

Kapalı Alanlarda Çevresel İzleme için Uçtan Uca IoT Tabanlı Veri Toplama ve Kayıt Sistemi Tasarımı

Mustafa TURHAN

Bilgisayar Mühendisliği A.B.D. Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

Bilecik / TÜRKİYE

ORCID: 0009-0000-5411-8539

Dr. Öğr. Üyesi Hakan ÜÇGÜN

Bilgisayar Mühendisliği

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

Bilecik / TÜRKİYE

ORCID: 0000-0002-9448-0679

Özet—Son yıllarda IoT ve düşük güç tüketimli gömülü sistemlerdeki gelişmeler, kapalı alanlarda çevresel parametrelerin sürekli ve güvenilir biçimde izlenmesini hem akıllı bina uygulamaları hem de endüstriyel otomasyon açısından önemli bir gereksinim haline getirmiştir. Bu doğrultuda çalışma kapsamında, iç ortam verilerini yüksek doğruluk ve süreklilikle toplayabilen, konumlandırma ve haberleşme katmanlarında yedeklilik prensibiyle tasarlanmış uçtan uca bir Nesnelerin İnterneti (IoT) tabanlı veri toplama ve kayıt sistemi geliştirilmiştir. Sistemin merkezinde Raspberry Pi Pico W kontrol kartı yer almakta; hava kalitesi ölçümleri için SGP30, sıcaklık ve nem için BME280, ortam ışık şiddeti için ise BH1750 sensörleri kullanılmaktadır. Bu yapı, iç ortam konfor parametrelerinin bütüncül biçimde izlenmesine olanak sağlamaktadır. Önerilen mimaride konum bilgisi, NEO-6M GNSS modülünden elde edilen veriler ile SIM800L üzerinden sağlanan Hücre Kimliği (Cell-ID) bilgilerinin birlikte değerlendirilmesiyle üretilmektedir. Bu hibrit yaklaşım, özellikle kapalı alanlarda Küresel Navigasyon Uydu Sistemi (GNSS) sinyalinin zayıfladığı durumlarda sistemin konumsal sürekliliğini korumaktadır. Veri iletiminde ise Wi-Fi ve Paket Anahtarlı Radyo Servisi (GPRS) altyapıları çift kanal prensibiyle yapılandırılarak bağlantı güvenilirliği artırılmıştır. Sensör verileri 30 saniyelik periyotlarla kaydedilmekte, eş zamanlı olarak Organik Işık Yayan Diyot (OLED) ekran üzerinden görüntülenmekte ve uzak sunucuya aktarılmaktadır. Ayrıca sıcaklık ve nem ölçümlerinin gaz sensörünün nem telafisi algoritmasında referans değişken olarak kullanılması, ölçüm sonuçlarının daha kararlı ve tekrarlanabilir olmasını sağlamaktadır. Sistem, ürettiği zaman damgalı ve konum etiketli veriler sayesinde gelecekteki makine öğrenmesi ve veri analitiği uygulamaları için ölçeklenebilir bir altyapı sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler—Nesnelerin İnterneti, Hibrit Konumlandırma, Çevresel İzleme, Raspberry Pi Pico W, İç Ortam Hava Kalitesi, Yapay Zeka

I. GİRİŞ

Dünya genelinde bireyler zamanlarının yaklaşık %90'ını kapalı alanlarda geçirmektedir. Bu durum, iç ortam hava kalitesi (Indoor Air Quality – IAQ) izleme sistemlerini halk sağlığı ve iş güvenliği açısından kritik hale getirmiştir [1]. IoT tabanlı IAQ sistemlerine yönelik sistematik çalışmalar, düşük maliyetli sensörlerin yaygınlaşmasının akıllı bina uygulamalarını hızlandırdığını ancak veri güvenilirliği ve kalibrasyon problemlerinin devam ettiğini göstermektedir [1].

IAQ süreçlerinde ortama ait genel hava parametreleri sağlıklı yaşam koşulları kapsamında ele alınmaktadır. Bu bağlamda genel olarak ortama ait sıcaklık, nem ve ses şiddeti parametreleri üzerinden uygulamalar gerçekleştirilse de Karbondioksit (CO₂), Toplam Uçucu Organik Bileşenler

(TVOC), partikül madde ve ışık şiddeti gibi çok boyutlu verilerinde eş zamanlı takibinin yapıldığı görülmektedir. Modern IoT mimarilerinde bu parametrelerin bütüncül izlenmesi, akıllı bina yönetim sistemleri açısından kritik öneme sahiptir [2].

İnsan sağlığı için en temel hava kalitesi parametrelerden bir tanesi olan gaz parametreleri için genel olarak Metal Oksit (MOX) tabanlı gaz sensörleri (örneğin SGP30), düşük maliyetli olmaları nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Ancak literatürde, bu sensörlerin ortam nemi ve sıcaklığından önemli ölçüde etkilendiğini görülmektedir [3], [4]. Özellikle nem kaynaklı sensör kayması, eCO₂ ve TVOC ölçümlerinde anlamlı sapmalara yol açabilmektedir. Dinamik nem telafisi ve harici referans sensör kullanımı, ölçüm doğruluğunu artırmak için önerilen yöntemler arasındadır [3].

IAQ uygulamalarında verilerin uzaktan izlenmesi ve konum bilgisinin takibi süreçlerinde konumlandırma tarafında, GNSS sistemleri kapalı alanlarda sinyal zayıflaması ve çok yollu yansıma gibi etkiler nedeniyle sınırlı performans göstermektedir [5]. Bu nedenle iç ortam konumlandırma alanında hibrit çözümler ön plana çıkmaktadır. Mevcut altyapıyı kullanan Wi-Fi veya Cell-ID temelli yöntemler, düşük maliyetli ve geniş kapsama alanlı birer alternatif sunmaktadır [6]. GNSS ve hücresel verinin birlikte kullanımı, kesintisiz izlenebilirlik sağlayan dayanıklı bir yöntem olarak önerilmektedir [7].

Bu çalışmada, Raspberry Pi Pico W mimarisi üzerine kurulu, sensör füzyonu ve hibrit konumlandırma destekli uçtan uca bir veri toplama platformu tasarlanmıştır. Sistem kapsamında eCO₂ ve TVOC parametreleri için SGP30 sensörü, ışık şiddeti için BH1750 sensörü, sıcaklık ve nem için BME280 sensörleri entegre kullanılmıştır. BME280'den elde edilen mutlak nem verisi, SGP30 için dinamik nem telafisi amacıyla kullanılmaktadır. Konum sürekliliği NEO-6M GNSS sensörü ve SIM800L (Cell-ID tabanlı Konum Tabanlı Servisler (LBS)) modülleri ile sağlanmıştır. Veri iletimi Wi-Fi ve GPRS kanalları üzerinden yedekli olarak yapılandırılmıştır.

II. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Kapalı alan izleme sistemleri, son yıllarda tekil sensör düğümlerinden çoklu sensör füzyonu ve ağ geçidi mimarilerine doğru evrilmiştir. IoT tabanlı IAQ sistemlerine ilişkin sistematik incelemeler, donanım entegrasyonu kadar kalibrasyon ve veri işleme süreçlerinin de kritik olduğunu göstermektedir [1].

MOX sensörlerin stabilitesi üzerine yapılan çalışmalar, nem ve sıcaklık değişimlerinin sensör çıkışında önemli kaymalara yol açtığını ortaya koymaktadır [4]. Uzun dönemli izleme çalışmalarında, çevresel faktörlerin telafi edilmemesi durumunda ölçümlerde ciddi sapmalar gözlenmiştir [8]. Bu nedenle dinamik kalibrasyon ve sensör düzeyinde veri füzyonu yaklaşımları önerilmektedir [3].

Konumlandırma literatüründe, GNSS'in bina içi performansının sınırlı olduğu ve hibrit çözümlerin gerekliliği vurgulanmaktadır [5]. Wi-Fi fingerprinting ve Ultra Geniş Bant (UWB) teknolojileri yüksek doğruluk sunsa da sırasıyla karmaşık veritabanı bakımı ve özel donanım gereksinimleri nedeniyle maliyet ve enerji tüketimi açısından sınırlayıcıdır [9]. Hücresel ağ temelli LBS çözümleri ise düşük maliyetli ve ölçeklenebilir bir alternatif olarak önerilmektedir [6]. Küresel Konumlandırma sistemi GPS ve hücresel ağ verisinin birlikte kullanımı, süreklilik açısından daha dayanıklı bir yapı sağlamaktadır [7].

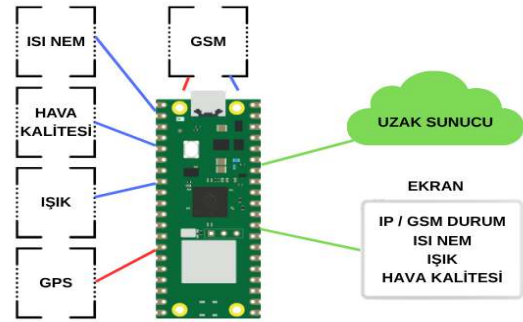
IoT ağ geçitlerinde iletişim sürekliliği kritik bir konudur. Kritik görev sistemlerinde, ağ geçidi katmanındaki herhangi bir düğümün arızalanması tüm ağın izolasyonuna yol açarak hata toleransını sıfıra indirebilmektedir. Endüstriyel uygulamalarda bu riskin aşılması için ağ geçidi katmanında yedekli yol yapılarının (mesh topolojileri) kullanılması, sistemin hata toleransını %11 oranında artırarak yüksek güvenilirlik sağlamaktadır [10]. Çoklu bağlantı mimarileri bu riski azaltmaktadır.

Son olarak, veri kalitesine odaklanan yaklaşımlar, çevresel modelleme ve akıllı sistemler için yüksek doğruluklu veri toplama altyapısının önemini vurgulamaktadır [11]. Bu bağlamda, Raspberry Pi kontrol ünitesi ile sıcaklık, nem, gaz ve ışık sensörlerini entegre eden IoT tabanlı platformlar; verilerin anlık izlenmesine ve geliştirilen formüllerle hava kalitesinin sayısal olarak anlamlandırılmasına olanak tanıyan ölçeklenebilir bir yapı sunmaktadır [12].

III. SİSTEMİN ÇALIŞMA PRENSİBİ

Çalışmada geliştirilen sistem, iç ortam hava kalitesinin çok parametrelilik olarak izlenmesini hedefleyen bütünlük bir IoT mimarisi olarak tasarlanmıştır. Sistem; veri toplama, işleme, yerel görüntüleme ve uzak sunucuya iletim aşamalarından oluşan, yüksek erişilebilirlik ve sürdürülebilir veri akışı odaklı bir uç cihaz (edge device) niteliğindedir. Bu kapsamda hava kalitesi, sıcaklık, nem ve ışık şiddeti gibi çevresel parametreler ilgili sensörler aracılığıyla gerçek zamanlı olarak ölçülmekte; elde edilen veriler mikrodenetleyici üzerinde ön işleme tabi tutulmaktadır. İşlenen veriler, anlık izleme amacıyla OLED ekran üzerinden yerel olarak görüntülenirken, eş zamanlı olarak kablosuz haberleşme altyapısı aracılığıyla uzak veri izleme platformuna aktarılmaktadır. Böylece sistem, hem bulunduğu ortamda anlık geri bildirim sağlayan hem de uzaktan erişim ile uzun dönemli veri analizi ve arşivleme imkânı sunan çift katmanlı bir izleme altyapısı ortaya koymaktadır. Sisteme ait blok diyagramı Şekil 1'de verilmiştir.

Sistem; veri toplama, işleme, yerel görüntüleme ve uzak sunucuya iletim aşamalarından oluşan, yüksek erişilebilirlik odaklı bir uç cihaz olarak tasarlanmıştır.



Şekil 1. IAQ Sistemine ait Blok Diyagramı

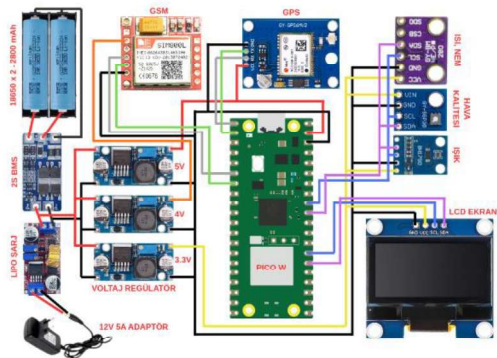
A. Donanım Bileşenleri ve Bağlantı Yapısı

Sistemin merkezinde, çift çekirdekli yapısı ve dâhili Wi-Fi yetenekleriyle gömülü uygulamalarda yüksek performans sunan Raspberry Pi Pico W yer almaktadır. Bu mikrodenetleyici, veri toplama ve haberleşme süreçlerini paralel (eş zamanlı) yürüterek sistemin kararlılığını ve gerçek zamanlılık kapasitesini artırmaktadır. Şekil 2'de detaylandırılan donanımsal haberleşme mimarisi, modülerlik ve ölçeklenebilirlik hedefleri doğrultusunda üç temel aşamada yapılandırılmıştır

Birinci Aşama (I2C): SGP30, BH1750, BME280 sensörleri ve SSD1306 OLED ekran aynı I2C hattı üzerinden haberleşmektedir. Her bileşene özgü I2C adreslerinin atanmasıyla veri çakışmaları engellenmiş, tek bir veri/saat hattı üzerinden yüksek hat verimliliği sağlanmıştır.

İkinci Aşama (UART1): NEO-6M GPS modülü ile seri haberleşme bu hat üzerinden kurulmuştur. Modülün NMEA standartlarında ürettiği konum ve zaman damgası verileri alınarak, sistemin konum tabanlı analiz fonksiyonları için işlenmektedir.

Üçüncü Aşama (UART2): SIM800L GSM/GPRS modülü ile iletişim AT komut seti aracılığıyla yürütülmektedir. Bu yapı, Wi-Fi erişiminin bulunmadığı bölgelerde veri iletiminin sürekliliğini sağlamakta ve LBS tabanlı konum sorgulamalarına olanak tanımaktadır.



Şekil 2. Donanımsal Bağlantı Şeması

B. Sistemin Çalışma Prensipleri ve Veri Akışı

Sistem, MicroPython tabanlı gömülü yazılım mimarisi üzerinde çalışan zaman kontrollü ve asenkron bir görev döngüsü ile işletilmektedir. Veri toplama ve iletim süreçlerinin birbirini bloke etmemesi amacıyla olay güdümlü (event-driven) ve kesintiye duyarlı bir yapı tercih edilmiştir. Bu kapsamda sistem aşağıdaki işlem adımlarını ardışık ve kontrollü biçimde gerçekleştirmektedir:

İlk Olarak SGP30 sensörü için kritik olan 15 saniyelik ön ısıtma süreciyle süreç başlamakta ve kalıcı bellekten (NVS) yüklenen son 12 saatlik baseline verileriyle sensörün hızlıca kararlı haline geçmesi sağlanmaktadır. Sistemin operasyonel sürekliliği, asenkron olarak yürütülen üç temel görev döngüsüyle yönetilmektedir: Birinci döngü, 1 saniyelik periyotlarla BME280 verilerini SGP30 nem telafisi algoritmasına aktararak hava kalitesi ölçümlerini kalibre etmekte ve tüm verileri OLED ekran üzerinden sunmaktadır. 30 saniyelik periyotlara sahip ikinci görev; hibrit konumlandırma (açık alanda GNSS, kapalı alanda LBS) verileriyle harmanlanan sensör çıktılarını JSON formatında paketleyerek Wi-Fi (öncelikli) veya GPRS (yedekli) kanalları üzerinden uzak sunucuya iletmektedir. Şekil 3'de 10'ar saniyelik periyotlarla gönderilmiş örnek verileri ve toplam veri sayısını görebilirsiniz.

	date_time	A2_latitude	A2_longitude	temp	hum	ecO2	VOC	lux	
B65	2026-03-30 03:02:10.038	40.131993	29.991596	29.78	33.86	553	405	0	
B66	2026-03-30 03:01:34.960	40.131993	29.991596	29.76	33.8	553	405	0	
B67	2026-03-30 03:01:00.033	40.131993	29.991596	29.79	33.85	553	405	0	
B68	2026-03-30 03:00:24.990	40.131993	29.991596	29.78	33.9	553	405	0	
Refresh Save Cancel Export data 35000 91.677									

sistemin güç kaynağı tasarımı dikkate alınması gereken kritik bir parametredir.

Kalibre edilmiş bir referans cihaz ile yapılan karşılaştırmalı analizler sonucunda, sıcaklık ve nem parametrelerinde hata payının %5 ile %7 arasında kalarak kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğu doğrulanmıştır. 5 günlük (120 saat) saha test süreci boyunca sistemde herhangi bir yazılımsal kilitlenme veya donanım arızası gözlenmemiştir. Sistemin detaylı performans metrikleri Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Performans ve Kararlılık Metrikleri

Parametre	Ölçülen Değer / Başarı Oranı	Not
İletişim Başarımı Wifi	% 99	24 Saatlik Veri
İletişim Başarımı GPRS	% 98	24 Saatlik Veri
Ortalama Tüketim	85 mA	Sensör Okuma ve Veri İletimi
Sistem Çalışma Süresi	120 Saat	Donanım Arızası Görülmedi
Batarya Ömrü	~ 48 Saat	
Sensör Kararlılığı	< % 5	Referans Cihaz ile Karşılaştırma
Konumlandırma GPS	< % 1	Referans Cihaz ile Karşılaştırma
Konumlandırma LBS	< % 2.5	Referans Cihaz ile Karşılaştırma

V. SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu çalışma kapsamında; kapalı alanların hava kalitesi ve konfor parametrelerini yüksek hassasiyetle izleyebilen, iletişim ve konumlandırma katmanlarında yedeklilik esasına dayalı uçtan uca bir IoT veri toplama sistemi tasarlanmıştır. Raspberry Pi Pico W kontrolcü mimarisi üzerine kurgulanan sistemin, düşük güç tüketimi ve yüksek işlem verimliliği ile saha koşullarında kararlı bir performans sergilediği deneysel olarak doğrulanmıştır.

Çalışmanın özgün değerini artıran temel unsur, operasyonel sürekliliği hedefleyen hibrit mimarilerdir. Bina içi ortamlarda GNSS sinyal zayıflamasına karşı geliştirilen SIM800L tabanlı LBS konumlandırma mekanizması, konumsal verinin sürekliliğini %100 oranında sağlamıştır. Benzer şekilde, Wi-Fi kesintilerinde otonom olarak devreye giren GPRS hattı, veri akışının bütünlüğünü garanti altına almıştır. Ayrıca, BME280'den elde edilen nem verilerinin SGP30 sensörü için dinamik bir telafi parametresi olarak kullanılması, çevresel değişkenlerden kaynaklanan ölçüm hatalarını minimize ederek verilerin bilimsel güvenilirliğini artırmıştır.

Sistemin güç yönetim katmanında kullanılan 18650 batarya bloğu ve izole edilmiş regülatör hatları (3.3V, 4V, 5V), elektriksel gürültüden arındırılmış bir şekilde yaklaşık 24 saatlik otonom çalışma imkânı sunmaktadır. Mevcut platform, sunduğu zaman damgalı ve konum etiketli veri yapısı sayesinde akıllı bina yönetimi ve endüstriyel sağlık-güvenlik standartları için ölçeklenebilir bir altyapı teşkil etmektedir.

Gelecek çalışmalarda, bu sistem vasıtasıyla elde edilen yüksek çözünürlüklü ve kesintisiz veri setleri, ilerleyen aşamalarda uça yapay zekâ (TinyML) tabanlı modellerin eğitilmesi için temel teşkil edecektir.

İlk olarak, sensörlerden elde edilen veriler üzerinde Isolation Forest veya Autoencoders gibi derin öğrenme ve istatistiksel sınıflama algoritmaları kullanılarak, hem sensör arızalarının hem de yangın veya gaz sızıntısı gibi ani çevresel değişimlerin gerçek zamanlı olarak belirlenebileceği bir anomali tespiti mekanizması geliştirilecektir. İkinci aşamada, sistem tarafından toplanan tarihsel veri setleri üzerinde eğitilecek olan Yinelemeli Sinir Ağları (RNN) veya Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM) modelleri vasıtasıyla, eCO₂ ve TVOC gibi hava kalitesi parametrelerinin kısa ve orta vadeli projeksiyonları yapılarak hava kalitesi tahmini gerçekleştirilecektir. Son olarak, uç birimlerden gelen ham veriler bulut tabanlı büyük veri analitiği yöntemleriyle işlenerek, bölgeye özgü kirlilik haritalarının oluşturulması ve otonom kontrol mekanizmalarının optimize edilmesi süreçlerinde etkin bir karar destek sistemi olarak kullanılacaktır. Bu entegrasyon süreci, mevcut veri toplama altyapısını statik bir izleme aracından, proaktif ve akıllı bir çevresel yönetim ekosistemine dönüştürmeyi hedeflemektedir.

VI. KAYNAKÇA

- [1] J. Saini, M. Dutta ve G. Marques, "Indoor Air Quality Monitoring Systems Based on Internet of Things: A Systematic Review," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, c. 17, no. 14, s. 4942, 2020, doi:10.3390/ijerph17144942.
- [2] R. N. Pietraru, A. Olteanu, I.-R. Adochiei ve F.-C. Adochiei, "Reengineering Indoor Air Quality Monitoring Systems to Improve End-User Experience," *Sensors*, c. 24, no. 8, s. 2659, 2024, doi:10.3390/s24082659.
- [3] A. N. Abdullah, K. Kamarudin, L. M. Kamarudin, A. H. Adom, S. M. Mamduh, Z. H. M. Juffry ve V. H. Bennetts, "Correction Model for Metal Oxide Sensor Drift Caused by Ambient Temperature and Humidity," *Sensors*, c. 22, no. 9, s. 3301, 2022, doi:10.3390/s22093301.
- [4] H. Chai, C. Gentner, M. Ulmschneider ve A. Dammann, "Stability of Metal Oxide Semiconductor Gas Sensors: A Review," *Sensors*, c. 22, no. 12, s. 4475, 2022, doi:10.1109/JSEN.2022.3148264.
- [5] T. Aziz ve I. Koo, "A Comprehensive Review of Indoor Localization Techniques and Applications in Various Sectors," *Applied Sciences*, c. 15, no. 3, s. 1544, 2025, doi:10.3390/app15031544.
- [6] R. S. Naser, M. C. Lam, F. Qamar ve B. B. Zaidan, "Smartphone-Based Indoor Localization Systems: A Systematic Literature Review," *Electronics*, c. 12, no. 8, s. 1814, 2023, doi:10.3390/electronics12081814.
- [7] A. A. Mahdi ve A. Chalechale, "A Hybrid Indoor Positioning Model for Critical Situations Based on Localization Technologies," *Mobile Information Systems*, c. 2022, s. 8033380, 2022, doi:10.1155/2022/8033380.
- [8] T. Baur, J. Amann, C. Schultealbert ve A. Schütze, "Field Study of Metal Oxide Semiconductor Gas Sensors in Temperature Cycled Operation for Selective VOC Monitoring in Indoor Air," *Atmosphere*, c. 12, no. 5, s. 647, 2021, doi:10.3390/atmos12050647.
- [9] S. Martín-Frechina, E. Dura, I. Miralles ve J. Torres-Sospedra, "From Fingerprinting to Advanced Machine Learning: A Systematic Review of Wi-Fi and BLE-Based Indoor Positioning Systems," *Sensors*, c. 25, no. 22, s. 6946, 2025, doi:10.3390/s25226946.
- [10] J. K. R. Sastry ve ark., "Enhancing the Fault Tolerance of a Multi-Layered IoT Network through Rectangular and Interstitial Mesh in the Gateway Layer," *Journal of Sensor and Actuator Networks*, c. 12, no. 5, s. 76, 2023, doi:10.3390/jsan12050076.
- [11] Okafor, N.U.; Alghorani, Y.; Delaney, D.T. Improving Data Quality of Low-cost IoT Sensors in Environmental Monitoring Networks Using Data Fusion and Machine Learning Approach. *ICT Express* 2020, 6, 220–228, doi:10.1016/j.icte.2020.06.004.
- [12] Üçgün, H., Gömbeci, F., Yüzgeç, U., & Yalçın, N. (2020). IoT Tabanlı Platform ile Gerçek Zamanlı İç Ortam Hava Kalitesi İzleme Sistemi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(1), 370-381.