

Bir telsiz duyurga ağı sına ma ortamının MSP430G2553 ve nRF24L01+ tabanlı duyurgalar ile geliştirilmesi

Developing a wireless sensor network testbed using MSP430G2553 and nRF24L01+ based sensors

Engin MAŞAZADE^{1*}, Volkan Talha DOĞUKAN², Veysel Yaman AKGÜN³

^{1,2,3}Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Yeditepe Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
engin.masazade@yeditepe.edu.tr, volkan.talha.dogukan@hotmail.com, veysel.akgun@yeditepe.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 29.03.2016, Kabul Tarihi/Accepted: 07.06.2016

* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2016.67790

Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bir telsiz duyurga ağı (TDA) hedeflenen uygulamanın başarı ile gerçekleştirilmesinin yanı sıra, duyurga başına harcanan toplam enerji gibi sistem kaynaklarının etkili kullanılması gerekmektedir. İncelenen sahada farklı uygulamalar için çok sayıda duyurgaya ihtiyaç duyulabileceğinden, tüm sistemin maliyet etkin olabilmesi için her bir duyurganın da düşük masrafla üretilmesi de önemlidir. Bu makalede, öncelikle özel yapılmış, az enerji tüketen ve maliyeti düşük olan, MSP430G2553 mikro işlemcisi ve nRF24L01+ haberleşme ünitesi tabanlı bir duyurganın geliştirilmesi amaçlanmıştır. Sonrasında geliştirilen bu duyurgalar kullanılarak sade bir TDA sına ma ortamı oluşturulmuş ve ışık kaynağının konum tespiti çalışması yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: Telsiz duyurga ağı, Duyurga tasarımı, Mikro işlemci, Konumlandırma

Abstract

In a Wireless Sensor Network (WSN), system resources, such as the total node energy, need to be utilized effectively while executing the task of interest. Since a number of sensor nodes may be needed in various type of applications, it is also important to develop each sensor node in a cost effective manner. The purpose of this paper is to develop a custom made, low power, cost-effective wireless sensor node based on a MSP430G2553 microprocessor and nRF24L01+ wireless transceiver module. Then, using these nodes, we form a simple WSN testbed, and locate the position of a light emitting source.

Keywords: Wireless sensor network, Sensor design, Microprocessor, Localization

1 Giriş

Duyurganın birbirleri ile telsiz kanallar üzerinden haberleştirilmesi sonucu oluşturulan, telsiz duyurga ağları (TDA), olanak verdiği olay sezimi ve kestirimi [1],[2], nesne takibi [3], çevre gözleme [4] gibi uygulamalar sayesinde hem akademi de hem de ve sanayide ilgi çekmektedir [5]. TDA'yı oluşturan telsiz duyurgalar ufak ve pil beslemeli cihazlar olduğundan, bir TDA'nın sürdürülebilmesine olanak veren duyurga enerjisi gibi özkaynaklarının idareli kullanımı TDA ömrünün uzun olması için son derece önemlidir. Örnek olarak, TDA'lar ile hedef konumlandırma işlemi yapıldığında ağdaki tüm duyurgalardan ölçüm toplamak yerine, sadece bilgi değeri yüksek duyurgaların ölçümlerini toplamak, ağı toplam enerji harcamasından önemli tasarruf sağlamaktadır [6].

TDA'yı oluşturan duyurgaların kısıtlı enerjisini verimli ve etkin kullanmasının yansırsa, her bir duyurganın az maliyetle üretilmesi ağı maliyet etkinliği açısından son derece önemlidir [5],[7]-[10]. TelosB ve MicaZ gibi duyurga birimleri ile çeşitli TDA uygulamaları yapılabilmektedir [11],[12]. Fakat maliyet bakımından bu hazır duyurgalar kısıtlı bütçeli çalışmalar için bir dezavantaj oluşturabilir. Örnek olarak TelosB CM5000 modülünün fiyatı 90€ civarındadır [13]. Bir duyurga birimi başlıca mikro işlemci, haberleşme ünitesi ve ortamdan veri alan algılayıcı ünitesinden (sıcaklık, basınç, ışık, v.b.)'den oluşmaktadır. Mikro işlemci ve haberleşme ünitesinin dikkatli seçimiyle, bir duyurga hem son derece enerji verimli hem de düşük maliyetli oluşturulabilir.

Bir duyurganın mikro işlemcisi için Texas Instruments (TI) MSP430 ailesi enerji verimliliği açısından tercih edilen bir

üründür [10],[14],[15]. Örnek olarak TelosB modülü mikro işlemci olarak MSP430 serisini kullanmaktadır [13]. Literatürde, MSP430 mikro işlemci ailesi temelli özel yapılmış duyurgalar ve bu duyurgalar ile oluşturulan ağlar ile farklı uygulamalar gerçekleştirilmiştir [7],[8],[14],[16].

[7]'de elektrokardiyografi algılayıcısı kullanan bir duyurga ünitesi, MSP430F1612 işlemcisi ve nRF24L01 haberleşme ünitesi ile birlikte az maliyet ve az güç tüketimi dikkate alınarak tasarlanmıştır. Bu çalışmada iki farklı duyurga ölçümlerini bir merkeze gönderirler ve bu merkezden ölçümler, bir internet sayfasına aktarılır. [8]'de MSP430F1611 mikro işlemcisine yine haberleşme ünitesi nRF24L01 eklenerek ultrasonik algılayıcı ile birlikte az maliyetli ve az güç tüketen bir duyurganın oluşturulması amaçlanmıştır. [14]'te ise aynı mikro işlemci ile telsiz alıcı/verici, üç farklı algılayıcı (Basınç, Ultrasonik, GPS (Global Positioning System)) ve güneş pili kullanılarak bir duyurga oluşturulmuş ve duyurganın enerji depolaması için yapılan çalışmanın yanı sıra GPS ve ultrasonik algılayıcı ölçümlerine yer verilmiştir. [16]'da seralarda kullanılmak üzere MSP430F149 işlemcisi ve nRF24L01 haberleşme ünitesi, ısı algılayıcısı ve güneş pili kullanılarak bir duyurga oluşturulmuş; analiz ve test için alıcı ve verici birimler ile karşılıklı haberleşme yapılmıştır.

TDA çalışmalarında yaygın olarak TI MSP430 ailesinden MSP430F serisinin kullanılmasına rağmen [7]-[10],[14],[16],[17] MSP430G serisi de (MSP430G2553) görece düşük fiyatı ile birlikte bu çalışma için yeterli düzeyde hafıza ve işlemci hızına sahiptir. Tablo 1'de MSP430 ailesinde yer alan bazı mikro işlemcilerin teknik özellikleri ile fiyatları karşılaştırılmıştır.

Tablo 1: MSP430 ailesinin teknik özellikleri [15].

MSP430	F149	F148	F1611	FE4272	F1612	F2013	G2553
Freq. (MHz)	8	8	8	8	8	16	16
Flash(KB)	60	48	48	32	55	2	16
SRAM(Kb)	2	2	10	1	5	0.125	0.5
GPIO	48	48	48	14	48	10	24
ADC	8ch	8ch	8ch	2ch	8ch	4ch	8ch
Aktif(Active) Güç (Power)(uA/MHz)	280	280	330	400	330	220	330
Bekleme(Standby) Güç (Power)(LPM3uA)	1.6	1.6	1.1	1.6	1.1	0.5	0.7
Fiyat(\$)	10.99	10.92	19.62	5.51	20.35	2.75	2.80

MSP430F148 [10], MSP430F149 [16],[17], MSP430F1611 [8],[14], MSP430F1612 [7] mikroişlemcileri hafıza ve GPIO (General Purpose Input/Output) bakımından daha üst düzey olmalarına rağmen birim fiyatları 10 \$'ın üzerindedir. MSP430FE4272 [17] ise daha az GPIO'a sahip olması ve ADC (Analog to Digital Converter, Analog Sayısal Çevirici) sayısının az olması yanında fiyat bakımından 5\$ civarındadır. MSP430F2013 [9] ise MSP430G2553'ten 0.05\$ daha ucuz olmasına rağmen sadece 2KB'lık hafızaya ve az sayıda GPIO'a sahiptir. Sayılan bu mikroişlemcilerden MSP430F2013 ile [9]'da uyarlamalı çıkış gücü kontrolü çalışması yapılmış ancak mikroişlemciye algılayıcı bağlanmamıştır. Algılayıcı ile yapılan uygulamalarda daha yüksek hafızaya sahip MSP430F1612 [7], MSP430F149 [16],[18] gibi mikro işlemciler tercih edilmektedir. MSP430G2553 ise algılayıcılardan elde edilen verilerin işlenmesi ve/veya depolanması açısından yeterli hafızaya sahip (16KB) ve işlemciye bağlanılacak olan algılayıcı ve haberleşme ünitesi gibi devre cihazları açısından yeterli GPIO (24) sayısına sahiptir. Uyku durumunda daha az akım çekmesi (0.7uA) ve fiyatının da 2.8 \$ civarı olması nedeniyle bu çalışmada MSP430G2553 tercih edilmiştir.

İkincil olarak, bir duyarga biriminde düşük enerjili bir telsiz haberleşme ünitesi kullanılması TDA sisteminin enerji verimliliği açısından gerçekleştirilebilir olması için son derecede önemlidir. Sıklıkla kullanılan Xbee [17],[19] ve CC2420 [18],[20] gibi haberleşme ünitelerinin yerine nRF24L01+ [7]-[9],[16],[21] hem enerji verimliliği bakımından ve hem de fiyatının yaklaşık 1\$ olması nedeniyle maliyet açısından oldukça avantaj sağlar. Bu çalışmada da haberleşme ünitesi olarak nRF24L01+ az maliyetli olması ve az güç tüketmesi nedeniyle seçilmiştir. Son olarak tasarlanan duyargalara algılayıcı olarak LDR eklenmiştir ve duyargaya şarj edilebilir pil (2xAA) eklenerek her bir duyarganın kendi başına çalışmasına olanak sağlanmıştır.

Bu doğrultuda, bu makaledeki katkılarımız şu şekilde sıralanabilir.

- Piyasadaki hazır duyargalar ile uygulama geliştirmek yerine hem enerji verimli ve hem de düşük maliyetli bir duyarga tasarımı sunulmaktadır. Bu çalışmadaki tek bir duyarga birimi başlıca MSP430G2553 mikroişlemcisi, nRF24L01+ telsiz haberleşme ünitesi ve ışık algılayıcı birim (Light Dependent Resistor, LDR) ile oluşturulmaktadır. Duyarga, LDR vasıtasıyla ortamdaki ışık şiddetini ölçmekte ve ölçümünü tümleştirme merkezi olarak adlandırılan bir merkeze göndermektedir,

- Tasarlanan duyargalar ile bir TDA sına ortamı oluşturulmuştur. Duyargalar ölçümlerini merkezi düğüm olan tümleştirme merkezine (TM'ye) tanımlanan bir rastgele ortam erişim protokolüne göre iletmektedirler. Bu rastgele erişim protokolüne göre duyarga ölçümü TM'ye başarı ile iletilirse, duyargaya TM tarafından bir alındı bilgisi iletilmektedir. Alındı bilgisi gelmezse duyarga ölçümünü tekrar göndermektedir. Duyargadan TM'ye, TM'den duyargalara iletimi sağlayan farklı paket yapıları tanımlanmıştır,
- Duyarga ölçümünü belirli bir eşik değerinin üzerindeyse TM'ye göndermektedir. Bu sayede sahadaki tüm duyargalardan ölçüm almak yerine sadece ilgilenilen olaya yakın olan duyargalardan ölçüm alınmaktadır. Farklı eşik seviyelerinde TM'ye ölçüm gönderen duyarga sayısı ve buna bağlı olarak konum kestirimindeki toplam karesel hata (TKH) ile duyargalardan TM'ye olan tekrar iletim sayısı incelenmiştir.

Bu makalenin devamı şu şekilde düzenlenmektedir. Bölüm 2, bir duyarga biriminin tasarımını, Bölüm 3, haberleşme protokolünü anlatmaktadır. Test sonuçları, duyargaların maliyet ve güç tüketimi hesapları Bölüm 4'te gösterilmektedir. Bölüm 5 ise varğı ve gelecek çalışmalara ayrılmıştır.

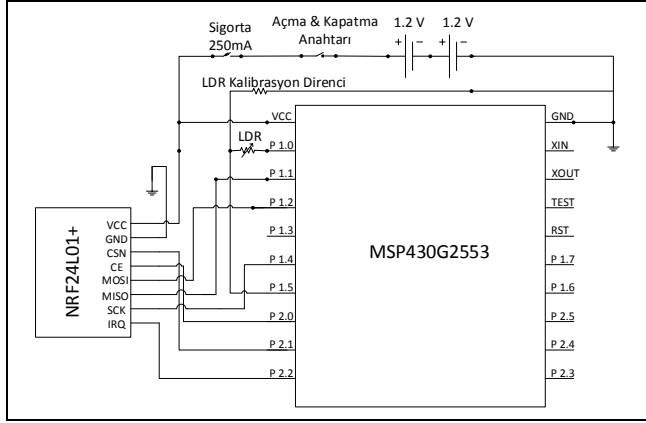
2 Duyarga tasarımı

Bu çalışmada yer alan her bir duyarga birimi MSP430G2553 mikroişlemcisi, nRF24L01+ haberleşme ünitesi, algılayıcı (LDR) ve tüm sistemi besleyen 2 adet şarj edilebilir AA kalem pilden oluşmaktadır.

Şekil 1, bir duyarganın bağlantı şemasını göstermektedir. Mikroşlemci olarak kullanılan MSP430G2553 ile birlikte haberleşme ünitesi nRF24L01+ pil ile beslenmiştir fakat veri iletimi olmadığı zamanlarda mikroşlemci üzerinden haberleşme ünitesi uyku moduna çekilerek enerji tasarrufu sağlanmıştır. Işık algılayıcısı olarak kullanılan LDR ise mikroşlemci üzerinden beslenmektedir ve bu sayede ölçüm yapılmadığı zamanlarda LDR kapatılarak yine enerji tasarrufu sağlanmaktadır.

MSP430G2553 mikroşlemcisi 1.8V ile 3.6V arasında çalışmaktadır ve 16 MHz'e kadar çalışma frekansına sahiptir. Bu çalışma için mikroşlemci frekansı 1MHz olarak ayarlanmıştır. Kendi içinde diğer aygıtlarla bağlantı kurabilmesi için seri haberleşme birimi bulunmaktadır. Bu birim, bir adet UART, iki adet SPI ve bir adet I2C haberleşme protokollerini de içermektedir. Mikroşlemci, 8 kanallı 10 bitlik

ADC birimine sahiptir. Ayrıca 8 adet karşılaştırıcısı ve iki adet 16 bitlik zamanlayıcı mevcuttur. Ek olarak mikroişlemcinin harcayacağı enerjiyi en aza indirmek için dört adet düşük güç modları (Low Power Modes, LPM) bulunmaktadır. Mikroişlemci düşük enerji tüketimi modunda iken, 1.5 us içerisinde uyanabilmektedir [22],[23].



Şekil 1: Bir duyurga biriminin bağlantı şeması.

Mikroişlemci içerisinde 10 bitlik hassasiyete sahip ADC birimi bulunmaktadır. Böylelikle, LDR'dan ölçülen ışık şiddetinin değeri en az 0 ile en çok 1023 arasında okunmaktadır. Duyarganın algılayıcı elemanı olarak bir adet LDR ve bir adet kalibrasyon direnci bulunmaktadır. Duyurga biriminin LDR'leri, az, orta ve parlak ışık altında birbirlerine yakın değerler verecek şekilde direnç değerleri seçilerek kalibrasyon yapılmıştır.

Haberleşme birimi nRF24L01+, MSP430G2553 mikroişlemcisi ile Seri Çevresel Arayüz (Serial Peripheral Interface, SPI) üzerinden haberleşir. nRF24L01+ birimi, mikroişlemcisinden gönderilen ölçümü TM'nin nRF24L01+ birimlerine iletir. Haberleşme ünitesinin (nRF24L01+) taşıyıcı frekansı 2.4 GHz olarak kullanılmaktadır ve bu makalede veri iletim hızı (data rate) 1Mbps olarak seçilmiştir. GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying) modülasyonu kullanan nRF24L01+ da ayrıca çıkış gücü olarak 0dBm seçilmiştir.

Son olarak 2 adet şarj edilebilir 2500 mAh AA kalem pilinin birbirine seri olarak bağlanması sonucu nominal 2.4Volt'luk bir voltaj bir duyurga birimini beslemek için uygundur.

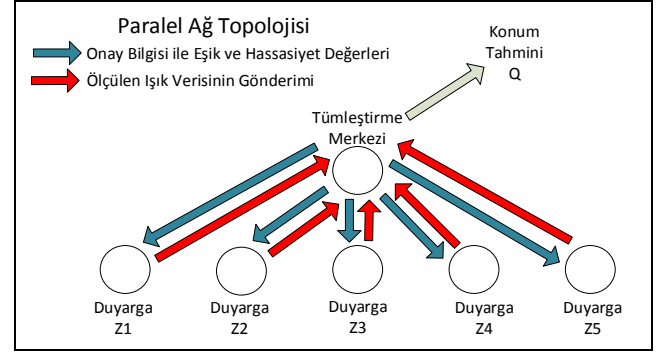
Duyurga biriminde enerji harcamasını azaltmak için sadece ölçüm alınacağı zaman algılayıcılar (LDR) beslenir. Diğer taraftan haberleşme üniteleri ise sadece veri transfer işlemini gerçekleştirecekleri zaman çalıştırılırlar.

3 Haberleşme protokolü

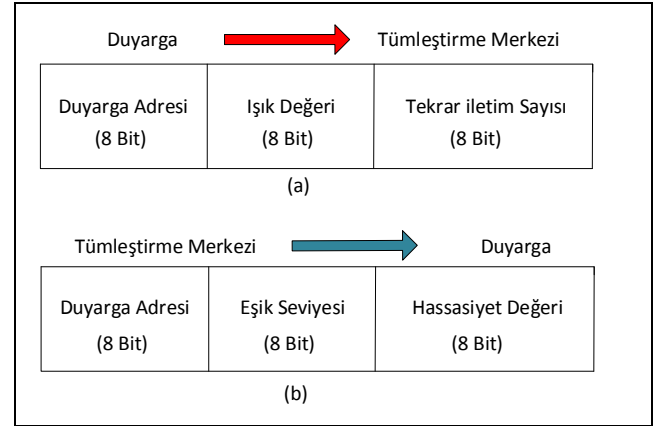
Duyargalar ölçümlerini Şekil 2'de gösterildiği gibi doğrudan TM'ye göndermektedirler. Bu çalışmada bir duyarganın ölçüm değeri belli bir eşik seviyesinin üstünde ise TM'ye gönderilmektedir. Test sonuçlarında da göstereğimiz gibi tasarlanan duyurga biriminde en çok akım haberleşme ünitesi nRF24L01+ tarafından çekilmektedir. Duyarganın ölçüm değeri belli bir eşik değerinin altındaysa nRF24L01+ haberleşme ünitesi duyarganın mikroişlemcisi tarafından uyutularak enerji tasarrufu amaçlanmıştır.

Duyargaların ve TM'nin birbirlerine gönderdikleri paketlerin yapısı Şekil 3'te gösterilmiştir. Duyargalar kendi adres bilgisini, ışık şiddeti ölçüm değerini ve tekrar iletim sayısını Şekil 3(a)'da verilen paket halinde TM'ye gönderirler. TM ise

ölçümünü başarı ile aldığı duyargaya Şekil 3(b)'de gösterilen paketi yollar. Bu paket içinde ilgilendiği duyarganın adres bilgisi ve bu duyarganın ölçümünü karşılaştırması için gereken eşik seviyesi ve hassasiyet değerleri taşınmaktadır. TM'den, alındı bilgisi yanısıra eşik seviyesi ve hassasiyet değerleri duyargalara gönderilerek eğer istenirse bu değerlerin güncellenmesi bu protokolde sağlanmıştır. Böylece TM duyurga seçimi yaparak yalnızca ışığın var olduğu bölge civarındaki duyargaların ölçüm göndermesini sağlar.



Şekil 2: Ağ Topolojisi.

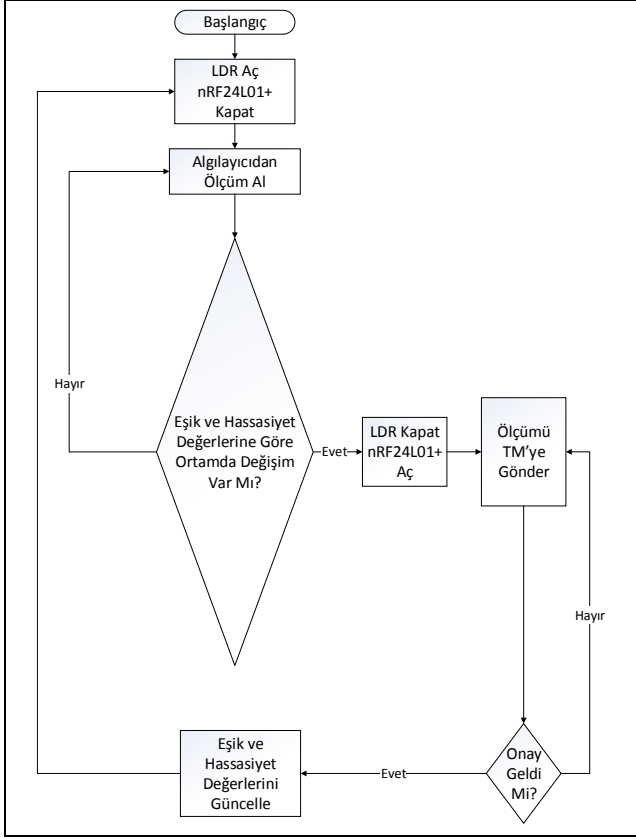


Şekil 3: Paket Yapısı. (a): Duyargadan TM'ye gönderilen paket yapısı, (b): TM'den duyargalara gönderilen paket yapısı.

Şekil 4'te tek bir duyurga biriminin çalışma akış çizelgesine yer verilmiştir. Sahada bulunan her bir duyurga birimine kurulumdan önce sabit eşik seviyesi ve hassasiyet değerleri atanmıştır. Eşik seviyesi, ölçülmüş olan ışık şiddeti değerinin hangi değeri geçmesi durumunda ölçümün TM'ye gönderilmesi gerektiğini gösterir. Hassasiyet değeri ise TM'ye bildirilen son ölçüm değeri referans alınarak ortamdaki ışık seviyesinin kayda değer değişip değişmediğini bildirir. Eğer ölçüm eşik değerini geçmişse, bir sonraki ölçüm değeri, (son ölçüm+hassasiyet seviyesi) ve (son ölçüm-hassasiyet seviyesi) arasındaysa ortamdaki ışık şiddetinin aynı kaldığı kabul edilir ve TM'ye tekrar ölçüm gönderilmez. Bu aralık dışındaki ölçümler TM'ye iletilir.

Bir duyurga biriminin okumuş olduğu ışık şiddeti değeri, belirlenmiş olan eşik seviyesi ve hassasiyet değeri sınırlarının dışındaysa ışık kaynağının konumunda bir değişiklik olduğunu fark ederek haberleşme birimini (nRF24L01+) açar ve ölçüm değerini TM'ye gönderir. Gönderim sürecinde LDR'dan yeni ölçüm alınmaz, algılayıcı birim (LDR) bu sırada kapalıdır. Son ölçüm değeri hafızada tutulur. Duyurga ölçümünü gönderdikten sonra 0.04sn bekler. Bu sırada TM'den onay gelmezse ölçümünü tekrar gönderir. TM'den alındı mesajı

geldiğinde ise tekrardan algılayıcısını (LDR) açarak ölçüm almayı sürdürür ve haberleşme birimlerini (nRF24L01+) kapatırlar. Bu sırada duyarga LDR'ından ölçüm alıp TM tarafından son gönderilen eşik ve hassasiyet değerlerine göre ortamı takip eder.



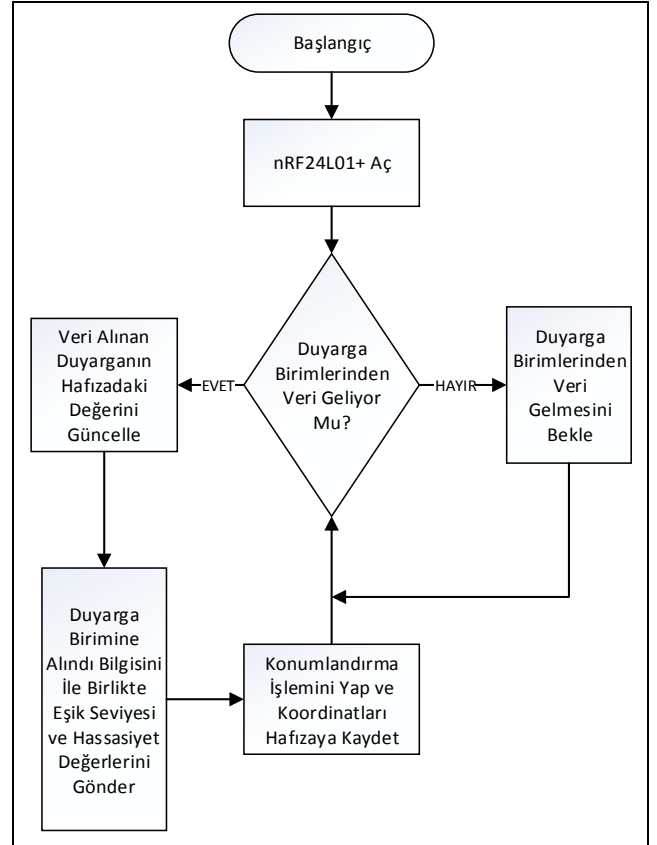
Şekil 4: Bir duyarga biriminin çalışma akış çizelgesi.

Şekil 5'te TM'nin çalışma akış çizelgesine yer almaktadır. MSP430G2553 ve nRF24L01+ içeren TM bilgisayara bağlı olduğundan enerji sıkıntısı yoktur ve haberleşme birimini (nRF24L01+) sürekli açık tutarak ortamı dinler. Duyarga birimleri tarafından TM'ye gönderilen ölçümleri alarak ilgili duyarga birimine alındı bilgisini, eğer değiştirilmesi istenirse yeni eşik ve hassasiyet değerleri ile birlikte gönderir. Ayrıca herhangi bir duyarga birimi ile TM arasında geçen her bir haberleşmenin ardından, TM duyarga biriminden gelen son ölçümü kaydeder. Işık kaynağının konumu, TM'ye gelen ölçümlerin aşığıdaki gibi ağırlıklı ortalaması ile bulunur [2].

$$\hat{x} = \frac{\sum_{i=1}^{N_A} D_i x_i}{\sum_{i=1}^{N_A} D_i} \quad (1)$$

$$\hat{y} = \frac{\sum_{i=1}^{N_A} D_i y_i}{\sum_{i=1}^{N_A} D_i} \quad (2)$$

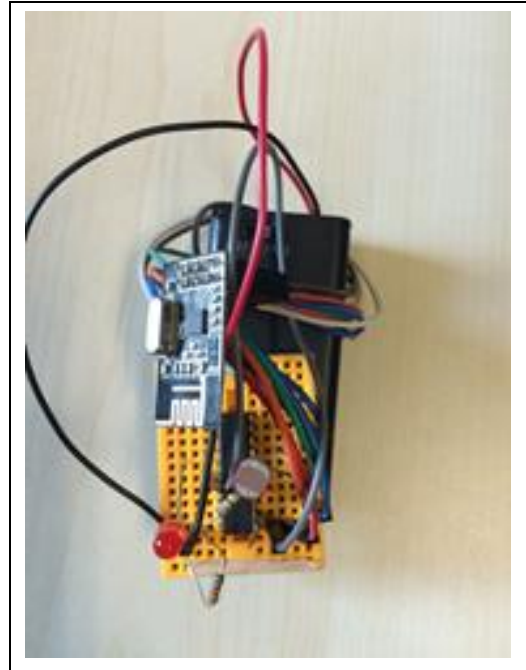
Bu ifadede (\hat{x}, \hat{y}) kestirilen ışık konumunu, N_A tümleştirme merkezine ölçüm gönderen toplam aktif duyarga sayısını (Bu sayı alandaki toplam duyarga sayısı N 'den küçük veya eşit olabilir), (x_i, y_i) , i . duyarganın konumunu, D_i i . duyarganın ölçümünü göstermektedir. Sürekli çalışma durumunda i . duyarga ölçümü güncellendikçe (\hat{x}, \hat{y}) kestirimleri de güncellenmektedir.



Şekil 5: TM çalışma akış çizelgesi.

4 Test sonuçları

Gerçekleştirdiğimiz TDA ile yaptığımız deneylerin sonuçları bu bölümde sunulmaktadır. Yapılan duyarganın fotoğrafı tüm birimleri ile birlikte Şekil 6'da gösterilmiştir. Duyargalarda yer alan mikroişlemciler (MSP430G2553) Code Composer Studio (CCS) ortamında C++ dili ile programlanmıştır.

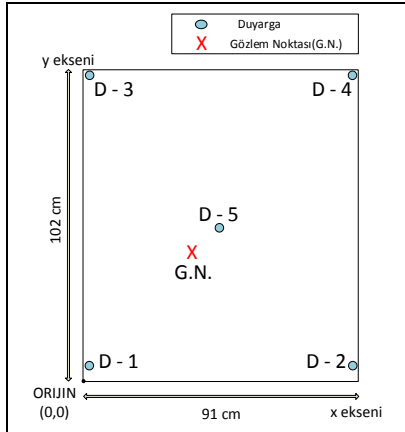


Şekil 6: Duyarga görünümü.

Şekil 7’de deney yapılan alan, Şekil 8’de ise deney yapılan alanın grafiksel görünümüne yer verilmiştir. Deney alanının köşe noktalarına birer duyurga birimi ile yine deney alanının orta noktasına bir adet duyurga birimi yerleştirilerek test alanı oluşturulmuştur.

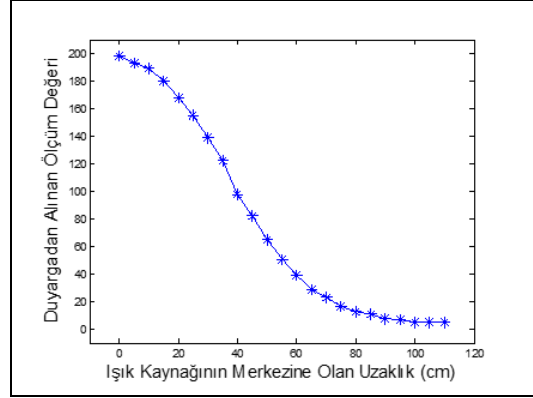


Şekil 7: Deney alanı.



Şekil 8: Deney alanının grafiksel gösterimi ve duyurga birimlerinin konumları. Duyurga-1 (D-1) Koordinatları: (2,5). Duyurga-2 (D-2) Koordinatları: (89,5); Duyurga-3 (D-3) Koordinatları: (2,100); Duyurga-4 (D-4) Koordinatları: (89,100); Duyarg- 5 (D-5) Koordinatları: (45,50); Gözlem Noktası (G.N.) Koordinatları: (36,42).

Işık kaynağı olarak halojen lamba kullanılmıştır. Işık kaynağının gerçek yeri, alanda en büyük LDR ölçüm değerini veren nokta olarak tanımlanmıştır. Deney sırasında ışık kaynağı $(x, y) = (36,46)$ noktasında yer almaktadır. Şekil 9 ise bir duyarganın ışık kaynağına olan uzaklığına göre LDR’den elde edilen değerleri göstermektedir. Ölçümler 5cm aralıklarla alınmıştır.



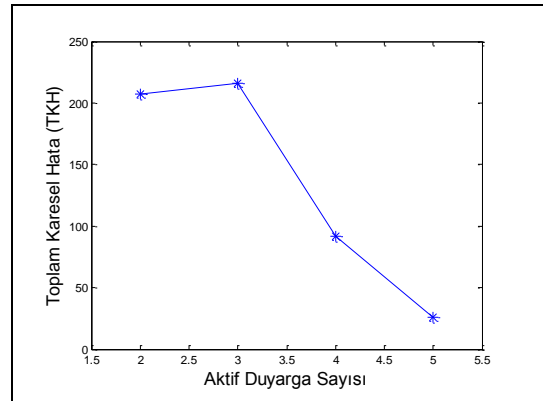
Şekil 9: Duyarganın ışık kaynağına göre uzaklığına bağlı ölçüm değeri.

Duyurgaların eşik seviyeleri 80 ile 200 arasında 20 birim aralıklarla değiştirilerek verilen ışık kaynağı için konum belirleme işlemi yapılmıştır. Eşik değerinin her bir değeri için $T=10$ farklı konumlandırma işlemi yapılarak toplam karesel hata (TKH) aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$TKH(e) = \sum_{t=1}^T (x - \hat{x}_t)^2 + (y - \hat{y}_t)^2 \quad (3)$$

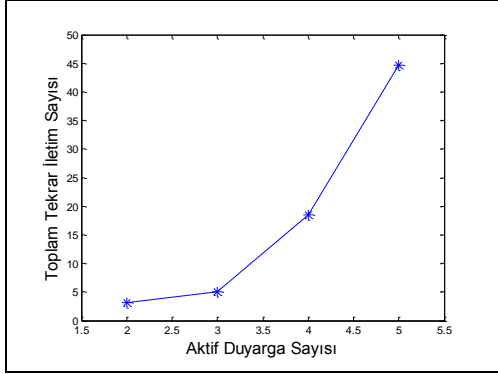
Yukarıdaki ifadede $TKH(e)$, e eşik değeri altında gözlenen TKH 'yi, (\hat{x}_t, \hat{y}_t) , t . denemede kestirilen ışık kaynağı konumunu ifade etmektedir. Bu deneyde TM deney alanından yaklaşık 10m uzaklıkta bulunmaktadır.

Her bir denemede TM 'ye ölçüm gönderen duyurga sayısı (aktif duyurga sayısı, N_A) duyarganın tanımlanan eşik değerine bağlıdır. Şekil 10'da aktif duyurga sayısına bağlı olarak TKH grafiğine yer verilmiştir. Duyurgaların eşik seviyesi yüksek seviyede olduğu zaman yer tespiti için daha az duyurga TM 'ye ölçüm gönderir. Böylece toplam enerjiden tasarruf edilirken TKH artar. Eğer duyurgaların eşik seviyesi düşük seviyede tutulursa daha fazla duyurga TM 'ye veri gönderir. Böylelikle daha doğru yer tespiti çalışması yapıldığından TKH da azalır ancak TDA 'da tüketilen toplam enerji miktarı artar.



Şekil 10: Aktif duyurga sayısına göre toplam karesel hata.

Şekil 11’de yer tespiti çalışması için TM’ye ölçüm gönderen aktif duyurga sayısına bağlı olarak duyurgaların toplam tekrar iletim sayısının grafiği verilmiştir. Işığı algılayan duyurgalar ölçümlerini TM’ye aynı anda iletmeye çalışınca ortamda paket çakışmaları meydana gelebilmektedir. Tanımlanan protokol gereği duyurgalar TM’den onay bilgisi gelinceye kadar ölçümlerini tekrar göndermeye çalışmaktadırlar. Yer tespiti çalışması için TM’ye ölçüm gönderen duyurga sayısı arttıkça çakışmalar ve toplam iletim sayısı artar ve buna bağlı olarak toplam ağda tüketilen enerji miktarı artmış olur.



Şekil 11: Aktif duyurga sayısına göre duyurgaların toplam veri iletim sayısı.

Tablo 2’de bir duyurganın akım çekim tablosu gösterilmektedir. Duyurgalar ölçüm aldıkları zaman haberleşme üniteleri enerji tasarrufu için kapalı olduğundan yaklaşık olarak 1mA akım çekerler ama haberleşme işlemleri boyunca haberleşme üniteleri açık olduğundan ortalama 12mA akım çekerler. Şekil 10 ve Şekil 11 incelendiği zaman en uygun eşik seviyesi değerin 120 ile 140 arası olduğuy söylenebilir.

Tablo 2: Akım çekim tablosu.

Durum	Mikroişlemci	Haberleşme Ünitesi	LDR	Toplam
Ölçüm Kontrolü	<0.4mA	-	<1mA	<1mA
Veri iletimi	<0.4mA	~11mA	-	<11mA
Veri alımı	<0.4mA	~13mA	-	<14mA

Tablo 3 ve Tablo 4, gerçekleştirdiğimiz iki farklı konumlandırma deneyi sırasında duyurgaların ölçümlerini başarılı gidene kadar yaptıkları iletim sayılarını göstermektedir. Bir duyurgadan TM’ye iletim süresi yaklaşık 0.04sn ile 0.06sn arası sürmektedir.

Tablo 4’te tüm duyurgalar için eşik değeri yüksek (140) seçildiğinde, duyurga 1 ve 2 sadece tek bir iletim süresi boyunca yaklaşık 13 mA akım çekerken, duyurga 3 ve duyurga 4 sırasıyla 2 ve 3 iletim süresi boyunca 13 mA akım çekmektedir. Bu deneyde duyurga 3’e gelen ölçüm eşik seviyesini geçmediği için duyurga 3’ün alıcı-verici birimi kapalıdır. Bu nedenle duyurga 3 yaklaşık 1 mA akım çekmektedir. Tablo 5’te ise duyurgaların eşik değeri düşük (80) seçilmiştir. Duyurgaların tekrar iletim sayıları ortamda çakışmaların artması sebebiyle artmaktadır ve bu nedenle toplam 13mA akım çekme süreleri de uzamaktadır. TM’ye iletimini başarı ile tamamlayan duyurgalar alıcı-verici birimlerini kapayarak 1mA akım çekmeye devam ederler.

Son olarak bir duyurga noktası oluşturmak için gereken malzemeler ve onların fiyat listesi Tablo 5’te gösterildiği gibidir. Perakende birim fiyatları kullanılarak bir duyurga noktası 11.60\$a imal edilebilir.

Tablo 3: Duyurga eşik seviyesinin 140 olduğuy bir deney için akım çekim tablosu.

Duyurga Numarası	Toplam İletim Sayısı	(Toplam iletim sayısı süresince akım çeker)
Duyurga 1	1	~13 mA
Duyurga 2	1	~13mA
Duyurga 3	-	~1mA
Duyurga 4	2	~13mA
Duyurga 5	3	~13mA

Tablo 4: Duyurga eşik seviyesinin 80 olduğuy bir deney için akım çekim tablosu.

Duyurga Numarası	Toplam İletim Sayısı	(Toplam iletim sayısı süresince akım çeker)
Duyurga 1	2	~13 mA
Duyurga 2	8	~13mA
Duyurga 3	23	~13mA
Duyurga 4	1	~13mA
Duyurga 5	2	~13mA

Tablo 5: Bir duyurga noktasının birim maliyet şeması.

Sıra No	Ürün Adı	Fiyatı (\$)
1	MSP430G2553	2.8
2	NRF24L01	0.99
3	Işığa duyarlı direnç (LDR)	0.35
4	Pil (2xAA 2100mah)	4.75
5	Diğer Malzemeler (Kablo, direnç, pil yuvası vb.)	2
6	Breadboard Mini	0.71
	Genel Toplam	11.60 \$

5 Vargı ve gelecek çalışmalar

Bu makalede az maliyetli ve enerji verimliliği yüksek bir TDA kurularak bir ışık kaynağının konum tespiti çalışmalarına yer verilmiştir. Uygulama bu haliyle karanlık bir ortamda ışık yayan bir cismi sezip ve konumunu kestirmek için kullanılabilir. Yapılan çalışmada konumlandırma işlemi için sahada bulunan tüm duyurgalar yerine sadece ışık kaynağına yakın duyurgaların ölçümlerini göndermesi enerji verimliliği açısından kazanç sağlamıştır. Test sonuçları bölümünde görüldüğü üzere konumlandırma işleminin ölçüm gönderen duyurga sayısı arttıkça gerçeğe daha yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Bu pilot çalışmamızda sunduğumuz konumlandırma uygulaması, gelecek çalışmalarımızda geliştirilerek alan şiddeti tahmini ve hedef takip uygulamaları da yapılabilecektir. Ayrıca, algılayıcı birime farklı yeni algılayıcı çeşitleri eklenerek ortamda bulunan farklı parametrelerin (sıcaklık, nem, basınç vb.) gözlemlenmesi de mümkün olacaktır. Böylece kurulacak olan sistem aracılığıyla ortamda ilgilenilen farklı parametrelerin eş zamanlı kestirimi, takibi ve kontrolü de mümkün olacaktır. Ek olarak, duyurga biriminin kullanım ömrünü daha da uzatmak adına yenilenebilir enerji çeşitlerinden olan güneş enerjisi ile duyurga pilinin şarj edilmesi üzerindeki çalışmalarımız devam etmektedir.

Bu çalışmada tüm duyurgalar ölçümlerini doğrudan TM’ye göndermektedir. İleriki çalışmalarımızda daha büyük bir alanda ve çok sayıda duyurga içeren bir ağda duyurga ölçümlerinin komşu duyurgalar üzerinden TM’ye iletimi incelenecektir. Oluşturulan duyurga birimine farklı bir alıcı-verici modül eklenerek, duyurga ölçümleri bir nesnelere interneti uygulaması ile uzak mesafedeki bir TM’ye ya da bir son kullanıcıya da aktarılabilir.

6 Teşekkür

Bu çalışma 113E220 No.lu TÜBİTAK araştırma projesinden desteklenmiştir.

7 Kaynaklar

- [1] Viswanathan R, Varshney PK. "Distributed detection with multiple sensors: Part I-Fundamentals". *Proc. IEEE*, 85(1), 54-63, 1997.
- [2] Niu R, Varshney PK. "Target location estimation in sensor networks with quantized data". *IEEE Trans. Signal Processing*, 54(12), 4519-4528, 2006.
- [3] Demigha O, Hidouci WK, Ahmed T. "On energy efficiency in collaborative target tracking in wireless sensor network: a review". *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 15(3), 1210-1222, 2013.
- [4] Zhang Haotian, MF Moura J, Krogh B. "Dynamic field estimation using wireless sensor networks: Tradeoffs between estimation error and communication cost". *IEEE Trans. on Signal Processing*, 57(6), 2383-2395, 2009.
- [5] Akyildiz IF, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. "A survey on sensor networks". *IEEE Communications Magazine*, 40(8), 102-114, 2002.
- [6] Masazade E, Niu R, Varshney P K, Keskinöz M. "Energy aware iterative source localization schemes for wireless sensor networks". *IEEE Trans. Signal Process*, 58(9), 4824-4835, 2010.
- [7] Kumar V, Sonavane SS, Patil BP. "Designing ultra low power Wireless Sensor Network with TCP/IP link". *ICAST 2nd International Conference on Adaptive Science & Technology*, Accra, Ghana, 14-16 January 2009.
- [8] Sonavane SS, Kumar V, Patil BP. "Designing wireless sensor network with low cost and low power". *16th IEEE International Conference on Networks*, New Delhi, India, 12-14 December 2008.
- [9] Sonavane SS, Kumar V, Patil BP. "MSP430 and nRF24L01 based Wireless Sensor Network Design with Adaptive Power Control". *ICGST-CNIR Journal*, 8(2), 11-15, 2009.
- [10] Kulkarni NS, Rakesh R, Bhargava S, Bundela SS, Hegde R. "Zigbee based low power Wireless Sensor Network nodes". *2010 International Conference on Next Generation Networks*, Mumbai, India, 24-25 September 2010.
- [11] Baghaee S, Gürbüz ZS, Uysal-Bıyıkoğlu E. "Application and Modeling of a Magnetic WSN for Target Localization". *2013 UKSim 15th International Conference on Computer Modelling and Simulation*, Cambridge, United Kingdom, 10-12 April 2013.
- [12] Baghaee S, Chamanian S, Ulsan H, Zorlu O, Uysal-Bıyıkoğlu E, Kulah, H. "Demonstration of energy-neutral operation on a WSN testbed using vibration energy harvesting". *20th European Wireless Conference*, Barcelona, Spain, 14-16 May 2014.
- [13] AdvanticsYS. "CM5000". <http://www.advanticsys.com/shop/mtmcm5000msp-p-14.html> (25.02.2015).
- [14] Hormann LB, Glatz PM, Steger C, Weiss R. "A wireless sensor node for river monitoring using MSP430® and energy harvesting". *4th European Education and Research Conference*, Nice, France, 1-2 December 2010.
- [15] Texas Instruments. "Category: MSP430". <http://processors.wiki.ti.com/index.php/Category:MSP430?keyMatch=msp430&tisearch=Search-EN-Everything> (25.02.2015).
- [16] Hou J, Gao Y. "Greenhouse Wireless Sensor Network Monitoring System Design Based on Solar Energy". *2010 International Conference on Challenges in Environmental Science and Computer Engineering*, Wuhan, China, 6-7 March 2010.
- [17] Kuzlu M, Hasan M, Rahman S, Dincer H. "Design of wireless smart metering system based on MSP430 MCU and ZigBee for residential application". *7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, Bursa, Turkey, 1-4 December 2011.
- [18] Gao R, Zhou H, Su G. "A wireless sensor network environment monitoring system based on TinyOS". *2011 International Conference on Electronics and Optoelectronics*, Dalian, PR China, 29-31 July 2011.
- [19] SparkFun Electronics. "SparkFun XBee Explorer Serial". <https://www.sparkfun.com/products/9111> (25.02.2015).
- [20] Texas Instruments. "CC2420". <http://www.ti.com/product/cc2420?keyMatch=cc2420&tisearch=Search-EN-Everything> (25.02.2015).
- [21] Nordic Semiconductor. "nRF24L01". <http://www.nordicsemi.com/eng/Products/2.4GHz-RF/nRF24L01> (25.02.2015).
- [22] Texas Instruments. "MSP430G2553". <http://www.ti.com/product/msp430g2553?keyMatch=msp430g2553&tisearch=Search-EN-Everything> (17.03.2016).
- [23] Ünsalan C, Gürhan HD. *Programmable Microcontrollers with Applications*. 1st ed. New York, USA, McGraw-Hill, 2013.