



Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

Fotovoltaik Uygulamalar İçin Kararlı Tek Eksenli Bir Güneş Takip Sistemi Tasarımı ve Uygulaması

İsmail KAYRI

Batman Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 72100, Batman, Türkiye

İsmail KAYRI, ORCID No: 0000-0002-4973-641X

Sorumlu yazar e-posta: ismail.kayri@batman.edu.tr

Makale Bilgileri

Geliş: 26.02.2023
Kabul: 28.03.2023
Online Ağustos 2023

DOI:10.53433/yyufbed.1256765

Anahtar Kelimeler

Enerji verimliliği,
Fotovoltaik sistemler,
Güneş enerjisi,
Güneş izleme sistemleri,
Tek yönlü güneş izleyici,
Yenilenebilir enerji

Öz: Hücre üretim teknolojilerindeki iyileştirmelere rağmen, modüllerin enerji dönüştürme oranlarının hâlâ istenen düzeyde olmaması fotovoltaik sistemlerin en önemli olumsuzluklarından biridir. Bu amaçla bir fotovoltaik sistemden daha yüksek enerji eldesi için güneş takip sistemleri kullanılmaktadır. Literatürde bu alanda yapılmış birçok çalışma olmasına rağmen, bu çalışmaların büyük bir kısmında genellikle takip sisteminin yazılım ve devre kısmına odaklanılmakta veya oluşturulan küçük boyutlu prototipler üzerinde gerçekleştirilen kısa vadeli test sonuçlarının sunulmasıyla yetinilmektedir. Fotovoltaik sistemlerin uzun yıllar boyunca farklı atmosferik değişimlere maruz kalarak çalıştığı göz önüne alındığında, bu sistemlerle beraber kullanılan güneş takip sistemlerinin farklı hava durumları altında uzun vadeli testlere tabi tutulmaları en doğru yaklaşım olacaktır. Bu amaçla bu çalışmada, tek eksenli bir güneş takip sistemi tasarlanmış ve üretilmiştir. Uygulamanın sürücü devresi ve mekanik aksamıyla ilgili tüm detaylar açık bir şekilde belirtilmiştir. Güneş izleyici sistem sayesinde günlük olarak elde edilen verim artışı, ilgili güne ait radyasyon ortalaması ve güneşlenme süresine göre değişmektedir. Sonuçlara göre güneş izleyici sistemin yıllık bazda %30.84 verim artışı sağladığı kaydedilmiştir.

Design and Implementation of a Stable Single Axis Solar Tracking System for Photovoltaic Applications

Article Info

Received: 26.02.2023
Accepted: 28.03.2023
Online August 2023

DOI:10.53433/yyufbed.1256765

Keywords

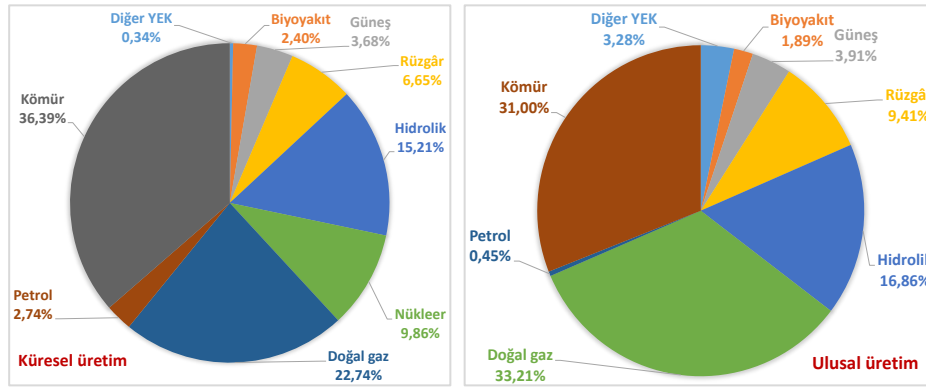
Energy efficiency,
Photovoltaic systems,
Renewable energy,
Solar energy,
Solar tracking systems,
Single-axis solar tracker

Abstract: Despite the improvements in cell production technologies, the energy conversion rates of the modules are still not at the desired level and this is one of the most important disadvantages of photovoltaic systems. For this purpose, solar tracking systems are used to obtain the highest energy from a photovoltaic system. Although there are many studies in this field available in the current literature, most of these studies generally focus on the software and circuit parts of the tracking system or focus on the short-term test results carried out on the small-sized prototypes created. Considering the fact that photovoltaic systems are generally exposed to different atmospheric changes for many years, it would be the best approach to testify the solar tracking systems under long-term tests for different weather conditions. For this purpose, a single-axis solar tracking system was designed and produced in this study. All details about the driver circuit and the mechanics of the system are clearly stated. Thanks to the solar tracker system, the daily increase in efficiency varies according to the radiation average and sunshine duration of the relevant day. According to the findings, the solar tracker system increases annual yield by 30.84%.

1. Giriş

Küresel enerji talep miktarındaki ivmelenme gün geçtikçe artmaya devam etmektedir. Bu talebi karşılamak üzere enerji arzındaki miktar da artmak durumundadır. Ancak gerek sınırlı olarak nitelendirilebilecek fosil kökenli enerji kaynaklarındaki erişilebilir rezervlerin azalma trendine girmesi gerekse bu enerji kaynaklarının kullanılmasıyla ortaya çıkan çevresel tehditlerin çeşitli uluslararası protokoller ile denetim altına alınmaya çalışılmasının oluşturduğu baskı, ülkelerin belirlediği enerji politikalarının enerji arz ve talebi arasındaki dengenin ekolojik sürdürülebilirliğe uygun olmasını sağlamaktadır. Bu hedeflere ulaşmadaki küresel duyarlılığa rağmen, ihtiyaç duyulan enerji arzının yenilenebilir ve sürdürülebilir odaklı olması istenilen düzeyde gerçekleşmemektedir. Uluslararası Enerji Ajansı, bu kapsamda belirli periyotlarla topladığı veriler üzerinde yaptığı istatistikleri sunarak, enerji alanında bölgesel ve küresel ilerleyişlere dikkat çekmeye çalışan ve geleceğe dönük vizyonlarını paylaşan kuruluşlardan biridir. Uluslararası Enerji Ajansı'nın 2021 sonu itibarıyla hazırladığı rapora göre, 2019 yılı içinde küresel enerji üretiminin yaklaşık %81'i fosil kökenli kömür, doğal gaz ve petrolün doğrudan veya dolaylı kullanılmasıyla gerçekleştiği kaydedilmiştir ([International Energy Agency, 2021](#)).

Sağladığı iletim, dağıtım, dönüşüm ve depolama avantajlarından dolayı elektrik enerjisi, en önemli enerji formlarından biri olarak ayrı bir konumda görülmekte ve bu enerji çeşidi alanındaki kalkınma süreci detaylı şekilde takip edilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimindeki payının daha iyi anlaşılabilmesi için 2021 yılı içinde küresel elektrik enerjisi üretiminin kaynak bazında dağılımı Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Kaynaklara göre küresel ve ulusal elektrik enerjisi üretimi – 2021 ([Ritchie & Roser, 2022](#)).

Şekil 1'deki grafiklere göre, 2021 yılı içinde gerçekleşen küresel elektrik enerjisi üretiminin yaklaşık %62'si fosil kökenli yakıtlarla sağlanmışken, Türkiye'de bu oran yaklaşık %65 olarak global ölçüğün biraz üzerinde seyretmiştir. Hidrolik enerji dâhil, yenilenebilir enerji kaynaklarının küresel elektrik enerjisi arzını karşılamadaki oranı yaklaşık %28 iken, Türkiye'de bu oran yaklaşık %35 olarak kaydedilmiştir. Bu oranın global ölçüğün oldukça üzerinde olmasının sebeplerinden biri de ülkemizin sahip olduğu zengin akarsu potansiyelidir. Modern yenilenebilir enerji kaynakları olarak nitelendirilebilecek güneş, rüzgâr, biyo-yakıt, jeotermal ve dalga enerjisi kullanımıyla elektrik enerjisi üretiminin 2021 yılı içinde küresel elektrik enerjisi arzındaki payı yaklaşık %13 iken, Türkiye'de bu oran yaklaşık %18.5 değeriyle küresel oranın oldukça üzerindedir. Bu modern yaklaşımlarla 2000 yılı içindeki küresel elektrik enerjisi üretimindeki pay sadece %1.55 iken ulusal üretimdeki pay ise sifıra yakındır. Bu oranlar, modern yöntemler kullanılarak yenilenebilir enerji kaynaklarıyla elektrik enerjisi üretiminde küresel ölçekte 20 yıl gibi görece kısa bir sürede ciddi bir oranda artış kaydedildiğini ifade etmektedir. 2010 yılı içerisinde Türkiye'de modern yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre dağılımındaki oran %1.86 iken, bu oran 11 yıl gibi kısa bir sürede %18.5'e yükselmiştir. Bu ciddi artış, yenilenebilirlik ve sürdürülebilirlik kavramlarının enerji politikaları açısından doğru okunduğunu ve bu eksende sağlanan teşvik, hibe, finansal kredi ve çeşitli yasal düzenlemelerin ülkemiz adına umut verici olduğunu söylemek mümkündür.

Güneş enerjisiyle küresel elektrik enerjisi eldesinin 2021 yılı içindeki payı %3.68 iken ulusal üretimde bu pay aynı yıl içinde %3.91'lik oranla global değerinin biraz üzerinde kaydedilmiştir. Küresel

ölçekte bu oran 2010 yılı içinde sadece %0.15 değerinde, ulusal ölçekte ise 2015 yılı içinde bile sadece %0.07 gibi düşük orana sahiptir. Bu değerdeki iyileşmenin görece kısa sayılabilecek bir periyotta gerçekleşmesi, diğer yenilenebilir enerji kaynaklarında olduğu gibi güneş enerjisi ile ilgili yatırımların da doğru bir program dâhilinde yürütüldüğünü göstermektedir.

Güneş enerjisiyle elektrik enerjisi üretiminde genel olarak, ışınım enerjisini doğrudan DC formunda elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik (PV) sistemler ve heliostat veya parabolik aynalar aracılığıyla güneş ışınımının belli bir noktada odaklanarak kaynama noktası yükseltilmiş tuzlu eriyiklere transfer edilen ısı enerjiden faydalanan türbin ve generatör bileşenlerini de barındıran sistemler kullanılmaktadır. Sağladığı avantajlar nedeniyle, PV sistemler aracılığıyla elektrik enerjisi üretimi, hem güneş enerjisi ile elektrik enerjisi üretiminde kullanılan yaklaşımlar arasında hem de genel olarak tüm yenilenebilir enerji kaynakları arasında öne çıkmaktadır (Fayaz ve ark., 2022). PV sistemlerde en temel bileşenlerden biri PV modüllerdir. PV modüller genel olarak, belirli düzeylerde saflaştırılmış silisyum kristallerinden veya galyum, silisyum, indiyum, tellür, arsenit, kadmiyum, bakır, titanyum gibi elementlerin bileşikleriyle oluşturulan hücrelerin bir araya getirilmesiyle oluşmaktadır (Singh ve ark., 2021). PV modüller, üretimlerinde kullanılan materyal ve teknolojiye göre mono kristal silikon, poli kristal silikon ve ince film isimlerini almaktadır. Bir PV hücrenin en önemli parametresi, güneşten gelen ışınımı elektrik enerjisine dönüştürme yeteneğidir. Bu parametre, "hücre verimi" veya "enerji dönüştürme oranı" olarak ifade edilmektedir (Kayri & Gençoğlu, 2019). Hücre teknolojileri ile ilgili yapılan çalışmalarda, enerji dönüştürme oranı artırılmaya çalışılmakta ve elde edilen son başarımlar periyodik olarak araştırmacıların dikkatine sunulmaktadır. Çizelge 1'de 2021 itibarıyla ticari üretimi devam eden çeşitli PV hücreler için erişilen son hücre ve modül enerji dönüştürme oranları, açık devre gerilim değerleri ve PN jonksiyon bölgesinden geçen akım yoğunluğu değerleri sunulmuştur.

Çizelge 1. PV hücelere ilişkin hücre ve modül dönüştürme oranları (Green ve ark., 2021)

PV teknolojisi	Hücre verimi (%)	Modül verimi (%)	Hücre Voc (Volt)	Hücre Jsc (mA/cm ²)
Tek kristal silikon	26.7 ± %0.5	24.4 ± %0.5	0.7380	42.65
Çok kristal silikon	24.4 ± %0.3	20.4 ± %0.3	0.7132	41.47
Galyum arsenit	29.1 ± %0.6	25.1 ± %0.8	0.9940	23.20
Amorf silikon	14.0 ± %0.4	12.3 ± %0.3	1.9220	9.940
Kadmiyum tellür	21.0 ± %0.4	19.0 ± %0.9	0.8750	30.25
CIS/CIGS	23.35 ± %0.5	19.2 ± %0.5	0.7340	39.58

Hücre verimi, tek bir hücrenin yüzey alanına gelen güneş kaynaklı ışınımın elektrik enerjisine dönüştürülme oranını; modül verimi ise, bir araya gelmiş hücrelerin oluşturduğu toplam yüzey alanına gelen ışınımın elektrik enerjisine dönüştürülme oranını ifade etmektedir. Modül üzerine yerleştirilen hücreler arasındaki mesafe ve hücreler arasındaki elektriksel bağlantılarda oluşan kayıplar nedeniyle modül verimi, belli bir ölçüde hücre veriminden düşük değerdedir.

Çizelge 1 incelendiğinde, erişilen en yüksek modül veriminin %25.1 değeriyle GaAs ince film hücre teknolojisine ait olduğu görülmektedir. GaAs hücreleri, %24.4 ve %20.4 oranlarıyla sırasıyla mono kristal ve poli kristal silikon hücre teknolojileri takip etmektedir. GaAs hücreler, galyum elementinin doğadaki erişilebilir rezerv miktarı kısıtlı olduğundan, kristalize silikon hücelere göre oldukça yüksek maliyetlidirler (Li, 2012). Ancak yüksek maliyetine rağmen, yüksek sıcaklık değerlerinde bile kararlı çalışmasını sürdürebildiğinden, hem ışınım yoğunlaştırıcı mercek sistemleriyle (CPV) beraber kullanılarak verimleri daha da yükseltilebilmekte hem de çalışma koşulları gereği uzay uygulamalarında tercih edilen başlıca hücre teknolojilerindedir (Bradshaw ve ark., 2013; Schön ve ark., 2022; Zhang ve ark., 2022). Ticari olarak üretilen ve PV pazarlarında hâlihazırda kullanımda olan hücre teknolojileri bir arada değerlendirildiğinde, PV teknolojisi ile elektrik enerjisi üretiminin %54'ü poli kristal ve %30'u mono kristal olmak üzere toplam %84'ü kristalize silikon teknolojisi ile sağlanmaktadır (Ogbomo ve ark., 2017; Gorjian ve ark., 2021).

PV hücre teknolojilerine ilişkin enerji dönüştürme oranlarındaki süregelen değişim, yıllara göre genellikle küçük artışlar şeklinde gerçekleşmektedir. Örneğin 2021 yılında, erişilen enerji dönüştürme oranları mono kristal silikon hücre teknolojisi için %26.7 ve poli kristal silikon hücre teknolojisi için %24.4 iken, bu oranlar 2005 yılı için sırasıyla %24.7 ve %20.3 olarak kaydedilmiştir. Bu değerlere göre, bu alanda çalışmalar yürüten birçok Ar&Ge laboratuvarına rağmen, 16 yıllık zarfta mono kristal ve

poli kristal silikon hücre teknolojisinde, enerji dönüştürme oranı değeri üzerinden sırasıyla yaklaşık %8 ve %20'lik bir iyileşme kaydedilmiştir (Green ve ark., 2005 ve 2021). Enerji dönüştürme oranındaki artışın yıllara göre seyirindeki değişim trendi, ince film teknolojisi çatısı altında bulunan diğer hücre çeşitleri için de benzer şekilde gerçekleşmiştir. Bunun yanında PV hücre verimliliğindeki artışın son 20 yıllık seyri incelendiğinde, bu artışın gittikçe daha yüksek dirençle karşılaşarak ciddi sıçramalar yaşamadığı ve yıllara göre azalan bir değişimin söz konusu olduğu görülmektedir.

Esasen, üretilmiş ve kullanıma sunulmuş bir PV modülün enerji dönüştürme oranının artırılması imkânsız değildir. Çünkü modül üreticilerinin ürünlerine ilişkin sundukları katalog verilerindeki tüm değerler, Standart Test Koşulları olarak adlandırılan, 1000 W/m² global radyasyon, 25 °C işletme sıcaklığı ve 1.5 AM (air mass: hava kütlesi) değerlerine göre elde edilmektedir. PN jonksiyon bölgesindeki hücre sıcaklığının çeşitli aktif veya pasif soğutma yöntemleri kullanılarak kontrol altına alınmasıyla PV hücrelerin enerji dönüştürme oranını artırmak mümkündür ve bu alanda çeşitli teknikler ve yaklaşımlar kullanılarak gerçekleştirilmiş birçok araştırma mevcuttur (Bhakre ve ark., 2021; Kayri & Ayyıldız, 2021; Ramkiran ve ark., 2021; Aydın ve ark., 2022a ve 2022b).

PV sistemlerde, hücre enerji dönüştürme oranından bağımsız olarak modüllerden daha büyük enerji değerleri elde etmenin bir yolu da, PV modüllerin güneş takip sistemleri ile beraber kullanılmalarıdır. PV modüllerin yüzeyine gelen efektif ışınım miktarı, güneş geliş açısı ve modül yüzeyinin normali arasındaki açıya bağlı olarak kosinüs yasası esasına göre belirlenir. Modüllerin bu özellikleri gereğince, PV sistemlerin güneş izleyici sistemlerle beraber kullanılmasıyla, sabit açılı sistemlere göre oldukça yüksek enerji değerleri üretmeleri sağlanmaktadır. Güneş izleyici sistemlerin önemli bir başka avantajı, PV sistemlerin tesis edileceği noktadaki saha kullanım alanının sınırlı olması durumunda etkili bir çözüm sunabilmeleridir. Güneş izleyici sistemler, güneşi takip etmedeki eksen sayısına bağlı olarak, Doğu-Batı veya Güney-Kuzey olarak tek eksenli ve aynı anda hem Doğu-Batı hem de Güney-Kuzey yönünde izleme yapabilen iki eksenli izleyiciler olarak sınıflandırılmaktadır. Güneş izleyici sistemler, sağladıkları önemli faydaların yanında sistemin büyüklüğüne bağlı olarak kayda değer tesis maliyetleri ve bakım onarım giderleri oluşturabilmektedirler. İki eksenli güneş izleyicileri, barındırdıkları hareket mekanizmaları, bu mekanizmaları yöneten elektronik denetleyiciler ve çeşitli konstrüktif zorlukların doğurduğu tesis maliyetleri nedeniyle, özellikle büyük kurulu güçlere sahip PV santrallerinde genellikle tercih edilmemektedirler. Büyük kurulu güce sahip santrallerde izleyici sistemlerin tercih edilmemesinin başka bir sebebi de PV hücre fiyatlarının süreç içinde anlamlı şekilde azalmasıdır. Çünkü PV pazarının büyük çoğunluğunu kapsayan silikon esaslı hücrelerin 2010'daki birim fiyatı 2.36 USD/Watt seviyelerindeyken (Price ve ark., 2010), 2020'de 0.35 USD/Watt seviyelerine (Dehghanmadvar ve ark., 2022) kadar kayda değer bir düşüş yaşamıştır. Beklentiler, 2030'dan önce bu hücre fiyatlarının 0.18 USD/Watt seviyelerine kadar düşeceği yönündedir (Oberbeck ve ark., 2020). Güneş izleyici sistemler, küçük ve orta ölçekteki PV sistem uygulamalarında hâlâ yoğun şekilde kullanılmaktadır. Özellikle uygulama sahasında alanın sınırlı olması hâlinde PV sistem boyutunu değiştirmeden daha yüksek enerji miktarları elde etmek üzere tesis edilmiş küçük ve orta ölçekli sayısız PV güneş izleme sistemi mevcuttur.

Bir güneş izleyici sistemden genel olarak, doğruluk, kararlılık, süreklilik gibi özellikler beklenir. Bunların yanında, geri dönüş sürelerinin kabul edilebilir düzeyde olabilmesi için, tesis ve bakım-onarım maliyetlerinin düşük olması gerekmektedir. Güneş izleyici sistemler, bu amaçlara hizmet edecek şekilde, açık döngü yaklaşımların kullanıldığı mikrodenetleyici devrelerle gerçekleştirilebildiği gibi, ışık yoğunluğundan etkilenen devre elemanlarının kullanılmasıyla oluşturulan ve genel olarak sensörlü sistemler olarak adlandırılan kapalı döngü yaklaşımlarla da gerçekleştirilebilmektedir. Her iki yaklaşımda da, izleyici sistemin öz tüketim değerlerinin minimize ve PV sistem çıkış gücünün maksimize edilebilmesini amaçlayan yapay sinir ağları veya bulanık mantık tekniklerini kullanan optimizasyon algoritmaları kullanılabilir. Literatürde bu esaslar üzerine geliştirilmiş birçok güneş izleyici sistem tanıtılmaktadır. Ancak bu çalışmaların önemli bir kısmı (Visconti ve ark., 2015; Motahhir ve ark., 2019; Pawar ve ark., 2021), geliştirilen güneş izleyici sistemleri kontrol eden yazılımlar ve elektronik devreler üzerinde yoğunlaşırken, yine önemli bir kısmı (Proadhan ve ark., 2016; Du ve ark., 2021; Barbón ve ark., 2021; Xu ve ark., 2022), izleyici sistemlerin mekanik aksamı üzerinde yoğunlaşmaktadır. Bunlarla beraber, birçok araştırma "düşük maliyetli" güneş izleme sistemi çalışmalarını kapsayan önerilerden oluşmaktadır. Bu çalışmaların önemli bir kısmında (Gabe ve ark., 2017; Hammoumi ve ark., 2018; Putra ve ark., 2019; Jaafar ve Maarof, 2022), önerilen sistemlere ilişkin deneysel uygulamalar ya küçük boyutlu prototipler şeklinde gerçekleştirilmekte ya da önerilen sisteme

ait uygulama orta veya büyük boyutlu olmasına rağmen, orta ve uzun vadeli testlere tabi tutulmadığı, sadece kısa vadeli test sonuçlarının sunulmasıyla yetinildiği görülmektedir. Zaghba ve ark. (2022) yaptıkları çalışmada, yaz mevsiminde tek eksen izleyici sistemin sabit açılı sisteme göre günlük bazda %16 ila %23 arasında enerji kazancı sağlandığı belirtilmiştir. Kuttybay ve ark. (2020) temmuz ayı içinde yaptıkları 5 günlük çalışmanın sonuçlarına göre, önerilen tek eksen izleyici sistemin sabit açılı sisteme göre günlük bazda %37 ila %60 arasında, 5 günün kümülatif değerlerine göre ise %57 oranında verim artışı elde edildiği kaydedilmiştir.

Fotovoltaik sistemlerin uzun yıllar boyunca farklı atmosferik değişimlere maruz kalarak çalıştığı göz önüne alındığında, bu sistemlerle beraber kullanılan güneş takip sistemlerinin farklı hava durumları altında uzun vadeli testlere tabi tutulmaları en doğru yaklaşım olacaktır. Bu sayede, gerek mekanik sistemin çalışma ortamındaki fiziksel şartlara cevabı, gerekse mekanik sistemi yönetmek için kullanılan sensör ve denetleyicilerin farklı hava şartlarındaki davranışları değerlendirilerek, güneş izleyici sistemlerden beklenen doğruluk, kararlılık ve süreklilik fonksiyonları etkin bir şekilde ortaya konulmuş olacaktır.

Bu çalışmada, bu amaçla tek eksenli bir güneş takip sistemi tasarlanmış ve üretilmiştir. Güneş izleyici sistemin tasarımı esnasında karşılaşılan sorunlar ve geliştirilen çözümler ortaya konulmak üzere, uygulamanın sürücü devresi, sensör yapısı ve mekanik aksamıyla ilgili tüm detaylar açık bir şekilde belirtilmiştir. Önerilen güneş izleyici sistemin birçok farklı hava durumundaki enerji üretimi, sabit bir modül ile kıyaslanmış ve sonuçlar tablolar ve grafikler hâlinde sunularak tartışılmıştır. Uzun vadeli test sonuçlarına göre, gerçekleştirilen uygulamanın, doğruluk, kararlılık ve süreklilik özelliklerine sahip olduğu anlaşılmaktadır. Bununla beraber, tesis maliyetinin ve geri dönüş süresinin sistemin boyutuna ve kullanılacağı bölgenin meteorolojik rejimine göre değişebileceği öngörülmektedir. Önerilen güneş izleyici sistemin, araştırmacılarca yürütülen PV modüllerle ilgili deneysel çalışmalarda veya profesyonel amaçlı küçük ve orta kurulu güçlere sahip PV uygulamalarda etkili bir çözüm sunacağı düşünülmektedir.

2. Materyal ve Yöntem

PV sistemlerle ilgili yapılan deneysel çalışmalarda, deney ortamının yapıldığı ortamın harici kaynaklar tarafından gölgelenmemesi önemli bir husustur. Özellikle karşılaştırmalı deneylerde, karşılaştırılan modüllerin ürettikleri enerji değerleri arasında yakın veya uzak nesnelere kaynaklı kısmi veya tam gölgelenme durumları modüller üzerinde eşit seviyede oluşamayacağından, hatalı sonuçların elde edilmesi ihtimali yüksektir. Bu hususlar göz önüne alındığında, tek eksen güneş izleyici sistemle çalıştırılan PV modül, sabit açılı hareketsiz PV modül ve bu modüllerin ürettiği enerjiyi ve çeşitli atmosferik parametreleri ölçmeye yarayan sensörlerin ölçüm sonuçlarını kaydetmek üzere kullanılan data loggerı da içeren meteoroloji istasyonu, uzun vadede birbirini gölgelemeyecek pozisyonlarda yerleştirilmişlerdir.

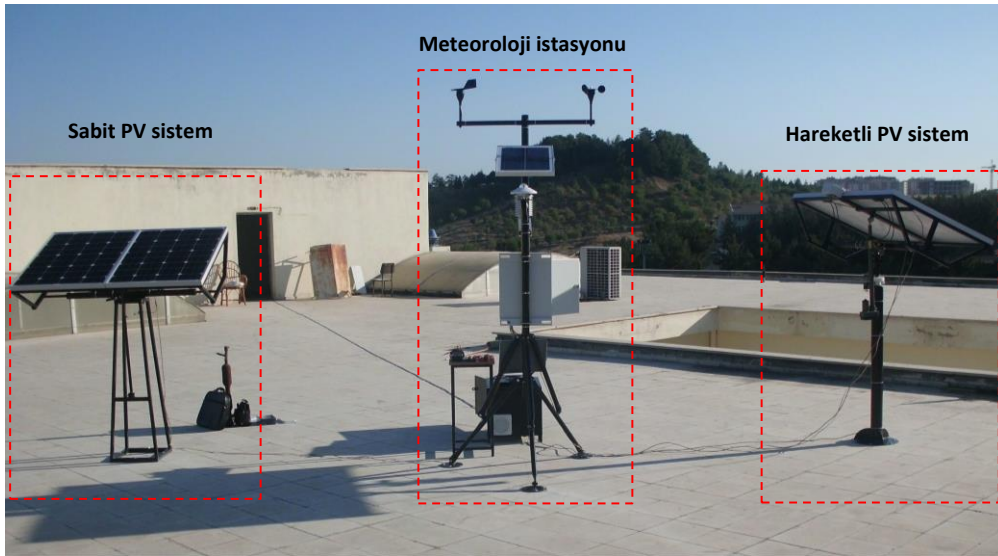


Şekil 2. Deneysel çalışmanın yapıldığı konumun uydu görüntüsü.

Deneyel çalışma, 37°54"12.11' Kuzey ve 41°07"46.71' Doğu koordinatlarında, Batman Üniversitesi merkez yerleşkesinde görece yüksek bir binanın çatı katında gerçekleştirilmiştir. Deney setinin uydu görüntüsü Şekil 2'de verilmiştir. Deney setinin konumu ile uzak gölgeleme unsuru olarak değerlendirilebilecek Doğu yönünde bulunan yapı arasında, 85 metre gibi yüksek bir mesafe ve 3 metre değerindeki düşük kot farkı dolayısıyla, seçilen konumun uzak gölgeleme unsurları açısından da çok iyi olduğu söylenebilir.

2.1. Deney setinin tanıtımı

Deney seti genel olarak 3 bileşenden oluşmaktadır. Bunlar, doğu-batı ekseninde hareket edebilen polar eksenli bir güneş izleyici sistemle çalışan hareketli PV modül, sabit açılı PV modül ve meteoroloji istasyonudur. Meteoroloji istasyonunda, global radyasyon değerini ölçmek üzere CMP6 piranometresi, hava sıcaklığını ve bağıl nem oranını ölçmek üzere HC2S3 probu, rüzgâr hızını ölçmek üzere 40C sensörü, rüzgâr yönünü ölçmek üzere 200P sensörü ve bu sensörlerden gelen verileri ve hareketli ve sabit PV modülün ürettiği güç değerlerini ölçmek ve kaydetmek üzere kullanılan CR1000 data loggerı bulunmaktadır. Bu tür çalışmalarda hassas sonuçların elde edilebilmesi için, meteoroloji istasyonunun ve güneş izleyici sistemin ihtiyaç duyduğu enerjinin, deneyel testler için kullanılan PV modüller tarafından karşılanmasından kaçınılmalıdır. Bu amaçla meteoroloji istasyonunun ihtiyaç duyduğu enerji, harici bir PV modülünün şarj regülatörü aracılığıyla şarj ettiği 10 AH kapasiteli bir akü tarafından; güneş izleyici sistemin zayıf ve kuvvetli akım ihtiyacı ise sistemin elektrik kesintileri durumunda da çalışmasını sürdürebilmesi için kesintisiz bir güç kaynağı üzerinden sağlanmıştır. Şekil 3'te deneyel çalışmanın temel bileşenleri olan sabit açılı PV modül, hareketli PV modül ve meteoroloji istasyonu gösterilmiştir.

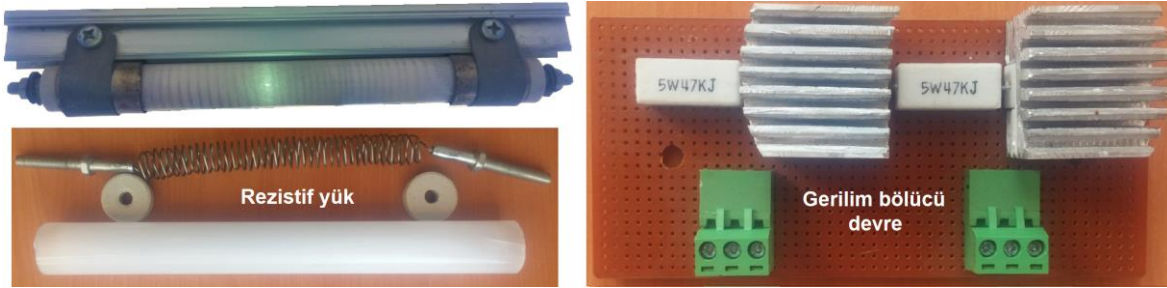


Şekil 3. Deneyel çalışmanın genel görüntüsü.

Deneyel çalışmada, kullanılan tüm sensörlerden elde edilen veriler kaydedilmişse de, güneş izleyici sistemle beraber çalışan PV modülün sabit açılı modüle göre üretilen enerji değerleri bakımından karşılaştırılabilmesi için, çalışma kapsamında sadece modüllerin ürettikleri güç değerleri ve piranometre tarafından ölçülen global radyasyon değeri kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Batman ilinde gündeğümü azimut açısı (γ_s), minimum değerini 21 aralık tarihinde 71.49° olarak, maksimum değerini ise 21 haziran tarihinde 110.95° olarak almaktadır. Güneş yükseklik açısı (α_s) ise, minimum değerini 21 aralık tarihinde 28.58° olarak, maksimum değerini ise 21 haziran tarihinde 75.07° olarak almaktadır. Batman ilinde güneşin 1 yıllık hareket rotası, bu sınırlar arasında değerler olarak gerçekleşmektedir. Tasarlanan izleyici sistemin güneşten gelen ışığın bütün açı değerlerine karşı tepkisinin değerlendirilebilmesi için testler 365 gün için yapılmıştır.

PV modüllerin ürettikleri enerjilerin ölçülmesine dair belirli bazı yaklaşımlar mevcuttur. Bunlardan biri, farklı şartlar altında işletilen modüllerin karşılaştırılmasına yönelik çalışmalarda

kullanılabilen açık devre gerilimi (V_{oc}) ve kısa devre akımlarının (I_{sc}) ölçülmesini içermektedir. Bu yaklaşımda elde edilen veriler, modüllerin ürettiği güç değerlerini yansıtmamakla beraber göreceli verim değişimi hakkında önemli bir bilgi sunmaktadır. Bir diğer yaklaşım, modüllerin ürettikleri enerjilerin mikro inverterler ile şebekeye basılması ve şebekeye aktarılan enerji değerlerinin karşılaştırılması şeklindedir. Bu yöntemde, modüllerin düşük ışınım altında ürettikleri gerilim değerlerinin, mikro inverterlerin çalışma gerilimi aralığının alt sınırından daha düşük olması hâlinde, üretilen enerjinin şebekeye basılamaması sorunu mevcuttur. Dolayısıyla bu yaklaşım, çok sayıda modülün seri bağlanmasıyla oluşturulan PV dizilerince üretilen enerjilerin karşılaştırılmasında tercih edilmektedir. PV modüllerin ürettiği enerjilerin karşılaştırılmasında kullanılan bir yaklaşım da, modüllerin elektriksel bir yükle yüklenmesi şeklindedir. Bu yöntemde bir maksimum güç noktası izleyici (MPPT) devresi bulunmadığından, modüllerin ürettiği enerji değeri net olarak yansıtılamayacak olsa da, karşılaştırmalı çalışmaların kapsamı gereğince tercih edilebilecek yöntemlerden biridir. Bu çalışmada modüllerin enerjilerinin ölçülebilmesi için maksimum ışınım altında 90 Wp güç üretebilen modüllerden bu gücün tümünü talep edebilecek direnç değerine sahip iki adet rezistif yük tasarlanmıştır. Bu yüklerin üzerindeki gerilim değerleri, modüllerin optimum işletme gerilimi (V_{mp}) gereğince 0 ila 18.2 Volt arasında değişecektir. Buna karşın kullanılan CR1000 data loggeri 0 ila 5 Volt arasındaki gerilimleri ölçebildiğinden, modüller ile data logger arasında bir gerilim bölücü devre tasarlanmıştır. Hesaplamalarda kullanılan gerçek gerilim değerleri ise gerilim bölücü devrenin dönüştürme katsayısı kullanılarak elde edilmiştir. Şekil 4'te tasarlanan rezistif yükler ve gerilim bölücü devre sunulmuştur.



Şekil 4. Tasarlanan rezistif yük ve gerilim bölücü devre.

Rezistif yüklerin tasarımında, direnç değerinin uzun vadede değişime uğramaması için, korozyona karşı dayanıklı krom nikel (CN80) alaşımli tel kullanılmıştır. Gerilim bölücü devrenin tasarımında, ısıya dayanıklı yüksek güçlü seramik dirençler kullanılmasına rağmen, oluşan ısının kolayca transfer edilebilmesi amacıyla dirençlerle azami yüzey teması sağlayacak biçimde alüminyum pasif soğutucular kullanılmıştır. Direnç yüzeyi ile pasif soğutucular arasındaki ısı transferini iyileştirmek üzere termal macun kullanılmıştır.

2.2. Mekanik tasarım

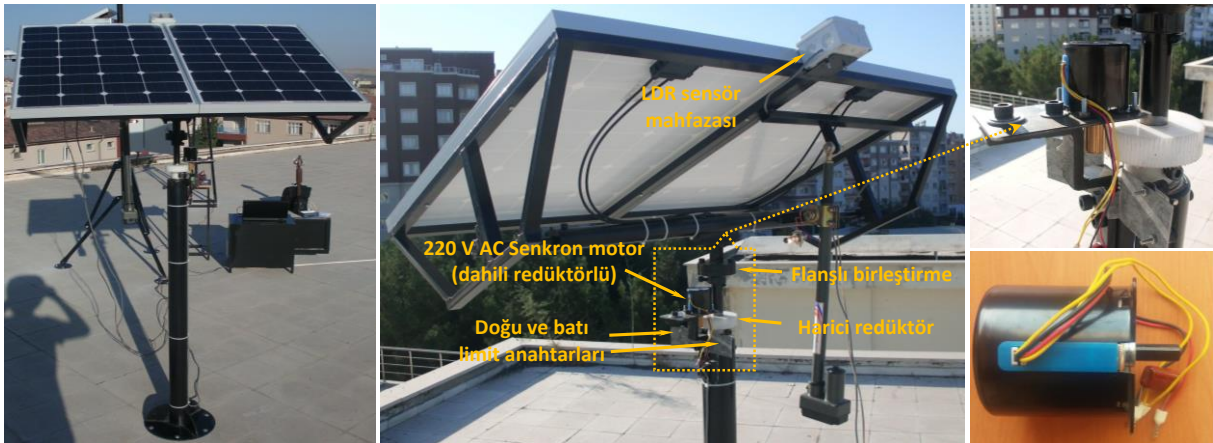
Güneş izleyici sistemin mekanik aksamı gerçekleştirilmeden önce, sistemi oluşturan bileşenler önce SolidWorks katı modelleme ve tasarım yazılımı ile 3 boyutlu olarak modellenmiş ve aynı yazılımın montaj modülü kullanarak bileşenlerin uyum içinde çalıştığı doğrulanmıştır. İzleyici sistemin tüm bileşenleri, çeşitli boyutlarda civata birleştirme elemanlarının kullanılmasıyla bir araya getirilebilecek biçimde modüler olarak üretilmiştir. Üretimde genel olarak çeşitli et kalınlığı ve boyutlarda boru, kare profil, dikdörtgen profil, lama ve L profil çelik malzemeler kullanılmıştır. PV modülleri ve modül taşıyıcıların ağırlığını taşıyan flanşlı yapının mili, ana platform içinde iki adet rulman ile yataklanmıştır. Bu sayede izleyici sistemin hareketi için küçük enerji miktarlarının yeterli olması sağlanmıştır. Hareketli mekanizma herhangi bir sınırlama ile karşılaşmadığı takdirde kendi etrafında 360° dönebilmektedir. Tipik bir güneş izleyici sistemden beklenen davranış ise, sistemin tesis edildiği bölgede güneşin bir yıl içinde izlediği rota değişimi ile uyum içinde hareket etmesidir. Bu amaçla mekanik aksamın hareketi, Batman iline ait gündoğumu azimut açısının maksimum değeri olan 110.95° değeri göz önünde bulundurularak, elektronik denetleyiciye gerekli bilgiyi göndermek için kullanılan doğu ve batı olmak üzere iki adet limit anahtarları ile sınırlandırılmıştır. Bu izleyici sistemin Batman ilinden farklı enlem açısına (θ) sahip bölgelerde kullanılması durumunda, sınır anahtarlarının, ilgili bölgenin maksimum

günderoğumu azimut açısı değerine göre konumlandırılması gerekmektedir. Güneş izleyici sistemin 3D katı modellemesinde kullanılan tüm bileşenler ölçeksiz olarak, bu bileşenlerle oluşturulan montaj görüntüsü ise ölçekli olarak Şekil 5'te sunulmuştur.



Şekil 5. Güneş izleyici sistemin 3D katı modeli.

Doğu-batı yönünde hareket eden güneş izleyici sisteme ilişkin üretilen sistem bileşenlerinin bir araya getirilerek tamamlanmış nihai görüntüleri Şekil 6'da çeşitli açılardan sunulmuştur. Tasarlanan sistemde, güney kuzey yönünde izleme yapmak üzere lineer aktüatör alt yapısı hazırlanmışsa da, çalışma kapsamında bu özellik kullanılmamıştır. Sistemin iki eksenli güneş izleyici olarak kullanılmak istenmesi durumunda, doğu-batı ve kuzey-güney yönünde izleme yapmak için bağımsız çalışan iki adet elektronik denetleme devresine ihtiyaç duyulacaktır. Bununla beraber, kuzey-güney yönündeki hareket için LDR sensör yapısı ve sınır anahtarları da bağımsız olarak tasarlanmalıdır.



Şekil 6. Güneş izleyici sistem bileşenleri ve montaj görüntüsü.

Güneş izleyici sistemin hareketi, 220 Volt, 14 Watt, 5 devir/dakika değerlerindeki bir senkron motor ile sağlanmıştır. Bu motorun milinde, düşük gücüne rağmen içinde bulunan dahili redüktör sayesinde 3.92 Nm tork üretilmektedir. Yapılan ön testlerde, motor gücünün sistem için yeterli olduğu,

ancak 5 devir/dakika değerindeki motor hızının sistemi istenilen hassasiyet aralıklarında hareket ettirmediği gözlemlenmiştir. Hem izleme hassasiyetinin iyileştirilmesi, hem de döndürme momentinin daha da artırılması için haricî bir redüktör sistemi tasarlanmıştır. Bu amaçla, motor çıkış mili ile hareket sistemi mili arasına yerleştirilen 12/62 oranında haricî bir redüktör sistemi üretilmiştir. Haricî redüktör sistemindeki küçük dişli pirinç, büyük dişli ise yüksek mukavemet ve düşük sürtünme katsayısı ile öne çıkan Delrin® (polioksümetilen) malzemeden üretilmiştir. Bu redüktör sayesinde motor hızı yaklaşık 5 kat azaltılarak, hareket sisteminin istenilen hassasiyete ulaştığı gözlemlenmiştir.

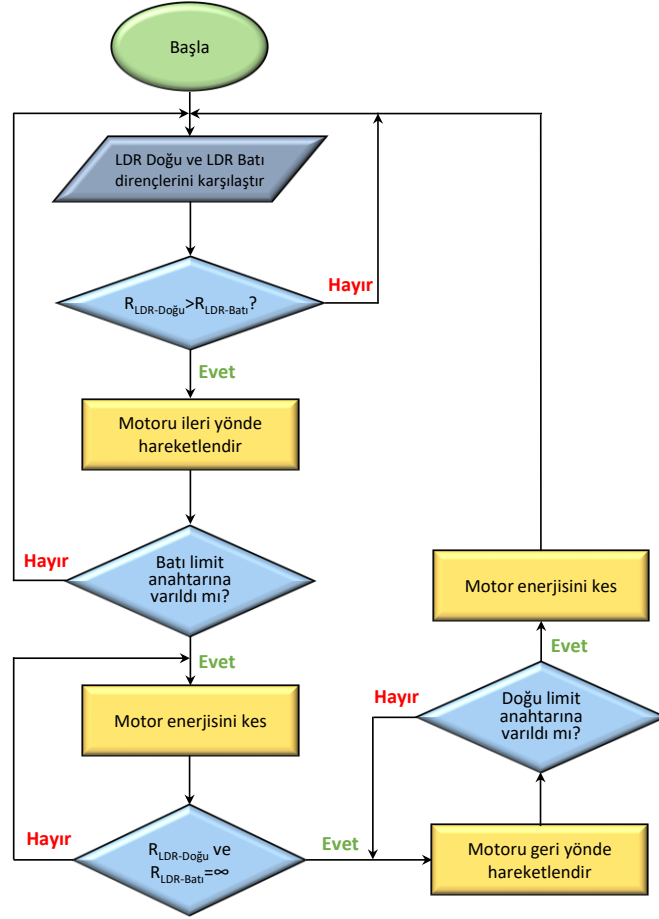
Tasarlanan güneş izleyici sistemde, güneşin anlık konumu takip edilmek üzere iki adet LDR komponenti kullanılmıştır. Işık miktarına bağlı olarak direnci değişen LDR'lerin bu özelliği temel alınarak kurgulanan elektronik denetleyici tarafından sürülen senkron motor sayesinde izleyici sisteme monte şeklindeki PV modüller gün boyunca güneşi izleyebilmektedir. Hassas bir izlemenin gerçekleşmesi için Şekil 6'da bulunan LDR sensör mahfazasının PV modüllerin doğu-batı doğrultusuna paralel tespit edilmesi gerekmektedir. "LDR doğu" ve "LDR batı" olarak adlandırılan devre elemanlarının özdeş olmasına dikkat edilmelidir. Özdeşlikleri, eşit şartlar altında gösterecekleri direnç değerlerinin birbirine çok yakın olmalarıyla test edilebilir. Bu elemanların montaj işleminde, mahfaza opak bir malzeme ile dikey olarak ikiye ayrıldıktan sonra, elemanların üst yüzeyi aynı düzlemde olacak şekilde ara elemana dayanmasına dikkat edilmelidir. Kullanılan sensör mahfazası açık hava şartlarında uzun vadede işletmede kalacağından dolayı, su ve toz geçirimine karşı dirençli (IEC 60529 – en az IP65) standartlarda olmasına dikkat edilmelidir. Güneş ışığının mahfaza içine homojen ve yansıma yapmayacak şekilde alınabilmesi için ön yüzeyde kullanılan camın düşük demir oranlı ve yansımayı engelleyen buzlu yapıdaki temperlenmiş özellikte olmasına dikkat edilmelidir. Bireysel kullanımlarda bu özelliklerde cam temin etmede sorunlar yaşanabilmektedir. Bu durumda, mahfazanın "LDR doğu" bölmesinde plastik iç cidarın mat bir boya ile kaplanması, ışık yansımalarını engelleyerek sistemin daha kararlı çalışmasını sağlayabilmektedir. Güneş izleyici sistemin hareket aralığını sınırlandırmak üzere kullanılan limit anahtarları, sistemin kullanılacağı bölgenin yıllık güneş açıları değerleriyle uyumlu olacak şekilde, açıları ayarlanabilen metal levhalar üzerine monte edilmişlerdir. LDR sensörlerinin mahfaza içindeki ve limit anahtarlarının metal levhalar üzerindeki yerleşimine ait görüntü Şekil 7'de sunulmuştur.



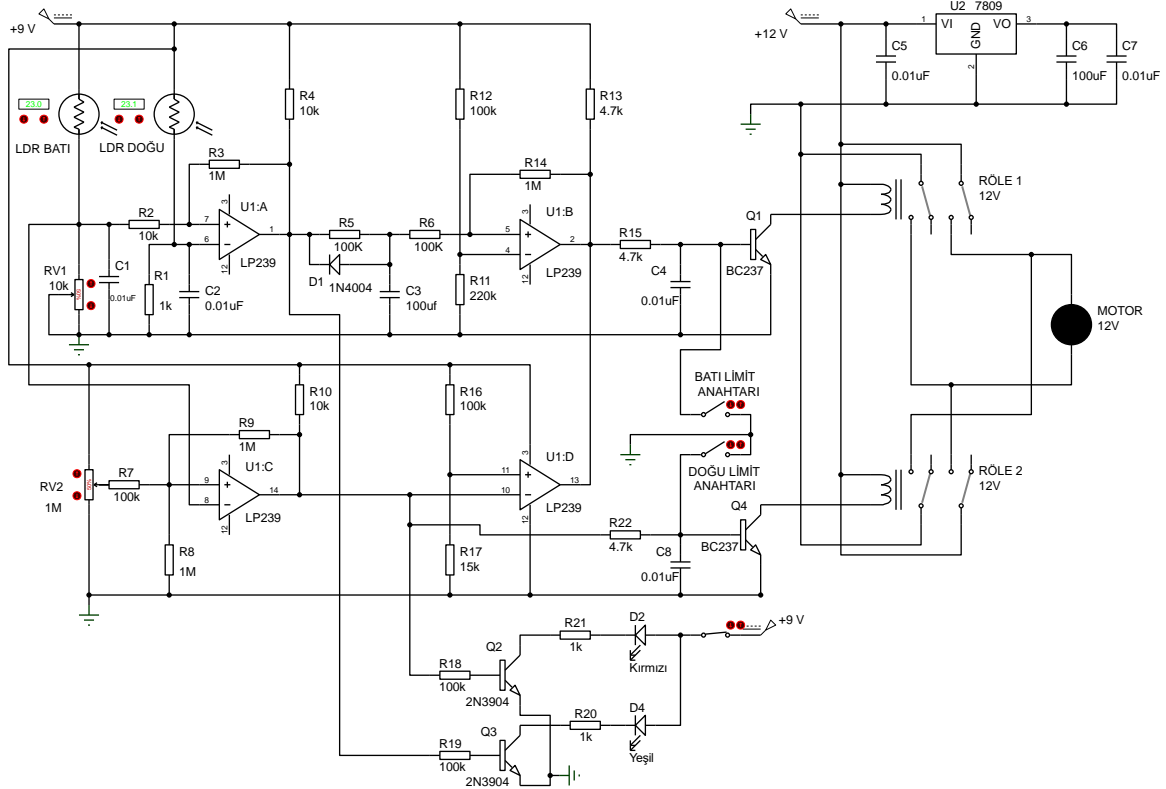
Şekil 7. LDR sensörlerinin ve sınır anahtarlarının yerleşim düzeni.

2.3. Denetleyici devrenin tasarımı

Güneş izleyici sistemin mekanik aksamını hareket ettiren elektrik motorunu işleyişe uygun şekilde kontrol etmek üzere elektronik bir denetleme devresi tasarlanmış ve üretilmiştir. Denetleyicinin tasarımı işlemsel yükselteçlerin karşılaştırmacı olarak kullanılması ilkesine dayanmaktadır. Çalışmada kullanılan elektronik denetleyici için, Gupta ve ark. (2012) tarafından önerilen Opamp karşılaştırma devresi temel alınmış olup devre üzerinde iyileştirmeler sağlanmıştır. Geliştirilen denetleyici devrenin üretimine geçilmeden önce, kararlılık testlerini gerçekleştirmek üzere Proteus 7.4 ISIS yazılımı ile simüle edilmiştir. Denetleyicinin çalışma algoritmasına ilişkin akış diyagramı Şekil 8'de, ISIS'te çizilen simülasyon devresi Şekil 9'da sunulmuştur.



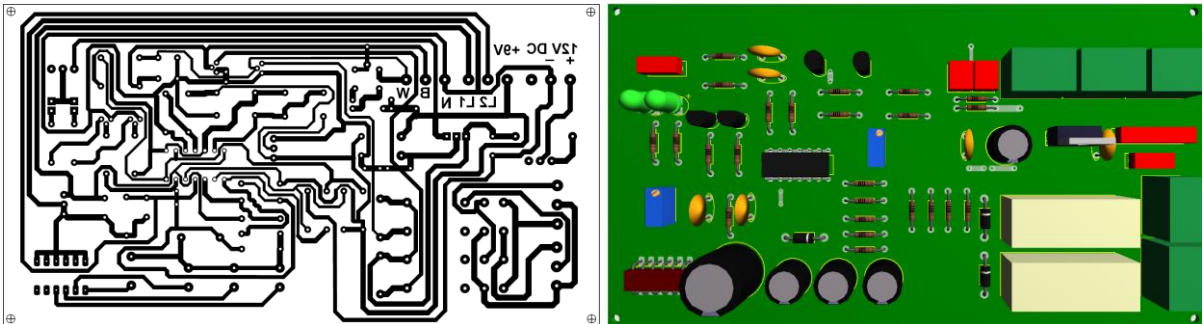
Şekil 8. Elektronik denetleyici algoritması akış diyagramı.



Şekil 9. Elektronik denetleyici devresi ISIS simülasyonu.

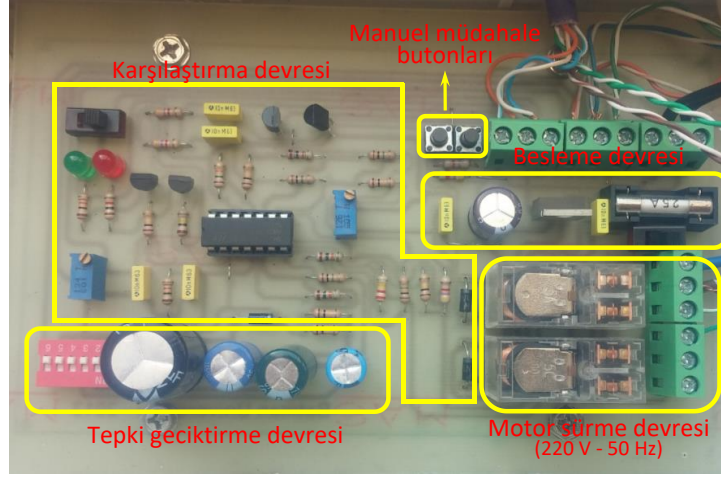
Simülasyon devresinde bulunan devre elemanlarının değerleri, denetleyicinin kararlı bir çalışma sunmasını sağlayacak şekilde tespit edilmiştir. Bu devrede U1:A opampı "LDR doğu" ve "LDR batı" sensörleri üzerindeki gerilimleri karşılaştırılmaktadır. Güneş batıya doğru hareket ederken LDR mahfazası içindeki ayırıcı aparat, "LDR doğu" sensörü üzerinde gölge oluşturarak direnç değerinin artmasına neden olacaktır. "LDR doğu" sensörü yüksek direnç değeri gösterdiğinde, R1 direnci üzerindeki gerilim RV1 potansiyometresi üzerine düşen gerilimden daha düşük değer olarak U1:A opampının pozitif çıkış gerilimi vermesini sağlayacaktır. Bu çıkış gerilimi C3 kondansatörünü şarj etmeye başlayacaktır. U1:B opampı C3 ile R21 elemanı üzerindeki gerilimi karşılaştırmaktadır. C3 kondansatörünün gerilim değeri R21 direncinin gerilim değerinden daha büyük olduğunda U1:B pozitif gerilim çıkışı vererek Q1 transistörünü ilettime götürmektedir. Q1 transistörü Röle 1'e enerji vererek motorun sistemi batı yönünde hareket ettirmesini sağlamaktadır. Motorun hareketi, mekanik sistemle beraber hareket eden LDR sensörlerinin eşit miktarda ışık almasıyla son bulmaktadır. Sistem bu şekilde gün boyunca hareket eden güneşi takip etmektedir. Hareketli mekanizmanın batı yönüne varmasıyla aktif olan "batı limit anahtarı" Q1 transistörünü kesime götürerek motorun enerjisini kesmektedir. U1:C opampı RV1 ile RV2 potansiyometreleri üzerindeki gerilimleri karşılaştırmaktadır. Ortam yeteri düzeyde karanlık olduğunda "LDR batı" sensörü büyük direnç değeri olarak RV2 geriliminin RV1 geriliminden büyük olmasını ve böylece U1:C opampının pozitif çıkış vermesini sağlamaktadır. U1:C opampının pozitif çıkış değeri Q4 transistörünü ilettime götürmektedir. Q4 transistörü Röle 2'ye enerji vererek motorun sistemi doğu yönünde hareket ettirmesini sağlamaktadır. Hareketli mekanizmanın doğu yönüne varmasıyla aktif olan "doğu limit anahtarı" Q4 transistörünü kesime götürerek motorun enerjisini kesmektedir. Sistem bu sayede sonraki gün çalışmak üzere doğru pozisyona gelmektedir. Kararlı bir çalışma için hareketli sistemin devreye ilk alınması sırasında LDR sensörlerinin kalibre edilmesi gerekmektedir. Kalibrasyon işlemini gerçekleştirmek için RV1 ve RV2 ayarlı dirençleri kullanılmıştır. RV1 direnci, LDR sensörlerinin gösterdiği direnç değerleri arasındaki farkın boyutuna bağlı olarak motoru süren rölenin devreye girme sıklığını tayin ederken, RV2 direnci, hareketli sistemin doğu limit anahtarına kadar getirilmesi işleminin hangi aydınlık düzeyinde gerçekleşeceğini belirlemek için kullanılmaktadır. Q2 ve Q3 transistörleri, kalibrasyon işlemi yapılırken, sistemin doğu ve batı yönündeki hareketini göstermek üzere sinyalizasyon amaçlı kullanılan D2 ve D4 diyotlarını sürmek için kullanılmıştır. Sistemin tesis edildiği yerde, havanın parçalı bulutlu olduğu zaman dilimlerinde, bulutların LDR sensörleri üzerinde oluşturacağı geçici ani gölgelendirmeler hâlinde sistemin hareket etmesi istenmez. Bu durumlarda sistemin tepkisini geciktirmek üzere bir RC devresi kullanılmıştır. Bu görevi yerine getirmek için R5 ve C3 elemanları kullanılmıştır. Sistem tepki süresinin ayarlanabilir bir yapıda olabilmesi için seçici anahtar ile bağımsız olarak devreye alınabilen dört adet kondansatör kullanılmıştır.

Simülasyon aşamasında kararlı hâle getirilen denetleyici devrenin baskı şemasının tasarımında Proteus (7.4) ARES yazılımı kullanılmıştır. Elemanların bakır plaket üzerindeki yerleşim düzeni, denetleyici devrenin fonksiyonlarına göre ayrı bölgelemlerde olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Baskılı devre şeması ve elemanların yerleşim düzeni Şekil 10'da sunulmuştur.



Şekil 10. Baskılı devre şeması ve elemanların yerleşim düzeni.

Üretilen denetleyici devrenin son görüntüsü ise Şekil 11'de sunulmuştur. Şekilde görülen elektronik kart, bu devrede bulunan ince bakır yolların uzun vadede korozyona uğramaması için kapalı bir mahfaza içine alınmıştır. Bu mahfazanın açık hava şartlarında işletilmesi durumunda su sızmasına karşı dirençli bir yapıya sahip olması gerekmektedir.



Şekil 11. Denetleyici devrenin tamamlanmış montaj görüntüsü.

Simülasyonda 12 Volt DC motor kullanılmışsa da, gerçekleştirilen devrede denetleyici beslemesinden bağımsız şekilde 220 Volt AC gerilim kullanılmıştır. Çalışma kapsamında, ihtiyaç duyulan bu enerji kesintisiz bir güç kaynağından karşılanmıştır. Bu sayede güneş izleyici sistemin, şehirde yaşanan elektrik kesintileri durumunda da çalışabilmesi sağlanmıştır.

Hareketli PV sisteminin ilk kurulumunda PV modüllerin tamamen güneşe yönlendirilmesi işleminin yapılması gerekmektedir. Bu işlemin yapılması, modül düzlemlerinin belli bir ölçüde güneşe yönlendirilmiş olmasını gerektirir. Bu durumda denetleyici kart üzerinde bulunan ve motoru ileri ve geri yönde çalıştıran transistörleri doğrudan sürebilecek şekilde tasarlanmış manuel müdahale butonlarından faydalanılmalıdır.

Yapılan çalışmada senkron veya asenkron motor kullanılması durumunda motorun ileri ve geri yönde hareketinin sağlanmasında motor sürme devresindeki röle bağlantıları doğru kurgulanmalıdır. DC motorların devir yönünün değiştirilmesi için gerilim polarizasyonunun değiştirilmesi yeterliyken AC senkron motorların devir yönünün değiştirilmesi işleminde üretici tarafından sağlanan bağlantı şeması dikkate alınmalıdır.

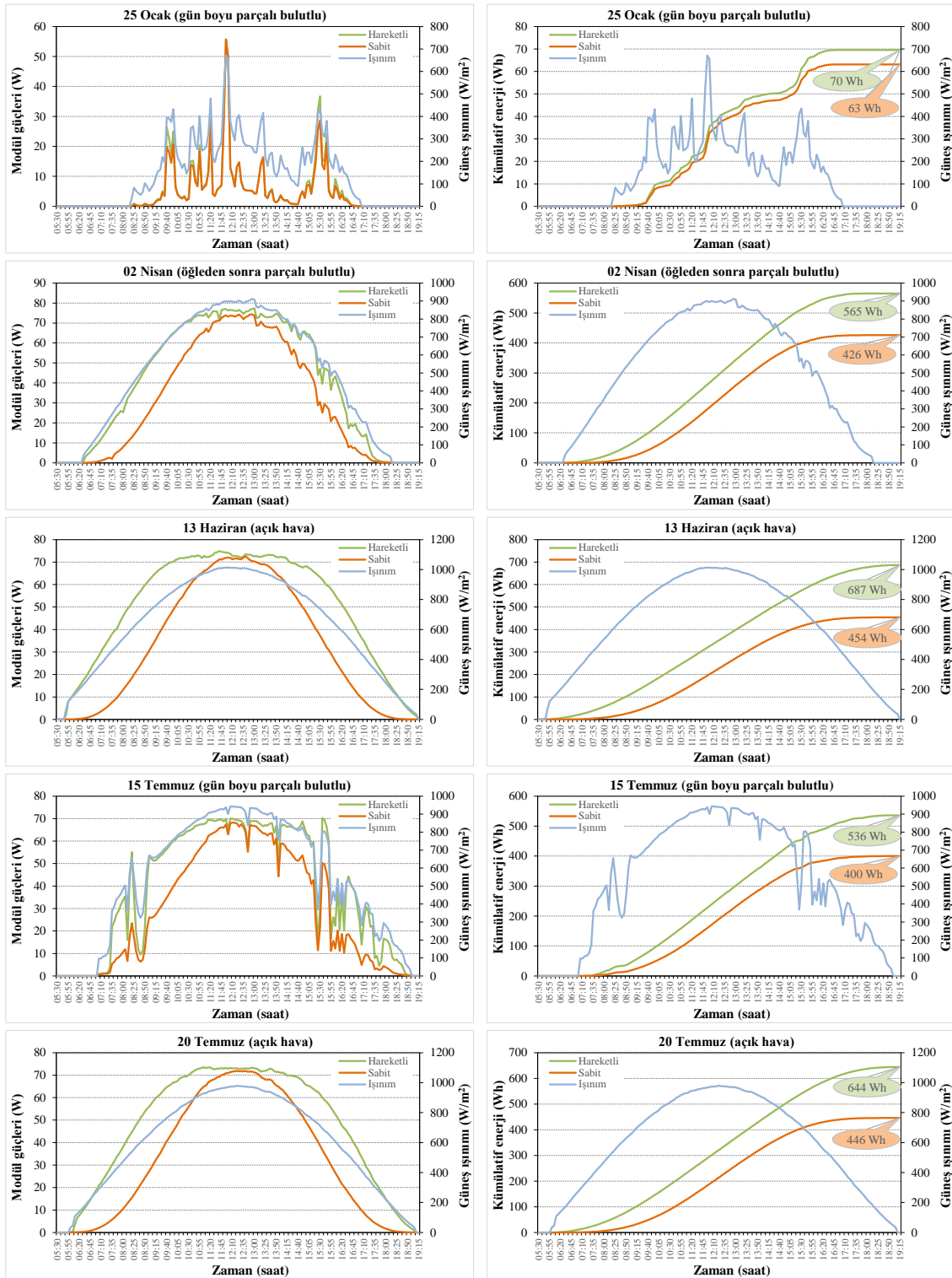
3. Bulgular ve Tartışma

PV sistemlerin, uzun yıllar boyunca açık hava şartlarında işletmede kalabilen yapıları gereği, hem konstrüktif hem de elektriksel kontrol yapıları açısından yeterli ekonomik ömre sahip olmaları gerekmektedir. Bununla beraber özellikle hareketli PV sistemlerinde, sağladığı görece büyük enerji miktarları dolayısıyla tercih edilen güneş izleme sistemlerinin doğurduğu ek maliyetler düşünüldüğünde, geri dönüş süresi de planlanması gereken parametreler arasındadır. Güneş izleyici sistemlerin kullanıldığı PV sistemlerde geri dönüş süresinin kabul edilebilir düzeyde olmasının sağlanabilmesi için, güneş izleme özelliğinin kararlı çalışması son derece önemlidir. Bir PV sistemin kararlılığı doğruluk, hassasiyet ve süreklilik olarak özetlenebilecek fonksiyonların test edilmesiyle mümkün olabilir. Bu fonksiyonlardan doğruluk ve hassasiyet kısa vadeli, süreklilik fonksiyonu ise ancak uzun vadeli testler sonucunda değerlendirilebilmektedir.

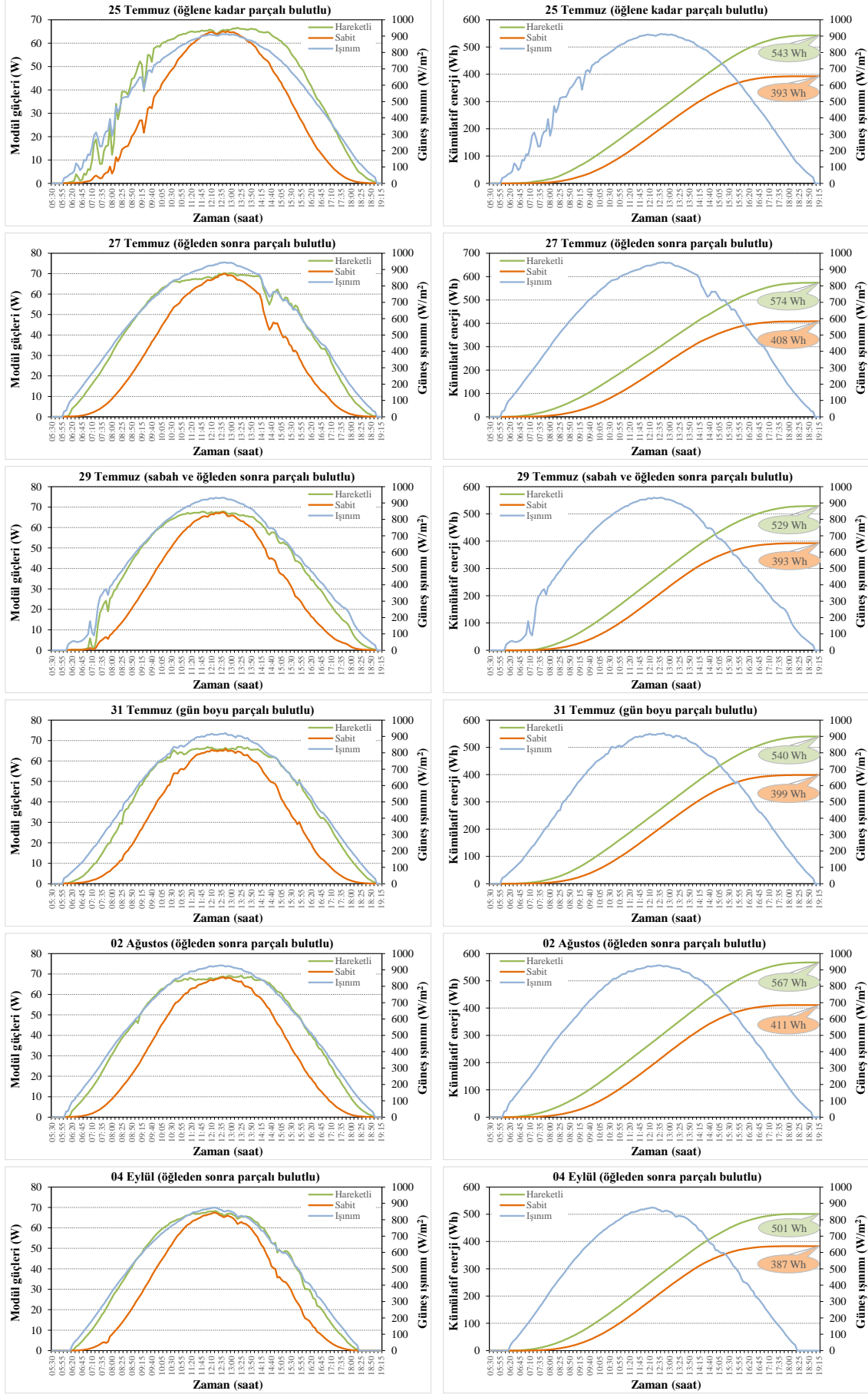
3.1. Bulgular

Deneyisel çalışma tüm bileşenleriyle, konumu ve çevresel özellikleri daha önce belirtilen lokasyonda zemine tespit edilerek tesis edilmiştir. Öncelikle havanın açık olduğu bir günde doğruluk ve hassasiyet testleri gerçekleştirilmiştir. RV1 ayarlı direnci aracılığıyla, PV modül düzlemlerinin güneşe yönlendirilmesi sağlanabilmiştir. Gün boyunca yapılan gözlemler sonucunda, modüllerin güneşi yüksek bir doğruluk ve hassasiyetle izlediği ve günün sonunda sınır anahtarına temas sağlandığında sistemin bekleme moduna geçtiği görülmüştür. Güneş battıktan sonra, aydınlık düzeyi yeterli miktarda düştüğünde RV2 direncinin ayarlanmasıyla sistemin bir sonraki gün için doğruya yönlendiği ve doğu sınır anahtarına temas ederek durduğu görülmüştür. Hareketli PV sistemin süreklilik testlerinin

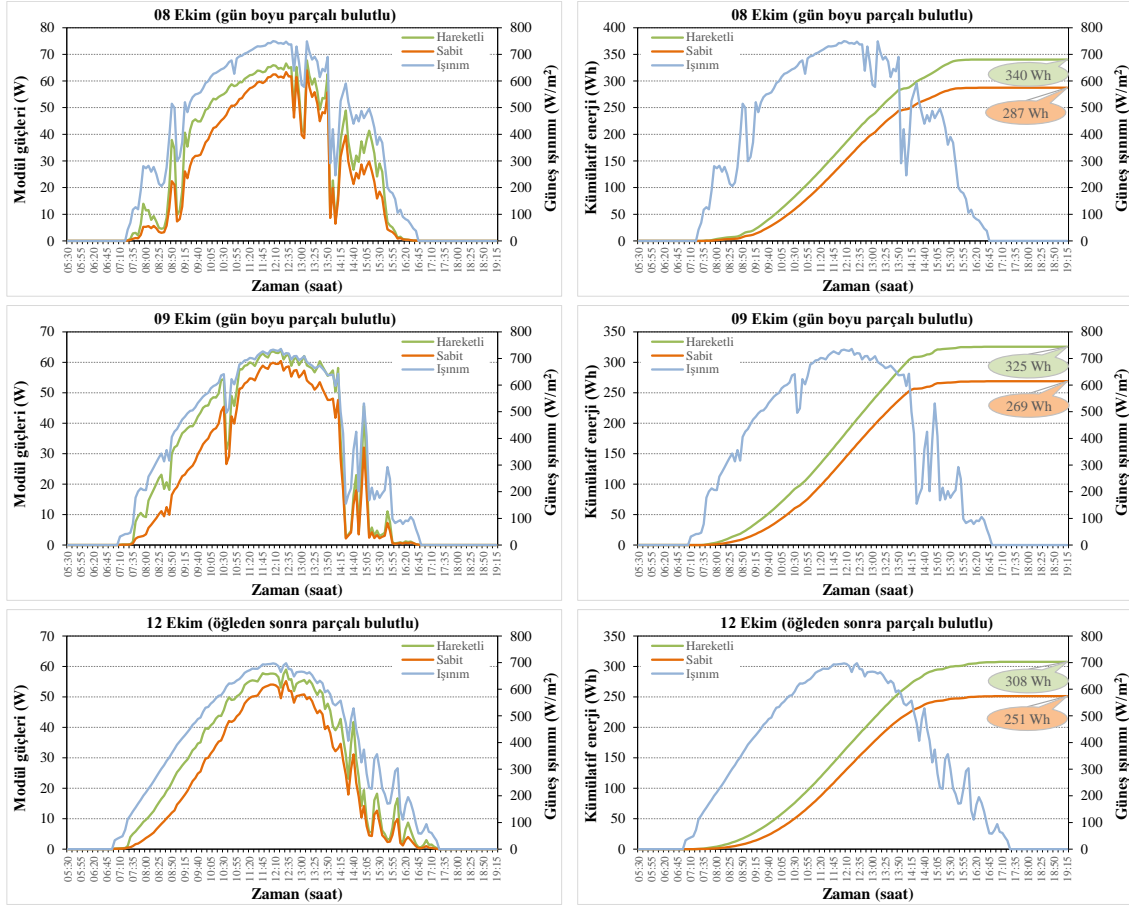
değerlendirilmesi için deney düzeneği 365 gün boyunca çalıştırılmış ve hem sabit hem de hareketli modülün üretim değerleri global radyasyon miktarı ile beraber kaydedilmiştir. Şekil 12’de çeşitli tarihlerde ve farklı hava durumlarında elde edilen modül güçleri ve kümülatif enerji değerleri karşılaştırmalı olarak 14 gün için sunulmuştur.



Şekil 12. Farklı hava durumlarında modül güçleri ve kümülatif enerjilerin karşılaştırılması.



Şekil 12. Farklı hava durumlarında modül güçleri ve kümülatif enerjilerin karşılaştırılması (devam).



Şekil 12. Farklı hava durumlarında modül güçleri ve kümülatif enerjilerin karşılaştırılması (devam).

Şekil 12’de aynı zamanda, örnek olarak ele alınan günlerde, modüller tarafından üretilen günlük bazda enerji değerlerinin kümülatif değişimi de hesaplanmıştır. Bu sayede hareketli modüle, sabit modüle göre sağlanan verim artış oranları tespit edilmiştir. 14 güne ait kümülatif enerji değerleri ve buna bağlı gelişen verim artış oranları Çizelge 2’de sunulmuştur.

Çizelge 2. Hareketli ve sabit PV modüllerin günlük enerji üretimleri

Günler	Ortalama güneş ışınımı (kW/m ²)	Günlük kümülatif enerji (Wh)		
		Hareketli modül	Sabit modül	Verimlilik artışı
25 Ocak	231	70	63	% 11
02 Nisan	572	565	426	% 32
13 Haziran	647	687	454	% 51
15 Temmuz	620	536	400	% 34
20 Temmuz	617	644	446	% 44
25 Temmuz	566	543	393	% 38
27 Temmuz	581	574	408	% 41
29 Temmuz	562	529	393	% 35
31 Temmuz	565	540	399	% 35
02 Ağustos	580	567	411	% 38
04 Eylül	539	501	397	% 26
08 Ekim	480	340	287	% 19
09 Ekim	445	325	269	% 21
12 Ekim	418	308	251	% 23

3.2. Tartışma

Güneş izleyici sistemler genel olarak, hava durumunun tamamen açık olduğu günlerde izleme işlemini başarılı bir şekilde yapmaktadırlar. Ancak havanın parçalı bulutlu olması durumunda, LDR sensörleri üzerine gelen ışınım değerindeki değişimlerin denetleyici devre tarafından hatalı yorumlanması, güneş açısının hatalı takip edilmesine yol açabilmektedir. Bundan dolayı Şekil 12’de, hareketli sistemin güneş izlemedeki başarımı "açık hava", "gün boyu parçalı bulutlu", "öğlene kadar parçalı bulutlu", "öğleden sonra parçalı bulutlu" ve "sabah ve öğleden sonra parçalı bulutlu" şeklinde tasnif edilen, bulutluluk düzeyi ve oranı farklı birçok hava durumu için gösterilmiştir. Grafiklerde, sabit ve hareketli modüllerin güç değerleriyle beraber global radyasyon değeri de eş zamanlı olarak sunulmuştur. Gerek örnek olarak sunulan günlerde gerekse yılın geri kalan tüm günlerinde tasarlanan sistemin güneşi başarılı bir şekilde izlediği görülmüştür. Tamamen açık, gün boyu parçalı bulutlu veya günün belirli saatlerinde bulutluluk yaşanan tüm farklı hava durumlarında, hem sabit modül hem de hareketli modül global radyasyon değişimine benzer bir değişim formu göstererek enerji üretmişlerdir. Güneş izleyici sistem tüm farklı hava durumlarında, sabit modüle göre belli oranlarda daha yüksek enerji üreterek ve bu özelliği 1 yıl boyunca süren tüm farklı güneş geliş açıları için sağlayarak, süreklilik fonksiyonu testinde de başarı kaydetmiştir.

Testlerin yürütüldüğü bir yıllık süre içinde 55 kez farklı yönlerden esen 6 m/s ve üzerinde rüzgâr meydana gelmiştir. Test sürecinde en yüksek rüzgâr hızı 3 mart gününde 7.446 m/s olarak kaydedilmiştir. Farklı yön ve hızlarda meydana gelen bu rüzgârlı hava durumlarında bile çalışmasını kararlı bir şekilde sürdüren sistemin, mekanik ve konstrüktif açıdan da iyi bir tasarıma sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Tasarlanan sistemde veriler bir yıl için kaydedilmişse de, sistemin çalışması 3 yıl boyunca gözlemlenmiştir. Batman gibi, gece gündüz arasındaki sıcaklık farkının yüksek ve yaz aylarının oldukça sıcak seyrettiği bir ilde, 3 yılın sonunda bile denetleyici kartın ve hareketli mekanizmanın çalışmaya devam ettiği görülmüştür. Ancak haricî redüksiyon sistemi için Delrin® malzemeden üretilen büyük dişlinin yüzeyinde küçük çaplı deformasyonlar tespit edilmiştir. Deney kapsamında ekonomikliği sebebiyle tercih edilen bu malzemenin, hava sıcaklığının Batman iline göre düşük seyrettiği bölgelerde daha uzun bir ömre sahip olacağı öngörülse de, genel bir çözüm olarak bu dişlinin de pirinç veya paslanmaya karşı dirençli çelik malzemeden üretilmesi tercih edilebilir. Yaz aylarının serin seyrettiği coğrafyalarda ise, sistem boyutundan kaynaklı mekanik zorlanmalara cevap verebilmesi şartıyla, sertlik, kayganlık ve boyutsal kararlılığa sahip çeşitli kompozit malzemeler kullanılabilir.

Farklı bulutluluk düzeylerine göre sınıflandırılmış ve buna bağlı gelişen farklı ortalama güneş ışınımı miktarlarına sahip 14 gün için, güneş izleyici sistemle beraber kullanılan hareketli modülün sabit açılı modüle göre belirli oranlarda verim artışı sağladığı görülmektedir. Ortalama güneş ışınımı ile verimlilik artışı arasında yakın bir ilişki bulunsa da, bulutların PV düzleminde oluşturduğu gölgelemenin etki düzeyinin ve güneşlenme süresinin de verim artışı üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Örneğin, 13 haziran ve 20 temmuz günlerinde günlük ortalama global radyasyon değerleri sırasıyla 647 ve 617 W/m² iken bu günler içinde sabit modül tarafından sırasıyla 454 ve 446 Wh, hareketli modül tarafından ise sırasıyla 687 ve 644 Wh enerji üretilmiştir. Bu iki tarihte, ortalama güneş ışınımı ile sabit modül tarafından üretilen enerji değerleri arasında bir uyum mevcutken, hareketli modülün 13 haziranda 20 temmuza göre anlamlı şekilde yüksek enerji üretmesi, güneşlenme süresinin bir sonucu olarak güneşin doğuş ve batış açılarının 13 haziranda daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Çizelge 2’de verilen örnek günlerde, en düşük verim artışı 25 ocak tarihinde %11 olarak gerçekleşmiştir. 25 ocak tarihinde global radyasyonun değişim seyri incelendiğinde, havanın gün boyu yoğun bulutlu olduğu görülmektedir ve bugüne ait ortalama ışınım miktarı 231 W/m² olarak ölçülmüştür. Yapılan bir yıllık ölçüm sonuçları bir arada değerlendirildiğinde, güneşi doğu-batı yönünde izleyen PV sistemin sabit açılı PV sisteme göre %30.84 oranında verim artışı sağladığı kaydedilmiştir.

4. Sonuç

PV sistemlerin ana bileşenlerinden biri olan modüllerin enerji dönüştürme oranı, kendilerini oluşturan hücrelerin üretim teknolojisi ile ilgilidir. Ancak bir modülden daha büyük enerji değerleri elde etmenin dolaylı yolları mevcuttur. Bunlardan biri, PV modüllerin güneş takip sistemleri ile beraber kullanılmalarıdır.

Bir güneş izleyici sistemin genel olarak, doğruluk, kararlılık, süreklilik gibi fonksiyonları yerine getirmesi beklenir. Bunların yanında, geri dönüş sürelerinin kabul edilebilir düzeyde olabilmesi için, tesis ve bakım-onarım maliyetlerinin düşük olması gerekmektedir. PV sistemlerin uzun yıllar boyunca farklı atmosferik şartlar altında işletmede kaldığı düşünüldüğünde, bu sistemlerle beraber kullanılan güneş izleyici sistemlerin kararlılığının test edilebilmesi için, farklı hava durumları altında uzun vadeli testlere tabi tutulmaları gerekmektedir. Bu amaçla bu çalışmada, tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen doğu-batı yönünde hareket edebilen güneş izleyici sistem, uzun vadeli testlere tabi tutulmuştur. Önerilen güneş izleyici sistemin tasarımı ve üretimi sırasında karşılaşılan sorunlar ve geliştirilen çözümler ortaya konulmak üzere, uygulamanın sürücü devresi, sensör yapısı ve mekanik aksamıyla ilgili tüm detaylar açık bir şekilde belirtilmiştir.

Önerilen güneş izleyici sistemin birçok farklı hava durumundaki enerji üretimi, sabit açılı bir modül ile kıyaslanmış ve sonuçlar tablolar ve grafikler hâlinde sunularak tartışılmıştır. Uzun vadeli test sonuçlarına göre, gerçekleştirilen uygulamanın doğruluk, kararlılık ve süreklilik fonksiyonlarını yerine getirdiği anlaşılmıştır. Bununla beraber, tesis maliyetinin ve geri dönüş süresinin sistemin boyutuna ve kullanılacağı bölgenin meteorolojik rejimine göre değişebileceği söylenebilir.

Deney seti, hiçbir bakım gerektirmeden 3 yıl boyunca Batman iklim şartlarında işletmede kalabilmiştir. 3 yılın sonunda, deney setinin mekanik tasarımında kullanılan haricî redüksiyon sistemi için Delrin® malzemeden üretilen büyük dişlinin yüzeyinde küçük çaplı deformasyonlar tespit edilmiştir. Deneysel çalışma kapsamında ekonomik bir çözüm olarak tercih edilen bu malzemenin, hava sıcaklığının görece düşük seyrettiği bölgelerde daha uzun bir ekonomik ömre sahip olacağı öngörülsede, genel bir çözüm olarak bu dişlinin de pirinç malzemeden üretilmesi tercih edilebilir.

Güneş izleyici sistem sayesinde günlük bazda elde edilen verim artışları arasında farklılıklar görülmektedir. Bununla beraber, yapılan bir yıllık ölçüm sonuçları bir arada değerlendirildiğinde, güneşi doğu-batı yönünde izleyen modülün sabit açılı modüle göre %30.84 oranında verim artışı sağladığı kaydedilmiştir.

Önerilen güneş izleyici sistemin, araştırmacılarca yürütülen PV modüllerle ilgili deneysel çalışmalarda veya profesyonel amaçlı küçük ve orta kurulu güçlere sahip PV uygulamalarında etkili bir model olacağı düşünülmektedir. Bununla beraber önerilen modelin sahip olduğu hassasiyet dolayısıyla, heliostat ve parabolik yansıtıcıların kullanıldığı termal uygulamalar için de etkili çözümler sunacağı düşünülmektedir. Ancak, heliostat ve parabolik yansıtıcılarla güneş ışığının belirli bir noktada odaklanması esasına dayanan termal sistemlerde son derece hassas izleyicilere ihtiyaç duyulmaktadır. Önerilen güneş izleyici modelin bu tür sistemlerdeki başarımının ölçülmesi ve ihtiyaç duyulması halinde hassasiyetinin iyileştirilmesi, sonraki çalışmaların konusu olarak ele alınmalıdır.

Kaynakça

- Aydın, A., Kayri, İ., & Aydın, H. (2022a). Determination of the performance improvement of a PV/T hybrid system with a novel inner plate-finned collective cooling with Al₂O₃ nanofluid. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 44(4), 9663-9681. doi:10.1080/15567036.2022.2136801
- Aydın, A., Kayri, İ., & Aydın, H. (2022b, October). *The Effects of TiO₂ Nanofluid on Efficiency and Heat Transfer Indicators of an Inner-Plate Finned Collective Cooling in a PV/T Hybrid System*. 2022 Global Energy Conference (GEC), Batman, Türkiye. doi:10.1109/GEC55014.2022.9986908
- Barbón, A., Fernández-Rubiera, J. A., Martínez-Valledor, L., Pérez-Fernández, A., & Bayón, L. (2021). Design and construction of a solar tracking system for small-scale linear Fresnel reflector with three movements. *Applied Energy*, 285, 116477. doi:10.1016/j.apenergy.2021.116477
- Bhakre, S. S., Sawarkar, P. D., & Kalamkar, V. R. (2021). Performance evaluation of PV panel surfaces exposed to hydraulic cooling—A review. *Solar Energy*, 224, 1193-1209. doi:10.1016/j.solener.2021.06.083
- Bradshaw, A. M., Reuter, B., & Hamacher, T. (2013). The potential scarcity of rare elements for the Energiewende. *Green*, 3(2), 93-111. doi:10.1515/green-2013-0014
- Dehghanimadvar, M., Egan, R., & Chang, N. L. (2022). Economic assessment of local solar module assembly in a global market. *Cell Reports Physical Science*, 3(2), 100747. doi:10.1016/j.xcrp.2022.100747

- Du, X., Li, Y., Wang, P., Ma, Z., Li, D., & Wu, C. (2021). Design and optimization of solar tracker with U-PRU-PUS parallel mechanism. *Mechanism and Machine Theory*, 155, 104107. doi:10.1016/j.mechmachtheory.2020.104107
- Fayaz, H., Khan, S. A., Saleel, C. A., Shaik, S., Yusuf, A. A., Veza, I., ... & Alarifi, I. M. (2022). Developments in nanoparticles enhanced biofuels and solar energy in Malaysian perspective: A Review of state of the art. *Journal of Nanomaterials*, 2022, 809157. doi:10.1155/2022/8091576
- Gabe, I. J., Bühler, A., Chesini, D., & Frosi, F. (2017, April). *Design and implementation of a low-cost dual-axes autonomous solar tracker*. 2017 IEEE 8th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG). doi:10.1109/PEDG.2017.7972522
- Gorjian, S., Ebadi, H., Trommsdorff, M., Sharon, H., Demant, M., & Schindele, S. (2021). The advent of modern solar-powered electric agricultural machinery: A solution for sustainable farm operations. *Journal of Cleaner Production*, 292, 126030. doi:10.1016/j.jclepro.2021.126030
- Green, M. A., Emery, K., King, D. L., Igari, S., & Warta, W. (2005). Solar cell efficiency tables (version 25). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 13(1), 49-54. doi:10.1002/pip.598
- Green, M., Dunlop, E., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., Kopidakis, N., & Hao, X. (2021). Solar cell efficiency tables (version 57). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 29(1), 3-15. doi:10.1002/pip.3371
- Gupta, S., Kalika, S., & Luisito, R. C. (2012). Maximum power point tracking for solar PV system. *Applied Mechanics and Materials*, 110, 2034-2037. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.110-116.2034
- Hammoumi, A. E., Motahhir, S., Ghzizal, A. E., Chalh, A., & Derouich, A. (2018). A simple and low-cost active dual-axis solar tracker. *Energy Science & Engineering*, 6(5), 607-620. doi:10.1002/ese3.236
- International Energy Agency. (2021). IEA key world energy statistics 2021. <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021/supply> Erişim tarihi: 03.02.2023
- Jaafar, S. S., & Maarof, H. A. (2022). influence of micro-controller-based single axis solar tracker system on solar panel's performance: Case study. *The NTU Journal of Renewable Energy*, 3(1), 33-43. doi:10.56286/ntujre.v3i1.347
- Kayri, I., & Gencoglu, M. T. (2019). Predicting power production from a photovoltaic panel through artificial neural networks using atmospheric indicators. *Neural Computing and Applications*, 31, 3573-3586. doi:10.1007/s00521-017-3271-6
- Kayri, İ., & Ayyıldız, S. (2021, Kasım). *Fotovoltaik sistemlerde hücre sıcaklığının panel verimi üzerindeki etkisinin deneysel olarak araştırılması*. Uluslararası Mühendislik, Doğa ve Sosyal Bilimler Sempozyumu (ISENS-21), Batman, Türkiye.
- Kuttybay, N., Saymbetov, A., Mekhilef, S., Nurgaliyev, M., Tukymbekov, D., Dosymbetova, G., ... & Svanbayev, Y. (2020). Optimized single-axis schedule solar tracker in different weather conditions. *Energies*, 13(19), 5226. doi:10.3390/en13195226
- Li, S. S. (2012). *Semiconductor Physical Electronics*. New York, USA: Springer Science & Business Media.
- Motahhir, S., Hammoumi, A. E., Ghzizal, A. E., & Derouich, A. (2019). Open hardware/software test bench for solar tracker with virtual instrumentation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 31, 9-16. doi:10.1016/j.seta.2018.11.003
- Oberbeck, L., Alvino, K., Goraya, B., & Jubault, M. (2020). IPVF's PV technology vision for 2030. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 28(11), 1207-1214. doi:10.1002/pip.3305
- Ogbomo, O. O., Amalu, E. H., Ekere, N. N., & Olagbegi, P. O. (2017). A review of photovoltaic module technologies for increased performance in tropical climate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 1225-1238. doi:10.1016/j.rser.2016.11.109
- Pawar, P., Pawale, P., Nagthane, T., Thakre, M., & Jangale, N. (2021). Performance enhancement of dual axis solar tracker system for solar panels using proteus ISIS 7.6 software package. *Global Transitions Proceedings*, 2(2), 455-460. doi:10.1016/j.glt.2021.08.049
- Price, S., Margolis, R., Barbose, G., Bartlett, J., Cory, K., Couture, T., ... & James, T. (2010). *2008 solar technologies market report (No. LBNL-3490E)*. Berkeley, CA, USA: Lawrence Berkeley National Lab. (LBNL). doi:10.2172/983330

- Prodhan, M. M. H., Hamid, M. K., Hussain, D., & Huq, M. F. (2016). Design, construction and performance evaluation of an automatic solar tracker. *Journal of Scientific Research*, 8(1), 1-12. doi: 10.3329/jsr.v8i1.23357 doi:10.3329/jsr.v8i1.23357
- Putra, A. R., Kusumanto, R. D., & Taqwa, A. (2019, February). *Minimum power of solar Panel Movement in Solar Tracker System Prototype*. Journal of Physics: Conference Series, 1167, 012030. IOP Publishing. doi:10.1088/1742-6596/1167/1/012030
- Ramkiran, B., Sundarabalan, C. K., & Sudhakar, K. (2021). Sustainable passive cooling strategy for PV module: A comparative analysis. *Case Studies in Thermal Engineering*, 27, 101317. doi:10.1016/j.csite.2021.101317
- Ritchie, H., & Roser, M. (2022). Where does our electricity come from? Energy mix. <https://ourworldindata.org/electricity-mix> Erişim tarihi: 03.02.2023
- Schön, J., Bissels, G. M., Mulder, P., van Leest, R. H., Gruginskie, N., Vlieg, E., ... & Lackner, D. (2022). Improvements in ultra-light and flexible epitaxial lift-off GaInP/GaAs/GaInAs solar cells for space applications. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 30(8), 1003-1011. doi:10.1002/pip.3542
- Singh, B. P., Goyal, S. K., & Kumar, P. (2021). Solar PV cell materials and technologies: Analyzing the recent developments. *Materials Today: Proceedings*, 43, 2843-2849. doi:10.1016/j.matpr.2021.01.003
- Visconti, P., Costantini, P., Orlando, C., Lay-Ekuakille, A., & Cavalera, G. (2015). Software solution implemented on hardware system to manage and drive multiple bi-axial solar trackers by PC in photovoltaic solar plants. *Measurement*, 76, 80-92. doi:10.1016/j.measurement.2015.08.024
- Xu, R., Ji, X., Liu, C., Hou, J., Cao, Z., & Qian, H. (2022). Design and control of a wave-driven solar tracker. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 20(2), 1007-1019. doi:10.1109/TASE.2022.3177353
- Zaghba, L., Khennane, M., Mekhilef, S., Fezzani, A., & Borni, A. (2022). Experimental outdoor performance assessment and energy efficiency of 11.28 kWp grid tied PV systems with sun tracker installed in saharan climate: A case study in Ghardaia, Algeria. *Solar Energy*, 243, 174-192. doi:10.1016/j.solener.2022.07.045
- Zhang, Q., Zhuang, Y., Aierken, A., Song, Q., Yang, X., Zhang, S., ... & Dou, Y. (2022). Probing the displacement damage mechanism in Si, Ge, GaAs by defects evolution analysis. *Computational Materials Science*, 203, 111084. doi:10.1016/j.commatsci.2021.111084