

IoT tabanlı içilebilir su kalitesi izleme sistemi

IoT-Based drinking water quality monitoring system

Ali Kavurur^{1,*} 

¹ Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Kontrol ve Otomasyon Bölümü, 15100, Burdur, Türkiye

Öz

Su kaynaklarının yerinde ve sürekli izlenmesi amacıyla, pH, bulanıklık, toplam çözünmüş katı madde (Total Dissolved Solids:TDS) ve sıcaklık parametrelerini eş zamanlı olarak takip eden, Wemos D1 Mini ESP32 mikrodenetleyicisi tabanlı düşük maliyetli ve gerçek zamanlı bir Nesnelerin İnternetini (Internet of Things :IoT) kullanan su kalitesi izleme sistemi geliştirilmiştir. Sistemin temel amacı; yüksek işlem gücü, yoğun bellek ve enerji tüketen karmaşık Yapay Zeka (YZ) algoritmaları yerine, matematiksel Su Kalitesi İndeksini (Water Quality Index: WQI) doğrudan donanım üzerinde çalıştırarak anlık ve verimli bir değerlendirme ortaya koymaktır. Sensörlerden alınan analog ve dijital veriler, Wemos D1 mikrodenetleyicisi bünyesinde işlenerek anlık olarak WQI skoruna dönüştürülmekte ve suyun içilebilirlik durumu yerel bir OLED ekran üzerinde gecikmesiz olarak gösterilmektedir. Sistem, anlık takibin yanı sıra verileri gelecekteki tahmine dayalı analizler, geniş ölçekli veri madenciliği ve makine öğrenmesi çalışmaları için bulut tabanlı ThingSpeak platformuna aktarmaktadır. Geliştirilen bu yaklaşım, donanım kaynaklarını asgari düzeyde tutarak gerçek zamanlı ve düşük maliyetli su kalitesi değerlendirmesi yapabilen, enerji verimli ve sürdürülebilir bir IoT mimarisi sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: Wemos D1 mini ESP32, Nesnelerin interneti IoT, Su kalitesi izleme

1 Giriş

Yeryüzündeki tüm ekosistemlerin kararlılığı, tarımsal sürdürülebilirlik, endüstriyel üretim ve insan sağlığı, temiz ve güvenli su kaynaklarının varlığına doğrudan bağlıdır. Ancak kontrolsüz endüstrileşme, evsel atıkların artırılmadan deşarj edilmesi ve tarımsal faaliyetlerde aşırı kimyasal kullanımı, küresel ölçekte su kalitesinin hızla bozulmasına yol açmaktadır. Su kaynaklarında meydana gelen değişimlerin ve kirlilik düzeyinin zamanında tespit edilememesinin, su kaynaklı salgın hastalıklara ve halk sağlığı açısından risk oluşturduğu literatürde belirtilmektedir [1]. Bu nedenle, su kaynaklarının parametrelerinin kesintisiz ve gerçek zamanlı bir yaklaşımla izlenmesi, çevre yönetimi çok önemlidir [2-3].

Geleneksel su kalitesi değerlendirme yöntemleri, büyük ölçüde sahadan fiziksel numune toplanması ve bu numunelerin akredite çevre laboratuvarlarında analiz

Abstract

To enable on-site and continuous monitoring of water resources, a low-cost, real-time Internet of Things (IoT) water quality monitoring system based on the Wemos D1 Mini ESP32 microcontroller has been developed to simultaneously track pH, turbidity, total dissolved solids (TDS), and temperature parameters. The primary objective of the system is to provide instant and efficient assessment by running the mathematical Water Quality Index (WQI) directly on the hardware, rather than relying on complex Artificial Intelligence (AI) algorithms that require high processing power, extensive memory, and consume significant energy. Analog and digital data collected from sensors are processed within the Wemos D1 microcontroller and instantly converted into a WQI score, with the water's potability status displayed in real time on a local OLED screen. In addition to real-time monitoring, the system transmits the data to the cloud-based ThingSpeak platform for future predictive analytics, large-scale data mining, and machine learning studies. This approach offers an energy-efficient and sustainable IoT architecture capable of performing real-time, low-cost water quality assessments while minimizing hardware resource usage.

Keywords: Wemos D1 mini ESP32, Internet of things IoT, Water quality monitoring

edilmesi prensibine dayanmaktadır [4]. Bu geleneksel yaklaşım, yüksek hassasiyetli sonuçlar sunmasına karşın; operasyonel maliyetlerin yüksekliği ve zaman alıcı test süreçlerinden dolayı bir erken uyarı alternatifi olmaktan uzaktır [5]. Laboratuvar ortamındaki gecikmeler, kirlenici unsurların ekosisteme yayılmasına yol açmakta ve ani müdahale şansını ortadan kaldırmaktadır. Bu kısıtları aşmak amacıyla, son yıllarda Nesnelerin İnterneti (Internet of Things: IoT) ve Kablosuz Sensör Ağları (Wireless Sensor Network: WSN) tabanlı otonom, düşük maliyetli ve yerinde ölçüm yapabilen istasyonların geliştirilmesine yönelik eğilim hız kazanmıştır.

Günümüzde su kalitesi izleme süreçleri, pH, TDS, bulanıklık ve sıcaklık gibi çok sayıda fizikokimyasal parametrenin laboratuvar ortamlarında analiz edilmesini gerektirir. Ancak elde edilen tekil parametre değerleri, suyun genel kalitesi ve kullanım amacına (içme, sulama,

endüstriyel vb.) uygunluğu hakkında saha operatörlerine veya halka doğrudan, anlaşılır bir bilgi sunamamaktadır. Kullanılan veri setlerindeki bu karmaşıklığı gidermek amacıyla literatürde Su Kalitesi İndeksi (Water Quality Index- WQI) modelleri geliştirilmiştir [6]. İlk olarak Horton (1965) tarafından literatüre kazandırılan ve Brown ve ark. (1970) tarafından geliştirilen bu yaklaşım; çok boyutlu fizikokimyasal ve biyolojik değişkenleri tek bir nümerik değere ya da kalite sınıfına indirgeyen matematiksel bir modeldir [7,8].

Literatürde su kaynaklarının içme, sulama veya ekosistem sağlığı açısından uygunluğunu test etmek amacıyla çok çeşitli su kalite indeksi hesaplama metodolojileri geliştirilmiştir. Örneğin yaygın olarak tercih edilen Ağırlıklı Aritmetik İndeks Yöntemi, parametrelerin yasal sınır değerlerine oranını esas alarak, bu sınır değerlerin orantılı şekilde hesaplanan birim ağırlık faktörlerini formüle dahil etmektedir [9]. Benzer şekilde Kanada Çevre Bakanları Konseyi (CCME) tarafından önerilen WQI modeli; yasal sınır değerlerden sapmanın kapsamını, frekansını ve genliğini ölçen üç boyutlu bir faktör yapısıyla yüzey sularının ve nehir havzalarının uzun dönemli takibinde sıklıkla kullanılmaktadır [10]. Ancak geleneksel indeks yapıları, kirlenici konsantrasyonlarının genel indeks puanı üzerindeki baskınlığını ya da tam tersi durumlarda kirliliğin gizlenmesini ifade eden gölgeleme ve maskeleye problemlerini barındırmaktadır. Bu kısıtlamaları aşmak adına literatürde, veri matrisindeki düzensizliği ölçerek insan kaynaklı hataları azaltan Entropi Ağırlıklı İndeksler (Entropy Weighted Water Quality Index: EWQI) [11] ve alt-indeks hesaplamalarında regresyon istatistiklerini kullanan Min-Max operatörlü hibrid yapılar [12] gibi yenilikçi arayışlar öne çıkmıştır.

Doğrusal olmayan kirlilik trendlerinin ve karmaşık parametrik ilişkilerin çözülmesinde, geleneksel indekslerin bu sınırlılıklarını aşmak adına son yıllarda yapay zeka ve makine öğrenmesi (Machine Learning: ML) tabanlı modellerin oldukça popülerlik kazanmıştır. Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Network: ANN), Rastgele Orman (Random Forest: RF) ve Destek Vektör Makineleri (Support Vector Machine: SVM) gibi algoritmalar, su kalitesinin geleceğe dönük tahmin edilmesinde yüksek kararlılık sunmaktadır. Ancak bu ileri teknolojik yaklaşımların saha uygulamalarına entegrasyonu; muazzam büyüklükte ve güvenilir geçmiş veri setlerinin oluşturulma zorunluluğu, yüksek işlemci gücüne dayalı donanım maliyetleri, karmaşık yazılım mimarileri ve kalibrasyon güçlükleri gibi operasyonel dezavantajları beraberinde getirmektedir. Özellikle kısıtlı kaynaklara sahip anlık ve sürekli izleme istasyonlarında, yapay zekanın getirdiği ağır bilgi işlem yükü ve yüksek maliyet mekanizmalarına girmeden, sadece anlık sensör verileri üzerinden en hassas ve doğrulanabilir sonuçları elde edebilmek adına anlık su kalitesi değerini hesaplayan yenilikçi bir modele ihtiyaç olduğu görülmektedir.

Geleneksel indeks modellerinin aksine, Mukate vd. [13] tarafından geliştirilen Entegre Su Kalitesi İndeksi (Integrated Water Quality Index: IWQI), parametrelerin yalnızca izin verilen üst sınırlarını değil, arzu edilen alt sınırlarını da

hesaba katan çift limitli ve bütüncül bir yaklaşım sunmaktadır. Belirtilen çalışmada, sudaki mineral eksikliğinin de en az üst sınır aşımı kadar insan sağlığı üzerinde risk oluşturduğunu savunulmaktadır. Geliştirilen IWQI modeli, ideal sınırların dışına çıkan her türlü eksiklik veya fazlalığı alt-indekslere cezai puan olarak yansıtırken; kirlilik henüz yasal üst sınıra ulaşmadan önce mineral bozulmalarını yakalayabilmek adına algoritmaya %20'lik bir sapma payı entegre etmektedir. Geleneksel indekslerin aksine, parametrelerin görece önem derecelerini yansıtan ve bütünsel bir birleştirme mimarisine sahip olan bu indeks, su kalitesini beş farklı sınıfa ayırır. Bu kararlı matematiksel mimari, anlık veri üreten çoklu sensör ve IoT tabanlı bulut izleme sistemleri için optimize bir altyapı sunmaktadır.

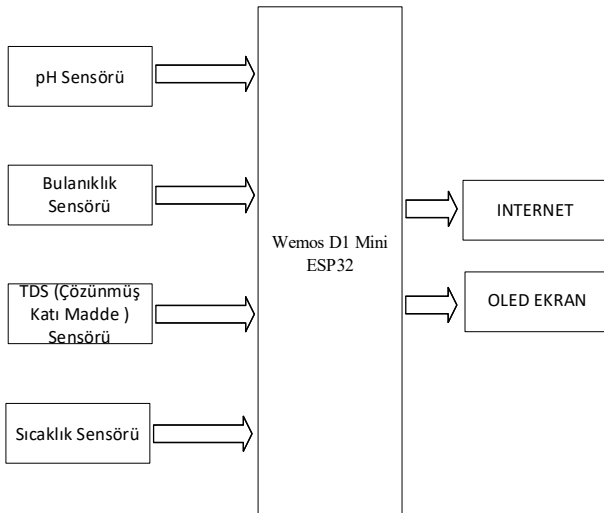
Literatür incelendiğinde, düşük maliyetli su izleme sistemlerinin geliştirilmesi amacıyla elektrokimyasal ve optik sensörlerin çeşitli mikrodenetleyici ve haberleşme mimarilerine entegre edildiği pek çok farklı çalışmanın yapıldığı da görülmektedir. Bu çalışmalarda, Arduino tabanlı kartlar kullanılarak taşınabilir ve ekonomik çözümler üretilmiş [14-17] ancak bu yerel mimarilerin yerleşik internet bağlantısına sahip olmamaları, ek donanım ihtiyacını doğurarak toplam güç tüketimini ve maliyeti artırmaktadır. Diğer taraftan, kırsal ve geniş coğrafi alanlarda kablosuz kapsama alanı sağlamak amacıyla LoRa ve LoRaWAN gibi Uzun Mesafeli Düşük Güçlü Geniş Alan Ağlarına (LPWAN) odaklanan modern IoT çözümleri de sıklıkla tercih edilmektedir [18-20]. Ancak, LoRa tabanlı bu topolojilerin veri paketi boyutu sınırlamaları, milisaniyeler mertebesinde kesintisiz akış gerektiren mobil takip sistemlerine ve anlık alarm mekanizmalarına esnek bir biçimde izin vermemektedir [21]. Tüm bu haberleşme ve donanım darboğazlarının yanı sıra, düşük maliyetli sensörlerin şebeke girişimleri ve elektriksel gürültüler nedeniyle ürettiği sinyal dalgalanmaları ile zamanla meydana gelen kalibrasyon kaymaları, literatürdeki mevcut izleme istasyonlarının en büyük kararlılık problemi olarak raporlanmaktadır [22,23].

Bu çalışmada; geleneksel yöntemlerin yüksek analiz maliyetleri, donanımsal sinyal kararsızlıkları ve veri iletim kısıtları problemlerine, optimize edilmiş bir çözüm sunan gerçek zamanlı bir su kalitesi izleme sistemi tasarlanmıştır. Sistem mimarisinde, dahili Wi-Fi ve 12-bit ADC çözünürlüğü sunan Wemos D1 Mini ESP32 mikrodenetleyicisi seçilmiştir. Denetleyicinin yerleşik Wi-Fi modülü aktifken analog pinlerinde (ADC2) yaşanan doğrusallıktan sapma ve frekans çakışması problemlerini aşmak adına, sensör hatları stratejik olarak sadece Wi-Fi bağımsızlığı olan ADC1 kanalına (GPIO 32, 34, 35, 39) yönlendirilmiştir. Sensörlerden alınan ham verilerin bulut katmanına kararlı ve gürültüden arındırılmış bir şekilde gönderilmesi amacıyla, çip üzerinde çalışan 30 örneklemeli bir Hareketli Ortalama Filtresi yazılıma entegre edilmiştir. Ayrıca optik bulanıklık sensörünün zamanla uğradığı kalibrasyon sapmalarını önlemek amacıyla, sabit referanslı standart NTU dönüşümleri yerine, temiz su voltajı (1.90V) referansına dayanan dinamik bir yüzde hesaplama modeli kullanılmıştır. Deney sırasında elde edilen bu veriler, kullanıcılara ve merkezi sistemlere yalnızca ham ve anlamsız

göstergeler olarak sunulmamış; tek bir skorla değerlendirilmesi adına su Kalitesi İndeksi (IWQI) modeline girdi olarak kullanılmıştır. Lokal katmanda OLED ekran, iletişim katmanında ise ThingSpeak ile eş zamanlı desteklenen bu modelin verileri raporlayabildiği deneysel olarak kanıtlanmıştır. Önerilen yaklaşım sürekli internet veya bulut eğitim altyapısının sınırlı olduğu kırsal şebeke ve depo izleme noktalarında, mobil ölçüm istasyonları ve saha ekiplerinin anlık içilebilirlik kararına ihtiyaç duyduğu durumlarda ve uzun dönem veri seti oluşturma ekonomisi olmadığı düşük bütçeli belediye veya kampüs uygulamalarında tercih edilebilir.

2 Materyal ve metod

Bu çalışmada, Wemos D1 Mini ESP32 mikrodenetleyiciye bağlı pH, TDS, sıcaklık ve bulanıklık sensörlerinden elde edilen ölçüm verileri kullanılarak anlık su kalitesinin değerlendirilmesi için bir sistem tasarlanmıştır. Su kalitesi izleme sistemine ait Blok diyagramı Şekil 1’de verilmiştir. İçilebilir su kalitesinin izlenmesi amacıyla örnek ölçümler için Burdur ili Şehir şebekesi suyu kullanılmıştır.



Şekil 1. Su kalitesi izleme blok diyagramı

2.1 pH sensörü

Su kalitesi ve kimyasal kirlilik tespitinde en kritik parametrelerden biri olan pH, çözeltideki hidrojen iyonu konsantrasyonunu ölçmektedir. Gerçek zamanlı izleme sistemlerinde sıklıkla tercih edilen analog pH sensörleri, elektrotlar arasındaki potansiyel farkı ölçme prensibiyle çalışır. Teorik olarak 25 derece sıcaklıkta 59 mV/pH duyarlılığa sahip olan bu elektrotların doğruluğunu düzenlemek adına kalibrasyon yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada, entegre edilen analog pH sensörünün verileri okuma sürecindeki sapmalarını gidermek adına iki noktali kalibrasyon uygulanmıştır.

İki noktali kalibrasyon, ADC voltaj çiftleri üzerinden doğrusal model (eğim = 3.50; ofset = -3.02) oluşturularak elde edilmiştir ve bu katsayılar programa dahil edilmiştir.

2.2 Bulanıklık (Turbidity) sensörü

Bulanıklık, su numunesi içerisindeki askıda katı maddelerin özelliklerini tanımlayan bir parametredir. Yüksek bulanıklık seviyeleri suyun içilebilirliğini ve tadını bozarken, patojenik risklere işaret etmektedir. Gerçek zamanlı izleme sistemlerinde sıklıkla tercih edilen optik bulanıklık sensörü, su içerisine kızılötesi (İnfrared:IR) ışık gönderen bir LED ve ışık geçirgenliğini voltaja dönüştüren bir fotodedektör mantığıyla çalışır. Bu ölçüm prensibinde, sıvı içerisindeki askıda katı madde miktarı arttıkça dedektöre ulaşan ışık yoğunluğu azalmakta ve buna bağlı olarak sensörün analog çıkış voltajı düşmektedir.

Literatürde fotodedektörden okunan ham voltaj değerleri ile standart Nefelometrik Bulanıklık Birimleri (Nephelometric Turbidity Units: NTU) birimi arasında genellikle parabolik veya yüksek dereceden polinomsal denklemler kullanılmaktadır. Ancak bu geleneksel yaklaşım, optik sensör yüzeyinin zamanla çevresel faktörlere bağlı olarak kirlenmesi, tortu bağlaması veya LED ömrünün azalması gibi nedenlerle ciddi kalibrasyon sapmalarına yol açmaktadır. Söz konusu problemi aşmak adına, sabit referanslı standart NTU dönüşümleri yerine, temiz su voltajı referansına dayanan dinamik ve bağıl bir yüzde hesaplama modeli geliştirilmiştir. Sistem ilk çalıştırıldığında temiz su numunesinden elde edilen baz voltaj 1.90 V referans olarak kaydedilmekte ve anlık ölçülen voltaj ile arasındaki ilişki Denklem (1)’de verilmiştir.

$$V_i = \frac{V_{temiz} - V_{anlık}}{V_{temiz}} \times 100 \quad (1)$$

Bu çalışmada bulanıklık çıktısı standart NTU birimine dönüştürülmemektedir; temiz su referans voltajına (1,90 V) göre bağıl yüzde (%) olarak hesaplanmaktadır. Dolayısıyla IWQI girişinde bulanıklık parametresi NTU değil, bağıl yüzde cinsindendir ve Tablo 1 buna göre düzenlenmiştir.

2.3 TDS sensörü

Toplam Çözünmüş Katı Madde (TDS), su içerisinde çözünmüş halde bulunan inorganik tuzların, metallerin ve anyon ile katyonların toplam miktarını ppm (part per million) cinsinden ifade eden bir değişkendir. Sabit mesafeli iki elektrot barındıran sensör probu, suyun iyon yoğunluğuna bağlı olarak meydana gelen direnç ve iletkenlik değişimlerini ölçerek çalışmaktadır.

TDS ölçümlerinde sıcaklığın iyon hareketliliği nedeniyle okuma değerlerini etkilediği literatürde bildirilmektedir [14], [15]. Bu çalışmada analog TDS dönüşümü, DFRobot Gravity Analog TDS Sensor/Meter (SEN0244) üretici örnek kodunda yayımlanan sıcaklık kompanzasyonu ve kübik voltaj-TDS modeline dayandırılmıştır. İlk aşamada, anlık sıcaklık kompanzasyon katsayısı üretici örnek kodundaki lineer model ile hesaplanmaktadır. 25 °C referansındaki iyonik hareketliliği standardize etmek için kullanılan Denklem (2) aşağıda tanımlanmıştır:[24]

$$f_T = 1.0 + 0.02(T - 25) \quad (2)$$

Burada T anlık sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$), f_T ise 25°C 'ye indirgeme katsayısıdır. Sıcaklık sensörü bulunmadığında veya $T \approx 25^{\circ}\text{C}$ alındığında $f_T \approx 1$ kabul edilebilir.

İkinci aşamada, Wemos D1 Mini ESP32'nin 12-bit ADC1 kanalından okunan ham analog voltaj değeri $V_{anlık}$, Denklem (2)'de elde edilen fT bölünerek 25°C de standart koşullarındaki kompanze edilmiş voltaj değerine V_{comp} indirgenmektedir Denklem (3).

$$V_{comp} = \frac{V_{anlık}}{fT} \quad (3)$$

Elde edilen bu kararlı voltaj çıktısı, SEN0244 üretici örnek kodundaki kübik dönüşüm ile suyun elektriksel iletkenlik ve çözünmüş katı madde yoğunluğu arasındaki ilişkiyi gerçek TDS değerine dönüştürülmektedir Denklem (4).

$$TDS_{skor} = b_1x(V_{comp}^3) - b_2x(V_{comp}^2) + b_3x(V_{comp}) \quad (4)$$

Denklem (4)'te yer alan, $b_1 = 66.71$, $b_2 = 127.93$ ve $b_3 = 428.70$ sabitleri; sensör çıkış voltajını $0 - 1000$ ppm çalışma aralığında yüksek doğruluk ve korelasyonla ölçeklendiren kalibrasyon katsayılarıdır. Söz konusu b_1 , b_2 ve b_3 sabitleri; DFRobot SEN0244 üretici örnek kodunda verilen voltaj-iletkenlik karakteristiğindeki ham polinom katsayılarının (133.42 , 255.86 ve 857.39), NaCl çözeltileri için yaygın olarak kullanılan iletkenlik-TDS dönüşüm faktörü (0.5) ile ölçeklenmesi sonucu elde edilmiştir. Bu katsayılar laboratuvar tipi TDS metre ile yeniden türetilmemiştir.

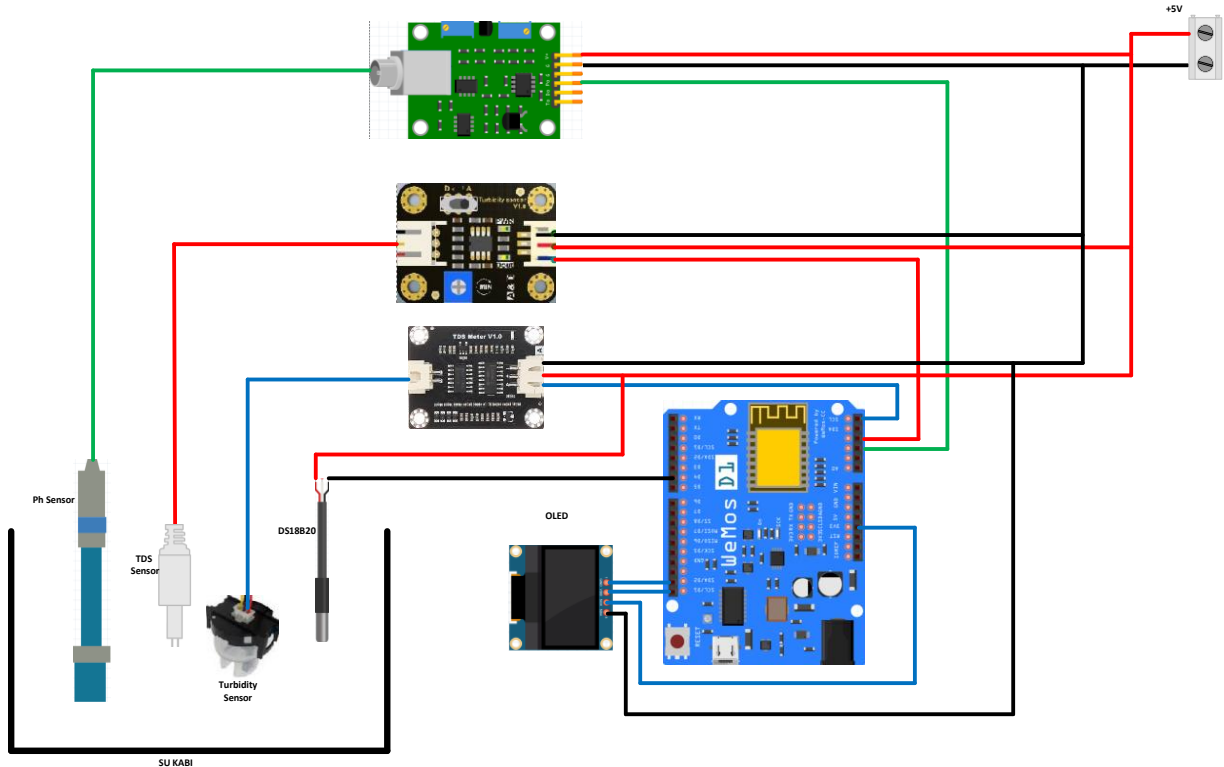
2.4 Sıcaklık sensörü

Su kalitesi izlenmesinde sıcaklık değişimleri, kullanılan sensörlerin okuma değerlerini doğrudan etkilediği için kritik bir öneme sahiptir. Bu çalışma kapsamında anlık sıcaklık takibi amacıyla, -55 ile $+125^{\circ}\text{C}$ ölçüm aralığına sahip DS18B20 analog sıcaklık sensörü kullanılmıştır. Bu sensör; veri iletişimi, besleme hattı ve topraklama olmak üzere tek kablolu (1-Wire) standart bir üçlü bağlantı mimarisine sahiptir.

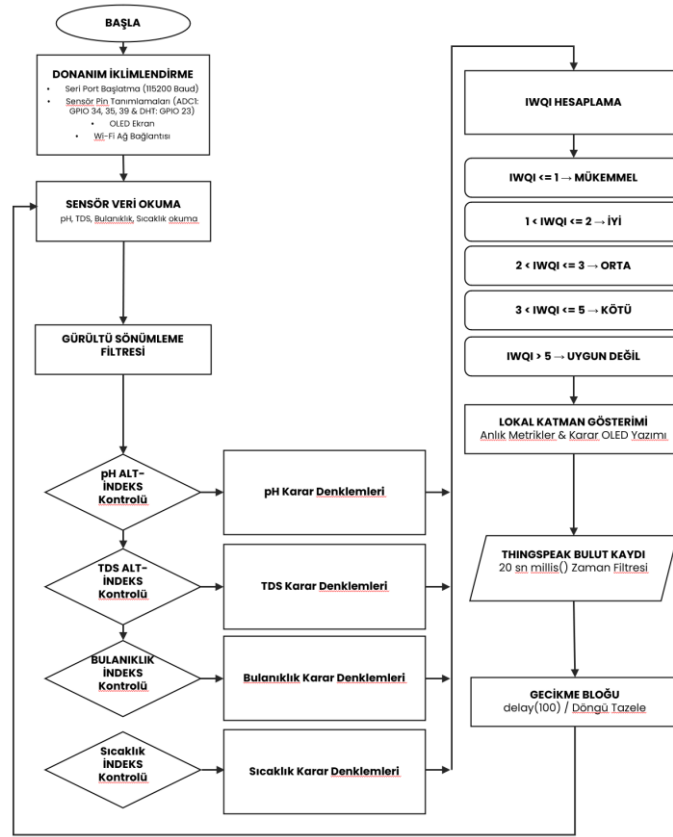
2.5 Wemos D1 Mini ESP32

Kullanılan denetleyici, Espressif Systems tarafından geliştirilen, 160 Mhz ila 240 Mhz arasında ayarlanabilir saat frekansına sahip, yüksek performanslı ve çift çekirdekli 32 -bit Xtensa LX6 mikroişlemci mimarisine dayanmaktadır. Cihaz, kablosuz iletişim katmanında yerleşik Wi-Fi modülü ile Bluetooth Klasik ve Bluetooth Düşük Enerji (BLE) protokollerini eş zamanlı olarak desteklemektedir. Harici çevre birimleri ve sensörlerle esnek bir şekilde entegrasyon sağlanabilmesi adına denetleyicide; SPI, I2C, UART ve PWM gibi endüstriyel haberleşme arayüzleri ile zengin bir genel amaçlı giriş/çıkış pini yer almaktadır. Wi-Fi modülü aktifken analog-dijital dönüştürücü (ADC2) kanallarında yaşanan doğrusalsızlık ve frekans çakışması problemlerini aşmak adına, sensör hatları sadece Wi-Fi bağlantısından etkilenmeyen 12 -bit çözünürlüklü ADC1 kanalına (GPIO 32 , 34 , 35 , 39) yönlendirilmiştir [25].

Tasarlanan sistemin donanımsal bileşenleri, güç hatları ve sensör-mikrodenetleyici arasındaki elektriksel pin bağlantı devre şeması Şekil 2'te ayrıntılı olarak sunulmuştur. Sistemin çalışmasına ait Akış şeması Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 2. Devre Şeması



Şekil 3. Akış Şeması

Algoritma akışında, başlangıçta veri iletim hızı 115200 baud olarak konfigüre edilerek seri port başlatılmakta, sensörlerin bağlı olduğu 12-bit ADC1 kanalları (GPIO 32, 34, 35, 39) tanımlanmaktadır. Lokal gösterim birimi olan I2C OLED ekranın ve kablosuz haberleşmeyi sağlayacak yerleşik Wi-Fi ağ bağlantısının başlatılmasının ardından sistem sürekli döngü fazına geçiş yapmaktadır.

Döngü mekanizmasının ilk adımında "Sensör Veri Okuma" bloğu çalıştırılarak pH, TDS, bulanıklık ve sıcaklık sensörlerinden mikro saniyeler düzeyinde ham veriler çekilmektedir. Donanım hatlarından ve çevresel parazitlerden kaynaklanabilecek ani sinyal sıçramalarını engellemek amacıyla, toplanan veriler doğrudan entegre üzerinde çalışan yüksek kararlılıktaki "Gürültü Sönümlleme Filtresi" ne aktarılmaktadır. Filtre istasyonundan çıkan optimize edilmiş kararlı veriler; pH, TDS, bulanıklık ve sıcaklık parametreleri için ayrı ayrı kurgulanmış alt-indeks kontrol mekanizmalarına eş zamanlı olarak iletilmektedir.

Yöntemde her parametre için alt-indeks değeri (Q_i) [Denklem \(5\)](#)'te hesaplanmıştır:

$$Q_i = \frac{2 V_i}{V_{max} + V_{min}} \times 100 \quad (5)$$

Burada V_i ölçülen parametre değeri, V_{min} ve V_{max} sınır değerlerini ifade etmektedir. Su kalite değeri, her parametrenin alt-indeks değerinin ilgili ağırlık katsayısı ile çarpılarak ağırlıklı aritmetik ortalama alınmasıyla elde edilmiştir [Denklem \(6\)](#):

$$IWQI = \sum_{i=1}^n W_i \times Q_i \quad (6)$$

Çalışmada kullanılan dört sensör (pH, TDS, sıcaklık ve bulanıklık) ve bunlara ait istenilen sınır, izin verilen sınır ile ağırlık katsayıları [Tablo 1](#)'de sunulmuştur.

Tablo 1. Su kalitesi hesaplamasında kullanılan parametreler, limit değerleri ve ağırlık katsayıları

Parametre	Ölçülen Birim	İstenilen sınır (V_{min})	İzin verilen sınır (V_{max})	Ağırlık (W_i)
pH	-	7.0	8.5	0.30
TDS	mg/L	300	1000	0.35
Bulanıklık	bağıl %	0	100	0.20
Sıcaklık	°C	20	30	0.15
Toplam	-	-	-	1.00

Elde edilen su kalitesi değeri çıktısı, [Tablo 2](#)'de sunulan beşli kalite sınıflandırma süzgecinden geçirilerek suyun mevcut durumunun kategorik etiketlemesi yapılmaktadır.

Bu doğrultuda algoritma; suyu sınıflandırmaktadır. Üretilen bu anlık metrikler ve nihai kalite kararı, lokal katmanda I2C tabanlı OLED ekrana eş zamanlı olarak yazdırılırken; bulut katmanında ağ bant genişliğini ve bulut sunucusunu çok fazla işgal etmemek amacıyla 20 saniyelik zaman süzgeci işletilmektedir. İlgili zaman koşulu sağlandığı

anda, doğrulanmış tüm veriler ve indeks etiketleri API GET istekleri üzerinden ThingSpeak bulut platformuna sürekli aktarılmakta ve sistem akışı en altta yer alan bir gecikme bloğu ile döngüyü tazeleyerek kararlı bir biçimde başa dönmektedir.

Tablo 2. IWQI değerlerine göre su kalitesi sınıflandırması ve karar matrisi[13]

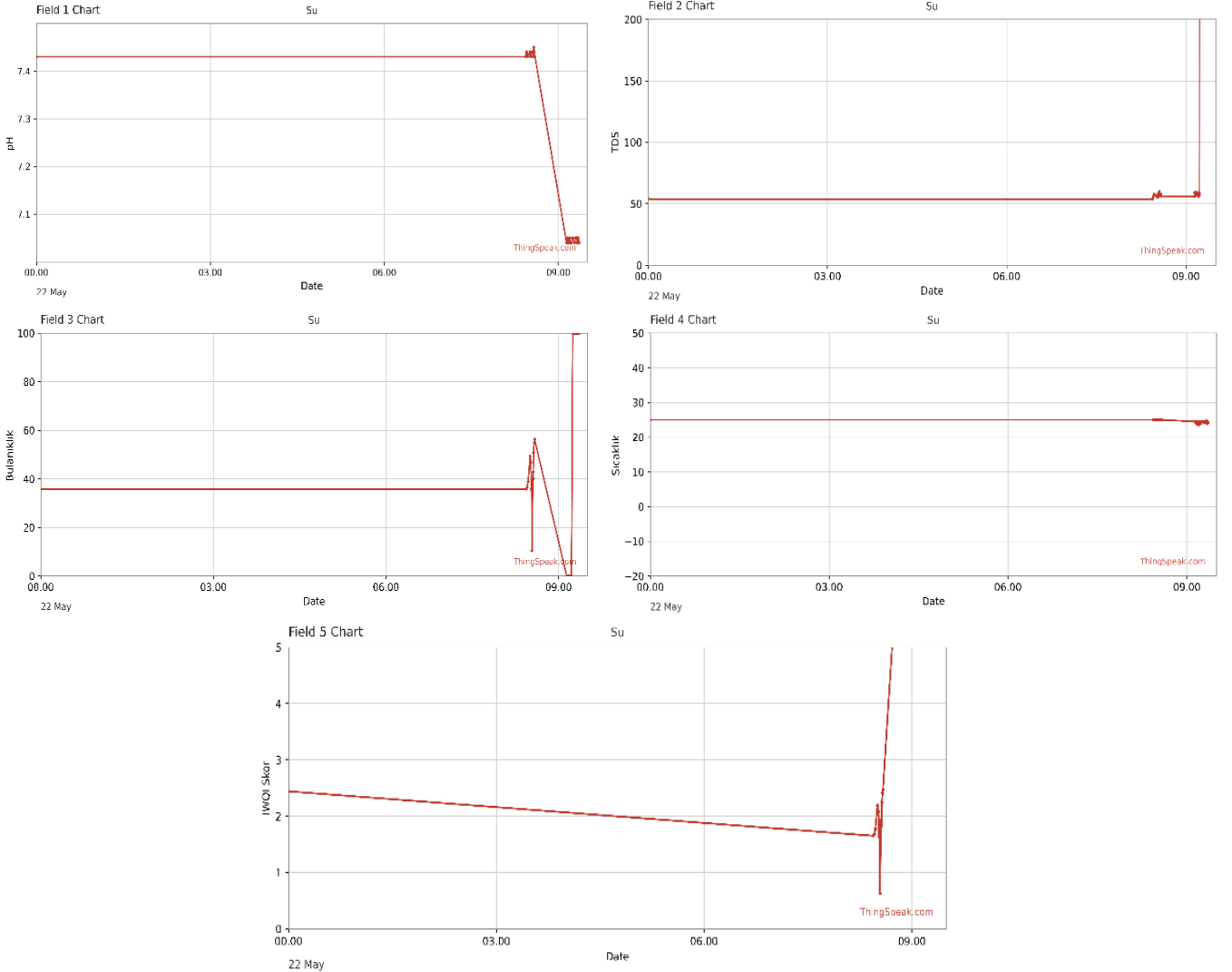
IWQI Değeri	Kalite Sınıfı	Karar
< 1	Mükemmel	İçme suyu için mükemmel
1 – 2	İyi	İyi kalite, içilebilir
2 - 3	Sınırdan	Sınırdan, dikkat edilmesi gerekir
3 - 5	Kötü	Su kalitesi iyileştirilmeli
> 5	Uygun Değil	İçilemez / Uygun değil

3 Bulgular ve tartışma

İçilebilir su kalitesinin izlenmesi amacıyla örnek ölçümler için Burdur ili şehir şebekesinden alınan su

örnekleri kullanılmıştır. Yapılan analizlere veriler Şekil 4'te verilmiştir.

Sistem genelinde 7.43 referans değerinde son derece kararlı seyreden pH grafiği, deneyin son fazında kontrollü kirlilik ve donanım müdahalesi simülasyonu esnasında 7.02 seviyesine anlık bir salınım göstermiştir. Bu değişim, pH kanalının durağan okumadan sapmaları ayırt edebildiğini ortaya koymaktadır (Field 1 Chart). Toplam katı madde analizi (TDS) uzun süre 54 seviyesinde doğrusal bir çizgi izleyen toplam çözünmüş katı madde yoğunluğu, sıvıya yabancı iyon enjeksiyonu yapıldığı anda ani bir sıçrama ile 200 tepe değerine ulaşmıştır. Grafikteki bu dikey ivmelenme, elektriksel iletkenlik probunun ve sinyal koşullandırma devresinin ani kirlilik şoklarını yakaladığını ortaya koymaktadır (Field 2 Chart). Bulanıklık analizi için; temiz su fazında %0 olan bulanıklık verisi, kullanılan su numunesinin değiştirilmesiyle 60 değerinden başlayarak yükseliş trendine girerek %100 seviyesini görmüştür. (Field 3 Chart). Ortam sıcaklığının 24-26 °C bandında kalmıştır (Field 4 Chart).



Şekil 4. IoT ortamına aktarılan veriler

4 Sonuç

Bu çalışma kapsamında, su kaynaklarının kalitesini anlık olarak gösterebilen, yerleşik ve bulut entegrasyonlu bir IoT sistemi oluşturulmuştur. Suyun içilebilirlik durumu, mikrodenetleyici üzerinde çalışan IWQI skorlama mekanizması ile belirlenmiştir. Üretilen sonuçlar anlık olarak OLED ekran üzerinden kullanıcıya iletilmiş; ThingSpeak entegrasyonu ile verilerin bulutta depolanması sağlanmıştır. Elde edilen IWQI skoru, ağır metal ve mikrobiyolojik parametreleri kapsamayan bir ön izleme göstergesidir; yasal içilebilirlik kararı yerine geçmemektedir.

Bu çalışmada referans laboratuvar cihazı ile sistematik karşılaştırma yapılmamış; RMSE, MAE, korelasyon katsayısı ve belirsizlik analizi olarak raporlanmamış ve sonuçlar “yüksek analitik doğruluk” iddiası olarak değil; gömülü IWQI hesaplama, kararlı okuma ve OLED/ThingSpeak eşzamanlı raporlama başarımı olarak değerlendirilmelidir. Nicel laboratuvar doğrulaması gelecek çalışmalarda planlanmıştır. Bulutta biriken veri seti, ileride TinyML, derin öğrenme veya bölgesel tahmin modelleri için tamamlayıcı bir altyapı oluşturabilir. Sonuç olarak sistem; içme suyu hatlarında kullanılabilecek ekonomik, taşınabilir ve gerçek zamanlı bir saha çözümü olarak önerilmektedir.

CRedit yazarlık katkı beyanı

Ali Kavurur: Kavramsallaştırma, Veri düzenleme, Araştırma, Yöntem, Doğrulama, Görselleştirme, Yazma-ilk taslak, Yazma-inceleme ve düzenleme;

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %7

Yazım sürecinde üretken yapay zekâ (YZ) ve YZ destekli teknolojilerin kullanımına ilişkin beyan

Bu çalışmanın hazırlanması sırasında yazarlar, dil ve okunabilirliği iyileştirmek için NotebookLM aracını kullanmıştır. Bu aracı kullandıktan sonra, yazarlar içeriği gerektiği gibi gözden geçirmiş ve düzenlemiş olup, yayın içeriğinden tamamen sorumludur.

Kaynaklar

- [1] World Health Organization, “Guidelines for Drinking-water Quality,” 4th ed. Geneva: World Health Organization, 2011. ISBN 978 92 4 154815 1
- [2] A. N. Prasad, K. A. Mamun, F. R. Islam, and H. Haqva, “Smart water quality monitoring system,” In 2015 2nd Asia-Pacific World Congress on Computer Science and Engineering, pp. 1-6, 2015. doi:10.1109/APWCC SE.2015.7476234
- [3] M. A. I. Khan, M. A. Hoque, and S. Ahmed, “IoT-based system for real-time water pollution monitoring of rivers,” In 2021 International Conference on Electronics, Communications and Information Technology pp. 1-5, 2021.
- [4] S. N. Zainurin, W. Z. Wan Ismail, S. N. I. Mahamud, I. Ismail, J. Jamaludin, K. N. Z. Ariffin, and W. M. Wan

- Ahmad Kamil, “Advancements in monitoring water quality based on various sensing methods: a systematic review,” *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(21), 14080, 2022. <https://doi.org/10.3390/ijerph192114080>
- [5] M. G. Eskin, M. Torabfam, E. Psillakis, A. Cincinelli, H. Kurt, and M. Yüce, “Real-time water quality monitoring of an artificial lake using a portable, affordable, simple, arduino-based open-source sensor,” *Environmental Engineering-Inženjerstvo Okoliša*, 6(1), 7-14, 2019. doi:10.37023/ee.6.1.2
- [6] A. Bilgin, “Water quality index and applications,” *Journal of Current Researches on Engineering, Science and Technology*, 4(2), 161–170, 2018. doi:10.26579/jocrest-4.2.14
- [7] R. K. Horton, “An index number system for rating water quality,” *Journal of Water Pollution Control Federation*, 37(3), 300–306, 1965.
- [8] R. M. Brown, N. I. McClelland, R. A. Deininger, and R. G. Tozer, “A water quality index Do we dare?,” *Water & Sewage Works*, 117(10), 339–343, 1970.
- [9] M. S. Islam, M. A. Azadi, M. Nasiruddin, and M. S. Islam, “Water quality of Boalia Khal tributary of Halda River by weighted arithmetic index method,” *American Journal of Water Resources*, 9(1), 15–22, 2021. <https://doi.org/10.12691/ajwr-9-1-3>
- [10] M. Marselina, F. Wibowo, and A. Mushfiroh, “Water quality index assessment methods for surface water: A case study of the Citarum River in Indonesia,” *Heliyon*, 8(7), e09848, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09848>
- [11] A. Masood, M. Aslam, Q.B. Pham, W. Khan, and S. Masood, “Integrating water quality index, GIS and multivariate statistical techniques towards a better understanding of drinking water quality,” *Environmental Science and Pollution Research*, 29(18), 26860–26876, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17594-0>
- [12] S. Ramesh, N. Sukumaran, A. G. Murugesan, and M. P. Rajan, “An innovative approach of Drinking Water Quality Index—A case study from Southern Tamil Nadu, India,” *Ecological Indicators*, 10(4), 857–868, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2010.01.008>
- [13] S. Mukate, V. Wagh, D. Panaskar, J. A. Jacobs, and A. Sawant, “Development of new integrated water quality index (IWQI) model to evaluate the drinking suitability of water,” *Ecological Indicators*, 101, 348–354, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.01.034>
- [14] W. J. Hong, N. Shamsuddin, E. Abas, R. A. Apog, Z. Masri, H. Suhaimi, S. H. Gödeke, and M. N. A. Noh, “Water Quality Monitoring with Arduino Based Sensors,” *Environments*, 8(1), 6, 2021. <https://doi.org/10.3390/environments8010006>
- [15] S. O. Osman, M. Z. Mohamed, A. M. Suliman, and A. A. Mohammed, “Design and Implementation of a Low-Cost Real-Time In-Situ Drinking Water Quality Monitoring System Using Arduino,” In 2018

- International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering, pp. 1-6, 2018.
- [16] C. Feng, and Y. Sun, "Design of Water Quality Monitoring System," In 2020 International Conference on Artificial Intelligence and Computer Engineering, pp. 284-288, 2020. <https://doi.org/10.1109/ICAICE51518.2020.00057>
- [17] F. M. L. S. Alimorong, H. A. D. Apacionado, and J. F. Villaverde, "Arduino-Based Multiple Aquatic Parameter Sensor Device for Evaluating pH, Turbidity, Conductivity and Temperature," In 2020 IEEE 12th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management, pp. 1-5, 2020.
- [18] L. M. Pires, and J. Gomes, "River water quality monitoring using LoRa-based IoT," *Designs*, 8(6), 127, 2024. <https://doi.org/10.3390/designs8060127>
- [19] W. A. Jabbar, T. M. Ting, M. F. I. Hamidun, A. H. C. Kamarudin, W. Wu, J. Sultan, and M. A. H. Ali, "Development of LoRaWAN-based IoT system for water quality monitoring in rural areas," *Expert systems with applications*, 242, 122862, 2024. [10.1016/j.eswa.2023.122862](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122862)
- [20] K. J. Berrio Quintanilla, P. L. Huayta Cosi, J. L. Huarca Quispe, J. C. Cutipa Luque, and J. P. Julca Avila, "Implementation of a Dynamic LoRa Network for Real-Time Monitoring of Water Quality," *Designs*, 9(4), 96, 2025. <https://doi.org/10.3390/designs9040096>
- [21] F. Adelantado, X. Vilajosana, P. Tuset-Peiro, B. Martinez, J. Melia-Segui, and T. Watteyne, "Understanding the limits of LoRaWAN," *IEEE Communications Magazine*, 55(9), 34-40, 2017. DOI:10.1109/MCOM.2017.1600613
- [22] E. T. De Camargo, F. A. Spanhol, J. S. Slongo, M. V. R. Da Silva, J. Pazinato, A. V. de Lima Lobo, and L. D. Martins, "Low-cost water quality sensors for IoT: A systematic review," *Sensors*, 23(9), 4424, 2023. <https://doi.org/10.3390/s23094424>
- [23] J. Fonseca-Campos, I. Reyes-Ramirez, L. Guzman-Vargas, L. Fonseca-Ruiz, J. A. Mendoza-Perez, and P. F. Rodriguez-Espinosa, "Multiparametric system for measuring physicochemical variables associated to water quality based on the Arduino platform," *IEEE Access*, 10, 69700-69713, 2022. [10.1109/ACCESS.2022.3187422](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3187422)
- [24] DFRobot, Gravity: Analog TDS Sensor/Meter for Arduino (SEN0244). https://wiki.dfrobot.com/Gravity_Analog_TDS_Sensor_Meter_For_Arduino_SKU_SEN0244, Accessed 11 May 2026.
- [25] Espressif Systems, ESP32 Series Datasheet. https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf, Accessed 11 May 2026.

