

Solar enerji hasadı ile çalışan IoT tabanlı dış ortam veri izleme sistemi tasarımı ve uygulaması

Design and implementation of an IoT-based outdoor data monitoring system powered by solar energy harvesting

Umut Burkaz^{1,*} , Nuri Kapucu² 

¹ Hitit Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 19030, Çorum, Türkiye

² Hitit Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 19030, Çorum, Türkiye

Öz

Bu çalışmada, solar enerji hasadı ile çalışan Nesnelerin İnterneti (Internet of Things, IoT) tabanlı dış ortam veri takip sistemi tasarlanmıştır. Tasarımda, bir ESP32 mikrodenetleyici, Uzun Menzilli Haberleşme (Long Range, LoRa) RA-01 modülü ve Güvenli Sayısal Hafıza Kartı (Secure Digital Memory Card, SD Kart) kart modülü kullanılmıştır. Güç yönetimi, güneş panelleri, CH3791 solar şarj modülü ve dört adet paralel bağlı 18650 Li-ion pil grubu ile sağlanmıştır. Sistem, LoRa'dan gelen verileri eş zamanlı olarak hem yerel SD karta (SPI üzerinden) hem de Wi-Fi üzerinden buluta (HTTP POST veya MQTT) aktarabilen hibrit bir yapıda tasarlanmıştır. Ayrıca, INA219 sensörü (I2C üzerinden) kullanılarak sistemin anlık güç durumu uzaktan izlenebilmektedir. Gerçek ortam koşullarında (çatı sahasında) gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ile güç yönetim sisteminin performansı değerlendirilmiştir. Deneysel çalışma sonuçları, CN3791 şarj entegresinin beklenen Sabit Akım (CC) – Sabit Gerilim (CV) şarj karakteristiği ile tam uyumlu çalıştığını ve sistemin sürdürülebilir enerji hasadı sağladığını doğrulamıştır.

Anahtar kelimeler: Enerji hasadı, Solar enerji, Kablosuz veri kaydedici, Nesnelerin interneti

1 Giriş

Veri kaydediciler, dahili ya da harici sensörler sayesinde verilerin takip edilmesini sağlayan sistemlerdir. Veri kaydediciler, meteorolojik izleme, enerji sistemleri, akıllı tarım uygulamaları ve endüstriyel otomasyon gibi alanlarda kullanılmaktadır. Veri kaydedici sistemlerin kurulumunda takip edilecek parametre çeşitliliğine göre çok sayıda sensör bağlantısı mevcuttur. Bu durum güç ve iletişim hatlarının kurulumunda kablo karışıklıklarına yol açmaktadır. Kablolama ve sensör kurulumu maliyetinin çoğu zaman sensörlerin kendisinden daha fazla olduğu belirtilmiştir [1, 2]. Kabloların ve sinyal hatlarının ortadan kaldırılmasıyla mühendislik ve zamana bağlı maliyetlerin belirgin olarak azaldığı ve işleme sürelerinin günlerden saatlere indiği, WirelessHART uygulama raporlarında ve maliyet verimliliğini esas alan modern otomasyon standartlarında ayrıntılı olarak gösterilmiştir [3, 5].

Abstract

In this work, an outdoor data monitoring system based on internet of things (IoT) which is powered by solar energy harvesting is designed. An ESP32 microcontroller, Long Range module RA-01 and a secure digital memory card module are used in the design of the considered system. Power management is provided by solar panels, CH3791 solar charging module and four parallel-connected 18650 Li-ion battery packs. The considered system is designed in a hybrid way in which the data transmitted from LoRa is synchronously sent to both internal SD card and cloud (HTTP POST or MQTT) where Wi-Fi is used for cloud access. Besides, the instant power of the system can be remotely monitored by using INA219 sensor (over I2C). The performance of the power management system is evaluated through experimental studies conducted under real environment conditions (rooftop field). Experimental results confirm that the CN3791 charging module operates in full compliance with the expected Constant Current (CC) – Constant Voltage (CV) charging characteristics and that the system provides sustainable energy harvesting.

Keywords: Energy harvesting, Solar energy, Wireless data logger, Internet of things

Veri kaydediciler uzun süreli ve düşük maliyetli ölçüm ihtiyacının başlıca bileşenlerinden biri haline gelmiştir. Nesnelerin İnterneti (Internet of Things, IoT) teknolojisinin yaygınlaşmasıyla birlikte veri kaydediciler yalnızca sensör verisini depolayan pasif cihazlar olmaktan çıkmışlardır. Buna bağlı olarak çeşitli araştırmalarda kablosuz teknolojilerin esneklik, ölçeklenebilirlik ve bakım kolaylığı sağladığı fakat bununla birlikte kablosuz iletimin gecikme ve paket kaybı gibi yönetilmesi gereken etkilerinin mevcut olduğu özellikle zorlu çevre koşullarında yapılan veri iletim performans testlerinde gözlemlenmiştir [6, 7]. Buna göre, kablosuz veri kaydedici tercihinin asıl gayesinin sadece kablo kalabalığını azaltmak olmadığı, aynı zamanda birden fazla sensörün farklı noktalara yerleştirilmesi, hızlı devreye alma ve saha için yeniden konfigürasyon esnekliği elde edilmesi olduğu anlaşılmaktadır [8, 9].

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: umutburkaz49@gmail.com (U. Burkaz)

Geliş / Received: 10.11.2025 Kabul / Accepted: 07.12.2025 Yayınlanma / Published: 15.01.2026

doi: 10.28948/ngumuh.1821141

Son yıllarda yapılan çeşitli çalışmalara göre, düşük güç ve yerel bir Güvenli Sayısal Hafıza Kartı (Secure Digital Memory Card, SD Kart) ile dahili depolama hedefleyen açık-kaynak veri kaydediciler ile bulut/portal akışını hedefleyen sistemler mevcuttur [10, 11]. ALog serisi ve Cave Pearl gibi veri kaydediciler, verileri yerel olarak SD karta kaydetmeye yarayan ve bu verileri çevrimdışı ortamlarda saklayabilen sistemlerdir [12, 13]. Bu tür cihazlar, çevrimdışı veri kaydını sağlamak için yerel depolama alanı olarak kullanılır. Bu yüzden sistemde bulut bağlantısına ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu tür tasarımlar, enerji verimliliği ve düşük maliyetli olma yönleriyle ön plana çıkmaktadır. Öte yandan, bazı veri kaydediciler verileri doğrudan bulut ortamına aktarmaktadır [14, 15]. Bu sistemler, verilere anlık erişimi sağlayıp, kullanıcıların verileri uzaktan takip etmelerine olanak sağlar. Ancak, bu çözümler internete sürekli erişim gerektirmektedir ve yerel depolama alanı yerine bulut depolama alanına ihtiyaç duymaktadır. Genellikle gerçek zamanlı veri takibi ve anlık müdahale imkânı sağlamaktadır fakat bağlantı kesildiğinde veri kaybı riski de ortaya çıkmaktadır [16, 17]. Edge ve bulut hibrit yaklaşımıyla veri kaydedicinin hem yerel depolama hemde bulut akışını aynı anda destekleyebilmesi amaçlanmaktadır. Cihaz yerel depolama kullanarak veriyi kaydederken, internete bağlandığında veriyi buluta aktarabilmektedir. Bu sistemin amacı, hem çevrimdışı hem çevrimiçi veri kaydını eşzamanlı olarak yürütmektir ve bu yaklaşımın ağ arızalarına karşı veri bütünlüğünü koruduğu güncel hibrit mimari çalışmalarında doğrulanmıştır [18-22]. Böylelikle internet bağlantısı olmadığı durumlarda bile veriler kaybolmaz ve cihaz bulut verilerini senkronize edebilir. Örneğin, Google Sheets gibi bir bulut sistemi ile veriler eşzamanlı olarak güncellenebilir.

Bilindiği kadarıyla eşzamanlı bulut akışı ile yerel kaynak destekli, Uzun Menzilli Telemetri (Long Range, LoRa), güneş enerji hasadı ile enerji özerkliği olan takip edilebilir bir sistem özelliklerini tek gövdede birleştiren sahaya dönük bütünleşik bir veri kaydedici tasarımı bulunmamaktadır. Bu çalışmada önerilen sistem kablo karmaşıklığını ve bağımlılığını ortadan kaldırmaktadır. Çift yönlü veri aktarımının sürekliliği ve uzun menzil-düşük güç ekseninde literatürdeki eksiği gideren bir sistem tasarlanmıştır.

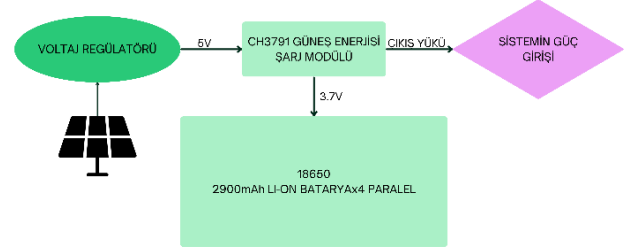
2 Sistem mimarisi

Bu bölümde, tasarlanan veri kaydedicinin temel bileşenleri olan güç yönetim sistemi ve haberleşme mimarisinin çalışması detaylı olarak açıklanmaktadır. Sistem, güneş enerjisi ile hem enerji depolamakta hem de aynı zamanda çalışmaya devam etmektedir. Çalışma esnasında sürekli olarak veri toplama, kaydetme ve buluta eş zamanlı veri aktarımı yapılmaktadır.

2.1 Güç ve şarj yönetim sistemi

Şekil 1’de, tasarlanan veri kaydedici sistemin enerji yönetim birimi gösterilmektedir. Sistem, 5V 220mAh 3 adet güneş panelinin paralel bağlanmasıyla enerji hasat etmektedir. Bu sayede, güneş ışığından elde edilen enerji elektriğe dönüştürülerek sistemin enerji ihtiyacı karşılanmaktadır. Güneş panellerinin çıkış voltajı, bir regülatör aracılığıyla 4V-5V seviyelerine yükseltilmektedir

ve bu voltaj CH3791 solar şarj modülüne iletilmektedir. CH3791 modülü, her iki işlevi bir arada yerine getirir. Bir yandan 18650 model 2900mAh 4 adet paralel bağlı lityum iyon pil setini şarj eder, diğer yandan bu pillerden alınan güçle tüm sistemin çalışmasını sağlar. Bu sayede sistem, güneş enerjisinin sürekli olarak depolanmasını ve pil setinin şarj edilmesini mümkün kılar.

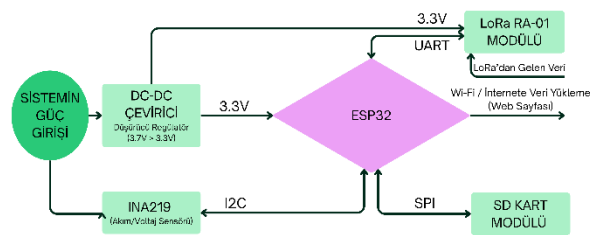


Şekil 1. Güç ve şarj yönetim sistemi

Pillerin şarj durumu, INA219 akıllı enerji ölçüm modülü ile izlenmektedir. Bu modül, pil voltajı, akım ve güç verilerini ölçerek, sistemin enerji verimliliği ve sağlamlığı hakkında sürekli bilgi sağlar. Bu sayede kullanıcı hem talep ettiği verileri izleme fırsatına erişebilmekte hemde kullandığı sistemin güç yönetimini anlık olarak takip edebilmektedir.

2.2 Sistemin haberleşme mimarisi

Sistemin haberleşme mimarisi Şekil 2’de gösterildiği gibi merkezde bir ESP32 mikrodenetleyicinin olduğu farklı çevresel birimler ve sensörlerin yer aldığı seri haberleşme protokolleri ile oluşturulmuştur. Güç yönetim sisteminden anlık olarak verilerin izlenebilmesi için INA219 sensörü ile Entegreler Arası Haberleşme (Inter-Integrated Circuit, I²C) protokolü kullanılmıştır. Verilerin yerel olarak ve kalıcı bir şekilde saklanabilmesi için offline depolama amacıyla SD kart modülü ile Seri Çevresel Arayüz (Serial Peripheral Interface, SPI) protokolü üzerinden iletişim kurulmuştur. Sistemin uzaktan telemetri ve veri aktarım durumu ise, Evrensel Asenkron Alıcı - Verici (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter, UART) arabirimi üzerinden bağlanan LoRa modülü aracılığıyla sağlanmaktadır. Bu çoklu protokol mimarisi, sistemin hem güç durumunu, hemde harici veri toplama ve iletme fonksiyonlarını eş zamanlı olarak yürütülmesine olanak tanır.

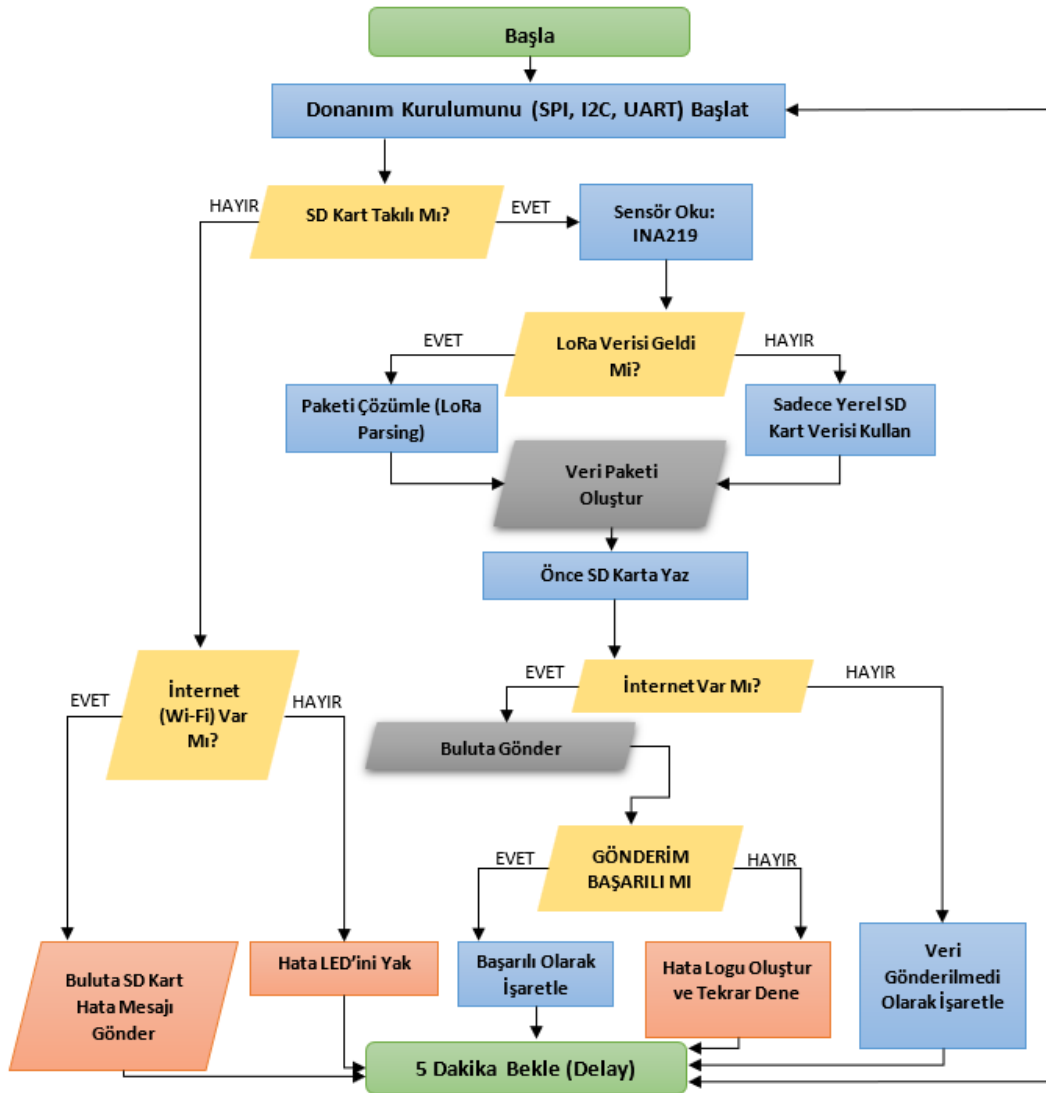


Şekil 2. Sistemin haberleşme entegrasyonu

Şekil 3'te görüldüğü gibi veri kaydedici topladığı bilgileri web platformuna ve Micro SD karta olmak üzere iki farklı yere göndermektedir. Bu şekilde, internete erişim olmadığı durumlarda veriler kaydedilmeye devam etmekte ve internet erişimi tekrar sağlandığında eksik olan veriler buluta aktarılmaktadır. ESP32 ile LoRa modülünün birlikte kullanılmasının sebebi verileri kablosuz şekilde buluta aktarmaktır. Ağ gitse bile kayıt durmayıp, bağlantı gelince otomatik senkronize olmaktadır. Enerji yönetimi bu sistemde önemli bir konudur. Batarya bloğu ile ana güç hattının arasına INA219 akım-gerilim sensörü yerleştirilmiştir. ESP32 bu sensörle I²C üzerinden haberleşmektedir. I²C'nin tercih edilmesinin nedeni, az pinle stabil bir iletişim kurabilmesidir. ESP32 düzenli aralıklarla sensörü sorgulayıp gerilim ve akım değerlerini okumaktadır. Bu değerlerden de $P=I \times V$ formülüyle anlık güç tüketimi hesaplanabilmektedir. Enerji verileri "Log Data" etiketiyle hem SD karta hem de telemetri verilerine eklenebilmektedir. Böylece sistemin kendi güç durumunu da uzaktan izlemek mümkün olmuştur. Dış ortamda çalışırken internetin kopması ciddi bir risk taşıdığından sensörlerden gelen veriler ve LoRa'dan alınan paketler doğrudan SPI arayüzüyle çalışan SD kart modülüne

yazılmaktadır. SPI'nın tercih edilmesinin sebebi hem hızlı hem de çift yönlü iletişime izin vermesidir. I²C'ye göre daha stabil ve yüksek hızlı kayıt yapabilmektedir.

Uzak iletişim kısmında LoRa modülü görev yapmaktadır. Bu modül ESP32'ye UART üzerinden bağlanmıştır. LoRa, sahadaki sensörlerden gelen verileri toplayan bir alıcı (gateway) gibi davranmaktadır. UART'tan gelen ham veriler ESP32 sayesinde çözümlenir, zaman damgası eklenir, sonra hem SD karta yazılır hem de internet bağlantısı ile buluta gönderilir. Sonuç olarak ESP32 bu sistemde sadece veriyi aktaran birim değil, aynı zamanda yerelde işleyebilen akıllı bir uç cihaz gibi davranabilmektedir. Tüm veriler önce SD karta yazılarak, veri kaybı riski ortadan kaldırılmaktadır. Eğer internet bağlantısı mevcut ise Wi-Fi üzerinden HTTP POST ya da MQTT ile buluta gönderilir. Bu yapı, sistemi hem çevrimdışı çalışabilir hale getirmektedir hem de bağlantı geldiğinde güncel tutmaktadır. Sadece SD karta kayıt yapan ya da sadece buluta bağlı çalışan sistemlere göre daha güvenilir ve esnek bir çözüm sunulmaktadır.



Şekil 3. Sistemin yazılım akış diyagramı

3 Deneyisel çalışmalar

Çalışma için yapılan testler, güneş enerji santrallerine yönelik sensörler üreten bir firmanın çatı sahasında yapılmıştır. Şekil 4'te görüldüğü gibi sistem meteorolojik verilerin alındığı bir ortamda test edilmiştir. 18.09.2025 ile 7.10.2025 tarihleri arasında her 5 dakikada bir veri alınarak testler yapılmıştır.



Şekil 4. Veri kaydedici sistemin test edildiği dış ortam görüntüsü

Gerçekleştirilen testlerde sistemin batarya doluluk oranı (SOC) zaman içerisinde izlenmiş ve CN3791 şarj entegresinin performansı değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler, sistemin gün boyunca güneş ışığı koşullarına uyumlu bir şekilde enerji hasadı yaptığını göstermektedir. Günün erken saatlerinde düşük akım koşullarında başlayan şarj süreci, güneş panellerinin maksimum güç noktalarına ulaşmasıyla birlikte sabit akım (CC) moduna geçmiştir. Bu evrede doluluk oranında belirgin bir artış gözlenmiştir. Gün ortasında panel geriliminin nominal seviyeye ulaşmasıyla birlikte şarj işlemi sabit gerilim (CV) moduna geçmiştir. Bu durum, CN3791'in CC-CV şarj karakteristiği ile tamamen uyumludur. Bu uyum, sistemin gün içi enerji üretimi ve depolama sürecinin verimli bir şekilde işlediğini göstermektedir. Özellikle 25–32 °C aralığındaki ortam sıcaklığı koşullarında pillerin kararlı bir dolunum profili sergilediği gözlemlenmiştir.

Elde edilen veriler, güneş panellerinin sağladığı ortalama akımın 220 mA mertebesinde olduğu durumda sistemin 4 ×

2900 mAh kapasiteli bataryaları tam şarja yaklaştırabildiğini göstermektedir. Şarjın son evresinde doluluk oranı artış hızının azalması, hücre başına gerilimin 4.2V'a yaklaşmasıyla akım sınırlamasına geçildiğini göstermektedir. Dolayısıyla sistemin tasarımında kullanılan CN3791 entegresi, hem şarj güvenliği hem de hücre ömrü açısından istenen şekilde çalışmaktadır. Veri kaydı sürecinde, ölçüm noktaları arasında görülen küçük genlikli salınımlar güneş ışınımındaki anlık değişimlerle ilişkilidir. Bu dalgalanmalar, Maksimum Güç Noktası Takibi (Maximum Power Point Tracking, MPPT) benzeri enerji dengeleme etkisinin doğal sonucu olarak değerlendirilebilir. Ayrıca, elde edilen sonuçlar, sistemin enerji dönüşüm veriminin sabit akım fazında yüksek, sabit gerilim fazında ise kontrollü olarak azaldığını göstermektedir. Yapılan testlerde, sistemin hem enerji toplama hem de depolama aşamalarında stabil bir çalışma performansı sergilediği ortaya konulmuştur. Doluluk oranı verileri, tasarlanan devre topolojisinin sürdürülebilir enerji hasadı için uygun olduğunu ve batarya yönetiminde CN3791'in beklenen regülasyon davranışını doğru biçimde yerine getirdiğini doğrulamaktadır.

3.1 Uzun süreli testlerin analizi

Yapılan testler, 20 gün boyunca verilerin Google Sheet üzerinden izlenmesi yöntemiyle takip edilmiştir. Bu testler de yer alan Ortam Sıcaklığı verisi, Panel Sıcaklığı verisiyle karşılaştırma yapmak için alınmıştır. Panel sıcaklığı verisinin takip edilmesinin sebebi, kullanılan güneş panellerinin hangi sıcaklıklarda ne kadar enerji üretebildiğine yönelik değerlendirme yapılması içindir. Nitekim, güneş panellerinin yüksek sıcaklıklarda düşük verimlilik ortaya koyduğu bilinmektedir. Şekil 5'te verilerin kaydedildiği web ortamının görseli yer almaktadır. Takip edilen verilerde yer alan Işınım Değeri verisi, Çorum'un Organize Sanayi Bölgesinde yer alan Argesim Teknoloji firmasının Seven Sensor Solutions markalı Işınım Sensörünün verileridir. Tablo 1'de yer alan verilerin Işınım Değeri haricinde olanlar, veri kaydedici üzerinden alınan verilerdir.

Şekil 5. Verilerin takip edildiği web sayfası görüntüsü

Işınım verileri ayrıntılı olarak incelendiğinde çok fazla iniş-çıkışların olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi bulutlu günlerde testlerin yapılmasıdır. Batarya Sıcaklık verileri incelendiğinde ise farkların fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi ise bataryaların üzerine konulan sıcaklık sensörünün 2 cm uzaklığa bırakılmasıdır. Daha önceden yapılan testlerde bataryaya yakın bırakılan sıcaklık

sensörlerinin bataryalara bitişik olarak konumlandırıldığında montaj açısından sorun çıkardığı tespit edilmiştir.

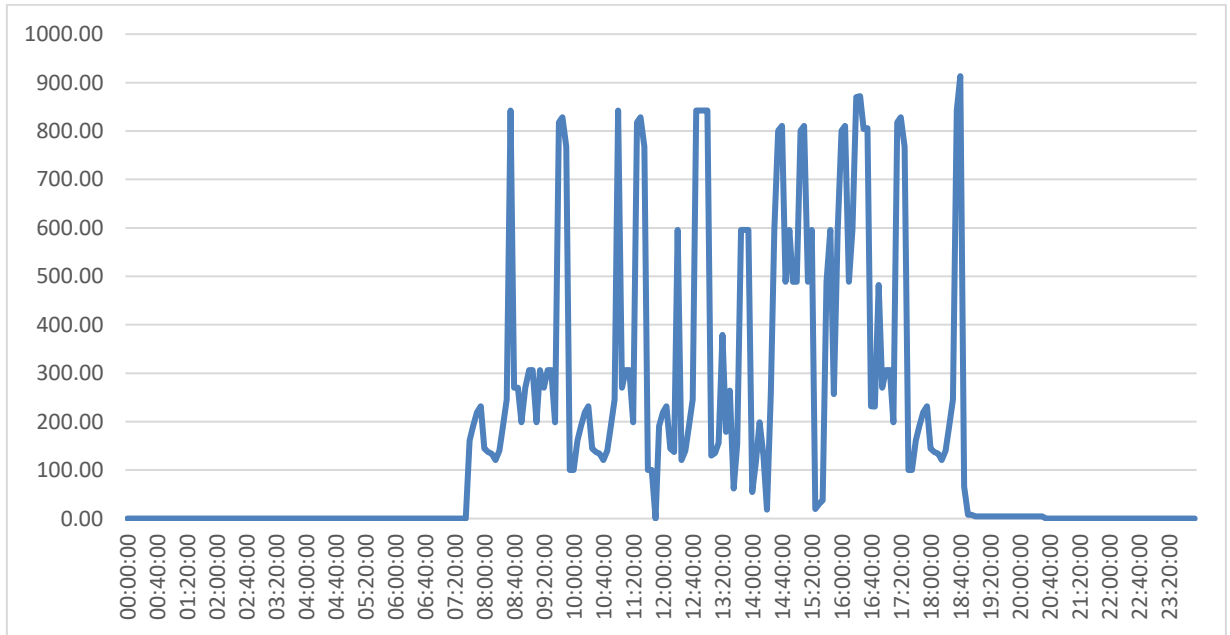
Bataryanın Doluluk Oranı verileri incelendiğinde sıcaklık ve ısıtım ile ilgili verilerin normal olduğu durumlarda iyi durumda olduğu gözlemlenmiştir. Çok bulutlu olan günlerde güneş enerji hasadı yapılamadığı için doluluk oranı oldukça düşmüştür. Tablo 1’de test yapılan 20 gün için ortalama, en küçük ve en büyük değerler¹ karşılaştırılmıştır.

Tablo 1. Uzun süreli testlere ait takip edilen veriler için günlük ortalama, en büyük ve en küçük değerler

Tarih	Değer Türü	Ortam Sıcaklığı	Panel Sıcaklığı	Işınım Değeri (W/m ²)	Batarya Sıcaklığı	Batarya Voltajı	Batarya Doluluk Oranı	Ortam Nem Oranı
18.09.2025	Ortalama Değer	14.98	15.45	97.24	16.00	4.12	90.00	76.64
	En Küçük Değer	5.00	5.40	0.00	6.01	4.12	90.00	57.40
	En Büyük Değer	31.40	30.90	798.10	32.03	4.12	90.00	85.00
19.09.2025	Ortalama Değer	18.33	20.69	220.11	19.05	4.13	94.55	69.24
	En Küçük Değer	8.00	7.80	0.00	9.01	4.12	90.00	35.00
	En Büyük Değer	33.60	32.90	1065.50	33.60	4.15	100.00	85.00
20.09.2025	Ortalama Değer	16.72	22.56	211.07	17.28	4.15	100.00	70.98
	En Küçük Değer	3.20	4.10	0.00	4.01	4.15	100.00	35.00
	En Büyük Değer	33.90	33.50	1053.90	33.90	4.15	100.00	85.00
21.09.2025	Ortalama Değer	18.00	19.44	212.84	18.63	4.15	100.00	69.26
	En Küçük Değer	7.80	7.60	0.00	8.81	4.15	100.00	35.00
	En Büyük Değer	33.70	33.90	985.10	33.70	4.15	100.00	85.00
22.09.2025	Ortalama Değer	16.55	23.39	209.56	17.13	4.15	100.00	67.65
	En Küçük Değer	3.20	6.60	0.00	4.21	4.15	100.00	35.00
	En Büyük Değer	33.80	33.60	820.70	33.90	4.15	100.00	85.00
23.09.2025	Ortalama Değer	15.85	16.79	233.14	16.43	4.15	100.00	66.61
	En Küçük Değer	0.70	0.10	0.00	1.71	4.15	100.00	35.00
	En Büyük Değer	33.90	33.50	819.00	33.70	4.15	100.00	85.00
24.09.2025	Ortalama Değer	16.40	16.43	232.42	17.00	4.15	100.00	65.52
	En Küçük Değer	0.80	0.50	0.00	1.79	4.15	100.00	35.00
	En Büyük Değer	33.40	33.80	810.90	33.38	4.15	100.00	85.00
25.09.2025	Ortalama Değer	16.94	23.45	206.07	17.56	4.15	100.00	65.92
	En Küçük Değer	2.50	3.80	0.00	3.51	4.15	100.00	35.00
	En Büyük Değer	33.70	33.40	796.20	33.50	4.15	100.00	85.00
26.09.2025	Ortalama Değer	16.86	19.03	174.67	17.50	4.13	93.73	69.69
	En Küçük Değer	3.30	2.70	0.00	4.30	4.10	86.27	35.00
	En Büyük Değer	33.80	32.80	1002.90	33.92	4.15	100.00	85.00
27.09.2025	Ortalama Değer	16.21	19.95	240.27	16.92	4.10	86.37	70.81
	En Küçük Değer	3.60	3.70	0.00	4.61	4.10	86.27	35.55
	En Büyük Değer	32.90	33.90	742.00	33.84	4.10	86.49	85.00
28.09.2025	Ortalama Değer	17.62	20.33	220.98	18.25	4.12	90.87	68.65
	En Küçük Değer	8.80	8.90	0.00	9.81	4.10	86.49	35.00
	En Büyük Değer	33.80	33.80	873.00	33.76	4.14	96.07	85.00
29.09.2025	Ortalama Değer	15.00	15.77	99.33	15.80	4.11	90.13	72.74
	En Küçük Değer	-0.70	0.70	0.00	0.31	4.08	83.05	38.05
	En Büyük Değer	33.10	33.90	413.30	33.78	4.14	96.07	85.00
30.09.2025	Ortalama Değer	16.23	16.02	167.18	17.07	4.01	75.58	74.50
	En Küçük Değer	9.30	9.50	0.00	10.31	3.93	66.69	35.00
	En Büyük Değer	33.90	32.60	913.30	32.43	4.08	83.05	85.00
1.10.2025	Ortalama Değer	17.15	17.00	210.78	17.92	3.83	59.17	71.36
	En Küçük Değer	8.20	8.40	0.00	9.21	3.70	50.22	35.00

2.10.2025	En Büyük Değer	33.20	33.60	911.60	33.45	3.93	66.69	85.00
	Ortalama Değer	16.54	16.37	147.50	17.33	3.59	42.02	73.05
	En Küçük Değer	3.90	3.60	0.00	4.91	3.46	32.27	39.75
3.10.2025	En Büyük Değer	33.70	33.80	1105.30	33.35	3.70	50.22	85.00
	Ortalama Değer	17.52	17.42	192.69	18.27	3.55	39.00	69.70
	En Küçük Değer	8.60	8.40	0.00	9.61	3.46	32.27	35.00
4.10.2025	En Büyük Değer	33.80	33.90	748.70	33.80	3.66	47.00	85.00
	Ortalama Değer	16.23	16.04	154.63	16.79	3.52	35.87	68.61
	En Küçük Değer	0.90	0.80	0.00	1.91	3.36	22.62	36.40
5.10.2025	En Büyük Değer	33.80	33.80	850.60	33.76	3.66	47.00	85.00
	Ortalama Değer	17.59	17.59	153.43	18.25	3.42	28.31	67.90
	En Küçük Değer	8.20	8.00	0.00	9.20	3.36	22.62	35.00
6.10.2025	En Büyük Değer	33.70	33.80	765.70	33.83	3.49	35.08	85.00
	Ortalama Değer	17.59	17.41	153.08	18.24	3.57	40.83	68.34
	En Küçük Değer	6.50	6.40	0.00	7.51	3.49	35.08	35.00
7.10.2025	En Büyük Değer	33.70	33.60	737.70	33.83	3.67	47.67	85.00
	Ortalama Değer	11.99	11.92	64.02	12.71	3.67	47.67	73.86
	En Küçük Değer	1.60	1.20	0.00	2.60	3.67	47.67	35.00
7.10.2025	En Büyük Değer	33.20	33.40	368.50	33.49	3.67	47.67	85.00
	En Küçük Değer	33.20	33.40	368.50	33.49	3.67	47.67	85.00

¹ 18.09.2025-07.10.2025 tarihleri arasında elde edilen detaylı test sonuçlarına <https://github.com/umutburkaz/IoT-Based-Data-Logger-with-Solar-Energy-Harvesting/issues/1> üzerinden erişilebilir.

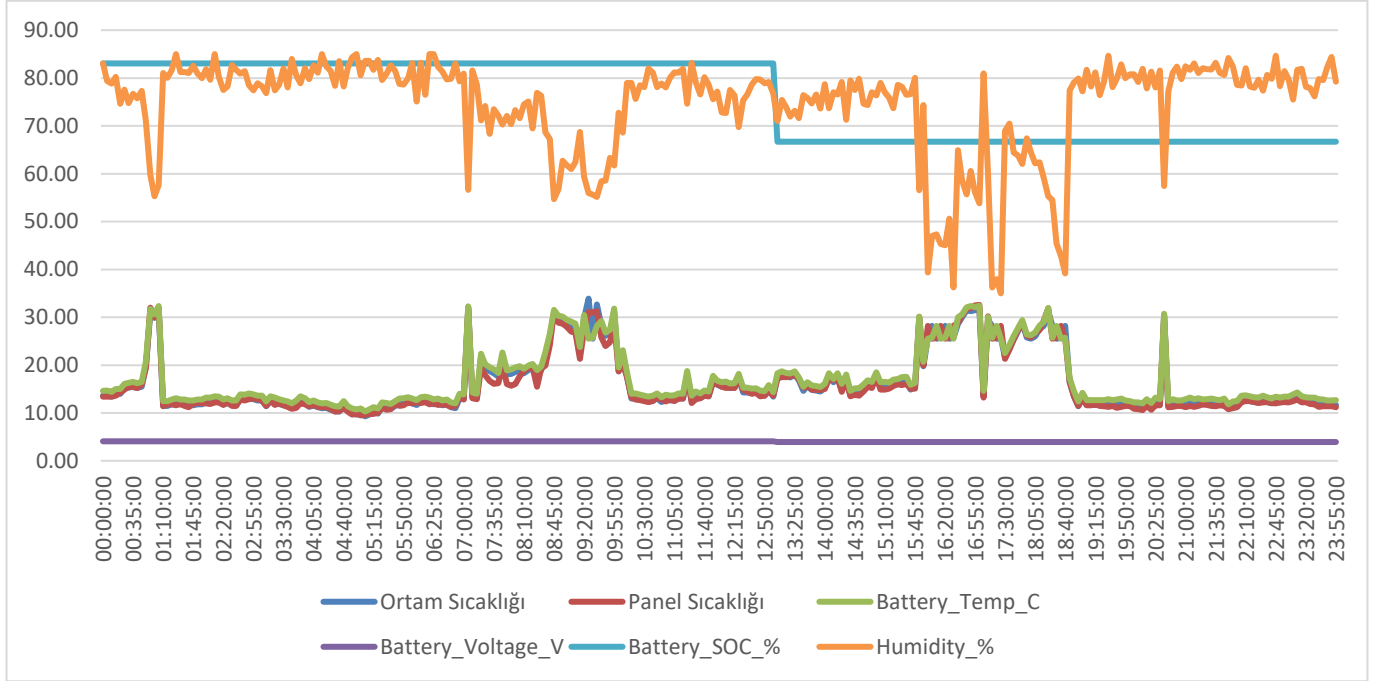


Şekil 6. Takip edilen veriler için örnek bir günlük ısıtım verileri

Uzun süreli testler için alınan 20 günlük verilerin tamamı incelenmiştir. Buna göre, verilerin bulutlu günlerde alınmasından ötürü ısıtım değerlerinde büyük sapmalar yaşandığı gözlemlenmiştir. Bu durum enerji hasadını doğrudan etkilediği için en kötü senaryolarda yaşanabilecek durumların gözlemlenmesi açısından önemlidir. 5 dakika aralıklarla ile takip edilen veriler için örnek bir günlük ısıtım (24 saatlik) verileri Şekil 6'da grafik olarak yer almaktadır. Şekil 6'da rastgele olarak örnek olması için 30.09.2025 tarihinde toplanan veriler yer almaktadır.

Bu çalışmada tasarlanan sistem, dış ortam koşullarında gündüz vakitleri enerji hasadı ile bataryayı destekleyerek ve geceleri batarya gücünü kullanarak uzun süreli çalışmayı başarmıştır. Örneğin, tam şarjlı batarya ile başlayan bir

döngüde art arda gelen birkaç bulutlu gün sonrasında batarya %25 seviyesine düşse bile, hava tekrar güneşli olduğunda sistemin kendini toparlayıp bataryayı yeniden %90 ve üzeri seviyelere çıkarabildiği gözlenmiştir. Bu da tasarlanan sistemin şarj-deşarj sürecini verimli yönettiğini ve enerji özerkliğini koruyabildiğini göstermektedir. Şekil 7'de görüldüğü gibi sıcaklık verilerinin arttığı zamanlarda çoğunlukla nem oranı azalmıştır. Sıcaklığın pik yaptığı durumlar da tüm sıcaklıklar etkilenmiştir. Bu veriler bataryanın tüketimi ve şarj dolumunun takip edilmesi açısından önemlidir. Sonuç olarak, sistemin enerji dengesi, batarya ömrü, güç tüketimi ve şarj profili açısından iyi bir performans sergilediği doğrulanmıştır.

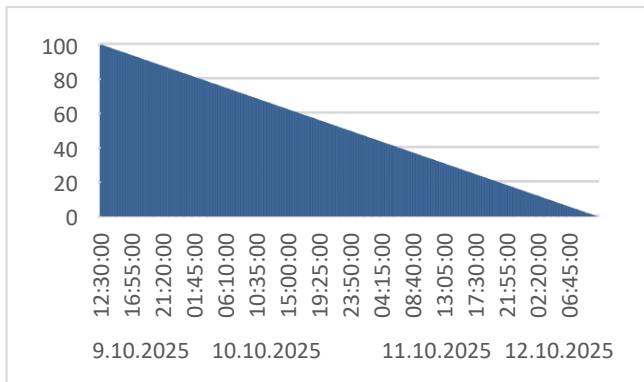


Şekil 7. Takip edilen veriler için örnek bir günlük farklı verilerin değişimi

3.2 Batarya kapasitesine göre çalışma süresi analizi

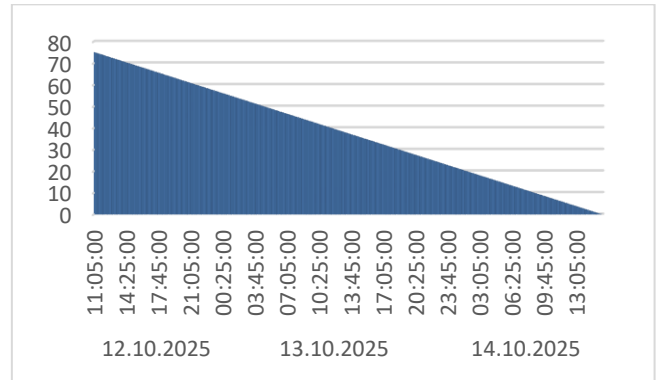
Gerçekleştirilen testler ile pil setinin belirli şarj seviyelerinde (%100, %75, %50 ve %25) iken sistemin enerji hasadı yapmadan bağımsız çalışma süresi analiz edilmiştir. Bu testler esnasında ortam, panel, batarya sıcaklıkları, batarya voltajı ve ortam nem oranı gibi parametreler için 5 farklı sensör üzerinden veri takibi yapılmıştır. Sistemin çalışma süresi takip edilen veri sayısına yani çalışan sensör sayısına göre değişiklik gösterebilir.

Şekil 8’de %100 şarj durumunda çalıştırılan sistemin solar enerji hasadı yapmadan tam kapasite ile test şartlarında toplamda 70,1 saat boyunca çalıştığı gösterilmiştir.



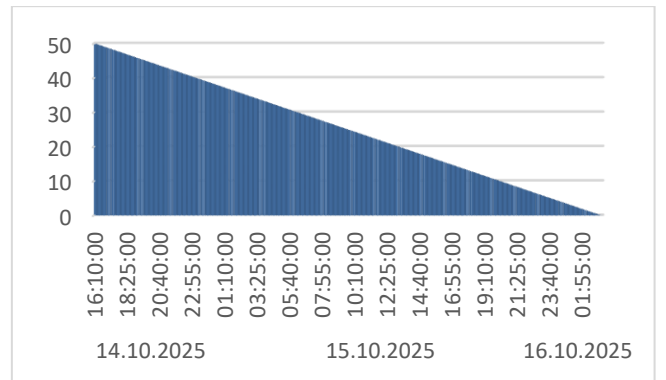
Şekil 8. Solar enerji hasadı yapılmadığı ve bataryanın %100 dolu olduğu durumda çalışma süresi

Şekil 9’da yer alan grafiğe göre batarya %75 dolu iken sistem enerji hasadı yapmadan 52.6 saat boyunca çalışmıştır ve kesintisiz olarak veri takibi yapılmıştır.



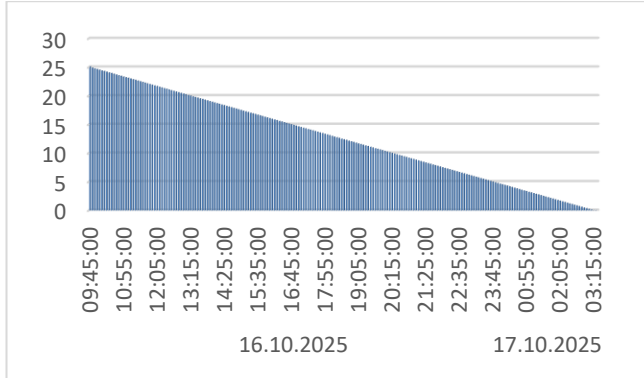
Şekil 9. Solar enerji hasadı yapılmadığı ve bataryanın %75 dolu olduğu durumda çalışma süresi

Şekil 10’da yer alan grafiğe göre sistem enerji hasadı yapmadan mevcut test şartlarında (5 sensör çalışırken) 35.1 saat boyunca çalışmıştır ve kesintisiz olarak veri alınmıştır.



Şekil 10. Solar enerji hasadı yapılmadığı ve bataryanın %50 dolu olduğu durumda çalışma süresi

Şekil 11’de ise batarya kapasitesi %25 seviyesinde iken enerji hasadı yapmadan sistem çalışmaya başlamış ve kesintisiz olarak 17.6 saat boyunca veri takibi mevcut test koşullarında yapılmıştır.



Şekil 11. Solar enerji hasadı yapılmadığı ve bataryanın %25 dolu olduğu durumda çalışma süresi

Tablo 3’te ise özet halinde tasarlanan veri kaydedici sistemin 4 farklı batarya kapasitesi ile enerji hasadı yapmadan kesintisiz olarak ne kadar süre ile çalışabildiği elde edilen test sonuçlarına göre verilmiştir. Batarya kapasitesi azaldıkça çalışma süresi beklendiği gibi azalmıştır. Yine de %25 gibi kritik bir seviye ile yaklaşık 0.75 gün çalışabildiği sonucuna ulaşılmıştır.

Tablo 3. Batarya kapasitesine göre sistemin enerji hasadı yapmadan toplam çalışma süresi

Başlangıç Batarya Kapasitesi	Toplam Çalışma Süresi (Gün + Saat)	Toplam Çalışma Süresi (Sadece Saat)
100%	2 gün ve 22.1 saat	70.1 saat
75%	2 gün ve 4.6 saat	52.6 saat
50%	1 gün ve 11.1 saat	35.1 saat
25%	0 gün ve 17.6 saat	17.6 saat

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, solar enerji hasadı ile çalışan, LoRa özellikli ve IoT tabanlı hibrit kaydetme yöntemine sahip bir dış ortam veri izleme sistemi tasarlanmış ve deneysel olarak dış ortamda veri takibi uygulaması yapılmıştır. Tasarlanan sistem, veri sürekliliğini sağlamak amacıyla verileri hem yerel SD karta kaydetmekte hem de internet bağlantısı mevcut olduğunda eş zamanlı olarak buluta (HTTP POST veya MQTT) aktarabilmektedir. Bu hibrit çözüm sayesinde internet bağlantısının kesildiği durumlarda bile veri kaybını önleyerek sadece yerel depolama veya sadece bulut tabanlı çalışan sistemlere göre daha güvenilir tasarım yapılmıştır. Gerçek ortam koşullarında gerçekleştirilen testler, güç yönetim sistemi ile mevcut bataryanın şarj performansının kullanılabilirliğini doğrulamıştır. Test sonuçları, entegrenin beklenen Sabit Akım (CC) – Sabit Gerilim (CV) şarj karakteristiği ile tam uyumlu çalıştığını göstermiştir. Sistemin sürdürülebilir bir enerji hasadı sağladığı yapılan testler ile ortaya konulmuştur. Yapılan analizler, pil setinin doluluk oranına bağlı olarak bağımsız çalışma sürelerini

göstermiştir. Örneğin, %100 şarj durumunda sistem, enerji hasadı olmadan 70,1 saat (2 gün ve 22,1 saat) kesintisiz veri kaydı yapabilmektedir. Bu sonuçlar, tasarlanan sistemin dış ortam koşullarında enerji özerkliği ile uzun süreli ve güvenilir veri izleme kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Gelecekteki çalışmalar için, sistemin enerji verimliliğini ve özerkliğini daha da artırmak adına güneş enerjisi hasadına ek olarak, sistemin enerji toplama yeteneğini artırmak için Radyo Frekansı (Radio Frequency, RF) enerji hasadı gibi ek bir enerji hasadı katmanının entegre edilmesinin yararlı olacağı düşünülmektedir. Bu doğrultuda RF enerji hasadı entegrasyonunun yapılması üzerine çalışmalarımız devam etmektedir. Bu durum, özellikle düşük güneş ışığı veya kapalı alanlarda çalışma verimliliğini arttırabilecektir. Sistem pil sayısının artırılmasıyla toplam enerji depolama kapasitesi yükseltilebilir. Özellikle enerji hasadının düşük olduğu dönemlerde cihazın kesintisiz çalışma süresini daha da uzatacaktır. Daha yüksek voltaj ve daha yüksek akım sağlayabilen güneş panelleri seçilerek, şarj süresi kısaltılabilir ve enerji hasat verimi maksimize edilebilir. Veri kaydedicinin toplam güç tüketimini azaltmak için, mikrodenetleyici (ESP32) periyodik ölçümler dışında uzun süreler boyunca Deep Sleep (Derin Uyku) modunda çalıştırılabilir. Bu sayede, toplam sistem ömrünün ve bağımsız çalışma süresinin önemli ölçüde artması mümkün olacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı (BİDEB) 2210-D Yurt İçi Sanayiye Yönelik Yüksek Lisans Burs Programı (Başvuru No: 1649B022416464) kapsamında desteklenmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %4

Kaynaklar

- [1] D. V. Queiroz, M. S. Alencar, R. D. Gomes, I. E. Fonseca and C. Benavente-Peces, Survey and systematic mapping of industrial Wireless Sensor Networks. Journal of Network and Computer Applications, 97, 96–125, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2017.08.019>.
- [2] E. Sisinni, A. Saifullah, S. Han, U. Jennehag and M. Gidlund, Industrial Internet of Things: Challenges, Opportunities, and Directions. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 14 (11), 4724–4734, 2018. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2852491>.
- [3] J. Aponte-Luis, J. A. Gómez-Galán, F. Gómez-Bravo, M. Sánchez-Raya, J. Alcina-Espigado and P. M. Teixedo-Rovira, An Efficient Wireless Sensor Network for Industrial Monitoring and Control. Sensors, 18 (1), 182, 2018. <https://doi.org/10.3390/s18010182>.
- [4] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen and W. M. Townsley, A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things. Sensors, 16 (9), 1466, 2016. <https://doi.org/10.3390/s16091466>.

- [5] V. C. Gungor and G. P. Hancke, Industrial Wireless Sensor Networks: Challenges, Design Principles, and Technical Approaches. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56 (10), 4258-4265, 2009. <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2015754>.
- [6] M. Wollschlaeger, T. Sauter and J. Jasperneite, The Future of Industrial Communication: Automation Networks in the Era of the Internet of Things and Industry 4.0. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 11 (1), 17-27, 2017. <https://doi.org/10.1109/MIE.2017.2649105>.
- [7] J. Song, S. Han, A. K. Mok, D. Chen, M. Lucas and M. Nixon, WirelessHART: Applying Wireless Technology in Real-Time Industrial Control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55 (5), 2124-2137, 2008. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.922542>.
- [8] A. D. Wickert, C. T. Sandell, B. Schulz and G.-H. C. Ng, Open-source Arduino-compatible data loggers designed for field research. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23, 2065-2076, 2019. <https://doi.org/10.5194/hess-23-2065-2019>.
- [9] P. A. Beddows and E. K. Mallon, Cave Pearl Data Logger: A Flexible Arduino-Based Logging Platform for Long-Term Monitoring in Harsh Environments. *Sensors*, 18 (2), 530, 2018. <https://doi.org/10.3390/s18020530>.
- [10] T. DeBell, L. Goertzen, L. Larson, W. Selbie, J. Selker and C. Udell, OPeN Hub: Real-Time Data Logging, Connecting Field Sensors to Google Sheets. *Frontiers in Earth Science*, 7, 137, 2019. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00137>.
- [11] G. L. Caltabiano, R. Cecchi, A. Catania, C. Sbrana, M. Macucci, S. Strangio and G. Iannaccone, Data Loggers for High-Temperature Industrial Environments. *IEEE Access*, 12, 180726-180737, 2024. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3509581>.
- [12] F. Alharbi, IoT Intrusion Detection System for Modbus Networks with Explainable AI. *Journal of Advances in Information Technology*, 16 (1), 2025. <https://doi.org/10.12720/jait.2025.16.01>.
- [13] M. J. Yaser, D. Abdullateef, K. A. Polshchykov and M. S. Balakshin, Estimating the Message Delivery Probability Without Duplication in an Industrial Internet of Things Network System. *Journal of Advances in Information Technology*, 16 (1), 2025. <https://doi.org/10.12720/jait.2025.16.01>.
- [14] S. Naifar, O. Kanoun and C. Trigona, Energy Harvesting Technologies and Applications for the Internet of Things and Wireless Sensor Networks. *Sensors*, 24 (14), 4688, 2024. <https://doi.org/10.3390/s24144688>.
- [15] A. Piroddi and R. Fonti, SDN-Driven Innovations in MANETs and IoT: A Path to Smarter Networks. *Journal of Advances in Information Technology*, 16 (1), 2025. <https://doi.org/10.12720/jait.2025.16.01>.
- [16] D. Thangavel, X. Ma, A. Valera, H. X. Tan and C. K. Y. Tan, Performance evaluation of MQTT and CoAP via NB-IoT and WiFi. *IEEE 9th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP)*, pp. 714-719, Manchester, UK, 2014.
- [17] F. J. Dian, R. Vahidnia and A. Rahmati, Wearables and Cloud Computing for Remote Medical Monitoring. *2020 IEEE 11th Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON)*, pp. 0588-0594, New York, USA, 2020.
- [18] G. Schmidt, Getting the Most Out of Your WirelessHART® System. Phoenix Contact—Americas Business Unit, Harrisburg, PA, USA, Technical Report (White Paper), 2010.
- [19] LoRa Alliance, LoRaWAN 1.1 Specification. LoRa Alliance, Technical Specification, 2017.
- [20] ThingsLog, Low Power LoRa Data Loggers. <https://thingslog.com/lora-data-loggers-2/>, Erişim: 14 Ocak 2026.
- [21] Espressif Systems, ESP32 Series Datasheet. https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf, Erişim: 10 Ocak 2026.

