



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEK EKSEN GÜNEŞ TAKİPLİ FOTOVOLTAİK SİSTEM
TASARIMI ve KONYA İÇİN ÖRNEK BİR UYGULAMA

Serdar NUHOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Nisan-2017

KONYA

Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Serdar NUHOĞLU tarafından hazırlanan “*Tek Eksen Güneş Takipli Fotovoltaik Sistem Tasarımı ve Konya için Örnek Bir Uygulama*” adlı tez çalışması 26/04/2017 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Yrd. Doç. Dr. Aziz Hakan ALTUN

Danışman

Doç. Dr. Ahmet SAMANCI

Üye

Yrd. Doç. Dr. Dilek Nur ÖZEN

İmza

.....

.....

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Ahmet COŐKUN
Enstitü Müdür

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all materials and results that are not original to this work.

Serdar NUHOĞLU

26.04.2017

ÖZET**YÜKSEK LİSANS TEZİ****TEK EKSEN GÜNEŞ TAKIPLI FOTOVOLTAİK SİSTEM TASARIMI ve
KONYA İÇİN ÖRNEK BİR UYGULAMA****Serdar NUHOĞLU****Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı****Danışman: Doç. Dr. Ahmet SAMANCI****2017, 69 Sayfa****Jüri****Doç. Dr. Ahmet SAMANCI
Yrd. Doç. Dr. Dilek Nur ÖZEN
Yrd. Doç. Dr. Aziz Hakan ALTUN**

Bu tez çalışması kapsamında; tek eksen güneş takipli bir sistem ile sabit bir sistemin verimlerini karşılaştırmak amacıyla özdeş iki adet 255 W gücünde fotovoltaik (PV) panel sistemi yan yana kurularak aynı şartlar altında deneysel olarak incelendi. Bu amaçla, PV paneli tam ortasından taşıyacak ve doğu-batı yatay ekseninde rahatça dönebilen çelik kutu profilden bir konstrüksiyon tasarlandı ve iki adet üretildi. Bunlardan biri; PV panel eğim açısı manuel olarak ayarlanabilecek şekilde imal edildi ve sabit sistem için Konya bölgesinde kurulu güneş santrallerinin tüm yıl verimini maksimize eden eğim açısı esas alınarak 32° olarak konumlandırıldı. Diğerinde ise Arduino programı ile kontrol edilen sonsuz vida-karşılık dişli çarklı DC motorlu bir tahrik sistemi ile doğu-batı ekseninde dönebilen ve bu eksende $\pm 5^\circ$ lik bir tolerans dahilinde güneşi dik alabilen bir sistem kuruldu. Her iki sistem tam güneşe bakacak şekilde yan yana kurularak anlık ışınım, akım ve gerilim değerleri kaydedildi. Ölçümler Konya ili Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi mekanik atölye bahçesinde (37°51'56.30"K, 32°25'4.01"D) 2017 yılı Nisan ayında yapıldı. Tek eksen güneş takipli sistemin, sabit sisteme göre nisan ayı boyunca %23 daha yüksek verime sahip olduğu tespit edildi.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik (PV), Tek eksen güneş takip,

ABSTRACT**M.Sc. THESIS****DESIGN of SINGLE AXIS SUN TRACKING PHOTOVOLTAIC SYSTEM and
A CASE STUDY for KONYA****Serdar NUHOĞLU****The Graduate School of Natural and Applied Science
of Necmettin Erbakan University
The Degree of Master of Science
in Mechanical Engineering****Advisor: Assoc. Dr. Ahmet SAMANCI****2017, 69 Pages****Jury****Assoc. Dr. Ahmet SAMANCI
Asst. Prof. Dr. Dilek Nur ÖZEN
Asst. Prof. Dr. Aziz Hakan ALTUN**

Within the scope of this thesis study; In order to compare the efficiency of a fixed system with a single axis solar powered system, two PV panels were installed side by side on 255 W power plants and examined experimentally under the same conditions. For this purpose, a construction was designed and two pieces were produced from the steel box profiler which can be moved from the center of the PV panel and turn freely in the east-west horizontal axis. One of these; The tilt angle was designed to be manually adjustable and was positioned at 32 ° based on the tilt angle that maximizes the yearly efficiency of the solar plants installed in the Konya region for a fixed system. The other, a system with a worm-toothed gearwheel-driven DC motor controlled by the Arduino program was installed on the east-west axis and a system capable of steepening the sun with a tolerance of $\pm 5^\circ$ to this axis. Both systems were installed side-by-side with a view to the south, and instant radiation, current and voltage values were recorded. Measurements were made in April, 2017 at the mechanical workshop garden (37 ° 51'56.30 "K, 32 ° 25'4.01" D) of the Engineering Faculty of the Necmettin Erbakan University in Konya. The single-axis solar-powered system was found to have a 23% higher efficiency over the fixed system duration month of April.

Keywords: Photovoltaic, PV, Single axis, Solar energy, Sun tracking

ÖNSÖZ

Çalışmalarım boyunca farklı bakış açıları ve bilimsel katkılarıyla beni aydınlatan, yakın ilgi ve yardımlarını esirgemeyen ve bu günlere gelmemde en büyük katkı sahibi çok değerli hocam Doç. Dr. Ahmet SAMANCI' ya teşekkürü bir borç bilirim. Bu tez çalışmasına maddi destek veren Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (Proje No:161319009) teşekkür ederim. Ayrıca; çalışmalarım süresince sabır göstererek beni daima destekleyen aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

Serdar NUHOĞLU
KONYA-2017

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Sabit Sistemler	1
1.2. Güneş Takip Sistemleri.....	1
1.3. Tezin Amacı ve Metodolojisi.....	4
1.4. Güneş Astronomisi.....	5
1.5. Gölgeleme	10
2. LİTERATÜR TARAMASI	13
2.1. Takip Sistemlerinde Enerji Verimliliği.....	13
2.2. Güneş Takip Metodları	17
2.2.1. Pasif takip sistemleri	17
2.2.2. Aktif takip sistemleri.....	17
2.2.3. Veri ve zaman tabanlı kontrol sistemleri	20
2.3. Takip Sistemlerinde Tekno-Ekonomik Analiz	22
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	27
3.1. Materyal	27
3.2. Yöntem.....	37
3.2.1. Tek eksen güneş takip sistemi seçimi	38
3.2.2. PV Simülasyon programın seçimi.....	39
3.2.3. Sistem değerlerinin (akım, volt ve güç) ölçümü.....	39
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	40
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	53
5.1. Sonuçlar	53
5.2. Öneriler	53
KAYNAKLAR	54
ÖZGEÇMİŞ.....	58

SİMGELER ve KISALTMALAR

SİMGELER

L_k	:Kollektör uzunluğu (m)
Φ	:Enlem ($^{\circ}$)
λ	:Boylam ($^{\circ}$)
δ	:Deklinasyon açısı ($^{\circ}$)
ω	:Saat açısı ($^{\circ}$)
θ_z	:Zenit açısı ($^{\circ}$)
γ_s	:Güneş azimut açısı ($^{\circ}$)
γ	:Yüzey azimut açısı ($^{\circ}$)
β	:Kollektör eğim açısı ($^{\circ}$)
α_s	:Güneş yükseklik açısı ($^{\circ}$)
θ	:Güneş geliş açısı ($^{\circ}$)
EA	:Kollektörlerin yatay düzlemle yaptıkları açı ($^{\circ}$)
GM	:Kollektör dizileri arasında bırakılması gereken mesafe (m)
GY	:Dizi halindeki kollektörlerin güneşi direk görmeye başladıkları yükseklik açısı ($^{\circ}$)
P_{max}	:Maksimum güç (W)
I_{mp}	:Maksimum akım (A)
V_{mp}	:Maksimum gerilim (V)
I_{sc}	:Kısa devre akımı (A)
V_{oc}	:Açık devre gerilimi (V)

KISALTMALAR

AC	:Alternatif akım
DC	:Doğru akım
$E-W$:Doğu-Batı (East-West)
$GEPA$:Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası
LDR	:Işığa bağlı direnç (Light Dependent Resistance)
$N-S$:Kuzey-Güney (North-South)
PV	:Fotovoltaik
PIC	:Peripheral Interface Controller
PLC	:Programlanabilir mantıksal denetleyici (Programmable Logic Controller)
STC	:Standart denetim koşulları (Standart Test Conditions)

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Dikey eksen takip (solda), yatay eksen takip (sağda).....	2
Şekil 1.2. Azimut ekseninde eğik eksen takip (solda), çift eksen takip (sağda) ...	3
Şekil 1.3. Güneş takip çeşitleri.....	4
Şekil 1.4. Dünyanın güneş etrafındaki yörüngesi, ekinokslardaki konumu ve deklinasyon açıları	6
Şekil 1.5. Deklinasyon açısının aylara göre değişimi	7
Şekil 1.6. Saat açısı (ω).....	8
Şekil 1.7. Yazın ve kışın öğle saatinde zenit açısı (θ_z) , deklinasyon açısı (δ) ve Enlem açısı (Φ) arasındaki ilişki (Roger & Jerry, 2005)	8
Şekil 1.8. Eğim açısı (β), zenit açısı (θ_z), güneş yükseklik açısı (α_s) ve güneş azimut açısı (γ_s).....	9
Şekil 1.9. Çeşitli güneş açılarının eğik düzlemde gösterimi	10
Şekil 1.10. Dizin halinde yerleştirilmiş kolektörlerin gölgelenme hesabı için gerekli parametreler	12
Şekil 2.1. Sabit ve takip sistemi arasındaki enerji karşılaştırması	18
Şekil 2.2. (soldan sağa) enlem açısına eşit eğim açısında tek eksen takip sistemi; enlem açısına eşit eğim açısında çift eksen ekvatorial güneş takip sistemi; azimut/yükseklik çift eksen güneş takip sistemi.....	21
Şekil 2.3. Model-A, model-B ve model-C'ye göre montaj edilen farklı V-troughs yoğunlaştırılmış PV sistemleri için güç üretimi ve I-V eğrileri.....	23
Şekil 2.4. Farklı takip sistemleri için enerji kazanımları	24
Şekil 3.1. Yan yana yerleştirilen güneş takipli (solda) ve sabit sistemlerin (sağda) deney düzeneği.....	27
Şekil 3.2. ACS712 akım sensörü	29
Şekil 3.0.3. ACS712 akım sensörü bağlantı şeması.....	29
Şekil 3.4. Sabit sistem konstrüksiyon bileşenleri.....	30
Şekil 3.5. Tek eksen güneş takibi için DC motor ve redüktör dişli bağlantısı....	31
Şekil 3.6. Sistemlerde yük olarak kullanılan tepegözü lambası.....	32
Şekil 3.7. Kontrolör Programı Akış Diyagramı	34
Şekil 3.8. L298 DC motor sürücüsü.....	36
Şekil 3.9. Tek eksen takip sisteminde kullanılan DC'yi AC'ye çeviren inverter	37

Şekil 3.10. Aynı şartlarda yan yana yerleştirilen tek eksen kuzey-güney takipli sistem (solda) ve sabit sistem (sağda)	38
Şekil 4.1. Tek eksen N-S takipli sistem (solda) ve sabit sistem (sağda).....	40
Şekil 4.2. 255 W gücünde sabit PV sistemin akım, voltaj ve güç değerleri (Konya, Nisan 2017)	42
Şekil 4.3. 255 W gücünde tek eksen güneş takipli PV sistemin akım, voltaj ve güç değerleri (Konya, Nisan 2017)	43
Şekil 4.4. 255 W gücünde sabit ve tek eksen güneş takipli PV sistemlerin güç ve güneş ışınım değerleri (Konya, Nisan 2017)	43
Şekil 4.5. 255 W gücünde Sabit ve tek eksen güneş takipli sistemin zamana göre eğim açılarındaki değişim (Konya, Nisan 2017).....	44
Şekil 4.6. Konya için aylara göre güneş yükseklik açısı ve azimut açısı (Sunearthtools, 2017)	45
Şekil 4.7. Konya için güneşin farklı aylardaki saatlere göre hareket eğrisi (sarı çizgi: 4 Nisan 2017) (Sunearthtools, 2017)	46
Şekil 4.8. Konya için yıllık güneşlenme süreleri (“GEPA,” 2017)	47
Şekil 4.9. Konya için sabit ve tek eksen güneş takipli sistemler için yıllık güç üretimleri	47
Şekil 4.10. Konya için PVSYST simülasyon parametreleri	49
Şekil 4.11 Konya için 255 W gücünde PVSYST simülasyon sonuçları.....	50

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 1.1. Monokristal ve polikristal PV panellerinin verimleri ve maliyetleri 1	
Çizelge 3.1. Fotovoltaik panelin Standart Denetim Koşullarındaki (STC) değerler (hava kütlesi (AM) 1.5, güneş ışınımı 1000 W/m ² , panel sıcaklığı 25°C)	28
Çizelge 3.2. Fotovoltaik hücrelerin Normal Çalışma Sıcaklığındaki Değerleri (Işınım yoğunluğu 800 W/m ² , spectrum AM 1.5, ortam sıcaklığı 20°C, rüzgâr hızı 1 m/sn)	28
Çizelge 3.3. Akım sensör özellikleri.....	29
Çizelge 3.4. Gerilim Sensör Özellikleri	30
Çizelge 3.5. Redüktörlü DC motor teknik özellikleri	31
Çizelge 3.6. Sistemlerde yük olarak kullanılan lambaların teknik özellikleri	32
Çizelge 3.7. Arduino UNO özellikleri	35
Çizelge 3.8. İnverter Teknik Özellikleri	36

1. GİRİŞ

Yenilenebilir enerji kaynakları; güneş, rüzgar, dalga, hidrolik, jeotermal ve biokütle enerjisi olarak sıralanabilir. Yenilenebilir enerji kaynakları içinde yaygın kullanılan türlerden birisi güneş enerjisidir.

Ülkemiz bulunduğu konum itibariyle güneşlenme miktarı ve süresi açısından Avrupa ülkelerine göre çok daha iyi potansiyele sahiptir. GEPA (Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası) (2017) raporunda, ülkemizin büyük bir kısmında yılda metrekare başına 1500 kWh'lik güneş ışınımı potansiyeli olduğunu göstermektedir. Bundan dolayı güneş enerjisinden yararlanılarak güneşli su ısıtıcıları ve fotovoltaik (PV) teknolojisi yaygın olarak kullanılmaktadır. PV teknolojisi, güneşten gelen ışınları alarak elektrik enerjisine çevirmektedir. Fotovoltaiklerin günümüzde birçok çeşidi bulunmaktadır. Bu PV panellerin verimleri ve maliyeti birbirlerine göre farklılık göstermektedir. Çizelge 1.1'de monokristal ve polikristal PV panellerinin verimleri ve maliyetleri gösterilmiştir. Bu bakımdan polikristal güneş panelleri maliyeti bakımından daha uygun olduğu için daha fazla tercih edilmektedir. PV paneller hareket mekanizmasına göre sabit sistemler ve güneş takip sistemleri olarak iki kısma ayrılmaktadır.

Çizelge 1.1. Monokristal ve polikristal PV panellerinin verimleri ve maliyetleri

	Verim	Maliyet
Monokristal PV Panel	%15-24	4.5 \$/W
Polikristal PV Panel	%14-19	3.5 \$/W

1.1. Sabit Sistemler

Sistemin uygulanacağı bölgenin enlemine bağlı olarak güneşe doğru tüm yıl boyunca verimi maksimize edecek açıda yerleştirilerek güneş enerjisinden elektrik üreten sistemlerdir. Takip sistemlerine göre, maliyetleri ucuz olmasına rağmen tüm gün boyunca güneşten gelen enerjiyi tam olarak alamadıklarından verimleri düşüktür.

1.2. Güneş Takip Sistemleri

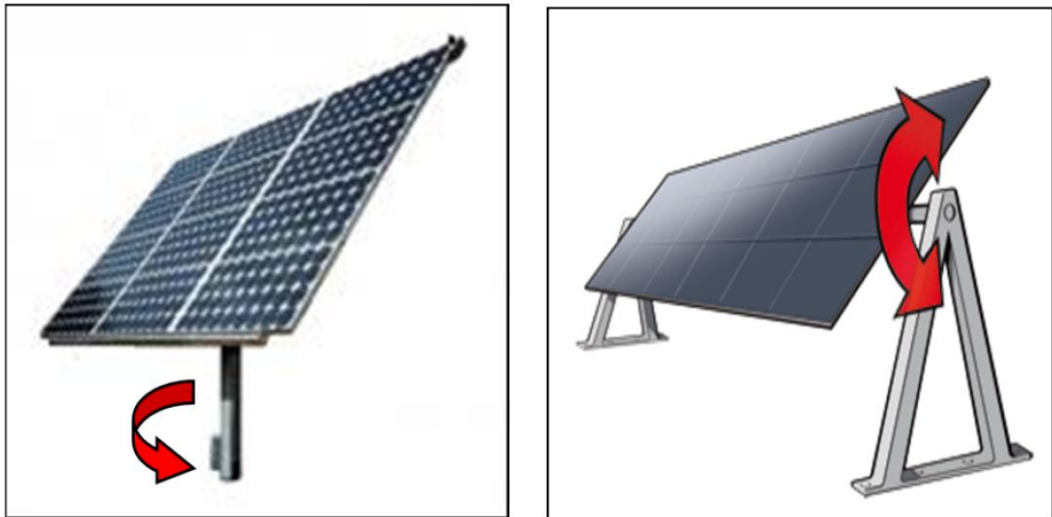
Güneş takip sistemi, pasif takip ve aktif takip sistemi olmak üzere iki kısma ayrılmaktadır. Pasif takip sistemi; maddenin ısıl genleşme mantığıyla çalışmaktadır.

Aktif takip sistemi; algılayıcılar ve algoritmalar yardımıyla güneşi takip eden sistemlerdir. Başlıca aktif takip sistemleri;

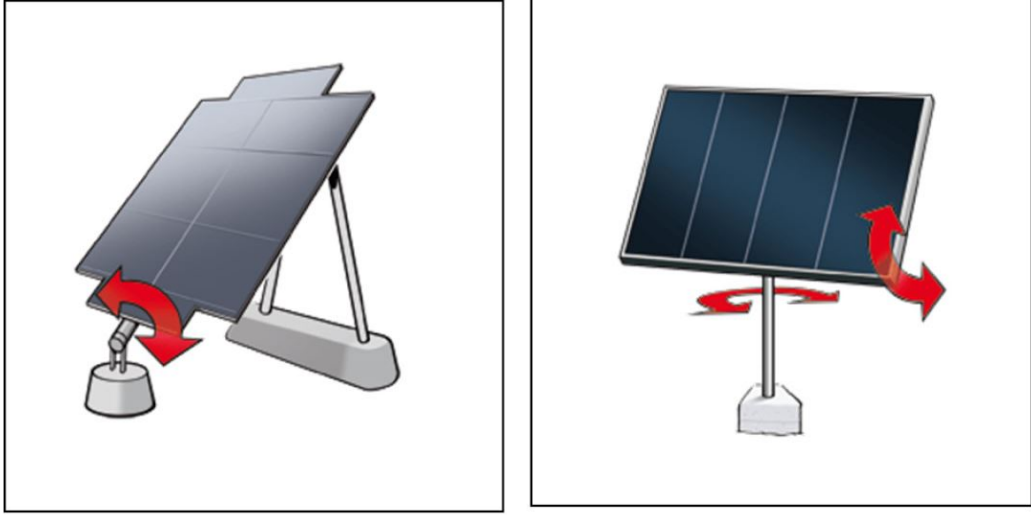
- Mikro işlemci ve elektro-optik sensör destekli
- Bilgisayar kontrollü tarih ve zaman destekli
- Çift yüzlü güneş hücresi destekli
- Yukarıdaki üç sistemin kombinasyonu olarak sınıflandırılmaktadır.

Pasif takip sistemi aktif takip sistemiyle kıyaslandığında daha az karmaşıktır ama daha az verime sahiptir.

Aktif takip sistemleri tek eksen takip ve çift eksen takip olmak üzere iki kısma ayrılmaktadır. Tek eksen takip sistemi de kendi içerisinde dikey eksen, eğik eksen ve yatay eksen olmak üzere üç kısma ayrılmaktadır (Şekil 1.1). Azimut takip olarak da adlandırılan dikey eksen maksimum günlük radyasyonu ve öğlen maksimum ışın radyasyonu olarak iki kısma ayrılmaktadır. Yatay eksen E-W (doğu-batı) yatay eksen (N-S takip) ve N-S (kuzey-güney) yatay eksenli (E-W takip) olarak iki kısımda incelenmektedir. Eğik eksen eğim açısına ayarlanan E-W takip ve E-W kutupsal takip olarak gruplandırılmaktadır (Şekil 1.2). Şekil 1.3'te tek eksen ve çift eksen takip sistemleri gruplandırılmıştır.

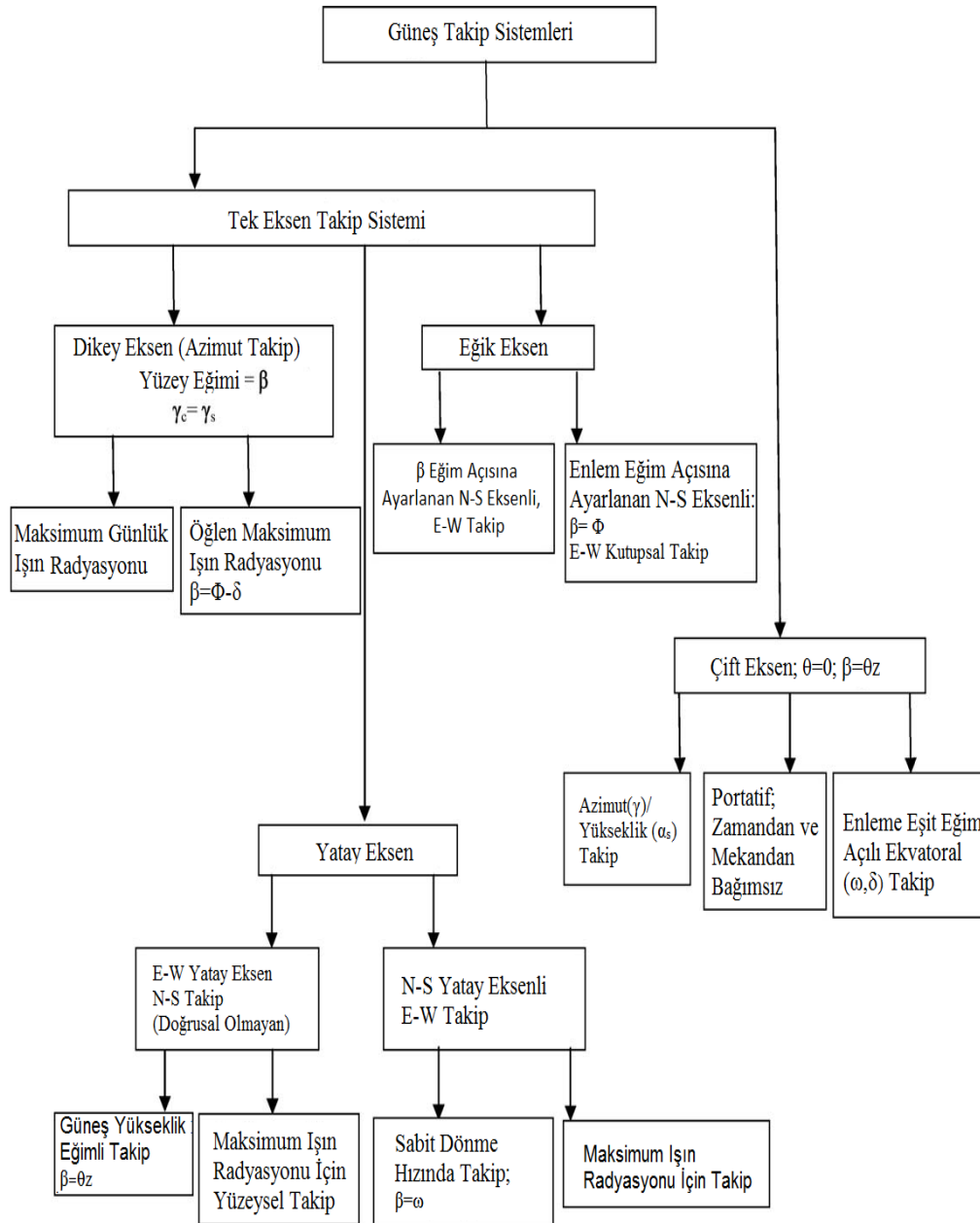


Şekil 1.1. Dikey eksen takip (solda), yatay eksen takip (sağda)



Şekil 1.2. Azimut ekseninde eğik eksen takip (solda), çift eksen takip (sağda)





Şekil 1.3. Güneş takip çeşitleri

1.3. Tezin Amacı ve Metodolojisi

Güneş takip sistemleri, PV panellerden ışıınım kazanımını ve enerji verimliliğini arttırmasına rağmen; motorlar ve takip sistemlerini içeren hareket parçalarından dolayı karmaşıklığı, yatırım ve bakım maliyetini arttırmaktadır. Ayrıca güneş takip sistemlerinin performansı sadece takip yöntemlerine değil iklim koşullarına, arazi boyutlarına ve uygulanacak yerlere bağlıdır. Bundan dolayı 255 W tek eksen güneş

takipli sistem ile sabit sistemden hangisinin Konya şartlarında daha verimli olduğu araştırılması gerekmektedir.

Bu araştırmanın amacı tek eksen güneş takip sisteminin tasarımı ve imalatı yapılarak Konya ilinde deneysel sonuçları değerlendirmektir. Takip sistemlerinde güneşi izlemek ve izleyiciyi kontrol etmek için birçok çeşit bulunmaktadır. İzleyicilerin kontrolünü geliştirmek için çeşitli algoritmalar; güneşi izleme yöntemlerini geliştirmek için de çeşitli takip mekanizmaları gerekmektedir. Diğer bir hedef olarak, tek eksenli güneş takip sistemlerinde verim ve maliyet açısından daha uygun takip sağlamak için optimum konstrüksiyon tasarımı yapılmıştır. Ayrıca PV simülasyon programı kullanılarak tasarlanan sistem ile deneysel uygulama arasındaki farkların gözlemlenmesi amaçlanmıştır.

Bu çalışmada aynı şartlar altında yan yana yerleştirilen PV sistemleri için farklı konfigürasyonların deneysel olarak değerlendirilmesi sağlanmıştır. Bu amaçla güneş takipli ve sabit sistemler imal edilmiştir. Daha sonra akım, voltaj, güneş ışınımı ve diğer zamana bağlı değişkenler kaydedilmiştir.

Giriş kısmı yenilenebilir enerjinin tanımından, fotovoltaik modül maliyetlerine ve çeşitlerine değinilmiştir. Ayrıca Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeline değinilmiştir. Bu araştırma çalışması için problemin neler olduğundan, amacından ve tezin şablonu üzerinde durulmuştur. Güneş ve dünya arasındaki açıların tanımına ve yararlanılan bağıntılara değinilmiştir. Literatür taramasında hangi yıllarda güneş takipli sistemler üzerine ne gibi çalışmalar olduğuna ve sonuçlarına değinilmiştir. Daha sonra metod ve yöntem kısmında tez araştırmasında kullanılan malzemelerden ve izlenen yollara değinilmiştir. Araştırma bulguları ve tartışma bölümünde ise deney ve simülasyon sonucunda elde edilen verilerden ve daha önceki sonuçlarla karşılaştırılması üzerinde durulmuştur. Sonuç ve öneriler kısmında ise tek eksen güneş takipli sistemle alakalı önerilere değinilmiştir.

1.4. Güneş Astronomisi

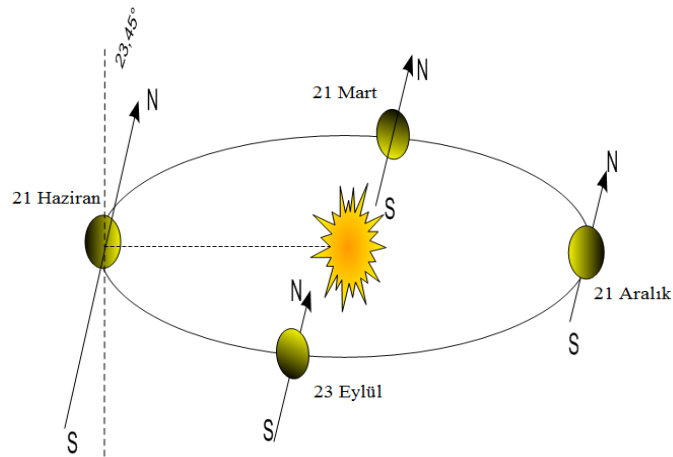
Dünyanın güneş etrafında elips şeklindeki hareketinden dolayı bazı açılar ortaya çıkmaktadır. Güneşin hareketlerini takip etmek ve konumunu belirlemek için güneşle ilgili bu açılar bilinmesi gerekir. Bu açılar, güneşin izlemiş olduğu yörünge ve dünyaya göre farklı zamanlarda güneşin pozisyonu hakkında bize bilgi verir. Açılar

aynı zamanda güneşin gün boyunca hareketini takip etmemizi sağlar. Bulduğumuz bölgenin coğrafik şartlarına (enlemine-boylamına) göre güneşin izlediği yörünge farklılık gösterir (Dickinson, Cheremisinoff, 1980). Örneğin; güneşin hareketi sırasında ekvatora olan mesafesi ile kutuplara veya aradaki herhangi bir bölgeye olan mesafesi değişik olacaktır. Bu da, gün içinde zamana bağlı olarak güneşin konumunun değişeceğini gösterir. Aynı zaman diliminde farklı coğrafik yerler farklı açılarda güneşlenmeye maruz kalacaklardır.(Şenpınar, 2006)

Dünya, güneş yörüngesi üzerinde $23,45^\circ$ eğimle dönmektedir. Bu eğim, güneşin yaz ayları süresince kışa göre daha yüksek konumda olmasını sağlamaktadır. Bu, yaz aylarında gündüz saatlerinin uzamasına ve kış aylarında da gündüz saatlerinin daha kısa olmasına sebep olmaktadır.

Dünya üzerindeki herhangi bir bölge için iki açı tanımlanmıştır: Enlem (φ) ve boylam (λ). Enlem değerleri $90^\circ < \varphi < -90^\circ$ arasında değişmekte; enlem ekvatorunda sıfır, kuzey kutbunda $+90^\circ$, güney kutbunda ise -90° değerindedir. Boylam, meridyen olarak adlandırılan kutuptan kutuba uzanan hayali bir çizgidir.

Deklinasyon Açısı (δ): Güneş doğrultusunun ekvator düzlemi ile yaptığı açıdır. Diğer bir ifade ile güneş ışınlarının dünyaya geliş açılarıdır. Kuzey yarımküre için artı değerlidir. Deklinasyon açısı $-23,45^\circ$ (21 Aralık kış gündönümünde) ile $+23,45^\circ$ (21 Haziran yaz gündönümünde) arasında değişir. İlkbahar ekinoksunda (21 Mart) ve sonbahar ekinoksunda (23 Eylül) deklinasyon açısı sıfır olur (Şekil 1.4).



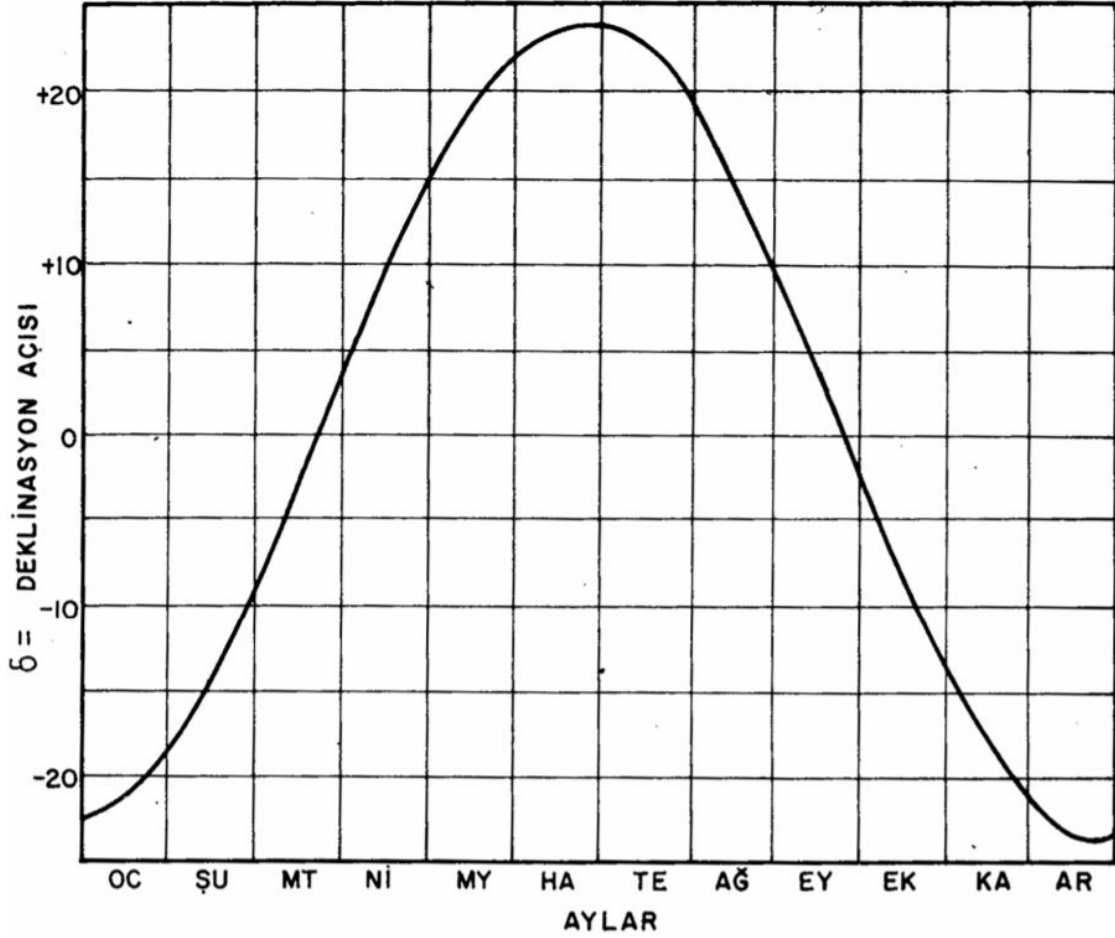
Şekil 1.4. Dünyanın güneş etrafındaki yörüngesi, ekinokslardaki konumu ve deklinasyon açıları

Deklinasyon açısı aşağıdaki Cooper denkleminde hesaplanır (Foster, 2010):

$$\delta = 23,45 \sin\left(\frac{360(284+n)}{365}\right) \quad (1.1)$$

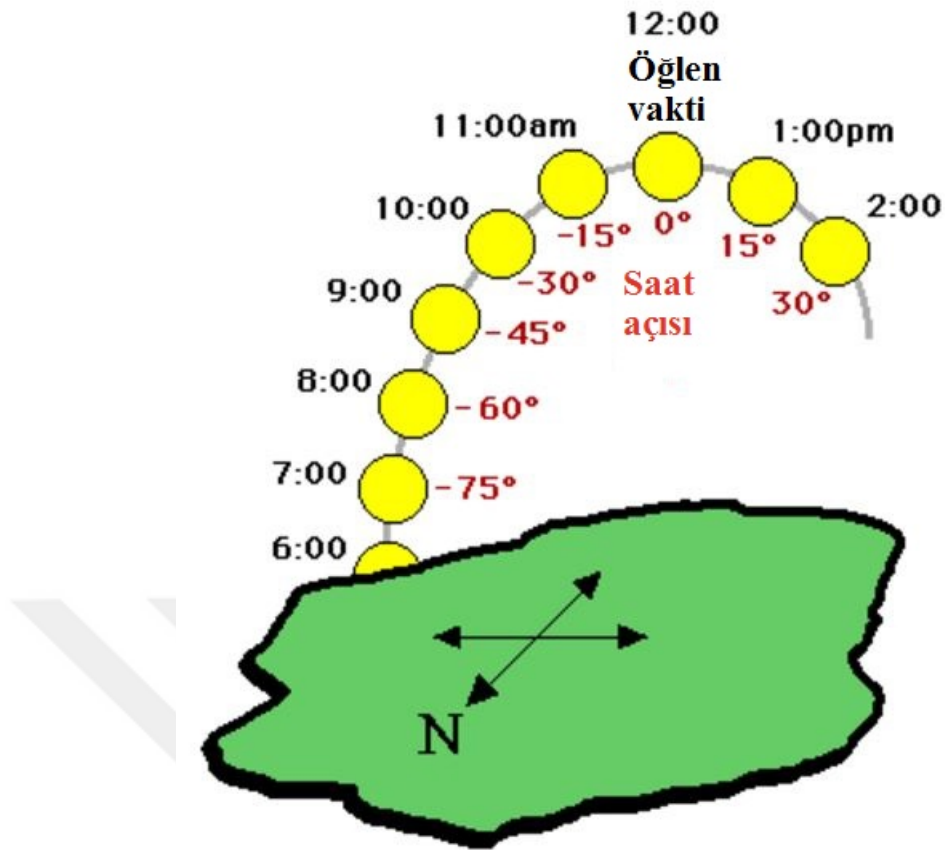
n gün sayısıdır ve 1 Ocak' tan ($n=1$) itibaren hesaplanır.

Deklinasyon açısının aylara göre nasıl değiştiği Şekil 1.5' te gösterilmiştir.



Şekil 1.5. Deklinasyon açısının aylara göre değişimi

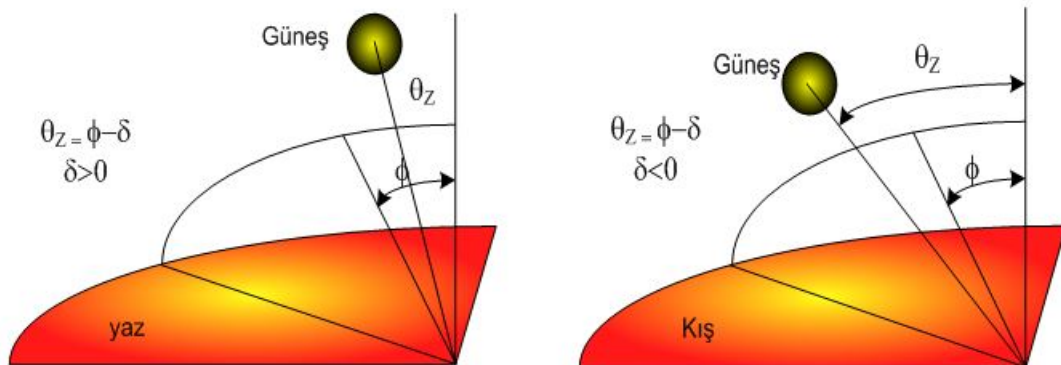
Saat açısı (ω): Güneş ışınlarının bulunduğu boylam ile göz önüne alınan yerin boylamı arasındaki açıdır. Zamanın açısal ölçüsüdür ve bir saat 15° boylama eşittir (Şekil 1.6). Öğleden evvel açı artı ve öğleden sonra eksi değer alır. Güneş saat açısı hesaplanmasında yerel saat kullanılmalıdır.



Şekil 1.6. Saat açısı (ω)

Zenit Açısı (θ_z): Dikey yüzey ile güneş ışınları arasında oluşan açıdır (Şekil 1.7). Zenit açısı şöyle hesaplanır (Foster, 2010):

$$\cos \theta_z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega \quad (1.2)$$



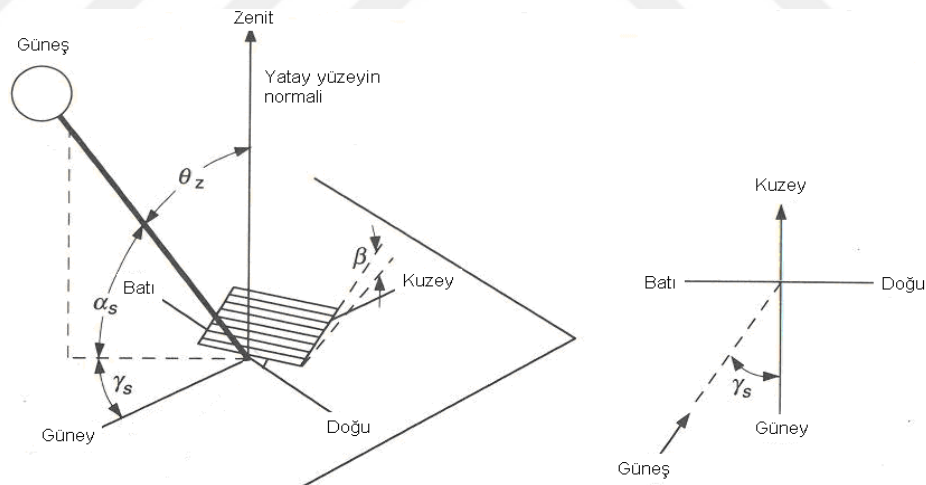
Şekil 1.7. Yazın ve kışın öğle saatinde zenit açısı (θ_z), deklinasyon açısı (δ) ve Enlem açısı (Φ) arasındaki ilişki (Roger & Jerry, 2005)

Azimet Açısı: Azimet açısını, güneş azimet açısı ve yüzey azimet açısı olmak üzere iki başlık altında inceleyeceğiz.

Güneş Azimet Açısı (γ_s): Güneş azimet açısı Şekil 1.8’de görüleceği üzere, güneş-dünya doğrultusunun yatay düzlemdeki izdüşümünün, kuzey-güney doğrultusu ile yapmış olduğu açıdır. Kuzey-güney doğrultusu ile doğrudan güneş ışınımı arasındaki açıdır. Ayrıca güneş azimet açısı, kuzeye göre saat dönüş yönünde sapmasını belirtir. Güneyden doğuya doğru (-), batıya doğru (+) olarak kabul edilir. Saat 12:00’da güneş azimet açısı 180° olur.

Güneş azimet açısı, herhangi bir bölgede ve zamanda, güneşe doğru varsayılan doğrunun, yatay düzlemdeki izdüşümü ile güney doğrultusu arasındaki açıdır. Azimet açısı, gün uzunluğunun 12 saatten fazla olması durumunda, günün bazı saatlerinde 90° ’den fazla olur. Güneş azimet açısı aşağıdaki bağıntıyla bulunur (Foster, 2010):

$$\sin \gamma_s = \cos \delta \sin \omega / \sin \theta_z \quad (1.3)$$



Şekil 1.8. Eğim açısı (β), zenit açısı (θ_z), güneş yükseklik açısı (α_s) ve güneş azimet açısı (γ_s)

Yüzey Azimet Açısı (γ): Yüzeyin normalinin yatay düzlemdeki izdüşümü ile güney doğrultusundaki açıdır. Yüzey azimet açısı güneyde sıfır, doğuya doğru negatif (-), batıya doğru pozitif (+) ‘dir.

$$-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ \quad (1.4)$$

Eğim açısı (β): Kollektörlerin yatay düzlemle yaptığı açıdır (Şekil 1.8).

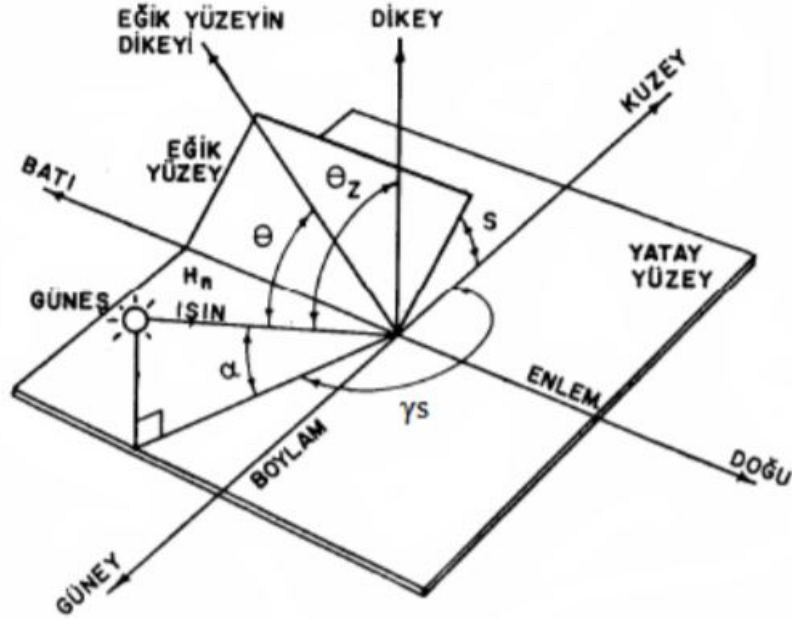
$$0 \leq \beta \leq 180^\circ \quad (1.5)$$

Güneş yükseklik açısı (α_s): Direkt güneş ışınlarının (güneş doğrultusu) yatayla yaptığı açıdır (Şekil 1.8). Zenit açısını 90° 'ye tamamladığı için, bundan dolayı güneş yükseklik açısı (Foster, 2010):

$$\alpha_s = 90^\circ - \theta_z \quad (1.6)$$

Güneş geliş açısı (θ): Yüzeye gelen direkt güneş ışınımı ile yüzeyin normali arasındaki açıdır (Şekil 1.9) (Foster, 2010).

$$\cos \theta = \sin \delta \sin \Phi \cos \beta - \sin \delta \cos \Phi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \Phi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \Phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \quad (1.7)$$



Şekil 1.9. Çeşitli güneş açılarının eğik düzlemde gösterimi

1.5. Gölgeleme

Gölgeleme hesaplarının yapılmasında kollektörlerin güneye yönlendirildikleri kabul edilecektir. Gölgeleme hesabının esasını, yılın herhangi bir gününde, kollektörlerin en fazla güneş ışını alabilmelerini tahmin etmek için, gerekli yerleştirme konumları teşkil eder. Şekil 1.10' da dizi halinde yerleştirilmiş kollektörler

görülmektedir. Kollektörler bu şekilde yerleştirilirse yılın en kısa gününde bile (22 Aralık) birbirlerinin üzerlerine gölge yapmamış olurlar.

Yılın en kısa gününde gölgenin en uzun olacağı hatırlanmalıdır. Genel bir kural olarak, Şekil 1.10' da (GM) ile gösterilen gölgelenme mesafesi kollektörler arasındaki yatay uzaklığın, 22 Aralık' ta saat 10:00-14:00 arasında sağlanması istenir. Böylece saat 10:00'dan önce ve 14:00'dan sonra kollektörler üzerine gölge düşmesine rağmen yılın en kısa gününde güneş ışınımından 4 saat faydalanmış olur. Bu durum, kış gündönümünde, sadece birkaç gün olacağından 22 Aralık'ta kollektörler arasındaki mesafenin (GM) gölgeleme yapmayacak şekilde düşünülmesi gereksiz olabilir. Kollektörler arasındaki mesafenin fazla olması, normal projelendirilmiş bir sisteme göre, daha fazla kablo ve geniş çatı ya da yerleştirme alanı gerektirir (Uyarel ve ark., 1987).

Birbirini takip eden kollektör dizileri arasındaki (GM) mesafesi yaklaşık olarak kollektör eğim doğrultusu ölçüsünün (L_k) üç katı olur. Bu kural 40° kuzey enleminde ve kollektör eğim açısının enlem derecesinden 15° fazla alındığı kış uygulamaları içindir.

Kollektörler arasındaki ölçü (GM) Şekil 1.10' dan faydalanılarak aşağıda hesaplanmıştır (Uyarel ve ark., 1987).

Şekilden görüldüğü gibi;

$$GM = L_k \left[\frac{\sin EA}{\tan GY} + \cos EA \right] \quad (1.8)$$

bulunur.

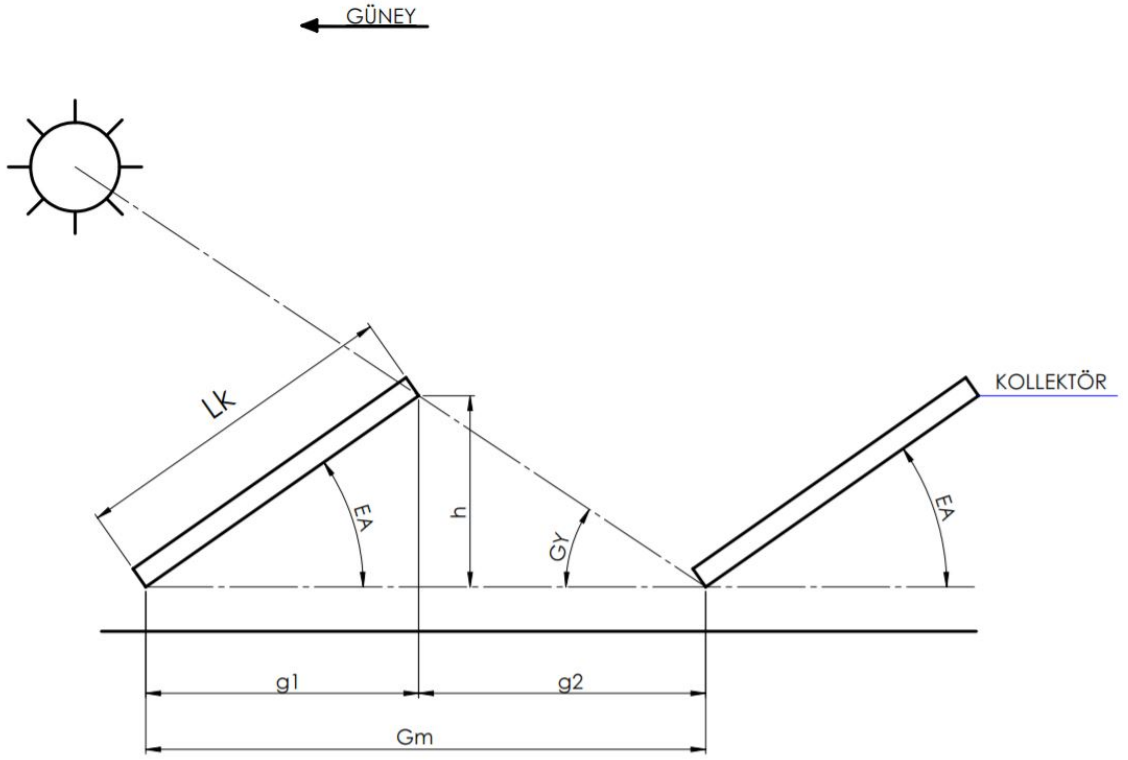
Formülde;

GM - Kollektör dizileri arasında bırakılması gereken mesafe

L_k - Kollektör uzunluğu

EA - Kollektörlerin yatay düzlemle yaptıkları açı (eğim açısı)

GY - Dizi halindeki kollektörlerin güneşi direk görmeye başladıkları yükseklik açısı



Şekil 1.10. Dizin halinde yerleştirilmiş kollektörlerin gölgeleme hesabı için gerekli parametreler

2. LİTERATÜR TARAMASI

Son yıllarda PV sistemlerinin performansını arttırmakla alakalı araştırmalar artmaktadır. Bu araştırmalar üç kısma ayrılmıştır. İlk bölümde, güneş takip sistemlerinde enerji verimliliğiyle alakalı çalışmalar özetlenmiştir. İkinci bölümde, güneş takip metotlarıyla alakalı yapılan çalışmalar sunulmuştur. Üçüncü bölümde ise PV sistemlerinde tekno-ekonomik açıdan araştırılan çalışmalara değinilmiştir.

2.1. Takip Sistemlerinde Enerji Verimliliği

Bione ve ark. (2004) yoğunlaştırılmış PV'lerle takip, takip sistemleri ve sabit sistemler tarafından çalıştırılan pompa sistemlerini karşılaştırmışlardır. N-S eksenini etrafında güneşi takip etmek için iki PV paneller arasında deneysel karşılaştırma uygulamışlardır. Takipli PV sistemi sabit PV sisteme göre günlük %51 daha fazla su pompaladığı gözlemlenmiştir.

Ai ve ark. (2003), azimut ve saat açılı üç kademeli takip sistemlerini karşılaştırmalı incelemişlerdir. Eğim açısını ayarlamak için güneye dönük eğimlerde gün uzunluğunu üç eşit parçaya bölmüşlerdir. Toplam doğrudan radyasyon her zaman aralığında alınmaktadır; yüzey üzerindeki günlük ışıınımı tahmin etmek için üç kademeli takip sistemi için matematiksel formülün türetilmesinde gökyüzü yayını ve yerden yansıyan ışıınımı değerlendirmişlerdir. Optimum eğim açısındaki radyasyonun tüm yıl için Er-Lian-Hao-Te şehrinde (43° enlem, Çin) %30.2 olduğu ve azimut çift eksen üç kademeli takip sisteminin yatay yüzeydekenden %72 daha fazla olduğu sonucuna varmışlardır. Azimut tek eksen üç kademeli takip sisteminin gücü ile saat açılı üç kademeli takip sisteminin gücü arasında hiçbir önemli fark bulamamışlardır.

Grass ve ark. (2004), takipsiz bileşik parabolik yoğunlaştırıcı kollektörler ile iki adet alışılmışın dışında takip kollektörlerini karşılaştırmışlardır: Bir parabolik çukur, entegre takip reflektörlü boşaltma tüpü kollektörü. Bir manyetik tek eksen takip sistemi kullanarak takip sağlamışlardır. Işının takip analizi için, ışın takip kodu olan ASAP ("Breault Research Organization Inc.," 2017) kullanmışlardır. Direk ve yayılan ışıınımlar için ışıınsal verimleri ve kollektörlerin etkili açı değişimlerini belirlemek için ölçümler çevre sıcaklığına yakın şartlarda yapmışlardır. Takip sistemi kullanımı ile gün boyunca direk ışıınım için ışıınsal verimlerin arttırılabileceğini sonuçlarında göstermişlerdir. Ancak adım açısı düştükçe, takipteki küçük hatalar önemli etkilere yol açtığı sonucuna varmışlardır.

Helwa ve ark. (2000) farklı takip sistemleri tarafından güneş enerjisini elde etmeye çalışmışlardır. Yatay yüzey üzerinde yayılan ışınları, parlamaları, küresel hesaplamaları toplayarak güneş enerjisini hesaplamışlardır. Deneylerinde dört sistem kullanmışlardır: Güneye dönük 40° eğim açılı sabit sistem, 33° eğim açısında tek eksen azimut takip sistemi, 6° eğim açısında N-S yönü doğrultusunda tek eksen takip sistemi ve çift eksen takip sistemi, tek eksen dikey ve diğer yataysal. Yüzeylerle bağlantı kuran ışınımın üç modu için formüller geliştirdiler ve her sistem için günlük ışınımı depolamak ve hesaplamak için BASIC’de bir bilgisayar programı yazmışlardır. Hesaplanan ve ölçülen veriler arasındaki karşılaştırma saatlik ortalama karekök değeri (RMSD) (root mean square difference) sabit için 5.36, dikey eksen takip sistemi için 9.07, eğim ekseninde takip sistemi için 7.92 ve çift eksen takip sistemi için 5.98 olarak göstermişlerdir. Tüm değerler kabul edilebilir aralıktadır.

Lorenzo ve ark. (2002) dikey tek eksen (azimut eksen) PV takip sistemi tasarlamışlardır ve “backtracking” özelliğini değerlendirmişlerdir. İspanya’da kurulmuş olan 400 takip sisteminin her birinde standart 0.25 hp AC motor kullanmışlardır. PV yüzeylerin eğim açısını sabitlemişlerdir. İdeal bir azimut takip sistemi tarafından toplanan enerji, optimal eğimli statik yüzeyle karşılaştırıldığında yaklaşık %40 daha fazla enerji topladığından ve yatay eksenli takip sistemiyle karşılaştırıldığında %10 daha fazla enerji topladığına değinmişlerdir. İki komşu takip sistemi arasındaki sabah ve öğlen ortaya çıkan E-W ve N-S gölgelenmelerini hesaplamışlardır. Gölge ortaya çıkacağı zaman, komşu yüzeylerin (arka arkaya takip sistemi) sadece köşesi boyunca geçen yeterli gölge sınırı olan ideal değerinden yüzeyin azimut açısı uzaklaşmasıyla gölgelenmeden kaçınılabileceğini tavsiye etmişlerdir. Karşılıklı enerji maliyeti önemli ölçüde azaltılabilirken, azimut takip sistemi kullanılan arazi statik yüzeyden %40 daha büyük olduğunu karşılaştırmalarında göstermişlerdir.

Helwa ve ark. (2000) sistem üretimi üzerindeki takip doğruluğunun etkisini ve takipli sistemlerin güç tüketimini belirlemek için sabit ve takipli PV sistemlerini karşılaştırmışlardır. Karşılaştırdıkları sistemler: yatayla 40° eğimli sabit bir sistem, dikey eksenli takip sistemi (kontrol için kullanma zamanı, tarihi ve yer parametreleri) ve çift eksen azimut/yükseklik takip sistemi (bir bilgisayar tarafından yönetilen mikroişlemci tarafından kontrol edilmiş) ve N-S yönüne paralel ekseninde 6° eğimli (kontrol için kullanma zamanı, tarihi ve yer parametreleri). Çeşitli devir sayı sensörü ve kısıtlama anahtarları kullanmışlardır. Farklı güneş takip sistemleri arasındaki

karşılaştırma eğrilerinde yıllık radyasyon kazancı çift eksen takip sisteminde %30, dikey eksen takipte %18, sabit eğimli takip sisteminde %11 arttığını göstermişlerdir. Takip hatası $\pm 0.56^\circ$ ve $\pm 10^\circ$ olduğunda, eğimli takip sistemleri için motor sürücüler, elektrik anahtarları, sensörler, elektrik ekipmanları ve mikroişlemcilerden dolayı güç tüketimi belirtilen takip hatalarına göre sırasıyla 50 Wh/gün ve 22 Wh/gün'dür.

İbrahim (1996) güç çevrimi için elektrik motorlu tek eksen yoğunlaştırıcı kollektörü elektronik olarak imal etmiştir. Kollektör 180° aralığı boyunca doğudan batıya sürekli olarak güneşi takip ederek eğimini ayarlamak için vida bağlantısıyla iki noktadan menteşelemiştir. Kollektör verimi kütle akış oranının farklı değerleri için ölçmüştür. Kütle akış oranı artışıyla kollektör veriminin de arttığı (%62 maksimum değerini bulması) sonucuna varmıştır.

Brunotte ve ark. (1996) kutupsal N-S eksenini etrafında tek eksen takip sistemli iki kademeli yoğunlaştırıcıyı incelemiştir. İlk yoğunlaştırma aşamasının yarım çember açısı güneşin maksimum eğimine eşit olması için 23.5° seçmişlerdir. Onlar değişik durumlar için test etmişlerdir ve teorik olarak E-W ve N-S takip için konsantrasyon faktörlerini hesaplamışlardır. Termodinamik olarak konsantrasyon faktörünün üç faktör tarafından arttığını sonuçlandırmışlardır. İlk prototip için konsantrasyon optik veriminin %77.5'i normal yansımada ölçmüşlerdir.

Gordon ve ark. (1991) PV elektrik santrali sistemlerinde geometrik diziliş hassasiyetini, tarla düzenine ve takibine çalışmışlardır. Onların hesapları saatlik bilgisayar simülasyon modellerine dayandırmışlardır. Sabit ve farklı takip modlarında yıllık enerji kayıplarını etkileyen dönme açısının maksimum dereceleri için ve zemin kaplama oranı (GCR) için grafikler çizmişlerdir. PV diziliş alanının sistem için toplam toprak alanına oranı olarak GCR tanımlamışlardır. GCR'li her sistem için gölgelenme kayıplarının azaldığını sonuçları göstermiştir. Düşük GCR değerlerinde sabit ve N-S yatay eksenli takip kollektörleri en az hassasiyettedir ve yaklaşık olarak sadece 0.6'nın üstündeki GCR'de önemli olduğunu sonuçlandırmışlardır. Kutup eksenli takip (enleme eşit eğim açısında N-S eksenini üzere tek eksen takip) çift eksen takip sistemlerinin yıllık enerjisinin yaklaşık %97'sini teslim eden en iyi tek eksenli takiptir fakat o GCR üzerinde çok hassas olduğunu gözlemlemişlerdir. Çift eksen takipli sistem yıllık enerji üretimini maksimize etmesine rağmen, oldukça düşük GCR gerektiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca yıllık enerji sarfiyatını her takip sistemi için maksimum dönme açısıyla azaltıldığını sonuçlandırmışlardır.

Braun ve ark. (1983) sabit ve takip yüzeyleri için optimum eğim açısını hesaplamışlardır. Tek eksen ve çift eksen güneş takip sistemleri için zenit, güneş azimut yüzey azimut ve eğim açılarını teorik olarak değerlendirdiler ve çift eksen güneş takip sistemleri için, yüzey azimutun güneş azimuta eşit olduğunda ve yüzey eğiminin zenite eşit olduğunda radyasyon ışınımının maksimum olduğunu sonuçlandırmışlardır.

Dickinson (1980) sabit ve takip kollektörler için uzun vadeli ortalama yıllık ışınımı hesaplamışlardır. Sonra birkaç bölgeden alınan şu verilerin doğruluğu sonuçlandırılmıştır: (a) yatay kollektör üzerine sadece %10 yıllık toplanılan ışınımı arttıran optimum $\phi=5$ eğimli açıda düz yüzey kollektörler; (b) kışın E-W eksenli takip kollektörler yatay N-S eksenli kollektörlerden %20 daha fazla ışınım sağlıyorken, yatay N-S eksenli takip sistemi yatay E-W eksenli takip sisteminkinden yıllık toplanan ışınımı %15 arttırır; (c) kutup eksenli takip sistem yatay N-S eksenli takip sistemden yaklaşık olarak %10 daha fazla ortalama yıllık ışınımına sahip olacaktır; (d) çift eksen takip sistem kutup eksenli takip sistemle karşılaştırıldığında yıllık olarak yalnızca yüzde birkaç daha fazla ışınım elde etmektedir.

Stern ve ark. (1996) tasarlamışlardır, imal etmişlerdir ve bir modül ve tek eksen takip sistemi PV gücüne tam olarak 15 kW AC entegre ettiklerini ispatlamışlardır. Takip motoruna ve aktuatöre pozitif bir feedback sinyali sağlamak için integral sarkacı ve potansiyometre takip sisteminde kullanmışlardır. Tek eksen güneş takip sistemi normal bir yılda sabit PV sistemden %20 daha fazla enerji ürettiği sonucuna varmışlardır. Ayrıca, tek eksen güneş takip sistemi şebekesinin toplam maliyetindeki net azalma %23.3 olarak bulunan PV güç sistemine bağlamışlardır.

Naidoo ve ark. (2003) parabolik tekneli güneş takip kollektörü için üç algoritma geliştirmişlerdir. İlk metotta, tekne pozisyonu için ayrık sinyal sayısı kullanmışlardır. Her bir sinyalde 0.144° 'ye sahip teknenin mutlak açılı pozisyonuna feedback sağlamak için bu projede dönen bir kodlayıcı kullanılmışlardır. İkincisinde, E-W istikametinde güneşi takip etmesi için N-S ekseninde tekne metodu konumlandırılmıştır. Güneşin yerini belirlemek için, PLC program yazılımında bir matematiksel algoritma tarafından teknenin geometrik konumuna bağlı olarak enlem ile boylamı birlikte kullanılmıştır. Akış sıcaklığı, rüzgar hızı ve tekne pozisyonu trapezoidal formda girdilerdir ve sürüş hızı çıktılardır. Girdi ile çıktılar arasındaki ilişki IF-THEN kuralı ile tanımlanmıştır. Hiçbir rapor karşılaştırma veya verim ölçümünü sağlamamaktadır.

Appelbaum ve ark. (1995) NASA Teknik Memorandum'da yataysal ve farklı takip PV sıraları için Mars üzerindeki güneş ışınımını değerlendirmişlerdir. Çift eksen takip sistemi yatay yüzeyle karşılaştırıldığında 23.3° N enleminde %7 daha fazla ortalama güneşlenme kazanımı, 47.4° N enleminde ise %21 daha fazla ortalama güneşlenme kazanımı olduğunu yıllık süreç için sonuçlandırmışlardır. Farklı modlar için güneşlenmede farklılık olan kapalı günler için çift eksen takip sisteminin önemsiz avantajı küçük göstergedir. Ancak, açık havalarda kazanım için N-S eksen, E-W kutupsal takip için %15.9; düşey eksen, azimut takip için %13.1, N-S yatay eksen, E-W takip, sabit dönüşlü takip hızı için %13.0, ve E-W yatay eksen, N-S takip, maksimum ışık parlaması için 23.3° N'de yatay yüzeyle karşılaştırıldığında %8.3 olduğu sonucuna varmışlardır.

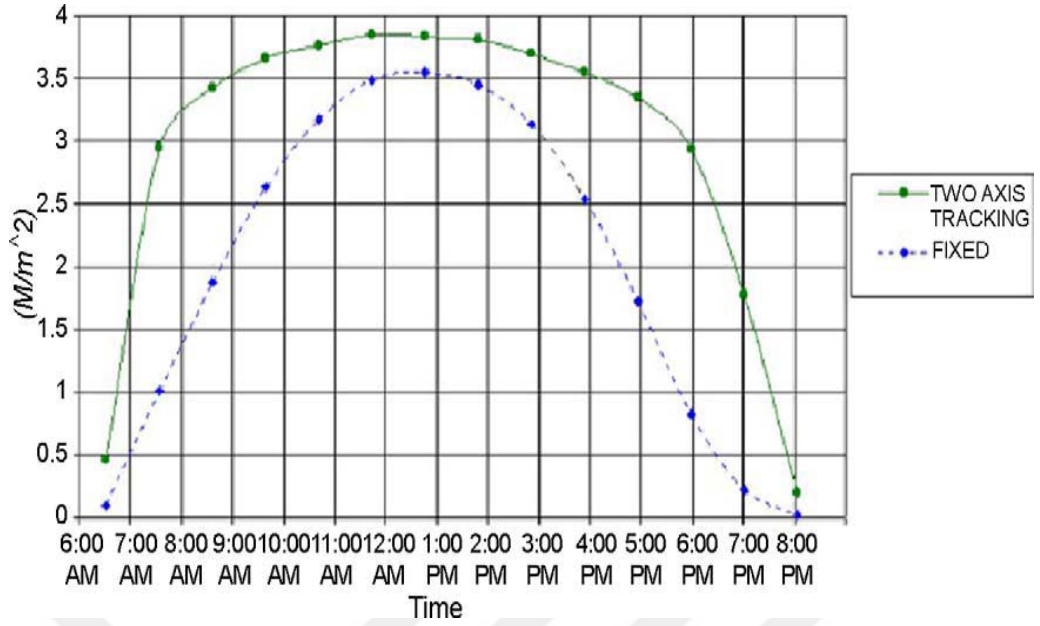
2.2. Güneş Takip Metodları

2.2.1. Pasif takip sistemleri

Poulek (1994) şekil bellek alaşımli aktüatörlere dayanan tek eksen pasif güneş takibini tasarlamıştır ve test etmiştir. Aktüatör 70°C 'nin altında kolayca deforme olabileceğini ve ısı makinesi gibi çalışacağını göstermiştir. Aktüatör dönüşüm sıcaklığının üzerine ısıtıldığı zaman, orijinal şekline geri döner. Bu aktüatörün verimi yaklaşık olarak %2 olduğu ve iki metalli aktüatörlerinkinden yaklaşık iki kat daha büyük olduğu sonucuna varmışlardır.

2.2.2. Aktif takip sistemleri

Abdallah ve ark. (2004) bir adet çift eksen, açık döngülü, PLC kontrollü güneş takip sistemi tasarlamışlardır ve imal etmişlerdir. İki açı etrafında (yüzey eğimi ve azimut açısı) tanımlanmış yüzey pozisyonunun matematiksel izahına dayandırmaktadır. Eğimin, güneş zenit açısına eşit almışlardır. İki takip motorundan biri yatay N-S eksen boyunca döndürmek için, diğeri ise dikey eksen boyunca döndürmek için kullanmışlardır. Gün ışığını dört aralığa bölmüşlerdir; bu sırada her birinin güneş ve motor hızı PLC'ye tanımlamışlardır ve programlamışlardır. Motor sürücüler için güç tüketimi ve kontrol sistemleri takip sistemleri tarafından üretilen gücün %3'ünü zorla aştığını öngörmüşlerdir. Şekil 2.1, 32° eğimli sabit yüzey ile takip sistemi arasındaki enerji karşılaştırmasını göstermişlerdir. Çift eksen takip sistemi tek eksen takip sistemiyle karşılaştırıldığında toplam günlük kazanç yaklaşık %41.34 olduğunu sonuçlandırmışlardır.



Şekil 2.1. Sabit ve takip sistemi arasındaki enerji karşılaştırması

Rumyantsev ve ark. (2004) 1 kWp güneş tesisi için kapalı döngülü güneş takip sistemi tasarlamışlardır ve imal etmişlerdir. Güneş takip tasarımları çinko korumalı çelikten yapılmış rulo şeklinde delikli kanallar ve eğriler gibi en ucuz yapısal malzemelere dayandırmaktadırlar. Takip mekanizması bir analog güneş sensörü tarafından tamamen otomatik kontrol etmektedirler. Takibi iki ana hareket parçasından oluşturmaktadırlar: Dikey eksen etrafında hareket eden destek platformu ve yatay eksen etrafında hareket eden PV modüllü durdurma platformu. Destek platformu, biri azimut sürücüsüne bağlanılan üç teker ile donatılmışlardır.

Konar ve ark. (1991) PV güneş panellerinde veya parabolik reflektörlerle kullanılması için güneş takip ayarı destekli tek eksen mikroçipi tasarlamışlardır. Diğer eksen ile azimut açısını kontrol etmektedirler ve tek eksen etrafında optimum eğimdedir. Takip cihazının tam olarak toplanan enerjiyi aldığından ve zaman farklılığı, geometrik konum gibi bölge şartlarından bağımsız olduğuna değinmişlerdir.

Al-Mohamad (2004) bir PV panelinin günlük çıkış gücünün geliştirilmesini incelemek için PLC programı destekli tek eksen güneş takip sistemi tasarlamıştır. İki direnç sensöründen birini gölgelemek için bir set tarafından bölümlendirmiştir. Güneş ışık yoğunluğu arttıkça sensör direnci azaldığını gözlemlemiştir. Tertibatın iki çıkış sinyali PLC'nin analog girişine direk olarak bağlamıştır ve uygun çıkış sinyalini üretmek için aktif elektromekanik bir güneş takip sistemiyle karşılaştırmıştır. Bu takip

yaklaşık olarak 120° E-W eksenini taradığını gözlemlemiştir. Toplanan veriler görüntüleme ve kontrolü sağlamak için uygun bir program olan PLC (Programlanabilir Mantıksal Denetleyici) için özel bir yazılım kullanarak geliştirmiştir. Güneş takip performansını değerlendirmiştir ve izlemiştir. Çıkış gücü sabah ve günün geç saatlerinde oldukça arttığı görülmektedir. Tam olarak iyileşme 6:00'dan 10:00'a kadar ki periyotta ve 15:00'dan 17:00'a kadar ki periyotta %40 arttığını sonuçlandırmıştır. Ancak gelişme öğlen vakti boyunca yaklaşık %2-4 civarında olduğunu gözlemlemiştir.

Abdallah ve ark. (2004) güneye 32° eğimli tek eksen takip sistemiyle karşılaştırdılar ve akım-voltaj özellikleri tahmin etmek için, dört elektromekanik açık döngülü güneş takip sistemi tasarladılar ve imal ettiler: Çift eksen, dikey tek eksen, E-W tek eksen ve N-S tek eksen takip. Gerekli pozisyonu hesapladılar ve PLC'ye programladılar. Güneşe dik pozisyondaki panelleri ayarlamak için PLC aktuatörü kontrol etmişlerdir. Takip sistemi tarafından elde edilen enerjinin %22'den daha az gücün kontrol sistemi tarafından harcandığını iddia etmişlerdir. Farklı güneş takip sistemleri için özel voltaj-akım ve güç üretimi karakteristik eğrilerinin çiziminden sonra, sabit eksenle kıyaslandığında, çift eksen, E-W, dikey ve N-S takip için elektriksel güç kazanımı sırasıyla %43.87, %37.53, %34.43 ve %15.69 arttığını sonuçlandırmışlardır.

Jinayim ve ark. (2007) tek eksen takip sisteminde PIC mikro kontrolör tarafından kontrol edilen bir step motor kullanımını değerlendirmişlerdir. Bir ışık direnci üst tarafa küçük delikli karanlık bir kutu içerisine konulmuştur. Maksimum aydınlatmalı buluş PIC (Peripheral Interface Controller) kontrolü tarafından çalıştırmışlardır. Herhangi bir güneş ışığı ışık direnci tarafından algılanmazsa, gerçek durum algılanana kadar, sıfır durumu algılamışlardır. Sonuç olarak, step motorlarda yüksek enerji kayıplarından dolayı küçük güneş panelleri için takip sistemi kullanılmamasını tavsiye etmişlerdir.

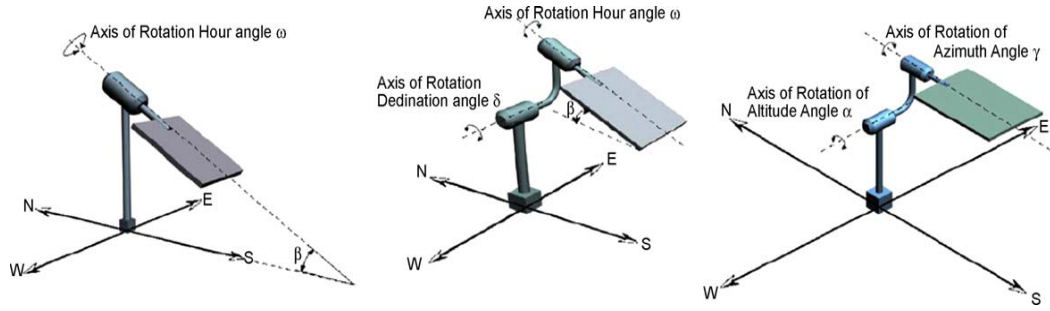
Huang ve ark. (2007) üç sabit açıda (üç pozisyonlu takip: Sabah, öğlen ve öğleden sonra) PV pozisyonunu ayarlamak için tek eksen takip mekanizmasını değerlendirmişlerdir ve tasarlamışlardır. Tek kutup desteği, eğim ayar platformu, bir motor tarafından sürülen PV şasesi ve bir adet güneş pozisyon sensörü mekanizmada bulundurmışlardır. Güneş pozisyon sensörü bir dikey levha tarafından bölünmüş iki adet ışığa duyarlı parçadan oluşturmuşlardır. Üç adet temas anahtarı şasenin şanzıman dişlisi üzerindeki sinyal kontrol çevrimine monte etmişlerdir. PV şasesi harekete

başladığı zaman, yakınındaki anahtara değdiğinde durduğunu gözlemlemişlerdir. Her bir durdurma açısı için, maksimum yıllık toplam enerjiyi bulmuşlardır ve sensörün çeşitli anahtar açısında yıllık toplam enerjiyi hesaplamışlardır. Optimum durdurma açısını 50° , ve optimum anahtar açısı durdurma açısının yarısı olan 25° olarak olduğunu gözlemlemişlerdir. Farklı enlemlerde güneşin öğlen vaktindeki eğim açısı için yapılan hesaplamalar tekrar edilerek, optimum anahtar açısı durdurma açısının yarısı olduğu ve enlem ne olursa olsun optimum durdurma açısının yaklaşık olarak 50° olduğu sonucuna varmışlardır. Yıllık toplam enerji sonuçları gösterdi ki; sabit PV modülüyle karşılaştırıldığında PV güç üretiminin %24.5 artacağını hesaplamışlardır.

Kalogirous (1996) bir adet DC (doğru akım) motordan ve üç adet ışığa bağlı direnç sensörlü kontrol sisteminden oluşan tek eksen takip sistemi tasarlamıştır ve imal etmiştir. Sensörlerden biri direk ışınım tesbiti için sorumludur; ikinci sensör bulut sensörüdür ve üçüncü sensör gün ışığı sensörü olduğunu belirtmiştir. Kontrol sistemi röleden, zamanlayıcıdan, birkaç dirençten ve elektronik parçalardan oluşturmuştur. Üç sensörün hiç biri gölgede olmadığı zaman, motor çalıştığını gözlemlemiştir. Sistem E-W yönünde güneşi takip ettiğini ve kollektörün son dönüş hızı 0.011 rpm olduğunu gözlemlemişlerdir. Güneş kollektörünün çeşitli testleri göstermiştir ki; takip mekanizması çok hassas olduğunu gözlemlemiştir. 600 Wm^{-2} için doğruluk 0.2° olduğunu gözlemlemiştir.

2.2.3. Veri ve zaman tabanlı kontrol sistemleri

Alata ve ark. (2005) şunları içeren zaman kontrol kademeli güneş takip sistemleri tasarlamışlardır ve simülasyonunu yapmışlardır: Enlem açısına eşit eğimde tek eksen takip sistemi, ekvatorial çift eksenli takip ve azimut/yükseklik güneş takibi (Şekil 2.2.). Karşılaştırma çalışması bu üç güneş takibi arasındaki motodlara uygulanan bulanık mantığa dayandırmışlardır. Tek eksen takip sistemi güneşe doğru yatayla eğimli enlem açısına ($\beta=32^\circ$) eşit açıda yerleştirmişlerdir. Enlem açısının saatlik değişimi çok yavaş olduğu dikkate almışlardır; dolayısıyla enlem açısına eşit açılı çift eksen ekvatorial güneş takip sistemi için gün boyunca bir kere veya birkaç kez bu eksende takip ayarlamışlardır.



Şekil 2.2. (soldan sağa) enlem açısına eşit eğim açısında tek eksen takip sistemi; enlem açısına eşit eğim açısında çift eksen ekvatorial güneş takip sistemi; azimut/yükseklik çift eksen güneş takip sistemi

Abdallah ve ark. (2008) PLC kontrollü tek eksen güneş takip sistemi geliştirmişlerdir. Bu tasarımda bir motor dikey eksen (azimut takip) etrafında yapıyı döndürmüşlerdir. Elektrik sistemi ve motor tarafından tüketilen güç toplanan enerjinin %3'ü kadar olduğunu tahmin etmişlerdir. Günün saatlerini dört eşit süreye parçalamışlardır ve motor hızı her bir süre için PLC'de programlamışlardır. Grafik sonuçlarında öğlene kadar sabah sırasında %40 arttığını ve takip modu için akşam %22 arttığını göstermişlerdir.

Ajay ve ark. (2003) zaman kontrol teknolojisine ve mikro kontrole dayalı tek eksen güneş takip sistemini tasarlamışlardır. Bir adet rüzgar hız sensörü ve sıcaklık sensörü Real Time Clock (RTC) ile haberleşen mikro kontrolörün ADC portuna bağlamışlardır. Bu işlemci bir motora sinyal gönderdiğinden, güneş pozisyonunu hesaplamak için RTC'den veri aldığından ve sensörlerden alınan verileri işlediğinden bahsetmişlerdir. Işık sensörünün tepe noktasında gölge yüksekliği 1° kararlılıkta 86 mm olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca kararlılık güneş ışığı yoğunluğuna bağlı olduğunu gözlemlemişlerdir. Düşük yoğunluklarda sadece zaman kontrol sistemi çalışmaktadır.

Güneş sensörü güneş pozisyonundaki küçük değişimlere çok hassastır ve normalden 1° sapmayla güneşi takip etmektedir.

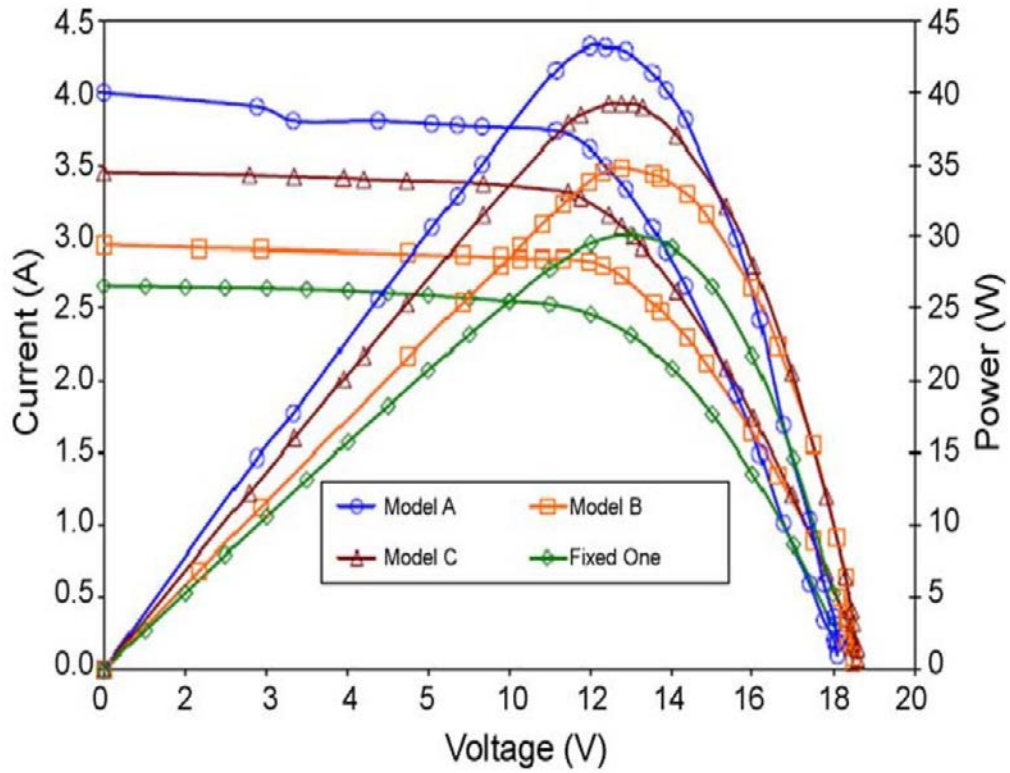
Hession ve ark. (1984) kollektörü kontrol etmesi için özel ışık dirençleri kullanılan tek eksen (E-W) güneş takip sistemini incelemişlerdir. Işık dirençleri tarafından alınan sinyaller voltaja çevrilmiş ve 2.2 W DC motorunu sürmek için uygulanmıştır. Sensördeki dokuz ışık transistordan; biri gece ve gündüzü tespit etmek için, altısı geniş açı hassasiyeti için ve ikisi çok dar açı hassasiyetini ayarlamak için kullanılmıştır. Gerekli kararlılık 0.1° 'dir. Tam olarak enerji ölçümlerini elde etmek için, bulutlu hava şartları altında saat tipi hareket mekanizması sistemde kullanmışlardır.

2.3. Takip Sistemlerinde Tekno-Ekonomik Analiz

Agee ve ark. (2007) güneş takip teknolojilerinin pazar eğilimlerini ve arazi uygulamalarını, onların ortak maliyetlerini, onarım gereklerini ve elde edilen verim artışlarını incelemişlerdir. Çalışmaları kutup eksensli takip sistemlerinin yanı sıra çift ve tek eksen takip tipleri gibi sensör destekli takip sistemlerini, program kontrollü sistemleri ve hidrolik sistemlerini içermektedir. Bir hidrolik destekli takip sisteminin düşük kapasiteli montajlar için uygun olduğunu sonuçlandırmışlardır. Kutup eksensli takip sisteminin maliyeti tek eksen takip sistemi maliyetine eşit iken, kutup eksensli takip sisteminin performansının çift eksen takip sisteminin performansına benzer olduğunu bulmuşlardır.

Michaelides ve ark.(1999) kollektör yüzeyli güneş su ısıtıcısının maliyet etkisini ve performansını şu dört durumda incelediler ve karşılaştırdılar: yatayla 40°'de sabitleme, düşey eksensli tek eksen takip sistemi, sabit eğimli ve değişken azimut, yılda iki defa değişen kollektör eğiminde mevsimsel takip modu. Sistemi analiz etmek adına, termosifon sistemi için bilgisayar simülasyon programı olan TRNSYS simülasyon sistemi kullanmışlardır. Simülasyon sonuçları en iyi ısı performansının tek eksen takip sisteminden elde edildiğini göstermiştir. Lefkoşa'da (35° enlem), bu mod (tek eksen takip sistemi) ile elde edilen yıllık güneşlenme yüzdesi (güneş ışınımıyla sağlanan yüklü bölüm) %81.6 mevsimsel moda ve %79.7 yüzeysel moda nazaran %87.6'dır, Atina (42° enlem) için bu değerler sırasıyla %76.2 (mevsimsel), %74.4 (sabit yüzey) ve %81.4 (tek eksen)'dür. Ekonomik olarak bakılırsa, sabit yüzey moddaki en fazla maliyet verimi olarak bulunmaktadır.

Sangani ve ark. (2007) PV ile üretilmiş elektrik maliyetini azaltmak için farklı güneş takip sistemi kullanılan bir V-trough (2-güneş) yoğunlaştırıcısı imal etmişlerdir ve test etmişlerdir. Onların takip modları mevsimsel takip (A), tek eksen N-S takip (B) ve gündüz hareketli olan (C). Farklı takip modlarında toplanmış 900 W/m² güneşlenme seviyesinde PV modülden elde edilen çıkış gücü ve I-V karakteristik eğrileri için deneysel sonuçlar Şekil 2.3' te gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Model-A, model-B ve model-C'ye göre montaj edilen farklı V-troughs yoğunlaştırılmış PV sistemleri için güç üretimi ve I-V eğrileri

Nann (1990) sabit (40°) bir sistemden alınan ışınım ve takip sistemleri için maliyetle ilgili potansiyelleri değerlendirdi. Güneş için yüzey normali üzerindeki direkt ışınım parçası sabit sistemdekenden %54 daha fazla olmasına rağmen, tek eksen ve çift eksen tarafından alınan fazla ışınım sırasıyla %34 ve %38'dir ve günümüzdeki modül maliyeti, güneş takibi PV tesisinin maliyet verimliliğini %20'ye kadar arttırabildiğine değinilmiştir. Üç sabit, tek eksen ve çift eksen takip sistemleri arasındaki karşılaştırma gösterdi ki; tek eksen takip sistemi tarafından elde edilen ışınım çift eksen takip sistemlerinkiyle aynıdır; ancak tek eksen takip sistemi maliyeti çift eksen takip sistemi maliyetinin yaklaşık olarak yarısı kadardır.

Farklı takip sistemlerinden elde edilen enerji verimleri Şekil 2.4' te detaylı olarak gösterilmiştir.

Takip Sistemi Çeşiti	İkincil Eksen	Takip Metodu	Değerlendirme Yöntemi	Bölgenin Enlemi	Karşılaştırılan Sistem	Kazanım	Referans
Çift Eksen			Teorik		Sabit	57%	(Poulek ve Libra, 2007)
Çift Eksen			Genellikle		Sabit	Günlük %0-100 Yıllık %30-40	(Tracstar, 2007)
Tek Eksen Takip	Çift pozisyonda eğimli		Bilgisayar simülasyonu		Sabit	Mevsimsel %10-20	(Bione et al., 2004)
Azimut tek eksen takip	Üç pozisyonda eğimli				Yatay düzlem	Yıllık %72	(Ai ve ark., 2003)
Tek Eksen Takip	Sabit				Yatay düzlem	Yıllık %30.2	(Ai ve ark., 2003)
Azimut tek eksen takip (dikey)	Üç pozisyonda eğimli				Üç kademeli saat açısı	0%	(Ai ve ark., 2003)
Değişken azimut	Sabit eğimli		DeneySEL ve bilgisayar simülasyonu		40° eğimde sabit sistem	Yıllık %9.9	(Michaelides ve ark., 1999)
Mevsimsel takip	Sabit eğimli		DeneySEL ve bilgisayar simülasyonu		40° eğimde sabit sistem	Yıllık %2.4	(Michaelides ve ark., 1999)
Değişken azimut	Sabit eğimli		DeneySEL ve bilgisayar simülasyonu		Mevsimsel takip	Yıllık %7.4	(Michaelides ve ark., 1999)
Çift Eksen			DeneySEL ve bilgisayar simülasyonu		Yatay düzlem	%30-40	(Pavel ve ark., 2004)
Çift Eksen azimut/yüksekli takip			DeneySEL		Yatayla 40° eğimli	Yıllık %30	(Helwa ve ark., 2000)
Azimut (dikey) eksen	Yataysal		DeneySEL		Yatayla 40° eğimli	Yıllık %18	(Helwa ve ark., 2000)
N-S takip	6° eğimli		DeneySEL		Yatayla 40° eğimli	Yıllık %11	(Helwa ve ark., 2000)
Çift Eksen			Gerçek		36° eğimli	Yıllık %37.7	(Chicco ve ark., 2007)
Çift Eksen			Gerçek		30° eğimli sabit	Yıllık %30.4	(Chicco ve ark., 2007)
Çift Eksen			Simulasyon		30° eğimli	Yıllık %31.5	(Chicco ve ark., 2007)
Çift Eksen			Gerçek		Yataysal	23%	(Shaltout ve ark., 1995)
Çift Eksen			Gerçek		Güneye dönük sabit	%22-33	(Baltas ve ark., 1986)
Çift Eksen			Simulasyon		N-S eksenli takip	Yıllık %10	(Gordon ve ark., 1991)
Çift Eksen			Simulasyon		Kutupsal eksen (güney eğimli N-S eksenli takip)	Yıllık %3	Gordon ve ark. (1991)

Şekil 2.4. Farklı takip sistemleri için enerji kazanımları

Takip Sistemi Çeşiti	İkincil Eksen	Takip Metodu	Değerlendirme Yöntemi	Bölgenin Enlemi	Karşılaştırılan Sistem	Kazanım	Referans
Çift Eksen			Deneysel		40° eğimli sabit	Yıllık %38	(Nann ve ark., 1990)
Tek eksen (N-S ekseni)			Deneysel		40° eğimli sabit	Yıllık %34	(Nann ve ark. (1990)
Çift Eksen			Teorik		40° eğimli sabit	54%	(Nann ve ark. (1990)
φ-5 eğimli sabit	Sabit		Teorik		Yataysal	Yıllık %10	(William C Dickinson, 1978)
Yatay N-S ekseni	Sabit		Teorik		Yataysal E-W eksen	Yıllık %15	(William C Dickinson, 1978)
Kutupsal eksen takip	Güney eğimli		Teorik		Yataysal N-S eksen	Yıllık %10	(William C Dickinson, 1978)
Çift Eksen			Teorik		Kutupsal eksenli takip	Yıllık %1-2	(William C Dickinson, 1978)
Çift Eksen			Teorik		Kutupsal eksenli takip	0%	(Kalogirou, 2004)
Çift Eksen			Teorik		Yataysal N-S eksen	Yıllık %26.2	(Kalogirou, 2004)
Çift Eksen			Teorik		Yataysal E-W eksen	Yıllık %10.9	(Kalogirou, 2004)
Tek eksen	Güneye dönük		Gerçek		Güneye dönük sabit	Yıllık %20	(Stern & West, 1996)
Çift Eksen			Teorik	23.3°	Yataysal	Yıllık %7	(Appelbaum et al., 1995)
Çift Eksen			Teorik	47.7°	Yataysal yüzey	Yıllık %21	(Appelbaum et al., 1995)
Kutupsal takip (değişken azimut)	Sabit eğimli		Teorik	23.3°	Yataysal yüzey	Yıllık %15.9	(Appelbaum et al., 1995)
azimut takip	Yataysal		Teorik	23.3°	Yataysal yüzey	Yıllık %13.1	(Appelbaum et al., 1995)
E-W takip	Yataysal N-S takip	Sabit dönen takip hızı	Teorik	23.3°	Yataysal yüzey	Yıllık %13	(Appelbaum et al., 1995)
N-S takip	Yatay eksenli E-W	Maksimum ışık parlaklığı	Teorik	23.3°	Yataysal yüzey	Yıllık %8.3	(Appelbaum et al., 1995)
Çift Eksen			Gerçek		Güneye dönük sabit	Yıllık %40	(Gay, Wilson, & Yerkes, 1982)
Çift Eksen		Elektro-optik sensör	Deneysel	32°	32° eğimli sabit	Yıllık %41.34	(Abdallah ve Nijmeh, 2004)
E-W takip	Sabit eğimli	Elektro-optik sensör	Deneysel		Sabit eğimli	Yıllık %20	(Al-Mohamad, 2004)
N-S takip	Sabit eğimli	Elektro-optik sensör	Deneysel		Sabit eğimli	Yıllık %30-45	(Abu-Khader ve ark., 2008)

Şekil 2.4. Farklı takip sistemleri için enerji kazanımları (devamı)

Takip Sistemi Çeşiti	İkincil Eksen	Takip Metodu	Değerlendirme Yöntemi	Bölgenin Enlemi	Karşılaştırılan Sistem	Kazanım	Referans
Çift eksen (azimut ve zenit)		Elektro-optik sensör	Deneyisel		Sabit eğimli	Yıllık %35	(Debasol, 2007)
Çift eksen (portatif)		Elektro-optik sensör	Deneyisel	32°	Sabit eğimli	30%	(Contreras, Garcia ve ark., 2006) (2006)
Çift eksen		Elektro-optik sensör	Deneyisel	32°	Sabit eğimli	Yıllık %43.87	(Abdallah ve Nijmeh, 2004)
Azimut (dikeysel) takip		Elektro-optik sensör	Deneyisel		Sabit eğimli	% 34.43	(Abdallah ve Nijmeh, 2004)
E-W takip	Sabit eğimli	Elektro-optik sensör	Deneyisel	32°	Sabit eğimli	% 37.53	(Abdallah ve Nijmeh, 2004)
N-S takip	Sabit eğimli	Elektro-optik sensör	Deneyisel	32°	Sabit eğimli	% 15.69	(Abdallah ve Nijmeh, 2004)
Çift eksen		Elektro-optik sensör	Deneyisel		Sabit eğimli	27%	(Hatfield, 2006)
Üç pozisyonlu tek eksen takip	Sabit eğimli	Elektro-optik sensör	Deneyisel		Sabit eğimli	Yıllık %24.5	(Hatfield, 2006)
E-W tek eksen takip	Sabit eğimli	Yedek iki yüzü güneş hücresi	Deneyisel		Sürekli takip	-5%	(Poulek ve Libra, 2000)
E-W tek eksen takip	Sabit eğimli	Yedek iki yüzü güneş hücresi	Deneyisel		Sabit eğimli	30%	(Karimov ve ark., 2005)
E-W takip	Sabit eğimli	Yedek iki yüzü güneş hücresi	Deneyisel		Sabit eğimli	40%	Poulek ve Libra (1998)
Azimut takip	Sabit eğimli	Tarih/zaman	Deneyisel		Sabit eğimli	31%	(Abdallah ve Badran, 2008)
Çift eksen (yükseklik/azimut)		GA'lı tarih/zaman	Deneyisel		Sabit eğimli	7%	(Khlaichom ve P Sonthipermpon, 2007)
Çift eksen		Sensör kombinasyonu ve tarih/zaman esası	Deneyisel		40° eğimli sabit	%46.46	(Bakos, 2006)

Şekil 2.4. Farklı takip sistemleri için enerji kazanımları (devamı)

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Tek eksen güneş takipli sistemin tasarımı çizim programında yapılarak; sistem için gerekli bileşenler belirlenmiştir. Daha sonra sabit sistem ve tek eksen güneş takipli sistemler için gerekli materyaller temin edilerek montajları yapılmıştır. Tek eksen güneş takipli ve sabit sistemler deney için hazır hale getirilmiştir. Sabit ve güneş takipli sistemler Şekil 3.1’de görüldüğü üzere yan yana yerleştirilerek aynı şartlar altında performanslarını ölçmek için; akım, voltaj ve güneş ışınım değerleri anlık olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.1. Yan yana yerleştirilen güneş takipli (solda) ve sabit sistemlerin (sağda) deney düzeneği

3.1. Materyal

Bu tez çalışmasında kullanılan malzemeler; sabit ve tek eksen güneş takipli sistemlerin konstrüksiyonu içindir. Ayrıca akım, voltaj, güneş ışınımı gibi değişkenlerin anlık ölçülmesi için gerekli malzemeler kullanıldı. Sistem bileşeni seçiminde ilk olarak fonksiyon özelliğine, maliyet yönünden uygunluğuna, kolay uygulanabilirliğine ve temin edilebilir olmasına dikkat edildi.

Fotovoltaik Paneller: Sistemde iki adet ReneSola (“RENESOLA US,” 2017) firması tarafından üretilmiş 255 W’lık özdeş PV panel kullanıldı. PV panellerin teknik özellikleri Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2’ de mevcuttur.

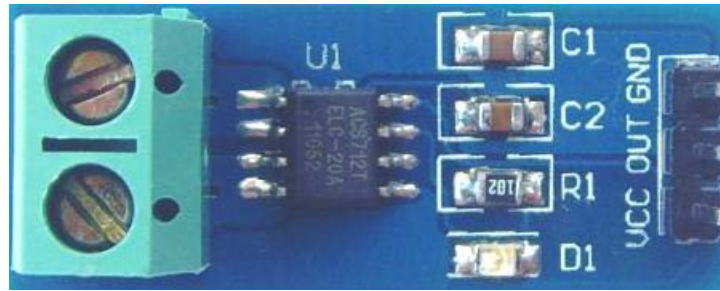
Çizelge 3.1. Fotovoltaik panelin Standart Denetim Koşullarındaki (STC) değerler (hava kütlesi (AM) 1.5, güneş ışınımı 1000 W/m^2 , panel sıcaklığı 25°C)

Elektriksel Özellikler STC	JC255M-24/Bb
Maksimum Güç (P_{max})	255 W
Güç Toleransı	0 ~ +5 W
Panel Verimi	% 15.7
Maksimum Akım (I_{mp})	8.39 A
Maksimum Gerilim (V_{mp})	30.4 V
Kısa Devre Akımı (I_{sc})	8.86 A
Açık Devre Gerilimi (V_{oc})	37.5 V
Ağırlık	19 kg
Mekanik yük taşıma kapasitesi	5400 Pa
Boyutlar	1640 x 992 x 40 mm

Çizelge 3.2. Fotovoltaik hücrelerin Normal Çalışma Sıcaklığındaki Değerleri (Işınım yoğunluğu 800 W/m^2 , spectrum AM 1.5, ortam sıcaklığı 20°C , rüzgâr hızı 1 m/sn)

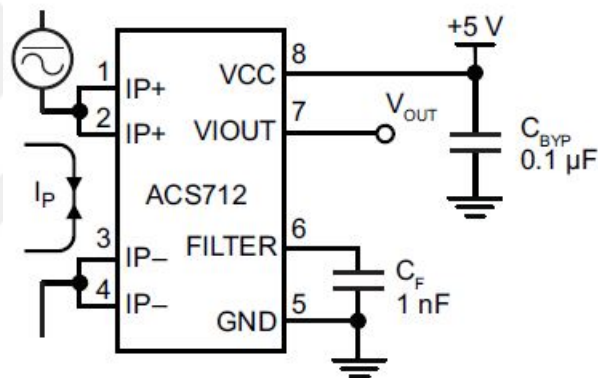
Elektriksel Özellikler NOCT	JC255M-24/Bb
Maksimum Güç (P_{max})	189 W
Maksimum Akım (I_{mp})	6.63 A
Maksimum Gerilim (V_{mp})	28.5 V
Kısa Devre Akımı (I_{sc})	7.20 A
Açık Devre Gerilimi (V_{oc})	35.1 V

Elektronik Ölçüm Kartı: Tasarlanan sistemde panelden yüklere gönderilen akımın ölçülebilmesi için Allegro firmasının ACS712 akım sensörü kullanılmıştır. ACS712 akım sensörü Hall-Effect prensibine göre çalışan bir akım algılama entegresidir (Şekil 3.2). 5, 20 ve 30 Amperlik 3 farklı versiyonu bulunmaktadır. Elektronik kartın içine yerleştirilen bu sensör yardımıyla sabit ve hareketli sistemlerden gelen akım değerleri alınarak bilgisayara kaydedildi.



Şekil 3.2. ACS712 akım sensörü

Sensörün çalışması için 5V'luk besleme yeterlidir. 1-2 nolu pinler akım giriş pinleri, 3-4 nolu pinler ise akım çıkış pinleridir. Sensörün bağlantı şeması Şekil 3.3'te verilmiştir. Çıkış sinyalinin filtrelenmesi için birde filtre kapasitesi kullanılmaktadır. Bu kapasite değeri ayrıca çıkış tazeleme frekansını da etkilemektedir. Akım sensörünün özellikleri Çizelge 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.0.3. ACS712 akım sensörü bağlantı şeması

Çizelge 3.3. Akım sensör özellikleri

Akım sensör özellikleri	
Hata payı	%1,5
Akım ölçüm aralığı	0-20 A

Gerilim ölçmek için elektronik kartın içine gerilim sensörü yerleştirildi ve panellerden alınan gerilim değerleri kaydedildi (Çizelge 3.4).

Çizelge 3.4. Gerilim Sensör Özellikleri

Gerilim sensör özellikleri	
Hata payı	% 1,4
Ölçüm aralığı	0-100 V

Sistemlerin Konstrüksiyon Bileşenleri: Takip sisteminde konstrüksiyon için kullanılan malzemeler; pinyon dişli, karşılık dişlisi, çelik profiller ve sarhoş tekerlerdir. Sabit sistem için de Şekil 3.4' te gösterilen çelik profiller, yataklar ve sarhoş tekerler kullanılmıştır.



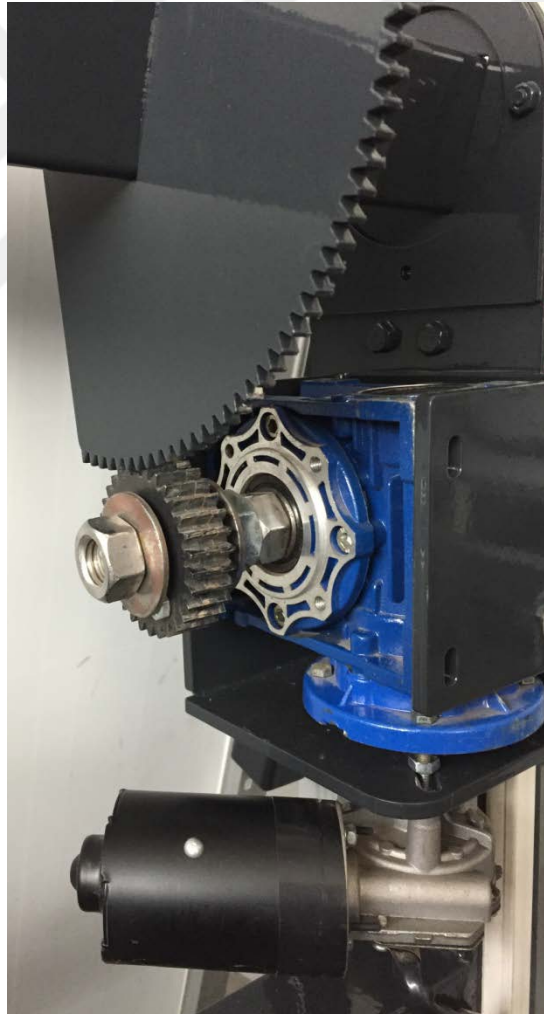
Şekil 3.4. Sabit sistem konstrüksiyon bileşenleri

Redüktörlü DC Motor: Düşük devirlerde yüksek tork üretmek için redüktörlü DC motor kullanılmıştır. Çizelge 3.5'te DC motorun teknik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.5. Redüktörlü DC motor teknik özellikleri

Redüktörlü DC motor özellikleri	
Sistem voltajı	12 V
Devir sayısı	55 d/d
Boşta çektiği akım	2 A
Tam güçte çektiği akım	10 A
Sistem gücü	120 W

Bu tez kapsamında kullanılan motor tipik bir araç silecek motorudur. Tek eksenli güneş takip sisteminin hareketi bu motor ile sağlanılacak olup, motor miline pinyon dişli monte edilmiştir. DC motor ise konstrüksiyondaki motor yuvası üzerine monte edilerek hareketi sağlamaktadır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Tek eksen güneş takibi için DC motor ve redüktör dişli bağlantısı

Tepegözü lambası: Sistemlerin elde ettikleri enerjiyi kullanmak üzere toplam iki adet tepegözü ampulü kullanıldı (Şekil 3.6). Sabit sistem ve güneş takipli sistem için birer adet kullanıldı. Her bir ampulün nominal gücü 400 W'dır (Çizelge 3.6). Kullanılan her bir panelin gücü 255 W olduğu için sisteme seçeceğimiz lambanın gücü de 255 W' tan yüksek olması gerekmektedir. Çünkü lamba gücü panel gücünden küçük olduğunda lambanın gücü kadar değer alacağı için PV panel maksimum değerlerde çalışmamış olacaktır. Yani lamba ne kadar akım alırsa o değerler sistem tarafında gözükecektir. Kullanılan lamba 400 W olduğu için PV panel en fazla 255 W üretebileceğinden PV panelden ölçülen maksimum değerler ölçülmüş olacaktır.

Çizelge 3.6. Sistemlerde yük olarak kullanılan lambaların teknik özellikleri

Lambaların teknik özellikleri	
Işık gücü	400 W
Gerilim	36 V



Şekil 3.6. Sistemlerde yük olarak kullanılan tepegözü lambası

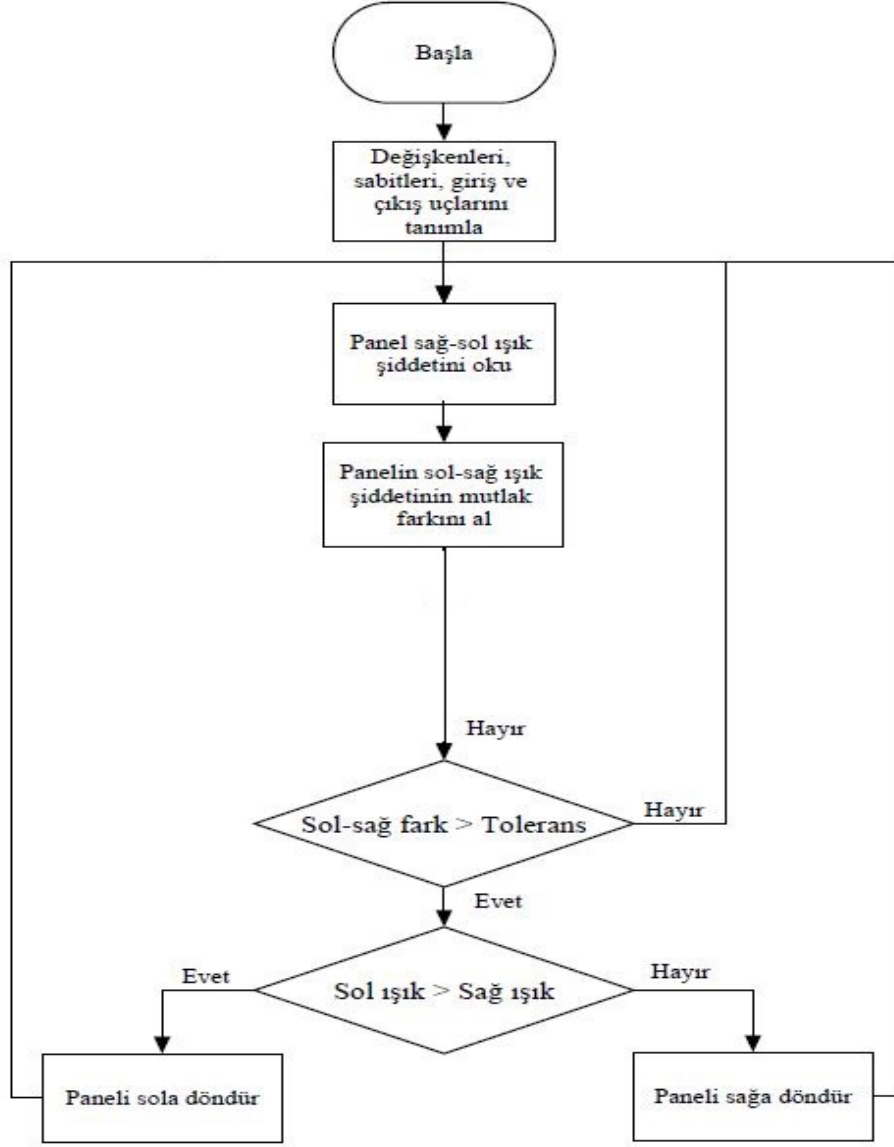
LDR (Light Dependent Resistance): Güneşin gün boyunca hareketini takip etmesi için deneyde ışığa duyarlı PV hücresi kullanılmıştır (Şekil 3.7). Bu PV hücrelerinin yerine ilk başta LDR (Light Dependent Resistance) kullanılmıştı. Fakat

istenilen hassasiyette ışık alınmadığından dolayı bu foto dirençler değiştirilerek PV hücreleri kullanıldı.

Sistem Kontrol Kartı: İki adet LDR ışık seviyesi ölçme devresini, Arduino devresini, motor sürücü pin bağlantılarını içinde barındıran bir kontrol kartı tasarlanmıştır.

Tasarlanan sistemde güneşin yönünün belirlenmesi amacıyla hareketli panelin dış kenarlarında 2 adet ışığa duyarlı direnç (LDR) kullanılmıştı. Üretimdeki küçük hatalardan dolayı tüm LDR'ler aynı karakteristiğe sahip olmayabilir. Bu nedenle üzerlerindeki gerilimler farklı olmaktadır. Bu durum panelin tam olarak güneşe yönelmesine mani olmaktadır. Bu problemi çözmek için LDR yerine PV hücreleri kullanılmıştır. Bu sayede güneşe yönelme LDR kullanımına göre daha hassas olmuştur.

Tasarlanan güneş takip sistemi tek eksenle kapalı döngü kontrol sistemi esasına göre güneşi takip etmektedir. Sistemin çalışma mantığı Şekil 3.7' de verilen program akışına göre oluşmaktadır. Sisteme enerji verildiğinde Arduino UNO gerekli pin ayarlamalarını yaptıktan sonra otomatik olarak PV hücrelerindeki ışık değerleri tekrar Arduino'ya iletilmektedir. Daha sonra Arduino motor sürücüyü devreye sokarak hangi PV hücresinde ışık fazla ise o tarafa dönmesi için DC motoru harekete geçirmektedir. Takip için PV hücrelerinin her ikisinin de ışık şiddetlerinin mutlak farkları alınmakta eğer bu farklar tolerans değerlerinden küçükse panel konumunu korumakta, büyük ise hangi yöndeki ışık şiddeti büyük olduğu tespit edilmekte ve panel o yöne yönlendirilmektedir.



Şekil 3.7. Kontrolör Programı Akış Diyagramı

Panelin güneşi takibi belirli bir tolerans değerine (15 mΩ) göre yapılmaktadır. Eğer takip işlemi belirli bir tolerans değerine göre yapılmaz ise panel sürekli kararsız hareketler yapacaktır. Çünkü PV hücrelerine gelen ışık miktarı sürekli değiştiği için tolerans değeri 15 mΩ'in altında olduğunda sürekli sağa veya sola hareketler yapacaktır.

Arduino: Güneşin takibini sağlamak için oluşturulan yazılım kodlar yardımıyla Arduino programında yazıldı. Arduino, açık kaynak kodlu bir mikrodenetleyici kartıdır. Ana MCU, Atmel tabanlıdır. (MCU'ya önceden bir mini program – bootloader yüklenmiştir). Kart ile robotik ve elektronik uygulamalar geniş kütüphane desteği sayesinde gerçekleştirilebilir.

Arduino geliştirilmek istenilen projelerin çeşitlerine göre farklı yapılarda olabilir ama genel olarak bütün modelleri tek kart mikro kontrolcü yapısındadır. Üzerinde USB portu, analog ve sayısal giriş/çıkış birimleri bulunur. Programlama için C/C++ dili kullanılır ve Java üzerinde geliştirilmiş, geliştirme, derleme, yükleme özelliklerine sahip Arduino IDE ile programlanır. Geliştirme ortamının ve sürücülerinin kurulumu çok kolaydır. Bütün platformlarda (Windows, Linux ve Mac) çalışabilir. Tek eksen güneş takipli sistemde kullanılan Arduino UNO özellikleri Çizelge 3.7’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.7. Arduino UNO özellikleri

Arduino UNO	Özellikleri
Çalışma Gerilimi	5V
Giriş Gerilimi (Önerilen)	7-12V
Giriş Gerilimi (Sınır)	6-20V
Dijital I/O Pinleri	14 (6 adedi PWM çıkış olarak yönlendirilebilir.)
Analog Giriş Pin Sayısı	16 adet
Her bir G/Ç pini başına akım	40 mA
3.3V gerilim çıkışı akımı	50 mA (maksimum)
Çalışma Gerilimi	5V
Flash Memory	32 KB (0,5 KB'ı Program yükleyici tarafından kullanılıyor.)
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Saat Hızı	16 MHz
Uzunluk	68,6 mm
Genişlik	53.4 mm
Ağırlık	25 g

Motor Sürücü: Sistemimizde kullanılan redüktörlü doğru akım motorunun sürülmesi için ST Microelectronics firmasına ait L298 motor sürücü entegresi kullanıldı (Şekil 3.8). L298 motor sürücü entegresi mikro denetleyicilerle kontrol edildi.



Şekil 3.8. L298 DC motor sürücüsü

İnverter (Evirici): İnverterler ya da diğer adıyla dönüştürücüler, doğru akımı alternatif akıma çeviren cihazlardır. Çizelge 3.8’de inverterin teknik özellikleri görülmektedir. Fotovoltaik paneller de doğru akım ürettiği için bunu günlük hayatta kullandığımız 230V 50/60Hz özelliklerinde alternatif akıma dönüştürmek için evirici kullanılması gerekir. Çıkış geriliminin frekansını nasıl ayarladıklarına göre tam sinüs ve modifiye edilmiş olarak ikiye ayrılmaktadırlar. Ortalama verimleri %85-95 arasında değişmektedir. Yüksek voltaj ve akım, yüksek ve düşük ortam sıcaklığı, mekanik baskılar gibi durumlar eviricileri olumsuz yönde etkilemekte ve sık arızalanmalarına neden olmaktadır. Bu yüzden uygun konumlara yerleştirilmeleri gerekmektedir. Bu araştırmada kullanılan inverter Linetech (“Linetech,” 2017) firması tarafından üretilmiştir (Şekil 3.9).

Çizelge 3.8. İnverter Teknik Özellikleri

İnverter Teknik Özellikleri	
DC giriş voltajı	24 V
Sistem gücü	3 kW
DC giriş akımı	100 A
AC çıkış voltajı	230 V
Çalışma sıcaklığı	-10 ~50 °C



Şekil 3.9. Tek eksen takip sisteminde kullanılan DC'yi AC'ye çeviren inverter

İnverterden ilk başta akım, volt ve güç değerleri okunmuştu. Fakat istenilen sağlıklı sonuçlar alınamadı. Bu yüzden inverterden değerleri okumak yerine ölçüm kartı tasarlanarak sistemlerin akım, volt ve güç değerleri okundu.

3.2. Yöntem

Tek eksen güneş takip sistemi için çizim programında tasarımı yapılarak maliyet ve uygulanabilirlik yönünden uygun konstrüksiyon oluşturuldu. Daha sonra bu tasarım çerçevesinde belirlenen parçalar temin edilerek montajı sağlandı.

Deneyde sabit sistem ile tek eksenli N-S takip sistemi karşılaştırılarak; akım, voltaj ve güneş ışınımı anlık olarak ölçüldü. Her bir sistemden ölçülen akım ve voltaj değerleri ile güç hesaplanarak iki sistem arasındaki verim farkı hesaplandı.

Konya ili için bu tez çalışmasında kullanılan sabit güneş sistemi için panel eğim açısı 32° olarak alındı. Konya için yıllık en yüksek verimi veren eğim 32° olarak hesaplanmıştır. Ayrıca Konya ilindeki santrallerde kurulu olan sabit sistemler 32° eğim açısında yerleştirilmiştir (Konya 2. Organize Sanayi Bölge Müdürlüğü GES). Sabit sistem güneşe bakacak şekilde ayarlanarak sabit tutuldu. Tek eksen güneş takipli sistem ise kuzey-güney boyunca hareket ederek; güneşi takip etti. Şekil 3.10'da deney

sırasında takip sistemi ve sabit sistemin eksnelere göre nasıl yerleştirildikleri görülmektedir.



Şekil 3.10. Aynı şartlarda yan yana yerleştirilen tek eksen kuzey-güney takipli sistem (solda) ve sabit sistem (sağda)

3.2.1. Tek eksen güneş takip sistemi seçimi

Takip sistem çeşitleri arasından en uygun takip sistemi belirlenerek; konstrüksiyon seçimine ve güneşi takip etmesini sağlayan kontrol sistemine karar verildi.

Güneşten elektrik elde etmek için günümüzde kullanılan PV sistemleri sabit sistemler, tek eksen ve çift eksen takip sistemleridir. Çift eksenli sistem sabit sisteme göre %30-40 civarında daha fazla verime sahiptir (Tracstar, 2007). Tek eksenli sistemler sabit sisteme göre %20 civarında daha fazla verime sahiptir (Stern ve ark., 1996). Çift eksen takip sistemi tek eksen takip sistemine göre gölgelenme ve maliyeti daha fazladır. Ayrıca çift eksen takip sistemi tek eksen takip sistemine göre yaklaşık %10 daha fazla verim farkına sahiptir (Kalogirou, 2004).

Tek eksenli güneş takip sistemini kontrol etmek için Arduino, PLC ve PIC gibi programlama dilleri mevcuttur. Bu kontrol sistemleri arasından Arduino basit, yaygın kullanımı ve maliyet uygunluğu yönünden ön plana çıkmaktadır. Bu tez çalışmasında güneşin takibini kontrol etmesi için Arduino seçildi.

Güneşin takibini mekanik olarak sağlayan hareket sistemlerinde pnömatik-hidrolik, dişli çarklar ve aktüatörler gibi elemanlar kullanılmaktadır. Hidrolik akışkanlar, yüksek ısılara hassastır. Akışkan sıcaklığı 50 °C'yi geçmesi istenmez. Ayrıca hidrolik devre elemanlarının fiyatları pahalıdır (MEGEP, 2011). Lineer aktüatörler ise kontrolü kolay olmasına rağmen 160° panele çift taraflı eğim açısı sağlayamamaktadır. Bundan dolayı istenilen tasarıma daha uygun olan dişli çark; ucuz ve yaygın olmasından dolayı avantajlıdır. PV paneller çelik profiller üzerine monte edilerek takip sistemi sağlanmış olmaktadır.

3.2.2. PV Simülasyon programının seçimi

Günümüzde PV için kullanılan bir çok simülasyon programı mevcuttur. Bunlardan bir kaç; PVSOL, PVSYST, PVDesignPro, Polysun, SolarPro gibi programlardır. Daha önce yapılan araştırmada PVSYST programının diğer programlara göre daha kullanışlı ve ekonomik çıktılarının olması nedeniyle bu programın daha uygun olduğu belirtilmiştir. Bu açıdan da bu araştırma çalışmasında PVSYST programı kullanılmıştır.

3.2.3. Sistem değerlerinin (akım, volt ve güç) ölçümü

Güneşten en verimli şekilde yararlanmak için güneş ışınlarının panellere dik gelmesi gerekmektedir. Güneşin gün içinde izlediği yörünge ve takip sistemlerinin yerleştirilme şekilleri itibariyle üretilen güçte farklılıklar oluşmaktadır.

Her ikisi sistem deney yapılan günler için açık alanda etrafında gölge yapmayacak bir ortama yerleştirilerek; yan yana konumlandırıldı. Deneyler sabah güneş doğuşundan akşam gün batımına kadar yapıldı. Sabit sistem güneye döndürülerek 32° eğim açısı ayarlandı. Tek eksen N-S takipli sistem kuzeyden güneye dönecek şekilde yerleştirildi. Daha sonra elektronik ölçüm kartına her bir sistem için birbirinden bağımsız tepegözü lambaları bağlandı. Sabit ve hareketli sistemlerin PV panellerinden çıkan kablolar elektronik ölçüm kartına bağlanarak sistem tamamlandı. Ölçüm kartına bilgisayar bağlanarak 10 saniyede bir veri kaydedecek şekilde ayarlandı. Karşılaştırılan sistemler aynı ortamda yan yana yerleştirilerek akım, voltaj, güç ve güneş ışınımı gibi değişkenler okunup kaydedildi. Her bir sistem için günlük yaklaşık 3400 adet değer okundu. Kaydedilen veriler ne kadar fazla olursa deney sonucu da o kadar hassas olacaktır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Sabit ve güneş takipli sistemler yan yana yerleştirilerek deney yapıldı. Sabit ve tek eksen güneş takipli sistemlerden lambalar tarafından çekilen akım ve gerilim değerleri okundu. Yan yana yerleştirilen sistemler Şekil 4.1’de gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Tek eksen N-S takipli sistem (solda) ve sabit sistem (sağda)

Konya ilinde nisan ayı boyunca açık alanda yapılan deneyler neticesinde elde edilen verilerin ortalaması grafik olarak verilmiştir. Sistemlerden okunan değerler saatlik olarak Çizelge 4.1’de verilmiştir. Çizelge 4.1’deki verilerden de görüldüğü üzere sabit sistem tarafından bir gün boyunca toplam ortalama 1,2 kWh, tek eksen güneş takipli sistemden ise 1,5 kWh elektrik üretildiği tespit edildi. Maksimum değerler her iki sistemde de öğle vaktinde yani yaklaşık olarak saat 13:00’ da kaydedildi. Çünkü tam öğlen güneş iki sisteme de dik gelmektedir.

Çizelge 4.1. 255 W gücünde sabit ve tek eksen güneş takipli sistemlerin saatlik akım, voltaj, güç, sıcaklık ve güneş ışınım ortalama değerleri (Nisan, 2017)

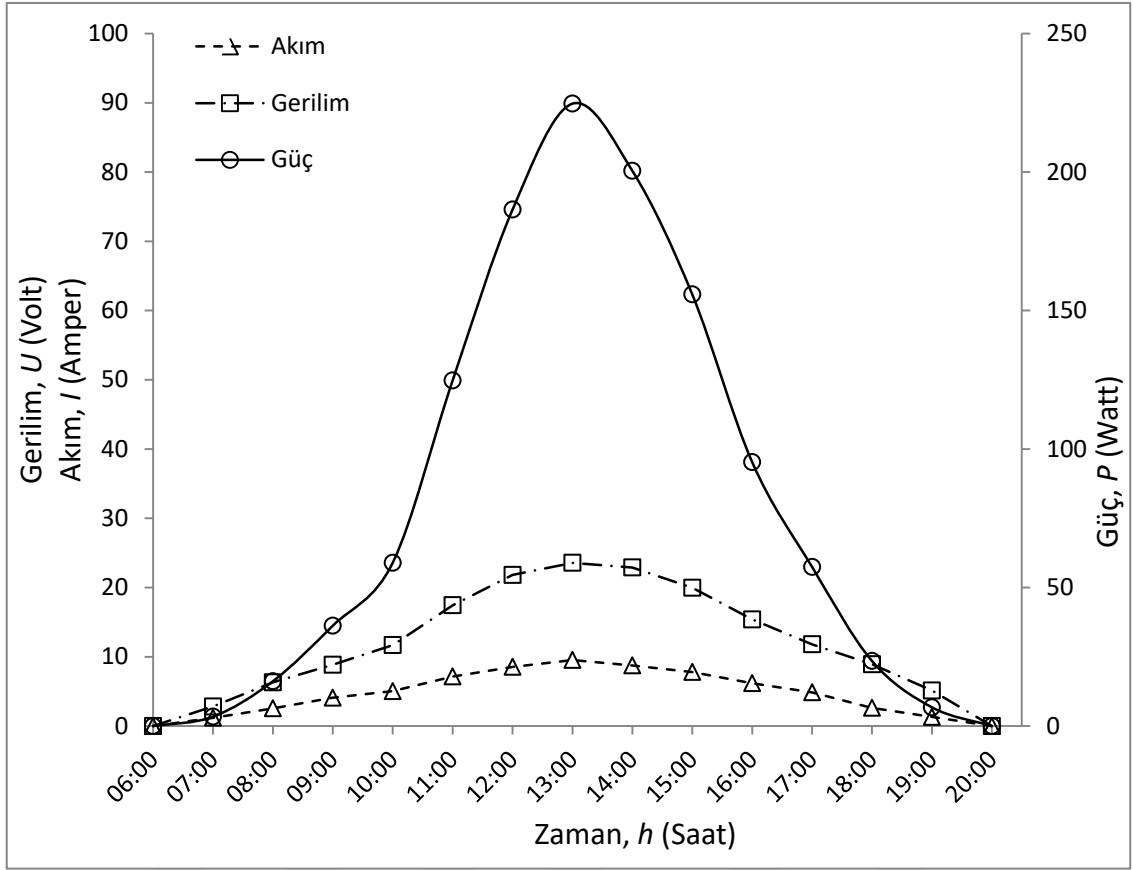
Saat	Sabit Sistem				Tek eksen güneş takipli sistem				Güneş ışınımı (W/m ²)	Sıcaklık (°C)
	Akım (A)	Gerilim (V)	Güç (Wh)	PV panel verimi	Akım (A)	Gerilim (V)	Güç (Wh)	PV panel verimi		
05:00-06:00	0,0	0,0	0,0	0%	0,0	0,0	0,0		0,0	0
06:00-07:00	1,2	2,8	3,4	1%	2,0	6,3	12,4	3%	252,6	0
07:00-08:00	2,6	6,3	16,2	2%	3,1	9,6	29,9	4%	461,5	4
08:00-09:00	4,1	8,9	36,3	4%	5,0	12,0	60,1	6%	598,0	12
09:00-10:00	5,1	11,7	59,0	5%	6,1	14,6	88,3	8%	714,7	17
10:00-11:00	7,2	17,4	124,8	8%	8,1	19,3	156,0	10%	947,7	19
11:00-12:00	8,5	21,8	186,4	11%	9,3	22,3	206,9	13%	1029,7	21
12:00-13:00	9,5	23,6	224,7	13%	9,8	23,6	231,6	14%	1066,3	22
13:00-14:00	8,8	22,9	200,4	12%	9,6	22,9	220,7	14%	1021,5	21
14:00-15:00	7,8	20,0	155,8	11%	8,8	21,0	184,3	13%	900,0	20
15:00-16:00	6,2	15,4	95,3	8%	7,2	17,3	125,0	11%	702,3	19
16:00-17:00	4,9	11,8	57,4	6%	6,2	14,7	90,6	10%	578,9	19
17:00-18:00	2,6	8,9	23,5	4%	4,1	10,4	42,2	7%	370,5	17
18:00-19:00	1,3	5,1	6,8	2%	2,7	6,9	18,2	5%	220,4	14
19:00-20:00	0,0	0,0	0,0	0%	0,0	0,0	0,0	0%	0,0	11
TOPLAM			1189,9				1466,2			

Nisan ayı boyunca yapılan deneyler neticesinde sabit sistemden 1,2 kWh ve hareketli sistemden 1,5 kWh ortalama güç değerleri dikkate alınarak verim oranı hesaplandı. Bu sonuçlar ışığında hareketli sistem sabit sistemden %23 daha fazla elektrik ürettiği görülmüştür. Aşağıda verim oranının nasıl hesaplandığı gösterilmiştir.

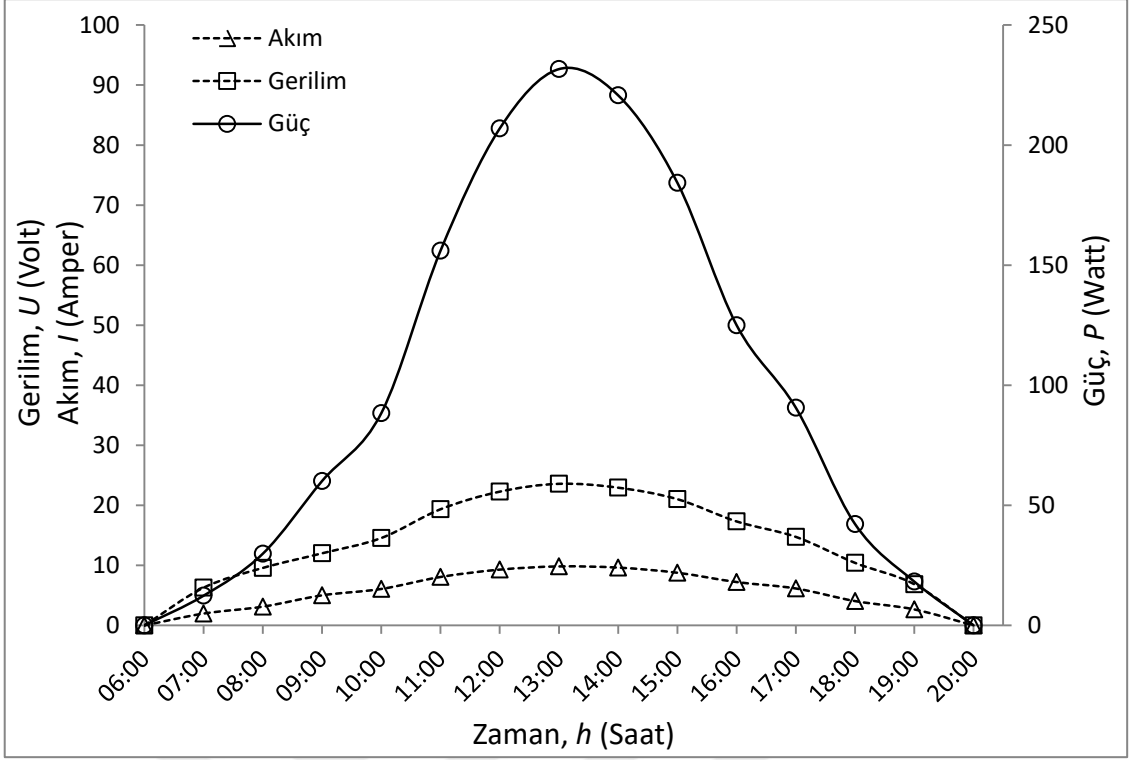
$$\text{Verim oranı (\%)} = 100(1466 - 1190)/1190$$

Verim farkı= %23'dur.

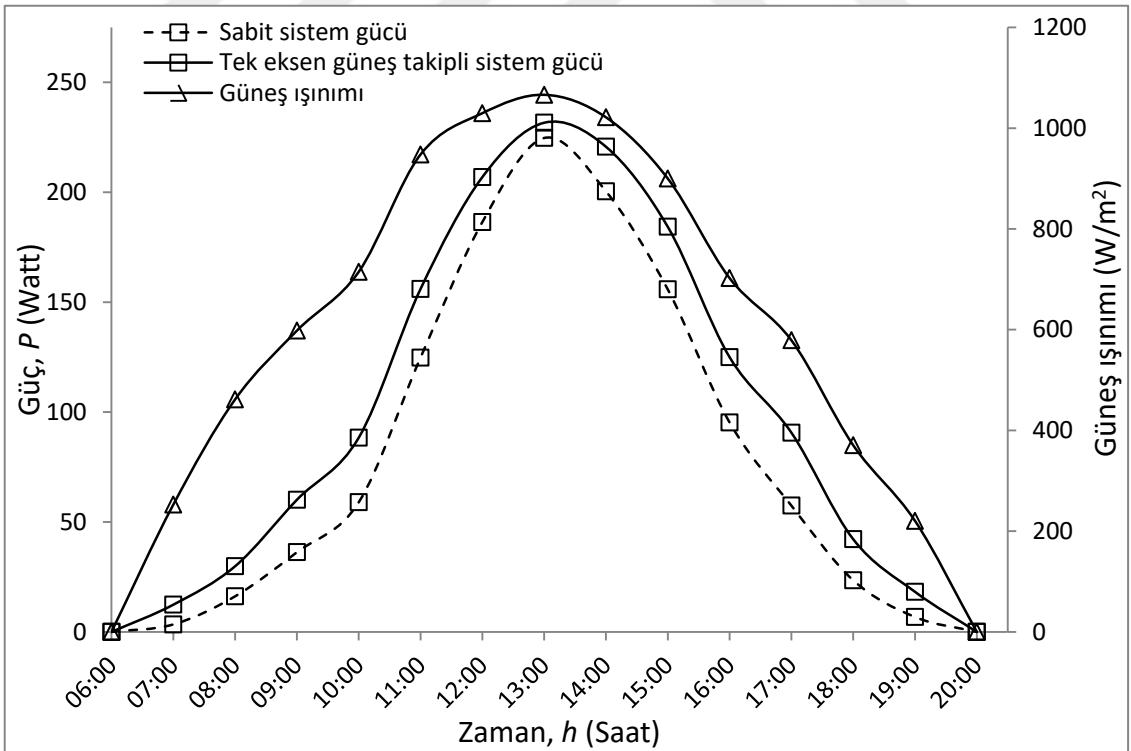
Nisan ayı boyunca yapılan örnek veri toplama çalışmasına ait bilgiler ve elde edilen veriler doğrultusunda çizilen akım, gerilim, güç ve güneş ışınım ortalama değerlerinin grafikleri gösterilmiştir (Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4). Sabit sistemin ortalama akım, gerilim ve üretilen gücün bir arada gösterimi Şekil 4.2'te verilmiştir. Şekil 4.3'te tek eksen güneş takipli sistemin ortalama akım, gerilim ve güç değerleri arasındaki ilişki gösterilmiştir. Şekil 4.4'te ise sabit sistem ile tek eksen güneş takipli sistemlerin ürettiği oldukları ortalama güçlerinin birbirlerine göre durumları ve güneş ışınım değerleri gösterilmiştir.



Şekil 4.2. 255 W gücünde sabit PV sistemin akım, voltaj ve güç değerleri (Konya, Nisan 2017)

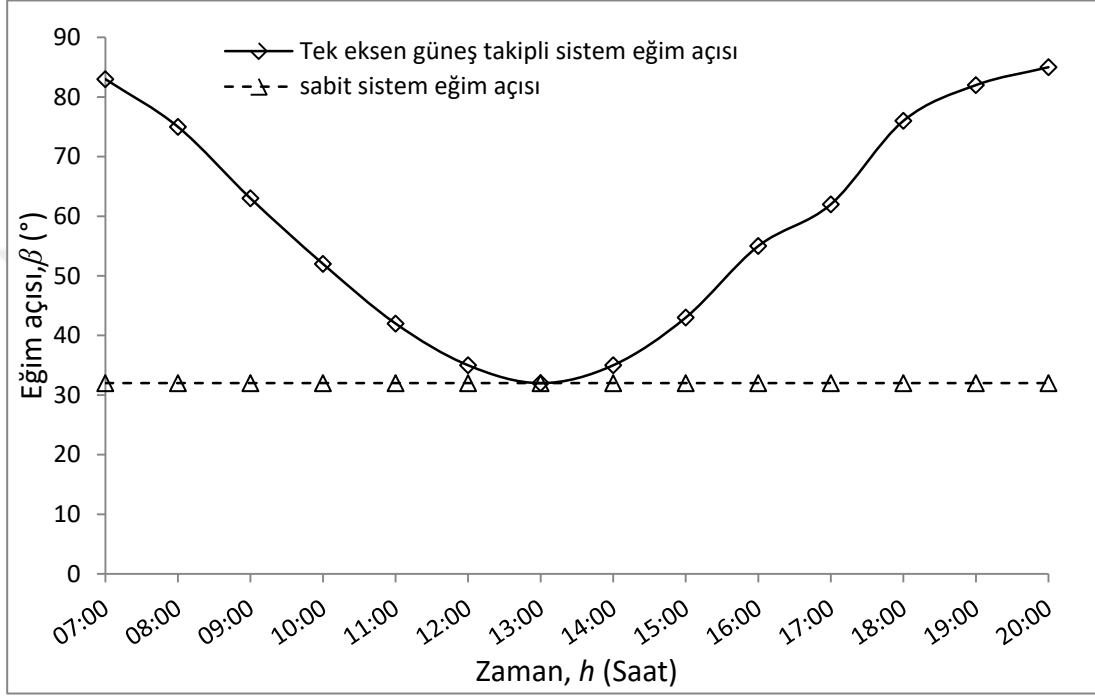


Şekil 4.3. 255 W gücünde tek eksen güneş takipli PV sistemin akım, voltaj ve güç değerleri (Konya, Nisan 2017)



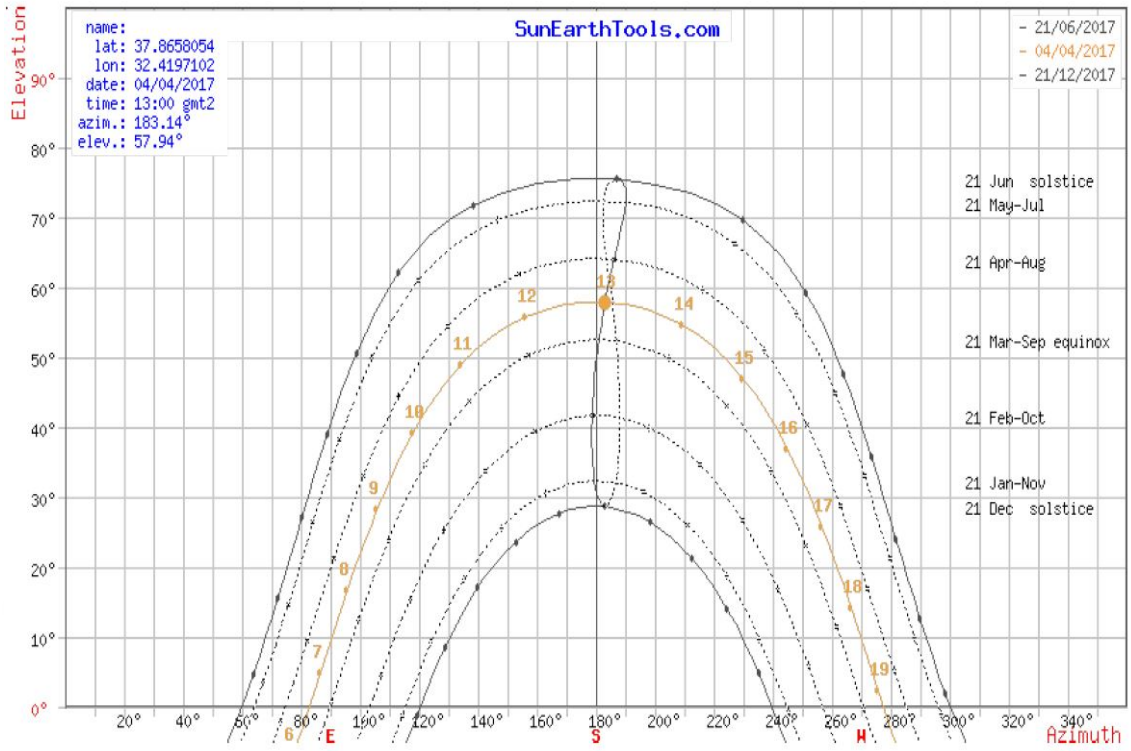
Şekil 4.4. 255 W gücünde sabit ve tek eksen güneş takipli PV sistemlerin güç ve güneş ışınım değerleri (Konya, Nisan 2017)

Sabit sistem gün içerisinde 32° eğim açısında iken takipli sistem güneşi belirli açılarda takip etti. Eğim açılarındaki değişim Şekil 4.5’de gösterilmiştir. Takip sistemi öğle vaktinde (azimut açısı sıfır) 32° eğim açısına gelerek sabit sistemle aynı eğim açısında aynı gücü ürettiği tespit edildi. Bu öğle vaktinde eğim açılarının aynı olması Nisan ayında güneş yükseklik açısının yaklaşık 58° olmasındandır.



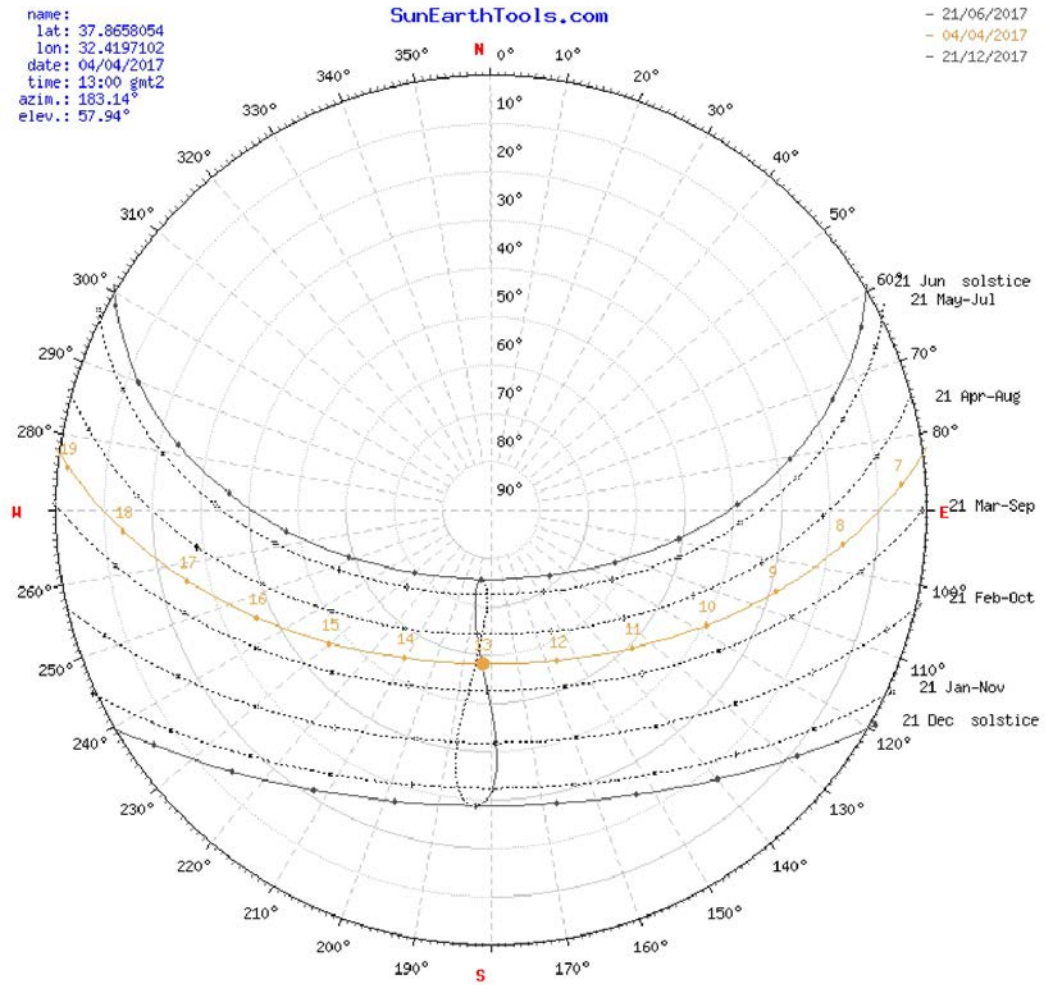
Şekil 4.5. 255 W gücünde Sabit ve tek eksen güneş takipli sistemin zamana göre eğim açılarındaki değişim (Konya, Nisan 2017)

Konya için güneş yükseklik açısındaki değişim Şekil 4.6’da gösterilmiştir. Şekil 4.6’ da görüldüğü üzere güneş yükseklik açısının tam öğle vaktinde 58° olduğu gün sarı çizgiyle gösterilmiştir. 21 Mart (ekinoks) ve diğer aylardaki güneş yükseklik açıları da verilerek tüm yıl boyunca açıdaki değişim gösterilmiştir.



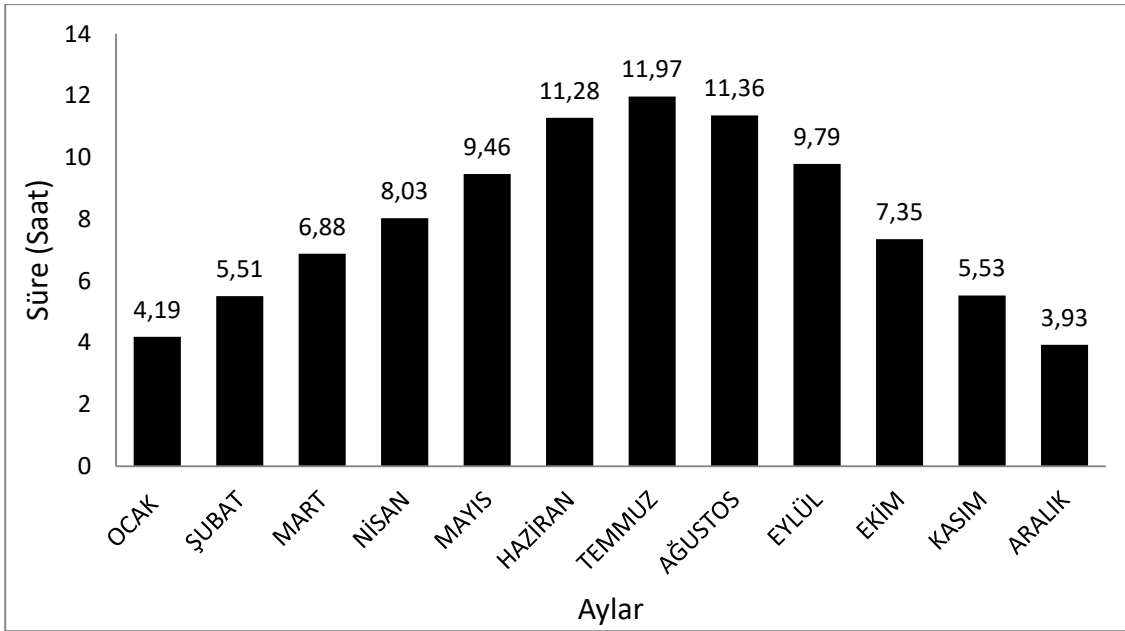
Şekil 4.6. Konya için aylara göre güneş yükseklik açısı ve azimut açısı (Sunearthtools, 2017)

Şekil 4.7’de örnek olarak 4 Nisan 2017 tarihli Konya için saatlere göre güneş hareket eğrisi gösterilmiştir.



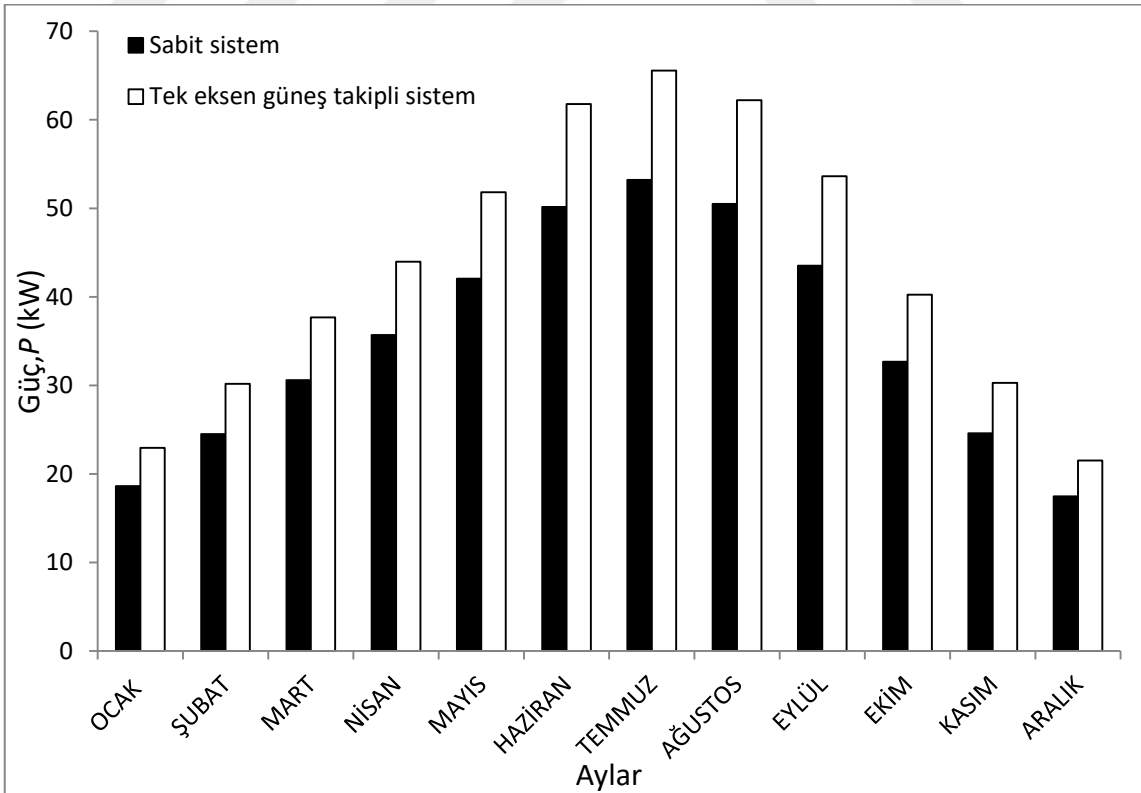
Şekil 4.7. Konya için güneşin farklı aylardaki saatlere göre hareket eğrisi (sarı çizgi: 4 Nisan 2017) (Sunearthtools, 2017)

Nisan ayında yapılan deney sonuçları dikkate alınarak nisan ayında ne kadar güç üretildiği hesaplandı. Nisan ayında sabit sistem 35,7 kWh enerji ürettiği; tek eksen güneş takipli sistemin ay boyunca 45,0 kWh enerji ürettiği görüldü. Böylece nisan ayı boyunca yapılan deneyler ışığında Konya için yıllık enerji üretimi hesaplandı. Bu hesaplama Şekil 4.8'de gösterilen Konya'nın aylık güneşlenme süreleri dikkate alınarak hesaplandı.



Şekil 4.8 Konya için yıllık güneşlenme süreleri ("GEPA," 2017)

Şekil 4.9'da Konya ili için sabit ve tek eksen güneş takipli sistemlerin yıllık ne kadar enerji ürettiği gösterilmiştir. Her iki sistem en yüksek gücü temmuz ayında üretmektedir. Çünkü temmuz ayında güneş diğer aylara göre daha dik açıyla gelmekte ve güneşlenme süresi daha fazla olmaktadır.



Şekil 4.9. Konya için sabit ve tek eksen güneş takipli sistemler için yıllık güç üretimleri

Helwa ve ark. (2000) 6° eğimli tek eksenli N-S takip sistemini 40° eğimli sabit sistemle karşılaştırmış ve takip sisteminin yıllık %11 daha verimli olduğunu bulmuşlardır. Bu deney Almanya'da yapılmıştır. Almanya'da bulunan bu değerin bizim bulduğumuz sonuçtan farklı olması enlemden kaynaklanmaktadır.

Abu-Khader ve ark. (2008) sabit eğimli tek eksen N-S takip sisteminin sabit sistemden yıllık %30-45 daha verimli olduğunu deneysel çalışmasında göstermiştir. Bu çalışmada güneye dönük olmasından dolayı verimin %30-45 olduğu görülmektedir.

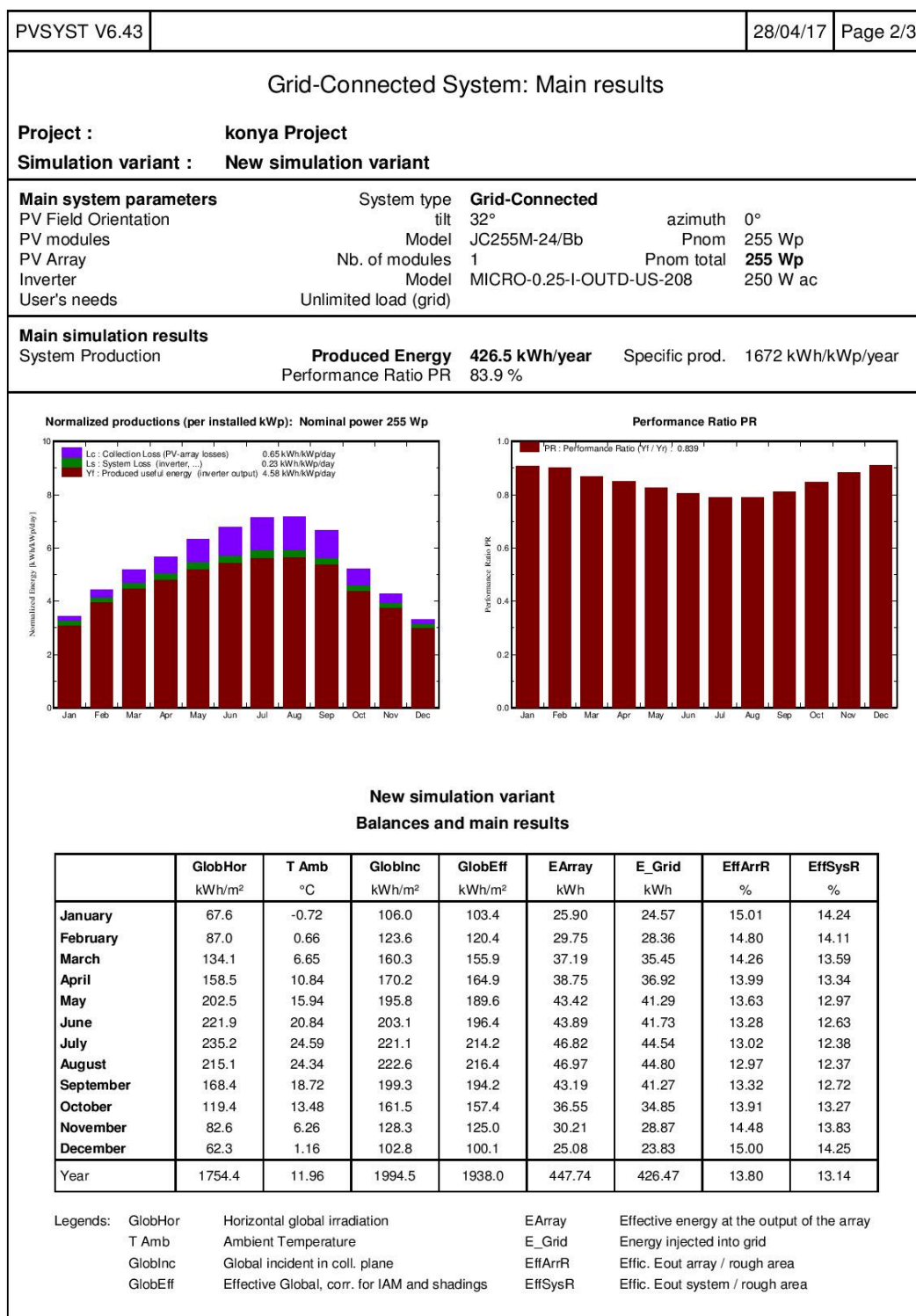
Abdallah ve ark. (2004) tek eksen N-S takipli sistemi sabit sistemle karşılaştırmışlardır ve takip sistemi sabit sistemden %15,69 daha verimli olduğu sonucunu elde etmişlerdir. Bu deney 32° enlemlili Amman/Ürdün'de gerçekleştirilmiştir. Konya ile Amman'da gerçekleştirilen deneyler arasında %3 'lük gibi farkın az olması iki şehir enleminin birbirine yakın olmasından kaynaklanmaktadır.

Yapılan uygulama ile Türkiye'de gelişme aşamasında olan güneş enerjisinden elektrik enerjisi elde etme konusunda farkındalık oluşturulması, bu konuda araştırmalara katkıda bulunması, güneş verimliliğinin araştırılması ve güneş enerjisinin ülkemizde kullanımının yaygınlaştırılması amaçlanmıştır.

Simülasyon Sonuçları: PV simülasyon programı olan PVSYST programı kullanıldı. Konya için gerekli bilgiler girilerek simülasyon yapıldı. Şekil 4.10'da simülasyon parametreleri verilmektedir. Simülasyon sonucunda 32° eğimli 255 W sabit sistemin Konya şartlarında yıllık 426 kWh enerji ürettiği görülmektedir (Şekil 4.11). Deneysel sonuçlar neticesinde 32° deki sabit sistemin gücü yıllık toplam 424 kWh olarak hesaplanmıştır. Bu neticeler sonucunda simülasyon ile deneysel sonuçlar arasında %0,47'lik fark olduğu görüldü.

PVSYST V6.43		28/04/17	Page 1/3
Grid-Connected System: Simulation parameters			
Project :	konya Project		
Geographical Site	Konya	Country	Turkey
Situation	Latitude 37.9°N	Longitude	32.4°E
Time defined as	Legal Time Time zone UT+3	Altitude	1151 m
	Albedo 0.20		
Meteo data:	konya	Meteonorm 7.1 (2003-2011), Sat=9% - Synthetic	
Simulation variant :	New simulation variant		
	Simulation date	28/04/17 01h55	
Simulation parameters			
Collector Plane Orientation	Tilt 32°	Azimuth	0°
Models used	Transposition Perez	Diffuse	Perez, Meteonorm
Horizon	Free Horizon		
Near Shadings	No Shadings		
PV Array Characteristics			
PV module	Si-poly	Model	JC255M-24/Bb
<small>Original PVsyst database</small>	Manufacturer	Renesola	
Number of PV modules	In series	1 modules	In parallel 1 strings
Total number of PV modules	Nb. modules	1	Unit Nom. Power 255 Wp
Array global power	Nominal (STC)	255 Wp	At operating cond. 230 Wp (50°C)
Array operating characteristics (50°C)	U mpp	27 V	I mpp 8.4 A
Total area	Module area	1.6 m²	Cell area 1.5 m ²
Inverter			
<small>Original PVsyst database</small>	Model	MICRO-0.25-I-OUTD-US-208	
Characteristics	Manufacturer	ABB	
Inverter pack	Operating Voltage	12-60 V	Unit Nom. Power 0.250 kWac
	Nb. of inverters	1 units	Total Power 0.25 kWac
PV Array loss factors			
Thermal Loss factor	Uc (const)	20.0 W/m ² K	Uv (wind) 0.0 W/m ² K / m/s
Wiring Ohmic Loss	Global array res.	55 mOhm	Loss Fraction 1.5 % at STC
Module Quality Loss			Loss Fraction -0.8 %
Module Mismatch Losses			Loss Fraction 1.0 % at MPP
Incidence effect, ASHRAE parametrization	IAM =	1 - bo (1/cos i - 1)	bo Param. 0.05
User's needs :	Unlimited load (grid)		

Şekil 4.10. Konya için PVSYST simülasyon parametreleri



Şekil 4.11 Konya için 255 W gücünde PVSYST simülasyon sonuçları

Maliyet Analizi

Maliyet analizinde aynı güce sahip sabit ve tek eksen güneş takipli sistemler karşılaştırılmıştır. 1 MW kurulu güce sahip sabit ve tek eksen güneş takipli sistemlerin maliyet karşılaştırması Çizelge 4.1’ de gösterilmektedir. Sabit ve hareketli sistemler tarafından üretilen elektrikler devlete 0,133 \$/kWh’ den satılmaktadır. Yıllık üretilen güçler devlete satış değeriyle çarpılarak yıllık gelir tutarı belirlenir.

Sabit sistem için;

$$\text{Yıllık gelir} = 1700 \frac{\text{MWh}}{\text{yıl}} * 0,133 \text{ \$/kWh}$$

$$\text{Yıllık gelir} = 226100 \text{ \$}$$

$$\text{Amortisman süresi} = 1127030/226100$$

$$\text{Amortisman süresi} = 4,98 \text{ yıl}$$

Güneş takipli sistem için;

$$\text{Yıllık gelir} = 2220 \frac{\text{MWh}}{\text{yıl}} * 0,133 \text{ \$/kWh}$$

$$\text{Yıllık gelir} = 295260 \text{ \$}$$

$$\text{Amortisman süresi} = 1314831/295260$$

$$\text{Amortisman süresi} = 4,45 \text{ yıl}$$

Çizelge 4.2. 1MW sabit ve tek eksen güneş takip sistemlerinin maliyet analizi

	Sabit sistem	Tek eksenli güneş takipli sistem
Kurulum maliyeti	1 127 030 \$	1 314 831 \$
Yıllık üretilen güç	1700 MWh/yıl	2220 MWh/yıl
Maliyet Farkının oranı	%0	%16,66
Yıllık üretilen güç farkının oranı	%0	%30
Amortisman süresi	4,98 yıl	4,45 yıl

Maliyet analizinden de görüleceği üzere sistemler arasında yaklaşık %17’ lik maliyet farkı çıkmaktadır. Sabit sistemle güneş takipli sistem arasında ki %30’luk verim farkında amortisman sürelerinde çok az fark oluşmuştur. Bu farkın az olması takip sisteminde elektriksel donanımların daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır.

İki sistem içinde dikkat edilecek noktalardan birisi panel seçiminde fiyat/performans oranının düşük olmasıdır. Ucuza alınmış PV paneller yüksek performansla daha yüksek enerji üretecektir.



5. SONUÇ ve ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

- Yan yana yerleştirilen iki sistemden elde edilen veriler sonucunda takip sisteminin sabit sisteme göre nisan ayı boyunca %23 daha fazla verime sahip olduğu görülmektedir.
- Konya ili için PV simülasyon sonucu ile deneysel sonuç arasında % 0,47'lik fark olduğu hesaplanmıştır.
- Nisan ayı boyunca gün içerisinde en yüksek güç değeri her iki sistem içinde öğle vakti olan saat 13:00'da ölçülmüştür.
- Tüm yıl boyunca her iki sistem de temmuz ayında en fazla gücü üretmişlerdir. Bunun nedeni de temmuz ayında güneşin dik gelmesi ve güneşlenme sürelerinin diğer aylara göre daha fazla olmasındandır.

5.2. Öneriler

- Bu deneysel çalışmada kullanılan sabit sistem ve tek eksen takipli sistemlerin yanına çift eksen takip sistemde yerleştirilerek üç sistemin Konya şartlarında karşılaştırılması yapılabilir.
- Takip mekanizmasını kontrol eden PIC, PLC ve Arduino gibi programlama dilleriyle oluşturulmuş takip sistemleri karşılaştırılarak programlama dilleri arasındaki farklar gözlemlenebilir.
- Tüm yıl boyunca üretilen güçleri görmek adına bu deneysel çalışmanın tüm yıl boyunca yapılması önerilmektedir.
- Sensörle takipte havanın bulutlu olması takip sistemini olumsuz etkilemektedir. İki ışık sensörüne aynı değer geldiğinden dolayı hareket etmemektedir. Bunun yerine güneş astronomisine dayanan algoritmali sistemlerin kullanılması tavsiye edilmektedir.
- Takip sistemlerinde daha az elektriksel donanıyla ne kadar fazla PV panel hareket ettirilirse maliyet yönünden avantaj sağlanmış olacaktır.

KAYNAKLAR

- Abdallah, S. (2004). The effect of using sun tracking systems on the voltage-current characteristics and power generation of flat plate photovoltaics. *Energy Conversion and Management*, 45(11–12), 1671–1679. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.10.006>
- Abdallah, S., & Badran, O. O. (2008). Sun tracking system for productivity enhancement of solar still. *Desalination*, 220(1–3), 669–676. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.02.047>
- Abdallah, S., & Nijmeh, S. (2004). Two axes sun tracking system with PLC control. *Energy Conversion and Management*, 45(11–12), 1931–1939. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.10.007>
- Abu-Khader, M. M., Badran, O. O., & Abdallah, S. (2008). Evaluating multi-axes sun-tracking system at different modes of operation in Jordan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.10.005>
- Ai, B., Shen, H., Ban, Q., Ji, B., & Liao, X. (2003). Calculation of the hourly and daily radiation incident on three step tracking planes. *Energy Conversion and Management*, 44(12), 1999–2011. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(02\)00229-7](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(02)00229-7)
- Al-Mohamad, A. (2004). Efficiency improvements of photo-voltaic panels using a Sun-tracking system. *Applied Energy*, 79(3), 345–354. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2003.12.004>
- Alata, M., Al-Nimr, M. A., & Qaroush, Y. (2005). Developing a multipurpose sun tracking system using fuzzy control. *Energy Conversion and Management*, 46(7–8), 1229–1245. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2004.06.013>
- Appelbaum, J., Sherman, I., & Landis, G. A. (1995). Solar radiation on Mars: Stationary photovoltaic array. *Journal of Propulsion and Power*, 11(3), 554–561. <https://doi.org/10.2514/3.23877>
- Bakos, G. C. (2006). Design and construction of a two-axis Sun tracking system for parabolic trough collector (PTC) efficiency improvement. *Renewable Energy*, 31(15), 2411–2421. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.11.008>
- Baltas, P., Tortoreli, M., & Russell, P. E. (1986). Evaluation of power output for fixed and step tracking photovoltaic arrays. *Solar Energy*, 37(2), 147–163. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(86\)90072-1](https://doi.org/10.1016/0038-092X(86)90072-1)
- Bione, J., Vilela, O. C., & Fraidenraich, N. (2004). Comparison of the performance of PV water pumping systems driven by fixed, tracking and V-trough generators. *Solar Energy*, 76(6), 703–711. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.01.003>
- Braun, J. E., & Mitchell, J. C. (1983). Solar geometry for fixed and tracking surfaces. *Solar Energy*, 31(5), 439–444. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(83\)90046-4](https://doi.org/10.1016/0038-092X(83)90046-4)
- Breault Research Organization Inc. (2017). Retrieved March 10, 2017, from <http://www.breault.com/>
- Brunotte, M., Goetzberger, A., & Blieske, U. (1996). Two-stage concentrator permitting concentration factors up to 300X with one-axis tracking. *Solar Energy*, 56(3), 285–300. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(95\)00107-3](https://doi.org/10.1016/0038-092X(95)00107-3)
- Chicco, G., Schlabbach, J., & Spertino, F. (2007). Performance of grid-connected photovoltaic systems in fixed and sun-tracking configurations. In *2007 IEEE Lausanne POWERTECH, Proceedings* (pp. 677–682). <https://doi.org/10.1109/PCT.2007.4538397>
- Contreras, A., Garcia, J., Gonzalez, C., & Martinez, E. (2006). Portable solar tracker. Retrieved May 8, 2006, from http://engineering.utsa.edu/ee/sd/projects/spring2006/13/Team_13_
- Debasol. (2007). solar power. Retrieved from <http://girasolar.com.tr/>

- Dickinson, W. C. (1978). Annual available radiation for fixed and tracking collectors. *Solar Energy*, 21(3), 249–251. [https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X\(78\)90030-0](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X(78)90030-0)
- Dickinson, W. C., Cheremisinoff, P. N., & Section, I. S. E. S. A. (1980). *Solar energy technology handbook*. M. Dekker. Retrieved from <https://books.google.com.tr/books?id=Cz5GAQAIAAJ>
- Foster. (2010). *SOLAR ENERGY Renewable Energy and the Environment*. Dalton transactions (Cambridge, England: 2003) (Vol. 39). <https://doi.org/10.1039/c0dt00454e>
- Gay, C. F., Wilson, J. H., & Yerkes, J. W. (1982). Performance advantages of two-axis tracking for large flat-plate photovoltaic energy systems. In *Conf. Rec. IEEE Photovoltaic Spec. Conf.:(United States)*. Arco Solar Industries, Woodland Hills, CA.
- GEPA. (2017). Retrieved February 6, 2017, from <http://www.eie.gov.tr/MyCalculator/Default.aspx>
- Gordon, J. M., & Wenger, H. J. (1991). Central-station solar photovoltaic systems: Field layout, tracker, and array geometry sensitivity studies. *Solar Energy*, 46(4), 211–217. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(91\)90065-5](https://doi.org/10.1016/0038-092X(91)90065-5)
- Grass, C., Schoelkopf, W., Staudacher, L., & Hacker, Z. (2004). Comparison of the optics of non-tracking and novel types of tracking solar thermal collectors for process heat applications up to 300 °C. *Solar Energy*, 76(1–3), 207–215. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.07.031>
- Hatfield, P. (2006). *Low cost solar tracker*. Curtin University of Technology.
- Hession, P. J., & Bonwick, W. J. (1984). Experience with a sun tracker system. *Solar Energy*, 32(1), 3–11. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(84\)90042-2](https://doi.org/10.1016/0038-092X(84)90042-2)
- Huang, B. J., & Sun, F. S. (2007). Feasibility study of one axis three positions tracking solar PV with low concentration ratio reflector. *Energy Conversion and Management*, 48(4), 1273–1280. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.09.020>
- Ibrahim, M. A. (1996). THE FORCED CIRCULATION PERFORMANCE OF A SUN TRACKING PARABOLIC CONCENTRATOR COLLECTOR. *Renewable Energy*, 0, 568–571.
- Jinayim, T., Arunrungrasmi, S., Tanitteerapan, T., Mungkung, N., & Characteristics, a S. C. (2007). Highly Efficient Low Power Consumption Tracking Solar Cells for White LED-Based Lighting System. *International Journal of Electrical, Computer, Electronics and Communication Engineering*, 1(4), 291–296.
- Kalogirou, S. A. (1996). Design and construction of a one-axis sun-tracking system. *Solar Energy*, 57(6), 465–469. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(96\)00135-1](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(96)00135-1)
- Kalogirou, S. A. (2004). Solar thermal collectors and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2004.02.001>
- Karimov, K. S., Saqib, M. A., Akhter, P., Ahmed, M. M., Chattha, J. A., & Yousafzai, S. A. (2005). A simple photo-voltaic tracking system. In *Solar Energy Materials and Solar Cells* (Vol. 87, pp. 49–59). <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2004.08.010>
- Khlaichom, P Sonthipermpoon, K. (2007). Optimization of solar tracking system based on genetic algorithms. Retrieved January 16, 2017, from [http://www.thaiscience.info/Article for ThaiScience/Article/3/10014367.pdf](http://www.thaiscience.info/Article%20for%20ThaiScience/Article/3/10014367.pdf)
- Konar, a., & Mandal, A. K. (1991). Microprocessor based automatic sun tracker. *IEE Proceedings A Science, Measurement and Technology*, 138(4), 237. <https://doi.org/10.1049/ip-a-3.1991.0032>
- Linetech. (2017). Retrieved from <http://www.linetech-tr.com/>
- Lorenzo, E., P??rez, M., Ezpeleta, A., & Acedo, J. (2002). Design of tracking

- photovoltaic systems with a single vertical axis. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 10(8), 533–543. <https://doi.org/10.1002/pip.442>
- MEGEP. (2011). Hidrolik Sistemler. In *ELEKTRİK-ELEKTRONİK TEKNOLOJİSİ*. Ankara.
- Michaelides, I. M., Kalogirou, S. A., Chrysis, I., Roditis, G., Hadjiyianni, A., Kambezidis, H. D., ... Adamopoulos, A. D. (1999). Comparison of performance and cost effectiveness of solar water heaters at different collector tracking modes in Cyprus and Greece. *Energy Conversion and Management*, 40(12), 1287–1303. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(99\)00020-5](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(99)00020-5)
- N. H. Helwa, A. B. G. Bahgat, A. M. (2000). Maximum Collectable Solar Energy by Different Solar Tracking Systems. *Energy Sources*, 22(1), 23–34. <https://doi.org/10.1080/00908310050014180>
- N. H. Helwa, A. B. G. Bahgat, A. M. (2000). Computation of the Solar Energy Captured by Different Solar Tracking Systems. *Energy Sources*, 22(1), 23–34. <https://doi.org/10.1080/00908310050014180>
- Naidoo, P., Elizabeth, P., & Brooks, M. (2003). Intelligent Control & Tracking of a Parabolic Trough Solar Collector. *North*.
- Nann, S. (1990). Potentials for tracking photovoltaic systems and V-troughs in moderate climates. *Solar Energy*, 45(6), 385–393. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(90\)90160-E](https://doi.org/10.1016/0038-092X(90)90160-E)
- Pavel, Y., Gonzalez, H., & Vorobiev, Y. (2004). Optimization of the solar energy collection in tracking and non-tracking PV solar system. In *Proceedings of the 1st international conference on electrical and electronics engineering* (pp. 310–4).
- Poulek, V. (1994). Testing the new solar tracker with shape memory alloy actuators. In *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference* (Vol. 1, pp. 1131–1133).
- Poulek, V., & Libra, M. (2000). Very simple solar tracker for space and terrestrial applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 60(2), 99–103. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(99\)00071-9](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(99)00071-9)
- Poulek, V., & Libra, M. (2007). New bifacial solar trackers and tracking concentrators. Retrieved from <http://www.solar-trackers.com/>
- RENESOLA US. (2017). Retrieved from <http://us.renesola.com/>
- Roger, M., & Jerry, V. (2005). *Photovoltaic Systems Engineering*. Vasa. [https://doi.org/10.1002/1521-3773\(20010316\)40:6<9823::AID-ANIE9823>3.3.CO;2-C](https://doi.org/10.1002/1521-3773(20010316)40:6<9823::AID-ANIE9823>3.3.CO;2-C)
- Rumyantsev, V., Chalov, A., Ionova, E., Larionov, V., & Andreev, V. (2004). Concentrator PV Modules with Multi-Junction Cells and Primary/Secondary Refractive Optical Elements. *The 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, (June), 19–22.
- Sangani, C. S., & Solanki, C. S. (2007). Experimental evaluation of V-trough (2 suns) PV concentrator system using commercial PV modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91(6), 453–459. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2006.10.012>
- Shaltout, M. A. M., Ghetas, A., & Sabry, M. (1995). V-trough concentrator on a photovoltaic full tracking system in a hot desert climate. *Renewable Energy*, 6(5–6), 527–532. [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(95\)00055-O](https://doi.org/10.1016/0960-1481(95)00055-O)
- Stern, M. J., & West, R. T. (1996). Development of a low cost integrated 15 kW a.c. solar tracking sub-array for grid connected PV power system applications. In *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference* (pp. 1369–1372). <https://doi.org/10.1063/1.52878>
- Sunearthtools. (2017). sun earth tools. Retrieved April 6, 2017, from

www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php#annual

Şenpınar, A. (2006). Güneş Açılarına Bağlı Olarak Optimum Sabit Güneş Paneli Açısının Hesaplanması. *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları*.

Tracstar. (2007). Should you install a solar tracker? Retrieved from <http://www.helmholz.us/smallpowersystems/>

Uyarel, A. Y., & Öz, E. S. (1987). *Güneş Enerjisi ve Uygulamaları*. Ankara: Birsen Yayınevi.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Serdar NUHOĞLU
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : ÇANKIRI / 30.09.1989
Telefon : 05434501236
Faks :
e-mail : serdarnuhoglu@outlook.com

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Çankırı Yabancı Dil Ağırlıklı Lisesi Merkez/ÇANKIRI	2008
Üniversite	: Selçuk Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü	2013
Yüksek Lisans	: Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Bölümü	

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2011	Tırsan Treyler Sanayi Ticaret ve Nakliyat A.Ş. Adapazarı Fabrikası Adapazarı / SAKARYA	Stajyer Mühendis
2012	Tırsan Treyler Sanayi Ticaret ve Nakliyat A.Ş. Genel Merkez Sancaktepe / İSTANBUL	Stajyer Mühendis
2014	Şakalak Tarım Makineleri San. ve Tic. A.Ş. Selçuklu / KONYA	AR-GE Mühendisi
2015	Tübitak	Tübitak Proje Asistanlığı

YABANCI DİLLER

İngilizce

