

802.15.4 Tabanlı Sensör Düğümü Tasarımı ve Geliştirilen Kablosuz Sensör Ağ Uygulama Ortamı: FıratZigBee

Güngör YILDIRIM, Yetkin TATAR

Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği, Elazığ
ytatar@firat.edu.tr

(Geliş/Received:12.05.2018; Kabul/Accepted:11.07.2018)

Özet

Kablosuz Sensör ağlarının (KSA/WSN) temel bileşenleri olan kablosuz sensör ağ düğümleri (KSAD), işlemci ve hafıza devresi, radyo modülleri, güç üniteleri, sensörler/aktuatörler ve dönüştürücü devrelerinden oluşmaktadır. Mevcut KSAD'lerin maliyetlerinin yüksek olması bir yana amaca yönelik tasarımlarda ek donanımlara/bağlantılara ihtiyaç duymaları veya bunun tam tersi olarak uygulamaların ihtiyaç duymadığı gereksiz özelliklere sahip olabilmeleri, dezavantajlardır. Bu makalede, özellikle deneysel amaçlı ve çok sayıda sensör düğüm gerektiren KSA ağ uygulamalarında kullanılmak üzere amaca özel programlanabilen, kurulumu ve işletmesi kolay, mevcut diğer ZigBee KSAD'ler ile kıyaslanabilen özelliklerde bir sensör düğümün (FNode) tasarlanması gerçekleştirme süreci sunulmuştur. Buna ek olarak FNode'lardan oluşturulacak KSA yapılarını kontrol edebilen, sensör düğümlerden toplanan verileri ön işlemlerle optimize ederek veri tabanlarına kaydedebilen bir kontrol ve gözlemele yazılımının (FMonitor) geliştirme detayları paylaşılmıştır. FıratZigBee isimli bu KSA sisteminin gerekli test ve denemeleri yapılarak hem pratik uygulamalar için hem de ilgili eğitim kurumlarındaki KSA uygulamaları için bir deneysel platform olarak kolaylıkla kullanılabilir olduğu gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kablosuz duyurga ağları, WSN, WSN düğüm

Design of an 802.15.4 Based WSN Node and a Wireless Sensor Network Application Platform: FıratZigBee

Abstract

Wireless sensor networks nodes, which are the fundamental components of wireless sensor networks (WSNs), consist of several units such as microcontroller, memory, radio, power supply, sensors/actuators, and their drivers. Besides their costs, today's WSN nodes may have several disadvantages, such as being goal-oriented devices requiring specific application components and having some unused hardware pieces that increase the cost. In this paper, for WSN systems requiring a large number of WSN nodes, the design of a WSN node, which is easy to use and comparable with other ZigBee nodes, which can be programmed towards a goal-oriented, is introduced. These nodes are called FNodes. In addition to this, the details of the WSN monitoring and optimization software, called FMonitor, which is developed to processes and optimizes the collected data before storing in databases, is also shared. As a result, by doing the necessary tests and experiments, it has been shown that the WSN system, named FıratZigBee, can be used as a testbed platform for both practical applications and educational goals.

Keywords: Wireless sensor networks, WSN, WSN nodes

1. Giriş

Gömülü sistem teknolojilerindeki gelişmeler ile birlikte pek çok farklı disiplinde kullanılan teknolojiler de değişim göstermeye başlamıştır. Devre boyutlarının fiziksel olarak küçülmesi, yazılımsal ve teknik kapasitelerinin artması ile birlikte daha verimli üretim/kontrol sistemlerinin geliştirilme süreçleri de hızlanmıştır. Kablosuz

sensör ağları da (KSA/WSN) bu teknolojik gelişmelerden nasibini almış olup günümüz yaygın teknolojileri arasına girmiştir. Özellikle Nesnelerin İnterneti (IoT) ve Siber Fiziksel Sistemlerin (CPS) yaygınlaşmaya başlamasıyla KSA sistemlerde kullanılan teknolojilerde bu yönde değişmeye başlamıştır. KSA'lar normal ağlardan farklı olarak, enerji kısıtları, dağıtık yapıları ve sınırlı işlem kapasiteleri gibi birçok

kısıtlayıcı özelliğe sahiptir. KSA düğümlerinde aranan özelliklerden birisi de yapılacak işe uygun minimum donanımsal ve yazılımsal konfigürasyonlardır. Bu sayede hem düğümün işlem hızı artmış olur hem de maliyeti ve enerji sarfiyatı azalmış olur. KSA 'lar üzerine uygulama geliştirici kurumların yapacakları uygulamaya uygun, işlem kapasitesi yüksek, çok sayıda sensör/aktuatörü denetleyebilen, yazılımsal olarak kolay programlanabilen ucuz maliyetli çok sayıda KSA düğümüne ihtiyaç duyduğu da açıktır.

Bu makalede kullanıcının kendi uygulamaları için rahatça programlayıp kullanabileceği, uygun maliyetli ve esnek bir KSA düğüm yapısının geliştirilmesi, bu düğümler ile oluşturulmuş KSA ve bu ağın yönetilmesini/gözlenmesini sağlayan bir ağ yönetim yazılımının gerçekleştirilme ve deneme süreci açıklanmıştır. Geliştirilen düğümler "FNode", oluşturulan KSA yapısı "FıratZigBee" ve yazılan ağ yönetim modülü ise "FMonitor" olarak isimlendirilmiştir. Makalenin ilerleyen bölümlerinde KSA'ların katmanlı mimari yapıları ve mevcut KSA düğümleri kısaca açıklanmış sonrasında ise gerçekleştirilen düğüm yapısının donanımsal-yazılımsal kısımları ve FMonitor ağ yönetim yazılımının geliştirilme süreci detaylı bir şekilde verilmiştir. FNode'ların belirli kriterlere göre test edilip sonuçlarının tartışıldığı bölümden sonra ise FNode'lar ile gerçekleştirilen fiziksel KSA yapısının FMonitor yazılımı ile denetlenme sürecindeki uygulama sonuçları tartışılmıştır.

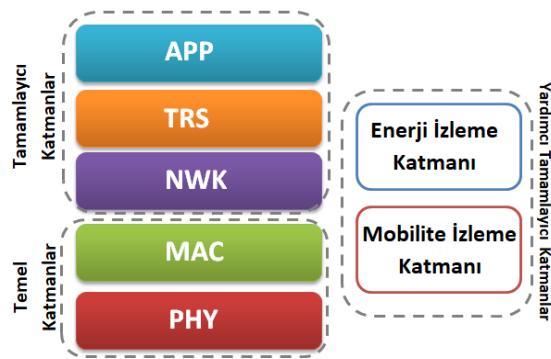
2. KSA Katmanlı Mimarisi ve Düğüm Teknolojileri

Yaklaşık yirmi yıllık gelişim ve olgunlaşma sürecinde pek çok KSA sistem teknolojisi ortaya çıkmıştır [1]. Doğal olarak bu da heterojen bir ürün yelpazesini ortaya çıkartmıştır. Bu alandaki heterojenlik, temelde düğüm ve ağ bazlı olmak üzere farklı gelişimler göstermiştir [2]. Düğüm açısından farklı katmansal ve donanımsal özellikler, KSA sistemlerin karakteristğini doğrudan etkilemektedir. KSA 'lar belirli katmansal bir protokol yığını üzerine çalışmaktadır [3]. Şekil 1 'de gösterildiği üzere bunlar temel katmanlar ve tamamlayıcı katmanlar olarak

sınıflandırılabilir. Temel katmanlar fiziksel (PHY) ve ortama erişim (MAC) katmanlarıdır. PHY katman, kablosuz medyada yayılacak olan sinyallerin üretilmesi /algılanması ve işlenmesini kotarır. MAC katmanı ise aynı medyayı kullanan aygıtların bu ortamda kendi verilerini sorunsuzca hedefe iletebilecekleri uygun anı ve yöntemi belirleyen algoritmaları içermektedir. Tüm düğümlerin birbirleriyle haberleşebildikleri aynı kapsama alanları içerisinde, bu iki temel katman yeterli olsa da çok sayıda düğümden oluşan geniş bir lokasyona dağılmış KSA sistemlerde verilerin hedefe yönlendirilmesini sağlayan tamamlayıcı bir ağ katmanına (NWK) ihtiyaç duyulmaktadır.

Her ne kadar KSA 'larda çok yaygın olmasa da veri çeşitliliğinin ve yoğunluğunun yüksek olduğu sistemlerde veri taşıma katmanı da (TRS) kullanılabilmektedir. Uygulama katmanı (APP) ise KSA sistemin veri toplama, sorgulama ve yönetim karakteristğini belirleyen, kullanıcının etkileşebildiği katmandır. Bu katmanlara ek olarak düğümlerde enerji tüketimini, veri güvenliğini ve hareketli senaryolarda (mobilite) konum farkındalığını sağlayan yardımcı tamamlayıcı katmanlarda bulunabilmektedir. Bu yardımcı tamamlayıcı katmanlar diğer katmanlar içerisinde dahili olarak bulunabilmekte beraber bunlarla bütünsel olarak da çalışabilmektedirler.

Bugün literatürde pek çok katman teknolojisi bulunmakla beraber [4-6] pratik ve ticari alanda genel kabul görmüş KSA protokol teknolojisi 802.15.4, Bluetooth ve WiFi 'dir [7-9]. Bunlardan Bluetooth ve WiFi kısıtlı düğüm özelliklerini çok dikkate almadıklarından KSA sistemlerde çok tercih edilmezler. KSA sistem karakteristiklerini esas alan standartlaşmış 802.15.4 protokol yığıtı ise temel PHY ve MAC katmanlarından oluşmaktadır. Bu standart protokol teknolojisi diğer KSA protokol teknolojilerine altyapı oluşturmuş, ZWave ve ZigBee gibi diğer KSA teknoloji standartlarının doğmasına ön ayak olmuştur [10,11]. Bunlardan ZigBee teknolojisi bugün en yaygın KSA teknolojisi durumundadır ve pek çok ticari/akademik uygulamada kullanılmaktadır. ZigBee, NWK katmanında örgü (Mesh) yönlendirme tekniğini kullanırken APP katmanında kendine özgü kimliklendirme ve soyutlama yöntemleri kullanmaktadır.



Şekil 1. KSA sistemlerde katmansal yapı

KSA düğüm teknolojileri esasen iki alanda değerlendirilmelidir. Bunlar ticari alanlar ve akademik/ArGe alanlarıdır. Pek çok durumda düğüm teknolojisi ve taşıdığı özellikler, kullanıldıkları senaryoya veya koşturdukları protokol yiğit teknolojisine göre değişiklik göstermektedir. Örneğin ZigBee katmansal protokol yapısı üzerinde çalışan düğümlerin bir kısmı sabit enerjili olmak zorundayken (Full Function Device - FFD) bir kısmı belirli bir çalışma düzene sahip, batarya ile çalışan düğümler (Reduced Function Device - RFD) olabilir. Bu da her bir düğümde bulunabilecek donanım özelliklerini değiştirebilmektedir. Ancak her halükarda temel birimler tüm düğüm teknolojilerinde aynıdır. Bu temel birimler mikrokontrolör (MCU), radyo ünitesi/protokol yiğiti, sensör/aktuatör modülü ve güç birimidir. Düğümlerde, 4 MHz -50 MHz MCU, 2 KB – 128 KB RAM , 32KB – 1 MB flash aralıklarında donanımsal özellikler bulunabilmektedir.

Bununla beraber akademik ve askeri alanlarda kullanılan düğüm teknolojileri üzerinde gömülü bir işletim sistemi (TinyOS, Contiki vb.) çalıştırılabilirken, diğer taraftan genel ticari uygulamalarda belirli bir KSA protokolü üzerinde basit bir bootloader çalıştırılabilen düğüm teknolojileri kullanılabilmektedir. Doğal olarak skaler veri toplayan düğüm özellikleri, multimedia veri toplayan düğüm özelliklerine göre daha mütevazi olacaktır. Bu bağlamda TelosB, MicaZ, Imote, Stargate, MeshEye gibi biraz daha gelişmiş KSA düğümleri genellikle araştırma geliştirme uygulamalarda tercih edilirken XBee, NXP132xx, Waspmove gibi amaca yönelik düğümler/modüller daha çok ticari alanlarda kullanılmaktadır [12-16].

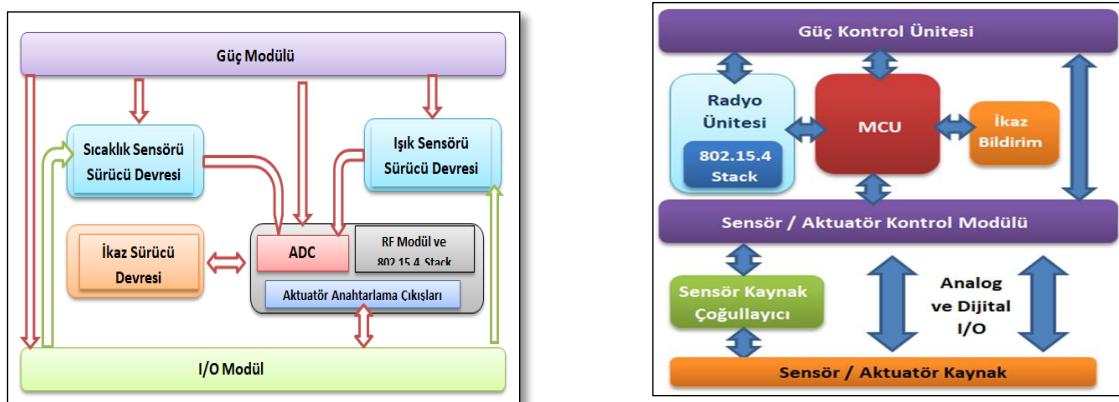
3. Geliştirilen KSA Düğüm Yapısı: FNode

Bu çalışmada gerçekleştirilmiş olan FNode isimli iki farklı KSA düğüm yapısı daha çok uygulamaya yönelik olarak geliştirilmiştir. FNode 'lar 802.15.4 temelli olup ZigBee teknolojisinin yanında farklı NWK ve APP katmanlarının da yazılmış geliştirilebildiği esnek bir yapıya sahip olacak şekilde tasarlanmıştır.

Şekil 2.a 'da görülen FNode Yönlendirici düğüm kartı; güç modülü, RF iletişim modülü, sensör ve aktuatör sürücü devrelerinden oluşmuştur. Bu düğüm, FıratZigBee omurgasının genişletilmesini sağlamak, veri paketlerini merkezi veri toplama birimine yönlendirmek, RFD düğümlerin ağa katılmasını sağlamak için tasarlanmıştır. Ayrıca üzerinde bulunan analog sürücü ve sensör devreleri yardımıyla ortamdan sıcaklık ve ışık verilerini almak, mevcut çıkış portları ile aktuatör sistemleri açıp kapayabilmek, mobil düğümlerden RSSI (Received Signal Strength Indication) değerlerini okumak gibi işlevleri yerine getirecek şekilde düzenlenmiştir. Fiziksnel, MAC ve ZigBee Ağ katmanı fonksiyonlarına sahiptir. Sürekli bir enerji kaynağından beslenir, FFD özelliğidir.

Şekil 2.b'de görülen FNode uygulama kartı ise, güç modülü, RF ve 802.15.4 stack modülü, Mikrokontrolör (MCU), Sensör/Aktuatör Modülü ve sensör çoğullayıcı biriminden meydana gelmiştir. Hem FFD hem de RFD özelliğindeki bu kart; Sensör /Aktuatör Modül (SAM) kartı ile Analog ve Dijital sensör okuyabilme, aktuatör anahtarlama, hem "router" hem de "End Device" olarak çalışabilme, uzaktan ayarlanabilir uyuma periyodu ayarlanabilme, uygulamaya yönelik "end point" ve protokol tanımı yapılabilme, sensör kaynak çoğullayıcı aracılığı ile daha fazla analog dijital sensör okuyabilme özelliğine sahiptir. Atmel328P MCU kullanılarak, Zigbee veya diğer ağ teknolojileri için uygulama katmanı yazılımlarının oluşturulmasına imkan sağlanmıştır. Aynı bir kart olarak tasarlanan Sensör/Aktuatör Modülü (SAM) ise iki görevden sorumludur. Sensör/Aktuatör kontrolleri MCU tarafından SAM üzerinden yapılmaktadır. Örnek olarak bir FNode 'un uyuma periyodunda ilgili Sensör/Aktuatör kaynaklarının pasif veya aktif

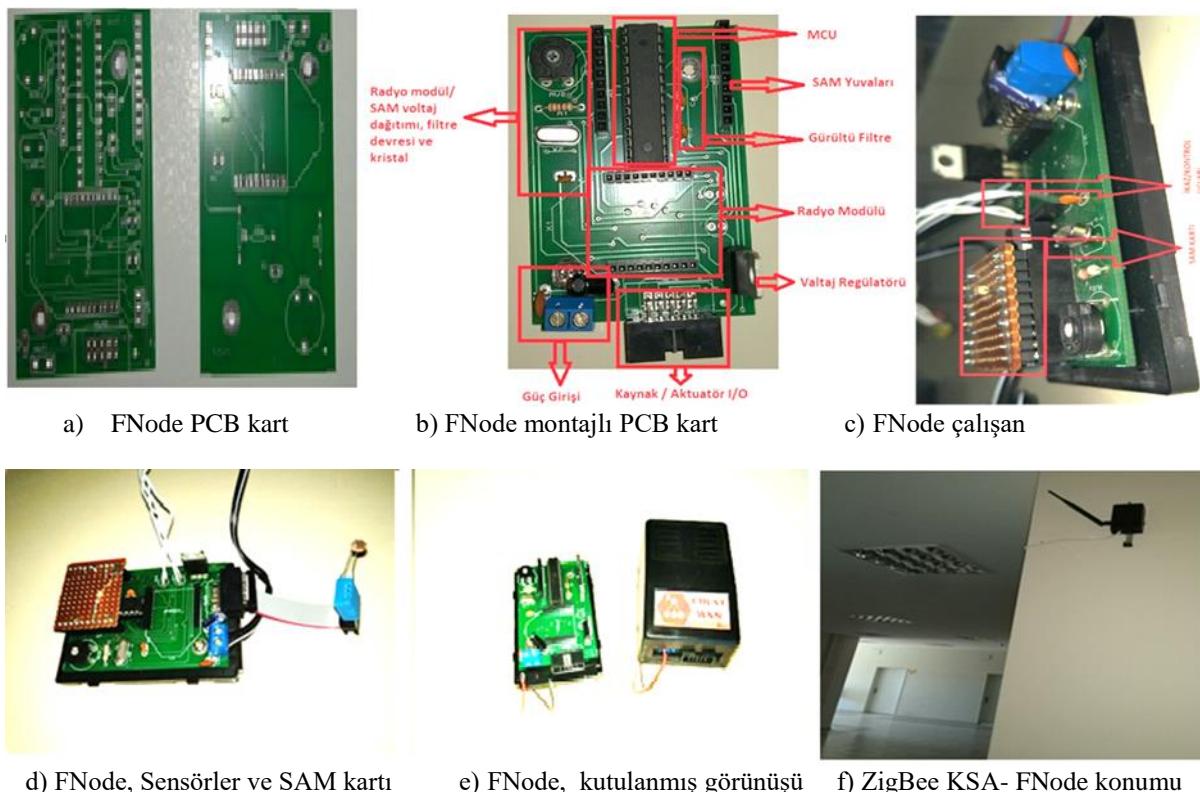
edilmesi SAM üzerindeki devrelerin MCU tarafından denetlenmesiyle başarılıır.



a) Router FFD FNode

b) FFD ve RFD özellikli FNode

Şekil 2. FNode 'lara ait genel blok şeması



Şekil 3. Uygulamada kullanılan FNode düğümlere ait bazı görüntüler

Böylelikle enerji tasarrufu da sağlanmış olur. Güç kontrol ünitesi her iki kart için aynıdır. Radyo devresi, MCU, Sensör/Aktuatör modülü ve diğer birimlerin ihtiyaç duyukları farklı voltaj seviyelerindeki istenen gücü sağlamak ve

kontrol etmek için tasarlanmıştır. Girişine uygulanan sabit 12 DC voltajı 3.3v, 5v, 12v seviyelerine dönüştürerek ilgili birimlere uygulanmasını sağlar. Güç kontrol ünitesinin girişindeki sabit voltaj kaynağı için bir batarya

kullanılabileceği gibi bir A.C/D.C adaptör de kullanılabilir.

Gerçekleştirilen FNode 'lara ait bazı görseller Şekil 3 'de verilmiştir. FNode ile ilgili genel teknik özellikler ise Tablo I de verilmiştir. Fnnode'larda, radyo devresi ve 802.15.4 stack'ını üzerinde barındıran Digi XBee modülleri tercih edilmiştir. Bu modül Şekil 3.b'de görülen kartın radyo kısmına takılmaktadır.FNode düğümlerde bir ağa katılıp katılmadığını gösteren, veri okuma veya veri paketi gönderme/yönlendirme yaptığı gösteren ikaz ledleri de bulunmaktadır. Geliştirilen FNode'lar hem genel amaçlı ar-ge çalışmaları için hem de ZigBee-Mesh protokol temelli çalışmaya tam uyumludur. FFD tip olanlar FNode-FZR/FAZR, RFD tip olanlar ise FNode-RZR/RAZR isimli düğüm olarak adlandırılmaktadırlar.

Tablo I. FNode Teknik Özellikleri

FNode Özellik	Açıklama
İşlemci	Atmega
Flash Hafıza	32 kB
RAM	2 kB
Radyo Ünitesi	Digi XBee s1/s2 /PRO
Frekans Bandı	2400MHz
Kanal Sayısı	16
Veri Hızı	250 kbps
Alici Hassasiyeti	96 dBm (102 dBm -pro)
Protokol	802.145.4 / ZigBee
Ağ Katmanı	Mesh
Analog Sensör uyumluluğu	Var
Dijital Sensör Uyumluluğu	Var
ADC	10 bit
Açık Alan Kapsama Mesafesi	70-100 mt (1000 mt -pro)
Bina içi Kapsama Mesafesi	20-30 mt (100 mt pro)
Çalışma Voltaj Aralığı	3-12 V
Alma modunda Akım	50 mA
Boşta Akım	5-10 mA
Uyku Modunda Akım	60-80 mikroA
Uyanma Süresi	15-25 msn
Çalıştığı Sensörler	O2, CO2, Nem, Isı, İşık, IR, NH3, CO, Akım, Gerilim, Hava Basınç, Ağırlık, Noise, Accelerometer, Eğim, piezzo, Ultasonic vb.

FNode'lar mobil veya statik uygulamalar için geliştirilmiştir. Bu nedenle konum tespit uygulamaları, sağlık alanında yapılabilecek çalışmalar veya arazi uygulamalarında rahatlıkla kullanılabilmektedir. Kullanılan sensör ve aktuator tipi, kullanılacak FNode'un tipini de etkilemektedir. Şöyle ki, gaz sensörleri gibi bazı sensörler stabil okumalar için ilk çalışmaya başladıkten sonra 12-48 saat arası sürekli bir çalışma isteyebilmektedirler. Bu ise kullanılacak sensör düğümün sabit voltajlı olmasını gerektirmektedir. Bu durumda kullanılacak sensör tipi FFD tipi FNode olmak durumundadır.

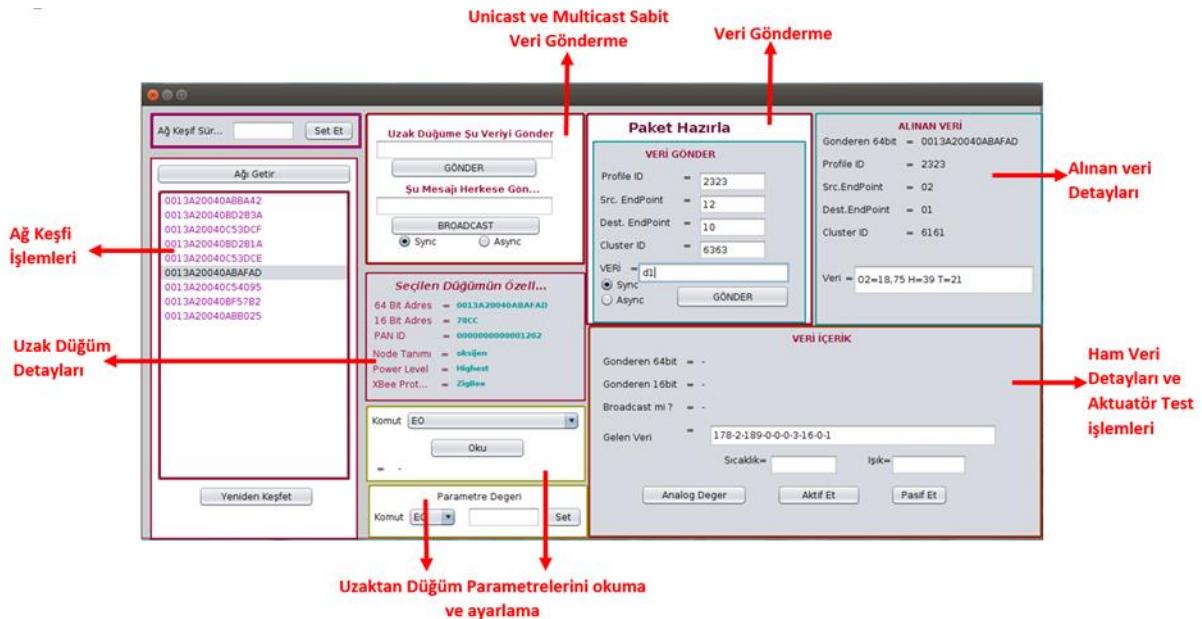
4. Geliştirilen Ağ Yönetim Yazılımı: FMonitor

FNode 'lardan oluşan FıratZigBee KSA sisteminin yönetilmesi için aynı zamanda FMonitor isimli bir ağ yönetim yazılımı da geliştirilmiştir. FMonitör yazılımı JAVA ortamında gerçekleştirilmiş olup ağ yönetimini koordinatör düğüm üzerinden yapmaktadır.

FMonitor yazılımı ile ağa istenilen bir düşüme bağlanılabilir, düğüm parametreleri okunabilir veya uzaktan ayarlanabilir parametreler değiştirilebilir, periyodik okumalar data kayıt modülüne gönderilebilir, ağ keşif işlemleri düzenlenebilir, senkron veya asenkron veri gönderimi yapılabilir, gelen verilerin içerikleri görüntülenebilir. Yukarıda bahsedilen özellikleri sağlayan FMonitör yazılımının uygulama arayüzü ve işlevleri Şekil 4'de gösterilmektedir.

ZigBee temelli ağlarda açık mod (Explicit Mode) ve soyut (Abstract Mode) mod şeklinde paket gönderimleri gerçekleştirilebilmektedir. ZigBee uygulama katmanına ait temel parametrelerin kullanılarak paket gönderimi veya analizinin yapıldığı açık moda ait ilgili kütüphane kodları da bu çalışma sürecinde yazılarak her iki modda da FMonitör yazılımının sorunsuzca kullanılabilmesi sağlanmıştır.

FMonitör yazılımının sunduğu asenkron /senkron paket gönderim seçenekleri ve ağ kaynak keşfi gibi özellikleri sayesinde oldukça kolay bir sistem sürdürülebilir/yürütmü sağlanmaktadır. FMonitor yazılımı aynı zamanda toplanan verileri uygulama tipine göre üç farklı platformda depolayabilmektedir. Bunlar ilişkisel bir veri tabanı olan MySQL, NoSQL teknolojisi olan CouchDB ve klasik text dosyalarıdır.



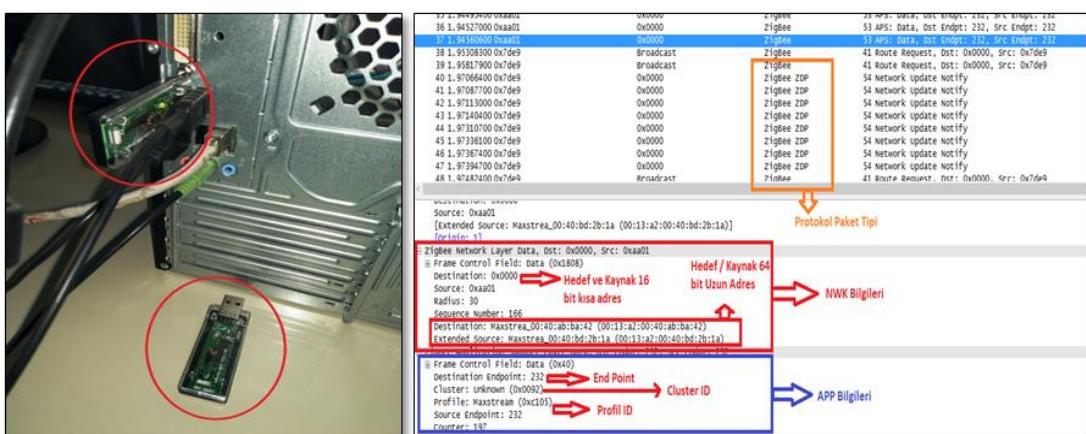
Şekil 4. FMonitor uygulama arayüzü

FMonitor yazılımı, tanımlı profil tiplerine göre farklı uygulamaları, kullandıkları endpoint'lere, cluster_ID 'lere ve command_ID' lere uygun olarak analiz edebilmekte ve yönetimsel komutları bu parametrelere göre düğümlere gönderebilmektedir. Örnek olarak farklı ZigBee uygulama profillerinde bulunan sensörlerin okuma periyotlarının uzaktan değiştirilmesini sağlamak, uyuma periyotlarını ayarlamak, aktuatörleri uzaktan işletmek veya test komutları göndermek bu yazılım sayesinde kolaylıkla yapılmaktadır. FMonitor yazılımı modüler bir yapıda tasarlanmıştır. Geliştirilmiş olan framework (arayüz ve abstarcı sınıflar)

yardımıyla farklı profillere ait kütüphaneler ayrı bir ortamda tanımlanarak bu yazılıma entegre edilebilir ve otomatik çalışmaları sağlanabilir.

FıratZigBee sisteminde düğümler arasındaki veri ve komutların alışverişini sağlayan 802.15.4 protokoluna ait paket trafiğinin izlenmesi ve analiz işlemleri de NXP USB Dongle cihazı ve Wireshark analizör yazılımı aracı vasıtıyla, FMonitor üzerinden yapılabilmektedir.

Böylece 802.15.4 temelli paket yapıları incelenerek, oluşan sistem sorunları yakalanabilmektedir. FıratZigBee de kullanılan analizör ve yazılıma ait çıktı görüntüleri Şekil 5 'de sunulmuştur.



Şekil 5. FıratZigBee ağ trafik ve paket analizör sistemleri

5. FıratZigBee İle Yapılan Örnek Uygulama

FıratZigBee sistemi bir bütün olarak, KSA konusunda lisans ve lisansüstü çalışmalarında gerek duyulan bir deney platformu oluşturma süreci olarak öngörlülmüştür. FNode'lar ile gerçekleştirilen KSA uygulamasından amaçlanan, çevresel parametrelerin (Isı, ışık, nem, CO₂ v.b) periyodik olarak ölçülüp bir veri tabanına aktarılmasını sağlayan bir KSA'ının oluşturulması, kontrol edilmesi ve toplanan verilerin optimizasyonu veya küçültmesi sürecinin gerçekleştirilebilmesidir. Bunun için oluşturulan FıratZigbee KSA sistemi, çok katlı bir binanın iki katını (80x40x4 m ebadında ve her katta farklı büyüklükte 6 adet sınıf mekanı içermektedir) kapsama alanına alan 7 adet FNode FFD omurga düğümden oluşmaktadır. Bu düğümler aynı zamanda ağır diğer katlara ve bina dışı ortamlara genişleyebilir olması için kullanılmaktadır.

FıratZigBee, iletişim teknolojisi olarak ZigBee'yi kullanmaktadır. Sistem, omurga ve son cihazlar olmak üzere mantıksal olarak iki kısımda değerlendirilmiştir. Şu an için son cihazlarla beraber FıratZigBee 40 adet düğüm içermektedir.

Omurga bölümü, sabit enerji noktalarına bağlı FFD FNode cihazlarından meydana gelmektedir. FıratZigBee ağının koordinatörü, MAC adresi 0013A20040ABBA42h ve NWK adresi 0000h olan FNode düğümüdür. Omurga FFD cihazlar paket yönlendirmenin yanı sıra üzerlerinde bulunan ısı/ışık gibi analog sensörlerle ortam ölçümleri, RSSI gibi ölçümler yapabilmekte ve son cihazların omurga üzerinden FıratZigBee 'e katılmasına yardımcı olmaktadır. FıratZigBee 'nin bu omurga yapısına ait topolojik yapısı Şekil 6'da görülmektedir.

FıratZigBee, ortamdan ve sınıflardan ısı, ışık, nem, oksijen seviyesi gibi değerleri periyodik olarak almak için SAM kartlı FNode RFD düğümlerini kullanmaktadır.

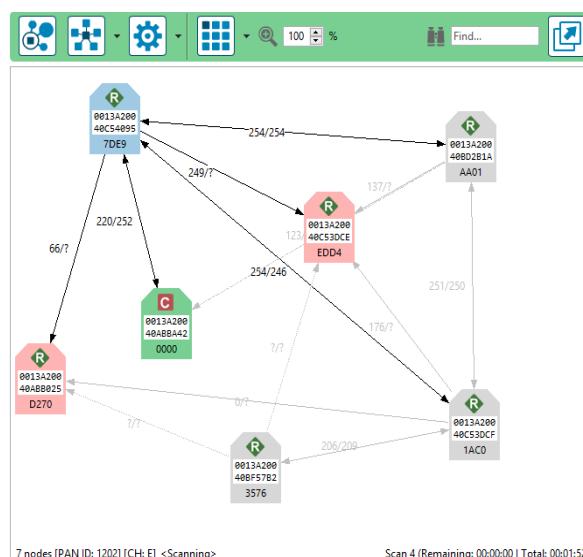
Düğüm konfigürasyonları iki adımda gerçekleştirilmektedir. İlk adımda MCU 'ne ilgili ZigBee uygulama profilinin yüklenmesidir. Bu işlem gerek assembly gerekse daha üst seviye (C/C++, basic vb) MCU dil destekli bir platform yardımıyla yapılabilmektedir.

Uygulama profil parametreleri (endpoint, cluster_ID vb.), ilgili radyo kütüphaneleri ve yürütüm fonksiyonları tanımlandıktan sonra herhangi bir ATMEL programlayıcı kartı ile MCU ya yüklenmektedir. İkinci adım ise radyo devresinin uygun ZigBee cihazı olarak ayarlanmasıdır. Bunun için Digi firmasının X-CTU yazılımı kullanılmakta ve bu yazılımla FFD/RFD tipi, PANID gibi ZigBee spesifikasyonları radyo modülüne yüklenmektedir.

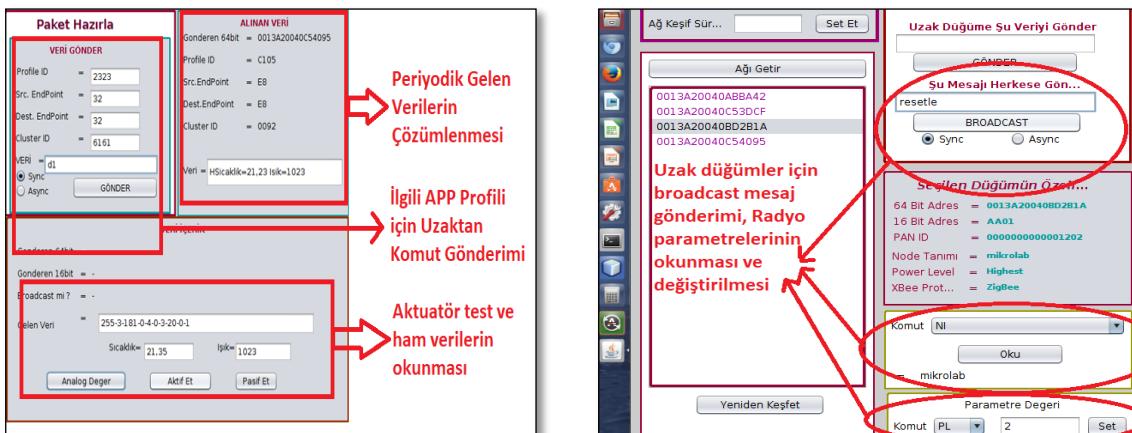
Radyo devresi ve MCU, FNode düğüm kartına takıldıktan sonra anten ve batarya tipine göre uygun kutuya yerleştirilmektedir. Sınıf içi ölçümler, mobil düğüm takibi, bina civarı ölçümler gibi ek uygulamalar bu FıratZigBee KSA üzerinden rahatlıkla yapılabilmektedir.

PAN ID olarak 1202, Profil kimliği (Profile ID) olarak 2323 ve C105'i kullanan FıratZigBee, 10-150/200-232 nolu endpoint'leri sensörler için kullanırken 151-180 nolu endpoint'leri aktuatör kaynakları için kullanmaktadır. FNode'lardan farklı komutlarla (ClusterID, CommandID) istenen veri şekli ve boyutu rahatlıkla değiştirilebilmektedir.

Oluşturulan FıratZigBee ağının gözlemebilmesini sağlayan Fmonitor yazılımının arayüzü ise Şekil 7'de gösterilmiştir.



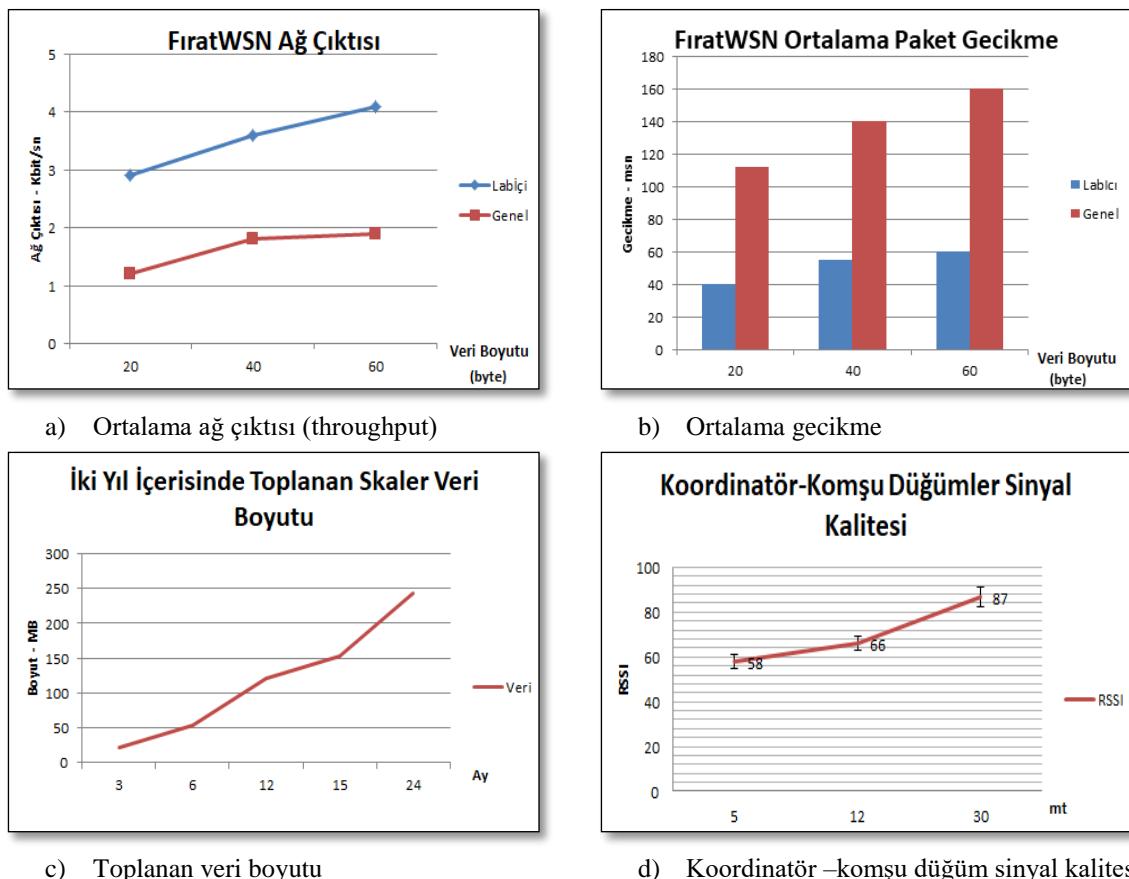
Şekil 6. FıratZigBee topolojik görüntüsü



Şekil 7. FMonitor yazılımı üzerinden örnek yönetim işlemleri.

FMonitor yazılımı ya ön tanımlı olarak ya da daha sonradan eklenen profil kütüphaneleri yardımıyla farklı profillere ait endpoint, cluster_ID ve command_ID çözümlemelerini otomatik olarak yapabilmektedir. Ağ yöneticisi

tarafından bu parametreler üzerinden gerçekleştirilen bazı yönetimsel işlemler Şekil 7'de gösterildiği gibi yapılmaktadır. Şekil 8'de ise FıratZigBee için bazı performans test değerlerine ait grafikler verilmiştir.



Şekil 8. FıratZigBee genel ağ performans verileri

Şekil 8.a, binadaki laboratuvar içi ve genel ağ yapısı içerisinde iletilen 20, 40 ve 60 byte'lık veri boyutları için FıratZigBee ağ çıktısını (throughput) göstermektedir. Ağdaki veri toplama periyotları, düğüm sayıları, düğüm üzerinde kullanılan buffer veri yapısı ve boyutu ağ çıktısını doğrudan etkileyen parametreler olup, kullanılan sensör kaynaklarındaki heterojenlikten dolayı, ölçüm sonuçları mevcut durumdaki ortalama sonuçları göstermektedir.

Şekil 8.b ortalama gecikme değerlerini, c toplanan veri boyutunu (MB olarak), d ise koordinatör düğümün kapsama alanı içerisinde bulunan farklı uzaklıklardaki komşu düğümlerden aldığı sinyal seviyelerini göstermektedir. Sensörlerden alınan veriler, büyük veri optimizasyonu açısından özel bir

formatta text dosyasında saklanmaktadır. Şekil 9'da verilen veri saklama formatında, sensörlerden (kaynaklardan) okunan değerlerin yanısıra kaynak düğüm, veri alınan son nokta (end point), cluster_ID, tarih ve zaman gibi ek verilerle tutulmaktadır.

Toplanan verilerin, hem kapladığı alan hem de hızlı arama açısından optimum şekilde depolanması da KSA'lar için oldukça önemlidir. Zaman içerisinde toplanan veri boyutlarının çok hızlı artması çoğu zaman kaçınılmaz olmaktadır. Toplanan verilerde tekrarlar ve artıklıklar doğal olarak depolama sistemindeki verimi düşürmektedir. Bu problemi vurgulamak ve çözmek açısından FıratZigBee ağından toplanan sensör verileri üzerinde optimizasyon çalışması da gerçekleştirilebilmektedir.

DüğümID;PANID;ClusterID;Endpoint;KaynakVeri1;.....; KaynakVeriN;Tarih;SaatVerisi;Lokasyon;
--

Şekil 9. Bina içi düğümlerden alınan veriler için text veri saklama formatı

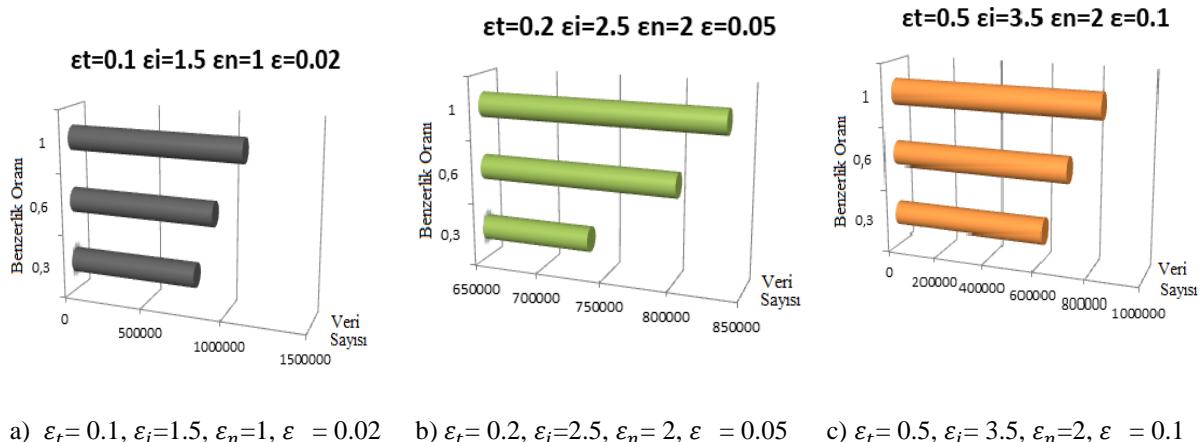
DüğümID;PANID;ClusterID;Endpoint;KaynakVeri1;.....; KaynakVeriN;Tarih;SaatVerisi;Lokasyon;
0013A20040CS4099;1202;C105;E8;HS1cakl1k=23,70 Isık=1023;12.03.18;11:43:02 AM;
0013A20040BF5782;1202;C105;E8;HS1cakl1k=22,64 Isık=1023;12.03.18;11:46:02 AM;
0013A20040CS3DCF;1202;C105;E8;HS1cakl1k=24,05 Isık=1023;12.03.18;11:47:02 AM;
0013A20040BD281A;1202;C105;E8;HS1cakl1k=23,46 Isık=1023;12.03.18;11:48:02 AM;
0013A20040CS4099;1202;0000:00;00;12.03.18;11:51:02 AM; → Buzuk Veri
0013A20040BF5782;1202;C105;E8;HS1cakl1k=22,64 Isık=1023;12.03.18;11:54:02 AM;
0013A20040CS4099;1202;C105;E8;HS1cakl1k=23,81 Isık=1023;12.03.18;11:55:02 AM;
0013A20040CS3DCF;1202;C105;E8;HS1cakl1k=24,05 Isık=1023;12.03.18;11:58:02 AM;
0013A20040BD281A;1202;C105;E8;HS1cakl1k=23,59 Isık=1023;12.03.18;11:59:02 AM;
0013A20040BF5782;1202;C105;E8;HS1cakl1k=22,76 Isık=1023;12.03.18;12:02:02 PM;
0013A20040CS4099;1202;C105;E8;HS1cakl1k=23,70 Isık=1023;12.03.18;12:03:02 PM;
0013A20040CS3DCF;1202;C105;E8;HS1cakl1k=24,05 Isık=1023;12.03.18;12:06:02 PM;
0013A20040BD281A;1202;C105;E8;HS1cakl1k=23,58 Isık=1023;12.03.18;12:08:02 PM;
0013A20040CS4099;1202;C105;E8;HS1cakl1k=23,81 Isık=1023;12.03.18;12:11:02 PM;
0013A20040CS3DCF;1202;C105;E8;HS1cakl1k=24,05 Isık=1023;12.03.18;12:14:02 PM;
0013A20040BD281A;1202;C105;E8;HS1cakl1k=22,76 Isık=1023;12.03.18;12:15:02 PM;
0013A20040CS4099;1202;C105;E8;HS1cakl1k=23,46 Isık=1023;12.03.18;12:16:02 PM;
0013A20040CS3DCF;1202;C105;E8;HS1cakl1k=23,81 Isık=1023;12.03.18;12:19:02 PM;
0013A20040CS4099;1202;C105;E8;HS1cakl1k=24,05 Isık=1023;12.03.18;12:22:02 PM;
0013A20040BF5782;1202;C105;E8;HS1cakl1k=22,76 Isık=1023;12.03.18;12:23:02 PM;
0013A20040BD281A;1202;C105;E8;HS1cakl1k=23,46 Isık=1023;12.03.18;12:24:02 PM;

a) Toplanan ham veri

0013A20040CS3DCF;1202;C105;E8;HS1cakl1k=24,05 Isık=1023;12.03.18;12:06:02 PM;
0013A20040BF5782;1202;C105;E8;HS1cakl1k=22,76 Isık=1023;12.03.18;12:07:02 PM;
0013A20040BD281A;1202;C105;E8;HS1cakl1k=23,58 Isık=1023;12.03.18;12:08:02 PM;
0013A20040CS4099;1202;C105;E8;HS1cakl1k=23,81 Isık=1023;12.03.18;12:11:02 PM;
0013A20040CS3DCF;1202;C105;E8;HS1cakl1k=24,05 Isık=1023;12.03.18;12:14:02 PM;
0013A20040BD281A;1202;C105;E8;HS1cakl1k=22,76 Isık=1023;12.03.18;12:15:02 PM;
0013A20040CS4099;1202;C105;E8;HS1cakl1k=23,46 Isık=1023;12.03.18;12:16:02 PM;
0013A20040CS3DCF;1202;C105;E8;HS1cakl1k=23,81 Isık=1023;12.03.18;12:19:02 PM;
0013A20040CS4099;1202;C105;E8;HS1cakl1k=24,05 Isık=1023;12.03.18;12:22:02 PM;
0013A20040BF5782;1202;C105;E8;HS1cakl1k=22,76 Isık=1023;12.03.18;12:23:02 PM;
0013A20040BD281A;1202;C105;E8;HS1cakl1k=23,46 Isık=1023;12.03.18;12:24:02 PM;
Kat2;Lab0nu;1202;C105;E8;HS1cakl1k=23,52 Isık=1023;12.03.18;12:22:02 PM;
0013A20040BF5782;1202;C105;E8;HS1cakl1k=24,05 Isık=1023;12.03.18;12:23:02 PM;
0013A20040BF5782;1202;C105;E8;HS1cakl1k=22,76 Isık=1023;12.03.18;12:28:02 PM;
0013A20040CS4099;1202;C105;E8;HS1cakl1k=23,70 Isık=1023;12.03.18;12:29:02 PM;
0013A20040BD281A;1202;C105;E8;HS1cakl1k=23,46 Isık=1023;12.03.18;12:32:02 PM;
Kat2;Lab0nu;1202;C105;E8;HS1cakl1k=23,52 Isık=1023;12.03.18;12:22:02 PM;
0013A20040BF5782;1202;C105;E8;HS1cakl1k=24,05 Isık=1023;12.03.18;12:23:02 PM;
0013A20040BF5782;1202;C105;E8;HS1cakl1k=22,76 Isık=1023;12.03.18;12:28:02 PM;
0013A20040CS4099;1202;C105;E8;HS1cakl1k=23,70 Isık=1023;12.03.18;12:29:02 PM;
0013A20040BD281A;1202;C105;E8;HS1cakl1k=23,46 Isık=1023;12.03.18;12:32:02 PM;
Kat2;HocaKoridor;1202;C105;E8;HS1cakl1k=22,82 Isık=914;12.03.18;13:02:02 PM; → Benzer verilerin birleştirilmesi
0013A20040BF5782;1202;C105;E8;HS1cakl1k=22,82 Isık=914;12.03.18;13:02:02 PM;
0013A20040CS3DCF;1202;C105;E8;HS1cakl1k=24,05 Isık=1023;12.03.18;13:02:02 PM;
0013A20040CS4099;1202;C105;E8;HS1cakl1k=23,70 Isık=1023;12.03.18;13:02:02 PM;
0013A20040BD281A;1202;C105;E8;HS1cakl1k=23,58 Isık=1023;12.03.18;13:02:02 PM;
0013A20040BF5782;1202;C105;E8;HS1cakl1k=22,76 Isık=1023;12.03.18;13:02:02 PM;

b) Optimize edilmiş veri

Şekil 10. FıratZigBee ağından toplanan veri dosyalarının optimizasyonu



a) $\varepsilon_t = 0.1, \varepsilon_i = 1.5, \varepsilon_n = 1, \varepsilon = 0.02$ b) $\varepsilon_t = 0.2, \varepsilon_i = 2.5, \varepsilon_n = 2, \varepsilon = 0.05$ c) $\varepsilon_t = 0.5, \varepsilon_i = 3.5, \varepsilon_n = 2, \varepsilon = 0.1$

Şekil 11. Farklı eşik değerler için DA işlem sonuçları

Ortak bölgesel düğümlerden elde edilen eş zamanlı benzer verilerin, tekrar verilerin ve bozuk verilerin saptanması; sistem taraflı optimum veri toplama algoritmaları (Data Aggregation - DA) yardımıyla başılarabilmektedir. FıratZigBee alt yapısında toplanan ısı, nem, oksijen verileri üzerinde gerçekleştirilen DA işlemleri “Dice Benzerlik Fonksiyonu” temellidir [17]. Denklem 1 ‘de ifadesi verilen Dice benzerlik fonksiyonu iki veri seti (D_1, D_2) arasındaki ortak verilere göre sonuç döndürmektedir. Veri setleri arasındaki benzerlik oranı ise Denklem 2 ‘de gösterildiği gibi ön tanımlı bir eşik değere (ε) göre belirlenmektedir. Burada $d_i, d_j \in D_1, D_2$ ‘dir. Bu denklemlere göre gerçekleştirilen DA işlemleriyle, 0.3 ‘den 1 ‘e kadar farklı benzerlik oranları için veri küçültme işlemleri, FıratZigBee ağının vasıtasiyla toplanmış olan yaklaşık 1.1 milyon veri üzerinde yapılmış ve oluşturulan ortak lokasyonlara göre denenmiştir. Örnek bir veri küçültme işleminden önce ve sonra oluşan veri dosya yapıları Şekil 10 a ve b’de verilmiştir.

$$D(D_1, D_2) = \frac{2 \times |D_1 \cap D_2|}{|D_1| + |D_2|} \quad (1)$$

$$Bnz(d_i, d_j) = \begin{cases} 1 & \text{eğer } \|d_i - d_j\| < \varepsilon \\ 0 & \text{Diğer durumlar} \end{cases} \quad (2)$$

Benzerlik oranlarının belirlenmesi uygulama ve senaryo bağımlı bir parametre olup yönetimsel

açıdan bilimsel veya gözlemsel analizlerle saptanan değerlerdir. Benzer şekilde bu oranlar farklı sensör kaynaklar için değişkenlik gösterebilmektedir. Bu çalışmada, ısı, nem ve Oksijen eşik karşılaştırmaları için farklı eşik değerleri (ε_t , sıcaklık, ε_i ışık, ε_n nem, ε oksijen) kullanılmıştır. Bu eşik değerleri sensör tipine göre değişiklik göstermektedir ve uygulama özelliğine göre belirlenmektedir.

Uygulama sürecinde toplanan ısı, nem ve oksijen veri setleri için belirlenmiş ε eşik değerlerine ve istenilen benzerlik oranlarına (0.33, 0.66 ve 1) uygun veri setlerinin benzer kabul edilerek tek bir veri seti olarak tanımlandığı deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 11’de verilmiştir. Şekil 11.a’daki ε eşik değerlerine göre en düşük benzerlik oranı (%33) için yaklaşık 800 bin veriye kadar düşüş sağlanırken, en yüksek veri benzerlik oranı için (%100) bu değer yaklaşık 1.08 milyon olmuştur. Şekil 11.b ve c’den görüldüğü gibi eşik değerlerdeki artışlar bu veri setlerini daha da düşürebilmektedir. Ancak burada dikkat edilmesi gereken temel nokta veri küçültmede yaşanacak veri kayıplarının karar mekanizmasını doğrudan etkileyeceğidir. Bu nedenle uygun eşik değerlerinin uygulamaya göre deşeceği dikkate alınmalıdır.

6. Sonuç

Bu makalede Fırat Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Kablosuz Sensör Ağları laboratuvarında geliştirilen FıratZigBee kablosuz

sensör ağı sistemi ve gerçekleştirmeye detayları sunulmuştur. FıratZigBee KSA, ZigBee teknolojisi temelli olup omurga yapısı genişlemeye uygundur. FıratZigBee, laboratuvar kapsamında geliştirilen ve FNode olarak isimlendirilmiş düğümlerden oluşmaktadır.

Bu düğümler hem FFD hem de RFD tipi olarak çalışabilmektedir. İşlemci olarak ATMEL, radyo ünitesi olarak Digi firmasına ait teknolojileri kullanmakta olup geliştirilen SAM (Sensör Aktutaör Modülü) kartları yardımıyla farklı sensör ve aktuatör kaynaklarla aynı anda rahatlıkla çalışabilmektedir. Buna ek olarak geliştirilmiş olan FMonitör yazılımı sayesinde FıratZigBee KSA ve düğümleri uzaktan kontrol edilebilmekte ve toplanan veriler sistem üzerinde depolanabilmektedir. Sensörlerden toplanan verilerin optimizasyon operasyonları için “Dice Benzerlik Fonksiyonu” kullanılmış ve gereksiz veri depolanmasının önüne geçilmiştir.

FıratZigBee KSA sisteminin başlangıç amacı, KSA konusunda lisans ve lisans üstü çalışmalar için gerçek bir uygulama platformu geliştirmektir. Gerçekleştirilen bu sistem halihazırda deneyel uygulamalarda başarıyla kullanılmaktadır. Bir sonraki safhada IoT teknolojileri yardımı ile diğer üniversiteler ve araştırma merkezleri ile ortak KSA uygulama platformlarının ve sanal KSA uygulama platformlarının kurulabilmesine yönelik bir altyapı sağlayabileceği, önemli bir sonuç olarak görülmektedir.

7. Kaynaklar

1. Rawat P., Singh K.D., Chaouchi H., Bonnin J. M. (2014). Wireless sensor networks: a survey on recent developments and potential synergies, *The Journal of Supercomputing*, **68**:1–48
2. Yildirim G., Tatar Y. (2017). On WSN heterogeneity in IoT and CPSs, Computer Science and Engineering (UBMK) International Conference, 5-8 Oct., Antalya, Turkey, doi: 10.1109/UBMK.2017.8093421
3. Akyildiz I.F., Su W., Sankarasubramaniam Y., Cayirci E. (2002). A survey on sensor networks, *IEEE Communications Magazine*, doi: 10.1109/MCOM.2002.1024422
4. Demirkol I., Ersoy C., Alagoz F. (2006). MAC protocols for wireless sensor networks: a survey, *IEEE Communications Magazine*, doi: 10.1109/MCOM.2006.1632658
5. Guo W., Zhang W. (2014). A survey on intelligent routing protocols in wireless sensor networks, *Journal of Network and Computer Applications*, Vol: **38**: 185-201, doi: 10.1016/j.jnca.2013.04.001
6. Prathap U., Deepa P. Shenoy, Venugopal K.R., Patnaik L.M. (2012). Cloud and Services Computing Wireless Sensor Networks Applications and Routing Protocols: Survey and Research Challenges, *Cloud and Services Computing (ISCOS) International Symposium*, 17-18 Dec., Mangalore, India
7. Khanafar M., Guennoun M., Mouftah H. T. (2013). A Survey of Beacon-Enabled IEEE 802.15.4 MAC Protocols in Wireless Sensor Networks, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 16:2,doi:10.1109/SURV.2013.112613.00094
8. Lakshmisudha K., Arun C. (2013). Research on power optimization in physical and MAC layer of wireless sensor networks — A survey, *Intelligent Systems and Signal Processing (ISSP) International Conference*, 1-2 March, Gujarat, India, doi: 10.1109/ISSP.2013.6526915
9. Davis A., Chang H. (2012). A Survey Of Wireless Sensor Network Architectures, *International Journal of Computer Science and Engineering Survey (IJCSES)*, **3**:6
10. Kalaivani T., Allirani A., Priya P. (2011), A survey on Zigbee based wireless sensor networks in agriculture, *Trendz in Information Sciences and Computing (TISC)*,3rd International Conference, 8-9 Dec., Chennai, India
11. www.z-wave.com, en son ziyaret 09.09.2018
12. Narayanan R. P., Sarath T. V., Vineeth V. V. (2016). Survey on Motes Used in Wireless Sensor Networks: Performance & Parametric Analysis, *Wireless Sensor Network*, **8**: 67-76.
13. Soua R., Minet, P. (2011). A survey on multichannel assignment protocols in Wireless Sensor Networks, *Wireless Days (WD)*, IFIP, Niagara Falls, Canada, doi: 10.1109/WD.2011.6098201
14. http://wsn.cse.wustl.edu/images/e/e3/Imote2_Data_sheet.pdf
15. <https://www.eol.ucar.edu/isf/facilities/isa/internal/CrossBow/DataSheets/stargate.pdf>
16. Farooq M. O., T. Kunz, (2014). Wireless Sensor Networks Testbeds and State-of-the-Art Multimedia Sensor Node, *Application Mathematicazl Information Science*, **8**: 935-940
17. Medlej M. (2014). Big data management for periodic wireless sensor networks, Doctoral Thesis, The University of Franche Comté, Besançon, France.