



The Design of a Mini Plant Factory with Artificial Lighting and Application of Environmental Conditions Control System

Ali Çaylı^{1,a,*}, Emir Hüseyin Kaya^{2,b}

¹Vocational School of Turkoglu, Kahramanmaraş Sutcu Imam University, 46880 Kahramanmaraş, Turkey

²Kahramanmaraş Teknokent, KSU Avsar Campus, 46050 Kahramanmaraş, Turkey

*Corresponding author

| ARTICLE INFO | ABSTRACT |
|--|---|
| <p><i>Research Article</i></p> <p>Received : 10/06/2019 Accepted : 25/10/2019</p> <p>Keywords: Mini-PFAL Environmental conditions control Hydroponic systems Greenhouse Artificial lighting</p> | <p>Due to rapidly increasing population and urbanization, agricultural lands are shrinking. However, environmental problems and pollution are constantly increasing. This poses a threat to agricultural production and food access. In order to overcome these threats, the use of fully controlled indoor production systems called plant factory is becoming widespread. The management of plant nutrition and monitor of environmental conditions is very important for production in the plant factory. Plant production is sensitive to environmental conditions. For this reason, it is necessary to make accurate measurements in order to ensure the correct climatic conditions. The high cost of control systems designed for this purpose is a problem for producers. In this study, a mini plant factory prototype and control system are presented which is developed by using open source hardware and software. In addition, the temperature, relative humidity and light measured by the low-cost sensors were compared with the reference devices and the system performance and stability were investigated.</p> |

Türk Tarım – Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi 7(11): 1834-1843, 2019

Yapay Aydınlatmalı Mini Bitki Fabrikası Tasarımı ve Çevre Koşulları Kontrol Sistemi Uygulaması[#]

| MAKALE BİLGİSİ | ÖZ |
|--|--|
| <p>[#]Bu makale, Emir Hüseyin Kaya tarafından hazırlanan yüksek lisans tezinden üretilmiştir.</p> <p><i>Araştırma Makalesi</i></p> <p>Geliş : 10/06/2019 Kabul : 25/10/2019</p> <p>Anahtar Kelimeler: Mini bitki fabrikası Çevre koşulları kontrolü Hidroponik sistemler Sera Yapay aydınlatma</p> | <p>Hızla artan nüfus ve kentleşme nedeniyle tarım arazileri küçülmektedir. Bununla birlikte çevre sorunları ve kirlilik de sürekli artmaktadır. Bu durum tarımsal üretim ve gıda erişimi için bir tehdit oluşturmaktadır. Bu tehditlerin aşılması amacıyla bitki fabrikası olarak adlandırılan tam kontrollü kapalı ortam üretim sistemlerinin kullanımı yaygınlaşmaktadır. Bitki fabrikalarında bitki besleme yönetimi ve çevre koşullarının izlenmesi oldukça önemlidir. Bitkisel üretim ortamları çevre koşulları açısından hassastır. Bu nedenle iklim koşullarının doğru olarak sağlanabilmesi için ölçümlerinde de hassasiyetle yapılması gerekir. Bu amaçla tasarlanmış kontrol sistemlerinin yüksek maliyetleri, üreticiler için bir sorun teşkil etmektedir. Bu çalışmada, bir mini bitki fabrikası prototipi ile açık kaynak donanım ve yazılım kullanılarak geliştirilen kontrol sisteminin tasarımı sunulmuştur. Ayrıca düşük maliyetli algılayıcılarla ölçülen sıcaklık, nispi nem ve ışık referans cihazlarla karşılaştırılarak sistemin performansı ve kararlılığı araştırılmıştır.</p> |

^a alicayli@ksu.edu.tr ^b <http://orcid.org/0000-0001-8332-2264> | ^a emirhuseyinkaya@hotmail.com ^b <http://orcid.org/0000-0002-2838-5446>



Giriş

Hızla artan nüfus ve kentleşme ile tarım arazilerinin küçülmesi, artan çevre sorunları ve kirlilik tarımsal üretim için tehdit oluşturmaktadır. Tüm bu sorunların yanında geri dönülemez noktaya gelen küresel ısınma sonucu değişen çevresel koşullar ve buna bağlı iklim değişikliği nedeniyle mevcut tarımsal üretim alanlarının gelecekte bölgesel olarak değişiklikler gösterecek olması insanların beslenme ihtiyaçlarının yeterince karşılanamamasına neden olabilir. Bununla birlikte, gıda kıtlığı hem doğal hem de insan yapımı olan, çoğu zaman kontrolümüz dışında olan çeşitli faktörlerden kaynaklanmaktadır. Doğal afetler, gençlerin tarım dışındaki alanlarda çalışma eğilimi sonucu genç tarım işçisi eksikliği, bölgesel çatışmalar veya savaşlar gibi nedenler gıda üretiminin yavaşlamasına veya durmasına yol açmaktadır (Anpo ve ark., 2019). Küresel ısınma ve etkileri kapalı alanlardaki yetiştirme sistemlerini cazip hale getirmektedir (Rosenzweig ve Liverman, 1992). Mevcut bitkisel üretim sistemleri çevre kaynaklarının aşırı tüketimine ve iklim değişikliğine katkıda bulunmakta, çevre ve yer altı sularının kirliliğine neden olmaktadır (Pearson, 2007).

Tüm bu olumsuzluklara karşı dünyayı beslemek, ekolojik dengeyi korumak ve ekonomik büyümeyi desteklemek ve verimli bitkisel üretim için yapay aydınlatmalı bitki fabrikası (YABF) olarak adlandırılan yeni bir tarımsal üretim sistemi önerilmiştir (Kozai, 2013). Tarımsal üretimin gelecekteki yönü olan bitki fabrikası, ileri teknoloji ve kaynakların verimli kullanımı ile kaliteli ve yüksek verim elde etmek için birçok avantaja sahiptir (Zheng, 2019).

Kentsel tarımın ticari uygulamalarında en yaygın kullanılan tarımsal üretim sistemi topraksız kültürde (hidroponik) yetiştiricilik, bitki fabrikalarında da tercih edilmektedir. Hidroponik bitki yetiştirme sistemi sayesinde arazi gereksinimi %75 ve su kullanımı ise %90 oranında azalmaktadır. Bitkinin ihtiyaç duyduğu besin maddeleri doğrudan bitki kök bölgesine verildiğinden çevreye hiçbir kalıntı bırakılmamakta ve yabancı ot sorunu olmadığından tarımsal ilaçların kullanımı da azalmaktadır (Bradley ve Marulanda, 2000). Verim açısından değerlendirildiğinde ise topraksız yetiştirilen bitkilerin verimi ve kalitesi genellikle topraklı koşullarda yetiştirilenlerden daha yüksektir (Pardossi ve ark., 2017).

Topraksız tarımda toprağa ihtiyaç duyulmamasına rağmen güneş yani ışık vazgeçilmez bir kaynaktır. Gelecekte ortaya çıkacak çevresel sorunların etkisi, topraksız tarım sisteminin çevreden tamamen bağımsız olarak yapılması fikrini ortaya çıkarmıştır. Gelişen teknoloji ile yeni aydınlatma sistemlerinin geliştirilmesi ve özellikle LED teknolojisindeki gelişmeler son yıllarda yapay aydınlatmalı çevre kontrollü bitki yetiştirme sistemlerinin yaygınlaşmaya başlamasına neden olmuştur.

Yapay aydınlatmalı bitki fabrikası (YABF) terimi, termal olarak yalıtılmış ve dış ortamdan izole, depo benzeri yapıya sahip bir bitki üretim tesisini ifade eder. YABF Japonya ve diğer Asya ülkelerinde yapraklı yeşilliklerin ve diğer bitkilerin ticari üretimi için kullanılmaktadır (Kozai ve Niu, 2016). Derin akış tekniği, besin filmi tekniği veya aeroponik sistemler gibi topraksız sistemler, YABF için gerekli araçlardır (Son ve ark., 2016).

Bu topraksız gıda üretim sistemleri, uygun koşullar sağlanan bir şehirde herhangi bir yerde kurulabilmektedir. Ticari büyüklükteki YABF'larının yanında dış mekanlarda bitki yetiştirme imkânı az olan şehirlerde yaşayanlar için mini-YABF sistemi geliştirilmiştir. Mini-YABF sistemleri, bina sakinlerinin iç mekânda tarımla uğraşması için eğlenceli bir ortam sağlamaktadır. Mini-YABF'ları ayrıca insanlara taze ürünler ve ilginç etkinlikler sunmak için eğitim, restoran, ofis ve hastane ortamları için uygun bir araçtır. Bu nedenle, mini-YABF'ları, pek çok ülkede şehirde yaşayan vatandaşların yaşam kalitesini iyileştirmesi nedeniyle popülerlik kazanmıştır (Kozai ve Niu, 2016). Aynı zamanda birçok bilimsel çalışmada da kullanılmıştır (Chen ve ark., 2013; Katayama, 2013; Kim ve ark., 2013; Hendrawan ve ark., 2014; Zhang ve ark., 2016; Jiang ve ark., 2018; Hang ve ark., 2019; Kim ve ark., 2019).

YABF'larının büyüklüğü arttıkça, işgücü tasarrufu ve verimlilik artmaktadır. Ekipmanlar ve otomasyon makineleri kültürel süreçte bir araç olarak kullanılmasının yanında nesnelere interneti teknolojisi benimsenerek daha verimli sistem geliştirme çalışmaları yürütülmektedir (Nakamura, 2019). Bu teknoloji geleneksel çiftçilikten modern çiftçiliğe geçiş için bir araç olacaktır. Modern tarımın sürdürülebilir kalkınmasını teşvik etmek için hızla teknoloji kullanımının yaygınlaştırılması gerekmektedir (Çaylı ve ark., 2017).

Ancak hızla yükselen teknolojik yenilikler bazı zorlukları da beraberinde getirmektedir. Bu teknolojilerin tarımda üretimi artırmak ve kolaylık sağlamak için uygulanması, teknik bilgi eksikliği, sistemlerin yüksek maliyetleri ve ayrıca yeni teknolojik sistemler için isteksizlik olan üreticilerden yeterince ilgi görmemektedir (Çaylı, 2019). Buna rağmen bir YABF'nda birçok sensör kurmak ve gerçek zamanlı olarak çevresel verileri toplamak mümkündür. Bu toplanan büyük verilerin bir veri tabanı oluşturularak gerçek zamanlı olarak işlenmesi ile bitki yetiştiriciliği için en uygun çevresel koşullar sağlanabilir (Sugano, 2019).

YABF'larında kullanılan malzemeler henüz standartlaştırılmamıştır. Otomasyon için gerekli genel ekipmanların da maliyeti yüksektir ve birçok YABF'da otomasyon ekipmanları kullanılmamaktadır (Shimizu ve ark., 2016). Bu nedenle kontrol, izleme ve otomasyon sistemlerinde açık kaynak ve düşük maliyetli donanım ve yazılım çözümlerinin kullanılması daha cazip olmaktadır.

Açık kaynak yazılımların popüleritesi son yıllarda hızla artmaktadır. Açık kaynak felsefesi, ilk olarak 1984'te Richard Stallman tarafından GNU projesi kapsamında tanıtılmış ve sonraki yıllarda da birçok yazılım açık kaynak olarak lisanslanmaya başlamıştır. Açık kaynak yazılım yerine 1998 yılında "özgür yazılım" terimi kullanılmaya başlanmıştır. Aynı yıl, açık kaynak alanında (publicware.org) kamu yararına hizmet vermek amacıyla Açık Kaynak Girişimi kurulmuştur (Çaylı ve ark., 2018). Özgür yazılım, kullanıcıların özgürlüğüne ve topluma saygı duyan yazılım anlamına gelir. Kabaca, kullanıcıların yazılımı çalıştırma, kopyalama, dağıtma, inceleme, değiştirme ve geliştirme özgürlüğüne sahip olduğu anlamına gelmektedir (Stallman, 2015). Bu felsefe, işletim sistemleri ve ürünler açısından çok sayıda yeniliğe yol açmıştır. Linus Torvalds tarafından başlatılan ücretsiz açık kaynak kodlu işletim sistemi (GNU/Linux), bu gelişmeyi desteklemede

önemli bir etki oluşturmuş ve bunu pek çok girişim takip etmiştir (Adenle ve ark., 2012). Açık kaynak donanım ise (OSHW, 2018) tarafından “herkese açık olarak tasarlanması nedeniyle yeniden değiştirilebilir, dağıtılabılır ve satılabilir” bir donanım olarak tanımlanmaktadır.

Topraksız kültür, diğer bitkisel üretim sistemleri ile karşılaştırıldığında çevre koşullarının daha dikkatli kontrol edilmesini gerektirmektedir. Bu sebeple kontrol donanımları ve bu donanımı harekete geçirecek yazılımların hassas ve kararlı bir şekilde çalışması oldukça önemlidir.

Kontrollü üretim veya bitki fabrikası gibi bitkisel üretim sistemlerinin çevre koşulları, çeşitli kültürel işlemler ve transpirasyon gibi bitki faaliyetleri ve dış iklim koşulları nedeniyle ani değişiklikler gösterebilir. Bu durumda ölçülmesi gereken en kritik değişkenlerden birisi sıcaklıktır. Hava sıcaklığı, yaprak sıcaklığı ve hatta besin çözeltisi sıcaklığı, bitkinin fizyolojik aktivitesini etkileyebilir. Ayrıca, bitki sıcaklığının ölçülmesi ve hava sıcaklığı ile karşılaştırılması, bitkinin streste olup olmadığını gösterir (Niu ve ark., 2016).

Bu nedenle kontrol ve otomasyon sistemlerinin temel elemanı olan sensörlerin ölçüm doğrulukları ve performansları, kaliteli ve yüksek verim için önemlidir.

Bu çalışmada, dış ortam iklim koşullarından bağımsız olarak kapalı ortamda hidroponik kültür ile bitkisel üretim yapılabilmesine olanak sağlayacak açık kaynak donanımlar kullanılarak geliştirilen bir mini-YABF tasarlanmıştır. Ayrıca mini-YABF veri toplama sistemine veri sağlayan sistemin ve çevresel koşulların denetlenmesini sağlayan alt sistemlerin performansları araştırılmıştır. Aynı zamanda çeşitli sensörlerle ölçülen sıcaklık, nispi nem, ışık gibi çevresel koşullar, referans cihazlarla istatistiksel olarak karşılaştırılarak sistemin kullanılabilirliği değerlendirilmiştir.

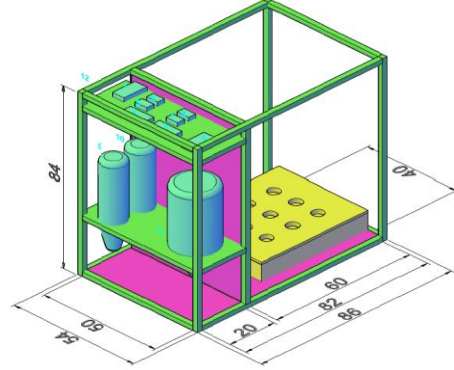
Materyal ve Metot

Bitki yetiştirme ortamı olarak mini-YABF imal edilmiş ve kullanılmıştır. Dış çerçevesi delikli çelik profilden yapılmış olan YABF’in, yüksekliği 0,84 m, toplam genişliği ise 0,80 m’dir. Bitki yetiştirme bölmesi 0,60 m genişliğindedir. Bitki besleme ve diğer donanımlar için 0,20 m genişliğinde bir alan bırakılmıştır. Donanım bölmesi ise dikey olarak 3 bölmeden oluşmaktadır. En üst bölmede kontrol donanımları ve güç kaynağı bulunmaktadır. Orta bölme 0,40 m yüksekliğindedir ve bitki besleme stok çözelti tankı, yoğun çözelti tankı ve pH düzenleyici sıvı tankı bu bölmeye yerleştirilmiştir. Bitki yetiştirme bölmesinin yan duvarları 1 cm kalınlığında MDF ahşap malzemeden imal edilmiş ve çelik çerçeveye vidalanmıştır. Bu bölmedeki LED aydınlatma, farklı bitki büyüme seviyeleri için yüksekliği ayarlanabilir şekilde monte edilmiştir. Ön duvarda ise 0,55×0,55 m boyutlarında bir pencere bırakılmış ve bu alan 3,0 mm kalınlığında 0,60×0,60 m boyutlarında şeffaf akrilik malzemeden, açılıp kapanabilen bir kapak ile kapatılmıştır. YABF’ına ait teknik çizim ve genel görünümü Şekil 1’de verilmiştir.

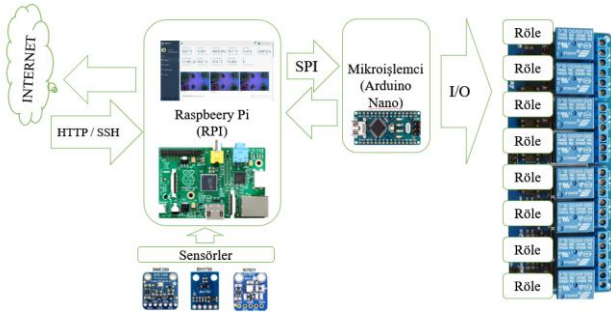
Tasarlanan sistemde iki farklı açık donanım Arduino Nano mikroişlemci kartı kullanılmıştır. Bunlardan birisi rölelerin kontrol edilmesi ve bazı sensör verilerinin okunması amacıyla, diğeri ise verilerin depolanması ve İnternet ağı üzerinden verilere erişim ve sistemin kontrol edilmesi amacıyla kullanılmıştır.

Donanım ve Sensörler

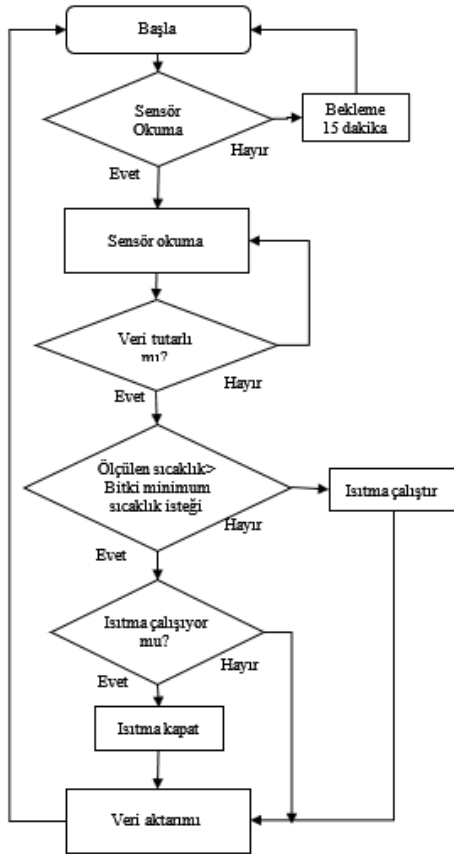
Çalışmada rölelerin kontrol edilmesi için Arduino Nano mikro işlemci kartı kullanılmıştır. Bu kart 16 MHz saat hızında çalışabilmektedir. Ayrıca 14 adet dijital, 8 adet analog giriş-çıkış portuna, 32 KB flash, 2KB SRAM ve 1 KB EEPROM hafızaya sahiptir. Giriş voltajı 6-20 V, çalışma voltajı 5 V’tur.



Şekil 1 Yapay aydınlatmalı mini bitki fabrikası teknik çizimi ve genel görünüm
Figure 1 Technical drawing and general views of the mini plant factory with artificial lighting



Şekil 2 Veri toplama ve kontrol donanımı sistem modeli
Figure 2 Data acquisition and control hardware system model



Şekil 3 Sensör veri okumasına dayalı ısıtma sistemi yazılım modülü akış şeması

Figure 3 Heating system software module flow chart based on sensor data reading

Verilerin depolanması ve arayüz yazılımının çalıştırılması için Raspberry pi (RPI) geliştirme kartı kullanılmıştır. Bu kart ARM1176JZFS 700 MHz Broadcom BCM2835 mikroişlemci ve 512 MB RAM ile bir mini bilgisayardır ve işletim sistemi olarak Linux tabanlı işletim sistemlerinin yanında yeni sürümlerinde BSD ve Windows işletim sistemi de desteklenmektedir. RPI üzerinde iki adet USB 2.0 portu, HDMI video, 10/100 RJ45 ethernet ve SD kart yuvası vardır. Ayrıca, 8 adet genel amaçlı giriş-çıkış (GPIO) bağlantısı sayesinde UART, I²C (Inter-Integrated Circuit) ve SPI veri yolu bağlantısını gerçekleştirebilir. Güç ihtiyacı ise 5.0 volt 700 mA'dır. Çalışmada RPI donanım versiyonu "Raspberry Pi Model B Rev 2" olan kart ve "Raspbian GNU/Linux 9 (stretch)" işletim sistemi kullanılmıştır. Tasarlanan sistem modeli Şekil 2'de verilmiştir.

Oransal nem ölçümlerinde SI7021 (Silicon Labs, TX, USA) sensörü kullanılmıştır. Bu sensör oransal nemin yanında sıcaklık ölçümleri de yapabilmektedir. Sensör, 1,9-3,6V arasında giriş voltajı ile çalışabilmektedir. Oransal nemi okuma aralığı %0-100 arasındadır. Ölçümleri $\pm 3\%$ doğruluk oranında yapabilmektedir. I²C ara yüzü ile verilere erişilebilmektedir. Güç tüketimi ise aktif durumda 150 μ A, bekleme durumunda ise 60 nA'dır. Atmosferik basınç, oransal nem ve sıcaklık ölçümleri için BME280 (Bosch Sensortec GmbH, Reutlingen, GERMANY) sensörü de çalışmada test edilmiştir. Bu sensör, katalog bilgilerine göre ölçümlerini $\pm 3\%$, basıncı ± 1 hPa mutlak hassasiyetle ve sıcaklık ise $\pm 1,0^\circ\text{C}$ doğrulukla ölçebilmektedir (Bosch, 2019).

Aydınlatma şiddeti ölçümleri için BH1750 (ROHM Semiconductor, Kyoto, JAPAN) sensörü kullanılmıştır. Bu sensör 0-65536 lümen aralığında aydınlatma şiddetini ölçebilmektedir. Çalışma gerilimi 2,4-3,6V arasındadır ve I²C ara yüzünden doğrudan dijital çıkış vermektedir.

Yapay Aydınlatma

Çalışmada her biri 2,4 W gücünde kırmızı, mavi ve beyaz renklerde ışık veren toplam 40 Adet COB (Chips on Board) LED kullanılmıştır. Yapay aydınlatma için bu sayede toplam 96 W aydınlatma gücü ve 8000 lümen aydınlatma şiddeti elde edilebilmiştir. LED'ler bitkilerden 0,40 m yükseklikte ve bitki büyüme sürecinde yüksekliği ayarlanabilir şekilde prototipin tavanına yerleştirilmiştir. Aynı zamanda ek aydınlatma için RGB şerit LED'lerde kullanılmıştır.

Veri Toplama Yazılımı

Üretim periyodu boyunca sensör okuma periyodu 15 dakika olarak belirlenmiş ve bu zaman aralığında sensörlerden okuma yapılmıştır. Sensör ölçümlerine dayalı olarak havalandırma, nemlendirme, ısıtma ve bitki besleme işlemlerinin yapılması sağlanmıştır. Bu işlemler için örnek bir algoritma Şekil 3'te verilmiştir.

Sensör verilerinin toplanması için Python 2.7 programlama dili ile geliştirilen yazılım (*sensoroku.py*) RPI üzerinde sistem servisi olarak çalıştırılmıştır. Bu yazılım sayesinde sıcaklık, oransal nem, aydınlatma, sıvı seviyesi, EC ve pH sensörlerinden belirlenen zaman aralıklarında veriler okunmuştur. Okunan verilerin tutarlılığı kontrol edildikten sonra veri tabanına kaydedilmiştir. Ayrıca sistem günlüklerine, *Python logging* modülü kullanılarak gerçekleşen olaylar ve sensör okuma durumu hakkında kayıtlar eklenmiştir. Yazılımın geliştirilmesinde *smbus*, *os*, *subprocess*, *time*, *MySQLdb*, *gpiozero*, *glob* ve *logging* Python modülleri kullanılmıştır (Şekil 4).

Kontrol Yazılımı

Mikroişlemci kontrol kartı için ihtiyaç duyulan yazılım, C++ programlama dili ve Arduino 1.8.5 kod yazma aracı kullanılarak geliştirilmiştir. Bu yazılımın temel işlevi kendisine gönderilen komutları işleyerek istenen işlemi (Röle açma-kapama, LED kontrolü, resetleme) yerine getirmektir. Yazılımda, I²C/TWI (Two Wire Interface) cihazları ile iletişim kurmayı sağlayan "Wire" kütüphanesi kullanılmıştır. Arduino kartları, SDA (veri hattı) ve SCL (saat hattı) pinleri üzerinden diğer cihazlarla iletişim kurulabilmektedir.

Yazılım işlevleri ve komut seti Çizelge 1'de, akış şeması Şekil 5'de verilmiştir.

Çizelge 1 P²C kontrol yazılımı parametreleri

Table 1 P²C control software parameters

| Alt parametreleri | ÖKP |
|------------------------------------|--|
| Parametre=1, Görev RGB LED kontrol | |
| P1: Kırmızı yoğunluğu (1-255) | 1 255 255 0 |
| P2: Yeşil yoğunluğu (1-255) | |
| P3: Mavi yoğunluğu (1-255) | |
| Parametre=2, Röle kontrol | |
| P[DD]: (10.20.30.40.50.60.70.80) | 2 21 (2 no'lu röle kapalı) 2 30 (3 no'lu röle açık) |
| Parametre=2, Resetleme | |
| - | 3 0 0 0 |

ÖKP: Örnek komut parametreleri

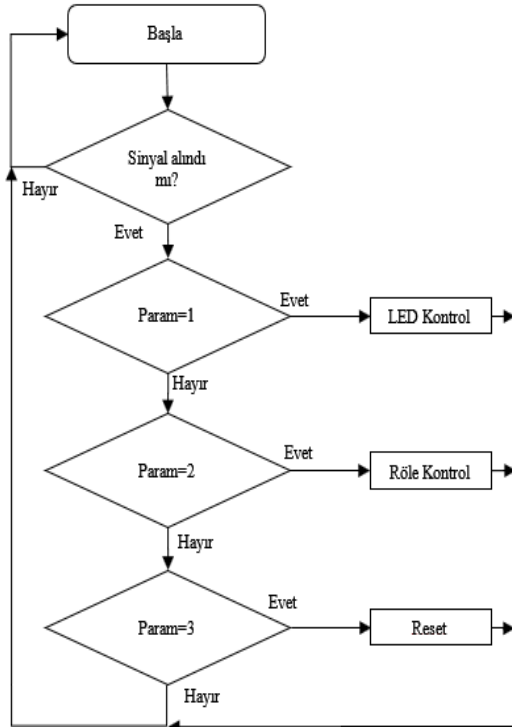
```

1 #!/usr/bin/python
2 import sys
3 import os
4 import time
5 import datetime
6 import signal
7 import sys
8 from time import sleep
9 from time import sleep
10 import sys
11 import sys
12 import sys
13 logging.basicConfig(level=logging.DEBUG, format='%(asctime)s - %(message)s', datefmt='%m-%d-%Y %H:%M:%S', filename='~/log/~/log.log', filemode='a')
14 while True:
15     try:
16         time.sleep(1)
17         s1 = datetime.datetime.now()
18         if s1.minute < 5: # 5 no'lu saat s1.minute < 5
19             s2 = datetime.datetime.now()
20             if s2.minute < 5: # 5 no'lu saat s2.minute < 5
21                 # led = led_on()
22                 # led = led_off()
23                 # led = led_on()
24                 # led = led_off()
25                 # led = led_on()
26                 # led = led_off()
27                 # led = led_on()
28                 # led = led_off()
29                 # led = led_on()
30                 # led = led_off()
31                 # led = led_on()
32                 # led = led_off()
33                 # led = led_on()
34                 # led = led_off()
35                 # led = led_on()
36                 # led = led_off()
37                 # led = led_on()
38                 # led = led_off()
39                 # led = led_on()
40                 # led = led_off()
41                 # led = led_on()
42                 # led = led_off()
43                 # led = led_on()
44                 # led = led_off()
45                 # led = led_on()
46                 # led = led_off()
47                 # led = led_on()
48                 # led = led_off()
49                 # led = led_on()
50                 # led = led_off()
51                 # led = led_on()
52                 # led = led_off()
53                 # led = led_on()
54                 # led = led_off()
55                 # led = led_on()
56                 # led = led_off()
57                 # led = led_on()
58                 # led = led_off()
59                 # led = led_on()
60                 # led = led_off()
61                 # led = led_on()
62                 # led = led_off()
63                 # led = led_on()
64                 # led = led_off()
65                 # led = led_on()
66                 # led = led_off()
67                 # led = led_on()
68                 # led = led_off()
69                 # led = led_on()
70                 # led = led_off()
71                 # led = led_on()
72                 # led = led_off()
73                 # led = led_on()
74                 # led = led_off()
75                 # led = led_on()
76                 # led = led_off()
77                 # led = led_on()
78                 # led = led_off()
79                 # led = led_on()
80                 # led = led_off()
81                 # led = led_on()
82                 # led = led_off()
83                 # led = led_on()
84                 # led = led_off()
85                 # led = led_on()
86                 # led = led_off()
87                 # led = led_on()
88                 # led = led_off()
89                 # led = led_on()
90                 # led = led_off()
91                 # led = led_on()
92                 # led = led_off()
93                 # led = led_on()
94                 # led = led_off()
95                 # led = led_on()
96                 # led = led_off()
97                 # led = led_on()
98                 # led = led_off()
99                 # led = led_on()
100                # led = led_off()

```

Şekil 4 Alt sistemler veri toplama yazılım kodları ekran görüntüsü

Figure 4 Screenshot of subsystems data acquisition software codes



Şekil 5 Mikroişlemci kontrol yazılımı algoritması

Figure 5 Microprocessor control software algorithm

Web Arayüz Yazılımı

Tasarlanan sistemin İnternet ağı üzerinden kontrol edilmesi, sistemin izlenmesi ve toplanan verilerin analiz edilmesi için RPI üzerinde çalışan bir web yazılımı geliştirilmiştir. Yazılımın geliştirilmesinde (PHP, 2017) programlama dili, verilerin depolanması için (MariaDB, 2019) veritabanı yazılımı kullanılmıştır. Web tasarımı

mobil cihazlara da uygun (*responsive css*) olarak yapılmıştır. Bu sayede cep telefonu ve tablet gibi mobil cihazlardan da sistemin kontrol edilmesi mümkün olabilmektedir. Geliştirilen web yazılımı modüler bir yapıda tasarlanmış olup kullanıcı yönetimi ve gözlem modülü (ana ekran), vejetasyon, raporlama ve ayarlar olmak üzere 4 modülden oluşmaktadır. Sistemin ekran görüntüleri Şekil 6'da verilmiştir.

Kullanıcı yönetimi modülünde, sistemde oturum açma, kişisel bilgilerin güncellenmesi işlemleri yapılmaktadır. Sistemde tanımlanan kullanıcılar, kullanıcı adı ve bir parola ile sisteme giriş yapabilmektedirler (Şekil 6a). Sistemde izleyici ve yönetici kullanıcı olmak üzere iki rol tanımlanmıştır. Yönetici rolü, vejetasyon başlatma-durdurma, donanımı kontrol etme, aydınlatma ve sulama işlemleri başlatma veya durdurma gibi tüm işlemleri yapma yetkisine sahiptir. İzleyici rolünde ise sadece iklim parametrelerinin izlenmesi ve iç ortamın görüntülenmesi işlemleri yapılabilmektedir.

Sistemde oturum açıldıktan sonra yazılımın ana ekranına ulaşılmaktadır. Bu ekranda sıcaklık, oransal nem, aydınlatma şiddeti gibi güncel çevre koşulları bilgileri gösterilmekte ve her 10 saniyede bir güncellenmektedir (Şekil 6b).

Vejetasyon modülünde ise yeni bir yetiştirme programının tanımlanması, devam eden vejetasyonların görüntülenmesi/düzenlenmesi ve bitki tanımlanması işlemleri yapılmaktadır (Şekil 6c). Yeni bir vejetasyon tanımlarken vejetasyon için tanımlayıcı ad, açıklama, bitki türü, başlama zamanı, bitiş zamanı ve durum alanları girilmektedir. Aynı ekran üzerinde devam eden bir vejetasyon olup olmadığı bilgisi ile kullanıcı uyarılmaktadır. Devam eden vejetasyon varsa, devre dışı bırakılıp yeni eklenen vejetasyonun aktif olması için de bir seçenек kutusu eklenmiştir. Sisteme eklenen vejetasyonun girilen zaman aralığında sistem tarafından otomatik olarak seçilen bitki istekleri doğrultusunda çalışmaktadır. Aynı zamanda girilen bilgiler sistemin veri tabanında kaydedilmekte ve daha sonra raporlar menüsünden görüntülenebilmektedir.

Vejetasyon menüsü altından ulaşılabilen bitki tanımlama modülü (Şekil 6d) ise havalandırma, ısıtma, soğutma, pH ve EC değerlerinin kontrol edilmesi, yapay aydınlatma gibi sistemin ana işlemlerinin yerine getirilmesinde ihtiyaç duyulan temel parametrelerin girildiği menüdür. Burada yeni bir bitki eklenirken bitki adı, Latince adı, bitki hakkında kısa bilgi girişinin yapılması gerekmektedir. Ayrıca vejetasyon süresince sistem tarafından uygulanacak bitki iklim istekleri de bu modül üzerinden tanımlanmaktadır. Bu parametreler sıcaklık, oransal nem, elektriksel iletkenlik, pH, tarla kapasitesi, vejetasyon süresi ve fotoperiyodizmdir.

Web ara yüzü üzerinden vejetasyon süresince gerçekleşen iklim bilgileri raporlama modülü ile analiz edilebilmektedir (Şekil 6e). Bu modülde her bir sensör için seçilen tarih aralığında veriler, sensörlerden okunduğu şekliyle görüntülenebildiği gibi aynı zamanda saatlik, günlük, aylık ortalamalar şeklinde de görüntülenebilmektedir. Ayrıca bu modülde saatlik, günlük ve aylık olarak maksimum ve minimum ortalamalar değeri hesaplanmaktadır. Verilerin görüntülenmesinde grafik ve dışarı aktarma olarak iki seçenек bulunmaktadır. Bunlardan grafiğin seçilmesi durumunda seçilen sensör verilerinin seçilen tarih aralığında grafikleri oluşturulmaktadır. Eğer istenirse birden fazla sensör seçilerek bu sensörler aynı grafik üzerinde karşılaştırmalı olarak analiz edilebilmektedir. Aynı zamanda sensörler arasında bu ilişkiler

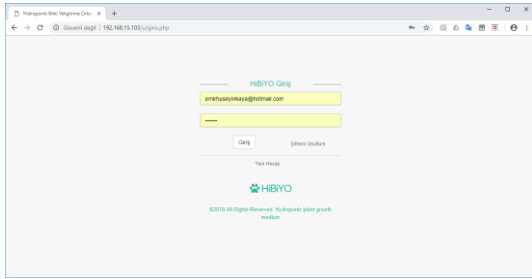
için lineer regresyon analizi yapılabilmekte, regresyon grafiği ve denklemi grafik üzerinde oluşturulabilmektedir (Şekil 6f).

Raporlama modülünde, prototip üzerine yerleştirilen kameradan her 30 dakikada alınan fotoğraflara erişim için "Fotoğraflar" menüsü kullanılmaktadır. Bu menüden istenilen tarihteki fotoğraflar listelenmektedir. Bu fotoğraflar ile geçmişe doğru bitki gelişimleri gözlenebilmekte ve analizler yapılabilmektedir (Şekil 6g).

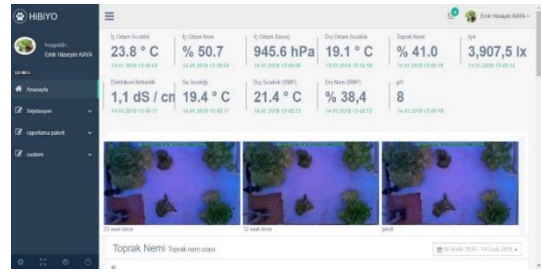
Ayarlar modülünde ise sistemin genel ayarları ile bazı alt sistemlerin manuel olarak çalıştırılmasına olanak sağlayan araçlar bulunmaktadır (Şekil 6h). Bu araçlar ile bitki besleme pompası, havalandırma, yoğun besin çözeltisi kontrol vanasının çalışma durumu kontrolü ve manuel olarak çalıştırılması mümkündür. Aynı zamanda periyodik fotoğraflama dışında istenilen anda fotoğraf güncelleme aracı ile ana sayfa fotoğrafı da bu menüden güncellenebilmektedir.

Işık miktarı (belirli bir zaman dilimindeki yoğunluk) ve kalite (spektral dağılım), bitki büyümesi üzerinde

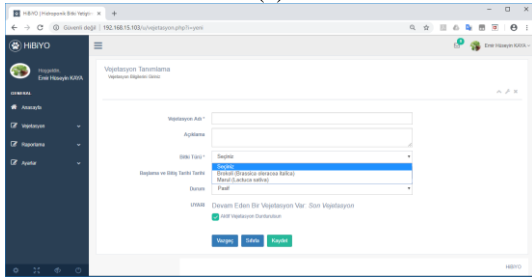
belirleyici etkiye sahiptir (Dorais, 2003). Fotosentetik Aktif Radyasyon (PAR), 400 ve 700 nm arasında dalga boyları olarak kabul edilen, bitkilerin fotosentezi için faydalı dalga boylarında radyasyon tanımlamak için kullanılan bir kavramdır (Sager ve McFarlane, 1997). Daha kısa dalga boylarında, fotonlar çok fazla enerji taşır ve bitki hücrelerine zarar verebilir. Daha uzun dalga boylarındaki enerji ise, fotosentezi tetiklemek için yetersizdir (Benis ve ark., 2017). PAR, fotosentez için doğal ve yapay veya ışığın mevcut olduğu her bir zaman periyodunda bir bitkiye ulaşan fotonların toplam sayısının kümülatif ölçümü olarak $mol.m^{-2}.gün$ cinsinden ifade edilir ve Günlük Işık İntegrali (DLI) olarak da adlandırılır (Benis ve ark., 2017). PAR ölçümleri için piyasada bulunan sensörler yüksek maliyetli olduğundan, tasarlanan sistemde düşük maliyetli ve aydınlatma şiddetini ölçen BH1750 sensörler kullanılmıştır. Bu sebeple ihtiyaç duyulan PAR değerine karşılık gelen aydınlatma şiddeti lüks olarak ölçülmüş ve (Apogee, 2019)'e göre dönüşümler yapılmıştır.



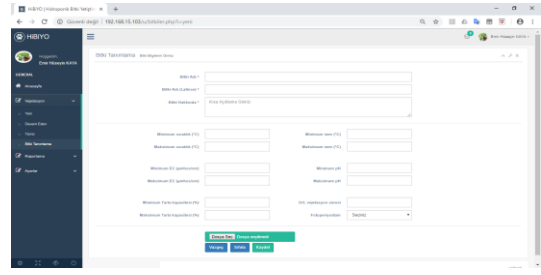
(a)



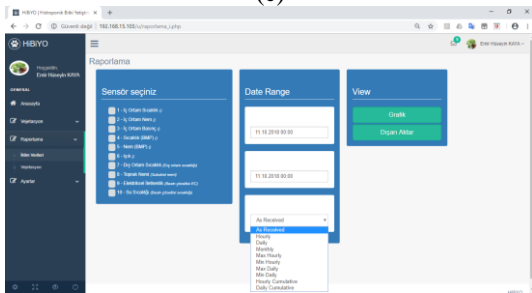
(b)



(c)



(d)



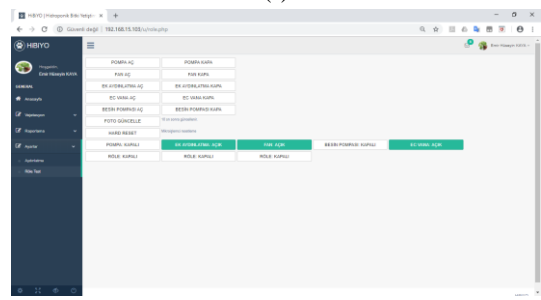
(e)



(f)



(g)



(h)

Şekil 6 Web arayüz yazılımı ekran görüntüleri
Figure 6 Screenshots of the web interface software

Daha önceden tanımlı olan bitki istekleri doğrultusunda ihtiyaç duyulan aydınlatma şiddeti sensör değerleri ile karşılaştırılmış ve ihtiyaç olması durumunda kontrol yazılımı tarafından ek aydınlatma yapılmıştır. Ayrıca iç ortamda ölçülen aydınlatma şiddeti 15 dakika aralıklarla kaydedilmiştir.

Sistemin Çalışma Performansı ve Sensör Doğruluklarının Araştırılması

Sistemin çalışma performansının belirlenmesi için araştırma döneminde marul bitkisi yetiştirilmiştir. Test süresince belirlenen zaman aralıklarında sensörlerin kesintisiz veri toplaması izlenmiştir. Sensörlerin ölçüm doğruluklarının belirlenmesi için HOB0 U12 (Onset,MA,USA) referans cihaz ile 48 saat boyunca 5 dakika aralıklarla kaydedilen veriler, sensör verileri ile karşılaştırılmıştır.

Bulgular ve Tartışma

Tasarlanan sistemde 31 Mart 2018 – 30 Mayıs 2018 tarihleri arasında durgun su yetiştirme yöntemi ile marul yetiştirilmiş ve sistem test edilmiştir. Bu dönem içerisinde sensörlerin veri okuma performansları gözlenmiş ve elde edilen veriler referans cihazı ile karşılaştırılmıştır. Bu amaçla Bağımlı Örneklem (Paired Sample) T testi yapılmış ve sıcaklık ölçümlerine ilişkin sonuçlar Çizelge 2’de verilmiştir.

Çizelge incelendiğinde sistemde kullanılan SI7021 sensörü ile referans sensör ölçümleri ortalamaları arasında önemli bir fark olmadığı görülmektedir ($P>0,05$). Çaylı ve ark. (2018) açık kaynak donanımlarla yaptığı çalışmada SI7021 sensörü için maksimum hatanın %2,5’ten küçük olduğunu ve güvenle kullanılabileceğini bildirmiştir. Bulgular (Çaylı ve ark., 2018) tarafından verilen sonuçlarla benzerlik göstermektedir. Ancak BME280 sensörü ile yapılan ölçümlerin ortalamaları ile referans cihaz ölçümleri ortalamaları arasındaki farkın istatistiksel olarak önemli olduğu görülmektedir ($P<0,001$).

Oransal nem ölçüm değerleri ile referans cihaz ölçüm değerleri arasındaki ilişkilerde araştırılmış ve analiz sonuçları Çizelge 3’te verilmiştir. Çizelge 3 incelendiğinde referans ölçüm ile SI7021 sensörü ölçümlerinin ortalamaları arasında arasındaki farkın önemsiz ($P>0,05$), BME280 sensörü ile yapılan ölçümler ile referans ölçüm ortalamaları arasındaki farkın ise önemli olduğu görülmektedir ($P<0,001$).

Aydınlatma şiddeti ölçümü için kullanılan sensör ile referans aydınlatma ölçüm sensörüne ait istatistik analiz sonuçları Çizelge 4’te verilmiştir. Çizelge 4 incelendiğinde ölçülen değerler ile referans ölçüm değerleri ortalamaları arasındaki farkın da önemli olduğu görülmektedir ($P<0,001$).

Çizelge 2 Sıcaklık ölçüm değerleri istatistiksel analiz sonuçları

Table 2 Statistical analysis results of temperature measurement values

| Sensörler | Ortalama | Std. Sapma | Std. Hata Ort. | 95% Güven aralığında fark | | T | df | P |
|--------------------|----------|------------|----------------|---------------------------|----------|---------|-----|-------|
| | | | | Alt | Üst | | | |
| Referans ve SI7021 | -0,02682 | 0,37880 | 0,02158 | -0,06929 | 0,01565 | -1,242 | 307 | 0,215 |
| Referans ve BME280 | -2,11747 | 0,68022 | 0,03876 | -2,19374 | -2,04120 | -54,631 | 307 | 0,000 |

Çizelge 3 Oransal nem sensör ölçüm değerleri istatistiksel analiz sonuçları

Table 3 Statistical analysis results of relative humidity sensor measurement values

| Sensörler | Ortalama | Std. Sapma | Std. Hata Ort. | 95% Güven aralığında fark | | T | df | P |
|--------------------|----------|------------|----------------|---------------------------|----------|---------|-----|-------|
| | | | | Alt | Üst | | | |
| Referans ve SI7021 | 0,00909 | 0,32554 | 0,01855 | -0,02741 | 0,04559 | 0,490 | 307 | 0,624 |
| Referans ve BME280 | 10,94234 | 1,47084 | 0,08381 | 10,77743 | 11,10726 | 130,563 | 307 | 0,000 |

Çizelge 4 Aydınlatma şiddeti ölçüm değerleri istatistiksel analiz sonuçları

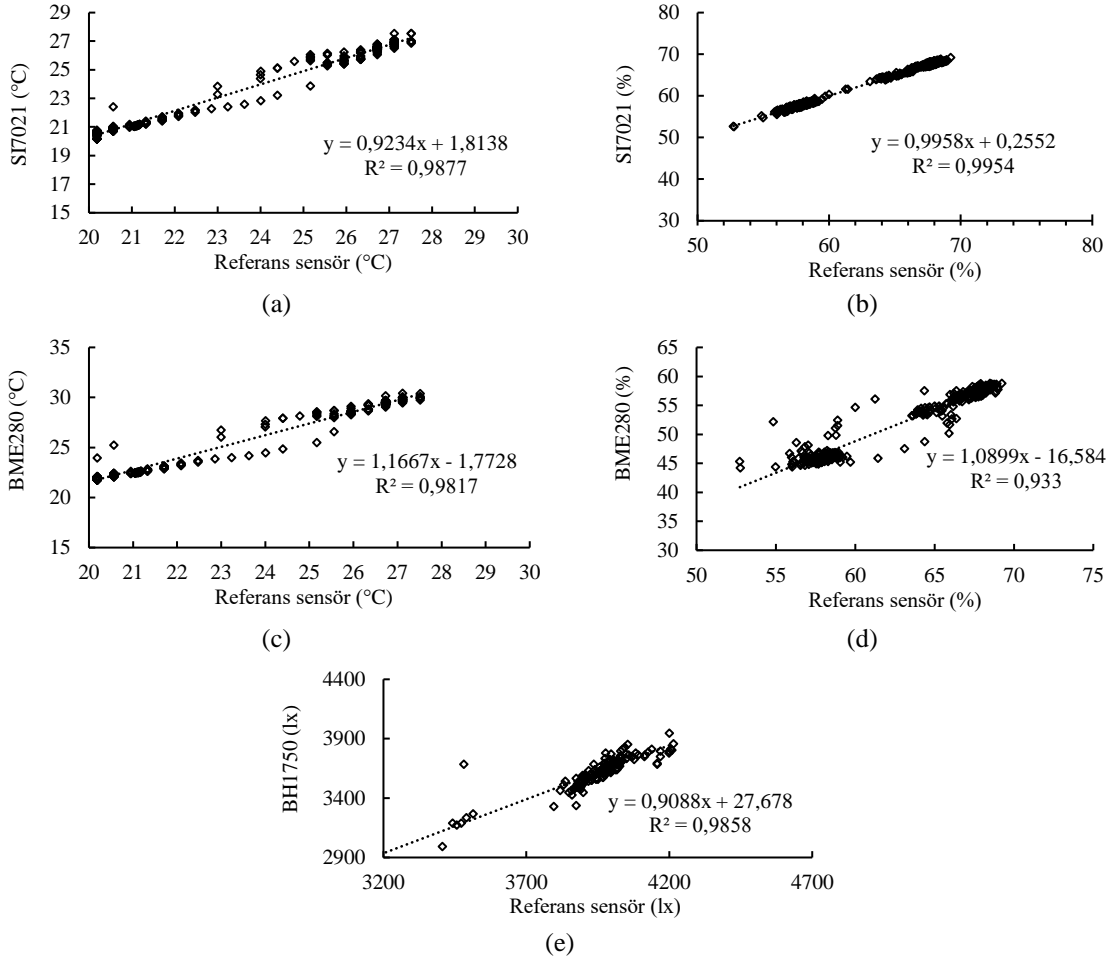
Table 4 Statistical analysis results of light intensity measurement values

| Sensörler | Ortalama | Std. Sapma | Std. Hata Ort. | 95% Güven aralığında Fark | | T | df | P |
|--------------------|------------|------------|----------------|---------------------------|------------|--------|-----|-------|
| | | | | Alt | Üst | | | |
| Referans ve BH1750 | -143,39727 | 281,66346 | 16,04927 | -174,97775 | -111,81679 | -8,935 | 307 | 0,000 |

Çizelge 5 Referans ve diğer sensörlere ait regresyon denklemleri

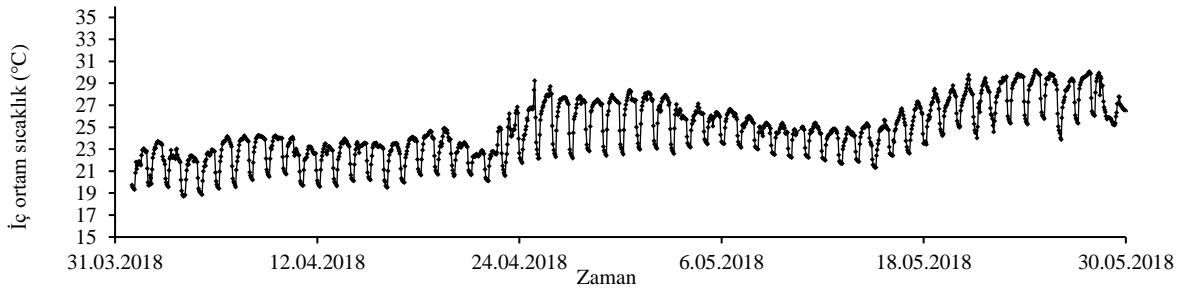
Table 5 Regression equations of reference and other sensors

| Sensörler | R ² | Denklem |
|---------------------------|----------------|------------------------|
| SI7021 Sıcaklık | 0,9877 | $y = 0,9234x + 1,8138$ |
| SI7021 Oransal Nem | 0,9954 | $y = 0,9958x + 0,2552$ |
| BME280 Sıcaklık | 0,9817 | $y = 1,1667x - 1,7728$ |
| BME 280 Oransal Nem | 0,9330 | $y = 1,0899x - 16,584$ |
| BH1750 Aydınlatma Şiddeti | 0,9858 | $y = 0,9088x + 27,678$ |



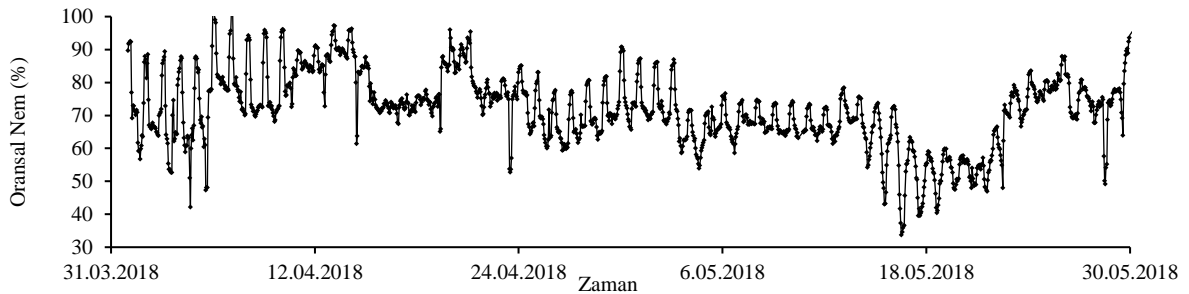
Şekil 7 Referans ve araştırmada kullanılan sensör regresyon grafikleri

Figure 7 Regression graphs for sensors used in the research with the reference device



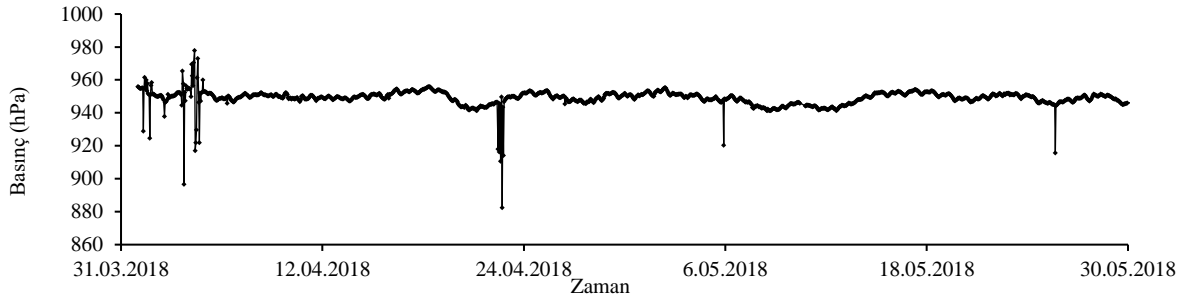
Şekil 8 Araştırma dönemi iç ortam sıcaklıkları

Figure 8 Indoor temperatures during the research period

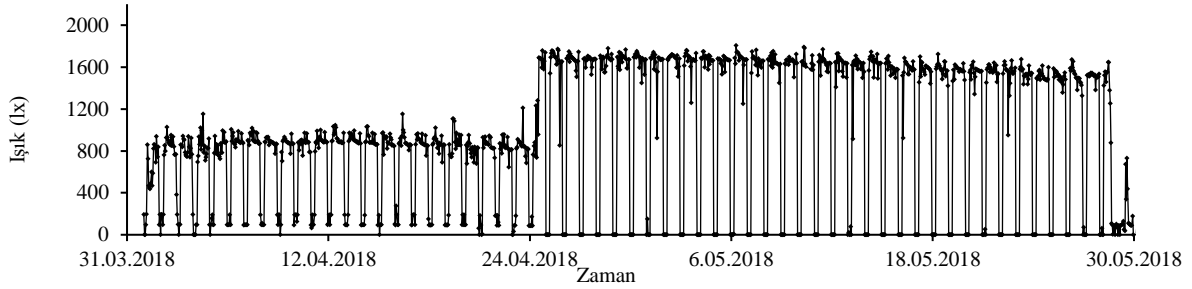


Şekil 9 Araştırma dönemi iç ortam oransal nem

Figure 9 Relative humidity of the indoor environment during the research period



Şekil 10 İç ortam hava basıncı
Figure 10 Indoor air pressure



Şekil 11 İç ortam aydınlatma şiddeti
Figure 11 Indoor lighting intensity

Referans ve kullanılan sensörlere ait regresyon grafikleri de Şekil 7'de verilmiştir. Şekil 7'de verilen grafiklerde, R^2 değerleri ile sensörler arasındaki ilişkiler görülmektedir. Bağımlı örneklem T testinde referans sensör ile BME280 sensör sıcaklık ve oransal nem ölçüm değerleri ortalamaları arasındaki farkın önemli olmasına rağmen, aslında bu farkın çok fazla olmadığı regresyon grafiklerinden anlaşılmaktadır. Eğer istenirse grafikler üzerinde verilen denklemlerin kullanılması ile referans ölçüm sensörlerine göre bir kalibrasyon düzeltmesi de yapılabilir. Bu amaçla ihtiyaç duyulabilecek kalibrasyon denklemleri Çizelge 5'te verilmiştir.

Bu bölümde test süresi içinde sensörlerin performansının değerlendirilmesi amacıyla kaydedilen veriler, sistemin raporlama modülü kullanılarak dışa aktarılmış ve grafikleri oluşturularak sistemin genel çalışma performansı ile ilgili değerlendirmelerde bulunulmuştur. Şekil 8'de iç ortam sıcaklık ölçüm değeri verilmiştir. Şekil incelendiğinde vejetasyon süresi boyunca ayarlanmış olan minimum 16°C , maksimum 30°C sıcaklık isteği değerlerinin aşılmadığı görülmektedir. Bu süre içerisinde sıcaklıklar mevsim koşullarına bağlı olarak artmış ancak belirlenen sınırlar içerisinde kalmıştır.

Şekil 9'da iç ortam oransal nem değerleri verilmiştir. Şekil 9 incelendiğinde sistemin çalıştığı dönemde veri kaydetme ve aktarımında herhangi bir kesinti olmadığı ve ölçüm değerlerinin, günlük doğal periyodik değişimlere göre bir salınım gösterdiği görülmektedir. Araştırma döneminin ilk günlerinde oransal nemin sistemde ayarlanmış aralıklar dışına çıkarak maksimum seviyelere ulaştığı görülmektedir. Bu da sistemdeki havalandırma fanlarının yüksek oransal nemin giderilmesi için yeterli olmadığını göstermektedir. Aynı şekilde araştırma döneminin son günlerine doğru oransal nem değerlerinin sistemde ayarlanan minimum değerin altına düştüğü görülmektedir. Sistemde düşük oransal nem oluşması durumunda, ortamın nemlendirilmesi için daha etkin önlemlerin alınması gerektiği anlaşılmaktadır.

Şekil 10'da iç ortam hava basıncı değerleri verilmiştir. Basınç değerlerinde deniz seviyesi düzeltmesi yapılmadan gerçek basınç değerleri kullanılmıştır.

İç ortam basınç grafiği incelendiğinde 945-960 hPa arasındaki aralıkta bir değişim gösterdiği görülmektedir. Ayrıca bazı ölçümlerde ani düşüşler görülmektedir. Bu ani düşüşlerin sebebi hatalı sensör okumaları olabilir. Bu değerlerin bazı istatistiksel yöntemlerle sistem veri tabanında kontrol edilmesi aynı zamanda hatalı okumaya neden olabilecek sistem sorunlarının araştırılması gerekmektedir.

Şekil 11'de iç ortam aydınlatma şiddeti ölçüm sensöründen okunan ölçüm değerleri grafiklenmiştir. İç ortamda LED aydınlatmanın bir dönem 800-1000 lx olarak yapıldığı, sonraki dönemde ise 1600-1800 lx aralığında yapıldığı görülmektedir. Sistemin çalıştırılmasından itibaren ilk bir aylık dönemde düşük seviyede yapılan aydınlatma sonucu bitki gelişiminin istenilen düzeyde olmadığı görülmüş ve sonrasında ilave LED donanımları ile aydınlatma şiddeti artırılmıştır. Aynı zamanda grafik üzerinde aydınlatmada foto periyod uygulandığı da görülmektedir.

Sonuç

Yapılan bu çalışmada açık kaynak donanım ve yazılım araçları kullanılarak dış ortam iklim koşullarından bağımsız kapalı ortamda hidroponik kültür ile bitkisel üretim yapılabilmesine olanak sağlayacak bir sistem geliştirilmiştir. Bu sistem ile ölçülen sıcaklık, oransal nem ve ışık gibi parametrelerin geliştirilen yazılımlarla analiz edilerek aydınlatma, sulama, bitki besleme ve ortam hava kalitesi gibi bitki isteklerinin optimum seviyede karşılanması amaçlanmıştır. Bulgulara göre geliştirilen sistemin stabil çalışma ve çevre koşullarını kontrol etme performansının başarılı olduğu görülmektedir. Aynı zamanda düşük maliyetli sensörlerin doğrulukları da

referans ölçümlerle istatistiksel olarak karşılaştırılmış ve bu tür sistemlerde kullanımı uygun olan sensörler belirlenmiştir. Tasarlanan sistem, açık kaynak araçların kullanılması nedeniyle yazılım lisanslama ve donanım maliyeti açısından avantajlıdır. Ölçüm verilerinin depolanması ve sürekli erişilebilir olması bitki büyüme ve gelişmesinin bilimsel olarak analiz edilmesinde fayda sağlayabilecektir.

Kaynaklar

- Adenle AA, Sowe SK, Parayil G, Aginam O. 2012. Analysis of open source biotechnology in developing countries: An emerging framework for sustainable agriculture. *Technology in Society*, 34, 256-269. doi: <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2012.07.004>
- Anpo M, Fukuda H, Wada T. 2019. Artificial light-type plant factories outline and a vision for the future (introduction). In M. Anpo, H. Fukuda T. Wada (Eds.), *Plant factory using artificial light*. (1st ed., Vol. 1, pp. xxiii-xxviii). Elsevier: Elsevier.
- Apogee. 2019. Ppfd to lux conversion. Erişim Adresi: <https://www.apogeeinstruments.com/conversion-ppfd-to-lux/> [Erişim: 01.06.2019, 2019].
- Benis K, Reinhart C, Ferrão P. 2017. Development of a simulation-based decision support workflow for the implementation of building-integrated agriculture (bia) in urban contexts. *Journal of Cleaner Production*, 147, 589-602. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.130>
- Bosch. 2019. Bosch sensortec technical data. Erişim Adresi: https://www.bosch-sensortec.com/bst/products/all_products/bme280 [Erişim: 01.06.2019, 2019].
- Bradley P, Marulanda C. 2000. Simplified hydroponics to reduce global hunger. Paper presented at the World Congress on Soilless Culture: Agriculture in the Coming Millennium, Leuven, Belgium.
- Chen W-T, Yeh Y-HF, Liu T-Y, Lin T-T. 2013. An automatic plant growth measurement system for plant factory. *IFAC Proceedings Volumes*, 46, 323-327. doi: <https://doi.org/10.3182/20130327-3-JP-3017.00073>
- Çaylı A. 2019. Internet of things and agricultural applications. Paper presented at the 3rd International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies (Engineering and Natural Sciences), Ankara, Turkey.
- Çaylı A, Akyüz A, Baytorun AN, Boyacı S, Üstün S, Kozak FB. 2017. Control of greenhouse environmental conditions with iot based monitoring and analysis system. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 5, 1279-1289. doi: 10.24925/turjaf.v5i11.1279-1289.1282
- Çaylı A, Akyüz A, Baytorun AN, Üstün S, Mercanlı AS. 2018. The feasibility of a cloud-based low-cost environmental monitoring system via open source hardware in greenhouses. *KSU J. Agric Nat*, 21, 323-338. doi: 10.18016/ksudobil.341513
- Dorais M. 2003. The use of supplemental lighting for vegetable crop production: Light intensity, crop response, nutrition, crop management, cultural practices. Paper presented at the Canadian Greenhouse Conference.
- Hang T, Lu N, Takagaki M, Mao H. 2019. Leaf area model based on thermal effectiveness and photosynthetically active radiation in lettuce grown in mini-plant factories under different light cycles. *Scientia Horticulturae*, 252, 113-120. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.03.057>
- Hendrawan Y, Riza DFA, Murase H. 2014. Applications of intelligent machine vision in plant factory. *IFAC Proceedings Volumes*, 47, 8122-8127. doi: <https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.01099>
- Jiang J-s, Kim H-J, Cho W-J. 2018. On-the-go image processing system for spatial mapping of lettuce fresh weight in plant factory. *IFAC-PapersOnLine*, 51, 130-134. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.075>
- Katayama N. 2013. Utilization of the plant waste in the water culture plant factory. *IFAC Proceedings Volumes*, 46, 75-76. doi: <https://doi.org/10.3182/20130327-3-JP-3017.00020>
- Kim Choi EG, Baek GY, Kim CH, Jink BO, Moon BE, Kim HT. 2013. Lettuce growth prediction in plant factory using image processing technology. *IFAC Proceedings Volumes*, 46, 156-159. doi: <https://doi.org/10.3182/20130327-3-JP-3017.00036>
- Kim Lee C, Yun YS, Hong CH, Choi YE. 2019. Recycling waste nutrient solution originating from the plant factory with the cultivation of newly isolated acutodesmus species. *J Biotechnol*, 289, 15-25. doi: 10.1016/j.jbiotec.2018.10.010
- Kozai T. 2013. Resource use efficiency of closed plant production system with artificial light: Concept, estimation and application to plant factory. *Proceedings of the Japan Academy, Series B*, 89, 447-461. doi: 10.2183/pjab.89.447
- Kozai T, Niu G. 2016. Plant factory: An indoor vertical farming system for efficient quality food production. In T. Kozai, G. Niu M. Takagaki (Eds.), *Plant factory*. (pp. 3-5). San Diego: Academic Press.
- Maria DB. 2019. The mariadb foundation (non-profit foundation). Erişim Adresi: <https://mariadb.org/> [Erişim: 01.06.2019].
- Nakamura K. 2019. Development of efficient production system. In M. Anpo, H. Fukuda T. Wada (Eds.), *Plant factory using artificial light*. (Vol. 1, pp. 171-176). Elsevier: Elsevier.
- Niu G, Kozai T, Sabeh N. 2016. Physical environmental factors and their properties. In T. Kozai, G. Niu M. Takagaki (Eds.), *Plant factory*. (Vol. 1, pp. 129-140). San Diego: Academic Press.
- OSHWA. 2018. Open source hardware association. Erişim Adresi: <https://www.oshwa.org/about/> [Erişim: 05.07.2018].
- Pardossi A, Incrocci L, Salas MC, Gianquinto G. 2017. Managing mineral nutrition in soilless culture Rooftop urban agriculture. (pp. 147-166): Springer.
- Pearson CJ. 2007. Regenerative, semiclosed systems: A priority for twenty-first-century agriculture. *BioScience*, 57: 409-418. doi: 10.1641/B570506
- PHP. 2017. The php group. Erişim Adresi: <https://php.net> [Erişim: 01.02.2017, 2017].
- Rosenzweig C, Liverman D. 1992. Predicted effects of climate change on agriculture: A comparison of temperate and tropical regions. *Dalam Global Climate Change: Implications, Challenges, and Mitigation Measures*. *Dalam SK Majumdar (Ed.) The Pennsylvania Academy of Sciences*. Pennsylvania, 342-361.
- Sager JC, McFarlane JC. 1997. Radiation, p. *Plant Growth Chamber Handbook*, 1-29.
- Shimizu H, Fukuda K, Nishida Y, Ogura T. 2016. Automated technology in plant factories with artificial lighting (chapter 23). In T. Kozai, G. Niu M. Takagaki (Eds.), *Plant factory*. (Vol. 1, pp. 313-319). San Diego: Academic Press.
- Son JE, Kim HJ, Ahn TI. 2016. Hydroponic systems (chapter 17). In T. Kozai, G. Niu M. Takagaki (Eds.), *Plant factory*. (Vol. 1, pp. 213-221). San Diego: Academic Press.
- Stallman R. 2015. Free software, free society: Selected essays of richard m. Stallman, third edition. Boston, MA: Free Software Foundation, Inc.
- Sugano M. 2019. Network and processing system (chapter 5.2). In M. Anpo, H. Fukuda T. Wada (Eds.), *Plant factory using artificial light*. (Vol. 1, pp. 207-210). Elsevier: Elsevier.
- Zhang Y, Kacira M, An L. 2016. A cfd study on improving air flow uniformity in indoor plant factory system. *Biosystems Engineering*, 147, 193-205. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.04.012>
- Zheng S. 2019. It networks and plant factories (chapter 5.3). In M. Anpo, H. Fukuda T. Wada (Eds.), *Plant factory using artificial light*. (Vol. 1, pp. 211-226). Elsevier: Elsevier.