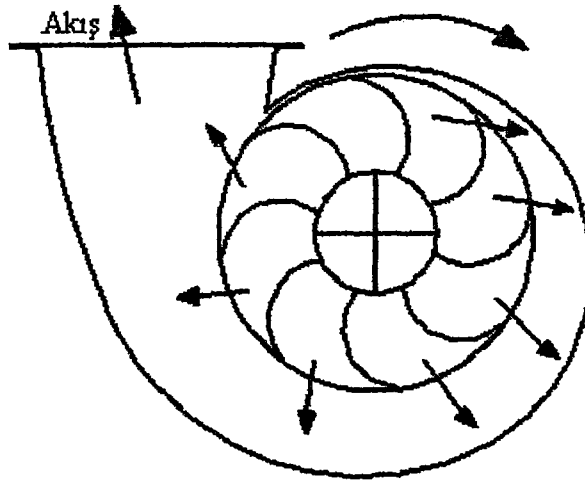
Su pompalarında statik ve dinamik olmak üzere iki yük profili tanımlanır [34]. Statik yük; su kaynağı ile suyun pompalanacağı yer arasındaki düşey uzunluk dinamik yük ise pompa ve bağlantı elemanlarında sürtünmelerden dolayı meydana gelen güç kayıpları olarak tanımlanır. Bu iki büyüklüğün suyun akış oranına yani debisine bağlı değişimi şematik olarak Şekil 2.8'de gösterilmiştir [35]. PV sistemlerde genellikle büyük çaplı iletim elemanları kullanılarak dinamik yük azalmaya ve dolayısıyla sistem için gerekli panel sayısı minimumda tutmaya çalışılır. Optimum bir dizaynda dinamik yükün toplam yük içerisindeki payı % 5 ile 20 arasında değiştiğinden, küçük sistemlerde dinamik yük ihmal edilebilir [34].

PV sistemlerin su pompası uygulamasında en çok kullanılan pompa tipi santrifüj prensibine göre çalışan pompalardır. Bunun en büyük nedeni; bu tip pompaların PV kaynaklı güce uyumlu yük profiline sahip olmalarıdır [41]. Ayrıca diğer pompalara

göre daha basit bir yapıya sahip olması, ilk yatırım ve işletme maliyetlerinin düşük olması ve dizayn açısından geniş seçenek sunmaları diğer önemli avantajlardır. Şematik şekli Şekil 2.9'da gösterilmiş olan santrifüj pompalar merkezkaç kuvvetini esas alan bir prensibe göre çalışırlar. Bu çalışmada da pompa olarak santrifüj pompa seçilmiş olup çalışmanın bu kısmında santrifüj pompa yük profilinin matematiksel modeli irdelenmiştir.



Şekil 2.8. Su pompalarında statik ve dinamik yüklerin debiye bağlı değişimi.



Şekil 2.9. Santrifüj pompanın şematik şekli.

2.3.1. Santrifüj pompanın yük karakteristikleri

Pompanın motor tarafından tahriki sonucu, mekanik enerji hidrolik enerjiye dönüşür. Enerji dönüşümü pompa çarkı üzerindeki kanatçıklar boyunca gerçekleşir. Santrifüj pompanın yük dağılımı Şekil 2.10'de gösterilmiştir. Su pompa eksenine paralel V_1 hızıyla pompaya girip pompayı radyal yönde veya yine eksenel yönde V_2 hızıyla terk eder. Suyun pompaya giriş ve çıkışı arasında oluşan ΔV kadar hız farkından dolayı (sürtünmeler ve kot farkı ihmal edildiğinde

$$\Delta P = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} \rho \quad (2.24)$$

kadar basınç farkı oluşur. Oluşan basınç farkı sonucunda su daha yüksek kotlara pompalanır. Denklemdaki ρ yoğunluğu göstermektedir. Denklem (2.24)'nin açılımından pompa torku ve debi arasındaki ilişki belli sınır şartları altında (pompa boyutlarına bağlı olarak) [42];

$$M_s = Q\rho \left[R_2 \left(\omega R_2 + \frac{Q \operatorname{ctg} \beta_2}{2\pi R_1 b_2} \right) - R_1 \left(\omega R_1 + \frac{Q \operatorname{ctg} \beta_1}{2\pi R_1 b_1} \right) \right] \quad (2.25)$$

şeklinde tanımlanır. Denklemdaki Q debiyi, R_1 çarkın giriş çapını, R_2 çarkın çıkış çapını, b_1 kanatçığın giriş yüksekliğini, b_2 pompa kanatçığının çıkış yüksekliğini β_1 kanatçık giriş açısını ve β_2 kanatçık çıkış yüksekliğini göstermektedir. Pompaların birçoğunda olduğu gibi suyun düşey doğrultuda hareket ettiği varsayılırsa, debi:

$$Q = \omega R_1 2\pi b_1 \operatorname{tg} \beta_1 \quad (2.26)$$

ile ifade edilir. Denklem (2.25) ve (2.26) birleştirilirse; pompanın açısal hızının ve boyutlarının bir fonksiyonu olarak tork denklemi için

$$M_s = \rho \omega^2 R_1^2 2\pi b_1 \operatorname{tg} \beta_1 \left(R_2^2 + \frac{R_1^2 b_1 \operatorname{tg} \beta_1}{b_2 \operatorname{tg} \beta_2} \right) \quad (2.27)$$

elde edilir. Pompanın boyutları,

$$K_m = \rho R_1^2 2\pi b_1 \tan \beta_1 \left(R_2^2 + \frac{R_1^2 b_1 \tan \beta_1}{b_2 \tan \beta_2} \right) \quad (2.28)$$

sabiti ile tanımlanırsa, pompa torku ile pompanın açısal hızı arasındaki ilişki,

$$M_s = \omega^2 K_m \Rightarrow K_m = \frac{M_s}{\omega^2} \quad (2.29)$$

şeklinde olur. Bu denklemin açılımından aşağıdaki bağıntılar türetilebilir:

$$Q_2 = Q_1 (\omega_2 / \omega_1), \quad H_2 = (\omega_2 / \omega_1)^2, \quad P_2 = P_1 (\omega_2 / \omega_1)^3 \quad (2.30)$$

Yukarıdaki bağıntılardan yararlanarak katalog bilgilerinden, pompanın çalışma karakteristikleri saptanabilir. Bir pompanın çalışma noktaları; yük eğrisinin Şekil 2.11'de gösterilmiş olan pompa karakteristikleri (yük-debi) ile çakışma noktalarıdır.

2.3.2. Pompa Yük Eğrisinin Tespiti

Pompalarda daha önce bahsedildiği üzere dinamik yük ve statik yük olmak üzere iki tip yük tanımlanır. Bu yüklerin toplamı ile debi arasındaki ilişki pompanın yük eğrisini belirler. Sürtünmelerin ihmal edildiği ideal şartlar altında Bernoulli denkleminde bu ilişki;

$$H_{id} = \frac{1}{g} \left[(\omega R_2)^2 - \frac{Q \omega}{2\pi b_2 \tan \beta_2} \right] \quad (2.31)$$

şeklindedir. Kanatçık sayısının suyun akışı üzerindeki etkisi, bir düzeltme katsayısı (ε_p) ile tanımlanırsa;

$$\varepsilon_p = \frac{1}{1 + P_p}, \quad P_p = \frac{1.2}{z} \frac{1 + \sin \beta_2}{1 - (R_1 / R_2)^2} \quad (2.32)$$

ideal veya teorik yük;

$$H_{id} = \frac{\varepsilon_p}{g} \left[(\omega R_2)^2 - \frac{Q\omega}{2\pi b_2 \tan \beta_2} \right] \quad (2.33)$$

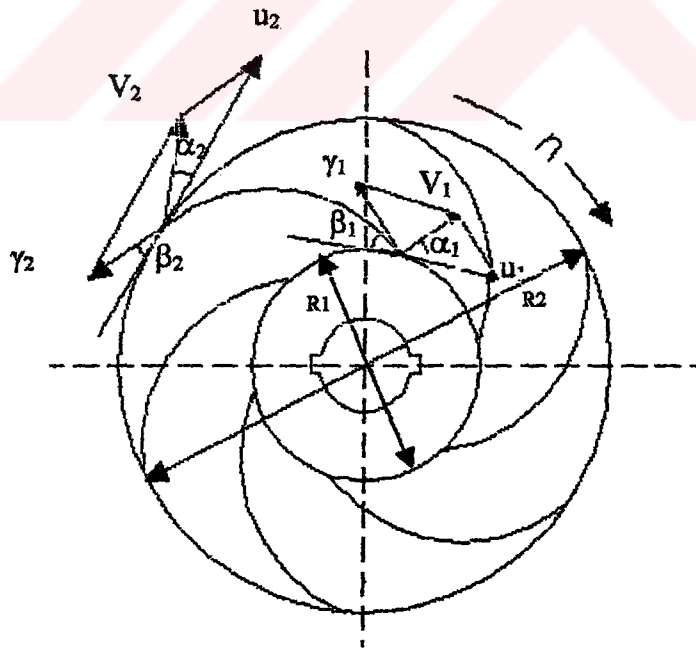
olur. Sürtünmelerden dolayı meydana gelen yük kaybı debinin karesiyle doğru orantılıdır. Sürtünmeler K_s katsayısıyla tanımlanırsa yük kaybı;

$$H_k = (1 - \eta_h) H_{id} Q^2 K_s \quad (2.34)$$

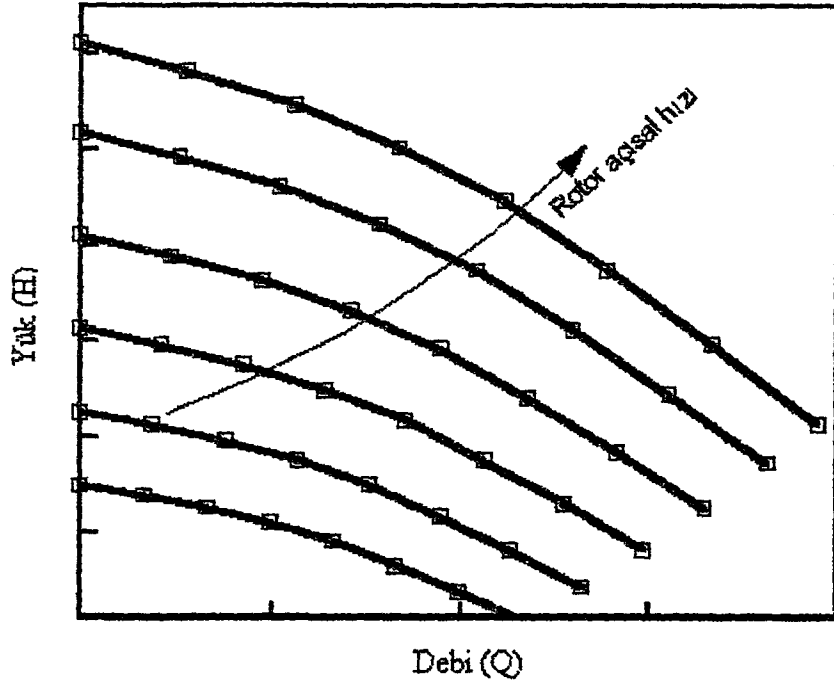
şeklinde olur. Bağlıntıdaki η_h hidrolik verimi göstermektedir. Denklem (2.33) ve (2.34) birleştirilirse gerçek yük veya pompanın çalışma noktaları arasındaki ilişkiyi tanımlayan

$$H_{ger} = \frac{\varepsilon_p}{g} \left[(\omega R_2)^2 - \frac{Q\omega}{2\pi b_2 \tan \beta_2} \right] - (1 - \eta_h) H_{id} Q^2 K_s \quad (2.35)$$

denklemini elde edilir.



Şekil 2.10. Santrifüj pompadaki yük dağılımı.



Şekil 2.11. Santrifüj pompanın sabit rotor hızlarındaki yük karakteristiklerinin şematik şekli.

3. PV PANELLER İÇİN METEOROLOJİK DATA ANALİZİ ve PANEL EĞİM AÇISI OPTİMİZASYONU

Güneş enerjisi sistemlerinde optimum tasarım koşullarının araştırılabilmesi için uzun dönem iklimsel verilerin bilinmesi zorunludur. Uygulamanın türüne göre verilerin önem sırası değişir. Bu çalışmada ışıının şiddeti ve çevre sıcaklığının fotovoltaik sistemler üzerine direkt etkisi söz konusu olduğundan [43,44], bu iki parametre ile ilgili detaylı hesaplamalar yapılmıştır.

İşınım şiddeti ve çevre sıcaklığı değerleri meteoroloji istasyonları tarafından yapılan ölçümlerle belirlenir. Ancak bu istasyonlarda sınırlı koşul ve zaman aralıklarında ölçümler yapıldığından optimum koşulların araştırılmasında meteorolojik veriler bazen yetersiz kalmaktadır [45,46]. Bu olumsuzlukları ortadan kaldırmanın bir yolu uzun dönem ölçüm sonuçlarını doğrulayacak şekilde uygun bir matematiksel model oluşturmaktır. Parametrenin türüne bağlı olarak, matematiksel model geliştirme sürecinde çeşitli zorluklar yaşanmaktadır. İşınım şiddetinin modellenmesinde yaşanan temel sorun, ışıının şiddetinin direkt ve yayılı olmak üzere iki bileşen içermesidir [47]. Çevre sıcaklığındaki temel sorun ise; sıcaklığın gün boyunca simetrik bir özellik göstermemesidir [48].

Yıl ve gün boyunca deklinasyon açısına, bölgenin enlemine ve güneş batış açısına bağlı olarak güneş ışıının dünyanın yatay yüzeyine geliş açısı değişir. İşınım şiddetinden maksimum yararlanabilmek için panel veya kollektörlerin güneş geliş açısı dikkate alınarak, optimum açılarda yatay yüzeye yerleştirilmesi gereklidir [49]. Optimum açılarda saptanabilmesinin ilk koşulu, eğimli yüzeylere gelen ışıının hesaplanabilmesidir. Literatürde meteorolojik ölçüm verisi olan yatay yüzeye gelen ışıının verisinden yararlanılarak eğimli yüzeyler için geliştirilmiş birçok model bulunmaktadır [50]. Bu modellerin ortak özelliği direkt ve yayılı ışıının birer fonksiyonu olmalarıdır. Bu iki ışıının türünün arasındaki ilişki; güneş sabiti, dünya-güneş mesafesi, deklinasyon açısı, saat açısı, atmosferdeki su buharı, bulunan yerin enlemi, boyları, deniz seviyesinden yüksekliği v.b. bir çok faktöre bağlıdır. Bu faktörlerin tümü bulanıklık indisinin bağımlı değişkenleri olduğundan, direkt ve yayılı ışıının arasındaki ilişki yalnızca bulanıklık indisinin bir fonksiyonu şeklinde tanımlanabilmektedir [51]. Bulanıklık indisi; yalnızca atmosferin karakteristiği hakkında değil, aynı zamanda bölgenin güneş enerjisi potansiyeli

hakkında da bilgi verir. Literatürde ışıının şiddeti ile ilgili modellerden yararlanabilmek için ilk etapta sırasıyla; bölgenin bulanıklık indisi, yayılı ve direkt ışıının şiddetinin hesaplanması gerekir. Söz konusu bu hesaplamaların Şanlıurfa ili için gerçekleştirilmesinde aşağıda belirtilen aşamalar takip edilmiştir:

- i) Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nden elde edilen ışıının şiddeti verilerinden ortalama saatlik-aylık-yıllık veri tabanlarının oluşturulması, atmosfer dış yatay yüzeyine gelen ışıının şiddetinin ortalama aylık-yıllık-saatlik değerlerinin hesaplanması, bulanıklı indisi, yayılı ve direkt ışıının şiddetlerinin tespiti,
- ii) Anlık ışıının şiddeti için literatürde verilen matematiksel modellerden bölgeye uygun olanın seçimi,
- iii) Günlük, aylık ve yıllık optimum eğim açılarının tespit edilmesi,
- iv) Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nden elde edilen çevre sıcaklığı verilerinden saatlik-aylık-yıllık ortalama sıcaklıkların belirlenmesi ve seçilen bir matematiksel model ile kıyaslanması.

Literatürde iklimsel verilerle ilgili modellerin tümü genelde enlem, deklinasyon açısı ve gün uzunluğunun birer fonksiyonudur. Deklinasyon açısı; zenit açısı sıfır olduğu anda ekvator düzleminin güneş ışıınının yatay yüzeye geliş doğrultusuyla yaptığı açıdır ve matematiksel olarak;

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

şeklinde tanımlanmaktadır. Buradaki n yılın gününü göstermektedir. Gün uzunluğu ise ;

$$t_0 = \frac{2}{15} \arccos(-\tan(\delta) \tan(E)) \quad (3.2)$$

şeklinde hesaplanır. Denklemdaki E enlemi göstermektedir. Bu iki büyüklüğe ait ortalama değerler genellikle aylık ortalama referans gün olarak kabul edilen, her ayın ortasındaki gün için hesaplanır [52]. Bu iki büyüklüğün Şanlıurfa ili için her aya ait referans günlerde aldığı değerler hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. 37 Enlemi için (Şanlıurfa) deklinasyon açısının (δ), gün uzunluğunun (t_0) ve referans günün (n) aylara göre değişimi.

Aylar	Günler (n)	δ (derece)	t_0 (saat)
Ocak	16	-21.097	9.740
Şubat	47	-12.956	10.665
Mart	75	-2.420	11.756
Nisan	105	9.781	12.998
Mayıs	135	19.029	14.015
Haziran	162	23.354	14.539
Temmuz	198	21.355	14.292
Ağustos	228	13.458	13.389
Eylül	258	1.818	12.183
Ekim	288	-9.963	10.983
Kasım	318	-19.376	9.945
Aralık	344	-23.371	9.458

3.1. BULANIKLIK İNDİSİNİN ve DİREKT-YAYILI IŞINIM ŞİDDETLERİNİN YIL BOYUNCA DEĞİŞİMİ

Bulanıklık indisi atmosfer dışına gelen ışıma şiddeti ve yatay yüzeye gelen ışıma şiddeti olmak üzere iki değişkenin fonksiyonu olup,

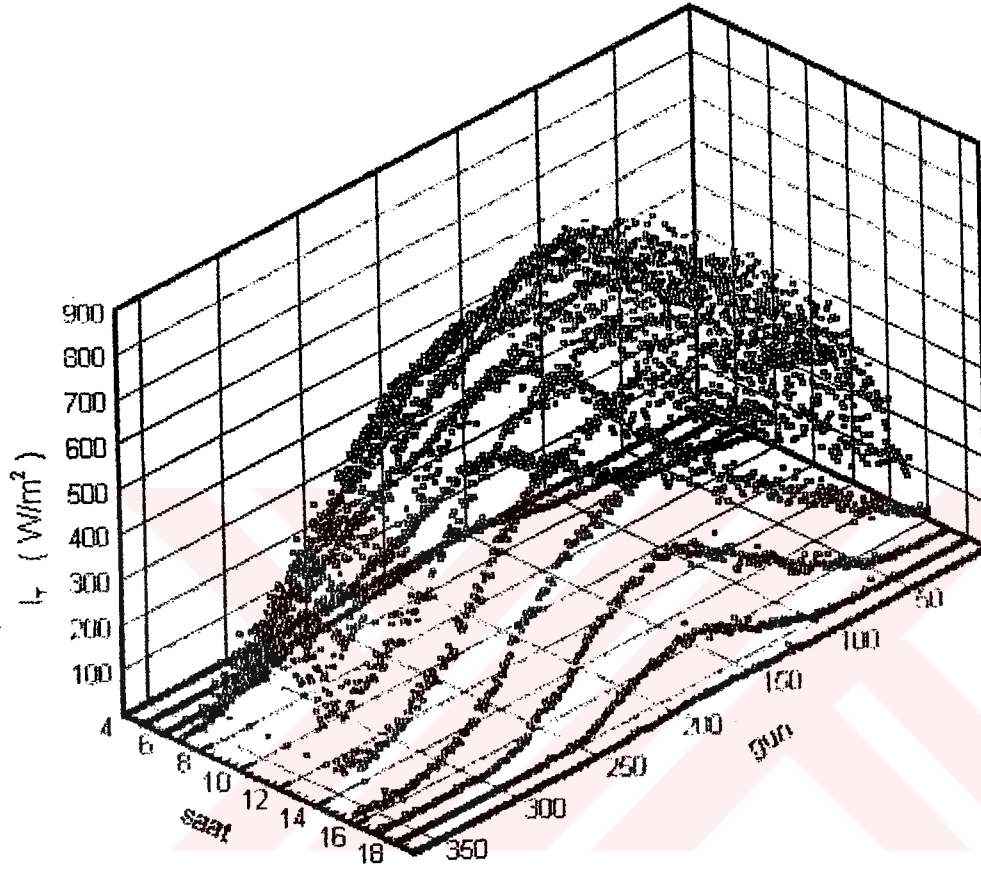
$$B_i = \frac{\text{Yatay yüzeye gelen ışıma şiddeti}}{\text{Atmosfer dış yatay yüzeyine gelen ışıma şiddeti}} \quad (3.3)$$

şeklinde tanımlanmaktadır.

3.1.1. Yatay Yüzeye Gelen Işıma Şiddeti

Şanlıurfa’ya ait 1985-2001 yılları arasındaki yatay yüzeye gelen ışıma şiddeti verileri; ham data şeklinde Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü’nden elde edilmiştir. Ham datalar bilgisayar programları yardımıyla yeniden düzenlenmiş ve günlük, aylık ve yıllık ortalamalara ait veri tabanları oluşturulmuştur. Hazırlanan veri tabanlarından yararlanarak hesaplanan değerler Tablo 3.2’de verilmiştir. Şanlıurfa’nın ışıma potansiyelinin, yıl boyunca gösterdiği değişimin kolayca izlenebilmesi amacıyla günlük değerleri de içeren grafik Şekil 3.1’de gösterilmiştir.

Yapılan analizlerde Şanlıurfa'da yıl boyunca ortalama anlık ışınlm seviyesinin 400 W/m²'nin üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Bu değer Şanlıurfa'nın mevcut güneş enerjisi potansiyelinin büyüklüğünü göstermek açısından önemlidir.



Şekil 3.1. Şanlıurfa için DMI'den elde edilen ışınlm şiddeti verileri ile hesaplanan yıllık ortalamalarının yıl ve gün boyunca dağılımı.

3.1.2. Atmosfer Dışı Yatay Yüzeye Gelen Işınlm Şiddeti

Atmosfer dış yüzeyine gelen ışınlm şiddeti;

$$I_0 = I_{gs} \left[1 + 0.033 \cos\left(\frac{360n}{365}\right) \right] \quad (3.4)$$

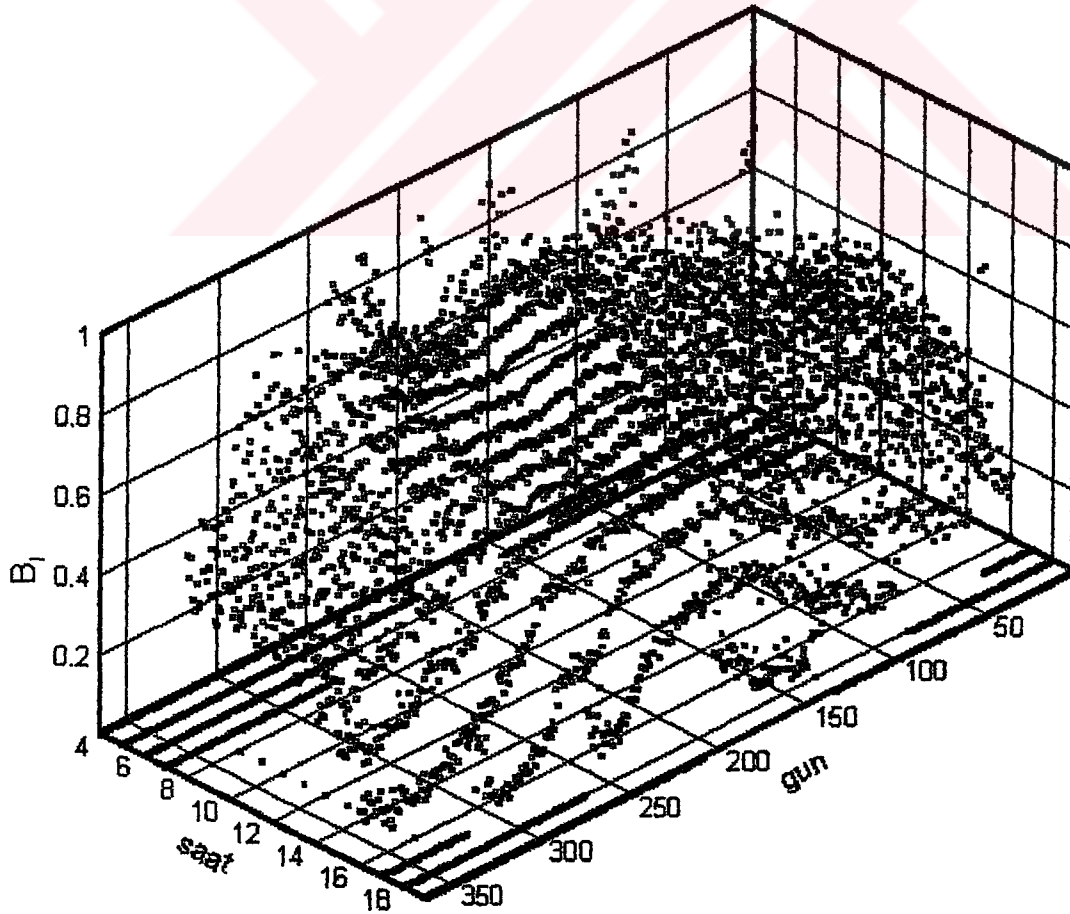
şeklinde tanımlanırken, atmosfer dışı yatay yüzeye gelen ışınlmın;

$$I_D = I_0 (\cos(\delta) \cos(E) \cos(h) + \sin(E) \sin(\delta)) \quad (3.5)$$

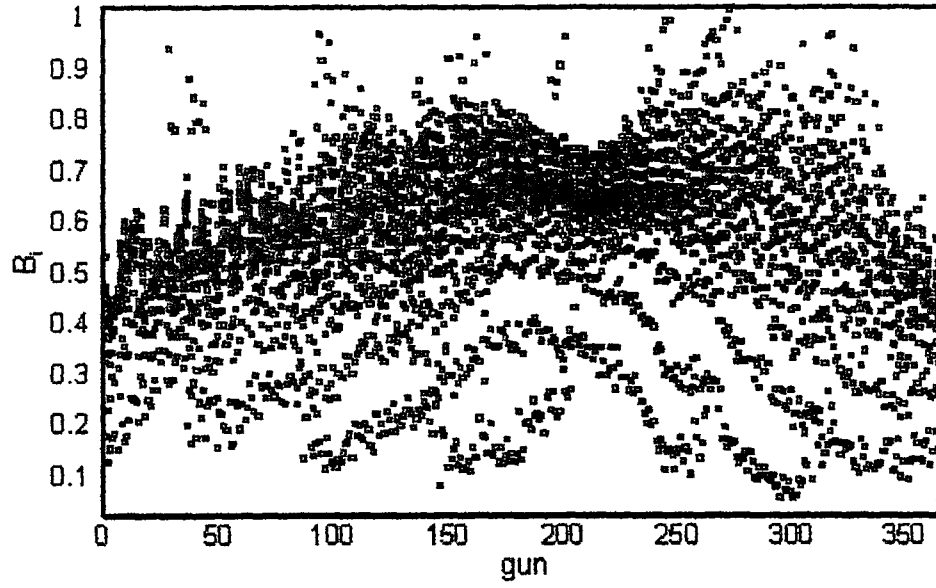
bağıntısı ile hesaplanabilmektedir [53]. Denklemlerdeki h güneş saat açısını, I_{gs} ise güneş sabitini göstermektedir. Güneş sabiti için literatürde genellikle 1353 W/m^2 değeri kullanılmaktadır. Denklem (3.4) ve (3.5)'deki eşitliklerden yararlanılarak bilgisayar programı yardımıyla, önce yılın tüm günleri için gün boyunca atmosfer dışı yatay yüzeyine gelen ışınlam şiddeti ve daha sonra da aylık ortalamalar hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler Tablo 3.3'de verilmiştir.

3.1.3. Bulanıklık İndisinin Hesaplanması

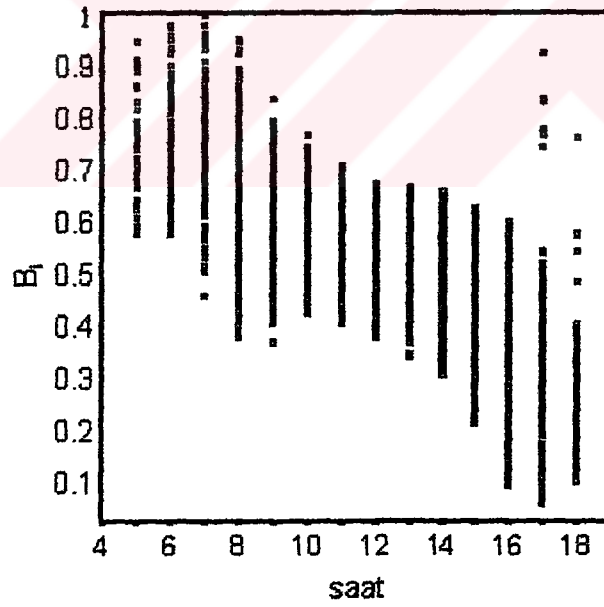
Bilgisayar programı yardımıyla elde edilen yatay yüzey ve atmosfer dışı yatay yüzeye gelen ışınlam verilerinden yararlanarak Şanlıurfa için ortalama bulanıklık indisinin yıl boyunca değişimi hesaplanmıştır. Saatlik bazda bulunan değerler Tablo 3.4'de verilmiştir. Hesaplamalar sonucu elde edilen detaylı bulgular Şekil 3.2. Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'de gösterilmiş olup, bulanıklık indisinin yıl boyunca gösterdiği



Şekil 3.2. Şanlıurfa için Bulanıklık indisinin ortalama yıl ve gün boyunca dağılımı.



Şekil 3.3. Şanlıurfa için bulanıklık indisinin ortalama yıl boyunca değişimi.



Şekil 3.4. Şanlıurfa için bulanıklık indisinin ortalama gün boyunca değişimi.

değişim bu grafiklerden görülebilir. Bulanıklık indisi 0-1 değerleri arasında değiştiğinden, güneş enerjisi potansiyelinin diğer bölgeler ile kıyaslanmasında yatay yüzeye gelen ışıının şiddeti verisine oranla daha etkili bir büyüklüktür. Bulanıklık indisi ile ilgili hazırlanan diyagramlardan görüleceği üzere, Şanlıurfa'da yıl boyunca ortalama bulanıklık indisi 0.6 gibi yüksek bir değere sahiptir.

3.1.4. Saatlik Ortalama Direkt ve Yayılı Işıının Şiddeti

Direkt ve yayılı ışıının saatlik değerlerinin hesaplanmasında Liu ve Jordan [28], tarafından geliştirilen;

$$\frac{I_{Ty}}{\bar{I}_{Ty}} = \left(\frac{\pi}{24} \right) \frac{\cos(h) - \cos(h_s)}{\sin(h_s) - (2\pi h_s / 360) \cos(h_s)} \quad (3.6)$$

eşitlik kullanılmıştır. Bu eşitlik saatlik yayılı ışıının, günlük yayılı ışıına oranının matematiksel ifadesi olup, eşitlikteki I_{Ty} saatlik yatay yüzeye gelen yayılı ışıını ve $\bar{I}_{Ty}$ günlük yatay yüzeye gelen yayılı ışıını göstermektedir. Denklem (3.6)'dan yararlanabilmek için günlük ortalamalara gereksinim olduğundan atmosfer dış yatay yüzeyine gelen ışıını, yatay yüzeye gelen ışıını ve bulanıklık indisinin aylık ortalama günlük değerleri hesaplanmış ve Tablo 3.5'de verilmiştir. Günlük yayılı ışıının yatay yüzeye gelen günlük toplam ışıına oranı bulanıklık indisinin bir fonksiyonu şeklinde tanımlanan matematiksel bağıntı [54];

$$\frac{\bar{I}_{Ty}}{\bar{I}_T} = 1 - 1.112\bar{B}_i \quad (3.7)$$

kullanılarak aylık ortalama yayılı ve direkt ışıının değerleri hesaplanmış ve Tablo 3.6'de verilmiştir. Denklemdaki $\bar{B}_i$ günlük bulanıklık indisini göstermektedir. Aylık ortalama günlük değerler hesaplandıktan sonra Denklem (3.6)'den yararlanarak ilk etapta saatlik ortalama yayılı daha sonrada direkt ışıının şiddeti hesaplanmış ve Tablo 3.7 ve Tablo 3.8'de verilmiştir.

Tablo 3.2. Şanlıurfa ili için yatay yüzeye gelen saatlik ortalama ışınlım (I_T) değerlerinin aylara göre değişimi.

Saat	I_T (W/m ²)											
	Ay											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4	-	-	-	3	2	4	15	3	-	-	-	-
5	-	-	2	12	33	48	31	13	4	1	13	-
6	2	4	32	106	177	225	182	132	85	37	7	2
7	19	56	154	287	382	438	396	337	267	166	74	21
8	104	182	312	445	537	594	555	503	440	322	199	104
9	212	308	450	568	654	714	676	631	574	448	319	205
10	300	404	537	650	728	790	755	713	663	534	398	278
11	350	460	583	681	755	821	793	753	700	575	431	317
12	352	469	591	674	736	815	798	756	698	566	420	314
13	319	431	542	625	686	778	770	715	645	501	362	272
14	250	356	453	536	596	692	690	634	547	395	267	200
15	152	245	337	413	481	572	573	517	415	257	146	99
16	52	115	198	271	345	420	420	360	245	107	37	22
17	5	18	64	121	191	260	261	186	78	13	5	4
18	-	4	5	20	58	102	99	48	8	2	-	-
19	-	-	1	2	5	8	8	3	1	-	-	-

Tablo 3.3. Şanlıurfa ili için atmosfer dış yatay yüzeyine gelen saatlik ortalama ışınlım (I_D) değerlerinin aylara göre değişimi.

Saat	I_D (W/m ²)											
	Ay											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	59	33	-	-	-	-	-
6	-	-	-	129	257	300	285	184	28	-	-	-
7	-	78	247	394	515	541	537	449	295	137	-	-
8	222	312	509	640	756	765	772	696	544	395	242	183
9	437	513	734	851	963	958	974	908	758	617	451	395
10	602	667	906	1013	1121	1106	1129	1071	922	787	611	558
11	706	763	1015	1115	1221	1199	1226	1173	1025	894	712	660
12	741	796	1052	1150	1255	1231	1259	1208	1060	930	747	695
13	706	763	1015	1115	1221	1199	1226	1173	1025	894	712	660
14	602	667	906	1013	1121	1106	1129	1071	922	787	611	558
15	437	513	734	851	963	958	974	908	758	617	451	395
16	222	312	509	640	756	765	772	696	544	395	242	183
17	-	78	247	394	515	541	537	449	295	137	-	-
18	-	-	-	129	257	300	285	184	28	-	-	-
19	-	-	-	-	-	59	33	-	-	-	-	-

Tablo 3.4. Şanlıurfa ili için ortalama saatlik bulanıklık indisinin (B_i) aylara göre değişimi.

Saat	B_i											
	Ay											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	0.029	0.704	0.420	-	-	-	-	-
6	-	-	-	0.736	0.689	0.726	0.638	0.733	0.065	-	-	-
7	-	0.527	0.624	0.702	0.744	0.783	0.736	0.753	0.816	0.031	-	-
8	0.469	0.528	0.616	0.673	0.714	0.751	0.719	0.724	0.785	0.810	0.793	0.544
8	0.483	0.542	0.613	0.646	0.682	0.722	0.694	0.696	0.734	0.724	0.682	0.500
10	0.497	0.547	0.591	0.621	0.652	0.691	0.669	0.668	0.697	0.676	0.628	0.481
11	0.495	0.545	0.576	0.591	0.621	0.663	0.647	0.643	0.661	0.641	0.585	0.466
12	0.473	0.532	0.564	0.567	0.590	0.641	0.634	0.627	0.637	0.605	0.543	0.437
13	0.451	0.510	0.536	0.543	0.566	0.628	0.628	0.610	0.609	0.558	0.490	0.401
14	0.415	0.483	0.503	0.512	0.536	0.605	0.612	0.592	0.574	0.498	0.421	0.349
15	0.344	0.432	0.463	0.470	0.504	0.577	0.588	0.570	0.528	0.411	0.310	0.242
16	0.226	0.334	0.391	0.410	0.459	0.531	0.545	0.517	0.434	0.264	0.146	0.116
17	0.095	0.221	0.258	0.296	0.373	0.465	0.486	0.411	0.249	0.080	0.118	-
18	-	-	0.092	0.144	0.223	0.328	0.347	0.249	0.107	-	-	-
19	-	-	-	-	0.152	0.127	0.215	-	-	-	-	-

Tablo 3.5. Şanlıurfa ili için atmosfer dış yatay yüzeyine ($\bar{I}_D$) ve yatay yüzeye ($\bar{I}_T$) gelen günlük toplam ışıınım miktarları ve bulanıklık indisinin ($\bar{B}_i$) aylara göre değişimi.

	Ay											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\bar{I}_D(kJ/m^2gün)$	16830	19663	28346	33962	39316	39913	40216	36612	29534	23724	17204	15433
$\bar{I}_T(kJ/m^2gün)$	7621	10987	15340	19490	22918	26212	25279	22694	19332	14126	9641	6617
$\bar{B}_i$	0,453	0,559	0,541	0,574	0,583	0,657	0,629	0,620	0,655	0,595	0,560	0,429

Tablo 3.6. Şanlıurfa ili için aylık ortalama günlük toplam yayılı ($\bar{I}_{Ty}$) ve direkt ($\bar{I}_{Td}$) ışıınım miktarının aylara göre değişimi.

Aylar	Ay											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\bar{I}_{Ty}(kJ/m^2gün)$	3784	4162	6109	7052	8064	7070	7610	7052	5260	4774	3632	3463
$\bar{I}_{Td}(kJ/m^2gün)$	3838	6826	9230	12438	14854	19141	17669	15642	14072	9353	6005	3154

Tablo 3.7. Şanlıurfa ili için aylık ortalama gün boyunca yatay yüzeye gelen saatlik direkt (I_{Td}) ışınlm değerlerinin aylara göre değişimi.

Saat	$I_{Td}(W/m^2)$											
	Ay											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	37	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	98	148	174	120	105	-	-	-	-
7	-	44	112	243	332	377	311	279	254	-	-	-
8	54	116	215	354	444	491	432	401	372	265	145	63
9	113	197	301	430	517	569	509	487	454	337	203	116
10	165	257	344	472	545	604	551	528	500	375	239	151
11	192	290	365	470	535	607	560	535	505	377	246	168
12	185	289	363	440	498	587	551	524	482	348	221	157
13	160	257	314	391	446	552	522	482	419	283	170	125
14	115	201	249	312	372	476	457	411	328	193	106	80
15	58	124	174	222	282	379	362	321	220	99	39	27
16	13	45	89	129	185	257	247	193	100	24	4	2
17	-	4	20	44	86	141	134	71	16	-	2	-
18	-	-	2	4	16	40	35	9	1	-	-	-
19	-	-	-	-	1	1	2	-	-	-	-	-

Tablo 3.8. Şanlıurfa ili için yatay yüzeye gelen saatlik ortalama yayılı (I_{Ty}) ışınlm değerlerinin aylara göre değişimi.

Saat	$I_{Ty}(W/m^2)$											
	Ay											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-
6	-	-	0	17	40	46	51	18	-	-	-	-
7	-	17	51	60	63	58	73	48	-3	-	-	-
8	49	75	103	109	108	99	112	92	50	29	27	38
9	97	122	149	157	154	142	156	137	101	83	80	86
10	133	158	190	198	197	183	194	179	144	128	122	123
11	157	181	216	231	232	215	223	211	179	162	150	147
12	166	191	227	248	252	232	237	225	198	181	164	156
13	158	187	225	248	254	232	234	226	204	184	159	147
14	134	166	205	232	241	223	222	213	194	168	134	120
15	93	129	168	199	213	201	198	186	166	129	86	71
16	38	74	116	150	171	170	164	149	119	64	24	19
17	-	14	49	85	115	125	118	94	47	7	-	-
18	-	-	3	19	46	65	57	27	3	-	-	-
19	-	-	-	-	3	7	4	-	-	-	-	-

3.2. ANLIK IŞINIM ŞİDDETİ İÇİN MATEMATİKSEL MODEL SEÇİMİ

İklimsel koşullarda yıl ve gün boyunca yaşanan dinamik sürece paralel olarak güneş enerjisinde de benzer bir süreç yaşanır. Güneş enerjisi uygulamalarının bir çoğunun kullanabilirlikleri de bu süreçlere bağlı bir değişim gösterir. Bu tür uygulamaların başında gelen sistemlerden biride; fotovoltaiik sistemlerin direkt akupleli kombinasyonlarıdır [55]. Böylesi sistemlerin uzun dönem performanslarının hesaplanabilmesi ve optimum koşulların araştırılabilmesi için saatlik verilere gereksinim duyulur.

Meteorolojik ölçüm verileri yerine, uygun bir matematiksel modelin kullanılması tercih edilir. Çünkü; matematiksel açıdan optimum koşulların araştırılması ve bilgisayar simülasyonlarına adaptasyonları daha kolaydır. Anlık ışınlama ile ilgili literatürde eksonansiyel, sinüzoidal, polinomik karakterli bir çok model bulunmakta olup, bu modellerin genel özelliği günlük ortalamalar yardımıyla saatlik verilerin türetilmesidir [56,57]. Bu çalışmada en uygun modelin tespiti için literatürde en çok kullanılan Collares-Pereira-Rabl modeli, Garg -Garg modeli ve Liu-Jordan modeli [12,58], ve ayrıca Türkiye'nin iklimsel koşulları göz önünde bulundurularak Kılıç [59] tarafından geliştirilen model arasında seçim yapılmıştır. Seçim için meteorolojik ölçüm verileri ile modeller arasında farkın en az olması hedef olarak belirlenmiştir. En uygun modelin seçiminin nasıl yapıldığını sergilemek amacıyla, aylık ortalama mutlak hata ve standart hata değerleri hesaplanarak diyagramlar oluşturulmuştur. Ayrıca, ortalama sapma denen yeni bir büyüklük tanımlanmış ve tanımlanan bu büyüklük yardımıyla, modellerin kullanılması sonucunda oluşacak hataların, dizaynı yapılacak sistemler üzerinde meydana getireceği olumsuz etkileri kıyaslama olanağı sağlanmıştır.

Yapılan gözlemler sonucunda yıl ve gün boyunca Şanlıurfa için ölçüm verilerinden en az sapmayı Liu-Jordan, en büyük sapmayı ise Kılıç tarafından geliştirilen modelin gösterdiği görülmüştür. Kılıç modelinin uyum açısından tüm yıl ve gün boyunca büyük sapmalar göstermesinin nedeni, öğle sonrası saatlerde gösterdiği sapmaların diğer modellere nazaran daha büyük olmasıdır. Bunun aksine öğle öncesi saatlerde Kılıç modelinin gösterdiği sapma diğer modellere nazaran daha küçüktür. Modellerin ölçüm verilerinden gösterdiği sapmalar, ışınlama şiddetinin büyük olduğu aylarda, ciddi seviyede olmasına rağmen günlük bazda kabul edilebilir

seviyelerdir. Tüm modellerin gösterdiği sapmaların, özellikle ışıının maksimum seviyelerde olduğu öğle saatlerinde minimum olması hesaplamalar açısından olumlu bir faktördür.

3.2.1. Kullanılan Matematiksel Modeller

Liu-Jordan (L.J.) Modeli

Liu -Jordan tarafından yatay yüzeye gelen saatlik ışıının, günlük ışıına oranı;

$$\frac{I_T}{\bar{I}_T} = \frac{\pi}{24} \frac{\cos(h) - \cos(h_s)}{\sin(h_s) - (2\pi h_s / 360) \cos(h_s)} \quad (3.8)$$

şeklinde tanımlanmıştır.

Collares-Pereira-Rabl (C.P.R.) Modeli

Collares-Pereira-Rabl tarafından yatay yüzeye gelen saatlik ışıının günlük ışıına oranı; Liu-Jordan bağıntısından yararlanılarak aşağıdaki gibi tanımlanmıştır;

$$\frac{I_T}{\bar{I}_T} = (a + b \cos(h)) \frac{\pi}{24} \frac{\cos(h) - \cos(h_s)}{\sin(h_s) - (2\pi h_s / 360) \cos(h_s)} \quad (3.9)$$

a ve b katsayıları:

$$a = 0.409 + 0.5016 \sin(h_s - 60) \quad (3.10)$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 \sin(h_s - 60) \quad (3.11)$$

Garg-Garg (G.G.) Modeli

Garg-Garg Hindistan'ın bazı yerel verilerinden yararlanarak Liu-Jordan'un bağıntısını;

$$\frac{I_T}{\bar{I}_T} = \frac{\pi}{24} \frac{\cos(h) - \cos(h_s)}{\sin(h_s) - (2\pi h_s / 360) \cos(h_s)} - 0.008 \sin(3(h - 0.65)) \quad (3.12)$$

şeklinde düzenleyerek yeni bir model teklif etmişlerdir.

Kılıç (K.) Modeli

Kılıç bazı yerel iklimsel verilerden yararlanarak hem sinüzoidal hem de eksponansiyel karakterli aşağıdaki denklemi önermiştir:

$$\frac{I_T}{I_o} = \frac{\pi}{4t_o} \left[\cos\left(\frac{180}{2} \frac{h}{h_s}\right) + \frac{2}{\sqrt{\pi}}(1 - \psi) \right] \quad (3.13)$$

$$\psi = \exp\left[-4\left(1 - \frac{|h|}{h_s}\right)\right] \quad (3.14)$$

3.2.2. Modellerden Elde Edilen Sonuçlar

Dört model arasından Şanlıurfa'nın anlık ışıyım verileri için matematiksel model seçimi yapılmıştır. Seçim için her bir modelden elde edilen veriler meteorolojik ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Seçimde modellerin yıl ve gün boyunca gösterdiği değişimler bilgisayar programı yardımıyla incelenmiş ve yılın tüm aylar için hazırlanan diyagramlar Şekil 3.5'de gösterilmiştir.

Ortalama aylık oluşan mutlak hata uygun model seçimi için önemli bir parametre olup,

$$MH = |I_{mo} - I_{oi}| \quad (3.15)$$

bağıntısı ile hesaplanabilmektedir. Denklemdaki I_{mo} modeller sonucunda elde edilen verileri, I_{oi} meteorolojik ölçüm verilerini göstermektedir. Yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen saatlik ortalama mutlak hataların izlediği trendi gösteren Şekil 3.6'daki diyagramlar hazırlanmıştır. Ayrıca Şekil 3.7'deki diyagramlarda ortalama mutlak hatanın yıl boyunca ortalama günlük gösterdiği dağılım gösterilmiştir. Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'deki diyagramlardan çalışmada ele alınan modellerin kullanılması durumunda oluşacak mutlak hataların gün ve yıl boyunca alacakları büyüklükler kolayca saptanabilir. Modellerden elde edilen verilerin meteorolojik ölçüm verilerine göre ortalama aylık yıl boyunca meydana gelen standart hatalar da hesaplanmıştır. Hesaplamalarda;

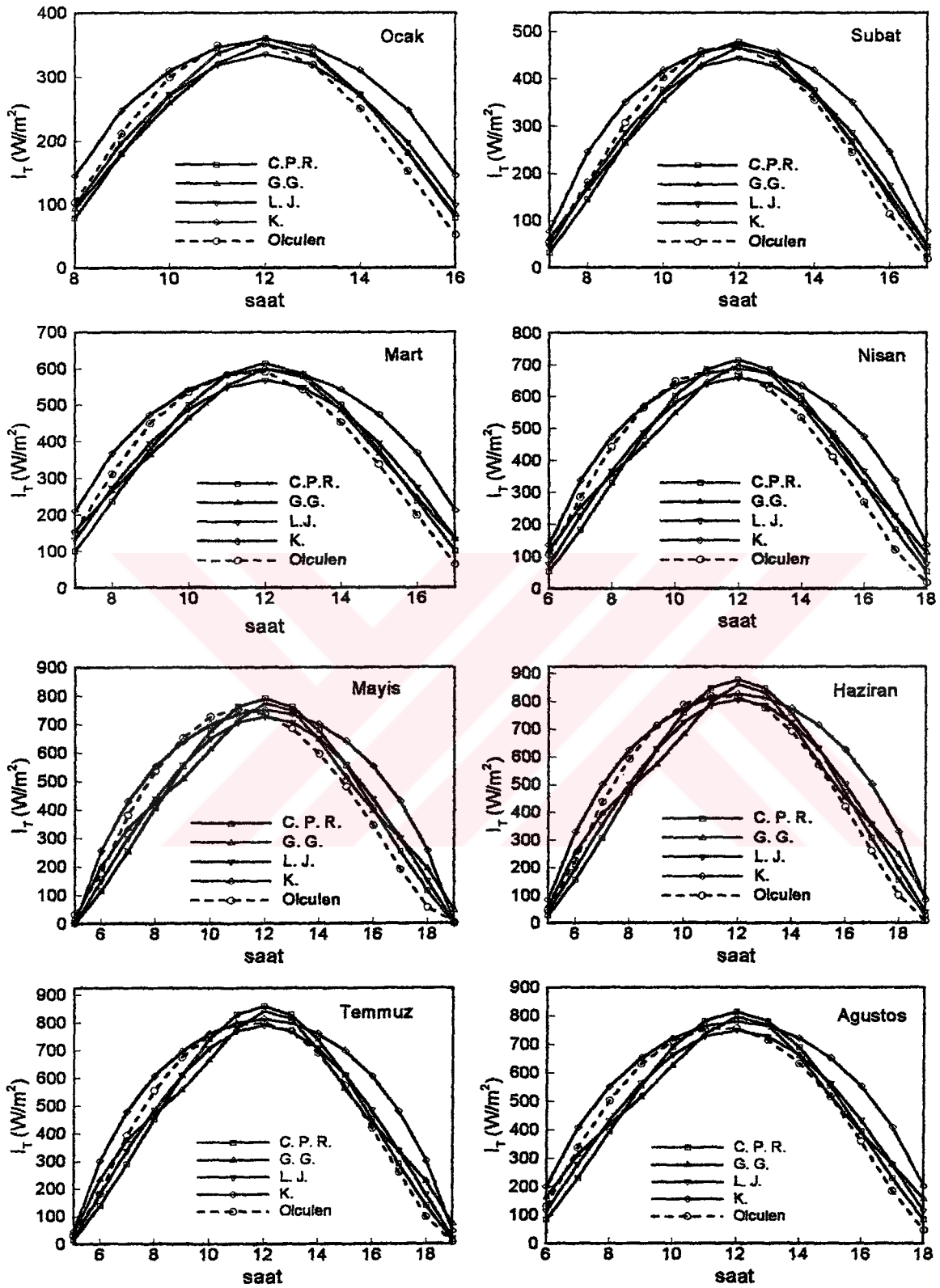
$$SH = \left[\frac{\sum_{i=1}^{m_p} (I_{mo} - I_{ol})^2}{m} \right]^{1/2} \quad (3.16)$$

şeklinde bir bağıntı kullanılmıştır. Bağıntıdaki m işlem dahilindeki veri sayısını göstermektedir. Yapılan hesaplamalar sonucunda her bir model için elde edilen sonuçlardan Şekil 3.8'deki diyagram hazırlanmıştır. Bu diyagramdan her model için standart sapmaların yıl boyunca gösterdikleri değişim izlenebilir. Ayrıca elde edilen sonuçlar sayısal değer olarak Tablo 3. 9'da verilmiştir.

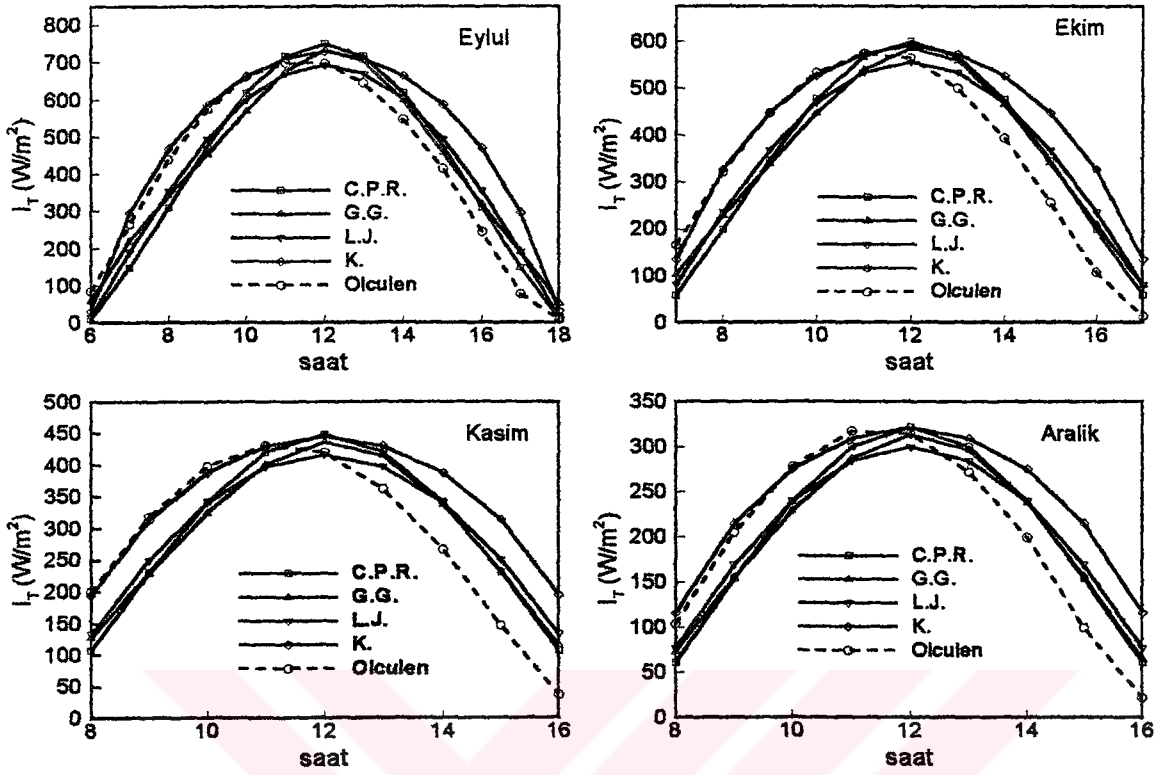
Standart sapma sadece iki nokta arasındaki ilişkiyi tanımladığından sapma derecesinin gün boyunca herhangi bir sistemin performansı üzerinde meydana getireceği etkiyi tanımlamakta yetersiz kalmaktadır. Bu yetersizliği giderebilmek amacıyla Denklem (3.11) yeniden düzenlenerek,

$$OS = \left[\frac{\sum_{i=1}^{m_p} (I_{mo} - I_{ol})^2}{m_p (I_{Tg})^2} \right]^{1/2} * 1000 \quad (3.17)$$

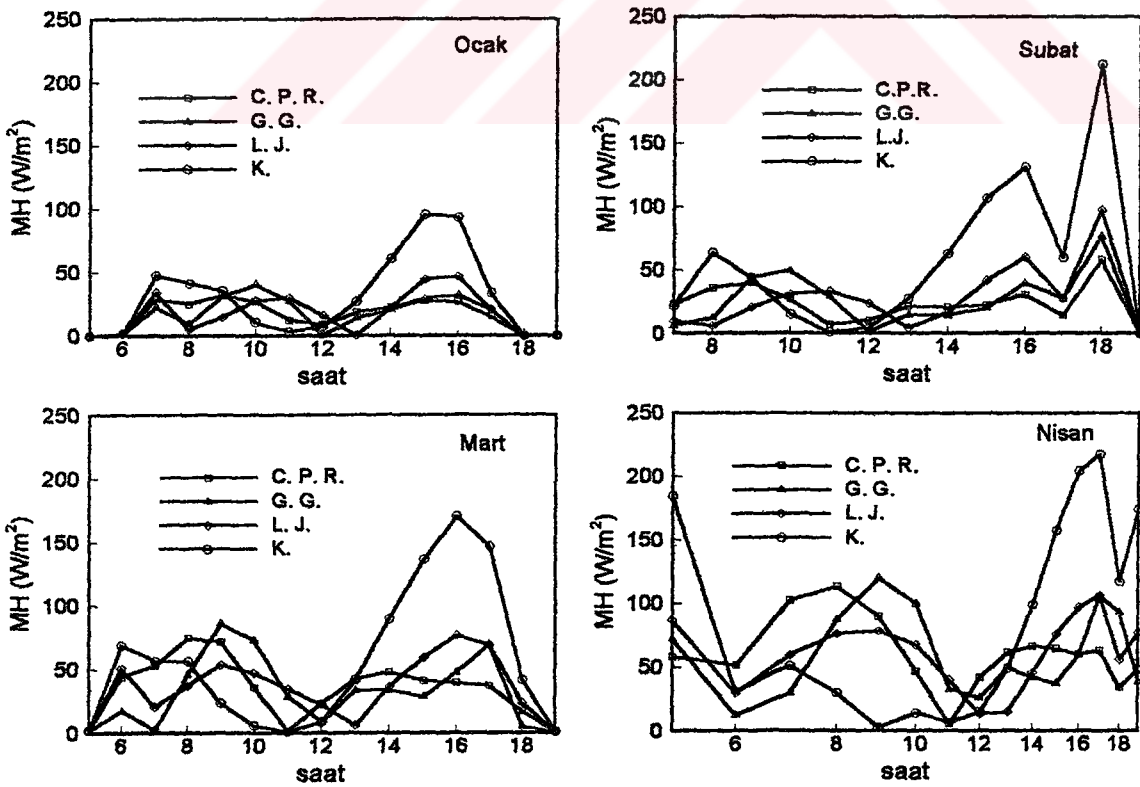
bağıntısıyla verilen ortalama sapma değerine ulaşmak mümkündür. Bu değer modeller arasındaki sapmaların gün ve yıl boyunca sistem üzerinde meydana getireceği etki derecesinin kıyaslamasına olanak tanımaktadır. Ortalama sapma değerlerinin yıllık değişimini gösteren diyagramlar Şekil 3.9'da gösterilmiştir. Ayrıca bu büyüklüğünün sayısal değerleri de Tablo 3.10'da verilmiştir.



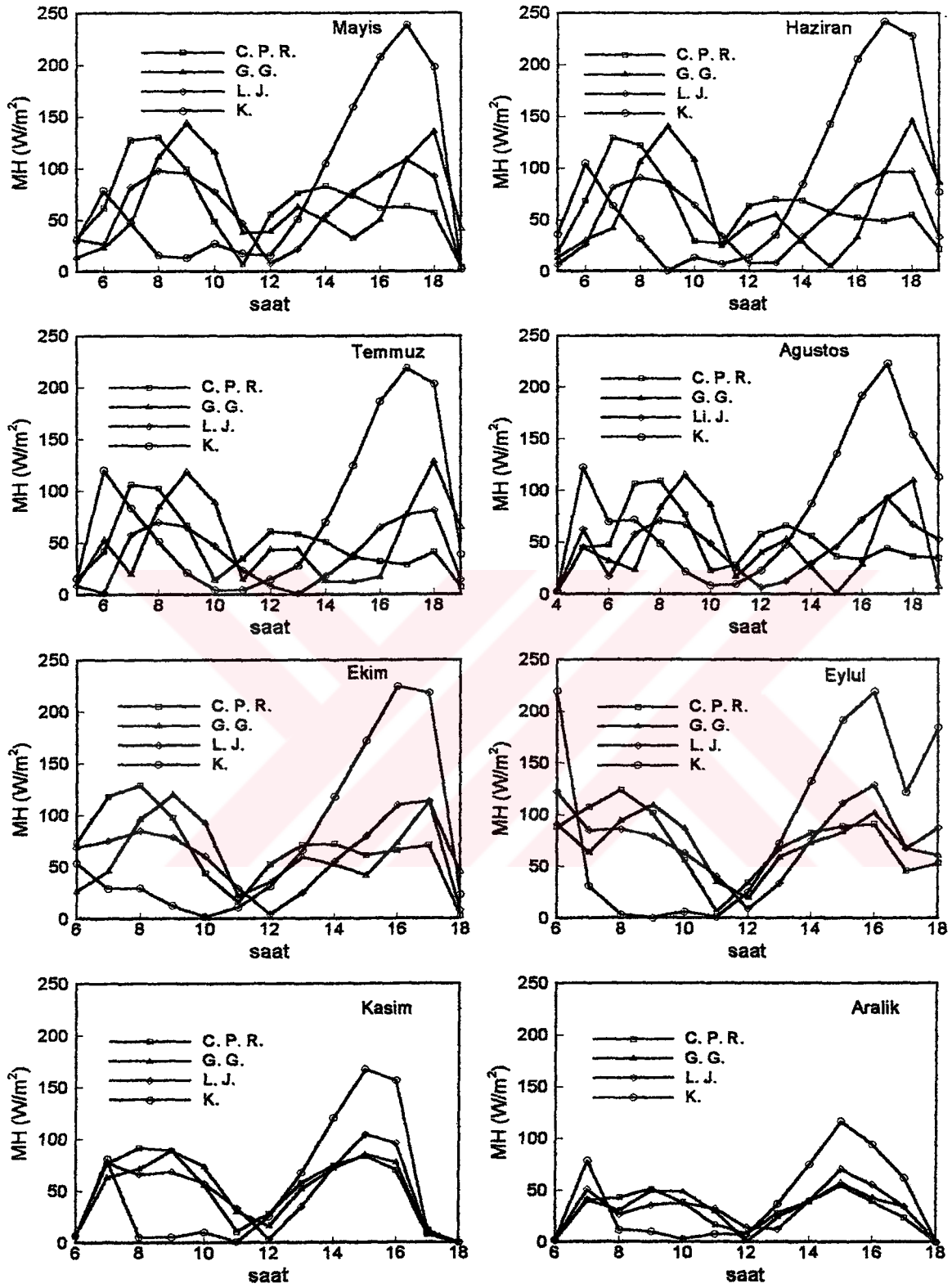
Şekil 3.5. Şanlıurfa için saatlik ortalama meteorolojik ölçüm ve modeller sonucunda elde edilen ışıma (I_T) verilerinin tüm aylar için gün boyunca değişimi.



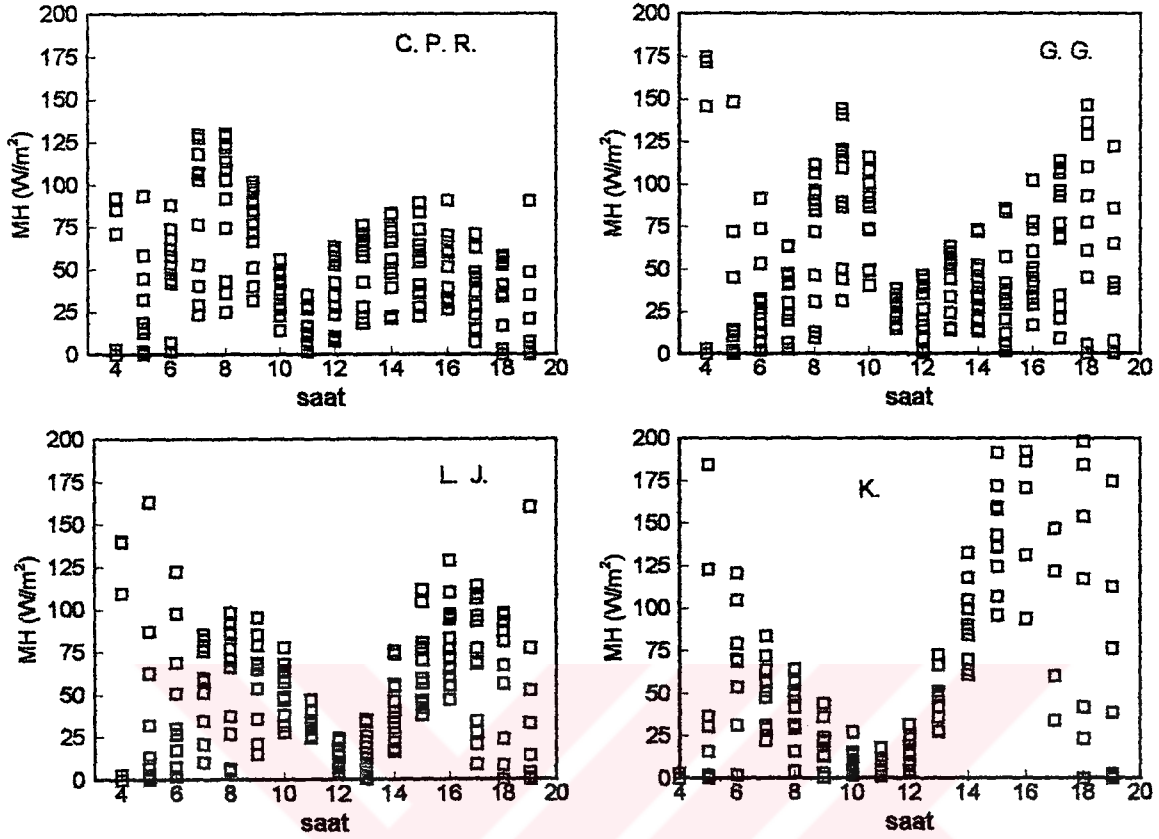
Şekil 3.5. (Devamı) Şanlıurfa için saatlik ortalama meteorolojik ölçüm ve modeller sonucunda elde edilen ışınlam (I_T) verilerinin tüm aylar için gün boyunca değişimi.



Şekil 3. 6. Şanlıurfa için meteorolojik ölçüm verilerine göre modeller sonucunda oluşan mutlak hatanın (MH) ortalama tüm aylar için saatlik değişimi.



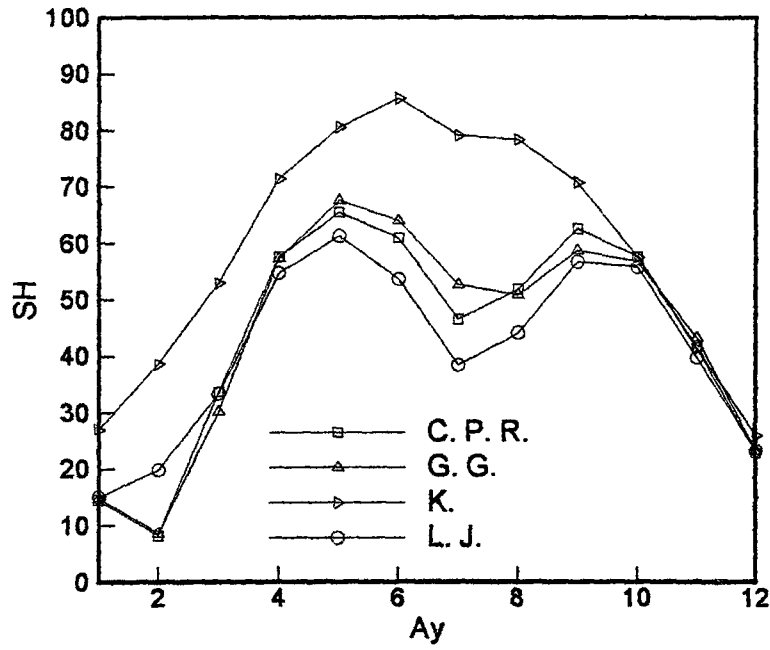
Şekil 3. 6. (Devamı) Şanlıurfa için meteorolojik ölçüm verilerine göre modeller sonucunda oluşan mutlak hatanın (MH) ortalama tüm aylar için saatlik değişimi.



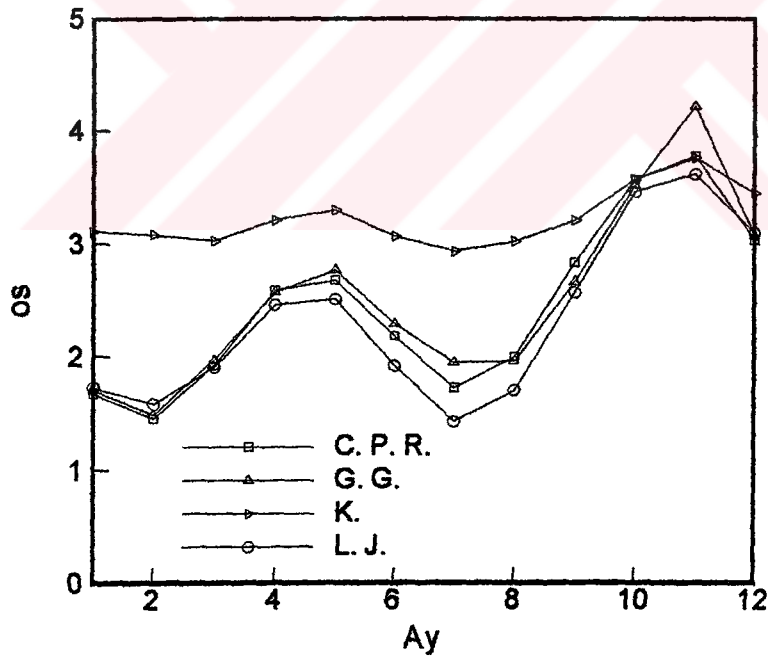
Şekil 3.7. Şanlıurfa için meteorolojik ölçüm verilerine göre modeller sonucunda oluşan mutlak hatanın (MH) ortalama gün boyunca dağılımı.

Tablo 3.9. Collares-Pereira-Rabl, Garg-Garg, Liu-Jordan ve Kılıç modellerinin meteorolojik ölçüm verilerine göre yıl boyunca oluşan standart hata değerleri.

Ay	SH (W/m^2 gün)			
	C. P. R	G. G.	L. J.	K.
1	14.573	14.896	15.095	27.098
2	8.259	8.669	19.887	38.672
3	33.721	30.253	33.418	53.036
4	57.699	57.371	54.841	71.545
5	65.485	67.670	61.348	80.669
6	61.031	64.041	53.734	85.766
7	46.589	52.697	38.534	79.185
8	51.904	50.977	44.199	78.447
9	62.631	58.856	56.827	70.853
10	57.697	56.794	55.887	57.642
11	41.654	43.398	39.897	41.472
12	22.924	23.214	23.387	26.067



Şekil 3.8. Şanlıurfa için meteorolojik ölçüm verilerine göre modeller sonucunda oluşan standart hatanın (SH) aylık değişimi.



Şekil 3.9. Meteorolojik ölçüm verilerine göre modeller sonucunda oluşan ortalama sapmanın (OS) aylık dağılımı.

Tablo 3.10. Collares-Pereira-Rabl, Garg-Garg, Liu-Jordan ve Kılıç modellerinin meteorolojik ölçüm verilerine göre yıl boyunca oluşan ortalama sapma değerleri.

Ay	OS			
	C. P. R	G. G.	L. J.	K.
1	1.673	1.710	1.733	3.111
2	1.454	1.487	1.584	3.080
3	1.923	1.972	1.906	3.025
4	2.590	2.576	2.462	3.212
5	2.679	2.768	2.510	3.300
6	2.183	2.290	1.922	3.068
7	1.728	1.954	1.429	2.937
8	2.001	1.965	1.704	3.025
9	2.835	2.664	2.572	3.207
10	3.574	3.518	3.462	3.570
11	3.780	4.220	3.621	3.764
12	3.031	3.070	3.093	3.447

3. 3. PV PANEL İÇİN OPTİMUM EĞİM AÇILARININ SAPTANMASI

Güneş ışıının şiddeti, güneş ışıınının yatayla yaptığı açılar, birer fonksiyonu olup, güneş enerjisinden maksimum şekilde yararlanabilmek için panel veya kollektörlerin güneşi gün içerisinde iki eksenle takip etmeleri gerekir. Bu tarz güneşi takip eden sistemlerde yüzde kırk daha fazla güneş enerjisi elde edilebilmesine rağmen, sistemlerin yüksek maliyetli olması ve takip için ek bir enerjiye gereksinim duyması nedeniyle, kullanımları sınırlıdır. Türkiye'nin de yer aldığı kuzey yarımkürede sabit optimum eğim açılarında güneye dönük, yani yüzey azimut açılarının sıfır olacak şekilde yatay yüzeye yerleştirilmesi tercih edilir [7,8]. Optimum eğim açılarının saptanabilmesinin ilk koşulu eğimli yüzeylere gelen ışıının şiddetinin hesaplanabilmesidir. Meteoroloji istasyonlarında yalnızca yatay yüzeye gelen ışıının ile ilgili ölçümler yapıldığından, eğimli yüzeyler için ek hesaplamalara gereksinim duyulur. Literatürde bu amaçla geliştirilmiş bir çok model bulunmakta olup, bunların ortak özellikleri yatay yüzeye gelen ışıının şiddetinin birer fonksiyonu olmalarıdır.

Bu çalışmada, güneye dönük yatay yüzeye yerleştirilmiş, panellerin ortalama aylık ve saatlik optimum eğim açıları Şanlıurfa koşullarında tespit edilmiştir. Ayrıca yıl boyunca 37° sabit eğim açısı ile yerleştirilmiş bir panel yüzeyine gelen ışıının şiddetleri hesaplanmıştır. Hesaplamalarda daha önceki bölümlerde meteorolojik

ölçüm verilerinden yararlanarak oluşturulan, ortalama direkt ve yayılı ışıınım veri tabanları kullanılmıştır. Ortalama aylık ve saatlik optimum eğim açlarına ek olarak 37° eğim açısı için hesaplama yapılmasının nedeni, klasik güneş enerjisi uygulamalarında yıllık optimum eğim açısı olarak enlem açısının kullanılmasıdır.

Değerlendirmeler panel yüzeyine gelen günlük ışıınım miktarları göz önüne alınarak yapılmıştır. Kış aylarında bu üç farklı yerleştirme için belirgin bir fark olmadığı, fakat yaz aylarında ciddi farklar olduğu hesaplamalar sonucunda saptanmıştır. Panel yüzeyi üzerine gelen günlük toplam ışıınım şiddeti açısından en uygun yerleştirme şeklinin optimum saatlik eğim açısı olduğu görülse de, saatlik optimum eğim açısı koşulu ile arasındaki farkın az olması ve kolay uygulanabilirliği nedeniyle panellerin optimum aylık eğim açılarında yerleştirilmesinin daha uygun olacağı sonucuna ulaşılmıştır.

3.3.1 Güneye Dönük Eğimli Yüzeyler Üzerine Gelen Güneş Işıınım Denklemleri

Güneye dönük eğimli bir yüzey üzerine gelen toplam ışıınım miktarı;

$$I_{Te} = R_d I_{Td} + R_y I_{Ty} + I_r \rho \left(\frac{1 - \cos(e)}{2} \right) \quad (3.18)$$

şeklinde tanımlanır. Denklemdaki ρ yansıma katsayısını ve e panel eğim açısını göstermektedir. Denklem (3.18)'den de görüleceği üzere eğimli yüzeylere gelen ışıınım şiddeti direkt, yayılı ve yansıyan olmak üzere üç bileşen içermekte olup, yansıyan bileşenin toplam ışıınım içindeki payının küçük olması nedeniyle bu bileşen ihmal edilebilir [9].

Güneye dönük bir yüzey için direkt ışıınım faktörü, güneş geliş açısı ve zenit açılarının kosinüslerinin oranı olup,

$$R_d = \frac{\cos(i)}{\cos(z)} = \frac{\cos(E - e) \cos(\delta) \cos(h) + \sin(E - e) \sin(\delta)}{\cos(E) \cos(\delta) \cos(h) + \sin(E) \sin(\delta)} \quad (3.19)$$

denklemleri ile ifade edilebilir. Denklem gün boyunca integre edilirse,

$$\overline{R_d} = \frac{\cos(E - e)\cos(\delta)\sin(h'_s) + (\pi/180)h'_s\sin(E - e)\sin(\delta)}{\cos(E)\cos(\delta)\sin(h_s) + (\pi/180)h_s\sin(E)\sin(\delta)} \quad (3.20)$$

şeklini alır. Denklemdaki h'_s eğimli yüzey için güneş batış açısı olup,

$$h'_s = \min[h_s, \arccos(-\tan(E - e)\tan(\delta))] \quad (3.21)$$

şeklinde tanımlanır. Yayılı ışıınım faktörü için ise Liu ve Jordan tarafından aşağıdaki denklem önerilmektedir [28].

$$R_d = \frac{1 + \cos(e)}{2} \quad (3.22)$$

3.3.2. Güneye Dönük 37° Sabit Eğimle Yerleştirilmiş Yüzeye Gelen Toplam Işıınım

Denklem (3.19)'dan yararlanarak güneye yönlendirilmiş 37° eğimli yüzeyin direk ışıınım faktörünün ortalama saatlik değerleri her ay için hesaplanmış ve Tablo 3. 11'de verilmiştir. Yayılı ışıınım faktörü sadece eğim açısının bir fonksiyonu olduğundan yıllık sabit eğim açısı için sabit kalır. 37° eğimli yüzeyler için bu değer 0.899'dır. Şanlıurfa ili için daha önce hesaplanan yatay yüzeye gelen direkt ve yayılı ışıınım şiddetleri ile Denklem (3.19) ve (3.22) vasıtasıyla hesaplanan direkt ve yayılı ışıınım faktörleri, Denklem (3.18) kullanılarak bilgisayar programı ile 37° sabit eğimle yerleştirilmiş yüzeye gelen toplam ışıınım hesaplanmış ve elde edilen değerler Tablo 3.12'de verilmiştir.

3.3.3. Güneye Dönük Optimum Aylık Ortalama Eğimle yerleştirilmiş Yüzeylere Gelen Toplam Işıınım

Güneye dönük bir yüzey için optimum aylık ortalama eğim açıları; Denklem (3.20) ve (3.22)'nin Denklem (3.18)'deki yerlerine yerleştirildikten sonra türevinin sıfıra eşitlenmesi sonucu elde edilecek eşitliğin çözümü ile hesaplanabilir. Ancak bu çalışmada böylesi bir matematiksel süreç yerine bilgisayar programları yardımıyla denklemin alabileceği tüm değerler hesaplanmış ve hesaplanan değerler içindeki optimumlar saptanmıştır. Her ay için saptanan optimum eğim açıları ve bu

açılara karşılık gelen direkt ve yayılı ışıınım faktörleri Tablo 3.13’de verilmiştir. Optimum aylık ortalama eğim açılarında yerleştirilmiş yüzey üzerine gelen saatlik ışıınımı hesaplayabilmek için direkt ışıınım faktörü hesaplanmış ve Tablo 3.14’de verilmiştir. Daha sonra her ay için hesaplanan ortalama saatlik ışıınım değerleri Tablo 3.15’de verilmiştir.

3.3.4. Güneye dönük Optimum Saatlik Ortalama Eğimle Yerleştirilmiş Yüzeye Gelen Toplam Işıınım

Her ay için optimum saatlik ortalama eğim açısının tespitinde matematiksel bir süreç yerine Denklem (3.18), (3.19) ve (3.22)’nin birleştirilmesi sonucu oluşan bağıntının, bilgisayar programları yardımıyla alabileceği tüm değerler hesaplanmış ve bu değerler içerisinde maksimum ışıınım değerini sağlayan eğim açısının seçilmesi şeklinde bir süreç izlenmiştir. Bu şekilde hesaplanan optimum eğim açıları Tablo 3.16’da ve bu eğim açılara karşılık gelen direkt ışıınım faktörlerinin aldıkları değerler Tablo 3.17’ de verilmiştir. Optimum saatlik ortalama eğim açısı koşullarındaki yüzeye gelen ışıınım şiddeti değerleri ise Tablo 3.18’ de verilmiştir.

Tablo 3.11. Güneye dönük 37° eğimli bir yüzey için saatlik ortalama direkt açı faktörlerinin (R_d) aylara göre değişimi.

Saat	R_d											
	Av											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	3.818	1.430	0.845	0.629	0.558	0.588	0.738	1.126	2.476	-	-
8	3.004	1.922	1.339	1.002	0.828	0.762	0.790	0.921	1.184	1.684	2.600	3.512
9	2.131	1.662	1.313	1.065	0.919	0.861	0.886	0.998	1.204	1.530	1.978	2.299
10	1.889	1.568	1.301	1.095	0.967	0.914	0.937	1.037	1.213	1.471	1.788	1.994
11	1.794	1.529	1.296	1.110	0.990	0.940	0.962	1.056	1.217	1.445	1.713	1.879
12	1.768	1.517	1.295	1.114	0.997	0.948	0.970	1.062	1.218	1.437	1.691	1.848
13	1.794	1.529	1.296	1.110	0.990	0.940	0.962	1.056	1.217	1.445	1.713	1.879
14	1.889	1.568	1.301	1.095	0.967	0.914	0.937	1.037	1.213	1.471	1.788	1.994
15	2.131	1.662	1.313	1.065	0.919	0.861	0.886	0.998	1.204	1.530	1.978	2.299
16	3.004	1.922	1.339	1.002	0.828	0.762	0.790	0.921	1.184	1.684	2.600	3.512
17	-	3.818	1.430	0.845	0.629	0.558	0.588	0.738	1.126	2.476	-	-
18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tablo 3.12. Güneye dönük 37^0 eğimli bir yüzey üzerine gelen ışımanın (I_{Te}) aylara göre değişimi.

Saat	$I_{Te}(W/m^2)$											
	Av											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	15	36	41	46	16	-	-	-	-
7	-	183	206	259	265	263	249	249	289	0	-	-
8	206	290	380	453	465	463	442	452	485	472	401	255
9	328	437	529	599	614	618	591	609	637	590	473	344
10	431	545	618	695	704	716	690	708	736	666	537	412
11	486	606	667	729	738	764	739	755	775	690	556	448
12	476	610	674	713	723	765	747	758	765	663	521	430
13	429	561	609	657	670	727	712	712	693	574	434	367
14	338	464	508	550	576	635	628	618	572	435	310	267
15	207	322	379	415	451	507	499	488	414	267	154	126
16	73	153	134	174	217	259	253	222	136	98	32	24
17	-	28	73	83	100	125	86	92	18	-	-	-
18	-	-	-	4	5	51	24	3	-	-	-	-
19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tablo 3.13. Güneye dönük bir yüzey için aylık ortalama optimum eğim açıları (e) ve bu koşullarda, direkt($\bar{R}_d$)-yaylı ($\bar{R}_y$) aç faktörleri.

	Ay											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$e(^0)$	55	48	34	19	5	0	0	14	31	46	55	57
$\bar{R}_d$	2.275	1.736	1.312	1.075	1.003	0.997	1.000	1.033	1.199	1.580	2.113	2.452
$\bar{R}_y$	0.787	0.835	0.915	0.973	0.998	1.000	1.000	0.985	0.929	0.847	0.787	0.723

Tablo 3.14. Güneye dönük aylık optimum eğim açılı bir yüzey için saatlik ortalama direkt aç faktörlerinin (R_d) aylara göre değişimi.

Saat	R_d											
	Av											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-	-
6	-	-	-	0.515	0.881	1	1	0.650	1.138	-	-	-
7	-	4.392	1.415	0.971	0.972	1	1	0.946	1.187	2.697	-	-
8	3.575	2.054	1.331	1.056	1.001	1	1	1.020	1.204	1.752	3.022	4.321
9	2.388	1.734	1.307	1.090	1.014	1	1	1.051	1.211	1.568	2.177	2.633
10	2.057	1.619	1.296	1.106	1.021	1	1	1.066	1.215	1.497	1.919	2.208
11	1.929	1.570	1.291	1.114	1.024	1	1	1.074	1.216	1.466	1.816	2.049
12	1.894	1.556	1.290	1.116	1.025	1	1	1.076	1.215	1.457	1.788	2.005
13	1.929	1.570	1.291	1.114	1.024	1	1	1.074	1.211	1.466	1.816	2.049
14	2.057	1.619	1.296	1.106	1.021	1	1	1.066	1.204	1.497	1.919	2.208
15	2.388	1.734	1.307	1.090	1.014	1	1	1.051	1.187	1.568	2.177	2.633
16	3.575	2.054	1.331	1.056	1.001	1	1	1.020	1.138	1.752	3.022	4.321
17	-	4.392	1.415	0.971	0.972	1	1	0.946	0.176	2.697	-	-
18	-	-	-	0.515	0.881	1	1	0.650	-	-	-	-
19	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-	-

Tablo 3.15. Güneye dönük aylık optimum eğimli bir yüzey üzerine gelen saatlik ortalama ışıınım (I_{Te}) değerlerinin aylara göre değişimi.

Saat	I_{Te} (W/m ²)											
	Ay											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5	-	-	-	-	-	11	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	67	170	220	171	86	292	-	-	-
7		207	205	294	386	435	384	311	488	-	-	-
8	232	301	380	480	552	590	544	499	640	489	459	302
9	346	444	530	621	678	711	665	647	739	599	505	372
10	444	548	620	715	753	787	745	739	780	670	555	428
11	494	606	669	748	779	822	783	782	770	690	565	458
12	481	609	676	732	762	819	788	786	698	661	524	435
13	433	560	611	677	710	784	756	740	577	571	434	370
14	342	464	510	571	620	699	679	648	419	431	309	269
15	212	323	381	435	498	580	560	521	136	265	152	126
16	76	154	133	185	256	327	311	245	18	96	31	23
17	-	29	73	92	134	192	142	111	-	-	-	-
18	-	-	-	6	20	97	62	9	-	-	-	-
19	-	-	-	-	-	5	2	-	-	-	-	-

Tablo 3.16. Güneye dönük bir yüzey için saatlik ortalama optimum eğim açılarının (e) aylara göre değişimi.

Saat	e (°)											
	Ay											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-	-
6	-	-	-	1	1	1	1	1	91	-	-	-
7		78	41	5	1	1	1	1	29	91	-	-
8	69	56	37	17	4	1	1	11	32	55	71	75
9	58	49	35	22	11	6	8	17	32	48	60	62
10	53	45	34	23	14	10	12	20	32	45	54	56
11	51	44	34	24	16	12	14	21	32	42	50	52
12	49	43	33	23	16	13	14	21	31	41	48	50
13	49	43	32	22	15	12	14	20	30	40	47	49
14	50	43	32	21	13	10	11	18	29	39	46	50
15	52	44	31	18	9	6	8	15	27	37	44	48
16	57	47	40	17	3	1	1	11	31	33	38	39
17	-	62	26	4	1	1	1	1	30	91	-	-
18	-	-	-	1	1	1	1	1	1	-	-	-
19	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-	-

Tablo 3. 17. Güneye dönük saatlik ortalama optimum eğim açılarındaki yüzey için direkt açı faktörlerinin (R_d) aylara göre değişimi.

Saat	R_d											
	Av											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	0.977	0.977	0.977	0.977	0.977	-	-	-	-
7	-	5.108	1.442	1.003	0.995	0.993	0.994	0.998	1.139	2.784	-	-
8	3.779	2.104	1.339	1.056	1.001	0.999	1.000	1.021	1.188	1.778	3.151	4.608
9	2.408	1.738	1.309	1.093	1.020	1.006	1.011	1.054	1.205	1.572	2.195	2.668
10	2.048	1.611	1.296	1.113	1.038	1.018	1.026	1.075	1.213	1.496	1.917	2.204
11	1.915	1.561	1.291	1.124	1.049	1.027	1.036	1.087	1.216	1.461	1.805	2.029
12	1.872	1.545	1.288	1.125	1.052	1.030	1.039	1.090	1.216	1.450	1.771	1.977
13	1.905	1.558	1.286	1.121	1.048	1.027	1.036	1.086	1.213	1.456	1.792	2.009
14	2.030	1.603	1.291	1.110	1.037	1.018	1.026	1.074	1.208	1.479	1.876	2.162
15	2.361	1.715	1.297	1.088	1.019	1.006	1.011	1.052	1.197	1.530	2.079	2.519
16	3.617	2.045	1.343	1.056	1.001	0.999	1.000	1.021	1.187	1.639	2.628	3.611
17	-	4.892	1.358	1.003	0.995	0.993	0.994	0.998	1.138	2.784	-	-
18	-	-	-	0.977	0.977	0.977	0.977	0.977	0.977	-	-	-
19	-	-	-	-	-	0.828	0.701	-	-	-	-	-

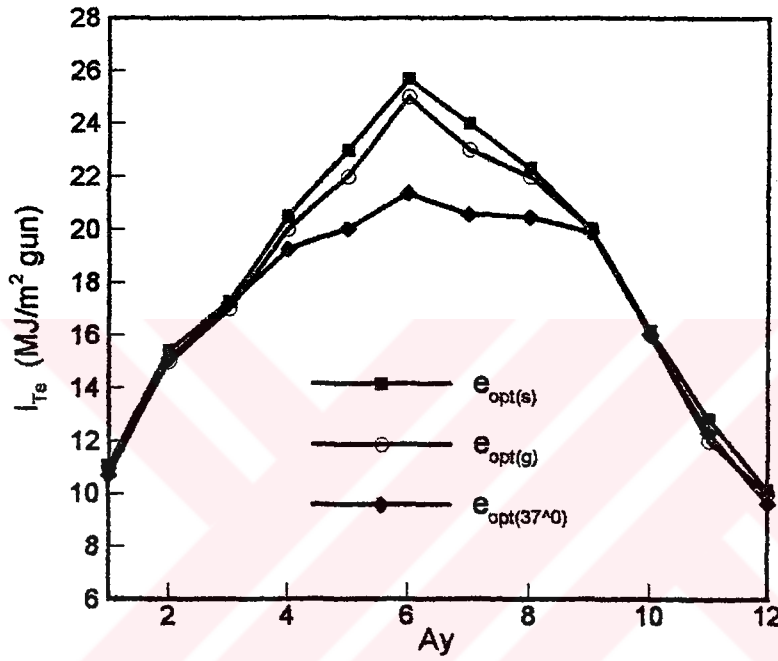
Tablo 3. 18. Güneye dönük saatlik ortalama optimum eğim açılı bir yüzey üzerine gelen saatlik ortalama ışınlam (I_{Te}) değerlerinin aylara göre değişimi.

Saat	I_{Te} (W/m ²)											
	Av											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5	-	-	-	-	-	10	0	-	-	-	-	-
6	-	-	-	113	185	216	168	121	0	-	-	-
7	-	235	206	304	393	432	382	326	292	0	-	-
8	237	303	380	480	552	589	544	500	488	494	475	314
9	346	443	530	621	680	714	670	647	640	599	506	373
10	444	549	620	716	760	797	757	741	739	670	555	429
11	496	608	669	749	789	836	800	786	780	692	567	460
12	484	612	676	733	771	834	806	789	770	664	528	438
13	436	562	612	677	717	796	771	743	699	574	438	373
14	344	466	511	571	624	706	689	649	578	435	312	272
15	212	324	382	436	499	582	563	521	420	267	155	127
16	76	154	134	185	256	327	311	246	136	98	32	24
17	-	30	74	95	137	191	141	115	18	0	-	-
18	-	-	-	8	22	96	61	12	1	-	-	-
19	-	-	-	-	-	5	1	-	-	-	-	-

3.3.5. Optimum PV Panel Eğim Açısının Seçimi

Güneye yönlendirerek yatay yüzeye yerleştirilmiş yüzeyler için optimum aylık ve saatlik ortalama eğim açıları tespit edilmiş ve bu koşullara ek olarak yıl boyunca 37° sabit eğim açısındaki yüzey üzerine gelen ışınlam miktarları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 3.10'da özetlenmiştir. Göz önüne alınan bu üç farklı dizayn

arasında kış ayları için belirgin bir fark olmamasına karşın yaz aylarında bu durum değişmektedir. Panel yüzeyi üzerine gelen günlük toplam ısıtım şiddeti açısından en uygun yerleştirme şeklinin optimum saatlik ortalama eğim açısı olduğu görülse de aradaki farkın az olması, kolay ve ekonomik uygulanabilirliği açısından optimum aylık ortalama eğim açılarındaki yerleştirilmesinin daha uygun olacağı sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 3.10. Güneye dönük saatlik ($e_{opt(s)}$) ortalama, aylık ($\alpha_{opt(g)}$) ortalama optimum ve 37° (e_{37}) eğim açılı yüzeyler üzerine gelen toplam günlük ısıtım miktarının (MJ/m^2gun) aylara göre değişimi.

3.4. ÇEVRE SICAKLIĞI İÇİN MODEL SEÇİMİ

Güneş uygulamalarında ön plana çıkan iklimsel parametreler; sistem üzerinde doğrudan etkisi söz konusu olan çevre sıcaklığı ve ısıtım verileri olup bunların önem sırası uygulamanın türüne göre değişir. Fotovoltaik sistemlerde ısıtım şiddeti değerlerine ek olarak çevre sıcaklığı değerlerinin de dikkatli analizi gereklidir. Bu nedenle Şanlıurfa ili için ortalama günlük aylık ve yıllık veri tabanları oluşturulmuş ve Tegethoff [8] tarafından önerilen gün boyunca çevre sıcaklığındaki değişimi tanımlayan matematiksel eşitliğin meteorolojik ölçüm verileri ile gösterdiği uyum araştırılmıştır.

Yeryüzünün fiziki yapısından dolayı oluşan ısıl ataletler nedeniyle gün boyunca çevre sıcaklığı, ışıınım şiddeti gibi simetrik bir değişim göstermez. Çevre sıcaklığının maksimuma ulaşma noktası yine bu ısıl ataletler sebebiyle güneş öğlesinin üzerindeki saatlere tekabül etmektedir. Bu nokta gün boyunca çevre sıcaklığı karakteristik eğrisini iki bölgeye ayırır. Çevre sıcaklığı ile ilgili tüm matematiksel modeller maksimum sıcaklığa ulaşma anını referans olarak aldığından matematiksel modellerden yararlanabilmenin ilk koşulu bu noktanın saptanmasıdır. Türkiye için bu nokta yaklaşık olarak saat 14:00 civarındadır [60].

Şanlıurfa'da ortalama minimum sıcaklık olan 3.8°C Ocak ayında görünürken maksimum sıcaklık $40,1^{\circ}\text{C}$ Temmuz ayında görülmektedir. Gün boyunca genelde maksimum sıcaklık anı 14:00, minimum sıcaklık anı 6:00 olmaktadır. Gün boyunca ve yıl boyunca ortalama çevre sıcaklık eğrilerinin gösterdiği değişim benzer özellikler gösterdiğinden, aynı tür yaklaşımlarla her iki veri türü benzer bağıntılarla tanımlanabilir. Tegethoff tarafından önerilen matematiksel modelin 10:00-18:00 saatleri arasında meteorolojik ölçüm verilerine göre gösterdiği mutlak hatalar nispeten düşük seviyelerdedir. Modelin basitliği yanında fotovoltaik sistemlerin en etkili çalışma aralığı olan 10:00- 17:00 saatleri arasında yüksek doğrulukta olması nedeniyle Tegethoff modeli fotovoltaik uygulamalarda yaygın olarak kullanılabilir.

3.4.1. Meteorolojik Çevre Sıcaklığı Değerlerinin Analizi

Meteoroloji Devlet İşleri'nden 1985-2001 arası yıllara ait ham data olarak elde edilen çevre sıcaklığı verileri bilgisayar programı yardımıyla yeniden düzenlenmiş ve elde edilen ortalama değerlerin yıl ve gün boyunca değişimleri Şekil 3.11'de gösterilmiştir. Aylık ortalama gün boyunca değerler ise Tablo 3.19'da verilmiştir.

3.4.2. Çevre Sıcaklığı Matematiksel Modeli

Gün boyunca çevre sıcaklığında meydana gelen değişimi tanımlayan bir çok matematiksel model bulunmakta olup, bunların ortak özelliği gün içindeki; maksimum sıcaklık, minimum sıcaklık, maksimum sıcaklığa ulaşma anı ve minimum sıcaklığa ulaşma anı parametrelerinin birkaçı veya tümünün birer fonksiyonu olmalarıdır. Şanlıurfa için saptanan bu parametreler Tablo 3.20'de verilmiştir. Bu

çalışmada matematiksel model olarak Tegethoff tarafından önerilen aşağıdaki bağıntılar kullanılmıştır:

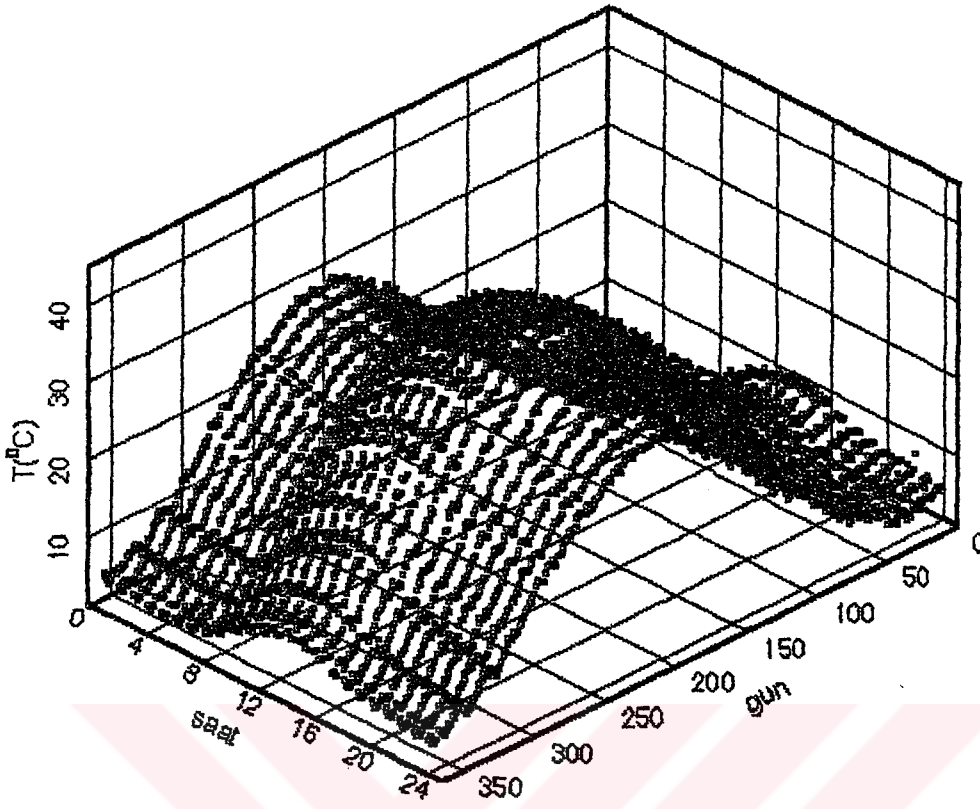
$$t < t_{max}$$

$$T_c = T_{max} - \alpha(t - t_{max})^2 \quad (3.23)$$

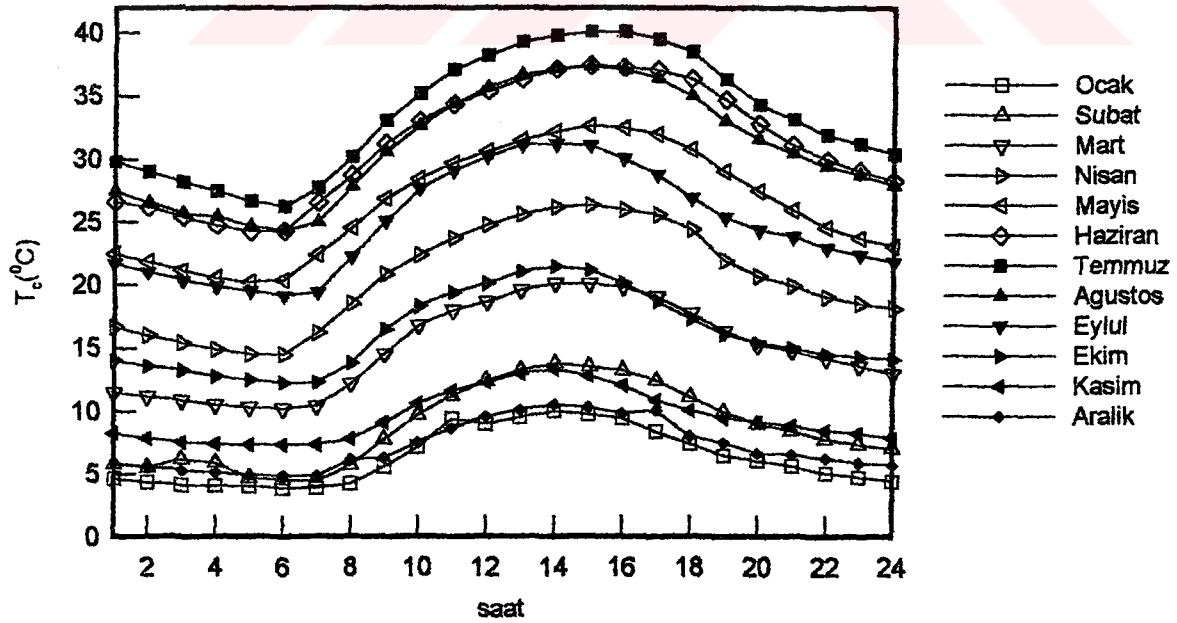
$$t > t_{max}$$

$$T_c = T_{max} - 2\alpha(t - t_{max})^2 \quad (3.24)$$

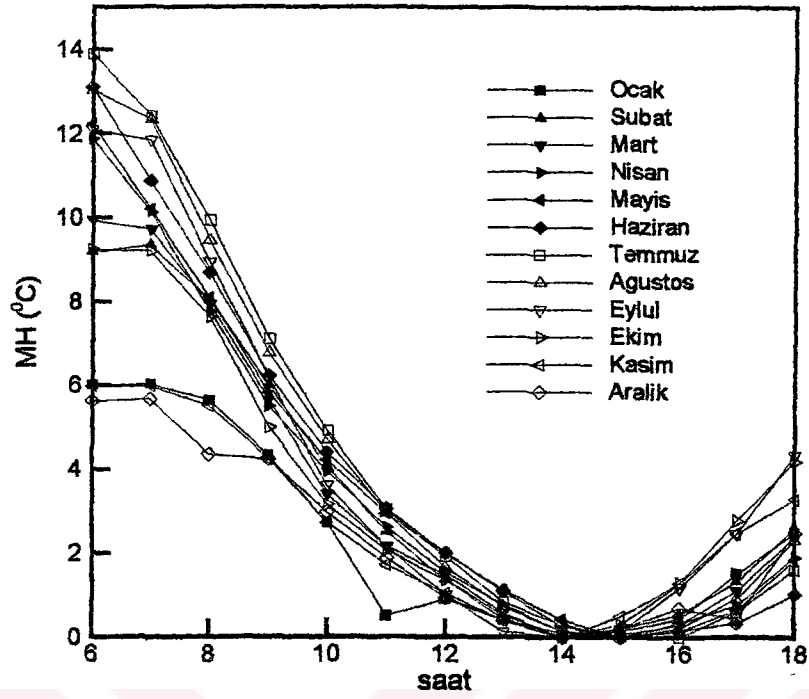
Bağıntıdaki T_{max} maksimum sıcaklığı, t_{max} maksimum sıcaklık anını, t zamanı a ise regresyon ile tespit edilebilen genlik katsayısını göstermektedir. Yapılan doğrusal regresyon sonucu bu katsayının Şanlıurfa için $6.137 \cdot 10^{-5}$ olduğu saptanmıştır. Bu modelin en büyük özelliği basit olması ve matematiksel işlem yükünü azaltmasıdır. Model parabolik iki bağıntıdan meydana geldiğinden, gün boyunca Şekil 3.12'deki gibi bir trend göstermesi mümkün değildir. Fakat fotovoltaik için sistemin en etkili çalışma aralığının yıl boyunca ortalama 10:00-17:00 saatleri arasında olması nedeniyle, bu sistemler için iyi sonuçlar verebilmektedir [8]. Model çerçevesinde ölçüm verileri göz önünde bulundurarak Şanlıurfa için yapılan hesaplamalarda yıl boyunca ortalama her ay için 6:00-18:00 saatleri arasında oluşan mutlak hatalar saptanmış ve Şekil 3.13'de gösterilmiştir. Şekilden görüleceği üzere, güneş ışınımının yüksek olduğu anlarda mutlak hata düşük seviyelerde kalmakta ve ortalama 3°C 'lik mutlak hata meydana gelmektedir. Mutlak hatanın öğle saatlerinde daha da düşmesi ve fotovoltaik sistemlerde çevre sıcaklığının panel üzerine etkisinin $\% 0.25/^\circ\text{C}$ olduğu [8] düşünülürse, bu modelin fotovoltaik sistemler için kullanılabilir düzeyde olduğu sonucuna varılabilir.



Şekil 3.11. Şanlıurfa ili için DİM tarafından saatlik periyotlarda ölçülen, 1985-2001 yıllarına ait çevre sıcaklık verilerinin yıl boyunca değişimi.



Şekil 3.12. DİM tarafından saatlik periyotlarda ölçülen, 1985-2001 yıllarına ait çevre sıcaklığı verilerinin, saatlik ortalama değerlerinin gün boyunca dağılımı.



Şekil 3.13. Tegethoff tarafından geliştirilen model sonucunda her ay için oluşan mutlak hatalar.

Tablo 3.19 Şanlıurfa ili için saatlik ortalama çevre sıcaklığı (T_c) değerlerinin aylara göre değişimi.

Saat	$T_c (^{\circ}\text{C})$											
	Aylar											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	4.65	5.80	11.4	16.6	22.4	26.5	29.7	27.4	21.7	14.0	8.24	5.89
2	4.36	5.52	11.1	15.9	21.8	26.1	28.9	26.5	21.0	13.5	7.86	5.55
3	4.14	6.18	10.8	15.4	21.1	25.3	28.1	25.6	20.3	13.2	7.54	5.29
4	4.06	5.89	10.4	14.8	20.5	24.7	27.4	25.4	19.8	12.7	7.41	5.09
5	4.03	4.69	10.2	14.5	20.2	24.2	26.6	24.6	19.5	12.4	7.33	4.92
6	3.88	4.55	10.2	14.4	20.3	24.3	26.2	24.2	19.1	12.2	7.33	4.89
7	3.86	4.40	10.4	16.1	22.4	26.5	27.6	25.0	19.3	12.2	7.33	4.85
8	4.24	5.69	12.1	18.5	24.5	28.7	30.1	27.8	22.2	13.8	7.81	6.17
9	5.57	7.76	14.4	20.8	26.8	31.1	33.0	30.5	25.0	16.4	9.08	6.28
10	7.15	9.67	16.7	22.3	28.4	33.0	35.1	32.6	27.6	18.3	10.5	7.53
11	9.37	11.2	17.9	23.7	29.6	34.3	37.0	34.3	29.0	19.4	11.6	8.63
12	8.97	12.3	18.6	24.7	30.6	35.3	38.1	35.6	30.2	20.0	12.2	9.56
13	9.46	13.2	19.5	25.5	31.4	36.3	39.2	36.5	31.0	21.0	12.9	10.0
14	9.98	13.7	20.1	26.1	32.1	37.1	39.8	37.1	31.2	21.4	13.3	10.5
15	9.73	13.5	20.0	26.3	32.6	37.4	40.0	37.3	31.0	21.1	12.8	10.3
16	9.43	13.1	19.8	25.9	32.4	37.2	40.1	37.1	30.0	20.1	12.0	9.82
17	8.37	12.4	19.0	25.5	31.9	37.0	39.5	36.4	28.7	18.6	10.8	10.0
18	7.37	11.1	17.7	24.3	30.7	36.3	38.4	34.9	26.8	17.2	10.0	8.00
19	6.46	9.93	16.3	21.9	29.0	34.7	36.3	33.0	25.3	16.0	9.45	7.47
20	6.04	8.96	15.2	20.6	27.4	32.7	34.2	31.5	24.3	15.4	9.11	6.65
21	5.61	8.43	14.7	19.9	25.9	31.1	33.1	30.4	23.8	14.9	8.82	6.54
22	5.04	7.75	14.1	19.0	24.5	29.9	31.9	29.4	22.9	14.5	8.44	6.23
23	4.73	7.34	13.5	18.5	23.6	29.0	31.1	28.7	22.3	14.2	8.19	5.86
24	4.42	7.01	12.9	18.1	23.0	28.2	30.3	27.8	21.8	14.0	7.85	5.71

Tablo 3.20. Her ay için ortalama günlük maksimum sıcaklık (T_{max}), minimum sıcaklık (T_{min}) ve bu sıcaklıklara ulaşılan anlar (t_{max} , t_{min}) (Şanlıurfa).

	Ay											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$T_{min}(^{\circ}C)$	3.867	4.404	10.202	14.448	20.204	24.236	26.217	24.295	19.127	12.2	7.339	7.35
$T_{max}(^{\circ}C)$	9.88	13.736	20.131	26.313	32.615	37.408	40.105	37.328	31.225	21.467	13.319	10.514
$t_{min}(st)$	7	7	6	6	5	5	6	6	6	6	5	7
$t_{max}(st)$	14	14	14	15	15	15	16	15	14	14	14	14

4. PV SİSTEM OPTİMUM TASARIMI ve OPTİMİZASYONU

Direkt akupleli fotovoltaik sistemleri tasarım aşamasındayken; panelin yatay yüzeye yerleştirme açılarının tespiti ve panel sayısı-konfigürasyonunun seçimi olmak üzere iki tip optimizasyona gereksinim duyulur. Panellerin sistemin termoekonomik ve enerji analizi üzerindeki direkt etkisi düşünülürse yapılacak tasarımda panel sayısı-konfigürasyonunun seçimi kritik bir öneme sahip olacaktır. Panel sayısı ve konfigürasyonunun seçimi ile ilgili grafiksel ve nümerik bir çok metot bulunmaktadır. Bu metotlar ana hatlarıyla; mevcut panel konfigürasyonları içerisinde, sistemin çalışma eğrisi ile panellerin maksimum çalışma eğrisi arasındaki alanı minimum yapacak konfigürasyonunun saptanması şeklindedir. Geliştirilen metotlardaki temel sorun; sistemi oluşturan bileşenlerin matematiksel modellerinin gayri lineer özellik göstermeleri nedeniyle tüm sistem için tek bir modelin tanımlanamamasıdır. Sistem tümüyle bir model çerçevesinde tanımlanamadığından çok büyük bir matematiksel işlem yükü meydana gelmekte ve optimizasyonların uygulanmasında çok sayıda parametre girdisi olan bilgisayar programlarına gereksinim duyulmaktadır. Ayrıca herhangi bir panel konfigürasyonunun maksimum çalışma eğrisi düşük ışıınım seviyelerinde gayri lineer yüksek ışıınım seviyelerinde sanki lineer olmak üzere iki farklı karakteristik özellik gösterdiğinden, optimizasyonların bölge ışıınım potansiyeline bağlı olarak dikkatle yapılması gerekmektedir [61].

Bu çalışmada, optimum panel sayısı ve konfigürasyonunun seçiminde bölgesel parametreleri de göz önünde bulunduran istatistiksel bir metot geliştirilmiştir. Geliştirilen metot matematiksel işlem yükü açısından nümerik ve grafiksel metotlara nazaran daha basit ve uygulanabilir düzeydedir. Metot iki aşamayı içermekte olup bunlar sırasıyla; (i) bölgesel açıdan sistemin maksimum çalışma eğrisi boyunca optimum ışıınım aralığının tespiti, (ii) bu aralığı dikkate alarak olası panel konfigürasyonları içerisinde istatistiksel yöntemlerle en iyi konfigürasyonun seçimi. Optimum ışıınım aralığının seçimi için, maksimum çalışma eğrisi boyunca, göz önünde bulundurulan herhangi bir aralıktaki panel çıktısının, gün boyunca toplam panel çıktısına oranı olan “kullanılabilirlik (ϕ)” ölçütlerinden yararlanılmıştır. Şanlıurfa için daha önceki bölümde saptanan ortalama aylık optimum eğim açıları ve bu bölümde her ay için tespit edilen optimum panel konfigürasyonları koşullarında

seçilen sistemin yıllık enerji analizi bilgisayar simülasyonları yardımıyla yapılmıştır. Sistemde toplam pompa yükü için birim değer olan 1 bar yani 10mss değeri kullanılmıştır. Hesaplamalarda kullanılan sistem bileşenleri (*panel-motor-pompa*) ile ilgili teknik özellikler Ek 1’de verilmiştir.

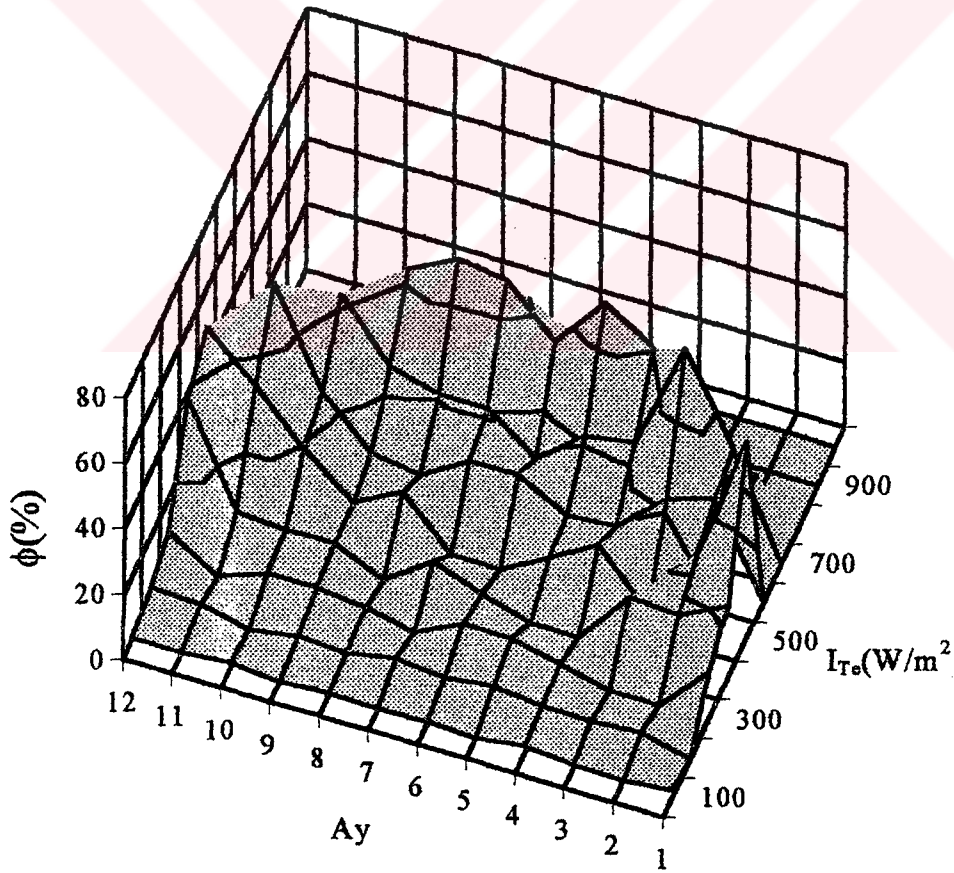
4.1. PANEL KONFIGÜRASYONUNUN SEÇİMİ

4.1.1. Optimum Işınım Aralığının Tespiti

Şanlıurfa için güneye dönük, optimum aylık ortalama eğim açılarında yatay yüzeye yerleştirilmiş bir panel üzerine gün boyunca gelen ışıınım şiddeti daha önceki bölümde hesaplanmıştır (Bknz: Tablo 3.15). Hesaplamalar DMİ tarafından ölçülen 1985-2001 arası yıllara ait saatlik ışıınım şiddeti verilerinden matematiksel modeller ve modeller çerçevesinde geliştirilen bilgisayar programları yardımıyla yapılmıştır. Benzer şekilde yine DMİ tarafından ölçülen, 1985-2001 arası yıllara ait saatlik çevre sıcaklığı verilerinden yararlanılarak, aylık ortalama çevre sıcaklığı değerlerindeki gün boyunca değişim önceki bölümde Tablo 3.19’da verilmiştir. Söz konusu bu veriler çerçevesinde, güneye dönük optimum aylık ortalama eğim açılarında yatay yüzeye yerleştirilmiş, 1*1 (paralel*seri) konfigürasyonundaki AP50 PV panelin, aylık ortalama kullanılabilirliğinin ışıınım seviyelerine dağılımı hesaplanmıştır. Kullanılabilirlik (ϕ) daha önce belirtildiği üzere panelin maksimum çalışma eğrisi boyunca saatlik ortalama ışıınım seviyelerindeki panel çıktısının günlük toplam panel çıktısına oranı şeklinde tanımlanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen veriler Tablo 4.1’de yıl boyunca dağılımları ise Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Tablo 4.1’deki verilerden yararlanılarak, en fazla kullanılabilirliğin elde edildiği optimum ışıınım aralıkları her ay için saptanmış ve Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.1 Şanlıurfa için güneye dönük optimum aylık ortalama eğimli 1*1 (p*s) konfigürasyonundaki AP 50 PV panelin kullanılabilirliğinin (ϕ) yılın her ayı için ışınlam seviyelerine göre dağılımı.

I (W/m ²)	ϕ (%)											
	Ay											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0-100	2.2	0.6	1.3	2.4	0.2	1.1	0.6	1.2	0.2	1.7	0.6	0.7
100-200	0.0	3.5	2.5	2.9	4.3	2.3	3.9	1.3	2.0	0.0	3.5	4.1
200-300	14.3	0.0	0.0	3.7	6.9	6.9	0.0	3.4	5.2	5.2	0.0	9.4
300-400	22.6	15.5	16.5	0.0	0.0	4.3	9.9	0.0	7.0	6.5	7.7	38.1
400-500	60.9	22.4	0.0	16.4	7.9	0.0	0.0	14.8	7.3	19.2	34.4	47.7
500-600	0.0	27.4	22.8	10.3	9.0	16.8	16.6	8.1	10.5	24.6	53.7	0.0
600-700	0.0	30.5	56.8	23.8	21.4	10.2	20.7	20.9	24.9	42.8	0.0	0.0
700-800	0.0	0.0	0.0	40.5	50.2	33.8	48.2	50.3	43.0	0.0	0.0	0.0
800-900	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	24.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
900-1000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0



Şekil 4.1. Şanlıurfa için Güneye dönük optimum aylık ortalama eğimli 1*1 (p*s) konfigürasyonundaki AP 50 PV panel kullanılabilirliğinin (ϕ) ışınlam seviyelerine göre dağılımı.

Tablo 4.2. 1*1 (p*s) konfigürasyonundaki AP50 PV panelin kullanılabilirlik (ϕ) bazında optimum ışınlam aralığının aylara göre değişimi.

Ay	ϕ (%)	I (W/m ²)
1	83,5	300-500
2	80,3	400-700
3	79,6	500-700
4	74,6	500-800
5	71,6	600-800
6	85,3	500-900
7	85,5	500-800
8	71,2	600-800
9	78,4	500-800
10	86,6	400-700
11	88,1	400-600
12	85,8	300-500

4.1.2 Optimum Panel Konfigürasyonunun Seçimi

Panel konfigürasyonunun seçimi 48, 50, 54, 60 ve 64 adet panelin Tablo 4.3’de verilmiş olan 43 konfigürasyonu arasından istatistiksel yöntemlerle yapılmıştır. Uygulanan istatistiksel yöntemde amaç: sistemin çalışma eğrisi ile panellerin maksimum çalışma eğrisi arasındaki farkı minimum yapmaktır. Bunun için Şekil 4.2’de gösterildiği gibi mevcut olan üçgenlerin, her ay için Tablo 4.2’de belirlenen ışınlam aralığında, alanlarının toplamını minimumda tutacak panel konfigürasyonunun saptanmasıdır. Şekil 4.2’de görüldüğü gibi, iki eğri arasındaki üçgenin alanı; maksimum çalışma eğrisinin sistemin çalışma eğrisine göre I ve V ekseninde meydana gelen mutlak hataların çarpımlarının birer fonksiyonu olması nedeniyle,

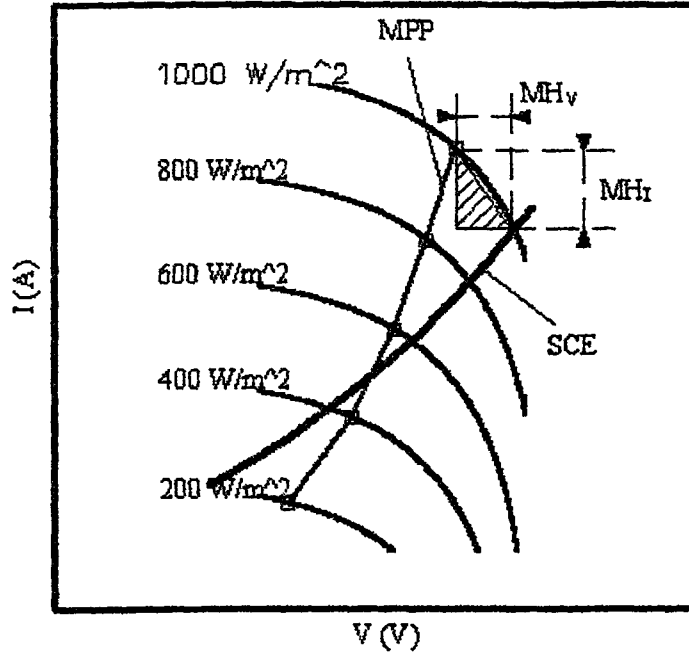
$$SH = \left[\frac{\sum (I_{SCE} - I_{MMP})^2 * (V_{SCR} - V_{MPP})^2 / G_{p*s}}{m} \right]^{1/2} \quad (4.1)$$

şeklinde tanımlamak mümkündür. Bu standart hata denkleminin en önemli özelliği matematiksel işlem yükü çok fazla ve dolayısıyla hata yapma olasılığı büyük olan grafiksel ve nümerik metotlar yerine işlem yükü ve uygulanabilirlik açısından daha basit bir istatistiksel işlem ile panel konfigürasyonu seçimi yapılabilmesidir. Denklemdaki m hesaplamaların yapıldığı ışınlam aralığındaki adım (mesh) sayısını,

$G_{p,s}$ seçilen panel konfigürasyonunun üzerine gelen ışıının şiddetini göstermektedir. Denklem (4.1)'de tanımlanan standart hata, Tablo 4.3'de verilmiş olan mevcut 43 konfigürasyon için geliştirilen bir bilgisayar programı yardımıyla 10 W artırımlarla hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, Tablo 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, ve 4.10 'da verilmiştir. Tablolardan da görüleceği gibi, seçilen sistem için yıllık çalışma koşulu altında elde edilen optimum panel konfigürasyonları, 10*5 12*4 ve 12*5 olmak üzere üç farklı kombinasyon Tablo 4.11'de daha açık olarak ifade edilmiştir. Söz konusu bu üç farklı konfigürasyon için, maksimum çalışma noktası eğrisi ile sistemin çalışma eğrisini de içeren I-V diyagramları Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'de gösterilmiştir. Hazırlanan bu diyagramlardan, optimizasyonun yapıldığı ışıının aralığında sistemin çalışma eğrisinin maksimum güç noktalarına yakınlığı optimizasyon için uygulanan metodun başarı düzeyini kanıtlayan önemli bir göstergedir.

Tablo 4.3. Seçilen 48, 50, 54, 60, 64 adet panelin olası konfigürasyonları.

Panel	Paralel*Seri				
	48	50	54	60	64
PANEL KONFIGÜRASYONLARI	48*1	50*1	1*54	1*60	1*64
	1*48	1*50	54*1	60*1	64*1
	2*24	25*2	2*27	2*30	2*32
	24*2	2*25	27*2	30*2	32*2
	16*3	10*5	3*19	3*20	4*18
	3*16	5*10	19*3	20*3	18*4
	4*12	-	6*9	4*15	8*8
	12*4	-	9*6	15*4	-
	6*8	-	-	5*12	-
	8*6	-	-	12*5	-
	-	-	-	6*10	-
	-	-	-	10*6	-



Şekil 4.2. Konfigürasyonların seçiminin grafiksel gösterimi.

Tablo 4.4. 300-500 W/m² ışınlam aralığında, 48, 50, 54, 60 ve 64 adet panelin olası konfigürasyonları için maksimum çalışma eğrisi ile sisteminin çalışma eğrisinin örtüşmemesinden oluşan standart hatalar.

48 Panel		50 Panel		54 Panel		60 Panel		64 Panel	
pxs	SH	pxs	SH	pxs	SH	pxs	SH	pxs	SH
1*48	1.1656	1*50	1.1906	1*54	1.2403	1*60	1.3104	1*64	1.3559
48*1	2.1930	50*1	2.2367	54*1	2.3263	60*1	2.4610	64*1	2.5540
2*24	1.1043	2*25	1.1314	2*27	1.1830	2*30	1.2565	2*32	1.3026
24*2	1.6936	25*2	1.7461	27*2	1.8517	30*2	2.0072	32*2	2.1119
3*16	1.0248	5*10	0.8529	3*18	1.1078	3*20	1.1848	4*16	1.1514
16*3	0.7184	10*5	0.1605	18*3	0.8874	20*3	1.0583	16*4	0.2230
4*12	0.9297	-	-	6*9	0.8006	4*15	1.1002	8*8	0.7108
12*4	0.0412	-	-	9*6	0.3880	15*4	0.1644	-	-
6*8	0.6976	-	-	-	-	5*12	1.0030	-	-
8*6	0.4141	-	-	-	-	12*5	0.0958	-	-
-	-	-	-	-	-	6*10	0.8944	-	-
-	-	-	-	-	-	10*6	0.3545	-	-

Tablo 4.5. 500-900 W/m² ısıtım aralığında, 48, 50, 54, 60 ve 64 adet panelin olası konfigürasyonları için maksimum çalışma eğrisi ile sisteminin çalışma eğrisinin örtüşmemesinden oluşan standart hatalar.

48 Panel		50 Panel		54 Panel		60 Panel		64 Panel	
pxs	SH	pxs	SH	pxs	SH	pxs	SH	pxs	SH
1*48	1.5692	1*50	1.6041	1*54	1.6713	1*60	1.7684	1*64	1.8308
48*1	2.9536	50*1	3.0049	54*1	3.1246	60*1	3.3021	64*1	3.4266
2*24	1.4636	2*25	1.5004	2*27	1.5718	2*30	1.6737	2*32	1.7393
24*2	2.5429	25*2	2.6027	27*2	2.7364	30*2	2.9320	32*2	3.0666
3*16	1.3253	5*10	1.0211	3*18	1.4415	3*20	1.5503	4*16	1.4756
16*3	1.6162	10*5	0.0354	18*3	1.8479	20*3	2.0672	16*4	1.0297
4*12	1.1589	-	-	6*9	0.9016	4*15	1.4016	8*8	0.6972
12*4	0.5078	-	-	9*6	0.2196	15*4	0.8916	-	-
6*8	0.7498	-	-	-	-	5*12	1.2395	-	-
8*6	0.2739	-	-	-	-	12*5	0.1104	-	-
-	-	-	-	-	-	6*10	1.0397	-	-
-	-	-	-	-	-	10*6	0.1681	-	-

Tablo 4.6. 400-700 W/m² ısıtım aralığında, 48, 50, 54, 60 ve 64 adet panelin olası konfigürasyonları için maksimum çalışma eğrisi ile sisteminin çalışma eğrisinin örtüşmemesinden oluşan standart hatalar.

48 Panel		50 Panel		54 Panel		60 Panel		64 Panel	
pxs	SH	pxs	SH	pxs	SH	pxs	SH	pxs	SH
1*48	1.3800	1*50	1.4108	1*54	1.4691	1*60	1.5519	1*64	1.6061
48*1	2.6053	50*1	2.6526	54*1	2.7596	60*1	2.9184	64*1	3.0300
2*24	1.2969	2*25	1.3294	2*27	1.3910	2*30	1.4781	2*32	1.5341
24*2	2.1545	25*2	2.2108	27*2	2.3328	30*2	2.5111	32*2	2.6334
3*16	1.1887	5*10	0.9521	3*18	1.2886	3*20	1.3809	4*16	1.3273
16*3	1.1889	10*5	0.0755	18*3	1.3935	20*3	1.5972	16*4	0.6044
4*12	1.0581	-	-	6*9	0.8667	4*15	1.2647	8*8	0.7209
12*4	0.2277	-	-	9*6	0.3093	15*4	0.4495	-	-
6*8	0.7390	-	-	-	-	5*12	1.1360	-	-
8*6	0.3530	-	-	-	-	12*5	0.0319	-	-
-	-	-	-	-	-	6*10	0.9825	-	-
-	-	-	-	-	-	10*6	0.2603	-	-

Tablo 4.7. 500-800 W/m² ışıınım aralığında, 48, 50, 54, 60 ve 64 adet panelin olası konfigürasyonları için maksimum çalışma eğrisi ile sisteminin çalışma eğrisinin örtüşmemesinden oluşan standart hatalar.

48 Panel		50 Panel		54 Panel		60 Panel		64 Panel	
pxs	SH	pxs	SH	pxs	SH	pxs	SH	pxs	SH
1*48	1.5085	1*50	1.5422	1*54	1.6058	1*60	1.6970	1*64	1.7575
48*1	2.8437	50*1	2.8941	54*1	3.0104	60*1	3.1842	64*1	3.3026
2*24	1.4109	2*25	1.4462	2*27	1.5138	2*30	1.6095	2*32	1.6732
24*2	2.4195	25*2	2.4786	27*2	2.6093	30*2	2.8016	32*2	2.9304
3*16	1.2830	5*10	1.0032	3*18	1.3933	3*20	1.4954	4*16	1.4294
16*3	1.4720	10*5	0.0320	18*3	1.6973	20*3	1.9140	16*4	0.8684
4*12	1.1292	-	-	6*9	0.8948	4*15	1.3583	8*8	0.7105
12*4	0.3874	-	-	9*6	0.2459	15*4	0.7408	-	-
6*8	0.7513	-	-	-	-	5*12	1.2084	-	-
8*6	0.3001	-	-	-	-	12*5	0.0538	-	-
-	-	-	-	-	-	6*10	1.0246	-	-
-	-	-	-	-	-	10*6	0.1912	-	-

Tablo 4. 8. 500-700 W/m² ışıınım aralığında, 48, 50, 54, 60 ve 64 adet panelin olası konfigürasyonları için maksimum çalışma eğrisi ile sisteminin çalışma eğrisinin örtüşmemesinden oluşan standart hatalar.

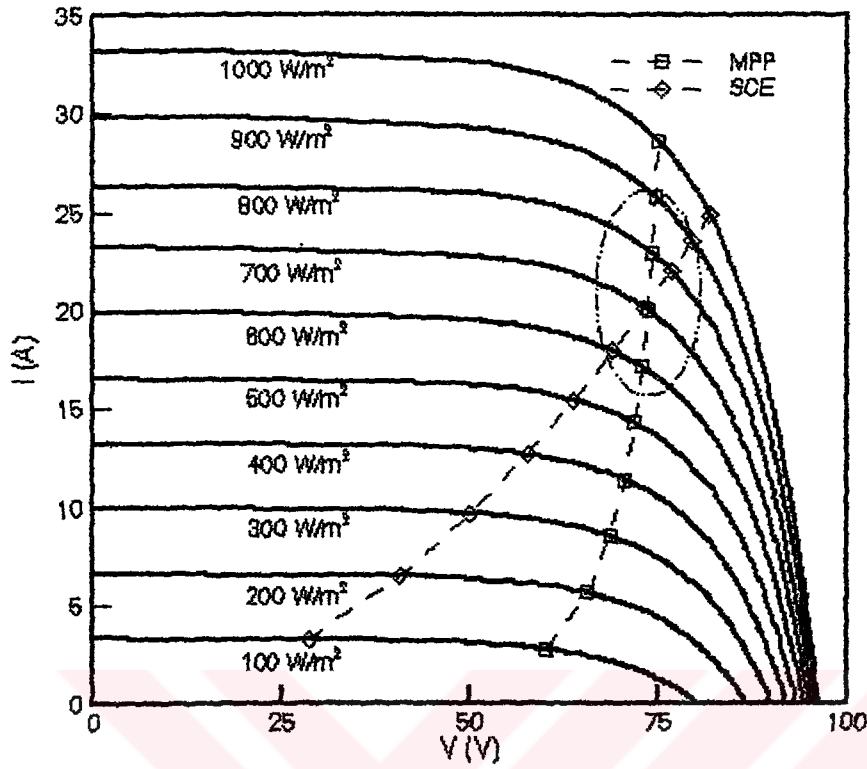
48 Panel		50 Panel		54 Panel		60 Panel		64 Panel	
pxs	SH	pxs	SH	pxs	SH	pxs	SH	pxs	SH
1*48	1.4451	1*50	1.4781	1*54	1.5388	1*60	1.6251	1*64	1.6814
48*1	2.7278	50*1	2.7766	54*1	2.8896	60*1	3.0557	64*1	3.1724
2*24	1.3554	2*25	1.3898	2*27	1.4541	2*30	1.5450	2*32	1.6039
24*2	2.2892	25*2	2.3470	27*2	2.4747	30*2	2.6599	32*2	2.7872
3*16	1.2382	5*10	0.9818	3*18	1.3433	3*20	1.4399	4*16	1.3797
16*3	1.3224	10*5	0.0385	18*3	1.5377	20*3	1.7511	16*4	0.7082
4*12	1.0964	-	-	6*9	0.8851	4*15	1.3139	8*8	0.7199
12*4	0.2745	-	-	9*6	0.2764	15*4	0.5895	-	-
6*8	0.7496	-	-	-	-	5*12	1.1758	-	-
8*6	0.3275	-	-	-	-	12*5	0.0164	-	-
-	-	-	-	-	-	6*10	1.0074	-	-
-	-	-	-	-	-	10*6	0.2207	-	-

Tablo 4. 9. 600-800 W/m² ışı nım aralı ğında, 48, 50, 54, 60 ve 64 adet panelin olası konfigürasyonları için maksimum çalışma eğrisi ile sisteminin çalışma eğrisinin örtüşmemesinden oluşan standart hatalar.

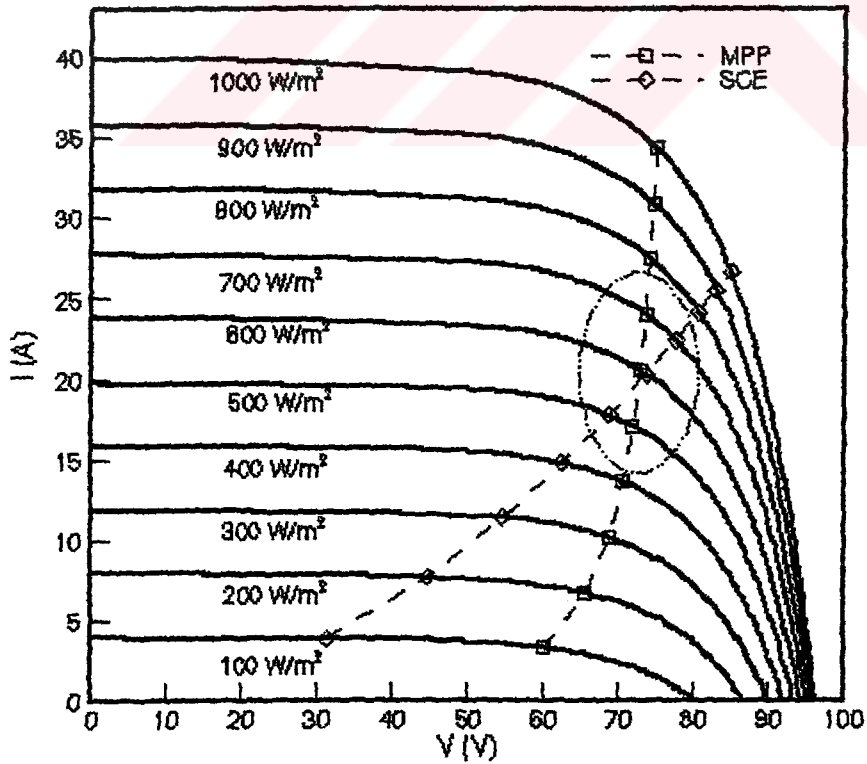
48 Panel		50 Panel		54 Panel		60 Panel		64 Panel	
pxs	SH	pxs	SH	pxs	SH	pxs	SH	pxs	SH
1*48	1.5692	1*50	1.6034	1*54	1.6695	1*60	1.7653	1*64	1.8290
48*1	2.9554	50*1	3.0080	54*1	3.1281	60*1	3.3094	64*1	3.4298
2*24	1.4644	2*25	1.5005	2*27	1.5710	2*30	1.6714	2*32	1.7389
24*2	2.5425	25*2	2.6036	27*2	2.7379	30*2	2.9373	32*2	3.0682
3*16	1.3270	5*10	1.0267	3*18	1.4422	3*20	1.5493	4*16	1.4774
16*3	1.6018	10*5	0.0102	18*3	1.8358	4*15	1.4021	16*4	0.9880
4*12	1.1621	-	-	6*9	0.9064	20*3	2.0591	8*8	0.7029
12*4	0.4565	-	-	9*6	0.2081	15*4	0.8496	-	-
6*8	0.7552	-	-	-	-	5*12	1.2423	-	-
8*6	0.2688	-	-	-	-	12*5	0.0652	-	-
-	-	-	-	-	-	6*10	1.0434	-	-
-	-	-	-	-	-	10*6	0.1493	-	-

Tablo 4. 10. 400-600 W/m² ışı nım aralı ğında, 48, 50, 54, 60 ve 64 adet panelin olası konfigürasyonları için maksimum çalışma eğrisi ile sisteminin çalışma eğrisinin örtüşmemesinden oluşan standart hatalar.

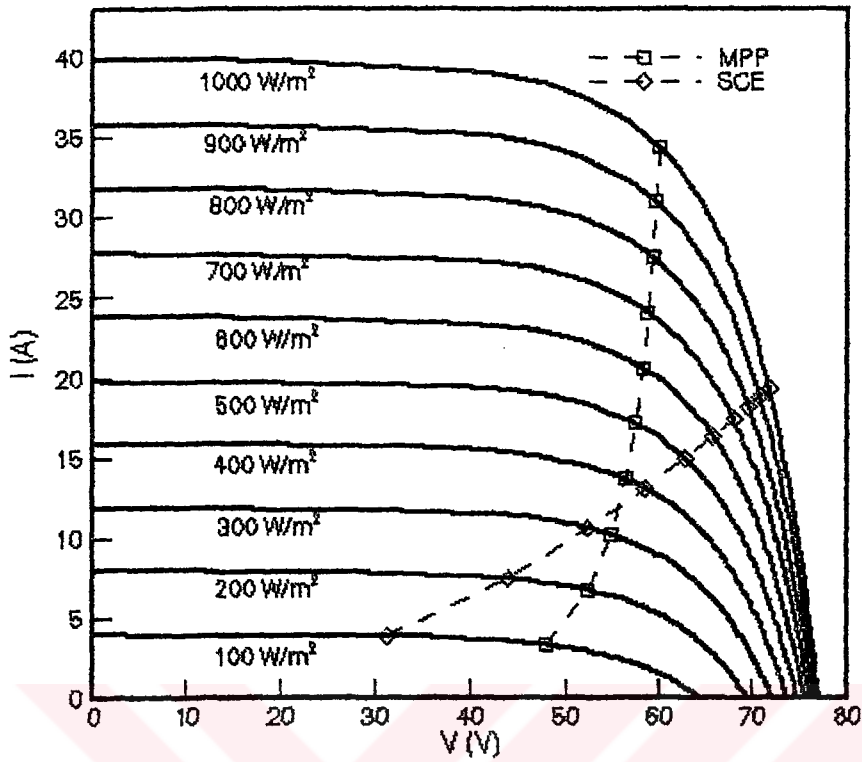
48 Panel		50 Panel		54 Panel		60 Panel		64 Panel	
pxs	SH	pxs	SH	pxs	SH	pxs	SH	pxs	SH
1*48	1.3111	1*50	1.3405	1*54	1.3964	1*60	1.4747	1*64	1.5264
48*1	2.4771	50*1	2.5222	54*1	2.6234	60*1	2.7745	64*1	2.8819
2*24	1.2357	2*25	1.2669	2*27	1.3256	2*30	1.4079	2*32	1.4608
24*2	2.0096	25*2	2.0638	27*2	2.1806	30*2	2.3517	32*2	2.4700
3*16	1.1378	5*10	0.9232	3*18	1.2322	3*20	1.3197	4*16	1.2733
16*3	1.0262	10*5	0.0915	18*3	1.2238	20*3	1.4182	16*4	0.4440
4*12	1.0195	-	-	6*9	0.8504	4*15	1.2146	8*8	0.7244
12*4	0.1314	-	-	9*6	0.3380	15*4	0.3525	-	-
6*8	0.7308	-	-	-	-	5*12	1.0961	-	-
8*6	0.3775	-	-	-	-	12*5	0.0355	-	-
-	-	-	-	-	-	6*10	0.9590	-	-
-	-	-	-	-	-	10*6	0.2920	-	-



Şekil 4.3. 10*5 (p*s) Panel konfigürasyonunun I-V karakteristik eğrileri, MPP; maksimum çalışma eğrisi, SCE; sistemin çalışma eğrisi.



Şekil 4.4. 12*5 (p*s) Panel konfigürasyonunun I-V karakteristik eğrileri, MPP; maksimum çalışma eğrisi, SCE; sistemin çalışma eğrisi.



Şekil 4.5. 12*4 (p*s) Panel konfigürasyonunun I-V karakteristik eğrileri, MPP; maksimum çalışma eğrisi, SCE; sistemin çalışma eğrisi.

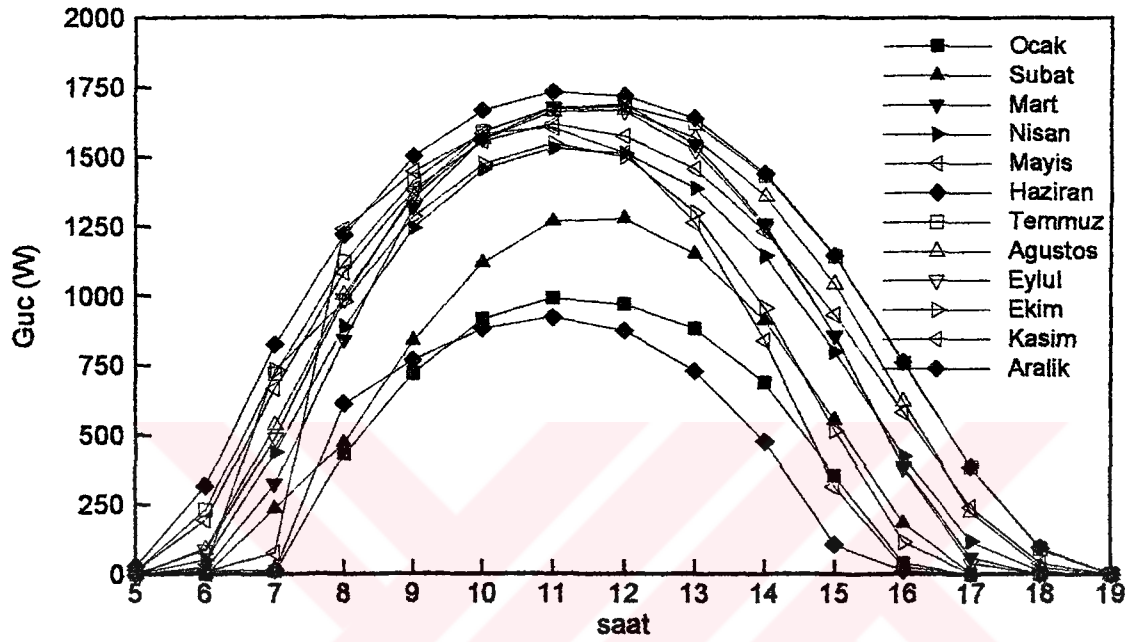
Tablo 4.11. Seçilen sistem için yıl boyunca saptanan optimum panel konfigürasyonları.

Panel Konfigürasyonları (Paralel*Seri)											
Ay											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
12*4	10*5	12*5	10*5	10*5	10*5	10*5	10*5	10*5	10*5	12*5	12*4

4.2. PV PANEL SİSTEMİNİN ÜRETTİĞİ GÜÇ ve POMPA SU DEBİSİ

Tablo 4.11’de verilmiş olan optimum aylık panel konfigürasyonlarında ve Tablo 3.15’de verilen optimum aylık ortalama eğim açılarında yerleştirilmiş PV panel sistemi tarafından üretilen güç değerleri bilgisayar programı ile hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 4.12’de Şekil 4.6’da gösterilmiştir. PV sistem veriminin her ay için gün boyunca gösterdiği değişim ise Şekil 4.7’de gösterilmektedir. Şekilden görüleceği üzere, yılın büyük kısmında sistem verimi % 7-8 arasında değişmektedir. Seçilen panel için maksimum çalışma veriminin %8,88 olduğu düşünülürse, yapılan optimizasyonla sağlanan bu nispeten yüksek ve gün boyunca kararlı verim dağılımı başarılı bir tasarım için temel hedeftir.

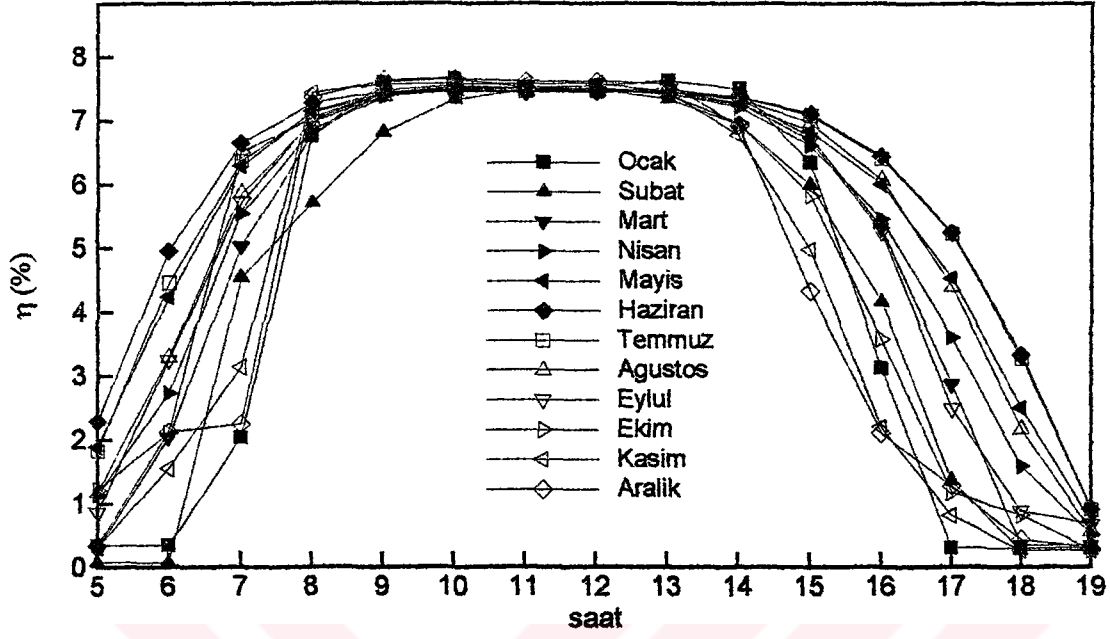
PV destekli su pompalama sistemleri için hesaplaması gereken ve temel hedef fonksiyonu olan su debisinin önceki bölümde belirtilen birim toplam basınç farkı için ($1 \text{ bar} \approx 10 \text{ mSS}$) aylık ortalama günün saatlerine bağlı değişimi Tablo 4.13 ve Şekil 4.8’de gösterilmiştir.



Şekil 4.6. PV sistemin saatlik güç çıkışının aylara göre değişimi.

Tablo 4.12. PV sistemin saatlik güç çıktı değerlerinin aylara göre değişimi.

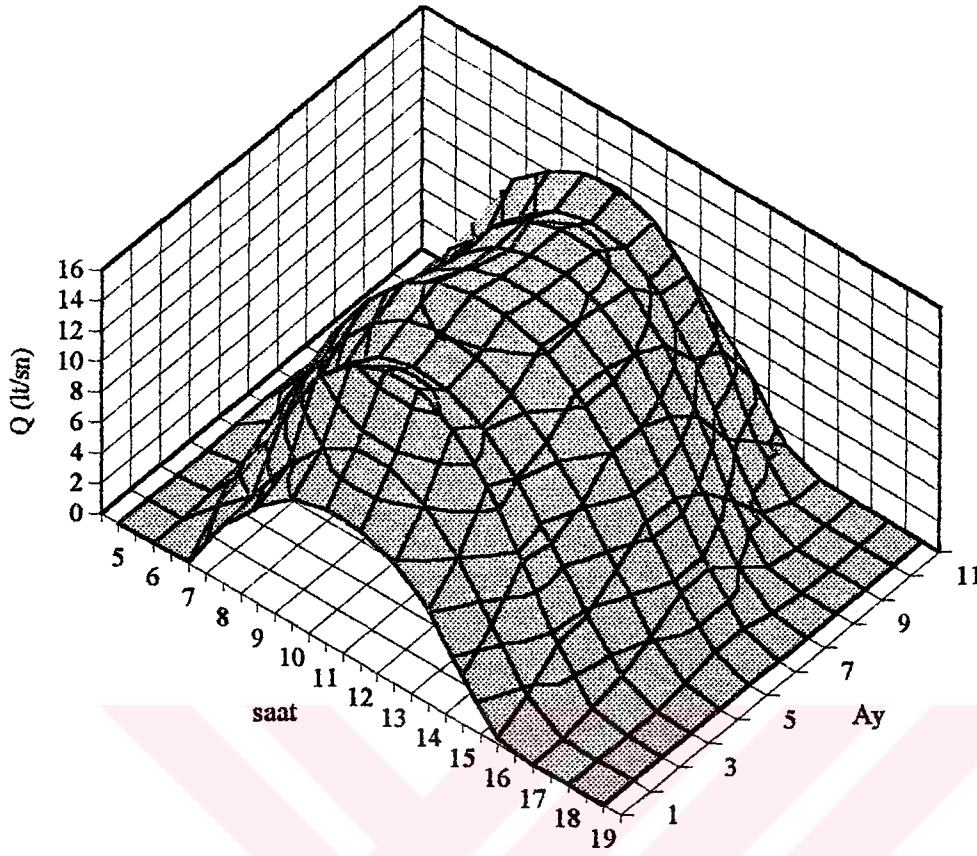
Saat	Güç (W)											
	Ay											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5	-	-	-	-	-	31	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	52	195	317	232	92	88	-	-	-
7	-	237	324	439	668	827	720	537	490	733	-	-
8	431	473	843	890	1085	1220	1123	1003	989	980	1240	614
9	720	839	1316	1243	1383	1501	1414	1354	1366	1283	1447	769
10	915	1119	1565	1457	1557	1667	1591	1563	1592	1474	1585	882
11	991	1268	1677	1532	1618	1733	1673	1662	1676	1549	1606	922
12	968	1278	1691	1513	1575	1721	1684	1669	1665	1502	1516	875
13	882	1151	1545	1387	1457	1640	1621	1569	1524	1299	1262	730
14	688	911	1259	1145	1233	1441	1433	1360	1249	958	840	477
15	353	554	856	799	933	1146	1144	1043	859	516	315	107
16	41	182	388	424	584	763	759	621	382	117	28	13
17	0	7	61	120	242	386	386	224	40	4	1	3
18	0	0	0	10	41	96	92	27	2	-	-	-
19	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-



Şekil 4.7. PV sistemin saatlik veriminin aylara göre değişimi.

Tablo 4.13. Pompalanan suyun her ay için günün saatlerine bağlı debi değerleri.

Saat	Q(lt/sn)											
	Ay											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5	-	-	-	-	-	0.281	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	1.733	2.804	2.047	0.821	0.79	-	-	-
7	-	2.109	2.877	3.872	5.864	7.241	6.285	4.725	4.333	6.435	0.711	0.142
8	3.804	4.183	7.424	7.814	9.511	10.69	9.805	8.803	8.71	8.601	10.79	5.37
9	6.341	7.398	11.58	10.91	12.12	13.13	12.36	11.88	12	11.25	12.63	6.766
10	8.108	9.861	13.77	12.77	13.61	14.51	13.88	13.66	13.9	12.91	13.85	7.803
11	8.819	11.17	14.74	13.4	14.11	15.05	14.56	14.47	14.58	13.54	14.06	8.205
12	8.645	11.26	14.83	13.23	13.75	14.95	14.65	14.53	14.5	13.15	13.31	7.785
13	7.872	10.14	13.58	12.16	12.75	14.28	14.13	13.7	13.32	11.41	11.11	6.523
14	6.122	8.032	11.08	10.07	10.83	12.61	12.54	11.92	10.97	8.441	7.412	4.247
15	3.135	4.896	7.542	7.051	8.223	10.07	10.05	9.183	7.565	4.564	2.795	0.962
16	0.368	1.628	3.441	3.757	5.164	6.731	6.698	5.489	3.385	1.044	0.25	0.114
17	0.001	0.061	0.546	1.074	2.149	3.421	3.424	1.991	0.359	0.04	0.014	0.027
18	0.001	0.001	0.001	0.095	0.365	0.861	0.821	0.243	0.018	-	-	-
19	-	-	-	-	-	0.019	-	-	-	-	-	-



Şekil 4.8. Pompalanan su debisinin saat ve aylara göre değişimi.

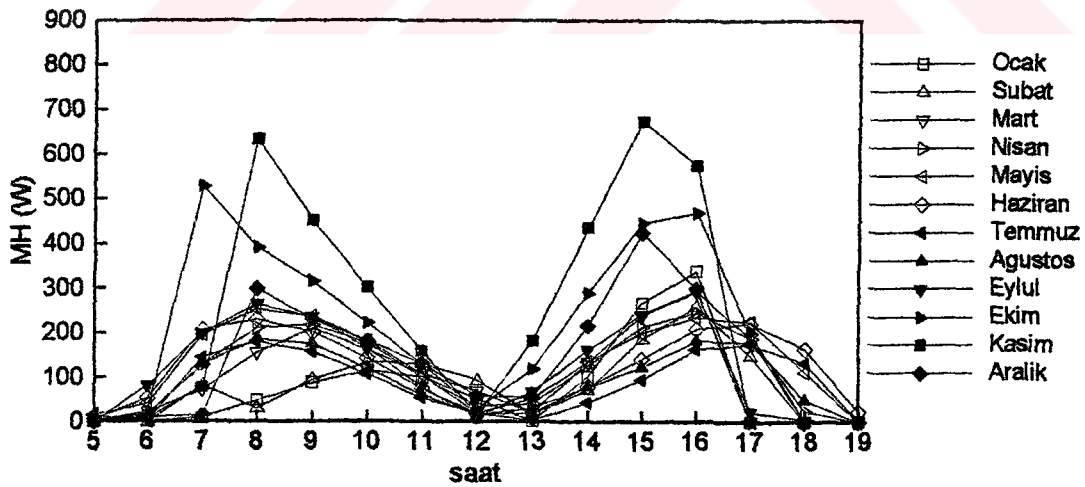
4.3. SİSTEM ÇIKTISI BAZINDA METEOROLOJİK ÖLÇÜM VERİLERİ İLE SEÇİLEN MODELLERİN UYUMU

Işınım şiddeti ve çevre sıcaklığı için sırasıyla seçilen Liu-Jordon ve Tegethoff modelleri çerçevesinde, yıllık sistem çıktısı bilgisayar simülasyonlarıyla hesaplanmıştır. Sistem dizaynında; meteorolojik ölçüm veriler için yapılan hesaplamalarda olduğu gibi, panellerin her ay için saptanan optimum panel konfigürasyonunda ve optimum aylık ortalama eğim açılarında yatay yüzeye yerleştirildiği kabul edilmiştir. Yapılan hesaplamalarda, ilk etap da Liu-Jordon ve Tegethoff modeli çerçevesinde Şanlıurfa yıllık ışınlm şiddeti ve çevre sıcaklığı verileri hesaplanmıştır. PV sistem tarafından üretilen güç daha sonra hesaplanmış ve elde edilen değerler Tablo 4.14'de verilmiştir. Meteorolojik ölçüm verilerine göre oluşan hatayı saptamak amacıyla; aylık ortalama mutlak hata değerleri saptanmış ve sonuçlar Şekil 4.9'daki diyagramda gösterilmiştir. Şekilden görüleceği gibi, özellikle ışınlm seviyesinin yüksek olduğu öğle saatlerinde mutlak hata beklenildiği üzere

düşük seviyelerde olmasına karşın, matematiksel modellerin kullanımında düşük ışıınım seviyelerinde çok dikkat edilmesi gerektiği sonucu ortaya çıkmaktadır.

Tablo 4.14. Liu-Jordon ve Tegethoff modelleri çerçevesinde yıl boyunca sistem tarafından üretilen güç değerleri.

Saat	Güç (W)											
	Ay											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5	-	-	-	-	-	24	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	35	154	264	228	76	7	-	-	-
7	-	155	252	310	472	619	575	409	292	205	-	-
8	383	442	688	679	831	989	944	817	725	589	606	315
9	631	744	1106	1025	1146	1300	1257	1180	1131	968	997	538
10	801	987	1403	1280	1376	1525	1484	1444	1427	1253	1284	701
11	891	1136	1569	1431	1512	1659	1620	1602	1598	1419	1448	791
12	916	1185	1621	1479	1556	1704	1665	1653	1653	1472	1499	817
13	884	1133	1565	1427	1509	1658	1618	1600	1592	1417	1443	786
14	790	982	1393	1272	1368	1520	1476	1437	1411	1247	1275	692
15	621	740	1094	1012	1133	1287	1239	1166	1101	961	988	531
16	379	441	682	670	818	972	921	803	677	585	602	312
17	-	155	251	308	466	608	560	403	63	205	-	-
18	-	-	-	35	153	261	224	76	6	-	-	-
19	-	-	-	-	-	25	-	-	-	-	-	-



Şekil 4.9. Liu-Jordon ve Tegethoff modelleri ile hesaplanan güç değerleri ile meteorolojik ölçüm verileri ile hesaplanan güç değerleri arasındaki farktan kaynaklanan mutlak hata değerleri.

5. DEĞERLENDİRME ve SONUÇLAR

Bu çalışmada fotovoltaiik panellerden temin edilen güç ile çalışan direkt akupleli fotovoltaiik su pompası sistemleri için optimum panel sayısı ve konfigürasyonu tespit etmek amacıyla istatistiksel bir metot uygulanmıştır. Sistemin uygulama yeri olarak ışıının şiddeti ve güneşlenme süresi açısından Türkiye'nin en zengin bölgesinde yer alan Şanlıurfa ili seçilmiştir.

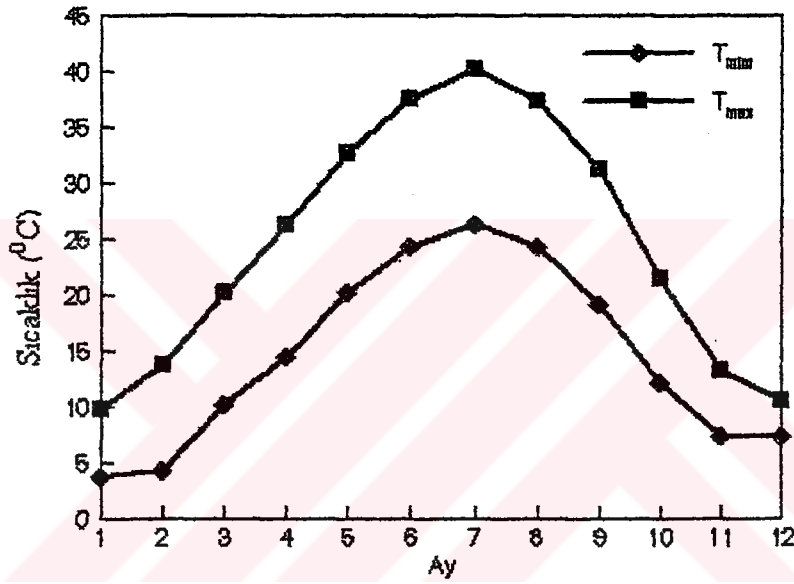
Çalışmanın ilk aşamasında Şanlıurfa ili için ışıının şiddeti ve çevre sıcaklığı veri tabanları oluşturulmuş ve verilerin tasarımıda kullanılabılmesine yönelik gerekli optimizasyon ve analizler yapılmıştır. İkinci aşamada panel sayısı ve konfigürasyonunun seçiminde, Şanlıurfa'nın meteorolojik parametrelerini göz önünde bulunduran istatistiksel bir metot kullanılmış ve seçilen sistemin yıllık enerji analizi yapılmıştır. Son olarak ise, Şanlıurfa'nın ışıının şiddeti ve çevre sıcaklık verilerine uygun bir matematiksel model seçimi yapılmış ve bu modeller ile hesaplanan değerlerin meteorolojik verilerle kıyaslanması yapılmıştır. Çalışmanın önemli aşamaları ile ilgili değerlendirmeler aşağıda özetlenmiştir.

5.1. Meteorolojik Veri Tabanlarının Oluşturulması

DMİ'den ham data şeklinde elde edilen Şanlıurfa'ya ait 1985-2001 arası saatlik ışıının şiddeti ve çevre sıcaklık verileri; geliştirilen bilgisayar programları yardımıyla yeniden düzenlenmiş, günlük, aylık ve yıllık ortalamalara ait veri tabanları oluşturulmuştur. Şanlıurfa'nın ışıının şiddeti ve çevre sıcaklığının günün ve yılın aylarına bağlı olarak gösterdiği değişim tablo ve grafiklerle 3.Bölüm'de gösterilmiştir. Yapılan gözlemlerden Şanlıurfa için yatay yüzeye gelen ışıının şiddeti yıllık ortalamasının 400 W/m^2 düzeyinde olduğu tespit edilmiştir.

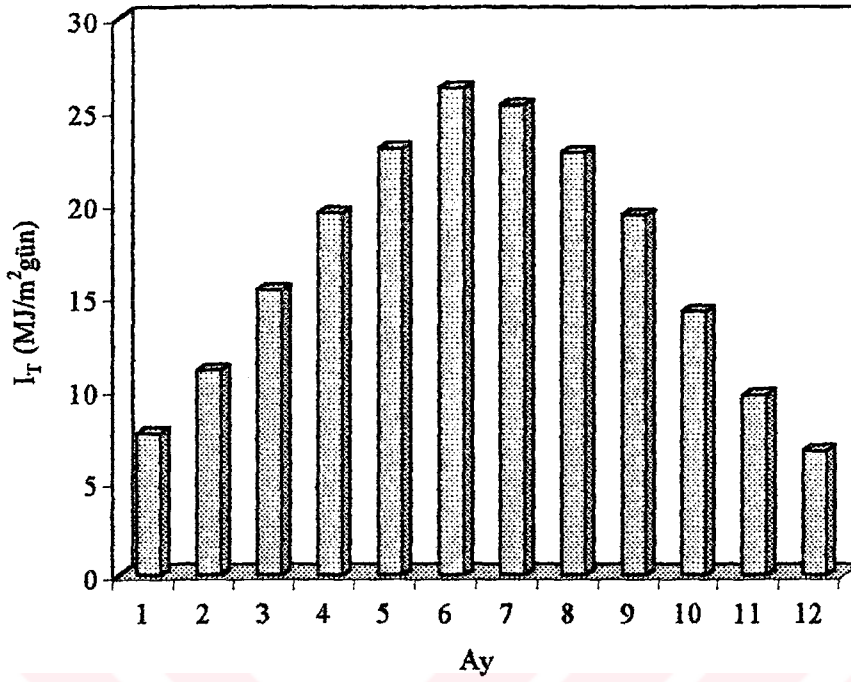
Çevre sıcaklığı için ise Şanlıurfa'da ortalama en düşük sıcaklığın 3.8°C (Ocak ayı), ortalama en yüksek sıcaklığın 40.1°C (Temmuz ayı) olduğu görülmüştür. Gün boyunca genelde maksimum sıcaklık anı 14:00, minimum sıcaklık anı 6:00 olmaktadır. Ortalama maksimum ve minimum sıcaklığın gün boyunca göstermiş olduğu değişim Şekil 5.1'deki diyagramda görülmektedir. Şekilden görüleceği gibi maksimum ve minimum sıcaklık arasında fark en yüksek düzeye Temmuz ayında ulaşmakta ve bu değer yaklaşık 14°C olmaktadır. Bu fark yaz ayları için aynı

düzeylerde kalmaktayken, kış aylarında 5°C 'ye kadar düşmektedir. Şanlıurfa için ortalama minimum sıcaklık ile maksimum sıcaklık periyodu arasındaki zaman süreci 6:00-14:00 olması nedeniyle, çevre sıcaklığının fotovoltaik sistem çıktısı üzerine etkisi en fazla bu zaman aralığında yaşanır. Fotovoltaik sistemlerde, sistem çıktısı üzerine çevre sıcaklığının $\% 0.25/^{\circ}\text{C}$ etkisi olduğu düşünülürse; Şanlıurfa'da günlük ortalama çevre sıcaklığı baz alınarak yapılacak bir analizde, saatlik çevre sıcaklığı kullanma durumuna kıyasla meydana gelecek hata yaklaşık olarak yüzde bir dolaylarındadır.



Şekil 5.1. Şanlıurfa'nın ortalama aylık maksimum (T_{max}) ve minimum (T_{min}) sıcaklıklarının yıl boyunca değerleri.

Şanlıurfa için yatay yüzeye gelen aylık ortalama günlük toplam ışıınım miktarı yılın tüm ayları için Şekil 5.2'deki histogramda gösterilmiştir. Bu histogramdan Şanlıurfa'nın güneş enerjisi potansiyelinin yıl boyunca gösterdiği değişim izlenebilir. Şekilden görüleceği gibi, yatay yüzeye gelen toplam günlük ışıınım miktarı açısından en yüksek ve en düşük arasındaki oran yaklaşık olarak 3.7'dir. Bu oran güneş yönüne dönük optimum eğimli yüzeyler için 2.3 değerine kadar düşmektedir. Bunun nedeni; yatay yüzeye gelen ışıınım içerisinde direkt ışıınım oranının, yayılı ışıınıma göre çok daha büyük olmasıdır. Böylesi bir durum panel eğim açısının sistem tasarımı içerisindeki önemini açıkça vurgulamaktadır.



Şekil 5.2. Şanlıurfa'da yatay yüzeye aylık ortalama günlük gelen ışı nım şiddeti değerleri.

5.2. Optimum Panel Eğim Açılarının Tespiti

Şanlıurfa için güney yönündeki panellerin optimum aylık ve saatlik ortalama eğim açıları tespit edilmiştir. Ayrıca yıl boyunca 37° sabit eğim açısında ve saptanan optimum açılarda yerleştirilmiş yüzeyler üzerine gelen ışı nım şiddetleri de hesaplanmıştır. Kıyaslamalar panel yüzeyine gelen günlük toplam ışı nım miktarları üzerinden yapılmıştır. Hesaplamalar göz önüne alınan üç koşul arasında kış aylarında belirgin bir fark olmadığı m, ancak yaz aylarında tersi bir durumun söz konusu olduğunu göstermektedir. Panel yüzeyi üzerine gelen günlük toplam ışı nım şiddeti açısından en uygun dizayn şeklinin ortalama optimum saatlik eğim açısı olduğu görölse de, ortalama saatlik optimum eğim açısı koşulu ile arasındaki farkın az olması ve kolay uygulanabilirliği nedeniyle panellerin optimum aylık ortalama eğim açılarında yerleştirilmelerinin daha uygun olacağı sonucuna varılmıştır.

5.3. Meteorolojik Verilerin Hesabı için Matematiksel Model Seçimi

Anlık ışı nım şiddeti için model seçimi Collares- Pereira-Rabl modeli, Garg-Garg modeli, Liu-Jordan modeli, ve Kılıç modeli arasından yapılmıştır. En uygun modeli bulma işlemi ise meteorolojik ölçüm verileri ile modeller sonucunda

elde edilen veriler arasında istatistiksel karşılaştırmalarla yapılmıştır. Yapılan gözlemler sonucunda, yıl ve gün boyunca Şanlıurfa için ölçüm verilerinden en az sapmayı Liu-Jordan, en büyük sapmayı ise Kılıç tarafından geliştirilen modelin gösterdiği görülmüştür. Kılıç modelinin uyum açısından tüm yıl ve gün boyunca büyük sapmalar göstermesinin nedeni, öğle sonrası saatlerde gösterdiği sapmaların diğer modellere nazaran daha büyük olmasıdır. Bunun aksine öğle öncesi saatlerde Kılıç modelinin gösterdiği sapma diğer modellere nazaran daha küçüktür. Bahsedilen şartlar altında bu çalışmada ışıınım şiddetlerinin hesabında Liu-Jordan modelinin kullanımı uygun bulunmuştur.

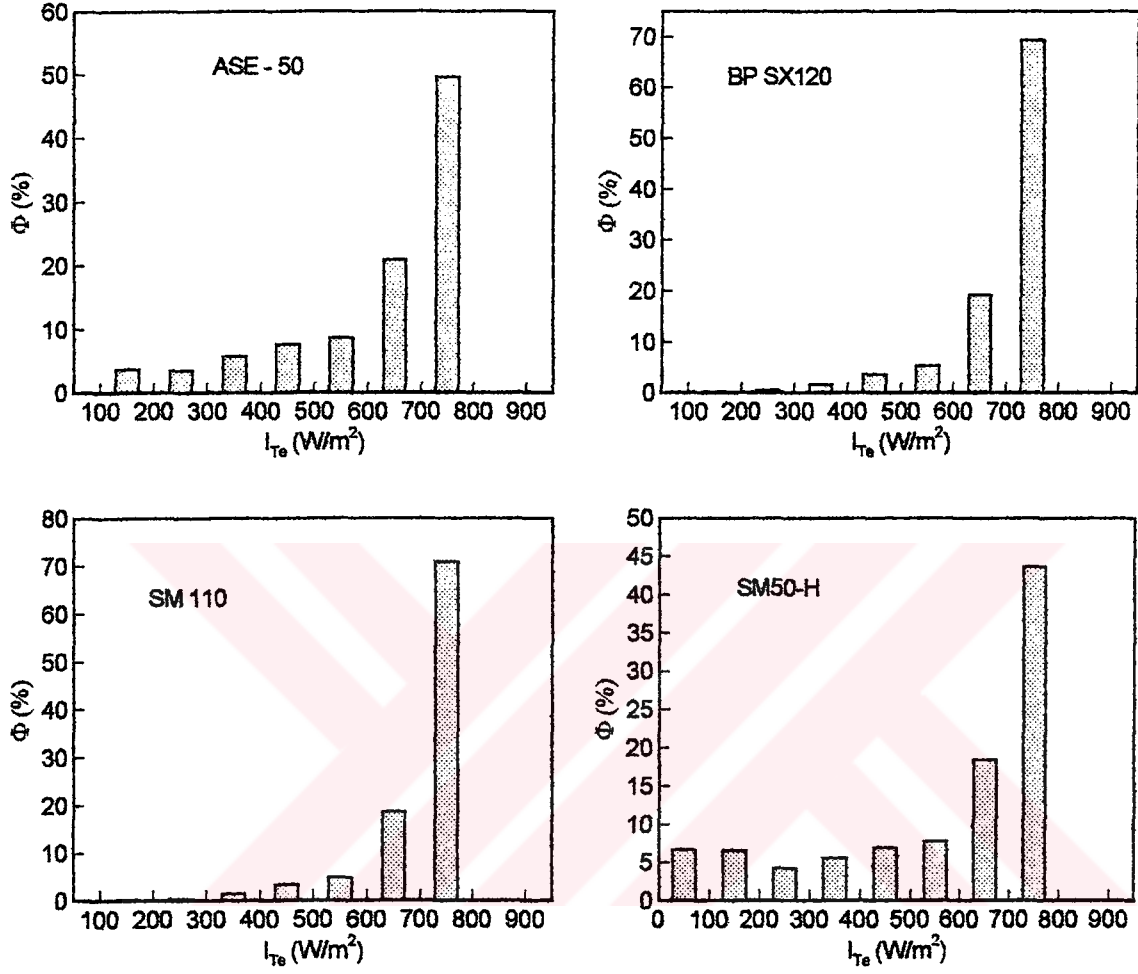
Çevre sıcaklığı için Tegethoff tarafından önerilen modelin Şanlıurfa için fotovoltaik sistem hesaplamalarında kullanılabilirliği araştırılmıştır. Tegethoff tarafından önerilen matematiksel modelin 8:00-18:00 saatleri arasında meteorolojik ölçüm verilerine göre gösterdiği mutlak hataların nispeten düşük olması, modelin basitliği ve fotovoltaik sistemlerin etkili çalışma aralığı olan 10:00-17:00 saatlerine uygunluğu nedeniyle bu modelin kullanımı uygun bulunmuştur.

5.4. Optimum Panel Sayısı-Konfigürasyonunun Seçimi

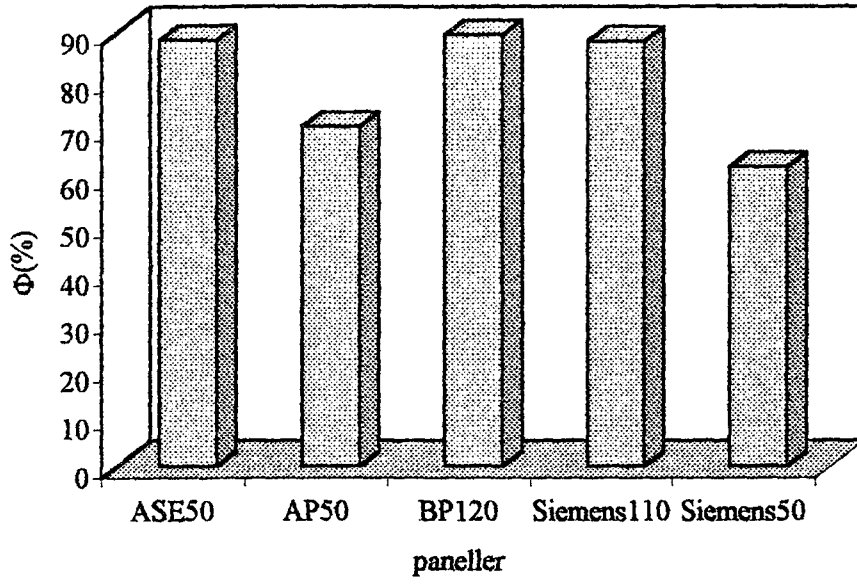
Çalışmada optimizasyon aralığının tespiti amacıyla tanımlanan kullanılabilirlik ölçüsü, hesaplamalarda kullanılan AP50 PV paneli haricinde, Mayıs ayı referans olmak üzere dört farklı üretici firmanın ürettiği PV panel için Şekil 5.3'deki histogramda görülmektedir. Kullanılan bu farklı panellere ait teknik özellikler Ek 2'de verilmiştir. Şekil 5.3'deki histogramdan görüleceği gibi Mayıs ayının saptanan optimizasyon aralığı olan 600-800 W/m² ışıınım aralığında dört panelin kullanılabilirlikleri birbirlerine yakın düzeydedir.

Bu çalışma için seçilen AP50 ve kıyaslama için kullanılan diğer dört panelin Mayıs ayında 600-800 W/m² ışıınım aralığında toplam kullanılabilirlikleri Şekil 5.4'de gösterilmektedir. Histogramdan görüleceği gibi, kullanılabilirlikler arasında sadece teknik özelliklere bağlı küçük farklar olup, bu durum çalışmada kullanılan kullanılabilirlik kavramının isabetli olduğunu göstermektedir. Optimum panel sayısı ve konfigürasyonu seçimi için geliştirilen metodun doğruluğunu gösteren en önemli faktörlerden biri olan sistem veriminin, panelin maksimum çalışma verimine oranını gösteren diyagram Şekil 5.5'de gösterilmiştir. Bu oranın

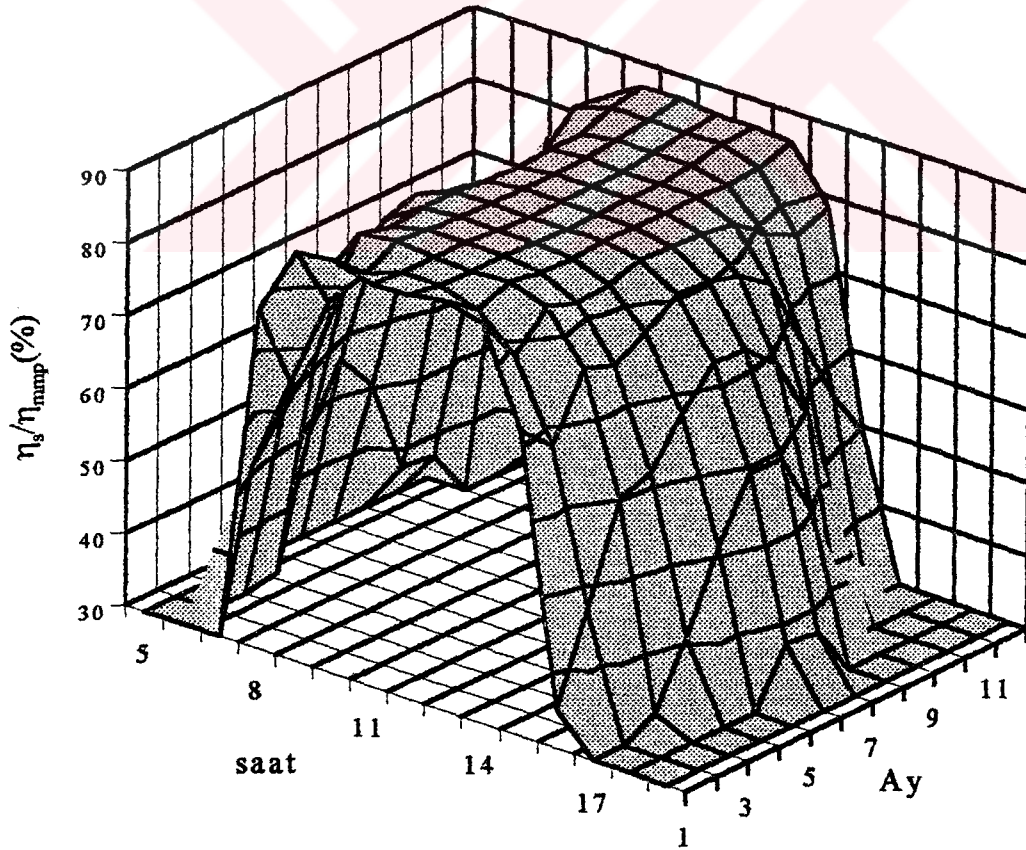
günün ve yılın büyük bir periyodunda yüzde seksenin üzerinde olması çalışmanın amacına ulaştığını göstermektedir.



Şekil 5.3. ASE 50, BP SX120, Siemens SM 110 ve Siemens SM50-H PV panellerin Şanlıurfa ili için Mayıs ayında aylık ortalama günlük kullanılabilirliğinin ısıtım seviyelerine dağılımı.



Şekil 5.4. ASE 50, AP50, BP SX120, Siemens SM 110 ve Siemens SM50-H PV panellerin Mayıs ayının optimizasyon aralığında kullanılabilirliklerinin toplam seviyesi.



Şekil 5.5. Seçilen sistem veriminin hesaplamalarda kullanılan panelin maksimum çalışma noktalarındaki (MPP) verimine oranının saat ve aylara göre değişimi.

6. KAYNAKLAR

- [1] Muntasser, M. A., Bara, M. F., Quadri, H. A., EL-Tarabelsi, R., La-Azebi, I. F., "Photovoltaic Marketing In Developing Countries", Applied Energy, Vol 65, pp 67-72, 2000.
- [2] Kurokawa, K., Ikki, O., "The Japanese Experiences with National PV System Program", Solar Energy, Vol 70, pp 457-466, 2001.
- [3] Oliver, M., Jackson, T., "The Market for Solar Photovoltaic", Energy Policy, Vol. 27, pp 371-385, 1999.
- [4] Yeşilata, B., Aktacir, M. A., " Fotovoltaik Güç Sistemli Su Pompalarının Dizayn Esaslarının Araştırılması", Mühendis ve Makina, cilt 42, sayı. 493, sy 29-34, 2000.
- [5] Lin, G. H., Carlson, D. E., "Photovoltaic in the year 2025", Hydrogen Energy, Vol 25, pp 807-811, 2000.
- [6] Fry, B., "Simulation of Grid-Tied Building Integrated Photovoltaic Systems", Master Thesis, The University of Wisconsin-Madison, Solar Energy Laboratory, 1998.
- [7] Yeşilata, B., Fıratoğlu, Z. A., "Bataryalı ve Direkt Akupleli Fotovoltaik Pompa Sistemlerinin Çalışma Karakteristiklerinin Araştırılması", Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu Bildiriler Kitabı, sy 129-135, 10-12 Eylül, 2001, Kayseri.
- [8] Bloos, H., "Analytical and Experimental Investigation of Photovoltaic Pumping Systems", Doctor Thesis, University of Oldenburg, 2000.
- [9] Fıratoğlu Z. A., Yeşilata B., "Fotovoltaik Destekli Su Pompası Uygulamasının Dinamik Analizi", II Gap ve Sanayi Kongresi, Sayfa 541-549, 29-30 Eylül, 2001, Diyarbakır.
- [10] Al-Shaban, S., Mohmoud, A., "Self-Control System in Storage Unit of PV Plants", Applied Energy, Vol 65, pp 85-90, 2000.
- [11] Zaki, A. M., Eskander, M. N., "Matching of Photovoltaic Motor-Pump Systems for Maximum Efficiency Operation", Renewable Energy, Vol 7, pp 279-288, 1996.
- [12] Fıratoğlu Z. A., Yeşilata B., "Maksimum Güç Noktası İzleyicili Fotovoltaik Sistemlerin Optimum Dizaynı ve Çalışma Koşullarının Araştırılması", 6-Türk Alman Enerji Sempozyumu, 23-25 Haziran, 2001, İzmir.

- [13] Veerachary, M., Yadaiah, N., "Ann Based Peak Power Tracking for PV Supplied DC Motors", Solar Energy, Vol 69, pp 343-350, 2000.
- [14] Appelbaum, J., Bany, J., "Performance Analysis of D.C. Motor Photovoltaic Converter System-I", Solar Energy, Vol 22, pp 439-445, 1978.
- [15] Appelbaum, J., "Performance Analysis of DC Motor-Photovoltaic Converter System-II", Solar Energy, Vol 27, pp 421-431, 1981.
- [16] Landridge, D., Lawrance, W., "Development of a Photovoltaic Pumping System Using a Brushless D.C. Motor and Helical Rotor Pump", Solar Energy, Vol 55, pp 151-160, 1996.
- [17] Vetter, G., Wirth, W., "Suitability of Eccentric Helical Pumps for Turbid Water Deep Well Pumping in Photovoltaic Systems", Solar Energy, Vol 51, pp 205-214, 1993.
- [18] Anis, W. R., Mertens, R. P., Van Overstraeten, R. J., "Coupling of a Volumetric Pump to a Photovoltaic Array", Solar Cells, Vol 14, pp 27-42, 1985.
- [19] Hsiao, Y. R., "Direct Coupling of Photovoltaic Power Source to Water Pumping System", Solar Energy, Vol 32, pp 489-498, 1984.
- [20] Suehrcke, H., Appelbaum, J., Reshef, B., "Modeling a Permanent Magnet DC Motor/Centrifugal Pump Assembly in a Photovoltaic Energy System", Solar Energy, Vol 59, pp 37-42, 1997.
- [21] Fraidenraich, N., Vilela, O. C., "Performance of Solar Systems With Non-Linear Behavior Calculated by The Utilizability Method: Application to PV Solar Pumps", Solar Energy, Vol 69, pp 131-137, 2000.
- [22] Narvarte, L., Lorenzo, E., Caamano E., "PV Pumping Analytical Design and Characteristics of Boreholes", Solar Energy, Vol 68, pp 49-56, 2000.
- [23] Loxsom, F., Durongkaveroj, P., "Estimating The Performance of a Photovoltaic Pumping System", Solar Energy, Vol 52, pp 215-219, 1994.
- [24] Salameh, Z., Mulpur, A. K., Dagher, F., "Two-Stage Electrical Array Reconfiguration Controller for PV-Powered Water Pump", Solar Energy, Vol 44, pp 51-56, 1990.
- [25] Al-Karaghoulali, A., Al-Sabounchi, A. M., "A PV Pumping System", Applied Energy, Vol 65, pp 145-151, 2000.
- [26] Fıratoglu Z. A., Yeşilata B., "Fotovoltaik Güç Destekli Dalgıç Pompa Sistemlerinde Optimum Dizayn Koşullarının Araştırılması", Tesisat Mühendisliği Dergisi, Nisan-Mart Sayısı, Sayfa 59-66, 2001.

- [27] Green, M. A., "Photovoltaic: Technology Overview", *Energy Policy*, Vol 28, pp 989-998, 2000.
- [28] Hsieh S. J., *Solar Energy Engineering*, Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey, 1986.
- [29] Shah, A., Platz, V. R., Keppner, H., "Thin-film Silicon Solar Cells: A Review and Selected Trends", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol 38, pp 501-520, 1995.
- [30] Treble, F., "Milestones in the Development of Crystalline Silicon Solar Cells", *Renewable Energy*, Vol 15, pp 473-478, 1998.
- [31] Duffie, J., Beckman, W. A., *Solar Engineering of Thermal Processes*, 2nd edn., Wiley Interscience, 1991.
- [32] Cross, T. A., Huggins, C. R., "Advanced Single Crystal III-V Solar Cell Technology and its Applications", *Renewable Energy*, Vol 6, pp 283-290, 1995.
- [33] Palsule, C., Liu, S., Gangopadhyay, S., Holtz, M., Lamp, D., Kristiansen, M., "Electrical and Optical Characterization of Crystalline Silicon/Porous Silicon Heterojunctions", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol 46, pp 261-269, 1997.
- [34] Kou, Q., "A Method for Estimation the Long-Term Performance of Photovoltaic Pumping System", Master Thesis, The University of Wisconsin-Madison, Solar Energy Laboratory, 1996.
- [35] Kou S.A., Klein A., Beckman W., "A Method for Estimating the Long-Term Performance of Direct Coupled PV Pumping Systems", *Solar Energy*, Vol. 64, pp 33-39, 1998.
- [36] A. M. Al-İbrahim, Beckman, W. A., Klein, S. A., Mitchell J. W., "Design Procedure for Selection an Optimum Photovoltaic Pumping System in a Solar Domestizing Hot Water System", *Solar Energy*, Vol 64, pp 227-239, 1998.
- [37] Konner, P. K., "Optimization Techniques for a Photovoltaic Water Pumping System", *Renewable Energy*, Vol 6, pp 53-62, 1995.
- [38] Swamy, P. C. L., Singh, B., Singh, B. P., "Dynamic Performance of a Permanent Magnet Brushless DC Motor Powered by a PV Array for Water Pumping", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol 36, pp 187-200, 1995.
- [39] Uğuz, N., Gökçaya, M., *Elektrik Makinaları Cilt-I*, Mili Eğitim Basımevi, İstanbul, sy 164-201, 1978.

- [40] Mummadi, V. C., "Steady-State and Dynamic Performance Analysis of PV Supplied DC Motors Fed from intermediate Power Converter", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol 61, pp 365-381, 2000.
- [41] Anis, W. R., Metwally, H., M. B., "Dynamic Performance of a Directly Coupled PV Pumping System", *Solar Energy*, Vol 53, pp 369-377, 1994.
- [42] Braunstein, A., Kornfeld, A., "Analysis of Solar Powered Electric Water Pumps", *Solar Energy*, Vol 27, pp 235-240, 1981.
- [43] Mohandes, M., Balghonaim, A., Kassas, REHMAN, M. S., Halawani, T. O., "Use of Radial Basis Functions for Estimating Monthly Mean Daily Solar Radiation", *Solar Energy*, Vol 69, pp 161-168, 2000.
- [44] Mohandes, M., Rehman, R., Hawalana, T. O., "Estimation of Global Solar Radiation Using Artificial Neural Networks", *Renewable Energy*, Vol 14, pp 179-184, 1984.
- [45] Mc Vicar, T. R., Jupp, D. L. B., "Estimating one-time-day Meteorological Data from Standard Daily Data as Inputs to Thermal Remote Sensing Based Energy Balance Models", *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol 96, pp. 219-228, 1999.
- [46] Lam, J. C. Li, D. H. W., "Correlation Between Global Solar Radiation and its Direct and Diffuse Components", *Building and Environment*, Vol 31, pp 527-535, 1996.
- [47] Hay, J. E., "Calculation of Monthly Mean Solar Radiation for Horizontal and inclined Surfaces", *Solar Energy*, Vol 23, pp 301-307, 1979.
- [48] Njau, E. C., "Differential Variations of Maximum and Minimum Temperatures", *Renewable Energy*, Vol 18, pp147-155, 1999.
- [49] Reindi, D. T., Beckman, W. A., Duffie, J. A., "Evaluation of Hourly Tilted Surface Radiation Models", *Solar Energy*, Vol 45, pp 9-17, 1990.
- [50] Hollands K. G. T., Huget, R. G., "A Probability Density Function for the Clearness Index, With Applications", *Solar Energy*, Vol 30, pp 195-209, 1983.
- [51] Dinçer, İ., "Optimum Tilt Angle for Solar Collectors Used in Cyprus", *Renewable Energy*, Vol 6, pp 813-819, 1995.
- [52] Klein, S. A., "Calculation of Monthly Average Insulation on Tilted Surfaces", *Solar Energy*, Vol 19, pp 325-329, 1977.

- [53] Srivastava, S. K., Singh, O. P., Pandey, G. N., "Correlations for the Estimation of Hourly Global Solar Radiation", *Applied Energy*, Vol 52, pp 55-64, 1995.
- [54] Gansler, R. A., Klein, S. A., Beckman, W. A., "Investigation of Minute Solar Radiation Data", *Solar Energy*, Vol 55, pp 21-27, 1995.
- [55] Metwally, H. M. B., Anis, W. R., "Dynamic Performance of Directly Coupled Photovoltaic Water Pumping System Using D. C. Shunt Motor", *Energy Covers*, Vol 37, pp 1407-1416, 1996.
- [56] Tsalides, P., Thanailakis, A., "Direct Computation of Array Optimum Tilt Angle in Constant Tilt Photovoltaic Systems", *Solar Cells*, Vol 14, pp 83-94, 1985.
- [57] Bulut, H., Büyükalaca, O. Yılmaz, A., "Türkiye'nin 15 İli için Bazı İklim Verilerinin Eşitliklerle İfadesi", *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, Mayıs-Haziran, sy 48-56, 1999.
- [58] Olmo, F. J., Vida, I., Foyo, Y., Castro-Diez, L., Alodos-Arboledas, "Prediction of Global Irradiance on inclined Surface from Horizontal Global Irradiance", *Energy*, Vol. 24, pp. 689-704, 1998.
- [59] Kılıç , K., Öztürk, S., "Anlık tüm Güneş Işınımı", *Güneş Enerjisi*, sy. 72-75, Kipaş Dağıtımçılık, 1983.
- [60] Ünal, A., Tanes, Y., Onur, H. Ş., "Günlük Ortalama Güneş Işınımı ve Sıcaklık Değerlerinin Yıllık Değişiminin Sürekli Fonksiyonlarla İfadesi, Fonksiyon Parametrelerinin Türkiye'deki Dağılımı", *Isı Bilim ve Tekniği Dergisi*, sy 37-45, 1986.
- [61] Fıratoğlu Z. A., Yeşilata B., "Lineer Elektriksel Yüke Bağlı PV Panellerin Optimizasyonu ve Bölgesel Uygulanabilirliğinin Araştırılması", 4. Gap Mühendislik Kongresi Bildiriler Kitabı, Sayfa 204-212, 06-08 Haziran, 2002, Şanlıurfa.

7. EKLER

Ek 1. Optimizasyon İçin Seçilen Sistem Bileşenlerin Teknik Özellikleri

PV Panel [AP-50].

Nominal Gücü (STK)	50	Wat
Açık devre gerilimi ($STK(V_{oc})$)	21.5	Volt
Maksimum nokta da panel gerilim çıktısı ($STK(V_{mp})$)	16.7	Volt
Kısa devre akımı ($STK(I_{sc})$)	3.3	Amper
Maksimum nokta da panel akım çıktısı ($STK(I_{mp})$)	3.0	Amper
Panel verimi ($STK(\eta)$)	8.83	%
Panel boyutları	8.58x6.6	cm ²

DC Motor [18].

Nominal gücü	2983	Wat
Nominal gerilimi	115	Volt
Nominal akımı	32	Amper
Motor direnci (<i>Armatür direnci</i> (R_a))	0.17	ohm
Nominal verimi	81	%

Santrifüj Pompa [41].

Pompa kanatçık sayısı (z)	5	-
Kanatçık giriş açısı (β_1)	50	Derece
Kanatçık çıkış açısı (β_2)	40	Derece
Pompa çarkı giriş çapı (R_2)	0.032	m
Pompa çarkı çıkış çapı (R_2)	0.088	m
Kanatçığın giriş yüksekliği (b_1)	0.012	m
Kanatçığın çıkış yüksekliği (b_2)	0.02	m

Ek 2. Kıyaslama Amacıyla Kullanılan PV Panellerin Teknik Özellikleri

ASE-50

Nominal Gücü (STK)	50	Wat
Açık devre gerilimi ($STK(V_{oc})$)	20	Volt
Maksimum nokta da panel gerilim çıktısı ($STK(V_{mp})$)	17.2	Volt
Kısa devre akımı ($STK(I_{sc})$)	3.2	Amper
Maksimum nokta da panel akım çıktısı ($STK(I_{mp})$)	2.9	Amper
Panel verimi ($STK(\eta)$)	11.37	%
Panel boyutları	0.44	m ²

BP SX120

Nominal Gücü (STK)	120	Wat
Açık devre gerilimi ($STK(V_{oc})$)	41.2	Volt
Maksimum nokta da panel gerilim çıktısı ($STK(V_{mp})$)	32.9	Volt
Kısa devre akımı ($STK(I_{sc})$)	3.69	Amper
Maksimum nokta da panel akım çıktısı ($STK(I_{mp})$)	3.34	Amper
Panel verimi ($STK(\eta)$)	12.77	%
Panel boyutları	1.06	m ²

Siemens 110

Nominal Gücü (STK)	110	Wat
Açık devre gerilimi ($STK(V_{oc})$)	21.7	Volt
Maksimum nokta da panel gerilim çıktısı ($STK(V_{mp})$)	17.5	Volt
Kısa devre akımı ($STK(I_{sc})$)	6.9	Amper
Maksimum nokta da panel akım çıktısı ($STK(I_{mp})$)	6.3	Amper
Panel verimi ($STK(\eta)$)	13.94	%
Panel boyutları	0.789	m ²

Siemens 50

Nominal Gücü (STK)	50	Wat
Açık devre gerilimi ($STK(V_{oc})$)	19.8	Volt
Maksimum nokta da panel gerilim çıktısı ($STK(V_{mp})$)	15.9	Volt
Kısa devre akımı ($STK(I_{sc})$)	3.35	Amper
Maksimum nokta da panel akım çıktısı ($STK(I_{mp})$)	3.15	Amper
Panel verimi ($STK(\eta)$)	13.55	%
Panel boyutları	0.37	m ²



ÖZGEÇMİŞ

21.03.1975 yılında Şanlıurfa'nın Siverek ilçesinde doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini aynı yerde tamamladı. 1995-1996 öğretim yılında Harran Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümüne kayıt yaptırdı. 1999 - Haziran döneminde Harran Üniversitesi'nden Makina Mühendisi olarak mezun oldu. 1999 - 2000 öğretim yılında Makina Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans eğitimine başladı. 2000 yılı Kasım ayında Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı.

2000 yılında Yrd. Doç. Dr. Bülent YEŞİLATA danışmanlığında başladığı "Fotovoltaik Destekli Su Pompalarının Analizi ve Optimizasyonu" isimli Yüksek Lisans Tez çalışması tamamlanmış bulunmaktadır.

