

# Güneş enerjisi sistemleri için çevresel parametre ölçüm cihazının tasarlanması

Ali ŞENTÜRK<sup>1,\*</sup>, Arıçtan TULGA COŞKUN<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Muğla.

Geliş Tarihi (Received Date): 18.05.2022

Kabul Tarihi (Accepted Date): 23.12.2022

## Öz

*Bu çalışmada, çevresel parametreler olan fotovoltaik panel üzerine düşen ışınım miktarını, fotovoltaik panel sıcaklığını ve çevre sıcaklığını ölçen ve kaydeden düşük maliyetli, geliştirilebilir ve kullanımı kolay olan bir cihaz tasarlanmıştır. Tasarlanan cihaz; bir adet Arduino karttan, bir adet akım sensöründen, iki adet sıcaklık sensöründen, bir adet saat modülünden, bir adet SD kart modülünden, bir adet hafıza kartından, bir adet ekrandan (LCD), bağlantı kablolarından ve diğer yardımcı malzemelerden oluşmaktadır. Tasarlanan cihaz anlık olarak çevresel parametreleri ölçmekte ve beşer dakikalık aralıklarla kaydetmektedir. Seçilen bir gün için tasarlanan cihaz kullanılarak çevresel parametreler ölçülmüştür. Ölçülen çevresel parametreler kullanılarak bir fotovoltaik panelin üreteceği enerji miktarı 500 Wh olarak hesaplanmıştır. Düşük maliyetli olması, geliştirilebilir ve kullanıcı odaklı olması, her tip kullanıcıya hitap eden kolay kullanım ve modüler yapıda olması tasarlanan cihazın sahip olduğu artılardır. Çalışma sonunda ortalama bir maliyet analizi yapılmış ve 38 \$ olarak belirlenmiştir.*

**Anahtar kelimeler:** Arduino, güneş enerjisi, ışınım, fotovoltaik panel sıcaklığı, çevre sıcaklığı.

## Designing of environmental parameters measurement device for solar energy systems

### Abstract

*In this study, a low cost, developable and easy-to-use device was designed to measure and store the environmental parameters of incoming irradiation onto photovoltaic panel, photovoltaic panel temperature, and ambient temperature. The designed device is*

\*Ali ŞENTÜRK, alisen@mu.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0001-7033-2957>

Arıçtan Tulga COŞKUN, arictancoskun@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7030-960X>

*consisted of an Arduino board, two temperature sensors, a current sensor, a LCD screen, a SD card module, a memory card, a clock module, jumper wires and supplementary materials. The designed device measures the environmental parameters instantly and records them at five-minute intervals. Environmental parameters were measured by using the new device for a selected day. By using measured environmental parameters, the amount of energy that a photovoltaic panel will produce is calculated as 500 Wh. The advantages of the designed device are being low cost, being developable and user-oriented, appealing to all types of users, easy to use and modular. At the end of the study, an average cost analysis was made and it was determined as \$38.*

**Keywords:** *Arduino, solar energy, irradiation, photovoltaic module temperature, ambient temperature.*

## 1. Giriş

Güneşten gelen enerjinin doğrudan olarak elektrik enerjisine dönüştürülmesi fotovoltaik süreç ya da kısaca fotovoltaik olarak adlandırılmaktadır. Bu dönüşümün en önemli birimi güneş gözesidir (solar cell). Elektriksel çıkış güçlerinin düşük olması ve kırılğan yapıya sahip olmaları nedeniyle özdeş güneş gözeleri genellikle seri olarak bağlanarak, özel olarak üretilen termal ve mukavemetli bir yapı içersine yerleştirilirler [1]. Bu yapıya fotovoltaik modül, fotovoltaik panel veya halk arasındaki ismi ile güneş paneli adı verilmektedir. Güneş enerjisi uygulamalarının boyutlandırılması, tasarımı gibi hesaplamalar fotovoltaik panelin sahip olduğu elektriksel özellikler dikkate alınarak yapılmaktadır [2]. Güneş enerjisi sistemlerinin kurulum maliyetleri, özellikle de ticari amaçlı olanlar için, devlet teşviklerine rağmen hala yüksek bütçeler gerektirmektedir [3]. Bu nedenle, kurulum yapılacak bölgede, kurulum öncesi fizibilite çalışmasının yapılması gereklidir. Bir fizibilite çalışması, kurulacak olan güneş enerjisi sisteminin üreteceği elektriksel çıktıyı hesaplayarak tahmin edebilmek için gerekli olan çevresel parametrelerin ölçülmesini ifade etmektedir. Bu çevresel parametreler, kurulumun yapılacağı bölgeye düşen ışınım miktarı (G), fotovoltaik panel sıcaklığı ( $T_p$ ) ve çevre sıcaklığıdır ( $T_c$ ) [4]. Bunun yanında, elektriksel çıktı hesabında kullanılmayan nem ve rüzgar hızı gibi ikincil parametrelerin de ölçümü gerçekleştirilebilir. Ticari olarak temin edilebilen veri kaydedici (data logger) sistemlerinin maliyetleri oldukça yüksektir (~600-800 \$) [5]. Yüksek maliyetlerinin yanı sıra, bu tip sistemlerde donanımsal veya yazımsal hiç bir değişiklik yapılamamaktadır. Bunun yanında, bu tip ölçüm sistemlerinde herhangi bir arıza/bozulma veya kullanıcı hatası durumlarında yüksek maliyetli ve genellikle hesapta olmayan bakım/tamir ücretleri ve istenmeyen bekleme süreleri ile karşılaşmak mümkündür. İlaveten bu tip ölçüm cihazlarında, tümleşik kart tipinde olmaları nedeniyle, arıza tespiti oldukça güçtür. Bu bağlamda, ticari veri kaydedici sistemlerin sahip olduğu kısıtlamaları veya sorunları ortadan kaldıran bir çevresel parametre ölçüm cihazının tasarlanması gerekmektedir.

Tasarlanacak cihazın en önemli birimi kontrolcü kart kısmıdır. Tasarlanacak yeni cihazın bilgisayar ortamına ihtiyaç duymadan çalışabilir olmasını sağlayan, sensörlerden gelen ölçüm verilerini toplayabilen (data acquisition), matematiksel ve mantıksal işlem dizilerini hızlıca gerçekleştirebilen (bilgisayara gerek duymadan), elde ettiği çıktıları uygun birimlerin yardımı ile görsel olarak kullanıcılara sunabilen, gerektiğinde bilgisayar ile kolayca haberleşebilen, düşük maliyetli uygun bir kontrolcü birimin seçilmesi gereklidir. Mevcut piyasada benzer kontrolcü kartları bulunmasına rağmen, muadilleri-

ne oranla satın alma maliyetinin düşük olması, yazılımının açık kaynaklı ve ücretsiz olması, kolay programlanabilir (program komutları konuşma diline yakın) olması, kendisi ile uyumlu olarak çalışabilen farklı tipte ve düşük maliyette birçok sensörün (sıcaklık, akım, gerilim, nem vb) ve birimin olması, sensörlerin ve birimlerin kolay kullanımını sağlayan ücretsiz hazır kütüphanelerin (sensörü Arduino karta tanıtmak için) veya program dizelerinin (sensör/birim kullanımı için yazılmış program bloğu) olması gibi artılardan dolayı, tasarlanan cihazda Arduino kontrolcü kartının kullanılmasına karar verilmiştir [6].

Literatürde fotovoltaik ile ilgili çalışmalar incelendiğinde, Arduino tabanlı birçok prototip cihazın rapor edildiği görülmektedir. Bunlar genellikle mevcut bir fotovoltaik sistemin veya örgünün veya tek bir fotovoltaik panelin çalışması esnasındaki akım-gerilim değerlerinin ölçülmesi ve izlenmesi veya akü şarj seviyesinin takip edilmesi üzerinedir [7–9]. Bunun yanında maksimum güç noktasının takip edilmesi, güneşin izlenmesi gibi çalışmalar da mevcuttur [10]. Ancak, literatürde güneş enerjisi fizibilite çalışması için gerekli olan çevresel parametrelerin ölçümünde kullanılan doğrudan bir cihaz rapor edilmemiştir.

Bu çalışmada çevresel parametreleri ölçebilen ve kaydedebilen bir cihaz tasarlanmıştır. Tasarlanan cihazda bir adet Arduino kart, bir adet akım sensörü, iki adet sıcaklık sensörü, bir adet SD kart modülü, bir adet hafıza kartı, bir adet saat modülü, bir adet LCD ekran ve yardımcı birimler kullanılmıştır. Tasarlanan cihaz kurulması planlanan bölgedeki ışınım miktarı, piranometre yerine, bir adet fotovoltaik panel kullanılarak elde edilmiştir. Tasarlanan cihazın ışınım ölçme kabiliyeti Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Menteşe Kütüphanesi çatısında bulunan çok kanallı akım-gerilim ölçme düzeneğinde bulunan piranometre kullanılarak test edilmiştir. Cihazın tasarlanma süreci Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü bünyesinde kurulan Arduino-Proje Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Seçilen bir gün için ölçülen çevresel parametreler kullanılarak bir fotovoltaik modülün ve bu fotovoltaik modül kullanılarak kurulacak olan fotovoltaik sistem için üretilecek enerji miktarları hesaplanarak sırası ile 500 Wh ve 50 kWh olacağı hesaplanmıştır. Çalışma sonunda ortalama bir maliyet analizi yapılmıştır.

## 2. Teorik Bilgiler

Güneş enerjisi ya da daha çok bilinen adı ile fotovoltaik enerji kavramı ilk olarak 1970'lerin başında petrol krizi ile gündelik hayata girmiştir. Fotovoltaik; foto kelimesine karşılık gelen ışık ve voltaik'e karşılık gelen gerilim kavramlarının bir araya getirilmesidir. Tanımlandığında ise güneşten gelen enerjinin doğrudan olarak elektrik enerjisine dönüştürüldüğü aygıtları (birimleri) ifade etmektedir. Güneş enerjisinin ve uygulamalarının sahip olduğu bazı avantajlar; kaynağının tükenmez olması, çevreye zarar vermemeleri, modüler yapıda olduklarından mevcut kurulu kapasitelerinin arttırılabilir olması, diğer enerji üreten sistemlere göre basit çalışma teknolojilerine sahip olmaları, düşük bakım maliyetlerine sahip olmaları ve doğrudan ihtiyaç duyulan bölgeye kurulabilmeleri dolayısıyla enerji iletim hatlarına ihtiyaç duymamalarıdır. Bunun yanında, süresiz olmaları, depolama maliyetlerinin yüksek olması ve büyük miktarda enerji elde etme maliyetinin yüksek olması en bilinen dezavantajlarıdır. Bu nedenle, belirlenen bir coğrafi konumda kurulması planlanan fotovoltaik sistemin yatırım maliyetlerine bağlı olarak geri dönüş süresinin bilinmesi ekonomik uygulanabilirlik açısından oldukça önemlidir [11].

Bir fotovoltaik panelin üreteceği enerji, fotovoltaik panel üzerine düşen ışınım ve sıcaklığına bağlıdır. Bu nedenle, kurulması planlanan konumdaki ışınım ve fotovoltaik panel sıcaklığı değerlerinin ölçülmesi gereklidir. Bu parametrelerin yanında, fotovoltaik panelin konumlandırılacağı konumun sıcaklığı (çevre sıcaklığı) da ölçülmelidir. Doğrudan fotovoltaik panelin konumlandırılmadığı durumda, termal hesaplama yöntemleri ve çevre sıcaklığı değerleri kullanılarak fotovoltaik panelin çalışma sıcaklığı hesaplanmaktadır. Elde edilen ışınım ve fotovoltaik panel sıcaklığı veya çevre sıcaklığı değerleri kullanılarak, ilgili fotovoltaik panelin maksimum çıkış gücü ( $P_M$ ) değerleri elde edilir.

Bir fotovoltaik panelin maksimum çıkış gücünü hesaplamak için doğrudan ve dolaylı yöntemler rapor edilmiştir. Dolaylı yöntemlerde, öncelikli olarak belirtilen ışınım ve fotovoltaik panel sıcaklığı için akım-gerilim eğrisi hesaplanmaktadır. Sonrasında ise elde edilen bu akım-gerilim eğrisinden  $P_M$  değeri elde edilir. Doğrudan yöntemlerde ise  $P_M$  değeri, ampirik veya deneysel olarak elde edilen ifadeler kullanılarak, belirtilen ışınım ve fotovoltaik panel sıcaklığı için, genellikle tek bir adımda hesaplanmaktadır. Doğrudan yöntemlerin en büyük artısı, hesaplama kolaylıklarının yüksek olması ve hesaplama için gerekli olan sabit veya katsayıların az sayıda olmasıdır. Bunun yanında, bu tür yöntemlerin en büyük eksisi, doğruluklarının nispeten düşük olması ve gerekli olan sabit veya katsayıların uzun ölçümler sonunda elde ediliyor olmasıdır. Buna karşın, dolaylı yöntemlerin sahip olduğu hesaplama doğruluğu oldukça yüksektir. Ancak, hesaplama yükünün çok fazla olması ve bir çoğunda uzman seviyesinde kullanıcıya ihtiyaç duyulması gibi eksi yanları mevcuttur. Belirli bir süre (gün, hafta, ay vb.) içerisinde elde edilen  $P_M$  değerleri ve ölçüm zamanı bilgisinin yardımı ile, o sürede üretilecek olan enerji miktarı hesaplanır. Bir fotovoltaik panel için elde edilen sonuçlar, kurulması planlanan fotovoltaik sistem için geliştirilerek, ilgili sistemin kurulduğunda üreteceği enerji miktarı hesaplanır. Bunun yanında, montaj maliyeti, bağlantı aparatları, invertör birimleri, güç kontrol birimleri (power conditioning), iletim kabloları gibi ilave maliyetler de dikkate alınarak kurulması planlanan fotovoltaik sistemin kurulum maliyeti ortaya konur. Böylece kurulması planlanan fotovoltaik sistemin ekonomik-geri dönüşün süresi hakkında bir tahmin yapılmış olunur [12].

### 3. Materyal ve Yöntem

Bir konuma veya bölgeye gelen ışınım miktarını ( $G$ ) piranometre adı verilen özel olarak tasarlanmış ışınım ölçer kullanmak yerine, alternatif bir teknikle elde etmek mümkündür. Bu teknik, bir fotovoltaik panelin kısa-devre akımının ( $I_{SC}$ ) ve sıcaklığının ( $T_P$ ) ölçülmesine dayanmaktadır. Bir fotovoltaik panelin kısa devre akımı; üzerine düşen ışınım miktarı ve panel sıcaklığı ile orantılı olup aşağıda belirtilen Eşitlik (1) ile hesaplanmaktadır [13].

$$I_{SC} = \frac{I_{SCREF}G}{G_{REF}}(1 + \alpha(T_P - T_{REF})) \quad (1)$$

Burada  $T_{MREF}$ ; referans panel sıcaklığını ( $25^\circ\text{C}$ ),  $G_{REF}$ ; referans ışınım değerini ( $1000 \text{ W/m}^2$ ),  $\alpha$ ; fotovoltaik panelinin katalogunda yer alan kısa-devre akımı sıcaklık katsayısını ve  $I_{SCREF}$ ; fotovoltaik panelinin katalogunda yer alan referans koşullarındaki kısa-devre akımını ifade etmektedir. Eşitlik (1)'de ışınım parametresini yalnız bırakacak şekilde

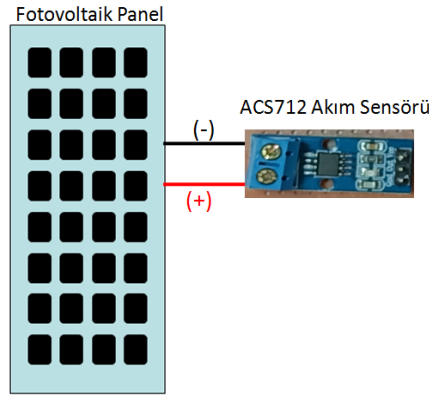
gerekli işlemler yapıldığında, fotovoltaik panel üzerine düşen ışınım miktarını; kısa devre akımı ve panel sıcaklığı cinsinden veren Eşitlik (2) elde edilir [14].

$$G = \frac{I_{SC} G_{REF}}{I_{SCREF} (1 + \alpha (T_P - T_{REF}))} \quad (2)$$

Eşitlik (2)'den anlaşılacağı üzere, fotovoltaik panel üzerine düşen ışınım miktarını elde edebilmek için, panelin kısa-devre akımı ve sıcaklığı ölçülmelidir. Işınım değerini elde etmek için 75 W gücünde tek-kristal silisyum teknolojisine sahip bir fotovoltaik panel kullanılmıştır. Bu panelin referans koşullarındaki kısa-devre akımı 4.8 A olup kısa-devre akımı sıcaklık katsayısı  $3 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 'dir. Fotovoltaik panelin kısa-devre akımı, iç direnci  $1.2 \text{ m}\Omega$  olan ve Şekil 1'de gösterilen ACS712 model akım sensörü ile ölçülmüştür. Bu akım sensörü 5A'e kadar akım okuma kabiliyetine sahiptir. Akım sensöründe, Arduino kart ile haberleşebilmek (veri yollamak) için, bir adet analog uç bulunmaktadır. Kısa-devre akım ölçümünü gerçekleştirebilmek için akım sensörünün artı (+) ve eksi (-) giriş uçları, fotovoltaik panelin artı (+) ve eksi (-) uçlarına bağlanır (Şekil 2).



Şekil 1. ACS712 model akım sensörü.



Şekil 2. Akım sensörünün temsili olarak fotovoltaik panele bağlanması.

Fotovoltaik panel sıcaklığı ve panelin bulunduğu çevre sıcaklığı dış ortam şartlarına dayanıklı ve su geçirmeyen iki adet DS18B20 model sıcaklık sensörü ile ölçülmüştür (Şekil 3). Seçilen sıcaklık sensörünün ölçüm aralığı  $-10^\circ\text{C}$  ile  $85^\circ\text{C}$  olup bu aralıkta sahip olduğu doğruluk  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 'dir. Bu sıcaklık sensörünün, mevcut sıcaklık sensörlerinden farkı, "onewire" protokolü ile çalışabilmesidir [15]. Bu protokol sayesinde aynı anda altı adet DS18B20 sıcaklık sensörü sadece bir adet dijital uç üzerinden Arduino kartla haberleşebilmektedir. Tasarlanan cihazdaki iki adet DS18B20 sıcaklık sensörünün "onewire" protokolü üzerinden tek bir dijital uçla Arduino kart ile haberleşmeleri sağlanmıştır. Fotovoltaik panelin sıcaklık ölçümü için kullanılan sıcaklık sensörü panelin arkasına ve ortasına yerleştirilmiştir (Şekil 4). Sıcaklık sensöründe, Arduino kart

ile haberleşebilmek için, bir adet dijital uç bulunmaktadır. DS18B20 sıcaklık sensöründe, Arduino ile haberleşen ucu ile besleme ucu arasına 4.7 k $\Omega$ 'luk bir direnç yerleştirilir.

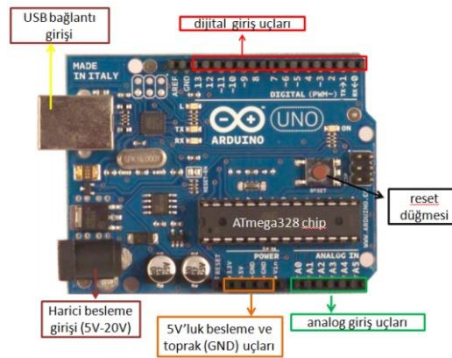


Şekil 3. DS18B20 model sıcaklık sensörü.



Şekil 4. Fotovoltaik panel sıcaklık sensörünün konumu.

Tasarlanan cihazda kullanılan Arduino Uno kontrolcü kartı Şekil 5'te gösterilmiştir. Tipik bir Arduino kartında; gerektiğinde bilgisayar ile haberleşmeyi sağlayan ve aynı zamanda kartın elektriksel beslemesi için kullanılan bir adet USB bağlantı ucu, Arduino kartın elektriksel beslemesini sağlayan bir adet harici besleme girişi, Arduino karta bağlanan sensörlerin elektriksel beslemesi için gerekli olan iki adet 5V'luk ve iki adet toprak (GND, ground) ucu, sensörlerle ve birimlerle haberleşmeyi (veri toplama, data acquisition) sağlayan 14 adet dijital ve 6 adet analog uç bulunmaktadır. Arduino kartta bulunan dijital uçlar; D0, D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D11, D12 ve D13, analog uçlar ise A0, A1, A2, A3, A4 ve A5 olarak isimlendirilmişlerdir. Mevcut dijital uçların dışında SCL ve SDA olarak adlandırılmış ve I2C protokolü ile doğrudan haberleşebilen iki adet dijital uç da bulunmaktadır.



Şekil 5. Arduino Uno kart [16].

Şekil 6'da gösterilen DS1302 model gerçek zamanlı saat modülü, ölçüm zamanı bilgisini (yıl, ay, gün, saat, dakika ve saniye olarak) kullanıcılara göstermek için kullanılmıştır. Bu modülün çalışması için, harici besleme dışında, bir adet CR2032 tip saat pili

gerekmektedir. Bu modülde, Arduino kart ile haberleşebilmek için, CLK, DAT ve RST olmak üzere üç adet dijital uç bulunmaktadır.

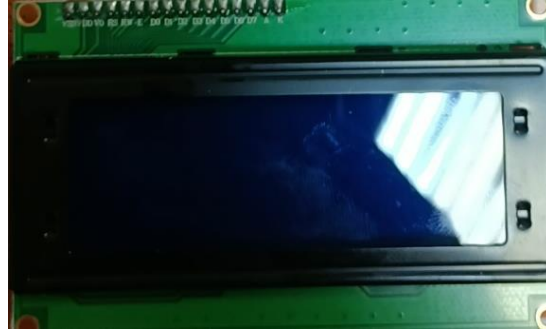


Şekil 6. DS1302 model gerçek zamanlı saat modülü.

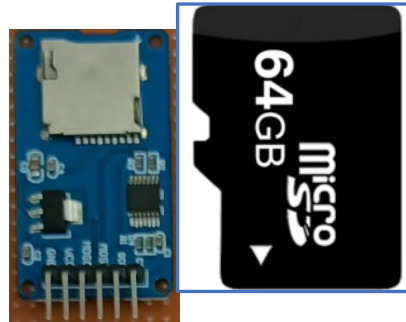
Ölçülen çevresel parametreleri ve ölçüm zamanını anlık olarak kullanıcılara göstermek için Şekil 7'de gösterilen 4x20 matrisine ve I2C haberleşme protokolüne sahip bir adet LCD (Liquid Crystal Display) ekran kullanılmıştır. Bu modülde, Arduino kart ile haberleşebilmek için, SDA ve SCL olmak üzere iki adet dijital uç bulunmaktadır.

Ölçülen çevresel parametreler ve ölçüm zamanı bilgisi 5 dakikalık aralıklarla Şekil 8'de gösterilen SD modül aracılığı ile bir hafıza kartına kaydedilmiştir. Kullanılan hafıza kartı mikro tipte olup veri saklama kapasitesi 64 GB'tır. Bu modülde, Arduino kart ile haberleşebilmek için CS, SCK, MISO ve MOSI olmak üzere 4 adet dijital uç bulunmaktadır.

Tasarlanan cihazı oluşturan tüm birimlerin ve sensörlerin Arduino kartla olan bağlantı uçları Tablo 1'de gösterilmiştir. Tüm birimlerin ve sensörlerin elektriksel beslemesi Arduino kart üzerinde bulunan 5V ve GND uçlarından gerçekleştirilmiş olduğundan bu uçlar Tablo 1'de gösterilmemiştir.



Şekil 7. LCD ekran.

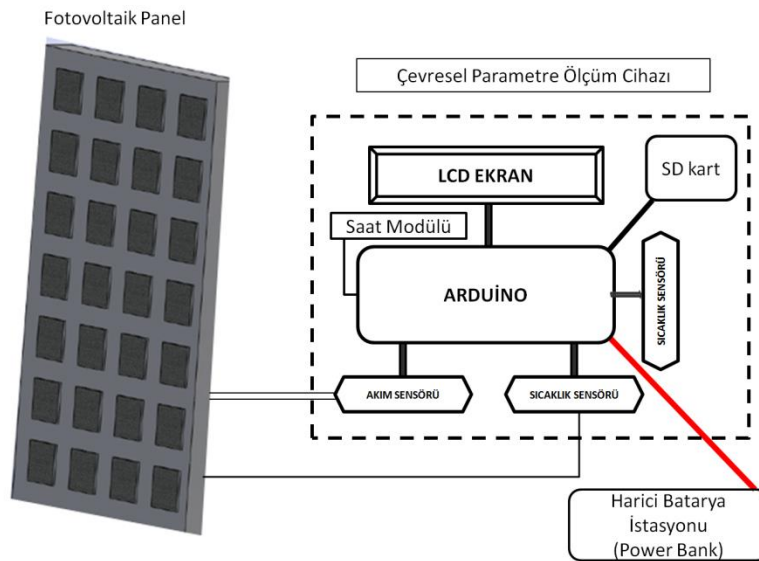


Şekil 8. SD kart modülü ve hafıza kartı.

Tablo 1. Sensör ve birim bağlantıları.

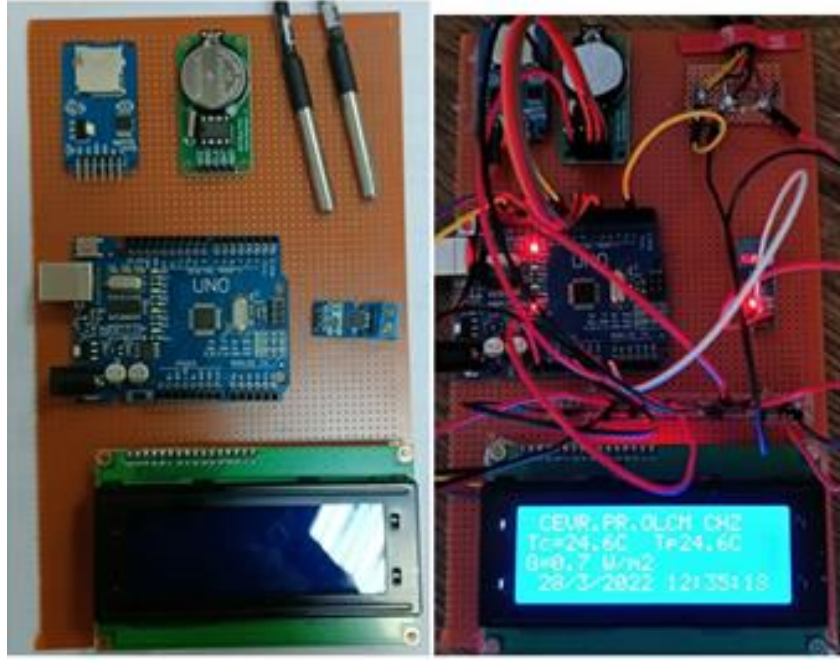
Birim	Çıkış Ucu	Arduino'ya Bağlantı	Gerekli Kütüphane
DS18B20 sıcaklık sensörü ( 2 adet)	Bir adet dijital uç	Dijital uç ► D2	onewire.h DallasTemperature.h
ACS712 akım sensörü	Bir adet analog uç	Analog uç ► A0	-----
LCD ekran	SCL ve SDA	SCL ► SCL SDA ► SDA	LiquidCrystal_I2C.h Wire.h
Saat modülü	RST, DT, CLK	RST ► D8 DT ► D7 CLK ► D6	virtuabotixRTC.h
SD kart m modülü	CS, SCK, MISO, MOSI	CS ► D10 SCK ► D13 MISO ► D11 MOSI ► D12	SPI.h SD.h

Tasarlanan cihazın temsili blok şeması Şekil 9'da gösterilmiştir. Tasarlanan cihazı meydana getiren Arduino kartının, sıcaklık sensörlerinin, akım sensörünün, saat modülünün, LCD ekranın ve SD kart modülünün pertinaks üzerindeki konumları Şekil 10'da (bağlantısız) gösterilmiştir. Bu birimler ve sensörler sıcak silikon kullanılarak pertinaks üzerine yapıştırılmışlardır. Devamında, ilgili haberleşme bağlantıları, muhtelif renkteki bağlantı kabloları kullanılarak Tablo 1'e göre gerçekleştirilmiştir ve Şekil 10'da bağlantılı hali gösterilmiştir. Bağlantı sonrası Arduino kartta 5 adet dijital ve 5 adet analog uç boşta kalmıştır.



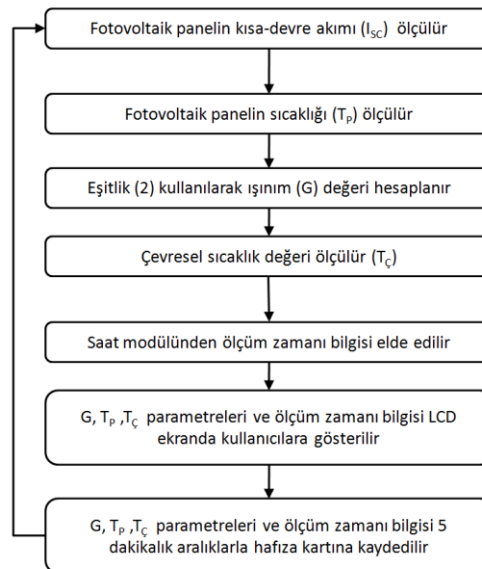
Şekil 9. Tasarlanan cihazın blok şeması.





Şekil 10. Tasarlanan cihazın bağlantısız ve bağlantılı gerçek görüntüsü.

Tasarlanan cihaz, akım ve sıcaklık sensörleri vasıtasıyla ışınım miktarı, panel sıcaklığı ve çevre sıcaklığı bilgilerini elde etmektedir. Elde edilen bu bilgiler ile birlikte ölçüm zamanı bilgisi anlık olarak LCD ekran vasıtasıyla kullanıcılara gösterilir. LCD ekranda gösterilen tüm bilgiler belirlenen zaman aralığında (5 dakika) hafıza kartına kaydedilir. Tüm bu işlemler anlatılan sıra ile tekrarlanır. Tasarlanan cihazın çalışma prensibi Şekil 11'de temsili olarak özetlenmiştir. Şekil 11'de gösterilen algoritmaya uygun olarak yazılan program tasarlanan cihazda bulunan Arduino karta yüklenmiştir.



Şekil 11. Tasarlanan cihazın çalışma algoritması.

Bir fotovoltaik panel kullanılarak elde edilen ışınım verilerinin doğruluğu, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Menteşe Kütüphanesi çatısında bulunan Kipp - Zonen CM11 mo-

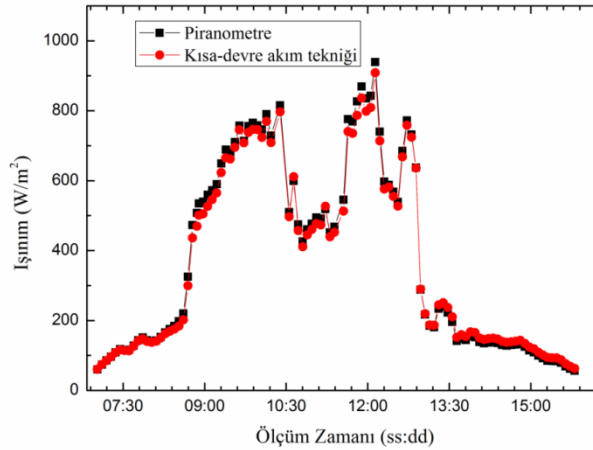
del piranometre [17] yardımıyla ortalama karekök hata hesabı (root mean square error: RMSE) kullanılarak karşılaştırılmıştır. Ortalama karekök hata hesabının genel ifadesi Eşitlik (3)'te verilmiştir [18].

$$RMSE (\%) = 100 \frac{\sqrt{N \sum_{i=1}^N (G_P - G_{FP})^2}}{\sum_{i=1}^N G_P} \quad (3)$$

Eşitlik (3)'te,  $G_P$ ,  $G_{FP}$ , ve  $N$  sırası ile piranometre ile ölçülen ışınım değerini, fotovoltaik panel ile elde edilen ışınım değerini ve veri (ölçüm) sayısına karşılık gelmektedir.

#### 4. Bulgular ve Tartışma

Seçilen bir gün için piranometre ve fotovoltaik panel kullanılarak elde edilen ışınım değerleri ölçüm zamanına karşı Şekil 12'de çizdirilmiştir. Elde edilen veriler ve Eşitlik (3) kullanılarak RMSE değeri %4.1 olarak hesaplanmıştır. Kullanılan akım sensörünün çalışma sıcaklığına bağlı olarak sahip olduğu doğruluk % 1.5-%4.1 aralığında değişiklik göstermektedir. Bu bağlamda, tasarlanan cihazın sahip olduğu %4.1'lik doğrulukla ışınım ölçme kabiliyeti yeterlidir [14].

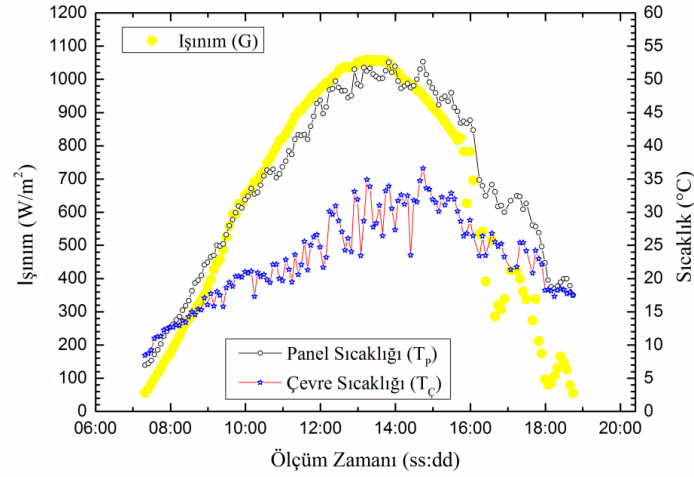


Şekil 12. Elde edilen ışınım değerleri.

Tasarlanan cihaz Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi'nde bulunan ve Türkiye'de ilk kurulan Güneşi İki Eksende İzleyen Fotovoltaik Sisteminin bulunduğu konuma (Şekil 13) yerleştirilerek çevresel parametreler ölçülmüştür [19]. Rastgele seçilen bir gün için, gün boyunca ışınım, fotovoltaik panel sıcaklığı, çevre sıcaklığı parametreleri ve ölçüm zamanı anlık olarak ölçülmüş ve 5 dakikalık zaman aralıkları ile kaydedilmiştir. Tasarlanan cihaz kullanılarak ölçülen ve hafıza kartına kaydedilen çevresel parametre verileri ve ölçüm zamanı bilgisi bir bilgisayara ortamına aktarılmış ve Şekil 14'te gösterilmiştir.



Şekil 13. Saha ölçümü.



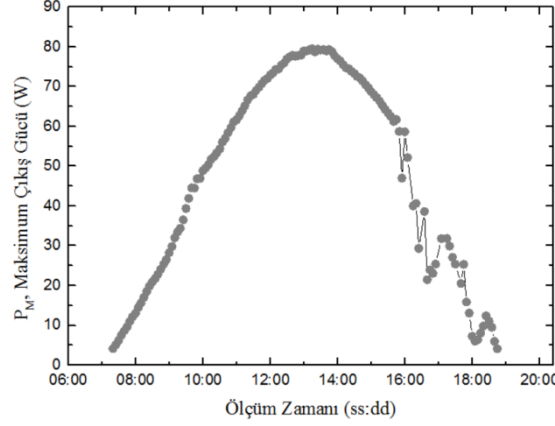
Şekil 14. Ölçülen çevresel parametreler.

Elde edilen çevresel parametreler kullanılarak bir fotovoltaik panelin (ışınım ölçümü için kullanılan) üreteceği enerji miktarı hesaplanmıştır. Sahip olduğu hesaplama kolaylığı ve hesaplama için gerekli olan bilgilerin tamamının fotovoltaik panel kataloğunda kullanıcılara sunulmasından dolayı matematiksel ifadesi Eşitlik (4)'te gösterilen yöntem kullanılmıştır [20]. Bu yöntemde, bir fotovoltaik panelin maksimum çıkış gücünü hesaplayabilmek için panel üzerine düşen ışınım miktarının ve panel sıcaklığının bilinmesi/ölçülmesi gereklidir.

$$P_M = \frac{P_{MREF} G}{G_{REF}} (1 + \gamma(T_p - T_{REF})) \quad (4)$$

Burada bilinenlerin dışında,  $\gamma$ ; fotovoltaik panelinin kataloğunda yer alan maksimum çıkış gücü sıcaklık katsayısı ( $3600 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) ve  $P_{MREF}$ ; fotovoltaik panelinin kataloğun-

da yer alan referans koşullarındaki maksimum çıkış gücünü (75 W) ifade etmektedir. Şekil 14'teki çevresel parametrelerden  $G$  ve  $T_p$  ve Eşitlik (4) kullanılarak ışınım ölçümü için kullanılan fotovoltaik panelin maksimum çıkış gücü ( $P_M$ ) değerleri hesaplanmış ve Şekil 15'te ölçüm zamanına karşı çizdirilerek gösterilmiştir.



Şekil 15. Maksimum çıkış gücü değerleri.

İlgili modülün seçilen gün için ürettiği enerji miktarı Şekil 15'teki eğrinin altında kalan alana karşılık gelmektedir [20]. Bu bağlamda, ilgili fotovoltaik panelin üreteceği enerji miktarı yaklaşık 500 Wh olarak hesaplanmıştır. Bu bölgeye 100 adet fotovoltaik panel kurulacağı düşünülürse, toplam üretilen enerji miktarı, bir fotovoltaik panel için elde edilen değer 100 ile çarpılması ile bulunacak olup, 100 adet panel için yaklaşık olarak 50 kWh olacaktır.

Cihazın ortalama maliyeti güncel fiyatlar dikkate alınarak Tablo2'de belirtilmiştir. Buna göre tasarlanan cihazın maliyeti yaklaşık olarak 38 \$'dır. Maliyet hesabında, cihazın elektriksel beslemesini sağlayan harici batarya istasyonu dikkate alınmamıştır. Bunun nedeni, tasarlanan cihazın elektriksel beslemesi için başka alternatiflerin de olmasıdır (sıradan 9V'luk pil, cep telefonu vb.). Kullanıcılar kendilerine en uygun besleme şeklini seçmekte özgürdürler. Tasarlanan cihazda kullanılan tüm birimler e-ticaret yolu ile temin edilmiştir. Farklı e-ticaret siteleri farklı zamanlarda bu tip ve benzer ürünlerde indirim yapmaktadırlar. Bu bağlamda, ilgili birimlerin satın alınmadan önce birkaç e-ticaret sitesi taranarak en ucuz birim/birimlerin satın alınması tavsiye edilmektedir.

Işınım ölçümü için kullanılacak olan fotovoltaik panelde bir kısıtlama yoktur. Bu yüzden maliyet hesabında fotovoltaik panel bedeli dikkate alınmamıştır. Kullanıcılar farklı teknolojideki ve güçteki fotovoltaik panelleri kullanabilirler. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli husus, kullanılacak olan fotovoltaik panelin sahip olduğu kısa-devre akımıdır. Mevcut piyasada ticari olarak temin edilebilen fotovoltaik panellerin sahip oldukları kısa-devre akım değerleri 0-10 A aralığında değişkenlik göstermektedir. Tasarlanan ve burada anlatılan cihazda kısa-devre akımını ölçmek için kullanılan akım sensörü 5A'e kadar akım ölçme kabiliyetine sahiptir. Bu bağlamda, kısa-devre akımı 5A'den büyük olan bir fotovoltaik panelin kullanılacağı durumda, örneğin kısa-devre akımı 8 A olan bir fotovoltaik panel, mevcut akım sensörü yerine 20 A'lik bir akım sensörü kullanılmalıdır. Tasarlanan cihazda kullanılan akım sensörünün yine aynı adla (ACS712) sunulan ve 20 A'e kadar akım ölçebilen modeli mevcuttur.

Tablo 2. Tasarlanan cihazın ortalama maliyeti.

Birim/Sensör	Birim Fiyat (\$)	Miktar	Maliyet (\$)
DS18B20 Sıcaklık Sensörü	1.65	2 adet	3.3
ACS712 Akım Sensörü	2.7	1 Adet	2.7
Arduino Uno Kart	8.6	1 adet	8.6
LCD ekran	10	1 adet	10
Saat Modülü	1.2	1 adet	1.2
SD kart Modülü	1.5	1 adet	1.5
Hafıza Kartı	6.5	1 adet	6.5
Pertinaks	1.5	1 adet	1.5
Bağlantı Kabloları	2.0	1 bağ	2.0
<b>Toplam Maliyet</b>			<b>~38</b>

Sensörlerden (akım veya sıcaklık) veya birimlerden (SD kart, LCD ekran vb.) herhangi birinin arızalanması ve çalışamaz hale gelmesi durumunda yapılması gereken, ilgili arızalı sensörün veya birimin, Tablo 1'de belirtilen bağlantı uçlarına göre, yenisi ile değiştirmektir. Bu durumda programın Arduino karta yeniden yüklenmesine gerek yoktur. Tasarlanan cihaza yeni bir birim/sensör eklenmediği veya tasarlanan cihazın mevcut programında bir değişiklik yapılmadığı sürece, bilgisayara gerek yoktur. Yeni bir sensör veya birim eklenmek istendiği durumda ise, Tablo 1 dikkate alınarak Arduino kart üzerindeki boş uçlar kullanılmalıdır. Ayrıca, eklenen birimin veya sensörün çalışır hale gelebilmesi için, mevcut program bloğuna ilgili kod bloğunun eklenmesi ve güncel programın Arduino karta yüklenmesi gereklidir. Eklenecek birimin veya sensörün ilgili kod bloğu internet aracılığı ile ücretsiz bir şekilde temin edilebilmektedir. Sonuç olarak, tasarlanan cihazda gerçekleştirilen her türlü yazılımsal (programın değiştirilmesi) veya donanımsal (yeni birim/sensör eklenmesi veya mevcut olanlardan birinin çıkarılması) değişiklikten sonra programın güncel hali Arduino karta yüklenmelidir. Aksi halde tasarlanan cihazda yapılan bu tür değişiklikler geçerli olmayacaktır.

Tasarlanan cihazda Arduino Uno kart kullanılmıştır. Mevcut cihazda kullanılan sensörler ve birimler dikkate alındığında bu kartın sahip olduğu dijital (14) ve analog (6) uç sayısı yeterlidir. Ancak, bağlanacak sensör veya birim sayısının arttığı durumda Arduino Uno kartın sahip olduğu uç sayısı yetersiz kalabilmektedir. Bu durumda, Arduino Uno karta göre, daha çok dijital (54 adet) ve analog (16 adet) uca sahip olan Arduino Mega veya benzeri bir kart kullanılmalıdır.

## 5. Sonuç

Güneş enerjisi sistemlerinin, kurulumundan önce, kurulmaları planlanan bölgedeki çevresel parametrelerin ölçülmesi gereklidir. Bu parametreler, panel üzerine düşen ışınım miktarı ( $G$ ), panel sıcaklığı ( $T_P$ ) ve panelin bulunduğu çevre sıcaklığıdır ( $T_C$ ). Bu çevresel parametrelerin yardımıyla, kurulması planlanan güneş enerjisi sisteminin ekonomik açıdan geri-dönüşüm zamanı hakkında bir öngörü elde edilerek fizibilite çalışması gerçekleştirilir. Bu çalışmada, çevresel parametreleri ölçen ve kaydedebilen bir cihaz tasarlanmıştır. Tasarlanan cihaz sayesinde belirlenen bir bölgede güneş enerjisi sistemi kurulmadan önce fizibilite çalışmasının yapılabilmesi hedeflenmektedir. Tasarlanan cihaz, bir adet Arduino karttan, iki adet sıcaklık sensöründen, bir adet akım

sensöründen, bir adet saat modülünden, bir adet hafıza kartı modülünden, bir adet hafıza kartından, bir adet LCD ekrandan ve yardımcı birimlerden oluşmaktadır (Tablo 2).

Bu çalışmada düşük maliyetli, her tipteki kullanıcıya hitap eden, kolay kullanıma sahip, modüler ve geliştirilebilir tipte olan (yazılımsal ve donanımsal değişikliğe açık) çevresel parametrelerin ölçülmesi için tasarlanan cihazın sahip olduğu artılar aşağıda açıklanmıştır.

**Düşük Maliyetli:** Tasarlanan cihazın güncel maliyeti, ticari ölçüm cihazlarına kıyasla oldukça düşük olup, 38 \$ olarak hesaplanmıştır.

**Geliştirilebilir ve Kullanıcı Odaklı:** Mevcut ticari ölçüm cihazlarında donanımsal ve/veya yazılımsal bir değişiklik yapmak mümkün değildir. Buna karşılık, tasarlanan cihaz geliştirilebilir yapıda olup her türlü değişiklik (yazılımsal veya donanımsal) tamamen kullanıcının amacı doğrultusunda yapılabilmektedir. Kullanıcılar, amaçları doğrultusunda, ölçüm programını düzenleyebilir/yeniden yazılabilir veya tasarlanan cihaza yeni sensörler (nem veya ıslaklık sensörü gibi) veya birimler ekleyebilirler.

**Modüler Yapı:** Ticari olarak temin edilebilen birçok ölçüm cihazında bir arıza durumunda, servis /bakım onarım maliyetleri gibi hesapta olmayan ilave maliyetler ve istenmeyen bekleme süreleri ile karşılaşmak mümkündür. Buna karşın tasarlanan cihaz, modüler tipte olduğundan dolayı, olası bir arıza durumunda, bozulan/hasar gören birimler veya sensörler düşük maliyetli ve kolay temin edilebilen yedek birimlerle/sensörlerle hızlıca değiştirilme imkanı sunmaktadır.

**Her Tip Kullanıcıya Hitap Eden Kolay Kullanım:** Son yıllarda oldukça popüler olan güneş enerjisi ve uygulamaları sayesinde farklı tipte kullanıcıların bu alana yönelmeleri sağlanmıştır. Kullanıcı profili incelendiğinde, kullanıcıların farklı imkan, kabiliyet ve akademik eğitime sahip oldukları görülmüştür. Ticari olarak temin edilebilen birçok cihazı kullanabilmek ve hatta montajını yapabilmek için kullanıcıların belirli bir uzmanlık seviyesinde olmalı gerekmektedir. Oysa tasarlanan cihazın kurulumu ve kullanımı oldukça basittir. Sahip olduğu kolay kullanım ve kurulum sayesinde tasarlanan cihaz, tasarımcıdan veya mühendisten son kullanıcıya kadar her tip kullanıcıya hitap etmektedir. Tablo 2'deki birimleri satın alan, Tablo 1'deki bağlantıları gerçekleştiren ve Şekil 11'dekine uygun bir programı yazan her kullanıcı tasarlanan cihazı kolaylıkla oluşturabilir ve kullanabilir.

Bu çalışmada tasarlanan cihazda kontrolcü kartı olarak ticari bir ürün olan Arduino Uno kart kullanılmıştır. Arduino firması, hiç bir telif hakkı talep etmeksizin, bu kartın kopyalanmasına izin vermektedir. Bu bağlamda, ilerleyen süreçte, tasarlanan cihazın maliyetini düşürebilmek için, yerli ve milli imkanlarla benzer bir kontrolcü kartının üretilmesi hedeflenmektedir. İlaveten, tasarlanan cihaz, birim ve sensörlerinin dış ortamdaki saha şartları altında zarar görmemesi için, mukavemetli bir kutunun içersine yerleştirilmesi de hedeflenmektedir.

Okuyucular, tasarlanan cihazda kullanılan programı talep etmek, cihazla ilgili merak edilenleri sormak, bilgi almak veya katkılarını/görüşlerini bildirmek için yazarlara ait elektronik posta adreslerini kullanabilirler.

## Teşekkür

Tasarlanan cihaz için gerekli bütçe Tübitak 2209-B Sanayiye Yönelik Lisans Araştırma Projeleri destek programından karşılanmıştır.

## Kaynaklar

- [1] Garip, Z., Çimen, M.E. ve Boz, A.F., Fotovoltaik Modellerin Parametre Çıkarımı İçin Geliştirilmiş Bir Kaotik Tabanlı Balina Optimizasyon Algoritması, **Politeknik Dergisi**, 9, 0–2, (2021).
- [2] Tian, H., Mancilla-David, F., Ellis, K., Muljadi, E. ve Jenkins, P., A cell-to-module-to-array detailed model for photovoltaic panels, **Solar Energy**, 86, 2695–2706, (2012).
- [3] Yılmaz U., Demirören, A. ve Zeynelgil, H.L., Gökçeada ' da Yenilenebilir Enerji Kaynakları ile Elektrik Enerjisi Üretim Potansiyelinin Araştırılması Investigation of the Potential for Electrical Energy Production with Renewable Energy Sources in Gökçeada, **Politeknik Dergisi**, 13, 215–223, (2010).
- [4] Chantana, J., Kawano, Y., Kamei, A. ve Minemoto, T., Description of degradation of output performance for photovoltaic modules by multiple regression analysis based on environmental factors, **Optik**, 179, 1063–1070, (2019).
- [5] Piranometre Güneş Radyasyon Sensörü.pdf, (2022).  
<https://www.enerjimgunes.com/rk200-03-piranometre-gunes-radyasyon-sensoru> (17.05.2022).
- [6] Ocak, M. A., Where does Arduino's power come from?: An extended literature review, **Journal of Learning and Teaching in Digital Age**, 3, 21–34, (2018).
- [7] Zachariadou, K., Yiasemides, K. ve Trougakos, N., A low-cost computer-control-led Arduino-based educational laboratory system for teaching the fundamentals of photovoltaic cells, **European Journal of Physics**, 33, 1599–1610, (2012).
- [8] Mahzan, N.N., Omar, A.M., Rimon, L., Noor, S.Z.M. ve Rosselan, M.Z., Design and development of an arduino based data logger for photovoltaic monitoring system, **International Journal of Simulation: Systems, Science and Technology**, 17, 1-5, (2017).
- [9] Pachauri, R.K., Mahela, O.P., Khan, B., Kumar, A., Agarwal, S., Alhelou H.H. ve Bai, J., Development of arduino assisted data acquisition system for solar photovoltaic array characterization under partial shading conditions, **Computers and Electrical Engineering**, 92, 107175, 1-15, (2021).
- [10] Morón, C., Ferrández, D., Saiz, P., Vega G. ve Díaz, J.P., New prototype of photovoltaic solar tracker based on arduino, **Energies**, 10, 1–13, (2017).
- [11] Şentürk, A., Fotovoltaik modüllerin akım-gerilim eğrilerinin simülasyonunda kullanılacak olan yöntemin seçimi, **Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 20, 1–14, (2018).
- [12] Şentürk, A., Yeni Bir Yöntem İle Kristal Silisyum Tabanlı Fotovoltaik Modüllerin Elektriksel Performansının Hesaplanması Ve Sıcaklık Katsayılarının (İç Ve Dış) Performansa Olan Etkisinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Muğla Sıtkı Kocman University, Fen Bilimleri Enstitüsü, Muğla, (2016).
- [13] Jack, V., Salam, Z. ve Ishaque, K., Cell modelling and model parameters estimation techniques for photovoltaic simulator application : A review, **Applied**

- Energy**, 154, 500-519, (2015).
- [14] Tan, R.H.G., Tai P.L.J. ve Mok, V.H., Solar Irradiance Estimation Based on Photovoltaic Module Short Circuit Current Measurement, **IEEE International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Applications (ICSIMA)**, 26-27, (2013).
- [15] Sarı, U. ve Kırındı, T., Using Arduino in Physics Teaching: Arduino-based Physics Experiment to Study Temperature Dependence of Electrical Resistance, **Journal of Computer and Education Research**, 7, 698-710, (2019).
- [16] Arduino.pdf, (2022). <https://www.arduino.cc/> (17.05.2022).
- [17] Eke, R. ve Demircan, H., Performance analysis of a multi crystalline Si photovoltaic module under Mugla climatic conditions in Turkey, **Energy Conversion and Management**, 65, 580–586, (2013).
- [18] Paulescu, M., Badescu, V. ve Dughir, C., New procedure and field-tests to assess photovoltaic module performance, **Energy**, 70, 49-57, (2014) 49–57.
- [19] Eke, R. ve Senturk, A., Performance comparison of a double-axis sun tracking versus fixed PV system, **Solar Energy**, 86, 2665–2672, (2012).
- [20] Rus-Casas, C., Aguilar, J.D., Rodrigo, P., Almonacid, F. ve Pérez-Higueras, P.J., Classification of methods for annual energy harvesting calculations of photovoltaic generators, **Energy Conversion and Management**, 78, 527–536, (2014).