



Araştırma Makalesi – Research Article

Geliş Tarihi / Received: 07/03/2026

Kabul Tarihi / Accepted: 18/04/2026

Yayın Tarihi / Published: 31/05/2026

Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Ağ Ömrü Optimizasyonu ve Pratik Uygulaması

Optimization of Network Lifetime in Wireless Sensor Networks and Its Practical Application

Bahtiyar Bayram¹, Hamid Yılmaz², Mehmet Barış Tabakcıoğlu^{3*}

¹Bursa Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Bursa, Türkiye, 24434981003@ogr.btu.edu.tr, <https://orcid.org/0009-0004-0639-8782>

²Bursa Teknik Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği, Bursa, Türkiye, hamid.yilmaz@btu.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0003-0852-4119>

^{3*}Bursa Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Bursa, Türkiye, mehmet.tabakcioglu@btu.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-1607-355X>

Etik Beyan: Bu çalışmanın hazırlanma sürecinde bilimsel ve etik ilkelere uyulduğu ve yararlanılan tüm çalışmaların kaynakçada belirtildiği beyan olunur.

Yapay Zeka Etik Beyanı: Yazar bu makalenin hazırlanma sürecinin hiç bir aşamasında yapay zekadan faydalanılmadığını; bu konuda tüm sorumluluğun kendisine(kendilerine) ait olduğunu beyan etmektedir.

Çıkar Çatışması: Çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Finansman: Bu araştırmayı desteklemek için dış fon kullanılmamıştır.

Lisans: CC BY-NC 4.0

Ethical Statement: It is declared that scientific and ethical principles were followed during the preparation of this study and that all studies used are stated in the bibliography.

Artificial Intelligence Ethical Statement: The author declares that artificial intelligence was not utilized at any stage of the preparation process of this article and accepts full responsibility in this regard.

Conflicts of Interest: The author(s) has no conflict of interest to declare.

Grant Support: The author(s) acknowledge that they received no external funding to support this research.

License: CC BY-NC 4.0

Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Ağ Ömrü Optimizasyonu ve Pratik Uygulaması

ÖZ

Kablosuz algılayıcı ağlarda bir ortamın izlenmesinde enerjisini küçük hacimli bir pil, batarya veya süperkondansatörden alan algılayıcı düğümler (AD) kullanılmaktadır. Bu düğümler genellikle zorlu şartlar altındaki bölgelerde konumlandırılmakta ve haberleşme esnasında, bilgi üretmede, bilgiyi alıp vermede ve boşta dinlemede sürekli enerji harcamakta ve kısa süre içerisinde enerji tükenmektedir. Algılayıcı düğümlerin pilini değiştirmek çok da pratik olmadığından, sensörün ömrünü dolayısıyla ağın ömrünü uzatmak için enerji yönetimi için MAC protokolleri tasarlanmakta, güneş, rüzgâr, titreşim ve elektromanyetik gibi ortam enerjisini alan ve kendini şarj eden üniteler eklenmekte ve yeni rotalama algoritmaları geliştirilmektedir. Bu çalışmada ağın ömrünü maksimize eden bir Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama (KTDP) modeli ortaya konulmuştur. Geliştirilen model 10 düğümlü bir problem üzerinde test edilmiş ve ağ ömrünün spesifik olarak 10 periyota kadar maksimize edildiği gösterilmiştir. Matematiksel modelden elde edilen rotalama stratejisinin pratik uygulaması donanım üzerinde gerçekleştirilerek 500 kesintisiz iletişim döngüsü boyunca test edilmiş; fiziksel düğümlerin bataryadeşarj seviyeleri ile matematiksel modelin öngördüğü enerji tüketim profillerinin uyumu karşılaştırılarak önerilen yaklaşımın doğruluğu onaylanmıştır.

Anahtar Kelimeler- *Kablosuz algılayıcı ağlar, Rotalama, Ağ ömrü uzatımı, Algılayıcı düğüm, İzleme*

Öne Çıkanlar

- Ağ ömrü sunulan matematiksel model ile maksimum hale getirilmiştir.
- Matematiksel modelden elde edilen rota bilgileri pratikte algılayıcı düğümler kullanılarak test edilmiştir.
- Arduino uno, nRF modülü, pil, algılayıcı (basınç, sıcaklık, nem) içeren bir sensör düğümü tasarlanmıştır.
- Matematiksel model ve pratik uygulamada benzer şekilde algılayıcı düğümlerin yaşam süresine ulaşılmıştır.

Optimization of Network Lifetime in Wireless Sensor Networks and Its Practical Application

ABSTRACT

In wireless sensor networks, sensor nodes (SNs) powered by small-volume batteries, cells, or supercapacitors are used to monitor an environment. These nodes are typically deployed in regions with harsh conditions and continuously consume energy during communication, data generation, data transmission and reception, as well as idle listening, leading to rapid energy depletion. Since replacing the batteries of sensor nodes is not very practical, MAC protocols for energy management are designed to extend the lifetime of the sensor and consequently the network while energy harvesting units that capture ambient energy sources such as solar, wind, vibration, and electromagnetic energy are integrated to enable self-charging and new routing algorithms are being developed. In this study, a Mixed Integer Linear Programming (MILP) model that maximizes network lifetime was proposed. The developed model was tested on a 10-node problem instance, demonstrating that the network lifetime was explicitly maximized to 10 periods. The practical implementation of the routing strategy obtained from the mathematical model was realized on hardware and tested over 500 continuous communication cycles; the correctness of the proposed approach was verified by comparing the consistency between the physical battery discharge levels of the nodes and the energy consumption profiles predicted by the mathematical model.

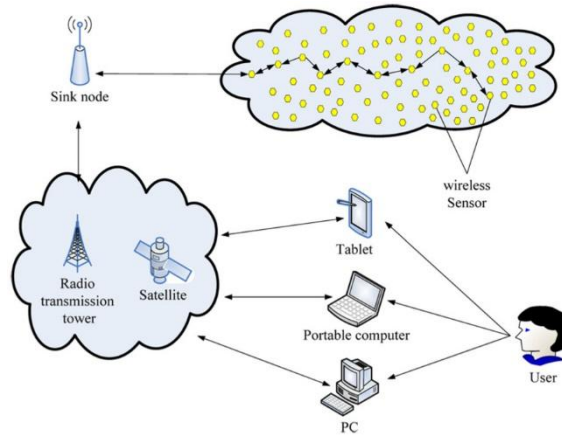
Keywords- *Wireless sensor networks, Routing, Lifetime maximization, Sensor node, Monitoring*

Highlights

- The network lifetime was maximized using the proposed model.
- The routing information obtained from the mathematical model was tested in practice using sensor nodes.
- A sensor node including an Arduino Uno, an nRF module, a battery, and sensors (pressure, temperature, and humidity) was designed.
- Similar sensor node lifetimes were observed in both the proposed mathematical model and the practical implementation.

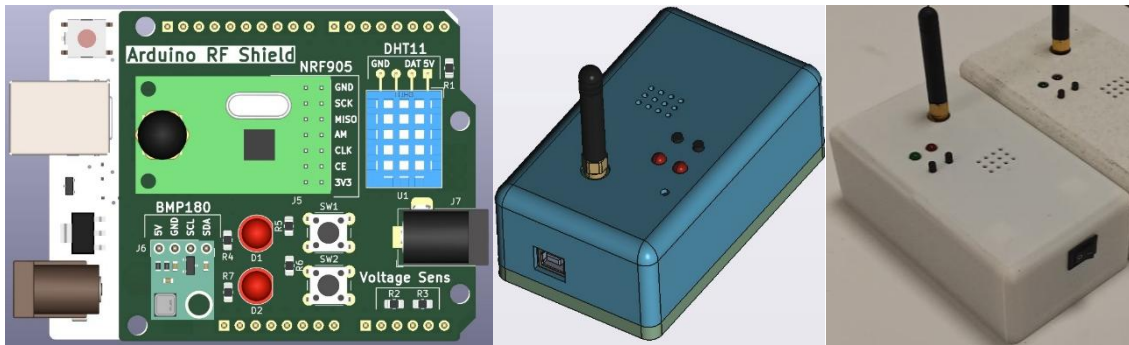
I. GİRİŞ

Kablosuz algılayıcı ağlar (KAA), birçok algılayıcı düğümün bir araya gelmesiyle sıcaklık, nem, titreşim, hava kirliliği ve basınç gibi çevresel parametreleri algılayıp, bu bilgiyi tek atlamayla veya çok atlamalı bir yapıyla sink düğümüne oradan da internet aracılığıyla merkezi bir istasyona göndermek için kurulan Şekil 1’de gösterilen bir ağıdır [1].



Şekil 1. Kablosuz algılayıcı ağ yapısı [2]

Tipik bir algılayıcı düğüm; haberleşme için bir alıcı-verici, hesaplama ve kodlama için bir geliştirme kartı, çevresel parametreyi algılamak için bir algılayıcı ve tüm bu birimleri besleyecek bir pil veya süperkondansatör içerir. Bu çalışmada tasarlanan algılayıcı düğümün; kartının şematik çizimi, muhafazasının CAD çizimi ve 3B baskı son halı görselleri Şekil 2’de sunulmuştur.



Şekil 2. Algılayıcı düğüm

Bir algılayıcı düğümün haberleşme ünitesi, bilgi gönderirken veya alırken her iki durumda da enerji kaybına uğrar. Birden fazla algılayıcı düğümün eş zamanlı veri göndermesi durumunda çakışmalar olacak ve bu veriler hedef düğüm tarafından alınamayacaktır. Bu veriler tekrar gönderilmek zorunda kalacak bu da enerji israfına sebep olacaktır. Benzer şekilde, antenlerin boşta dinleme (idle listening) ve aşırı duyma (overhearing) yapması da enerji israfına neden olmaktadır. Her iki durum sonucunda da pilin daha kısa sürede tükenmesine sebep olmaktadır [3]. Algılayıcı düğümler genellikle dağlık arazi, orman, okyanus tabanı ve yanardağ ağzı gibi zor coğrafyalarda konuşlandırıldığı için düğümün pilini değiştirmek çok da pratik değildir. Düğümün enerjisi tükendiğinde o bölgeden veri toplanamayacak ve kurulan ağ ölecektir. Bu sebeple çeşitli MAC protokolleri geliştirilecek düğümün yaşam süresinin artırılması dolayısıyla ağın yaşam süresi uzatılmaktadır. Ağın ömrünü uzatmak için batarya yönetimi yapan birçok S-MAC, Wise-MAC, D-MAC, T-MAC, DS-MAC, Z-MAC, B-MAC gibi MAC protokolü geliştirilmiştir [4-11]. Her ne kadar bu protokoller geliştirilse de pil tükenecek ve düğüm

ölecek ve dolayısıyla ağ ömrü bitecektir. Ağ ömrünü uzatmak için güneş, rüzgâr, titreşim, termal, elektromanyetik gibi ortam enerjisini kullanıp kendini şarj edebilen RF-MAC, REACH-MAC, EA-MAC, ERI-MAC, OD-MAC, PP-MAC, HEHB-MAC, ED-MAC gibi protokoller de geliştirilmiştir [12-19]. Ortam enerjisini kullanıp kendini şarj etme durumu çevresel parametrelere çok bağlı olduğundan ve hasat edilen enerji verimliliği çok düşük olabileceğinden rotalama algoritmalarının geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Rotalama yapılarak her seferinde farklı düğümler kullanılarak veri iletimi yapılacağından, sürekli aynı düğümün kullanılmasının önüne geçilmiş ve dolayısıyla düğümün yaşam süresinin artırması sağlanmaktadır. Kriter olarak tüm düğümlerin enerjisinin birbirine yakın bir şekilde tükenmesi seçilmiştir. Bu çalışmada kablosuz algılayıcı ağın ömrünü maksimize eden bir matematiksel model sunulmuş ve bu model ile bulunan rotalar üzerinden pratik çalışmalar yapıldı ve geliştirilen yöntemin doğruluğu onaylandı.

Literatürdeki mevcut KAA enerji yönetimi çalışmaları incelendiğinde, yaklaşımların genellikle belirli MAC protokollerinin geliştirilmesi veya matematiksel modellerin simülasyon ortamlarında çözülmesi ile sınırlı kaldığı görülmektedir. Tablo 1'de, önerilen çalışmanın literatürdeki temel yaklaşımlar ve öne çıkan çalışmalar ile yapısal bir karşılaştırması sunulmuştur. Geleneksel çalışmalar [20, 21] rotalama problemini ağ ömrü maksimizasyonu hedefiyle başarılı bir şekilde modellemiş olsa da, elde edilen analitik sonuçların fiziksel donanım kısıtları (gerçek batarya deşarj grafikleri, sinyal kayıpları vb.) altındaki pratik geçerliliği test edilmemiştir. Bu çalışma; kesin çözüm veren bir KTDP modeli kurması, enerji yükünü düğümler arasına homojen dağıtması ve en önemlisi teorik optimizasyon sonuçlarını özel tasarlanmış fiziksel algılayıcı düğümler üzerinden pratik olarak doğrulaması yönüyle mevcut literatürden ayrılmaktadır.

Tablo 1. Önerilen modelin literatürdeki mevcut çalışmalarla karşılaştırılması

Çalışma	Çözüm Yöntemi	Temel Amaç	Yük Dengeleme	Çözüm Niteliği	Donanım Doğrulaması
MAC Protokolleri [4-11]	Kural Tabanlı / Sezgisel	Enerji Tasarrufu	Kısmi	Yaklaşık	Genellikle Simülasyon
Keskin (2017) [20]	Sütun Üretimi (Hezsezgisel)	Ağ Ömrü Maksimizasyonu	Evet	Yaklaşık	Hayır (Sadece Simülasyon)
Lee ve Moon (2014) [21]	Matematiksel Modelleme	Enerji Verimli Rotalama	Evet	Kesin	Hayır (Sadece Simülasyon)
Önerilen Çalışma	KTDP	Ağ Ömrü Maksimizasyonu	Evet	Kesin	Evet (Fiziksel Düğüm Prototipi)

Bu bağlamda, sunulan çalışmanın literatüre sağladığı temel bilimsel katkılar ve yenilik yönü şu üç başlık altında özetlenebilir:

1. KAA'lar için ağ ömrünü doğrudan maksimize eden, donanımların boşta bekleme ve yarı-çift yönlü iletişim kısıtlarını matematiksel denklemlere entegre eden gerçekçi bir KTDP modeli literatüre kazandırılmıştır.
2. Teorik optimizasyon çalışmaları sadece yazılım simülasyonlarında bırakılmamış, Arduino ve nRF modülü kullanılarak matematiksel modelin kısıtlarına tam uyumlu, düşük maliyetli fiziksel bir algılayıcı düğüm prototipi tasarlanmıştır.
3. Geliştirilen algoritmaların doğruluğu, ilk kez fiziksel düğümlerin sahada gösterdiği anlık batarya deşarj profilleri (voltaj düşüşleri) üzerinden test edilmiş ve matematiksel modelin sunduğu yük dengeleme stratejisinin pratikte de ağ ömrünü başarılı bir şekilde uzattığı kanıtlanmıştır.

II. MATEMATİKSEL MODEL FORMÜLASYONU

Literatürde, KAA ağ ömrünün rotalama ve çizelgeleme stratejileri ile maksimize edilmesi problemi, yaygın olarak tamsayı programlama (TP) veya karma tamsayı doğrusal programlama (KTDP) modelleri kullanılarak ele alınmaktadır [20, 21]. Sunulan model, KAA'nın çevresel veya fiziksel koşulları izleyen sensör düğümlerinin sınırlı enerji kaynaklarını en verimli şekilde kullanarak verinin hedef düğüme iletilmesini amaçlamaktadır. Kurulan matematiksel model, literatürdeki ağ tasarımı ve optimizasyonu problemlerine uygun olarak KTDP yapısındadır. Sunulan model, sensörlerin sınırlı batarya kapasitelerini ve iletişim mesafelerini göz önünde bulundurarak, ağın toplam ağ ömrünü maksimize etmeyi hedefler. KTDP, verilerin kaynak düğümden hedef düğüme birden fazla periyot boyunca kesintisiz ulaşmasını sağlayacak rotaları belirler.

Kümeler ve İndisler

- $i, j, k \in N$: Sensör düğümleri kümesi indeksleri ($i, j, k = 0, 1, \dots, N - 1$).
- $t \in T$: Zaman periyotları kümesi indeksi ($t = 0, 1, \dots, MaxT - 1$).
- $s \in N$: Kaynak düğüm indeksi.
- $n \in N$: Hedef düğüm indeksi.

Parametreler

- N : Ağdaki toplam düğüm sayısı.
- $MaxT$: Maksimum periyot sayısı.
- ld : Sensörlerin bağlantı kurabileceği maksimum mesafe.
- d_{ij} : i ve j düğümleri arasındaki mesafesi.
- e_0 : Sensör düğümlerinin başlangıç enerji seviyesi.
- cw : Devre aktifleşme enerji maliyeti.
- $fixedTx$: Veri paketini gönderme işlemi için harcanan sabit enerji.
- $fixedRx$: Veri paketini alma işlemi için harcanan sabit enerji.
- sbt_energy : Sensörün boşa beklediği durumlarda harcadığı enerji.

Karar Değişkenleri

- $Active_t \in \{0,1\}$: Ağın t periyodunda başarılı bir şekilde veri iletimi yaptıysa 1, aksi takdirde 0.
- $X_{ijt} \in \{0,1\}$: Eğer t periyodunda i düğümünden j düğüme bir veri akışı varsa 1, aksi takdirde 0.
- $Busy_{it} \in \{0,1\}$: i düğümünün t periyodunda herhangi bir veri aldıysa 1, aksi takdirde 0.
- $E_{it} \geq 0$: t periyodunun sonunda i düğümünün bataryasında kalan toplam enerjiyi ifade eden sürekli değişken.

Amaç Fonksiyonu

Önerilen KAA tasarımı, sistemin verimli bir şekilde çalışır durumda kaldığı toplam ağ ömrünü maksimize etmeyi sağlar:

$$\max Z = \sum_{t \in T} Active_t \quad (1)$$

Kısıtlar

Akış ve Rotalama Kısıtları

Kaynak düğümünden çıkan akış ve hedef düğüme giren akış, ilgili periyodun aktiflik durumuna eşittir. Ara düğümlere giren veri akışı, düğümünden çıkan veri akışına eşit olmak zorundadır.

$$\sum_{j \in N} X_{sjt} = Active_t \quad \forall t \in T \quad (2)$$

$$\sum_{i \in N} X_{int} = Active_t \quad \forall t \in T \quad (3)$$

$$\sum_{i \in N} X_{ikt} - \sum_{j \in N} X_{kjt} = 0 \quad \forall k \in N \setminus \{s, n\}, \forall t \in T \quad (4)$$

Fiziksel Bağlantı ve Yarı Çift Yönlü İletişim

Bağlantı kapasitesi 1 ile sınırlandırılmıştır (aynı anda karşılıklı veri iletimini engellemek için).

$$X_{ijt} + X_{jit} \leq 1 \quad \forall i, j \in N, i < j, \forall t \in T \quad (5)$$

Meşguliyet Durumu Mantığı

Bir düğüm, veri alıyor veya gönderiyorsa zorunlu olarak "meşgul" (1) kabul edilir; aksi halde "boşa" (0) durumuna geçer.

$$\sum_{j \neq i} X_{ijt} + \sum_{k \neq i} X_{kit} \leq 2 \cdot Busy_{it} \quad \forall i \in N \setminus \{s, n\}, \forall t \in T \quad (6)$$

$$Busy_{it} \leq \sum_{j \neq i} X_{ijt} + \sum_{k \neq i} X_{kit} \quad \forall i \in N \setminus \{s, n\}, \forall t \in T \quad (7)$$

Enerji Tüketimi ve Güncelleme Kısıtları

Her ara düğüm; veri iletimi, veri alımı ve boşa bekleme sürelerine göre enerji tüketir (CE_{it}). Harcanan enerji mevcut enerjiden düşülür.

$$CE_{it} = \sum_{j \neq i} (cw + fixedTx) X_{ijt} + \sum_{k \neq i} (cw + fixedRx) X_{kit} + sbt_energy \cdot (1 - Busy_{it}) \quad (8)$$

$$E_{i,0} = e_0 - CE_{i,0} \quad \forall i \in N \setminus \{s, n\} \quad (9)$$

$$E_{it} = E_{i,t-1} - CE_{it} \quad \forall i \in N \setminus \{s, n\}, \forall t \in T, t > 0 \quad (10)$$

Zaman Sürekliliği

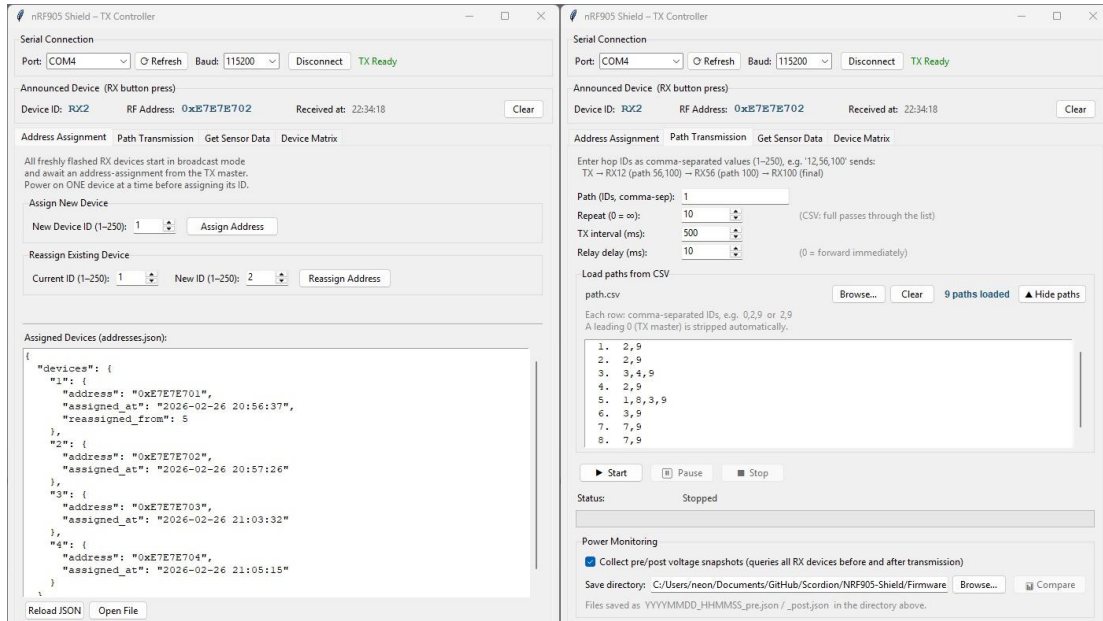
Eğer sistem t periyodunda pasif duruma düşüyse, onu takip eden periyotlarda da pasif kalmalıdır:

$$Active_t \geq Active_{t+1} \quad \forall t \in T, t < MaxT - 1 \quad (11)$$

III. DONANIM GELİŞTİRİLMESİ

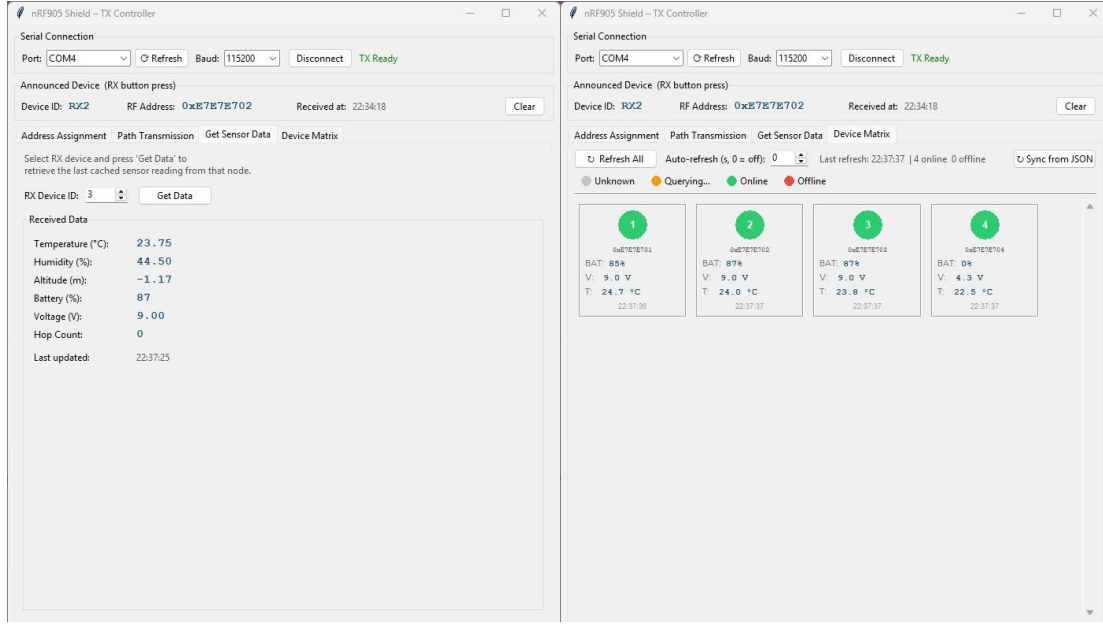
Geliştirilen modelin pratikte doğrulanması için Şekil 2’de gösterilen algılayıcı düğüm geliştirildi. Algılayıcı düğüm 9 V bir batarya, Arduino UNO geliştirme kartı, NRF905 kablosuz alıcı-verici, basınç ölçmek için BMP 180 algılayıcı, sıcaklık ve nem ölçmek için DHT11 algılayıcı kullanılmıştır. Ayrıca düğüm üzerinde veri aldığını ve gönderdiğini gösteren kırmızı ve yeşil LED bulunmaktadır. Algılayıcı düğümler genellikle erişilmesi zor alanlarda kullanıldığı için fiyatlarının az olması ve kolayca gözden çıkarılabilmesi beklenmektedir. Bu bağlamda piyasada bulunan en ucuz algılayıcı düğüm tasarımı için bu komponentler kullanılmıştır. Arduino geliştirme kartı olup sensör verilerini okumayı, haberleşme sistemini çalıştırmayı desteklemektedir. nRF905 bilgi almayı ve göndermeyi sağlayan haberleşme modülüdür. DHT11 yüksek doğrulukta 0-50 derece ve 20%-90% bağıl nem aralığında sıcaklığı ve bağıl nemi ölçebilen bir algılayıcıdır. BMP180 ise 300–1100 hPa aralığında açık hava basıncı bilgisini veren algılayıcıdır. nRF modülü açık alanda 250 m mesafe menzili olan ultra düşük güç tüketimi olan ve geniş bant aralığı desteği olan bir modüldür. Teknik detaylar ve arayüz açıklaması “Donanım Geliştirilmesi” başlığı altında paylaşılmıştır.

Sensör düğümünü, veri alış verişini rotalamayı takip etmek için Şekil 3’te gösterilen bir arayüz tasarlanmıştır. Ayrıca bu arayüz vasıtasıyla algılayıcı düğümün başlangıçtaki enerjisi, haberleşmeden sonraki enerjisi, üretilen bilgi sayısı, sink düğümü tarafından başarıyla alınan bilgi sayısı kaydedilecek ve işlem hacmi ölçülebilecektir. Şekil 3’ten de görülebileceği gibi alıcı ve verici atanma, yeni cihaz ekleme-silme ve cihazlara adres atanması işlemleri bu arayüzden yapılmaktadır (a). Üstelik bilginin hangi rotayı kullanarak sink düğümüne ulaşacağı, bilgiyi alan düğümün ne kadar bekleyeceği, simülasyonun kaç kez yapılacağı bu arayüzden girilmektedir (b). Yine aynı pencereden dosya yükleme seçeneğiyle rotalar yüklenebilmekte ve gönderim öncesi ve sonrası batarya seviyelerinin gösterilmesi işaretlenebilmekte ve simülasyon sonucunda bir pencerede gösterilmektedir (c). Bu işlem yapılırken bir gerilim bölücü devre kullanılarak pilin ilk ve simülasyon sonrası gerilimleri ölçülüp farkı alınarak deneyler sırasında ne kadar gerilim eksildiği hesaplanmaktadır. Dahası istenilen düğümün veya düğümlerin sıcaklık, nem ve basınç bilgileri gösterilebilmekte ve bir pencerede kayıt altına alınabilmektedir (c, d).



(a)

(b)



(c)

(d)

Power Comparison - 20260227_223521

Pre-snapshot vs Post-snapshot | Timestamp: 20260227_223521

Device	Pre V	Post V	ΔV	Pre %	Post %	$\Delta \%$	Temp °C	Hum %	Alt m
RX1	9.0 V	9.0 V	+0.0 V	87%	86%	-1%	24.5	45.1	-0.1
RX2	9.1 V	9.0 V	-0.1 V	89%	88%	-1%	23.6	45.1	-0.5
RX3	9.1 V	9.0 V	-0.1 V	88%	88%	+0%	23.5	44.7	-0.5
RX4	4.3 V	4.3 V	+0.0 V	0%	0%	+0%	22.3	45.0	-0.8

Export CSV... Close

(e)

Şekil 3. Geliştirilen arayüzden görseller

IV. PRATİK UYGULAMA

A. Matematiksel Model Örneği

Literatürde MAC protokolü geliştirilmesinde genellikle çakışma, gizli terminal ve açık terminal gibi problemleri gözlemlenmek ve tek ve çok atlamalı gönderimleri desteklediği ve simülasyon ve matematiksel analiz kolaylığı için genellikle 6 düğümlü senaryolar geliştirilmektedir. Düğüm sayısının daha da artması bunların gözlemlenmesini zorlaştırmaktadır. Mevcut çalışmada veri üretimi tek bir düğümden yapılarak başlatılmakta ve veriler tek bir sink düğümünde toplanmakta ve çok fazla karışıklık gözükmediğinden düğüm sayısı biraz artırılarak 10 düğüm seçilmiştir. Bu bölümde, Tablo 2’de verilen $N = 10$ düğümlü bir KAA yapısında, $MaxT = 50$ periyotluk bir planlama ufku göz önüne alınarak elde edilen optimizasyon sonuçları değerlendirilmiştir. Modelin temel amacı, düğümlerin batarya ($e_0 = 100$ birim) ve mesafe ($ld = 20.0$ birim) kısıtlarını gözeterek kesintisiz veri iletiminin sağlandığı toplam ağ ömrünü maksimize etmektir.

Tablo 2. 10 düğümlü KAA mesafe matrisi

Düğüm	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	16	11	17	21	22	14	19	25	30
1	16	0	27	8	13	18	20	29	10	24
2	11	27	0	28	21	15	23	12	26	18
3	17	8	28	0	9	24	11	31	14	20
4	21	13	21	9	0	19	25	16	22	15
5	22	18	15	24	19	0	17	21	13	28
6	14	20	23	11	25	17	0	26	15	19
7	19	29	12	31	16	21	26	0	23	11
8	25	10	26	14	22	13	15	23	0	17
9	30	24	18	20	15	28	19	11	17	0

Uygulamada, ortaya konulan matematiksel model GUROBI 13.0 optimizasyon çözücüsü kullanılarak Intel Core i7 işlemcili ve 16 GB RAM kapasiteli bir bilgisayarda çözülmüştür. Çözücü tarafından elde edilen maksimum ağ ömrü tam olarak 10 periyot olarak sonuç vermiştir. Önerilen modelin işlem süresi ve hesaplama karmaşıklığı değerlendirildiğinde; KAA rotalama problemleri doğası gereği NP-Zor sınıfında yer almasına rağmen, kurulan KTDP modelinin 10 düğümlü ve 50 periyotluk karar uzayında oldukça verimli çalıştığı görülmüştür. Çözücü, ilgili problem boyutu için optimal çözüme (optimizasyon boşluğu “gap %0” olacak şekilde) 1 saniyenin altında bir işlem süresinde (CPU time) ulaşmıştır. Model, 10 periyotluk ağ ömrünü elde etmek için yük dengeleme stratejisini saniyelerden çok daha kısa bir sürede üreterek pratik donanım uygulamaları için gerekli algoritmik hızı sağladığını başarılı bir biçimde kanıtlamıştır. Elde edilen rotalama stratejileri Tablo 3’de sunulmuştur.

Tablo 3. 10 düğümlü KAA problemine dair optimum çözüm rotaları.

Periyot	Veri Akış Rotası
Periyot 1	0→2→9
Periyot 2	0→2→9
Periyot 3	0→1→8→9
Periyot 4	0→7→9
Periyot 5	0→3→9
Periyot 6	0→3→9
Periyot 7	0→7→9
Periyot 8	0→6→9
Periyot 9	0→1→4→9
Periyot 10	0→6→9

Elde edilen stratejiler incelendiğinde, doğrudan iletim ve çok sekmeli iletişim yaklaşımlarının öne çıktığı görülmektedir.

- **Doğrudan İletim Rotaları:** Düğüm 2, 3, 6 ve 7’nin Hedef düğüme (Düğüm 9) olan mesafeleri 20 birimin altındadır. Bu nedenle sırasıyla Periyot 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8 ve 10’da kaynak ile hedef arasında yalnızca tek bir ara düğüm kullanılmıştır (örn. [0] → [6] → [9]).
- **Çok Sekmeli İletişim Stratejisi:** Düğüm 1, kaynağa bağlı olmasına rağmen Hedef düğüme olan mesafesi (24 birim) iletişim sınırını aşmaktadır. Model, Düğüm 1’i denklem dışında bırakmak yerine, onu kullandığı Periyot 3 ve 9’da ağı uzatarak Düğüm 8 ve Düğüm 4’ü sürece dâhil etmiştir ([0] → [1] → [8] → [9] ve [0] → [1] → [4] → [9]).

Onuncu periyodun sonunda düğümlerin kalan batarya durumları Tablo 4’te özetlenmiştir. Tablo incelendiğinde, ağ üzerindeki yükün homojen bir biçimde dağıtılmaya çalışıldığı ve düğümlerin kapasitelerinin optimum şekilde kullanıldığı görülmektedir.

Tablo 4. 10. Periyot Sonunda Düzgümlerin Enerji Tüketim Profilleri

Kategori	Düzgümler	Kalan Enerji / e_0
1. Kademe	1, 2, 3, 6, 7	44.00 / 100
2. Kademe	4, 8	69.50 / 100
Atıl Düzgümler	5	95.00 / 100

Sunulan veriler ışığında önerilen MILP modeli ağ ömrünü maksimize etme, düğümler üzerindeki enerji tüketimini dengeli dağıtma ve çoklu rota alternatiflerini fiziksel kısıtları da göz önünde bulundurarak ağ ömrünü optimize etmiştir.

B. Donanım ile Doğrulama

Önceki kısımda ağ ömrünü maksimize etmek için elde edilen rota bilgisi kullanılarak algılayıcı düğümler üzerinden (10 tane) testler gerçekleştirilmiştir. 0 numaralı düğüm bilgiyi üreten, 9 numaralı düğüm ise en son tüm bilgilerin toplandığı alıcı sink düğümüdür. Üretilen bilginin sink düğümüne ulaştırılması için geliştirdiğimiz matematiksel modelden elde edilen 10 rota kullanılmıştır. Bu rotalar üzerinden gönderim 500 kez tekrarlandığında, düğümlerin kalan enerjileri Tablo 5'te sunulduğu gibi elde edilmiştir.

Tablo 5. 10. Gönderim sonrası düğümlerin mevcut enerjileri

Cihaz	Önceki Gerilim	Sonraki Gerilim	Gerilim Farkı	Sıcaklık	Nem
RX1	8.5 V	8.2 V	-0.3 V	28,4	25,3
RX2	8.6 V	8.2 V	-0.4 V	27,9	25,5
RX3	8.5 V	8.2 V	-0.3 V	28,2	25,6
RX4	8.5 V	8.2 V	-0.3 V	27,2	25,8
RX6	8.7 V	8.3 V	-0.4 V	27,8	26,9
RX7	8.7 V	8.3 V	-0.4 V	28,5	26,4
RX8	8.6 V	8.2 V	-0.4 V	28	25,6
RX9	8.6 V	8.2 V	-0.4 V	28,5	25,9

Simülasyon sonucunda 5 numaralı düğüm atıl düğüm olarak belirlenmiştir. Tablo 5'te bu düğüm kullanılmadığı için yer almamıştır. 500 tekrardan sonra algılayıcı düğümlerin enerjileri benzer şekilde (0.3-0.4 V) azalmıştır. Rx9 alıcısı sink düğümü olduğundan dolayı tüm bilgiler ona ulaştırılmaktadır. Bu sebepler 500 tekrar sonrasında enerjisi en çok azalan (0.4 V) düğümlerden biri olmuştur. Geliştirilen modelin sunduğu rotalarda Rx7 en çok kullanılan düğüm olduğundan dolayı, enerjisi de en çok azalan (0.4 V) düğümlerden birisi olmuştur. Geliştirilen optimizasyon modeli sonucunda elde edilen rota çizelgesi kullanıldığı için düğümlerin enerjisinin birbirine yakın bir şekilde azalması sağlanmış ve bazı düğümlerin pilinin erken tükenmesine engel olunarak ağın ömrü maksimize edilmiştir.

V. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Kablosuz Algılayıcı Ağların en kritik problemi olan enerji kısıtına karşı, optimizasyon teorisi ile donanım pratiğini birleştiren yenilikçi bir metodoloji sunulmuştur. Literatürdeki mevcut çalışmalar genellikle matematiksel modellerin simülasyonlarıyla veya kural tabanlı MAC protokolleriyle sınırlı kalırken, bu çalışmanın en büyük bilimsel katkısı, geliştirilen deterministik Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama modelinin fiziksel donanım üzerinde gerçek zamanlı testlerle doğrulanmasıdır.

Kurulan matematiksel model, yalnızca rotalama mesafelerini değil, fiziksel düğümlerin boştaki bekleme, veri alma ve veri gönderme durumlarındaki gerçek enerji tüketim karakteristiklerini ve yarı-çift yönlü iletişim kısıtlarını da içerecek şekilde kurgulanmıştır. Modelin sunduğu optimal rotalar, Arduino UNO ve nRF905 tabanlı olarak özel tasarlanan algılayıcı düğümlere yüklenmiş ve 500 periyotluk kesintisiz iletişim döngüsü boyunca test edilmiştir. Pratik uygulama sonuçları, matematiksel modelin öngördüğü yük dengeleme stratejisinin, fiziksel düğümlerin gerçek batarya deşarj (voltaj düşüşü) grafikleriyle tam bir uyum içinde çalıştığını kanıtlamıştır. Sonuç olarak, önerilen bu bütünsel yaklaşımın, KAA tasarımlarında ağ ömrünü maksimize etmek için hem teorik olarak kesin hem de pratik sahada uygulanabilir, donanımla uyumlu güvenilir bir çözüm olduğu onaylanmıştır. Gelecek çalışmalarımızda, bilgiyi üreten düğüm sayısı ve senaryoda kullanılan algılayıcı düğüm sayısı artırılacak ve bu durum için matematiksel model geliştirilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Akyildiz I.F, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, Cayirci E. (2002). Wireless sensor networks: a survey, *Computer Networks*, (38), 393–422.
- [2] Liang, W., Huang, Y., Jianbo, X., & Xie, S. (2017). A distributed data secure transmission scheme in wireless sensor network. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 13(4), 1550147717705552.
- [3] Kumar, S. and Chauhan, S. A survey on scheduling algorithms for wireless sensor networks, *International Journal of Computer Applications*, 20 (5), 7–13.
- [4] Ye, W., Heidemann, J., and Estrin, D. (2004). Medium Access Control with Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks, *IEEE/ACM Trans. Net.*, 12(3), 493-506.
- [5] Enz, CC. (2004). WiseNET: An Ultralow-Power Wireless Sensor Network Solution, *IEEE Comp.*, 37(8).
- [6] Lu, G., Krishnamachari, B., Raghavendra, C.S. (2004). An Adaptive Energy-Efficient and Low-Latency MAC for Data Gathering in Wireless Sensor Networks, *Proc. 18th Int'l. Parallel and Distrib. Processing Symp.*, 224.
- [7] Dam, T.V., Langendoen, K. (2003). An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks, *1st ACM Conf. Embedded Networked Sensor Sys.*
- [8] Lin, P., Qiao, C., Wang, X. (2004). Medium Access Control with a Dynamic Duty Cycle for Sensor Networks, *IEEE WCNC*, 3, 1534-1539.
- [9] Rhee, I., Warrier, A., Aia, M., Min, J. (2005). Z-MAC: a hybrid MAC for wireless sensor networks. *3rd international conference on Embedded networked sensor systems*, 90–101.
- [10] Polastre, J., Hill, J., Culler, D. (2004). Versatile low power media access for wireless sensor networks, *Proc. 2nd ACM Int. Conf. Embedded Netw. Sensor Syst.*, 95-107.
- [11] Liu, B., Yan, Z., Chen, C.W. (2011). CA-MAC: A Hybrid context-aware MAC protocol for wireless body area networks, *2011 IEEE 13th International Conference on e-Health Networking, Applications and Services*, 213-216.
- [12] Naderi, M.Y., Nintanavongsa, P., Chowdhury, K.R. (2014). RF-MAC: A medium access control protocol for rechargeable sensor networks powered by wireless energy harvesting, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 13 (7), 3926 – 3937.
- [13] Kim, T., Park, J., Kim, J., Noh, J., Cho, S. (2017). REACH: An efficient MAC protocol for RF energy harvesting in wireless sensor network, *Wireless Communications and Mobile Computing*, 1–8.
- [14] Kim, J., Lee, J.V. (2011). Energy adaptive MAC protocol for wireless sensor networks with RF energy transfer, *IEEE Third International Conference on Ubiquitous and Future Networks*, 89-94.
- [15] Nguyen, K., Nguyen, V.H., Le, D.D., Ji, Y., Duong, D.A., Yamada, S. (2014). ERI-MAC: A receiver-initiated MAC protocol for energy harvesting wireless sensor networks, *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 1-8.
- [16] Fafoutis, X., & Dragoni, N. (2011). ODMAC: An on-demand MAC protocol for energy harvesting-wireless sensor networks. In *Proceedings of the 8th ACM Symposium on Performance evaluation of wireless ad hoc, sensor, and ubiquitous networks*, pp. 49-56.
- [17] Fujii, C., Seah, W.K.G. (2011). Multi-tier Probabilistic Polling in Wireless Sensor Networks Powered by Energy Harvesting, *IEEE Int. Conf. Intell. Sensors, Sensor Netw. Inf. Process.*, 383–388.
- [18] Ibarra, E., Antonopoulos, A., Kartsakli, E., and Verikoukis, C. (2015). HEH-BMAC: hybrid polling MAC protocol for WBANs operated by human energy harvesting, *Telecommunication Systems*, 58(2):111-124.
- [19] Varghese, J., and Rao, S. V. (2014). Energy-efficient exponential decision MAC for energy harvesting wireless sensor networks, *International Conference on Advances in Green Energy Computer Communication*, 239-244.
- [20] Keskin, M.E., (2017). A column generation heuristic for optimal wireless sensor network design with mobile sinks, *European Journal of Operational Research*, (260), 291–304.
- [21] Lee, J.H., Moon. I., (2014). Modeling and optimization of energy efficient routing in wireless sensor networks, *Applied Mathematical Modelling*, (38), 2280–2289.