KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 29(3), 2026
Araştırma Makalesi

KSU J Eng Sci, 29(3), 2026
Research Article

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Journal of Engineering Sciences

Geliş Tarihi : 13.02.2026
Kabul Tarihi : 15.07.2026

Received Date : 13.02.2026
Accepted Date : 15.07.2026

FOTOVOLTAİK ENERJİ İLE ÇALIŞAN AKILLI SULAMA SİSTEMİNİN SERA ORTAMINDA UYGULANABİLİRLİĞİNİN DENEYSEL ANALİZİ

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE FEASIBILITY OF A PHOTOVOLTAIC ENERGY-POWERED SMART IRRIGATION SYSTEM IN A GREENHOUSE ENVIRONMENT

Muhammed Enes ÇİFTÇİ[1] (ORCID: 0009-0002-0120-7567)
Hashim SALAHELDIN HASHIM ISHAG[2] (ORCID: 0009-0007-0017-2290)
Musa DEMİR[3*] (ORCID: 0000-0002-2191-5395)

[1]Giresun Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Giresun, Türkiye
[2]Giresun Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Giresun, Türkiye
[3*]Giresun Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Giresun, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Musa DEMİR, musa.demir@giresun.edu.tr

ÖZET

Bu çalışma, fotovoltaik (PV) panel ile beslenen sensör tabanlı otomatik sulama sistemine sahip bir akıllı sera prototipinin uygulanabilirliğini incelemektedir. Araştırmada enerji üretimi, su yönetimi ve çevresel kontrol parametreleri bütüncül olarak değerlendirilmiştir. Geliştirilen sistemde PV panelden üretilen elektrik enerjisi bataryalarda depolanmış, Arduino tabanlı kontrol ünitesi, toprak nem sensörü ve sulama pompasının enerji gereksinimi bu depolama biriminden karşılanmıştır. Sulama sistemi, nem sensöründen elde edilen verilere dayalı histerezis kontrol algoritmasıyla kararlı şekilde çalıştırılmıştır. Deneysel süreçte sera ve açık alan koşulları karşılaştırılmış, sıcaklık ve bağıl nem değerleri meteorolojik verilerle birlikte analiz edilmiştir. Bulgular, sera ortamının dış koşullara göre daha sıcak ve nemli bir mikroiklim oluşturduğunu göstermiştir. Ayrıca yüksek nem ve yetersiz hava sirkülasyonunun çilek bitkilerinde çürüme riskini artırabileceği belirlenmiştir. Sonuç olarak, yenilenebilir enerji destekli akıllı sulama sistemlerinin uygulanabilir olduğu, ancak sürdürülebilir üretim için nem kontrolü, havalandırma ve ışık optimizasyonunun etkin şekilde yönetilmesi gerektiği ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik sistemler, akıllı sulama, tarımda yenilenebilir enerji, akıllı sera, mikroiklim yönetimi

ABSTRACT

This study investigates the feasibility of a smart greenhouse prototype equipped with a sensor-based automatic irrigation system powered by a photovoltaic (PV) panel. In the study, energy generation, water management, and environmental control parameters were evaluated holistically. In the developed system, the electrical energy generated by the PV panel was stored in batteries, and the energy requirements of the Arduino-based control unit, soil moisture sensor, and irrigation pump were supplied from this storage unit. The irrigation system was operated stably using a hysteresis control algorithm based on the data obtained from the soil moisture sensor. During the experimental process, greenhouse and outdoor conditions were compared, and temperature and relative humidity values were analyzed together with meteorological data. The findings showed that the greenhouse environment created a warmer and more humid microclimate than the outdoor conditions. In addition, it was determined that high humidity and insufficient air circulation could increase the risk of decay in strawberry plants. Consequently, it was demonstrated that renewable energy-supported smart irrigation systems are feasible; however, humidity control, ventilation, and light optimization should be managed effectively to ensure sustainable production.

Keywords: Photovoltaic (pv) systems, smart irrigation, renewable energy in agriculture, smart greenhouse, microclimate management

GİRİŞ

Artan dünya nüfusu, iklim değişikliği ve su kaynaklarının azalması, tarımsal üretimde sürdürülebilir ve enerji verimli sistemlerin geliştirilmesini zorunlu hale getirmiştir. Özellikle kontrollü tarım uygulamalarında kullanılan akıllı sulama sistemleri, su tüketiminin optimize edilmesi, enerji maliyetlerinin azaltılması ve üretim sürekliliğinin sağlanması açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Sensör tabanlı kontrol sistemleri ile desteklenen otomatik sulama uygulamaları, bitki ihtiyaçlarının gerçek zamanlı izlenmesine olanak sağlayarak hem su verimliliğini artırmakta hem de insan müdahalesini azaltmaktadır. Bununla birlikte bu sistemlerin yenilenebilir enerji kaynakları ile desteklenmesi, enerji bağımsız ve sürdürülebilir tarımsal üretim modellerinin geliştirilmesi açısından önemli bir araştırma alanı oluşturmaktadır (Bayraktar & Küçükbayrak, 2025; Tutar et al., 2025; Ashir et al., 2022).

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında güneş enerjisi, ekonomik avantajları ve geniş uygulanabilirliği sayesinde öne çıkmaktadır. Fotovoltaik (PV) sistemler, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürerek sürdürülebilir enerji üretimine katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte PV sistem performansının; güneş ışınımı, panel sıcaklığı, gölgeleme, eğim açısı ve kurulum geometrisi gibi çevresel parametrelere bağlı olarak değiştiği belirtilmektedir (Keskin, Pour Rahmati Khalejan ve Çıkla, 2021). Literatürde gerçekleştirilen çalışmalarda, maksimum güç noktası izleme (MPPT) yapılarının sistem verimliliğini artırdığı, panel türü ve yerleşim stratejilerinin ise enerji üretimi üzerinde belirleyici olduğu ifade edilmektedir (Keskin et al., 2021; Geliş, Akyürek ve Yoladı, 2020). Ayrıca monokristal ve polikristal paneller üzerine yapılan karşılaştırmalı çalışmalarda, çevresel koşullara bağlı olarak farklı performans sonuçlarının elde edildiği rapor edilmiştir (Karagöz et al., 2025; Karaağaç, Oğul ve Bulut, 2021). Bununla birlikte güneş enerjisinin tarımsal uygulamalarda kullanılması, özellikle şebekeden bağımsız sistemlerde enerji sürekliliği ve maliyet avantajı açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır.

Enerji teknolojilerindeki gelişmeler, tarım sektöründe kullanılan sulama ve otomasyon sistemlerinin de dönüşümünü hızlandırmıştır. Artan su kıtlığı, nüfus artışı ve iklim değişikliği, su kaynaklarının daha verimli yönetilmesini zorunlu kılmaktadır. Tarımsal sulama uygulamalarında suyun etkin kullanımı, sürdürülebilir üretim açısından kritik önem taşımaktadır (Bayraktar ve Küçükbayrak, 2025). Sensör teknolojileri, mikrodenetleyici tabanlı kontrol sistemleri ve otomatik sulama uygulamaları sayesinde su tüketiminin azaltılması, enerji verimliliğinin artırılması ve üretim sürekliliğinin sağlanması mümkün hale gelmektedir (Tutar ve ark., 2025). Ayrıca damla sulama ve akıllı sulama yöntemlerinin, su kaynaklarının korunması ve üretim maliyetlerinin azaltılması açısından önemli avantajlar sunduğu belirtilmektedir (Masat, İkikat Tümer ve Gürün, 2025). Bunun yanında tarımsal sulama sistemlerinde kullanılan pompa ve enerji altyapılarının verimliliğinin de sürdürülebilir tarımsal üretim açısından önemli olduğu ifade edilmektedir (Azizoğlu ve Koçyiğit, 2025).

Tarımda sürdürülebilir üretimin sağlanmasında modern sera teknolojileri de önemli bir rol üstlenmektedir. Sera ortamlarında sıcaklık, bağıl nem, ışık ve havalandırma gibi çevresel parametrelerin kontrol altında tutulması, bitki gelişimi ve ürün kalitesi açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Fotovoltaik sistemlerin sera yapılarıyla birlikte kullanılması ise enerji üretimi ile kontrollü tarımsal üretimin eş zamanlı yürütülmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca su tüketiminin tarım sektörü ile doğrudan ilişkili olduğu ve akıllı tarım uygulamalarının sürdürülebilir su yönetimi açısından önemli katkılar sağlayabileceği belirtilmektedir (Şimşek ve Aydınbaş, 2025). Yapılan deneysel çalışmalar, PV destekli sera uygulamalarında iç ortam sıcaklığının dış ortama göre farklılık gösterebildiğini ve sistemin enerji üretim performansının sürdürülebilir tarımsal uygulamalar açısından önemli potansiyel taşıdığını göstermektedir (Sancar ve Bayram, 2023).

Bununla birlikte literatür incelendiğinde çalışmaların büyük çoğunluğunun belirli bir bileşene odaklandığı görülmektedir. Bazı araştırmalar PV sistemlerin enerji performansının optimize edilmesine yönelirken, diğerleri akıllı su yönetimi veya sera teknolojileri üzerine yoğunlaşmaktadır. Ancak yenilenebilir enerji üretimi, otomatik sulama kontrolü ve bitki gelişiminin gerçek yetiştirme koşullarında birlikte değerlendirildiği bütünleşik deneysel çalışmaların sınırlı olduğu dikkat çekmektedir.

Literatürde yer alan düşük maliyetli Arduino tabanlı akıllı sulama sistemlerinin önemli bir bölümü çoğunlukla toprak nemine bağlı pompa kontrolü ve su tasarrufu üzerine odaklanmaktadır. Benzer şekilde, fotovoltaik sistemlere yönelik çalışmaların önemli bir kısmı enerji üretim performansını bağımsız bir araştırma konusu olarak ele almaktadır. Buna karşın fotovoltaik enerji üretimi, batarya destekli enerji depolama, sensör tabanlı histerezis kontrollü sulama mekanizması, sera mikroiklim koşulları ve bitki gelişiminin aynı deneysel düzenek içerisinde birlikte değerlendirildiği çalışmaların oldukça sınırlı olduğu görülmektedir. Özellikle Akdeniz ve benzeri nemli iklim

bölgelerinde düşük maliyetli akıllı sera prototiplerinin enerji sürekliliği, sulama kontrol kararlılığı ve mikroiklim etkileri üzerindeki performansını birlikte inceleyen deneysel araştırmalar literatürde yeterince temsil edilmemektedir.

Bu bağlamda, fotovoltaik enerji ile çalışan akıllı sulama sistemlerinin kontrollü üretim ortamlarında uygulanabilirliğinin değerlendirilmesi ve sera mikroiklim koşullarının bitki gelişimi üzerindeki etkilerinin ortaya konulması önemli bir araştırma ihtiyacı olarak öne çıkmaktadır.

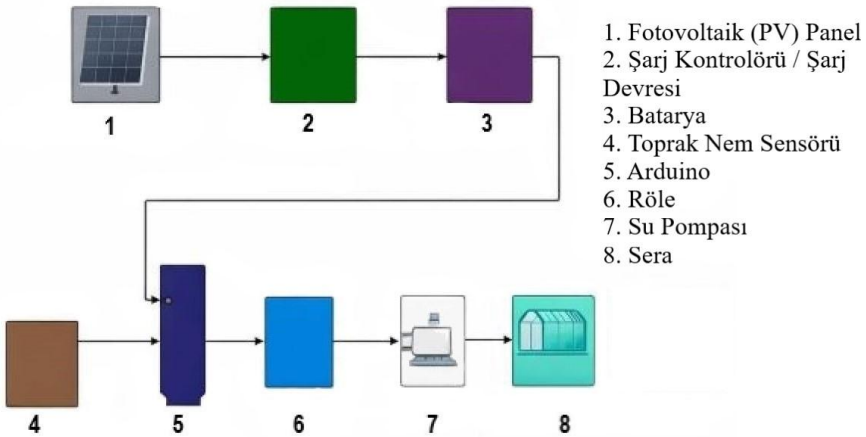
Bu çalışma kapsamında, fotovoltaik panel ile beslenen sensör tabanlı otomatik sulama sistemine sahip bir akıllı sera prototipi geliştirilmiş ve enerji üretimi, su yönetimi ile çevresel kontrol parametreleri bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmiştir. Literatürde fotovoltaik sistem performansı, akıllı sulama uygulamaları ve sera teknolojileri çoğunlukla ayrı araştırma alanları olarak ele alınmasına rağmen, yenilenebilir enerji destekli otomatik sulama sistemi ile sera mikroiklim koşullarının bitki gelişimi üzerindeki etkilerini gerçek deneysel veriler üzerinden birlikte inceleyen çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Bu araştırma, yalnızca teorik modelleme veya simülasyon sonuçlarına odaklanmak yerine gerçek sera koşullarında gerçekleştirilen deneysel uygulamalar üzerinden sistem performansını değerlendirmesi bakımından mevcut çalışmalardan ayrılmaktadır. Ayrıca sera ve açık alan yetiştirme koşullarının karşılaştırmalı olarak incelenmesi, sistemin yalnızca teknik performansının değil; bitki sağlığı, ürün kalitesi ve üretim sürekliliği üzerindeki etkilerinin de analiz edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu yönüyle çalışma, yenilenebilir enerji destekli akıllı tarım uygulamalarının sürdürülebilir üretim açısından uygulanabilirliğine ilişkin literatüre deneysel ve bütünleşik bir katkı sunmaktadır.

Bu yönüyle çalışma, enerji bağımsız tarımsal üretim modellerinin geliştirilmesine katkı sunmayı ve küçük ile orta ölçekli işletmeler için sürdürülebilir, düşük maliyetli ve teknolojik açıdan entegre bir üretim yaklaşımına bilimsel temel oluşturmayı hedeflemektedir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışma Alanı ve Sistem Yaklaşımı

Bu çalışmada geliştirilen sistem, deneysel uygulamalar Türkiye'nin Doğu Karadeniz Bölgesi'nde yer alan Giresun ilinde gerçekleştirilmiştir. Çalışma alanı, Köppen-Geiger iklim sınıflandırmasına göre baskın olarak Cfb iklim tipi (ılıman okyanusal/nemli iklim) özellikleri göstermektedir. Literatürde Türkiye'nin kuzey kesimlerinde Cfa ve Cfb iklim tiplerinin yaygın olarak görüldüğü belirtilmektedir (Demir, 2025). Bölge iklimi yıl boyunca yüksek bağıl nem, düzenli yağış rejimi ve ılıman sıcaklık koşulları ile karakterize edilmektedir. Özellikle yüksek nem seviyeleri ve sınırlı güneşlenme süreleri, sera mikroiklim koşullarının bitki gelişimi üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi açısından önemli çevresel parametreler oluşturmaktadır. Bu nedenle çalışma kapsamında sera içi sıcaklık ve bağıl nem değerleri dış ortam meteorolojik verileri ile karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.
Araştırma, deneysel ve uygulamalı mühendislik yaklaşımı temel alınarak yürütülmüş olup sistem, donanımsal ve yazılımsal bileşenleriyle birlikte bütüncül bir çerçevede ele alınmıştır. Tasarım sürecinde düşük maliyet, enerji bağımsızlığı, modülerlik ve sürdürülebilirlik temel kriterler olarak benimsenmiş; sistem bileşenleri ve deney düzeneği Şekil 1'de sunulmuştur.



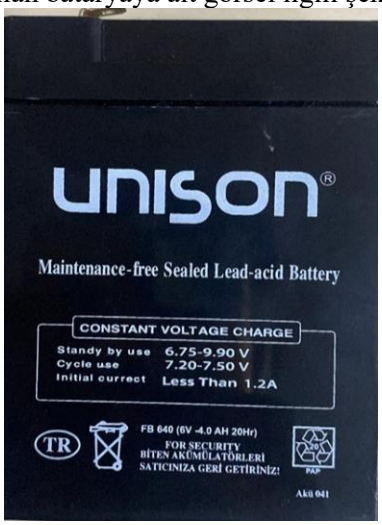
Şekil 1. Deney Düzeneğinin Şematik Görünümü

Şekil 1'de gösterilen sistem akışı, fotovoltaik tabanlı enerji üretiminden başlayarak akıllı tarım uygulamasına kadar bütünleşik bir çalışma prensibi sunmaktadır. Sistemde öncelikle fotovoltaik (PV) panel aracılığıyla güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretilmekte ve elde edilen enerji şarj kontrol devresi üzerinden bataryada depolanmaktadır. Depolanan enerji, Arduino tabanlı kontrol ünitesi, toprak nem sensörü ve sulama pompası gibi sistem bileşenlerinin enerji ihtiyacını karşılamaktadır. Toprak nem sensöründen alınan veriler Arduino kontrol kartı tarafından sürekli olarak izlenmekte ve önceden tanımlanan alt ve üst eşik değerlerine göre değerlendirilmektedir. Nem seviyesinin kritik değerin altına düşmesi durumunda röle modülü aktif hale getirilerek su pompası çalıştırılmakta, yeterli nem seviyesine ulaşıldığında ise pompa otomatik olarak durdurulmaktadır. Böylece enerji üretimi, enerji depolama, sensör tabanlı veri izleme ve otomatik sulama süreçleri entegre biçimde çalıştırılarak sera ortamında yenilenebilir enerji destekli akıllı tarım uygulaması gerçekleştirilmiştir.

Şekil 2. Yapay Güneş Işığı ve Monokristal Panel

Monokristal panel ve yapay güneş ışığı kaynağı Şekil 2'de gösterilmiş olup elektrik enerjisi üretimi amacıyla hazırlanmıştır. Sistem kapsamında kullanılan Arduino kartı, nem sensörü, mini su pompası ve LED aydınlatma gibi düşük güç tüketimine sahip elektronik bileşenlerin enerji beslemesi bu panel aracılığıyla sağlanmaktadır. Panel tarafından üretilen elektrik enerjisi bataryada depolanarak sistemin kesintisiz çalışmasına olanak tanımaktadır.

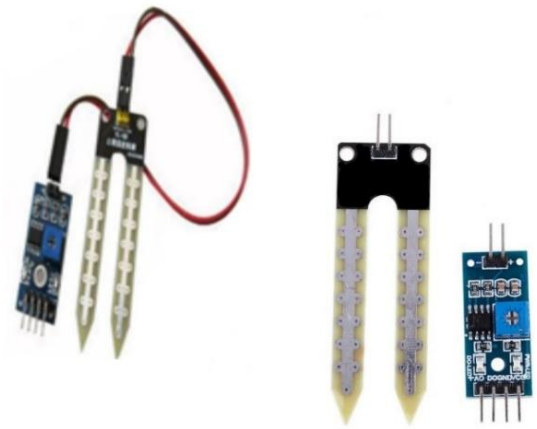
Şekil 3'te Unison FB640 model, 6 V ve 4 Ah kapasiteli kapalı tip kurşun-asit (sealed lead-acid) batarya gösterilmektedir. Bataryanın şarj gerilim aralığı 7,20–7,50 V olup maksimum şarj akımının 1,2 A'in altında olması önerilmektedir. Söz konusu batarya, sistemde yer alan düşük güçlü bileşenlerin enerji gereksinimini karşılayabilecek kapasitededir. Deney düzeneğinde kullanılan bataryaya ait görsel ilgili şekilde sunulmuştur.



Şekil 3. Unison Fb640 Model Batarya

Şekil 4. Deney Düzeneğinde Kullanılan Arduino Uno Kontrol Kartı

Arduino Uno, sistemin merkezi kontrol birimi olarak yapılandırılmış olup görseli Şekil 4'te verilmiştir. Analog girişler aracılığıyla toprak nem sensörlerinden elde edilen verileri işleyen kart, dijital çıkışlar üzerinden pompa ve rölelerin kontrolünü sağlamaktadır.



Şekil 5. Toprak Nem Sensörü (FC-28) Görseli

FC-28 toprak nem sensörü, topraktaki nem seviyesini analog sinyal olarak ölçmek üzere kullanılan bir algılama birimidir. Ölçülen nem değerinin önceden tanımlanan eşik değerin altına düşmesi halinde sulama sistemi otomatik olarak etkinleştirilmektedir. Sensörün görseli Şekil 5'te, teknik özellikleri ise Tablo 1'de verilmiştir.

5V röle modülü, mikrodenetleyicinin doğrudan süremeyeceği akım seviyelerine sahip yüklerin kontrolünü sağlamak amacıyla kullanılan bir anahtarlama elemanıdır. Sistem kapsamında su pompasının çalıştırılması ve durdurulması röle modülü aracılığıyla gerçekleştirilmektedir.

4,5–12V DC mini su pompası, düşük gerilim altında çalışabilen ve sera ortamında bulunan su kaynağından bitkilere su transferini sağlayan bir aktüatör olarak sistemde konumlandırılmıştır. Pompanın çalışma durumu, toprak nem sensöründen elde edilen verilere bağlı olarak kontrol ünitesi tarafından otomatik biçimde yönetilmektedir.

Sistem bileşenleri arasındaki elektriksel bağlantıların güvenilir ve kararlı şekilde sağlanması amacıyla kablolar, lehim noktaları ve soketlerden oluşan bağlantı elemanları kullanılmıştır.

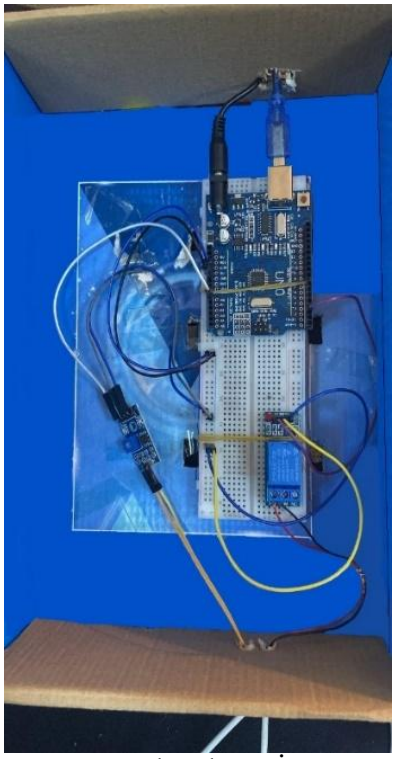
FC-28 toprak nem sensörü Arduino Uno'nun A0 analog pinine bağlanarak nem verilerinin kontrol ünitesine aktarılması sağlanmıştır. Röle modülü Arduino'nun dijital pinlerinden birine entegre edilmiş ve bu sayede su pompasının açma-kapama kontrolü gerçekleştirilmiştir. Su pompası ayrı bir güç kaynağı ile beslenmiş, ancak çalışma kontrolü Arduino üzerinden sağlanmıştır. Şekil 8'de görseli verilmiştir.

Tablo 1. FC-28 Toprak Nem Sensörünün Teknik Özellikleri

Parametre	**Açıklama**
Malzeme	Metal
Net Ağırlık	7 g
Model	FC-28
Çalışma Gerilimi	3,3–5,0 V
Çıkış Yapılandırması	Çift çıkışlı yapılandırma (analog çıkış daha yüksek ölçüm hassasiyeti sağlamaktadır)
Montaj Yöntemi	Kolay montaja olanak sağlayan sabit montaj deliği
Durum Göstergeleri	Güç göstergesi (kırmızı LED) ve dijital çıkış durum göstergesi (yeşil LED)
Çalışma Kararlılığı	Kararlı çalışma
PCB Boyutları	Yaklaşık 3 cm × 1,5 cm
Toprak Prob Boyutları	Yaklaşık 6 cm × 3 cm
Kablo Uzunluğu	1 m
Arayüz Tipi	Dört telli arayüz
VCC (Besleme Gerilimi Girişi)	3,3–5,0 V besleme girişi
GND (Toprak Hattı)	Toprak referansı
DO (Dijital Çıkış)	Dijital çıkış arayüzü (HIGH/LOW mantık seviyesi)
AO (Analog Çıkış)	Analog çıkış arayüzü
Kullanım Amacı	Toprak nem değerinin ölçülmesi
Çalışma Prensibi	Dijital çıkış (DO), önceden belirlenen eşik değerine ulaşıldığında HIGH mantık seviyesine geçer; toprak nem seviyesi eşik değeri aştığında ise DO çıkışı LOW mantık seviyesine geçmektedir.
Dijital Çıkış Çalışması	Modül, ikili nem durumlarının algılanabilmesi amacıyla bir mikrodenetleyiciye doğrudan bağlanabilmektedir.
Röle / Alarm Entegrasyonu	Modül, bir röle modülünü veya sesli alarm modülünü doğrudan kontrol edebilmektedir.
Analog Çıkış Çalışması	Analog çıkış, analog-dijital dönüştürücüye (ADC) bağlandığında daha hassas toprak nem ölçümlerinin gerçekleştirilmesine olanak sağlamaktadır.

Şekil 6. Röle Modülü Görseli

Şekil 7. Mini Su Pompası Görseli



Şekil 8. Sensör ve Pompa Bağlantılarını İçeren Veri Kontrol Ünitesi

Sera Tasarımı ve Ürün Konumlandırması

Çalışma kapsamında geliştirilen akıllı sera prototipi ile aynı boyutlara sahip bir açık alan yetiştirme düzeni oluşturularak karşılaştırmalı analiz gerçekleştirilmiştir. Her iki ortamda da aynı toprak yapısı kullanılmış ve yetiştirme koşulları mümkün olduğunca standartlaştırılmıştır.

Sera içi ve açık ortam düzeneklerinde aynı saksı içerisinde üç adet çilek ve dört adet biber fidesi yetiştirilmiştir. Şekil 9'da görseller verilmiştir.

Şekil 9. Sera (1) ve Açık Alan (2) Saksıların İçindeki Fidelerin Görünümü

Bitki gelişim parametrelerinin güvenilir biçimde karşılaştırılabilmesi amacıyla her iki ortamda da eşit miktarda gübre uygulanmıştır. Fide döneminde bitkilerin yüksek tuzluluğa karşı hassas olması nedeniyle gübreleme kontrollü şekilde yürütülmüştür. Standart granül kompoze (NPK) gübre esas alınarak çilek fideleri için bitki başına yaklaşık 3–5 g, biber fideleri için ise 4–6 g gübre verilmiş; böylece toplam gübre miktarı 25–35 g aralığında tutulmuştur. Uygulamada alt sınır tercih edilerek yaklaşık 25 g gübre kullanılmış ve bitki gelişimine bağlı olarak kademeli besleme yaklaşımı benimsenmiştir.

Gübre, fide gövdesi ve kök boğazı ile doğrudan temas etmeyecek şekilde bitki çevresinde yaklaşık 5–8 cm mesafe bırakılarak halka formunda uygulanmış ve ardından besin elementlerinin toprakta homojen dağılımını desteklemek amacıyla sulama yapılmıştır. Bu yöntem, kök bölgesine dengeli besin iletimi sağlarken bitki stresinin azaltılmasına katkı sunmaktadır.

Gübre uygulamasının bitki gelişimi üzerindeki etkilerinin görsel olarak değerlendirilmesi amacıyla sera ve açık ortam koşullarına ait örnekler Şekil 10'da sunulmuştur. Şekil 10(1)'de sera ortamında, Şekil 10(2)'de ise açık alanda yetiştirilen çilek bitkileri yer almaktadır. Gübreleme miktarının her iki ortamda sabit tutulması, kontrollü sera koşulları ile doğal çevre şartlarının bitki morfolojisi ve gelişim süreçleri üzerindeki etkilerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesine olanak sağlamıştır.

Şekil 10. Gübre Uygulaması Sonrası Sera Ortamında (1) ve Açık Alanda (2) Yetiştirilen Çilek Bitkilerinin Karşılaştırmalı Görünümü

Şekil 11. Sera Ortamında (1) ve Açık Alanda (2) Yetiştirilen Biber Bitkilerinin Karşılaştırmalı Görünümü

Fotovoltaik panelden elde edilen elektrik enerjisi akülerde depolanmış ve sistem bileşenlerinin enerji gereksinimi bu depolama birimi üzerinden karşılanmıştır. Sulama pompası ve Arduino tabanlı kontrol ünitesinin çalışması için gerekli elektrik enerjisi batarya sistemi aracılığıyla sağlanmıştır. Sera içi aydınlatma amacıyla iki adet LED lamba kullanılmıştır.

Deney süresince PV panel, yapay güneş ışığı kaynağı altında sürekli olarak çalıştırılmış ve üretilen elektrik enerjisi batarya sistemi üzerinden depolanarak Arduino kontrol ünitesi, sulama pompası ve LED aydınlatma bileşenlerinin enerji ihtiyacı karşılanmıştır. Batarya doluluk oranlarının sayısal olarak izlenmesine yönelik ayrı bir ölçüm modülü kullanılmamış olmakla birlikte sistemin operasyonel sürekliliği LED aydınlatmaların ve kontrol bileşenlerinin kesintisiz çalışması üzerinden gözlemsel olarak takip edilmiştir. Bu durum, kurulan PV destekli enerji altyapısının deney süresince düşük güçlü sera uygulamaları için yeterli enerji sürekliliği sağlayabildiğini göstermiştir.

Ayrıca Arduino Uno tabanlı kontrol ünitesi, sensörler ve röle modülü düşük güç tüketimine sahip bileşenlerden oluştuğundan kullanılan 6 V–4 Ah batarya kapasitesinin deney süresince sistem çalışmasını sınırlandıran temel faktör olmadığı gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada sistemin enerji performansı operasyonel süreklilik temelinde değerlendirilmiştir. Bununla birlikte PV panel üretimi, batarya şarj durumu ve yük tüketimi arasındaki enerji dengesinin gerçek zamanlı olarak izlenebilmesi amacıyla veri kaydedici tabanlı enerji izleme sistemlerinin kullanılması gelecekteki çalışmalar için önemli bir geliştirme alanı olarak değerlendirilmektedir. Böyle bir yaklaşım enerji otonomi süresinin ve sistem verimliliğinin daha hassas biçimde belirlenmesine katkı sağlayacaktır.

Sistemin operasyonel sürekliliğini sağlamak amacıyla sulama sistemi, toprak nem sensöründen elde edilen verilerin çift eşik değerine dayalı histerezis kontrol algoritması ile değerlendirilmesi prensibine göre çalışmaktadır. Sensör çıktısı alt eşik değerinin altına düştüğünde sulama pompası aktive edilmekte, üst eşik değerine ulaşıldığında ise pompa devre dışı bırakılmaktadır. Eşik değerler deneysel kalibrasyon ile belirlenmiş olup bu kontrol stratejisi, anahtarlama frekansını azaltarak sistem kararlılığını ve enerji verimliliğini artırmaktadır.

Bu çalışmada kullanılan kontrol yaklaşımı, klasik tek eşik değerine dayalı sulama sistemlerinden farklı olarak çift eşik değerine dayalı histerezis kontrol algoritması prensibine göre yapılandırılmıştır. Geliştirilen algoritmada toprak nem sensöründen elde edilen analog veriler sürekli olarak izlenmiş ve sulama kontrolü belirlenen alt ve üst eşik değerlerine göre gerçekleştirilmiştir. Nem değerinin alt eşik seviyesinin altına düşmesi durumunda sulama pompası aktif hale getirilmiş, üst eşik seviyesine ulaşılmasıyla birlikte pompa otomatik olarak devre dışı bırakılmıştır.

Bu yaklaşım sayesinde sensör verilerinde oluşabilecek ani dalgalanmaların röle sistemi üzerinde oluşturabileceği sürekli anahtarlama davranışı azaltılmıştır. Böylece hem sistem kararlılığı artırılmış hem de enerji tüketiminin optimize edilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca histerezis tabanlı kontrol yapısı sayesinde sulama mekanizmasının daha stabil, güvenilir ve kesintisiz çalışması sağlanmıştır.

Deneysel süreç öncesinde FC-28 toprak nem sensörü için kalibrasyon işlemi kontrollü toprak koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon kapsamında sensör önce tamamen kuru, ardından suya doygun toprak koşullarında test edilerek minimum ve maksimum analog çıkış değerleri belirlenmiştir. Sensör verileri Arduino Uno'nun 10-bit analog-dijital dönüştürücü (ADC) yapısı kullanılarak 0–1023 aralığında okunmuştur. Deneysel süreçte elde edilen ham analog sinyaller, aşağıdaki doğrusal normalizasyon yaklaşımı kullanılarak göreli hacimsel toprak nem içeriğine (Volumetric Water Content, VWC) dönüştürülmüştür:

$$VWC\ (\%) = [(A_{kuru} - A_{ölçüm}) / (A_{kuru} - A_{doygun})] \times 100$$

Burada A_{kuru} tamamen kuru toprak koşulunda elde edilen ortalama analog değeri, A_{doygun} suya doygun toprak koşulunda elde edilen ortalama analog değeri ve $A_{ölçüm}$ deney sırasında ölçülen anlık sensör çıkışını ifade etmektedir.

Kalibrasyon sürecinde her ölçüm noktası için tekrarlı okumalar alınmış ve ortalama sensör çıktıları değerlendirilmiştir. Elde edilen referans değerler doğrultusunda sulama sistemi için çift eşik değerine dayalı histerezis kontrol aralığı tanımlanmıştır. Bu kapsamda toprak nem seviyesinin yaklaşık %40'ın altına düşmesi durumunda sulama pompasının aktif hale getirilmesi, nem seviyesinin yaklaşık %70'e ulaşması durumunda ise

sulamanın durdurulması esas alınmıştır. Böylece histerezis tabanlı kontrol yaklaşımı sayesinde sensör verilerindeki küçük dalgalanmalardan kaynaklanabilecek gereksiz röle anahtarlama davranışlarının azaltılması ve sistemin daha kararlı çalışması amaçlanmıştır.

Ölçümlerde düşük maliyetli rezistif sensör yapısından kaynaklanabilecek hata paylarının; toprak sıcaklığı, iyon yoğunluğu, elektrot korozyonu ve uzun dönemli sensör sürüklenmesi gibi parametrelerden etkilenebileceği değerlendirilmiştir. Bu nedenle sensör çıktıları mutlak laboratuvar tipi VWC ölçümü olarak değil, sulama kontrolü amacıyla kalibre edilmiş göreli nem göstergesi olarak yorumlanmıştır.

Bu çalışmada deney süresi yedi hafta ile sınırlı olduğundan sensör performansında belirgin bir korozyon kaynaklı doğruluk kaybı gözlenmemiştir. Bununla birlikte rezistif sensörlerde uzun süreli kullanımda ortaya çıkabilecek elektrot aşınması ve ölçüm sürüklenmesini azaltmak amacıyla gelecekte periyodik yeniden kalibrasyon algoritmaları, ölçüm sırasında aktif edilen sensör besleme stratejileri ve kapasitif nem sensörlerinin kullanımı değerlendirilecektir.

Sensörler, bitki kök bölgesini temsil edecek şekilde yaklaşık 5–7 cm toprak derinliğine yerleştirilmiş ve ölçümler deney süresince düzenli aralıklarla takip edilmiştir. Deneyler toplam yedi haftalık gözlem periyodu boyunca yürütülmüş; sera ve açık alan ortamlarında kullanılan toprak yapısı, saksı boyutu, bitki sayısı, gübreleme miktarı ve sulama koşulları mümkün olduğunca sabit tutulmuştur. Sera içi sıcaklık ve bağıl nem değerleri düzenli ölçümler ile izlenmiş, dış ortam verileri ise Meteoroloji Genel Müdürlüğü Giresun istasyonundan temin edilen meteorolojik veriler ile karşılaştırılmıştır. Bu yaklaşım sayesinde sera mikroikliminin bitki gelişimi üzerindeki etkilerinin kontrollü biçimde değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Sıcaklık ölçümlerinde kullanılan termokupl sensörlerin kalibrasyon işlemleri deneysel süreç öncesinde kontrollü su banyosu ortamında gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon sürecinde farklı sıcaklık seviyelerinde referans sıcaklık değerleri ile sensör çıktıları karşılaştırılarak ölçüm doğruluğu kontrol edilmiş ve sensörler deney düzeneğine bu referans değerler doğrultusunda entegre edilmiştir. Böylece sıcaklık ölçümlerinin tekrarlanabilirliğinin ve deneysel güvenilirliğinin artırılması amaçlanmıştır.

Kontrol Algoritmasının Çalışma Prensibi

Geliştirilen kontrol algoritması, sensör tabanlı gerçek zamanlı veri izleme yaklaşımına dayanmaktadır. Sistem çalışma döngüsünde öncelikle FC-28 toprak nem sensöründen analog nem verisi okunmaktadır. Elde edilen veriler Arduino Uno kontrol kartı tarafından işlenerek önceden belirlenen eşik değerleri ile karşılaştırılmaktadır.

Geliştirilen sulama kontrol algoritması, çift eşik değerine dayalı histerezis kontrol yaklaşımı kullanılarak yapılandırılmıştır. Kontrol mekanizmasında toprak nem sensöründen elde edilen analog veriler sürekli olarak izlenmekte ve önceden tanımlanan alt ve üst eşik değerleri ile karşılaştırılmaktadır. Nem seviyesinin alt eşik değerinin altına düşmesi durumunda röle modülü aktif hale getirilerek sulama pompası çalıştırılmakta, nem seviyesinin üst eşik değerine ulaşmasıyla birlikte pompa otomatik olarak devre dışı bırakılmaktadır. Böylece sensör verilerindeki ani dalgalanmalardan kaynaklanabilecek gereksiz açma-kapama davranışlarının azaltılması amaçlanmıştır.

Algoritma Akış Yapısı

Algoritma 1. Çift eşik değerine dayalı histerezis kontrollü sulama algoritması

1. Başla
2. Nem sensöründen analog veri oku
3. Eğer nem değeri < alt eşik değeri ise
   Röleyi aktif et
   Sulama pompasını çalıştır
4. Eğer nem değeri > üst eşik değeri ise
   Röleyi pasif et
   Sulama pompasını durdur
5. Sensör verisini sürekli izle
6. Döngüyü tekrarla

Kontrol mekanizmasında kullanılan histerezis yaklaşımı sayesinde röle anahtarlama kararlılığı artırılmış, enerji tüketimi optimize edilmiş ve sulama mekanizmasının daha stabil çalışması sağlanmıştır. Bu yaklaşım, klasik tek eşik değerine dayalı kontrol sistemlerine kıyasla sensör gürültüsüne ve ani veri dalgalanmalarına karşı daha dayanıklı bir karar mekanizması sunmaktadır. Böylece gereksiz açma-kapama işlemleri azaltılmış ve sistem performansının olumsuz etkilenmesi sınırlandırılmıştır.

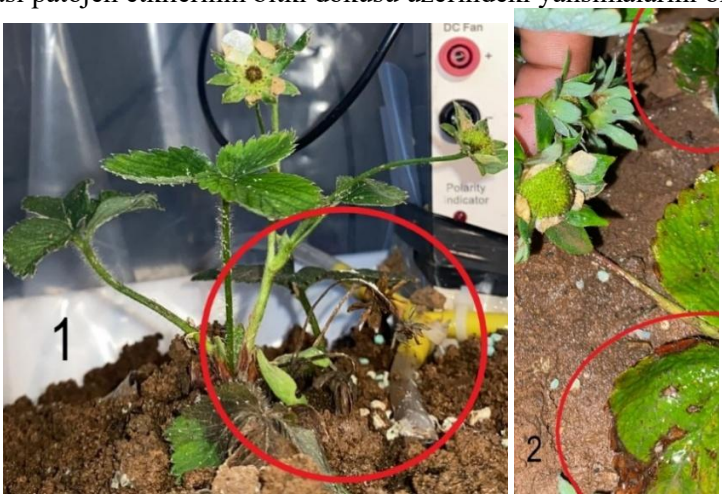
Literatürde yaygın olarak kullanılan tek eşik değerine dayalı sulama kontrol sistemlerinde, sensör verilerindeki ani değişimlerin röle anahtarlama davranışını artırabildiği ve sistem kararlılığını olumsuz etkileyebildiği bildirilmektedir. Bu çalışmada kullanılan çift eşik değerine dayalı histerezis kontrol yaklaşımı ise sulama karar mekanizmasına bir kararlılık bölgesi ekleyerek gereksiz anahtarlama davranışlarının azaltılmasını amaçlamaktadır. Böylece klasik tek eşikli kontrol yapılarından farklı olarak daha kararlı, güvenilir ve enerji verimli bir sulama yönetimi sağlanmıştır (Olodu et al., 2025).

Kurulan enerji altyapısı ve histerezis tabanlı kontrol mekanizması sayesinde sistem deney süresince stabil ve kesintisiz biçimde çalıştırılmıştır.

Bu çalışmada eşik değerleri deneysel kalibrasyon sonuçlarına göre sabit olarak belirlenmiştir. Ancak gelecekte farklı bitki türleri, gelişim evreleri ve çevresel koşullara göre eşik değerlerini otomatik olarak güncelleyebilen adaptif kontrol algoritmalarının geliştirilmesi planlanmaktadır.

Sistem stabil şekilde çalışmasına rağmen deney sürecinin ilerleyen haftalarında sera ortamında yetiştirilen bitkilerde çürüme belirtileri gözlemlenmiştir. Bu durumun nedenlerini belirlemek amacıyla literatür taraması gerçekleştirilmiş ve bitki çürümesine yol açabilecek başlıca faktörlerin; zararlı organizmalar, yetersiz güneş ışınımı, yüksek bağıl nem, sıcaklık dengesizlikleri ve kök bölgesindeki oksijen yetersizliği gibi çevresel parametreler olduğu belirlenmiştir.

Gözlenen bozulma belirtilerini destekleyen örnek görseller Şekil 12'de sunulmuştur. Şekil 12(1)'de sera ortamında gelişen çürüme ve doku bozulmaları, Şekil 12(2)'de ise yaprak ve meyve yüzeyinde gözlenen nekrotik alanlar ile potansiyel zararlı etkilerine ait bulgular gösterilmektedir. Bu görseller, mikroiklim koşullarına bağlı olarak ortaya çıkan fizyolojik stres ve olası patojen etkilerinin bitki dokusu üzerindeki yansımalarını ortaya koymaktadır.



Şekil 12. Sera Ortamında Gözlenen Çürüme Belirtileri: (1) Gövde ve Kök Bölgesinde Doku Bozulması, (2) Yaprak Ve Meyve Yüzeyinde Nekrotik Alanlar

Deneysel süreçte toprak kaynağı, gübre miktarı her iki ortamda sabit tutulmuş olduğundan, bozulmanın çevresel mikroiklim parametrelerinden kaynaklanabileceği değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda sera içerisindeki sıcaklık ve ışınım değerleri mümkün olduğunca sabit tutulmaya çalışılmıştır.

Deney düzeneğinde sera içerisindeki hava hareketini desteklemek amacıyla LED aydınlatma ünitesinin altında konumlandırılmış bir DC fan kullanılmıştır. Buna rağmen deney sürecinin ilerleyen dönemlerinde gözlenen çürüme belirtileri, mevcut havalandırma kapasitesinin sera içerisinde oluşan yüksek nem koşullarını yeterince kontrol edememiş olabileceğini göstermektedir. Özellikle kapalı sera hacmi içerisinde nemin homojen şekilde uzaklaştırılamaması ve hava dağılımının sınırlı kalması, bitki çevresinde yüksek nem bölgelerinin oluşmasına neden olmuş olabilir. Bu bulgu, sera mikroiklim yönetiminde yalnızca havalandırmanın varlığının değil, havalandırma

kapasitesi ve hava sirkülasyon etkinliğinin de kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir. Gelecekte bağıl nem sensörleri ile entegre çalışan otomatik fan kontrol sistemleri ve daha yüksek hava debisine sahip havalandırma çözümlerinin değerlendirilmesi planlanmaktadır.

Elde edilen gözlemler doğrultusunda, sera ve açık alan koşullarına ait çevresel parametrelerin bitki gelişimi üzerindeki etkileri bulgular bölümünde ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Elde edilen dış ortam verileri ile deney süresince ölçülen sera içi değerler karşılaştırmalı olarak analiz edilmiş ve sonuçlar Tablo 2'de sunulmuştur. Meteorolojik veriler günlük ortalama değerler şeklinde değerlendirilmiş olup dış ortam verileri T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü'ne bağlı Giresun Meteoroloji İstasyonu'ndan (İstasyon No: 17034) temin edilmiştir.

Tablo 2. Deney Süresince Ölçülen Sera İçi Sıcaklık ve Nem Değerleri ile Meteorolojik Dış Ortam Verilerinin Karşılaştırılması (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2025)

İstasyon No	Giresun	Haftalar	%Nem (meteoroloji)	Ortalama Sıcaklık (meteoroloji)	Rüzgar Yönü (meteoroloji) - Hız (m/sn)	Ölçülen Sıcaklık (Dış Ortam)	Sera içi sıcaklık	Ölçülen Sera Laboratuvar %Nem
17034	15.05.2025	1. Hafta	82,1	13	WSW-1,2	13,9	14,7	
17034	16.05.2025		73,9	14,6	NE-1,2	16	16,7	
17034	17.05.2025		60,3	19,9	W-1,4	20,4	21,3	
17034	18.05.2025		78,2	16,9	NNW-1,5	18,5	19,2	
17034	19.05.2025		83,3	15,4	NNE-1,3	16,2	17	
17034	20.05.2025		73,3	16,1	WSW-1,6	17,3	18	
17034	21.05.2025		73,4	16,4	NNE-1,2	17,0	18.4	
17034	22.05.2025	2. Hafta	75.9	16,1	NE-1,1	17,1	17.3	
17034	23.05.2025		72,1	17,5	NNW-0,9	19	19.9	
17034	24.05.2025		72,4	19,2	NNW-0,9	19,9	20.7	
17034	25.05.2025		68,5	19,7	N-1,1	21	21.9	
17034	26.05.2025		75,1	20,7	WNW-1,5	21,1	22.5	
17034	27.05.2025		84,5	18,5	W-2,3	19,6	20.6	
17034	28.05.2025		71,4	17,6	NNW-1	18,5	18,9	
17034	29.05.2025	3. Hafta	75	18	NNW-1,3	19,7	20,5	
17034	30.05.2025		82,5	17,3	N-0,9	17,9	18,9	
17034	31.05.2025		81,5	17,5	NNE-1,3	18,9	19,5	
17034	1.06.2025		90	18,3	N-1,3	19,1	20,2	
17034	2.06.2025		84,2	17,4	WSW-0,9	18,6	18,8	
17034	3.06.2025		79	18,2	SW-1,1	18,7	20,5	
17034	4.06.2025		69,8	20,1	NW-0,7	21,7	21,8	
17034	5.06.2025	4. Hafta	67	20,1	NNE-1	20,8	22,5	
17034	6.06.2025		75,8	19,7	NW-0,9	20,7	21,2	
17034	7.06.2025		76,5	20	WNW-1,2	20,9	22,2	
17034	8.06.2025		75,5	20,1	NNW-1	21,4	21,9	
17034	9.06.2025		81	21,2	NNW-1	21,6	23,2	
17034	10.06.2025		76,5	21,5	NW-1	23	23,1	
17034	11.06.2025		76,3	22,3	N-1,1	22,9	24,8	

17034	12.06.2025		79,2	22,9	NW-1,2	24	24,8	
17034	13.06.2025		81	22,4	W-2	23,2	24,5	
17034	14.06.2025		72	20,2	SW-1,6	21,4	21,6	
17034	15.06.2025	5. Hafta	64,4	20,3	WNW-1,5	20,8	22,6	
17034	16.06.2025		66,1	20,3	WNW-2	21,9	22	
17034	17.06.2025		70	19,5	WNW-1,5	20,2	21,5	
17034	18.06.2025		70,9	21,3	N-1	22,3	22,8	
17034	19.06.2025		97,7	21,8	N-1,2	22,7	24,2	72,5
17034	20.06.2025		76,7	21,4	N-1,1	22,8	23,2	84
17034	21.06.2025		74,3	21,6	WNW-2,5	22,2	23,8	79
17034	22.06.2025	6. Hafta	72,6	19,6	WSW-1,4	20	20,9	80
17034	23.06.2025		61	20,5	N-1,1	21,3	22,6	67,3
17034	24.06.2025		59	21,9	N-1,1	23,6	23,7	66,9
17034	25.06.2025		65	21,8	NNE-1,1	22,3	24,3	62,9
17034	26.06.2025		70,5	22,4	N-1,1	23,6	24,3	72,5
17034	27.06.2025		62,2	24,3	WNW-1,4	25,2	26,6	66,1
17034	28.06.2025	7. Hafta	74	23	W-1,8	24,4	24,7	77,8
17034	29.06.2025		71,5	21,4	SW-2,3	22,1	23,4	75
17034	30.06.2025		71,5	19,8	N-0,8	20,9	21,2	74

**Not: Meteorolojik veriler T.C. Meteoroloji Genel Müdürlüğü Giresun 17034 numaralı istasyondan temin edilmiştir.

Ölçümler, sera ortamında nemin daha stabil ancak daha yüksek seviyelerde gerçekleştiğini göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, sera ortamının dış koşullara kıyasla daha sıcak ve daha yüksek nem seviyelerine sahip olduğu belirlenmiştir.

Çalışma kapsamında, akıllı sera ortamında yetiştirilen bitkiler ile aynı boyutlara sahip bir saksı içerisinde açık hava koşullarında yetiştirilen bitkiler karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Her iki ortamda da toprak kaynağı, sulama miktarı, gübreleme ve vitamin uygulamaları eşit tutulmuştur.

Gözlemler sonucunda bitki boylarının her iki ortamda da ilk 3 hafta benzer seviyelerde ilerlediği belirlenmiştir. Bununla birlikte ürün kalitesi ve bitki dayanıklılığı açısından bazı farklılıklar tespit edilmiştir. Sera ortamında yetiştirilen biberlerin tat profilinin daha acı olduğu, açık ortamda yetiştirilen biberlerin ise daha koyu renkli ve nispeten daha uzun olduğu gözlenmiştir. Çilek bitkilerinde ise açık ortamda yetişen bitkilerin daha yüksek aroma yoğunluğu verdiği renk olarak daha açık kırmızı olduğu ve küçük olduğu, yaşam döngülerinin daha uzun olduğu belirlenirken, sera ortamındaki çilek bitkilerinin 5. haftadan sonra çürümeye başladığı tespit edilmiştir.

Bu farklılıkların temel olarak yetiştirme ortamlarının oluşturduğu mikroiklim koşullarından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Kapalı sera ortamlarında nem oranının genellikle daha yüksek olması ve hava sirkülasyonunun sınırlı kalması, özellikle çilek gibi hassas bitkilerde fungal hastalıkların ve kök çürümesinin ortaya çıkma riskini artırabilmektedir. Nitekim çalışma sürecinde sera ortamında yetiştirilen çilek bitkilerinin beşinci haftadan itibaren çürümeye başlaması, yüksek nem ve yetersiz havalandırma ile ilişkili olabilir. Açık hava koşullarında ise doğal hava akışı sayesinde bitki yüzeyinde su birikimi azalmakta ve patojen gelişimi daha sınırlı kalmaktadır.

Bitkilerde gözlenen tat farklılıkları da çevresel stres faktörleri ile açıklanabilir. Açık ortamda yetiştirilen bitkiler; rüzgâr, sıcaklık dalgalanmaları ve daha yoğun güneş ışığı gibi değişken koşullara maruz kalmaktadır. Bu tür stres faktörleri, bitkilerin savunma mekanizması olarak daha fazla şeker ve aromatik bileşik üretmesine neden olabilmektedir. Açık alanda yetiştirilen çileklerin daha yüksek aroma yoğunluğuna sahip olması bu durumla ilişkilendirilebilir. Buna karşın sera ortamında daha kontrollü ve düşük stresli bir yetiştirme ortamının bulunması, şeker birikiminin görece sınırlı kalmasına yol açmış olabilir.

Biber bitkilerinde açık ortamda gözlenen daha koyu renk oluşumu da yüksek ışık şiddeti ve güneş ışığındaki ultraviyole bileşenlerin etkisiyle açıklanabilir. Artan ışık maruziyeti, bitkilerde pigment üretimini destekleyerek daha yoğun renk oluşumuna katkı sağlayabilmektedir. Bununla birlikte açık ortamda yetiştirilen biberlerin daha uzun gelişim göstermesi, doğal ışık spektrumunun fotosentetik etkinliğinin yapay aydınlatmaya kıyasla daha yüksek olmasından kaynaklanabilir.

Sera ortamında çileklerin çürümesinin bir diğer nedeni sulama yönetimi olabilir. Kapalı ortamlarda buharlaşma hızının düşük olması nedeniyle toprak nemi daha uzun süre korunmaktadır. Açık alan ile aynı miktarda sulama yapılması, sera içerisinde aşırı nem oluşmasına ve kök bölgesinde oksijen yetersizliğine neden olmuş olabilir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, elde edilen bulgular sera ve açık alan yetiştiriciliği arasındaki bilinen farklılıklarla örtüşmektedir. Sera sistemleri bitki büyümesini destekleyen kontrollü bir ortam sunarken, doğal çevre koşulları bazı ürünlerde tat, renk yoğunluğu ve bitki dayanıklılığı açısından avantaj sağlayabilmektedir. Bu durum, akıllı sera sistemlerinde yalnızca sulama otomasyonunun yeterli olmadığını; nem kontrolü, etkin havalandırma ve ışık optimizasyonu gibi çevresel parametrelerin de dikkatle yönetilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Sistemin ekonomik uygulanabilirliğini değerlendirmek amacıyla deney düzeneğinde kullanılan temel bileşenlere ait yaklaşık yatırım maliyetleri hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 3'te sunulmuştur. Maliyet analizine fotovoltaik panel, batarya sistemi, Arduino Uno kontrol kartı, FC-28 toprak nem sensörü, mini su pompası ve LED aydınlatma elemanları dahil edilmiştir. Toplam sistem maliyeti yaklaşık 13 302 TL olarak hesaplanmıştır.

Ekonomik değerlendirme kapsamında ayrıca farklı üretim senaryolarına bağlı olarak ön fizibilite analizi gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Tablo 4'te verilmiştir. Her hasatta yaklaşık 5 kg çilek ve 5 kg sivri biber üretildiği varsayımı altında, Giresun koşullarında çilekte 10–15, sivri biberde ise 8–15 hasat gerçekleştirilebileceği dikkate alınmıştır. Çileğin yaklaşık 250 TL/kg ve sivri biberin yaklaşık 100 TL/kg piyasa değeri esas alınarak yapılan değerlendirmede, sistemin farklı üretim senaryolarına bağlı olarak yaklaşık 0,5–0,8 üretim sezonu içerisinde yatırım maliyetini karşılayabilecek potansiyele sahip olduğu öngörülmektedir. Bununla birlikte çalışma prototip ölçeğinde gerçekleştirildiğinden, ekonomik değerlendirme ön fizibilite yaklaşımı çerçevesinde yorumlanmıştır.

Bu çalışmada sistem maliyeti ve farklı üretim senaryolarına dayalı ön ekonomik değerlendirme gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinde kullanılan ekipmanların toplam yatırım maliyeti yaklaşık 13 302 TL olarak hesaplanmıştır. Yapılan değerlendirmelerde, üretim senaryolarına bağlı olarak yatırım maliyetinin yaklaşık 0,51–0,81 üretim sezonu içerisinde geri kazanılabileceği öngörülmüştür. Bununla birlikte sunulan ekonomik analiz ön fizibilite niteliğinde olup bakım giderleri, işçilik maliyetleri, ekipman yenileme maliyetleri ve uzun dönem enerji tüketimi gibi parametreleri kapsamamaktadır. Bu nedenle ticari ölçekte uygulanabilirliğin daha ayrıntılı olarak ortaya konulabilmesi için kapsamlı geri ödeme süresi ve yaşam döngüsü maliyet analizlerinin gelecekteki çalışmalar kapsamında değerlendirilmesi planlanmaktadır.

Tablo 3. Sistem Bileşenlerine Ait Yatırım Maliyetleri

Sistem Bileşeni	**Yaklaşık Maliyet**
PV Panel	6400 TL
Batarya (2 adet)	4000 TL
Arduino Uno	400 TL
Mini Su Pompası	837 TL
LED Aydınlatma	380 TL
FC-28 Toprak Nem Sensörü	1285 TL
Toplam	**13.302 TL**

Tablo 4. Farklı Üretim Senaryolarına Göre Sistemin Ön Ekonomik Değerlendirmesi

Senaryo	**Çilek geliri**	**Sivri biber geliri**	**Toplam sezonluk gelir**	**Amortisman**
Düşük senaryo	10 × 1250 = 12500 TL	8 × 500 = 4000 TL	16500 TL	0,81 sezon
Ortalama senaryo	12,5 × 1250 = 15625 TL	11,5 × 500 = 5750 TL	21375 TL	0,62 sezon
Yüksek senaryo	15 × 1250 = 18750 TL	15 × 500 = 7500 TL	26250 TL	0,51 sezon

SONUÇLAR

Bu çalışmada, fotovoltaik panel destekli ve Arduino tabanlı otomatik sulama sistemine sahip akıllı sera prototipi geliştirilmiş ve sistem performansı açık alan koşulları ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Deneysel süreç boyunca sıcaklık, bağıl nem, bitki gelişimi ve sistem çalışma verileri birlikte analiz edilerek sera mikroikliminin bitki gelişimi üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Deneysel ölçümler sonucunda sera ortamının dış koşullara kıyasla daha sıcak ve daha yüksek nem seviyelerine sahip bir mikroiklim oluşturduğu belirlenmiştir. Açık ortam sıcaklık değerleri yaklaşık 13,9–25,2 °C aralığında değişirken, sera içi sıcaklık değerlerinin çoğu ölçümde dış ortamdan daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Özellikle beşinci haftadan itibaren sera içi sıcaklığının dış ortama göre yaklaşık 0,5–2 °C daha yüksek seviyelerde gerçekleştiği gözlenmiştir. Benzer şekilde sera içi bağıl nem değerlerinin çoğu ölçümde dış ortam nem değerlerinden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum, kapalı ortam koşullarının nem birikimini artırarak daha stabil ancak daha nemli bir mikroiklim oluşturduğunu göstermektedir.

Bitki gelişim gözlemleri incelendiğinde, ilk üç hafta boyunca sera ve açık alan koşullarında benzer büyüme performanslarının elde edildiği görülmüştür. Ancak deney sürecinin ilerleyen aşamalarında ürün kalitesi, renk yoğunluğu ve bitki dayanıklılığı açısından farklılıklar ortaya çıkmıştır. Açık ortamda yetiştirilen çilek bitkilerinde daha yüksek aroma yoğunluğu, daha açık kırmızı renklenme ve daha uzun yaşam döngüsü gözlenirken, sera ortamındaki çilek bitkilerinde beşinci haftadan itibaren çürüme belirtileri ortaya çıkmıştır. Biber bitkilerinde ise açık ortamda yetiştirilen örneklerde daha koyu renk oluşumu ve daha uzun gelişim gözlenmiştir. Bu farklılıkların yetiştirme ortamlarının oluşturduğu mikroiklim koşullarından kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

Sera ortamında gözlenen çürüme problemlerinin; yüksek bağıl nem, sınırlı hava sirkülasyonu, düşük buharlaşma oranı ve kök bölgesindeki oksijen yetersizliği ile ilişkili olabileceği düşünülmektedir. Özellikle kapalı ortamda nemin uzun süre korunması, aynı sulama miktarının uygulanması durumunda kök bölgesinde aşırı nem oluşumuna neden olmuş olabilir. Beşinci haftadan sonra gerçekleştirilen havalandırma uygulamaları sonucunda sera içi nem seviyelerinde kısmi düşüş gözlenmiş, ancak değerlerin çoğu ölçümde dış ortamın üzerinde kaldığı belirlenmiştir. Bu durum, sera uygulamalarında yalnızca otomatik sulama kontrolünün yeterli olmadığını; havalandırma, nem kontrolü ve ışık yönetimi gibi mikroiklim parametrelerinin birlikte optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir.

Fotovoltaik enerji altyapısı deney süresince sistemin enerji gereksinimini karşılayacak şekilde stabil çalışmıştır. Monokristal PV panel tarafından üretilen elektrik enerjisi bataryada depolanmış ve Arduino tabanlı kontrol ünitesi, toprak nem sensörü, röle modülü, mini su pompası ve LED aydınlatma sisteminin enerji ihtiyacı bu depolama sistemi üzerinden sağlanmıştır. Kullanılan 6 V ve 4 Ah kapasiteli batarya sistemi sayesinde sulama kontrol mekanizması kesintisiz biçimde işletilmiştir. Ayrıca çift eşik değerine dayalı histerezis kontrol algoritması sayesinde gereksiz pompa anahtarlamalarının azaltıldığı ve sistem kararlılığının artırıldığı gözlenmiştir.

Çalışma kapsamında kullanılan çift eşik değerine dayalı histerezis kontrol algoritmasının sistem kararlılığı açısından olumlu sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Sensör verilerindeki ani değişimlerin doğrudan pompa kontrolüne yansıtılmaması sayesinde röle anahtarlama frekansı azaltılmış ve sulama sistemi deney süreci boyunca stabil şekilde çalıştırılmıştır. Bu durum, yenilenebilir enerji destekli akıllı sulama sistemlerinde histerezis tabanlı kontrol yaklaşımının uygulanabilir ve işlevsel bir yöntem olduğunu göstermektedir.

Sistemin temel bileşenleri düşük maliyetli Arduino tabanlı kontrol kartı, FC-28 nem sensörü, mini su pompası ve küçük ölçekli fotovoltaik enerji altyapısından oluşmaktadır. Bu nedenle sistem özellikle küçük ölçekli üreticiler için erişilebilir bir çözüm sunmaktadır. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen ön ekonomik değerlendirmede, sistem yatırım maliyetinin kullanılan üretim senaryosuna bağlı olarak yaklaşık 0,51–0,81 üretim sezonu içerisinde geri kazanılabileceği öngörülmüştür. Bununla birlikte sunulan değerlendirme ön fizibilite niteliğinde olup bakım giderleri, işçilik maliyetleri, ekipman yenileme maliyetleri ve uzun dönem işletme giderlerini kapsamamaktadır. Bu nedenle daha büyük ölçekli uygulamalarda ayrıntılı maliyet-fayda, yaşam döngüsü maliyeti ve geri ödeme süresi analizlerinin gerçekleştirilmesi önerilmektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, elde edilen bulgular fotovoltaik enerji destekli akıllı sulama sistemlerinin küçük ölçekli sera uygulamalarında teknik açıdan uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte sürdürülebilir ve sağlıklı üretim için yalnızca sulama otomasyonunun yeterli olmadığı; sıcaklık, bağıl nem, havalandırma ve ışık

optimizasyonu gibi çevresel parametrelerin de bütüncül biçimde yönetilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Gelecekte gerçekleştirilecek çalışmalarda gerçek zamanlı veri analitiği, bağıl nem sensörleri ile entegre otomatik havalandırma sistemleri, düşük güçlü aktif nem alma veya hava sirkülasyon çözümleri, gelişmiş sensör entegrasyonu ve enerji üretim-tüketim analizlerinin sisteme dahil edilmesi önerilmektedir.

ÇALIŞMANIN BİLİMSEL KATKISI

Bu çalışma, yenilenebilir enerji ile çalışan otomatik sulama sistemlerinin gerçek bir yetiştirme ortamında uygulanabilirliğini göstermesi bakımından literatüre katkı sağlamaktadır. Fotovoltaik panel destekli akıllı sera prototipinin meteorolojik verilerle birlikte değerlendirilmesi, mikroiklim koşullarının bitki sağlığı üzerindeki etkilerinin veri temelli olarak analiz edilmesine olanak tanımıştır.

Araştırmanın önemli katkılarından biri, akıllı sera sistemlerinde yalnızca sulama otomasyonunun yeterli olmadığını; nem ve sıcaklık gibi çevresel parametrelerin sürekli izlenmesi ve kontrol edilmesi gerektiğini ortaya koymasıdır. Ayrıca çalışma, teknolojik altyapı ile agronomik planlamanın birlikte ele alınmasının sera verimliliği açısından kritik olduğunu göstermektedir. Bu yönüyle araştırma, küçük ve orta ölçekli üreticiler için uygulanabilir, sürdürülebilir ve enerji bağımsız bir üretim modeline bilimsel temel sunmaktadır.

Yapay zekâ destekli karar mekanizmalarının entegrasyonu da gelecekte araştırılabilecek konular arasında yer almaktadır.

GELECEK ÇALIŞMALAR

Elde edilen bulgular doğrultusunda, gelecekte geliştirilecek akıllı sera sistemlerinde mikroiklim kontrolünün daha hassas hale getirilmesi önerilmektedir. Sıcaklık ve nem sensörlerinden elde edilen verilerle çalışan otomatik havalandırma sistemlerinin kullanılması, aşırı nem oluşumunu önleyerek bitki hastalıkları riskini azaltabilir.

Gelecek çalışmalarda bitki yerleşim planının agronomik kriterlere göre düzenlenmesi ve bitkiler arası mesafenin optimize edilmesi özellikle önerilmektedir. Uygun bitki aralığı, hava dolaşımını artırarak lokal nem birikimini azaltabilir ve çürüme gibi hastalıkların görülme olasılığını düşürebilir.

Ayrıca sulama kararlarının yalnızca sabit eşik değerlerine bağlı kalmadan veri odaklı algoritmalarla desteklenmesi, bitkilerin gerçek zamanlı su ihtiyacına göre sulama yapılmasını mümkün kılabilir. Farklı bitki türleriyle ve daha uzun gözlem periyotlarıyla gerçekleştirilecek çalışmalar ise elde edilen bulguların genellenebilirliğini artıracaktır.

Sonuç olarak, teknolojik otomasyon ile doğru yetiştirme planlamasının birlikte ele alındığı akıllı sera sistemlerinin, sürdürülebilir tarımsal üretimin sağlanmasında önemli bir potansiyele sahip olduğu değerlendirilmektedir.

YAPAY ZEKA BEYANI

Bu makalenin hazırlanmasında yapay zeka araçları kullanılmamıştır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarların makale ile ilgili başka kişiler veya kurumlar ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından 1919B012469759 numaralı 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında desteklenmiş ve tamamlanmıştır. Projeye sağladıkları değerli katkı ve desteklerinden dolayı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) teşekkür ederiz. Ayrıca, çalışmada kullanılan verilerin temin edilmesine katkı sağlayan T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü Meteorolojik Veri İşlem Dairesi Başkanlığı ile Giresun Meteoroloji İstasyonu'na teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Ashir, D. M. N. A., Ahad, M. T., Talukder, M., & Rahman, T. (2022). *Internet of Things (IoT) based smart agriculture aiming to achieve sustainable goals.* arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2206.06300

Azizoğlu, R., & Koçyiğit, F. (2025). Investigation of pump selection and energy efficiency in agricultural irrigation systems. *Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 14*(1), 57–75. https://doi.org/10.55007/dufed.1681728

Bayraktar, S. S., & Küçükbayrak, M. (2025). Tarım sektöründe sürdürülebilirlik ve tarımsal sulamanın önemi. *TYB Akademi, 43*, 154–168.

Demir, M. (2025). Optimizing solar water heating systems for carbon emission reduction in residential buildings: A case study of Turkey's renewable energy potential. *Case Studies in Thermal Engineering, 69*, Article 105964. https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.105964

Geliş, K., Akyürek, E. F., & Yoladı, M. (2020). Panel konumu ve açısının fotovoltaik panel karakteristiği üzerine etkisi. *Journal of the Institute of Science and Technology, 10*(3), 1899–1908. https://doi.org/10.21597/jist.686478

Karagöz, Ş., Aras, M., Yıldırım, O., Şimşek, F., & Çomaklı, Ö. (2025). Performance and efficiency of photovoltaic panels in Erzurum winter conditions. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28*(2), 732–746. https://doi.org/10.17780/ksujes.1611476

Karaağaç, M. O., Oğul, H., & Bulut, F. (2021). Evaluation of monocrystalline and polycrystalline photovoltaic panels in Sinop province conditions. *Turkish Journal of Nature and Science, 10*(1), 176–181. https://doi.org/10.46810/tdfd.855488

Keskin, V., Pour Rahmati Khalejan, S. H., & Çıkla, R. (2021). Investigation of the shading effect on the performance of a grid-connected PV plant in Samsun/Turkey. *Politeknik Dergisi, 24*(2), 553–563. https://doi.org/10.2339/politeknik.701525

Masat, G., İkikat Tümer, E., & Gürün, S. (2025). Mısır yetiştiriciliğinde toprak ve su kaynaklarının sürdürülebilirliği açısından damla sulama yönteminin uygulanabilirliği. *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi, 12*(1), 1–9. https://doi.org/10.30910/turkjans.1435430

Olodu, D. D., Inegbedion, F., & Ihenyen, O. I. (2025). Smart water management systems: Engineering innovations for water conservation and distribution. *Journal of Studies in Advanced Technologies, 3*(1), 13–31. https://doi.org/10.63063/jsat.1613583

Sancar, M. R., & Bayram, A. B. (2023). Modeling and economic analysis of greenhouse top solar power plant with PVsyst software. *International Journal of Engineering and Innovative Research, 5*(1), 48–59. https://doi.org/10.47933/ijeir.1209362

Şimşek, O., & Aydınbaş, G. (2025). Su tüketimi ile tarım, sanayi, turizm sektörleri ilişkisi üzerine panel nedensellik analizi. *Doğuş Üniversitesi Dergisi, 26*(1), 205–231. https://doi.org/10.31671/doujournal.1465481

T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2024). *İl ve ilçeler istatistikleri*. https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx

Tutar, F. K., Abukalloub, A., & Çat, M. (2025). Geleneksel tarımdan akıllı tarım uygulamalarına dönüşüm süreci: Türkiye örneği. *MTÜ Sosyal ve Beşeri Bilimler Dergisi, 5*(1), 46–62.