

**ARAZİ UYGULAMALARI İÇİN ÇOK NOKTALI VERİ
TOPLAMA VE KABLOSUZ İLETİM SİSTEMİ
GELİŞTİRİLMESİ VE UYGULANMASI**

**DESIGN AND IMPLEMENTION OF MULTIPOINT DATA
COLLECTION AND WIRELESS TRANSMISSION SYSTEM
FOR TERRAIN APPLICATIONS**

SEYMUR SHUKUROV

Prof. Dr. Uğur Baysal
Tez Danışmanı

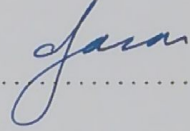
Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim - Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

2018

SEYMUR SHUKUROV'un hazırladığı **Arazi Uygulamaları İçin Çok Noktalı Veri Toplama ve Kablosuz İletim Sistemi Geliştirilmesi ve Uygulanması** adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Erkan Afacan

Başkan



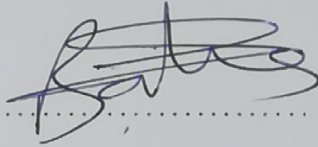
Prof. Dr. Uğur Baysal

Danışman



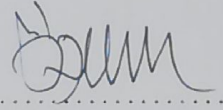
Prof. Dr. Birsen Saka Tanatar

Üye



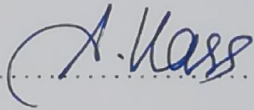
Dr. Öğr. Üyesi Yakup Özkazanç

Üye



Prof. Dr. Ali Kara

Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

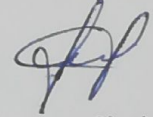
Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezin / raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe Üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “ Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge” kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi / H. Ü. Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- o Enstitü / Fakülte yönetim kurulu kararı ile tezin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir. ⁽¹⁾
- o Enstitü / Fakülte yönetim kurulunun gerekçeli kararı ile tezin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren Ay ertelenmiştir. ⁽²⁾
- o Tezimle ilgili gizlilik kararı verilmiştir. ⁽³⁾

21 / 09 / 2018



Seymur Shukurov

“Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge”

- (1) Madde 6. 1. Lisansüstü teze ilgili patent başvurusu yapılması veya patent alma sürecinin devam etmesi durumunda, tez danışmanının önerisi ve enstitü anabilim dalının uygun görüşü üzerine enstitü veya fakülte yönetim kurulu iki yıl süre ile tezin erişime açılmasının ertelenmesine karar verebilir
- (2) Madde 6. 2. Yeni teknik, materyal ve metotların kullanıldığı, henüz makaleye dönüşmemiş veya patent gibi yöntemlerle korunmamış ve internetten paylaşılması durumunda 3. Şahıslara veya kurumlara haksız kazanç imkanı oluşturabilecek bilgi ve bulguları içeren tezler hakkında tez danışmanının önerisi ve enstitü anabilim dalının uygun görüşü üzerine enstitü ve fakülte yönetim kurulunun gerekçeli kararı ile altı ayı aşmamak üzere tezin erişime açılması engellenebilir.
- (3) Madde 7. 1. Ulusal çıkarları veya güvenliği ilgilendiren, emniyet, istihbarat, savunma ve güvenlik, sağlık vb. konulara ilişkin lisansüstü tezlerle ilgili gizlilik kararı, tezin yapıldığı kurum tarafından verilir*. Kurum ve kuruluşlarla yapılan işbirliği protokolü çerçevesinde hazırlanan lisansüstü tezlere ilişkin gizlilik kararı ise, ilgili kurum ve kuruluşun önerisi ile enstitü veya fakültenin uygun görüşü üzerine üniversite yönetim kurulu tarafından verilir. Gizlilik kararı verilen tezler Yükseköğretim Kuruluna bildirilir.
Madde 7. 2. Gizlilik kararı verilen tezler gizlilik süresince enstitü veya fakülte tarafından gizlilik kuralları çerçevesinde muhafaza edilir, gizlilik kararının kaldırılması halinde Tez Otomasyon Sistemine yüklenir.

* Tez danışmanının önerisi ve enstitü anabilim dalının uygun görüşü üzerine enstitü veya fakülte yönetim kurulu tarafından karar verilir.

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

21. / 09 / 2018



Seymur Shukurov

ÖZET

ARAZİ UYGULAMALARI İÇİN ÇOK NOKTALI VERİ TOPLAMA VE KABLOSUZ İLETİM SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ VE UYGULANMASI

SEYMUR SHUKUROV

Yüksek Lisans, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Uğur Baysal

Eylül 2018, 87 sayfa

Ulaşılması zor olan, gerekli altyapının bulunmadığı alanlarda sistem kontrolü ve takibini sağlamak ciddi bir sorundur. Bu sorunu çözmek için kablosuz iletişim sistemleri tercih edilmektedir. Bunun en önemli nedenlerinden bazıları bu sistemlerin düşük maliyetli, kurulumunun kolay olması ve bakım ihtiyaçlarının minimal seviyelerde olmasıdır. Bu sistemler genellikle birkaç merkezi istasyondan ve bunlara bağlı ikincil istasyonlardan oluşmaktadır.

Bu tez kapsamında açık veya kapalı alanda çalışacak, anlık olarak 4 analog voltaj değerini okuyabilme kapasitesine sahip ve kablosuz haberleşen sensör birimlerinde oluşan Kablosuz Sensör Ağı (KSA) tasarlanmış, 1 Merkez 3 İkincil İstasyon olmak üzere toplam 4 biriminden oluşan KSA prototipi üretilmiş ve başarıyla test edilmiştir.

Sistem kablosuz haberleşme için kullanıma açık ISM bandı frekanslarını (2.4 - 2.5 GHz) kullanmaktadır. Bu bandı kapsayan ve frekans, haberleşme hızı, çıkış gücü gibi iletişim kanalı ayarlarını yapmaya izin sağlayan nrf24l01 modülü alıcı-verici olarak kullanılmıştır. Bu birim SPI haberleşmesi ile işlemciden sayısal verileri okuyarak onları paket haline getirip uygun birime göndermektedir. Bu birim 1000 metreye kadar haberleşmeyi desteklemektedir ve yapılan testlerde bu özellik başarılı bir şekilde test edilmiştir. Sensör birimlerinde işlemci olarak dahili Analog-Sayısal Dönüştürücü (ASD) barındıran Atmel şirketine ait mikrodenetleyici kullanılmıştır. Dahili ADC sayesinde voltaj örneklenmesi

için ek devre elemanlarına gerek duyulmamıştır ve hem güçten, hem de boyutlardan tasarruf edilmiştir. Bunu dışında her birimde 4 adet yeniden şarj edilebilir AA pil bulunmaktadır. Merkezi istasyonda bunlara ek olarak alınmış verilerin kaydedilmesi için hafıza kartı ve okuyucusu ile zaman senkronizasyonu için saat modülü bulunmaktadır. Bu birimler sayesinde alınmış veriler tarih ve saat değerleri ile beraber hafıza kartına 'text' dosyası halinde kaydedilmektedir. Modüler yapısı sayesinde istenildiği zaman merkezi istasyon kullanıcı bilgisayarına bağlanarak seri haberleşme ile anlık olarak sensör birimlerden alınan voltaj değerleri izlenebilir. Bu amaçla MATLAB kullanıcı arayüzü geliştirilmiş ve başarılı şekilde test edilmiştir. Son olarak sistem gerçek kullanım koşulları altında farklı arazi ortamlarında test edilmiş ve sistemin düzgün çalıştığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kablosuz Sensör Ağı, Zincir-Tipi Topoloji, Kablosuz Veri Gönderimi, Uzaktan Gözetleme, 2.4 GHz İletişim

ABSTRACT

DESIGN AND IMPLEMENTION OF MULTIPOINT DATA COLLECTION AND WIRELESS TRANSMISSION SYSTEM FOR TERRAIN APPLICATIONS

SEYMUR SHUKUROV

**Master of Science, Department of
Electrical and Electronics Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Uğur Baysal

September 2018, 87 pages

It is a serious problem to provide system control and follow-up in areas that are difficult to reach and where there is no necessary infrastructure. Wireless communication systems are preferred to solve this problem. Some of the most important reasons for this are low cost, easy to install, and minimal maintenance requirements. These systems usually consist of a few central stations and their secondary stations.

In this thesis, Wireless Sensor Network (WSN) prototype consisting of total 4 units (1 Central and 3 Secondary) has been designed and manufactured. Sensor units communicate using wireless communication and have capacity to read 4 analog voltage values in real time mode. They can be placed in both open and closed areas.

The system uses the open ISM band frequencies (2.4 - 2.5 GHz) for wireless communication. The nrf24l01 module, which working range includes this band and allows to make communication channel settings such as frequency, communication speed, output power, is used as a transceiver. This unit reads the numerical data from the processor by SPI communication and packs them into a suitable packages ready to be sent. This unit supports up to 1000 meters of communication and this property has been successfully tested. The sensor units use a microcontroller from Atmel which houses a built-in Analogue to Digital Converter (ADC) as a processor. Thanks to the internal

ADC, additional circuitry is not required for voltage sampling and both power and size are saved. Apart from this, there are 4 rechargeable AA batteries in each unit. In the central station, there is a memory card with the reader for reading out the received data and a time module for time synchronization. The received data are recorded in the 'text' file on the memory card together with the date and time data. Thanks to the modular structure, the central station can be connected to the user's computer at any time and the voltage values received from the sensor units can be monitored instantaneously by serial communication. For this purpose, the MATLAB user interface has been developed and tested successfully. Finally, the system has been tested in different terrestrial environments under actual working conditions and it has been observed that the system works as expected.

Keywords: Wireless Sensor Network, Chain-Type Topology, Wireless Data Transfer, Remote Monitoring, 2.4 GHz Communication

TEŞEKKÜR

Bu tezin ilk gününden itibaren beni cesaretlendiren, her türlü maddi ve manevi desteęi eksik etmeyen sayın Prof. Dr. Uğur BAYSAL'a teşekkür ederim.

Bilgi ve deneyimlerini paylaşan deęerli jüri üyelerine teşekkür ederim.

Maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve beni daima destekleyen aileme teşekkür ederim.

Tez sürecinde gösterdikleri anlayış ve destek için PROFEN'deki yönetici ve çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu süreci benimle birlikte yaşayan ve her zaman yanımda olan Ekin Can Erkuő'a, İsmail Çor'a, Görkem Tünay'a, Fatih Deniz Erdoğan'a, İbrahim Özkan'a, İbrahim Kumbet'e verdikleri destek için teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER	ix
ÇİZELGELER	xi
KISALTMALAR	xii
SÖZLÜK DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. KABLOSUZ SENSÖR AĞLARI	5
2.1. Sensör Ağlarının Tarihsel Gelişimi	5
2.2. Fiziksel Katman	6
2.3. Ortam Erişim Kontrolü	10
2.3.1. Çekişmeli Ortam Erişimi	11
2.3.2. Ön Ayarlamalı Ortam Erişim	12
2.3.3. Hibrit Ortam Erişim	13
2.4. Ağ Topolojileri	13
2.5. Kablosuz Sensör Birimi Mimarisi	16
2.5.1. Sensör Alt Birimi	17
2.5.2. İşlemci Alt Birimi	17
2.5.3. İletişim Alt Birimi	18
2.6. Sensör Ağlarında Güvenlik	20
2.6.1. Güvenlik Kısıtlamaları	21
2.6.2. Güvenlik Gereksinimleri	21
2.6.3. Güvenlik Saldırıları	22

2.6.4. Savunma Yöntemleri	23
2.7. Sensör Ağları Uygulamaları	24
3. SİSTEM TASARIMI	27
3.1. İşlemci	27
3.2. İletişim Sistemi	27
3.3. İkincil Birimler	28
3.4. Sistem Mimarisi	29
3.5. Donanım	32
3.6. Yazılım	35
3.7. Prototip Kullanımı	39
3.7.1. Denetimsiz Kullanım	39
3.7.2. Denetimli Kullanım	40
4. TESTLER	42
4.1. Teknik Performans Testleri	42
4.2. Çalışma Frekansı Seçimi	44
4.3. Veri Paketi Hata Oranı	46
4.4. İletim Mesafesi Testi	46
4.5. Sistem Saha Testi	49
5. SONUÇLAR	53
KAYNAKLAR	55
EK A	60
A.1. Kablosuz İletişim Modülü: nRF24L01+	60
A.1.1. nRF24L01+ Özellikleri	60
A.1.2. nRF24L01+ Kontrolü	64
A.1.2.1. Power Down Durumu	65
A.1.2.2. Standby Durumu	65
A.1.2.3. RX Durumu	66

A.1.2.4. TX Durumu	66
A.1.3. Enhanced ShockBurst™	67
A.1.3.1. Enhanced ShockBurst™ Paket Formatı	68
EK B	71
EK C	77
C.1. Sensör Kutusu Teknik Çizimleri	78
EK D	82
D.1. I2C	82
D.1.1. I2C Donanımı	82
D.1.2. Haberleşme Akışı	83
D.2. SPI	83
D.2.1. SPI Haberleşme Modları	84
ÖZGEÇMİŞ	86

ŞEKİLLER

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. KSA Uygulamaları.	5
Şekil 2.2. KSA haberleşme alt birimleri.	7
Şekil 2.3. ASK, FSK ve PSK modülasyon türleri [17].	10
Şekil 2.4. (a) Yıldız, (b)Küme/Ağaç, (c) Örgü topoloji sistemleri.	15
Şekil 2.5. Genel Kablosuz Sensör Birimi mimarisi.	16
Şekil 2.6. 1-100 km mesafesine ve 1-100 GHz frekans aralığına ait FSPL grafiği.	20
Şekil 3.1. Genel sistem yapısı.	29
Şekil 3.2. Merkezi istasyonun mimarisi.	29
Şekil 3.3. Diğer istasyonların mimarileri.	30
Şekil 3.4. Zamana göre birimler arası haberleşme.	30
Şekil 3.5. Merkezi birimin çalışma akışı.	31
Şekil 3.6. Sensör birimlerin çalışma akışı.	31
Şekil 3.7. Arduino UNO 'Shield' 3 boyutlu görüntüsü.	34
Şekil 3.8. Arduino UNO 'Shield' PCB çizimi.	34
Şekil 3.9. KSA Birimi Dış Görünümü.	35
Şekil 3.10. KSA Merkezi İstasyon Yapısı.	36
Şekil 3.11. KSA Diğer İstasyonların Yapısı.	36
Şekil 3.12. MultiCeiver™ yapısı.	38
Şekil 3.13. Tezde kullanılan haberleşme yapısı.	39
Şekil 3.14. MATLAB Kullanıcı Arayüzü.	40
Şekil 4.1. Kütüphane kullanım yoğunluk grafiği.	44
Şekil 4.2. Yaşam alanı kullanım yoğunluk grafiği.	45
Şekil 4.3. Açık alan kullanım yoğunluk grafiği.	45
Şekil 4.4. Veri PKO test düzeneği.	47
Şekil 4.5. Kapalı ofis test planı.	50

Şekil 4.6. Konya açık alan test sahası.	51
Şekil 4.7. Konya açık alan test sahası.	51
Şekil 4.8. Beytepe açık alan test sahası.	52
Şekil A.1. nRF24L01+ Blok Şeması [50].	60
Şekil A.2. nRF24L01+ QFN20 4x4 paketinin pin dizilişi [50].	61
Şekil A.3. Modül kontrolü durum diyagramı [50].	64
Şekil A.4. Multiceiver™ yapısı [50].	70
Şekil C.1. Sensör Birimi Dış Görünümü.	79
Şekil C.2. Sensör Birimi Dış Görünümü.	80
Şekil C.3. Sensör Birimi Dış Görünümü.	81
Şekil D.1. I2C Master-Slave bağlantı şeması.	82
Şekil D.2. SPI 1 Master 3 Slave bağlantı şeması.	84
Şekil D.3. SPI Haberleşme Modları.	85

ÇİZELGELER

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1. Kaydedilmiş Sensör Verisi Örneği.	33
Çizelge 4.1. Prototip Kablosuz Sensör Ağı Teknik Özellikleri.	42
Çizelge 4.2. nRF24L01+ modülü deneysel çıkış gücü seviyeleri.	43
Çizelge 4.3. Farklı Haberleşme Ayarlarında Paket Kayıp Oranı kritik mesafesi (Metre).....	46
Çizelge 4.4. nRF24L01+ modülü güç seviyeleri.	47
Çizelge 4.5. nRF24L01+ modülü alıcı hassasiyeti verileri.	48
Çizelge 4.6. Farklı Haberleşme Ayarlarında Maksimum Haberleşme Menzili (Metre).....	49
Çizelge A.1. nRF24L01+ pin görevleri.	62
Çizelge A.2. Mutlak Maksimum Değerleri.	63
Çizelge B.1. Sensör Birimleri adres bilgileri.	77

KISALTMALAR

ADC	Analog to Digital Converter
BER	Bit Error Rate
CT	Current Transformer
DSN	Distributed Sensor Network
DSP	Digital Signal Processor
FEC	Forward Error Correction
FPGA	Field Programmable Gate Array
FSPL	Free Space Path Loss
GFSK	Gaussian Frequency-Shift Keying
I ² C	Inter-Integrated Circuit
ISM	Industrial, Scientific and Medical
ITU	International Telecommunication Union
kbps	kilo bits per second
KSA	Kablosuz Sensör Ağı
KET	Kısa Mesafe Erişimli Telsiz
mbps	mega bits per second
MAC	Medium Access Control
MCU	Microcontroller Unit
PCB	Printed Circuit Board
PT	Potential Transformer
RF	Radyo Frekansı
RTC	Real Time Clock
SPI	Serial Peripheral Interface
TDMA	Time Division Multiple Access
USB	Universal Serial Bus
WSN	Wireless Sensor Network

SÖZLÜK DİZİNİ

Alan Programlanabilir Kapı Dizisi	: Field Programmable Gate Array
Analog-Sayısal Dönüştürücü	: Analog to Digital Converter
Baskı Devre Kartı	: Printed Circuit Board
Bit Hata Oranı	: Bit Error Rate
Çok-Sekmeli	: Multi Hop
Dağıtılmış Sensör Ağı	: Distributed Sensor Network
Dijital Sinyal İşlemcileri	: Digital Signal Processors
Endüstriyel, Bilimsel ve Tıbbi	: Endustrial, Scientific and Medical
Gerçek Zamanlı Saat	: Real Time Clock
İleri Hata Düzeltme	: Forward Error Correction
Kablosuz Sensör Ağı	: Wireless Sensor Network
Ortam Erişim Kontrolü	: Medium Access Control
Radyo Frekansı	: Radio Frequency
Saçaklanma	: Fringing
Serbest Uzay Yol Kaybı	: Free Space Path Loss
Taşıyıcı-Algılamalı Çoklu Erişim	: Time-Division Multiple Access
Tek-Sekmeli	: Single Hop
Uluslararası Telekomünikasyon Birliği	: International Telecommunication Union
Uygulamaya Özel Entegre Devresi	: Application Specific Integrated Circuit
Zaman Bölmeli Çoklu Erişimi	: Time Division Multiple Access

1. GİRİŞ

Teknolojinin gelişimi ile sensör, mikrodenetleyici ve kablosuz iletişim birimlerinin maliyetleri ile boyutları önemli ölçüde azalmıştır. Bu durum onları sahalarda ve ulaşılması zor alanlarda kullanmak için ideal bir vasıta haline getirmiştir. Günümüzde sıcaklık, nem ve basınç ölçümleri, hareket algılama, gürültü tespiti yapan sensörler farklı alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Kullanım alanına göre sensörlerin fiziksel gereksinimleri de farklılık göstermekte ve uygulamaya göre darbeye dayanıklılık, güç tüketimi, iletişim ve kullanım ortamları, boyutsal kısıtlamalar gibi çeşitli tasarım şartlarını karşılayan sensörler geliştirilmiştir [1].

Mikrodenetleyici, sensör, kablosuz iletişim birimi ve güç modülü ile birleştirilince bu yapılar kendi kendine yeten bağımsız sistem olarak uzun süre çalışabilmektedir. Bu süre güç kaynağına, mikrodenetleyicinin ve sensörün güç tüketimine ve kullanım amacına göre birkaç günden birkaç yıla kadar değişebilmektedir. Kablosuz iletişim modülü de eklenmiş birimler birbiri ile veri alışverişi yapabilir, kurulduğu alandan verileri komşu birimler aracılığıyla merkezi sisteme iletebilir hale gelebilir. Kablosuz Sensör Ağı (Wireless Sensor Network, WSN, KSA) ismi verilen sistemler çok sayıda böyle birimlerin farklı topoloji türleri altında bir araya getirilmesiyle oluşturulmuştur. KSA askeri, sağlık, ev ve sanayi otomasyonu, çevresel takip gibi çok farklı alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [1].

Modern sensör ağı teknolojilerini başlangıcı 1980'lere dayanmaktadır. İlk sensör ağları Dağıtılmış Sensör Ağı (Distributed Sensor Network, DSN) olarak isimlendirilmiştir. Bunlar 10 cm civarında boyutlara sahip ve çok da küçük olmayan bilgisayarlardan kontrol edilen sistemlerdi. İnternet yapısı daha yeni yaygınlaşmaya başladığı için bu sistemlerde kullanılması verimli değildi ve uyarlanması zaman alacaktı. Daha esnek ve hatalara karşı dayanıklı ağ yapısı için sensör haberleşmesini kontrol edecek özel haberleşme odaklı işletim sistemi olan Accent gibi yazılımlar bu zorluğu ortadan kaldırmak için tasarlanmıştır. Çoğu uygulamalarda olduğu gibi KSA teknolojisi de savunma sanayi öncülüğünde gelişmiş ve son olarak boyutları 1 mm³ hacme sığacak sensör birimleri tasarlanmaya başlanmıştır. Kablosuz Sensör Ağı teknolojisi askeri uygulamalarla başlayıp önemli binaların güvenliğinde, sanayi alanlarında aletlerinin otomasyonunda, büyük

alanların çevre gözlemlerinde, sağlık sektöründe ve trafik kontrolü gibi farklı uygulamalarda hali hazırda kullanılmaya devam etmektedir [2].

İsminden de anlaşıldığı üzere KSA birbiri ile iletişim halinde olan, belirli bir alana yayılmış birden fazla alt birimden oluşan bir sensör ağ yapısıdır. Genelde bu tip yapılarda sensörlerden okunan veriler bir merkez istasyona iletilmekte, oradan da internet veya başka iletişim kanalları kullanılarak kullanıcıya veriler iletilmektedir. Sensör birim sayısı uygulama alanına göre değişim göstermekte ve sayıları birkaç birimden başlayarak on binlere kadar çıkmaktadır. Terminolojide birimlerin birbiri ile iletişim yaptığı sanal haberleşme ağ dizilimine topoloji denmektedir. Uygulamalarda KSA sistemlerinde genelde üç temel topoloji kullanılmaktadır: Yıldız, Ağaç ve Örgü. Bunların dışında olan dizilimler bahsedilen topolojilerin türevleridir [3].

Sistem olarak birçok sorunun üstesinden gelinse de KSA'larda tasarımı zorlayan bazı kısıtlar mevcuttur. Bunlardan en önemlisi sensör birimlerinin güç kapasitesidir. KSA birimleri genellikle açık alan şartlarında kullanıldıkları için güç kaynağı kısıtlı kapasiteye sahip olmaktadır. Bu nedenle sistem tasarımı yapılırken bu kistas göz önünde bulundurulmaktadır. Diğer kısıtlama gücün en çok harcandığı iletişim alanı ile ilgilidir. KSA'lar tanımı gereği kablosuz iletişim kullanmakta ve bu da kendi sırasında önemli miktarda güç istemektedir. İletim alanındaki güç sorununu çözmek için daha fazla alt birim kullanılması, alternatif güç kaynaklarının bulunması gibi çözümler uygulanmaktadır [4].

KSA alt birimleri temel olarak dört ana bölümden oluşmaktadır. Bunlardan ilki ve belki de en önemli olanı güç kaynağıdır. En çok kullanılan güç kaynaklarına örnek olarak pil ve güneş enerjisi verilebilir. RFID haberleşme kullanan bazı uygulamalarda enerji direk haberleşme sinyalinden alınabilmektedir. Giyilebilir KSA'lar sistem beslemesi için insan vücudu tarafından üretilen enerjiyi kullanabilmektedir. Mikro-motorlar, radyoaktif maddeler, sıcaklık farkı, titreşimler ve rüzgar diğer fiziksel değişkenler sensör birimleri için güç kaynağı olarak kullanılabilir [5].

İşlemci birimi KSA sensör birimlerinin temelini oluşturmaktadır. Bu birim farklı alt birimleri iletişim protokolleri ile birbirine bağlayarak sistem bütünlüğünü sağlamaktadır. KSA için Mikrodenetleyici, Dijital Sinyal İşleyiciler, Uygulamaya Özel Entegre Devre,

Alan programlanabilir Kapı Dizisi gibi farklı işlemci türleri kullanılabilir. En uygun işlemci seçimi KSA'nın uygulama alanına göre değişim göstermektedir [6].

Sensörler fiziksel niceliği elektriksel sinyale dönüştüren cihazlardır. İsminden de anlaşıldığı üzere sensörler KSA'ların temel yapı taşlarıdır. Ölçtüğü fiziksel özelliğe göre sensörler farklılık göstermektedir. KSA'larında elektriksel, manyetik, termal, mekanik ve kimyasal nicelikleri ölçen sensör birimleri geniş kullanım alanına sahiptir. Her sensör türü kendine has karakteristik özelliklere sahiptir. Transfer fonksiyonu, hassaslık, dinamik aralık, gürültü seviyesi gibi özellikler bunlardan en önemlileridir [7].

KSA'da birimler haberleşme için alıcı-verici devreleri kullanmaktadır. Bazı uygulamalar bu amaçla optik iletişimi tercih etse de, genelde uygulama kolaylığından dolayı haberleşme için Radyo Frekansları (RF) kullanılmaktadır. Kullanılan frekans uygulamaya göre değişiklik gösterse de genelde lisans gerektirmeyen bantlar seçilmektedir. Kullanım için izin istemediğinden bu bantlar yoğun olarak diğer uygulamalar tarafından kullanılmakta ve sisteme olası bozucu etkiler göstermektedir. Sistem frekans seçimi yapılırken bu husus göz önünde bulundurulmalıdır. Düşük maliyetli haberleşme cihazları 20-50 kbps (kilo bits per second) hız sunmakta ve 315/433/868/916 MHz bantlarını kullanmaktadır. Daha yeni modellerde ise gelişen mikrodenetleyici teknolojisi sayesinde 250 kbps gibi hızlarda 2.4 - 2.48 GHz frekans aralıklarında kullanılabilir [8].

Tez kapsamında, Ağaç Topolojisinin özel durumu olan Zincir topolojisi altında belirli noktalarda konumlanmış ve ölçülmüş verileri merkezi istasyona komşu birimler aracılığı ile ileten KSA tasarlanmıştır. Daha sonra tasarlanmış olan KSA baz alınarak 4 adet sensör biriminden oluşan prototip üretilmiştir. Prototip üretiminde uygulama için en uygun işlemci, haberleşme ve güç birimleri seçilmiştir. Bu birimler uygun haberleşme protokolleri aracılığıyla birleştirilmiş ve arazi uygulamaları için uygun boyutlu kutunun içerisine yerleştirilmiştir. KSA performansı farklı ölçütler baz alınarak değerlendirilmiştir. Son olarak sistemin çalışması gerçek saha şartlarında başarılı bir biçimde test edilmiştir.

Bu tezin geri kalan kısmı şu şekilde özetlenebilir. İkinci bölümde, Kablosuz Sensör Ağ tanımı yapılmış ve tarihsel gelişimi hakkında bilgi verilmiştir. Daha sonra sensör birimlerinin farklı bölümlerine ait detaylı bilgiler, kullanımda olan ağ topolojileri ve aralarındaki

farklar açıklanmıştır. Sensör ağları birim tasarımına ait teknik bilgiler de bu bölümde yer almaktadır. Son olarak KSA'ların kullanıldığı farklı uygulamalardan örnekler verilmiştir.

Üçüncü bölümde, tezin ana konusu olan sistemin tanımlanması ve tasarımı ile ilgili aşamalar hakkında bilgi verilmiştir. Bu bölümde ayrıca sistem tanımı, kullanılacak olan birimlerin seçimi ve özellikleri, bir biri ile karşılaştırılması ve teorik bilgilere de değinilmiştir. KSA sisteminde kullanılmak üzere işlemci iletişim sistemi birimi, merkezi birimde kullanılan saat ve SD kart için malzeme seçimleri nedenleri ile birlikte anlatılmıştır. Sonrasında sistem mimarisi açıklanmıştır. Sistem bir merkezi istasyon ve 3 yardımcı birimden oluşmaktadır. Her bir alt birimde güç birimi, kablosuz iletişim modülü ve mikroişlemci bulunmaktadır. Merkezi istasyonda buna ek olarak SD kart okuyucu ve zaman bilgisinin okunması için bir modül bulunmaktadır. Sensör birimlerine K.V.P (Kontrol Veri Paketi), S.B.V (Sensör birimi verisi) olmak üzere iki farklı veri gelmektedir. Eğer alınan veri K.V.P ise sensör birimi voltaj değerlerini kaydederek önceki birime iletecek ve K.V.P'ni bir sonraki birime aktaracaktır. Eğer sensör birimine gelen veri S.B.V ise veri alındığı gibi önceki birime iletilmektedir. Üçüncü bölümde sensör birimlerinin donanımı malzeme seçimi ve tasarımı konularından bahsedilmiştir. Haberleşme ağı topolojisi verilmiştir. Ayrıca bu bölümde prototip kullanım durumları değerlendirilmiştir. Prototip açık veya kapalı ortamda kullanılabilir. Su geçirmez olarak tasarlanmış olup çevresel koşullara dayanıklıdır. KSA denetimsiz ve denetimli kullanım olmak üzere iki duruma sahiptir. Denetimsiz kullanımda KSA sahaya uzun süreli bırakılıp veri toplamaktadır. Kullanıcı denetimsiz kullanım esnasında KSA'ya müdahalede bulunmamaktadır. Denetimli durumda ise bir arayüz üzerinden kullanıcı KSA'yı izleyebilmekte ve Kontrol edebilmektedir.

Dördüncü bölümde, yapılan, saha testleri, bu testlerde kullanılan yöntemler ve donanımlar detaylandırılmıştır. KSA'lar üzerinde teknik performans testler, çalışma frekans aralığı testi, Veri Paketi Hata Oranı testi, iletim mesafesi testi yapılmıştır. Saha testlerinin yapıldığı yerler ve test düzeneği detaylı olarak bu bölümde anlatılmıştır. Tez kapsamında üretilen prototiplerin teknik özellikleri bir tablo halinde verilmiştir.

Beşinci ve son bölümde, saha testleri sonuçları, yapılan prototipin performansı ile ilgili sonuçlar ve yapılabilecek geliştirmeler hakkında yorumlar yazılmıştır.

2. KABLOSUZ SENSÖR AĞLARI

Kablosuz Sensör Ağları (KSA) gelişen mikroişlemci, haberleşme teknolojileri ile daha fazla kullanım alanı bulan bir teknolojidir. Askeri uygulamalardan hastaların durum takibine, günlük olarak kullanılan akıllı ev sistemlerinden deprem zamanı yer tabakasındaki verilerin ölçülmesine kadar çok farklı uygulamalarda kolaylıkla kullanılmaktadır. Kullanıldıkları alanlar ve sistem tasarımları arasında çok büyük değişkenlik olsa da bu ağların temel mantığı aynı kalmaktadır: sensör birimlerinden verilerinin ölçülmesi ve bunların sorunsuz bir şekilde merkez istasyona iletilmesi. Sensör ağlarının farklı uygulama alanları Şekil 2.1’de grafiksel olarak gösterilmiştir [24] [25].



Şekil 2.1. KSA Uygulamaları.

2.1 Sensör Ağlarının Tarihsel Gelişimi

Bir çok teknoloji alanında olduğu gibi sensör ağlarında da gelişim savunma sanayisi öncülüğünde olmuştur. Bu alanda ilk örneklerden biri olarak Soğuk Savaş sırasında Sovyet denizaltılarını bulmak ve takip etmek için Amerika tarafından kurulmuş Ses Gözetleme Sistemi (Sound Surveillance System, SOSUS) gösterilebilir [9]. Bu sistem daha sonraları geliştirilmiştir ve şu anda okyanuslarda oluşan doğa olaylarını gözlemlemek

için kullanılmaktadır. Yine Soğuk Savaş döneminde Amerika Birleşik Devletleri'ni ve Kanada'yı kapsayan hava savunma radar ağları kurulmuştur. Bu sistem kapsamına daha sonraları Aerostatlar ve AWACS uçakları da dahil edilerek sistem kapasitesi artırılmıştır.

Modern sensör ağları gelişimi 1980'lerde Dağılmış Sensör Ağı (Distributed Sensor Network, DSN) programı kapsamında yine bir savunma sanayi öncülüğünde, Savunma İleri Araştırma Projeleri Ajansı (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) tarafından başlatılmıştır. Aynı zamanda DARPA'da çalışan ve TCP/IP kurucularından olan R. Kahn, daha yeni gelişmekte olan Arpanet (Internet'in öncülü) sistemini sensör ağları üzerinde uygulamaya çalışmıştır [2].

Carnegie Mellon Üniversitesi'nde çalışan bilim adamları çalışmalarını esnek çalışabilen, daha az hata üreten işletim sistemi üzerinde yapmış ve DSN'ler için haberleşme odaklı işletim sistemi olan 'Accent'i geliştirmişlerdir. Bu sistem ağ yapılandırması, sistem ayarlanması ve yeniden-bağlanma gibi temel sensör ağı uygulamalarını desteklemiştir. Daha sonra 'Accent' ticari olarak daha fazla rağbet görmüş 'Mach' işletim sistemine evrilmiştir [10].

Gelişen mikroişlemci ve elektronik alanlarının sensör ağlarının gelişmesinde çok büyük katkısı olmuştur. Elektronik bileşen maliyetlerinin düşmesi ve ekipmanların boyutlarının küçülmesi gibi önemli gelişmeler sayesinde sensör ağları önceden kullanılmadığı alanlarda kullanılmaya başlanmıştır. Buna örnek olarak MICA2 sistemi gösterilebilir. Bu sisteme ait alt birimler TinyOS işletim sistemi kullanmakta ve standart AA pilleri ile 1 seneye yakın servis sağlayabilme kapasitesine sahiptir. Ayrıca ışık, sıcaklık, basınç, manyetik ve başka fiziksel değerleri ölçen sensör birimlerinin cihaza bağlanması ile sistem farklı uygulama alanlarında kullanılabilme esnekliğine sahiptir [23].

Sensör ağlarının uygulama alanları ile ilgili daha detaylı bilgi Bölüm 2.7'de verilmiştir.

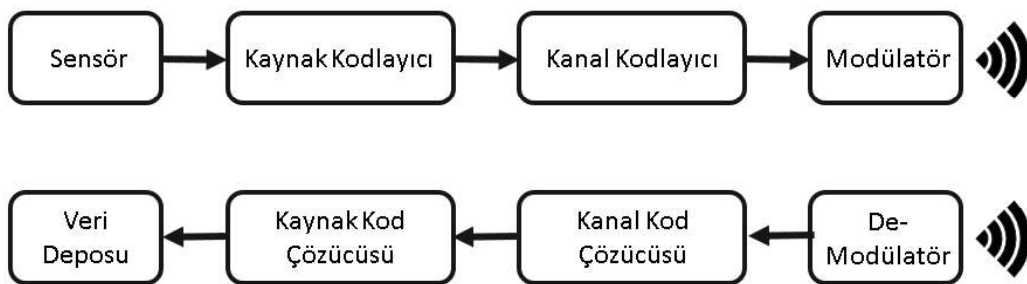
2.2 Fiziksel Katman

Kablosuz haberleşme ile iletişim yapılabilmesi sensör ağlarının geniş kullanım alanları bulmasındaki en önemli etkenlerden biridir. Bu haberleşme türü temelde haberleşme frekansı, kanal modülasyonu, sinyal algılanması ve veri şifrelenmesi gibi farklı özellikleri

içermektedir. Sensör ağlarında bulunan fiziksel katman, yukarıda bahsedilen değişkenleri kontrol ederek birimler arasındaki maksimum güvenilir haberleşmeyi sağlamakla yükümlüdür.

Genel olarak sensör ağlarında birimler arası iletişim için RF haberleşmesi kullanılmaktadır. Bu haberleşme türünde frekans aralığı 3 Hz'den 300 GHz'e kadar değişebilmektedir. Kullanım için lisans gerekmediği için KSA'larda genelde ISM frekansları tercih edilmektedir. Kullanılan frekans ile beraber bant genişliği de uygulamaya göre değişim göstermektedir. Yapılan ilk sensör ağlarında ve düşük güç gerektiren uygulamalarda iletişim için dar bant tercih edilmekteydi [11]. Teknoloji geliştikçe iletişimde veri gönderim hızı ve kapasite sorunları oluşmaya başlamış ve bunun üstesinden daha geniş bant kullanılarak gelinmiştir. Günümüzde, TI tarafından geliştirilen CC2420 IEEE 802.15.4 standardında çalışan ve 250 kbps'e kadar hız sunan iletişim birimleri herkes tarafından kolayca kullanılmaktadır [22]. Sensörler arası iletişim için RF haberleşmesi dışında optik, akustik ve manyetik endüksiyon gibi farklı yöntemler de kullanılmaktadır. [12] [13] [14]

Şekil 2.2'de genel bir KSA haberleşme altyapısı görülmektedir. Bu yapıda gönderici tarafı temel olarak; fiziksel ortamdan verileri okuyan sensör, modülatör, kaynak ve kodlayıcısından oluşmaktadır. Alıcı tarafı ise sırasıyla demodülatör, kanal ve kaynak kod çözücülerinden ve alınan verileri kaydeden birimden oluşmaktadır.



Şekil 2.2. KSA haberleşme alt birimleri.

İletişim kanalının ilk aşaması olarak kaynak kodlayıcı sensör biriminden alınan verileri işleyerek onları farklı biçimde kaydetmektedir. Bu aşamada verilerde olan fazlalıklar kaldırılarak sinyal kapasitesi düşürülmekte ve dolayısıyla daha verimli bir iletişim sistemi

elde edilmektedir. Kaynak kodlaması aşamasında fazlalıkların kaldırılması bazı sistemlerde kabul edilmemektedir. Bunun için geri dönüşebilir ve dönülemez olarak iki çeşit kodlama tekniği bulunmaktadır. Bu tekniklerin teorik ve pratik uygulamaları farklılık göstermektedir [15].

Kaynak kodlamasından sonra işlenmiş dijital veriler kanal kodlayıcısına iletilmektedir. Kanal kodlayıcısı iletilmek olan veriyi iletim hattında gerçekleştirilecek hatalardan korumak için gönderilecek olan veriye ek bilgi eklemektedir. Sadece hataları bulan kanal kodlar "Hata Bulan Kodlar"; aynı zamanda hatayı hem bulup hem de düzelten kodlar ise "Hata Düzeltme Kodları" olarak adlandırılmaktadır. Bu kodların temel amacı eklenen yeni bilgiler ile iletim hattının performansını yükseltmektir.

Temel olarak iki tür hata bulma ve düzeltme kodu vardır: Blok kodları (Block Codes) ve Evrişimli kodlar (Convolutional Codes).

Blok kodları İleri Hata Düzeltme (Forward Error Correction, FEC) kodları olup alınmış olan bilgidaki belirli sayıdaki hataları yeniden iletilmesine gerek duymadan bulma veya düzeltme kapasitesine sahiptir. Blok kodları diğer çözümler (yüksek iletim gücü kullanımı, daha gelişmiş kod çözücü seçimi) pratik olmadığına iletişim sisteminin performansını artırmak için kullanılabilir.

Doğrusallık, Sistematiiklik ve Döngüsel olması Blok kodlarının en önemli özelliklerindendir. Örnek olarak eğer bir blok koda ait iki şifre sözcüğünün tüm doğrusal birleşimleri de aynı blok koda ait ise bu blok kodu doğrusallık özelliğini sağlamaktadır. Sistematiik blok kodlarında eklenecek olan şifre sözcükleri ancak gönderilecek olan verinin sonuna eklenmektedir. Döngüsel özelliğe sahip blok kodlarında aşağıdaki özellik görölmektedir: eğer $C = \{c_{n-1}, c_{n-2}, \dots, c_0\}$ bir şifre sözcüğü ise $C = \{c_{n-2}, c_{n-3}, \dots, c_0, c_{n-1}\}$ 'de aynı blok koda ait şifre sözcüğü olması gerekmektedir [16].

Bir diğerkodlama tekniğı Evrişimli Kodlama olup, Blok kodlamadan farklı olarak veriler ayrı bloklar şeklinde işlenmemekte, onun yerine sürekli alınan iletişim verileriyle kodlanmış veriler dizi halinde iletilmektedir. Bu amaçla genelde Kaydırma Yazmacı (Shift Register) kullanılmaktadır [16].

Yukarıda açıklanan aşamaları geçen sinyal modülatör tarafından alınıyor. Dijital modülatör sıralı ayırık zaman sembollerini iletim için uygun olan sürekli zaman sinyallerine dönüştüren bir cihaz olarak basitçe açıklanabilmektedir. Her T_s saniyede, giriş sinyali olan x_n 'e karşılık gerçek M dalga formlarından biri olan $s_{x_n}(t)$ sinyalini üretmektedir. Bu işlem M 'li modülasyon olarak tanımlanmaktadır. Dalga formları voltaj, akım, elektrik alanı şiddeti gibi farklı fiziksel bileşenleri temsil edebilmektedir. İletişim hızı 1 saniyede gönderilen sembol sayısına eşittir ve formülü $R_s = 1/T_s$ 'dir. Genel olarak M 2'nin üssü olarak tanımlanmaktadır. Dolayısıyla $M = 2^m$ şeklinde yazılabilir. Sonuç olarak her sembolün m bit veri gönderdiği düşünülebilir. Bunlar göz önünde bulundurulduğunda bit rate formülü $R_b = m/T_s = mR_s$ şeklinde yazılabilir. Bit rate hızının birimi saniye başına gönderilen bit sayısı olarak tanımlanmaktadır: *bits/second* veya *bps*. Tüm bu işlemler sonucu çıkan toplam modülasyon edilmiş dalga formu Eşitlik 2.1 şeklinde yazılabilir.

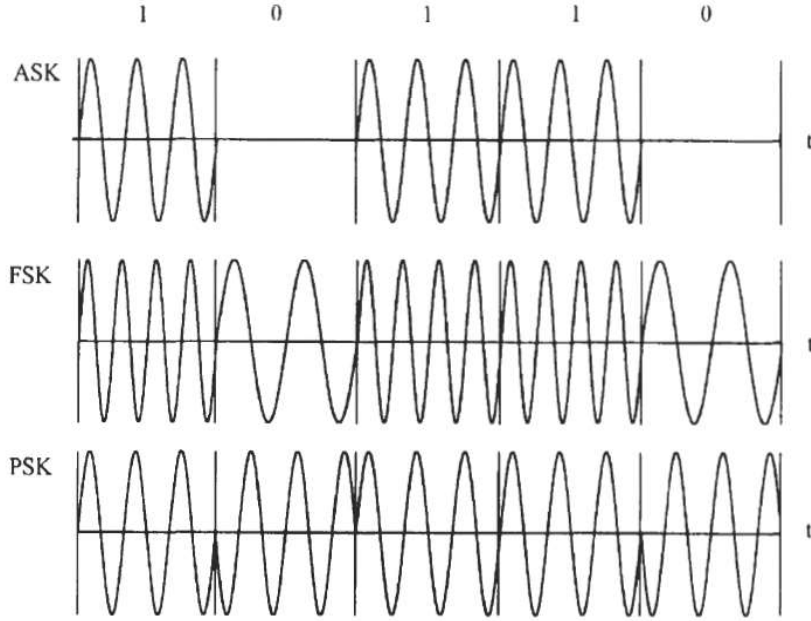
$$s(t) = \sum_n s_{x_n}(t - nT_s) \quad (2.1)$$

Genel olarak gönderilen sinyalin üç ana bileşeni vardır: Genlik, frekans ve faz. Bu bileşenler gönderilecek olan dijital sinyale uygun olarak değiştirilip gönderilmektedir. Şekil 2.3'te Genlik, Frekans ve Faz modülasyon çeşitlerinin verilmiş bir dijital sinyale nasıl uygulandığı gösterilmiştir.

Kısaca anlatılacak olursa Genlik Modülasyonu (Amplitude Shift Keying, ASK) gönderilecek veriye göre dalga formunun genliğinin değişmesi prensibine dayanmaktadır. Buna en basit örnek olarak Şekil 2.3'te gösterilen ON-OFF anahtarlama gösterilebilir. Alıcı tarafında bu tür sinyali demodüle etmek için basit olarak genlik karşılaştırması yapmak yeterli olmaktadır.

Frekans Modülasyonu (Frequency Shift Keying, FSK) adından da anlaşıldığı üzere gönderilecek veri bileşenlerine göre modülasyon frekansının değiştirilmesi ile oluşmaktadır. Farklı frekans değerleri verilerek demodülasyon tarafında ayrı veri olarak algınlacaktır. Bu modülasyon çeşidi kablosuz haberleşme için kullanılan en yaygın türdür.

Son olarak, Faz Modülasyonu (Phase Shift Keying, PSK) gönderilecek sinyalin fazını belirli miktarda değiştirerek oluşmaktadır. Aynı şekilde alıcı tarafındaki demodülatör bu



Şekil 2.3. ASK, FSK ve PSK modülasyon türleri [17].

değişim miktarını baz alarak alınan sinyali demodüle edebilmektedir.

2.3 Ortam Erişim Kontrolü

Kablosuz Sensör Ağları belirli bir alanda rastgele dağılmış veya seçilmiş konumlarda yerleştirilmiş ve birbiri ile kablosuz çok-sekmeli iletişim kullanarak haberleşen cihazlardan oluşmaktadır. Bu cihazlar ortak kablosuz iletişim ağını paylaşmaktadır. Ortam Erişim Kontrolü (Medium Access Control, MAC) protokolü bu ağ yapısı içinde olan haberleşme trafiğini kontrol ederek tüm sistemdeki iletişimin sorunsuz çalışmasını sağlamaktadır. Bu özelliğinden dolayı MAC protokolünün seçimi performans ve enerji verimliliğini etkileyen önemli bir husustur.

Doğası gereği KSA bir çok kısıtlama ile karşılaşmaktadır. Aynı zamanda çalışan sensör birimlerinin maliyetinin de belirli bir seviyenin altında kalması gerekmektedir. Tüm bu etkenler birleşince MAC protokollerinin üzerine ağır yük düşüyor. Bu sorunları çözmek için son yıllarda bir çok MAC protokolü geliştirilmiştir. Bu protokoller

(i) Çekişmeli

(ii) Ön Ayarlamalı ve

(iii) Hibrit Ortam Erişimine sahip protokoller olarak üç ana başlık altında toplanabilir.

2.3.1 Çekişmeli Ortam Erişimi

İsminden de anlaşıldığı üzere Çekişmeli Ortam Erişimi (Contention-Based Medium Access, CBMA) protokolü kullanan KSA'larda sensör alt birimleri haberleşme kanalına erişim için kendi aralarında 'çekişmektedirler'. Bu proses sonucunda verilmiş kablosuz iletişim ağını hangi sensör biriminin kullanacağı yerel sensör birimleri arasında belirlenmektedir. Dolayısıyla ağ yapısı içinde olan iletişimin korunması için dışarıdan farklı bir sistem gerekmemektedir. Protokolün bu özelliği kullanıldığı sisteme sağlamlık ve ölçeklenebilirlik sağlamaktadır.

CBMA'da standart veri haberleşmesinde Taşıyıcı Duyarlı Çoklu Erişim (Carrier Sense Multiple Access, CSMA) mekanizması kullanılmaktadır. CSMA temel olarak veriyi göndermeden önce kullanılacak olan haberleşme kanalının durumunun kontrol edilmesine dayanmaktadır. Yani sensör birimi kullanacağı iletişim kanalını belirli bir süre dinlemekte ve bu süre bitiminde aşağıdaki seçeneklerden birini seçmektedir;

1. Sensör birimi süre bitiminde kanalda herhangi bir aktivite gözlemlenmedi ise anında iletişime başlar.
2. Eğer bu süre zarfında kanalda aktivite gözlemlendi ise süre sıfırlanır ve kanal kullanımı sona erdikten sonra yeniden süre sayımı sıfırdan başlar.

Bu mekanizma ilk bakışta kullanışlı gözükse de enerji verimliliği açısından iyi sonuç vermemektedir. Bunun nedeni sensör biriminin sürekli olarak iletişim kanalının aktivitesini kontrol etmesidir. Bu gözlemler sırasında önemli miktarda enerji kaybı olmaktadır. Bu sorunu çözmek için Uyku MAC (Sleep MAC, S-MAC), Berkeley MAC (B-MAC) gibi protokoller geliştirilmiştir.

S-MAC [18] iletişim kanalını sürekli gözlemlemek yerine belirli periyotlar ile gözlemleyerek enerji sorununu çözmektedir. Bu periyotlar arası sensör birimi uyku durumunda

kalarak enerji harcaması minimuma indirilmektedir. S-MAC'in dezavantajı sisteme ek gecikme getirmesidir. Buna ek olarak bekleme periyotları arasında oluşan yeni veriler de bekletilerek daha fazla yoğunluğa sebep olmaktadır. Dolayısıyla büyük ölçekli sensör ağlarında bu protokolü kullanmak verimliliği artırmayarak tam tersi, düşürebilmektedir.

S-MAC'in getirdiği sorunları çözmek için B-MAC protokolü kullanılabilir. [19] Bu protokol uyku-uyanma süreçlerinde düşük güç kullanarak gereksiz enerji harcamasının önüne geçmektedir. Ayrıca iletişim hattını da kontrol ederek trafiğin olmadığı zamanlarda sensör biriminin gereksiz yere yayın yapmasını engellemektedir. Eklenen yeni özellikler verimliliği arttırsa da her bir sensör birimine düşen işlem yükünü de arttırmaktadır. Dolayısıyla trafiğin yoğun olduğu uygulamalarda sistemin kullanımı etkili olmamaktadır.

2.3.2 Ön Ayarlamalı Ortam Erişim

Ön Ayarlamalı Ortam Erişim (Reservation-Based Medium Access, RBMA) protokolleri kullanan sensör ağlarına ait sensör birimlerinde haberleşme her bir birime ayrılan zaman aralığında gerçekleşmektedir. Bunun sonucunda birimler arası iletişim zamanında sıkışma ve çarpışma olmamaktadır. Birimler arasındaki haberleşme için gerekli olan zamanlama ayarı genelde ortak küme denetleyicileri tarafından yapılmaktadır.

Y-MAC bu özelliği kullanan bir kaç protokolden birisidir ve temelinde Zaman Bölmeli Çoklu Erişimi (Time Division Multiple Access, TDMA) baz almaktadır [20]. TDMA'a benzer olarak Y-MAC verilmiş zaman aralığını çerçeve ve aralıklara bölmektedir. Her iletişim çerçevesi çoklu ve tekli yayından oluşmaktadır. Çoklu yayın başladığında her sensör birimi uyanmakta ve ortam erişimi kazanmak için birbiri ile 'çekişmektedir'. Çoklu yayın süresi bittikten sonra sensör birimleri iletişim birimlerini kapatmakta ve kendi yayın zamanını beklemektedir. Y-MAC protokolünde her yayın zamanı sadece tek sensör birimi yayın yapmaktadır. Bu özellik enerji verimliliğini önemli ölçüde arttırmaktadır. Buna ek olarak Y-MAC TDMA'ya ait olan esneklik ve ölçeklenebilirlik sorunlarına sahiptir. Ayrıca yapısı gereği bu protokolü kullanan sensör birimlerinde birden fazla iletişim kanalının bulunması gerekmektedir.

Genel anlamda güç verimliliği açısından güzel sonuçlar verse de protokolde sorunlar da vardır. Yukarıda bahsedildiği üzere sensör birimleri arasında zaman ayarlaması

yapmak için küme denetleyicilerine ihtiyaç duyulmaktadır ve bu sistemi kullanmak için de sensörler arasında zaman eşitlemesi yapılması gerekmektedir. Bunlar sisteme ek yük olarak yansımaktadır. Ayrıca yüksek sensör sayısı olan sistemlerde veri iletişim gecikmesi artmakta ve hatta bazı durumlarda veri kaybına yol açmaktadır.

2.3.3 Hibrit Ortam Erişim

Çekişme Ortam erişimi protokolü kullanan sistemlerde sensör sayısı düştükçe sistem performansı da kaynakların verimsiz kullanımından dolayı düşmektedir. Bu durum ön ayarlamalı protokoller için sorun teşkil etmemektedir. Tam tersi sensör sayısı arttıkça çekişme protokollerinin kullanımı ön ayarlamalı protokollere göre daha iyi sonuçlar vermektedir. Her iki protokol tasarımlarının iyi yönlerini kullanmak için Hibrit Ortam Erişim protokolleri geliştirilmiştir.

Zebra MAC (ZMAC) hibrit ortam erişim protokollerine örnek olarak verilebilir [21]. ZMAC düşük veri yoğunluğunun olduğu durumlarda CSMA tabanlı yaklaşım, yoğunluğun arttığı zamanlarda ise TDMA tabanlı yaklaşım kullanmaktadır. Bu protokolde sensör birimleri iletişime başladığı zaman öncelikle komşuluklarında olan birimlerin adreslerini öğrenmektedir. Daha sonra bu bilgi zaman kullanımını ayarlarken kullanılmaktadır. Bunun sayesinde bir sensör biriminin haberleşmeyi yeniden yapması için tüm birimlerin haberleşmeyi bitirmesine gerek kalmamaktadır. Sadece yakın komşuluğunda olan birimler görevini tamamladığı zaman kanal kullanımı için döngü yeniden başlatılabilir. Bu verilerin komşu birimlere gönderilmesi zamanı CSMA kullanılmaktadır. Dolayısıyla veri iletişimi yapan sensör birimlerine ek yoğunluk getirmemektedir.

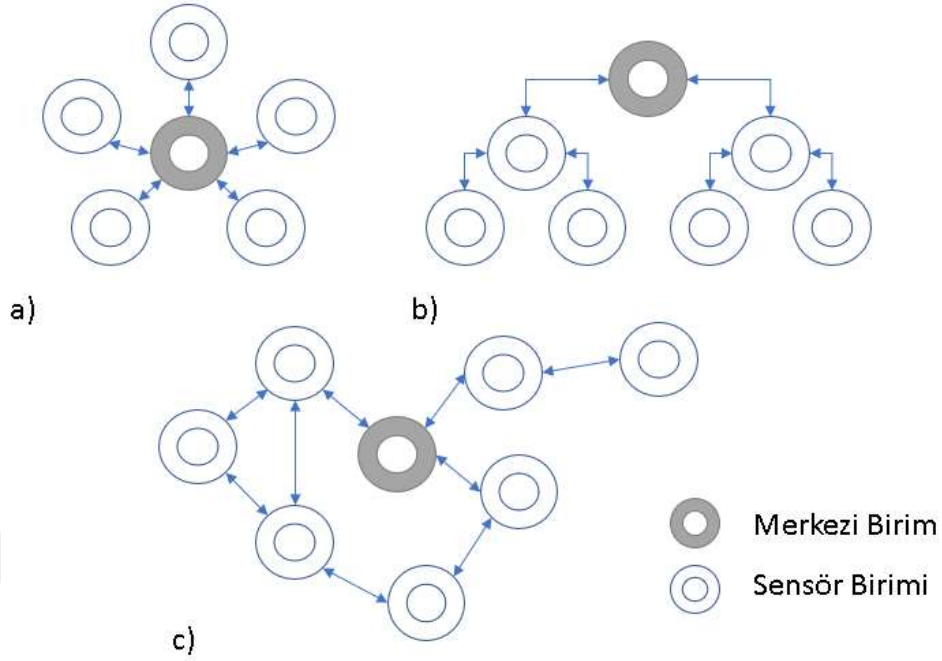
2.4 Ağ Topolojileri

Bir KSA tasarlanırken ilk önce sensör birimlerinin hangi ağ topolojisi altında çalışacağı seçilir. Bu seçim tasarlanacak olan sistemin hangi amaçla kullanılacağı ile doğrudan ilişkilidir. Genel olarak KSA bir alan içerisine dağılmış sensör grubundan oluşmaktadır. Böyle bir sistemde kullanılabilecek Yıldız (Star), Küme/Ağaç (Cluster / Tree) veya Örgü (Mesh) gibi topoloji çeşitleri mevcuttur [26]. Bazı önemli topolojiler hakkında bilgiler aşağıda verilmiştir:

1. **Yıldız Topolojisi:** Bu tür topolojiye sahip KSA'larda alt birimleri direk olarak merkezi istasyona bağlanmıştır. Dolayısıyla sensör birimleri arasında iletişim olmamaktadır. Eğer topoloji içerisinde herhangi bir sensör birimi çalışmayı durdurursa sistem bundan etkilenmeyecek ve çalışmaya devam edecektir. Ama eğer alt katmanlardaki merkezi birimden birisi çalışmayı durdurursa o birime ait tüm alt sensör birimlerin merkez ile olan bağlantısı kopacaktır.
2. **Küme/Ağaç Topolojisi:** Yıldız topolojisinin genişletilmiş hali olup tek merkezi birimden ve buna bağlı farklı seviyelerde konumlanmış sensör birimlerinden oluşmaktadır. Bu sistemler ağaç yapısına benzer şekilde tasarlanmış olup, veriler en uçtaki sensör birimlerinden merkezi birime sıralı şekilde taşınmaktadır. Dolayısıyla merkezi birime daha yakın olan sensörler veri akış hızı daha yüksek olduğu için daha fazla enerji harcayacaktır.
3. **Örgü Topolojisi:** Diğer türlere göre daha fazla avantajı bulunan bu ağ türü doğal olarak daha fazla alanda kullanılmaktadır. Örgü topolojisi genellikle bir merkezi birim ve buna bağlı sensör birimlerinden oluşmaktadır. Sensör birimleri de aynı zamanda kendi aralarında bağlantı kurabilmektedir. Bu tür sistemlerde tasarımın odak noktası verilen bir birime gönderilmek istenen sinyalin en kısa ve verimli bir biçimde nasıl gönderileceğini bulmaktır [28].

Bu topolojiler arasında karşılaştırılma yapılırsa bir kaç farklı özelliğe bakmak gerekmektedir. Bunlar sırasıyla güvenilirlik, enerji verimliliği, ölçeklenebilirlik ve gecikme süreleridir [26].

Genel anlamda KSA'da güvenilirlik, tasarlanan sistemin verilen koşullar altında tanımlanan zaman aralığı içinde görevi sorunsuz bir şekilde uygulamasıdır. Daha farklı biçimde söylenecek olursa verilen bir sinyalin merkezi birimden istenilen sensör birimine ulaşma olasılığı şeklinde de tanımlanmaktadır. Bunlar göz önünde bulundurulduğunda Yıldız topolojisi ağda oluşabilecek hataları azaltmaktadır, çünkü sensörün devre dışı kalması durumunda bu sadece yerel sistemi etkileyecektir. Ağaç topolojisinde ise bir birimin bozulması ona bağlı olan tüm alt birimlerin merkezi birim ile iletişimini kesecektir. Örgü türü KSA'larda ise ağ yapısı sayesinde bir sensörde bozukluk olduğu halde bunu telafi



Şekil 2.4. (a) Yıldız, (b)Küme/Ağaç, (c) Örgü topoloji sistemleri.

edecek yan sensörler mevcuttur. Sonuç olarak güvenilirlik açısından en iyi performans Örgü topolojisine aittir [26, 27].

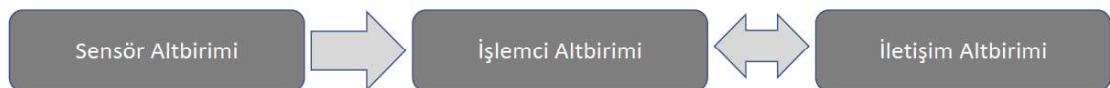
Enerji verimliliği KSA'larda sensör birimlerinin saha şartlarında kullanacakları sınırlı güç kapasitesi nedeniyle en önemli performans göstergesidir. KSA'lar temel olarak birbiri ile kablosuz haberleşen birimlerden oluştuğu için, en fazla enerji de haberleşme aşamasında tüketilmektedir. Basit iletişim teorisinden de bilindiği üzere kablosuz iletim gücü mesafenin karesi ile ters orantılıdır. Yıldız topolojisi kullanan ağlarda sensör birimleri direk merkezi birim ile haberleştikleri için birimler arası mesafe normalden daha uzun olacaktır ve bu da enerji verimliliğini önemli ölçüde düşürecektir. Bu durum Örgü yapısında olan KSA'lar için tam tersi olsa da burada da başka sorun ortaya çıkmaktadır. Bu tür ağlarda merkezi birime daha yakın olan sensörler daha yoğun veri trafiğine maruz kaldıkları için sonuç olarak normal sensör birimlerinden daha fazla enerji tüketecektir. Ağaç topolojisinde enerji verimliliği Örgü'deki gibi dengesiz dağılmadığından, ve Yıldız ağındaki gibi uzun mesafelere veri göndermek gerekliliği olmadığından aralarında en iyi değerlere sahiptir [26, 27].

Ölçeklenebilirlik bir KSA'ya yeni sensör birimin eklenmesi ve buna karşılık sistem performansının nasıl etkilendiğinin bir göstergesidir. Yıldız ağına sahip sistemlere yeni bir birim eklendiğinde sistem tanımı gereği eklenen birim direk olarak merkezi istasyon ile iletişim kurması gerekmektedir. Bu da aynı zamanda istasyonun haberleşme yükünü arttırmakta, dolayısıyla güç performansını düşürmektedir. Aynı zamanda artan iletişim yükü diğer sensörler ile olan bağlantıları da olumsuz etkileyecektir. Örgü ağında bu durum daha farklıdır. Sisteme eklenen her bir yeni birim daha fazla iletişim yolu demektir ve sistem performansını arttırmaktadır, ama diğer yönden eklenen birimler arttıkça onların sisteme entegrasyonu ve sistem karışıklığı artacaktır. Bu sorunu gidermek için ise fazladan kaynak harcanması gerekmektedir. Ağaç topolojisinde yeni birim eklenmesi diğerlerine göre daha kolaydır. Birimin ekleneceği alanda sadece bağlı olduğu birimleri etkileyeceği için sisteme olan fazladan yük daha az olacaktır. Her hangi bir sorun yaşansa bile topoloji gereği sadece bağlı olduğu bölüm etkilenecektir. [26, 27]

Son olarak sistemlerin gecikme süreleri karşılaştırılmıştır. Yıldız ağlarında sensörler direk merkez istasyonuna bağlandıkları için veri aktarım gecikmesi minimaldir, ama tüm birimlerden aynı zamanda sinyal gelmesi durumunda veri kaybı oranı yükselebilmektedir. Örgü ağlarında sistem gecikmesi yıldız ağlarına oranla daha yüksektir ama özel durumlarda sistemdeki veri kaybı daha düşüktür. Ağaç topolojilerinde veri yollarının önceden belirli olması nedeniyle gecikmeler daha düşüktür ve özel durumlarda sistemin bütünlüğü korunmaktadır. [26, 27]

2.5 Kablosuz Sensör Birimi Mimarisi

Sensör birimleri KSA'nın temel yapı taşlarıdır ve ağda olan tüm işlemler bu birimler vasıtasıyla gerçekleşmektedir. Temel olarak bunlar algılama, işleme, iletişim ve güç işlemlerini yapan farklı parçalardan oluşmaktadır. Genel sensör birimi yapısı Şekil 2.5'te verilmiştir [2, 7, 29].



Şekil 2.5. Genel Kablosuz Sensör Birimi mimarisi.

2.5.1 Sensör Alt Birimi

Bu birim fiziksel bir özelliği dijital sinyale çevirerek ölçülmesi istenen değişkeni farklı bir şekilde sisteme tanıtılmaktadır. Genellikle fiziksel birimi analog sinyale daha sonra da analogdan dijitale çevirerek bu işlem yapılmaktadır. Farklı alanlarda amaca uygun olarak sensör türleri değişkenlik göstermektedir. İvmeölçer, manyetik alan sensörleri, EEG veya EMG, jiroskop, nem ve basınç sensörleri gibi farklı alanlarda geniş kullanım alanlarına sahip sensörler piyasada mevcuttur.

Bu birimin bir parçası olarak Analog-Sayısal Dönüştürücü (Analog to Dijital Converter, ADC) seçilirken hem ortamda ölçülecek fiziksel niteliğin özellikleri, hem de işlemcinin kapasitesi göz önünde bulundurulmaktadır. Yetersiz veya yanlış seçilmiş ADC gerçek olmayan ve yanıltıcı sonuçlar verebilmektedir.

2.5.2 İşlemci Alt Birimi

Bu alt birim diğer birimleri bir araya getirerek sensör altyapısını oluşturmaktadır. Genel olarak program tanımlamalarının kaydedildiği kalıcı bellekten, işlemci yongasından, sensör verilerinin geçici olarak saklandığı aktif bellekten, dahili veya harici saatten ve dış birimlerle iletişim için dijital bağlantılardan oluşmaktadır. Kullanılan alana göre tercih edilen işlemci türü değişebilmektedir. Direk olarak her hangi bir işlem için tasarlanmamış ve akademik alanda kullanılmak üzere genelde mikroişlemciler tercih edilmektedir. Bunun nedeni bu tür işlemcilerin maliyetinin düşük olması ve sürekli değişen yazılım güncellemesi için yapılan program değişikliklerini uygulamanın daha kolay olmasıdır. Özel bir görev için imal edilen KSA'larda ise FPGA türü işlemcilerin kullanılması verimlilik açısından daha uygundur.

Önceki bölümde anlatıldığı üzere KSA'larda uygulama alanına göre farklı işlemci türleri kullanılmaktadır. Bunların Mikrodenetleyici (MCU), Uygulamaya Özel Entegre Devre (Application-Specific Integrated Circuit, ASIC), Alan Programlanabilir Kapı Dizisi (Field Programmable Gate Array, FPGA), Dijital Sinyal İşlemcileri (Digital Signal Processors, DSP) gibi çeşitleri vardır.

Mikrodenetleyiciler sürekli değişen ve esneklik gerektiren uygulamalarda tercih edil-

mektedir, ama bunun yanında bu işlemciler güç tüketimi ve işlemci gücü açısından diğer türlerden geri kalmaktadır. Bunun yanında ASIC'ler kapasite, işlem gücü, boyut olarak yeterli performans sunmaktadır. Buna rağmen bu tür işlemcilerin tasarımı çok zordur ve kullanım olarak mikrodenetleyici gibi esnekliğe sahip değildir. Burada FPGA'lar yüksek kapasite, paralel işlem yetenekleri ile öne çıkmaktadır ama bu işlemcileri programlamak daha zordur ve maliyet olarak da sensör birimlerinin fazla sayıda kullanıldığı uygulamalarda kullanılması elverişli değildir. Son olarak DSP'ler pahalı, büyük boyutu ve kullanım esnekliği az olan işlemci türleridir. Bu tür işlemciler özel sinyal işleme uygulamalarında sabit bir yazılım ile kullanılmak için birebirdir.

Bunlar göz önünde bulundurulduğunda bu tez kapsamında kullanılacak en uygun işlemci türü mikrodenetleyici olacaktır. Bunun ilk nedeni yapılan prototiplerin yazılımının tez süresince sürekli geliştirilecek olmasıdır. FPGA veya ASIC gibi işlemciler seçilirse tasarım aşamasının maliyeti makul seviyeleri geçecektir. Ayrıca tez kapsamında yapılacak saha testlerinde gerekirse değişikliklerin sahada hemen uygulanması ve yeniden test edilmesi gerekmektedir. DSP'ler bu işlemler için gerekli esnekliği sunmamaktadır.

2.5.3 İletişim Alt Birimi

İşlemci ve sensör birimlerinin seçilmesi kadar önemli olan bu birimlerin birbiri ile iletişimi nasıl sağlayacağıdır. Düzgün seçilmemiş iletişim alt birimi hem güç kaybına, hem de kısıtlı olan programlama belleğinin boşa harcanmasına neden olabilir. Daha hızlı olmasına rağmen bellek kısıtlamaları nedeniyle genelde paralel iletişim arayüzleri yerine seri haberleşme sistemleri kullanılmaktadır. En çok kullanılanlar arasında Serial Peripheral Interface (SPI), the Inter-Integrated circuit (I²C), Universal Serial Bus (USB) vardır.

SPI haberleşmesini kullanan alt birimlerden biri Master diğeri de Slave olarak tanımlanmaktadır ve iletişim için 4 hat kullanılmaktadır. Bu haberleşmede sadece tek Master birimi olduğundan otomatik olarak mikrodenetleyici bu göreve atanmaktadır. Bunun sonucu aynı sistemdeki farklı alt birimler sadece mikrodenetleyici üzerinden haberleşmek zorundadır. I²C haberleşmesinde ise birden fazla Master birimi tanımlanabilmektedir. Slave birimlerine veri gönderimi onlara farklı adres tanımlanması ile gerçekleşmektedir.

Bu tanımlamadan dolayı fiziksel olarak gerekli hat sayısı bu haberleşme türünde ikidir.

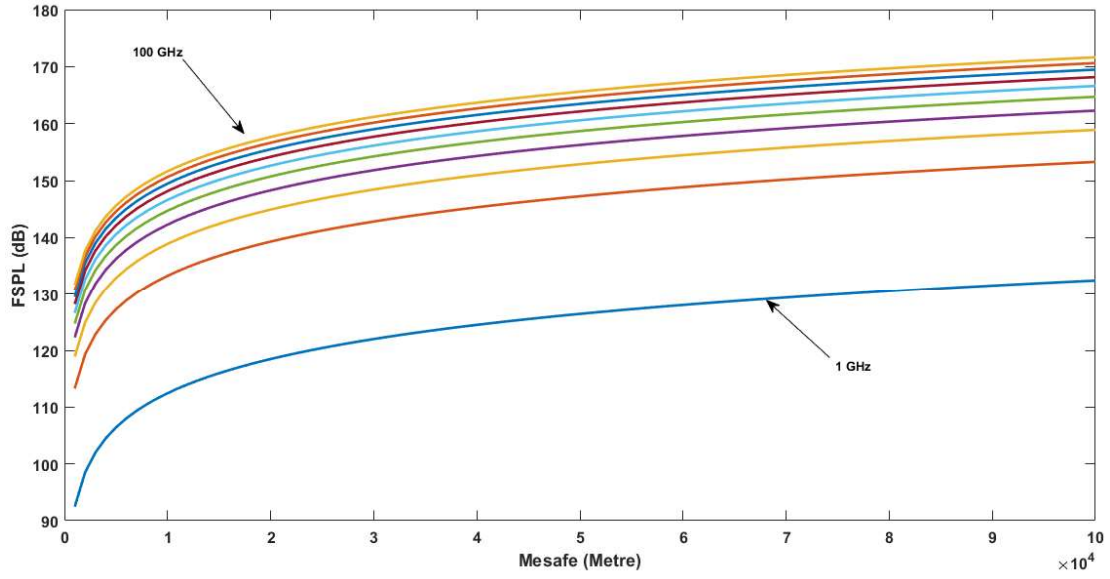
İletim sistem seçilmeden önce sistemin kullanacağı frekansın seçilmesi gerekmektedir. Uluslararası ve ulusal yönetmeliklere göre bazı frekansların kullanımı serbest iken, diğerleri için özel izinler gerekmektedir. Endüstriyel, Bilimsel ve Tıbbi (Industrial, Scientific and Medical, ISM) bantları telekomünikasyon dışındaki sözü geçen alanlarda radyo frekansı (RF) kullanımı için uluslararası olarak ayrılmış radyo bantlarıdır. Bu frekans aralıkları temelde Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (International Telecommunication Union, ITU) düzenlemeleri ile belirlenmiş olsa da farklı ülkelerde yerel standartlara uyması açısından küçük farklılıklar vardır. Türkiye’de bu bant aralığı frekans bölümleri ve teknik kriterleri Resmi Gazete 11.09.2012 tarihli 28408 sayısında "Kısa Mesafe Erişimli Telsiz (KET) Cihazları Hakkında Yönetmelik" başlığı altında tanımlanmıştır. Tez kapsamında prototipi üretilen KSA’da kullanılacak olan frekans lisans gerektirmediği için ISM bantlarından seçilmiştir.

Frekans seçiminde bir diğer önemli kıstas Serbest Uzay Yol Kaybı’dır (Free Space Path Loss, FSPL). Bu değer Eşitlik 2.2 ile hesaplanmaktadır.

$$FSPL = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 = \left(\frac{4\pi df}{c} \right)^2 \quad (2.2)$$

Burada d yol uzunluğunu, λ dalga boyunu, f çalışma frekansını, c ise ışık hızını belirtmektedir. Formülden de gözüktüğü gibi frekans ve iletim mesafesi arttıkça kayıp da artmaktadır. Mesafenin FSPL’ye olan etkisi açık olsa da, frekans arttığı zaman kaybın da artması FSPL tanımlandığı zaman anten olarak izotropik antenin seçilmiş olmasıdır. Bu antenin kazancı sabit olduğundan frekans yükseldiği zaman aynı değeri sağlamak için antenin boyutlarının küçülmesi gerekmektedir. Dolayısı ile boyutları küçülen antenin kazancı da azalmaktadır. Sonuç olarak yüksek frekansa sahip antenlerin kazancı küçük olduğundan FSPL değeri de yüksek olacaktır. Şekil 3.1’de 1’den 100 km’ye kadar 1-100 GHz frekanslarına ait FSPL grafiği gösterilmektedir.

Frekansı belirleyen bir başka değişken KSA birimlerinin kullandığı protokollerdir. Bu tip sistemlerde en yaygın olarak kullanılan protokollerden biri IEEE 802.15.4’tür. Bu protokol üç frekans bandını desteklemektedir: 2450 MHz (16 kanal), 915 MHz (10 kanal)



Şekil 2.6. 1-100 km mesafesine ve 1-100 GHz frekans aralığına ait FSPL grafiği.

ve 868 MHz (1 kanal) [8]. Frekans olarak bu bantlardan birinin seçilmesi yapılacak olan sistemin farklı uygulamalarda da kullanılmasını kolaylaştıracaktır.

Son olarak KET Cihaz Yönetmeliği, FSPL ve KSA için kullanılan protokoller baz alınırsa kullanılacak olan frekans bandı 2400-2483.5 MHz olarak seçilmiştir. Piyasada, verilen frekans bandında çalışan Nordic Semiconductor'a ait nRF24L01+, Texas Instruments'e ait CC2500, Atmel'e ait AT86RF233 model alıcı-verici modülleri bulunmaktadır. [50, 51, 52].

2.6 Sensör Ağlarında Güvenlik

Sensör Ağları kablosuz iletişim yapan ve belirli bir alanda konumlandırılmış sensör birimlerinden oluşmaktadır. Askeri, sağlık ve diğer hassas veri iletişiminin olduğu uygulamalarda kablosuz iletilen verinin güvenliği ön plana çıkmaktadır. Asgari veri güvenliğini sağlamak için sensör birimlerinde zaten kısıtlı olan güç ve depolama gibi kaynaklar kullanılmaktadır. Sensör birimlerinin gözlemlenmesi ve ulaşılması zor alanlarda konumlanması sistemin korunmasını daha da zor hale getirmektedir. Bu nedenle güvenlik ile ilgili planlamaların sistemin tasarım aşamasında yapılması gerekmektedir [53].

2.6.1 Güvenlik Kısıtlamaları

Güvenlik uygulamalı belirli bir ölçüde kaynak gerektirmektedir. Bu kaynak veri depolaması veya güç tüketimi olarak tanımlana bilir. Doğası gereği sensör birimleri olabildiğince küçük tasarlanmaktadır ve bu da kullanılacak veri deposu ve güç birimi boyutlarını kısıtlamaktadır. Sonuç olarak verimli bir güvenlik mekanizması tasarlamak için depolama boyut kısıtlarını göz önünde bulundurmak ve buna göre güvenlik yazılım boyutunu olabildiğince kısa tutmak gerekmektedir.

Güç sensör ağlarında belki de en önemli kısıtlamadır. Güvenlik uygulamalarını gerçekleştirmek için de belirli bir güce ihtiyaç duyulmaktadır. Bu güç verilerin şifrelenmesi, şifrelerin çözülmesi, güvenlik anahtarı aktarımı gibi uygulamalarda harcanmaktadır. Dolayısıyla uygulamalarda bu aşamalarda harcanan gücü de göz önünde bulundurmak gerekmektedir.

KSA'larda iletim doğal olarak kablosuz iletişim kanalları ile yapılmaktadır ve doğası gereği bu haberleşme yöntemi güvenilir değildir. Veri kaybı, iletişim zamanı olabilecek gecikmeler ve fiziksel kısıtlamalar güvenliğini etkileyen önemli ölçütlerdir. Tüm bu değişkenler sadece yüksek hassasiyetli veriyi değil, aynı zamanda iletişim zamanı gönderilen güvenlik anahtarlarını da tehdit etmektedir.

Uygulama gereği bazı KSA'lar uzun süre kullanıcı tarafından gözetilmeksizin çalışmaktadır. Bu da aynı zamanda birçok güvenlik açığını beraberinde getirmektedir. Bu süre KSA'lara fiziksel saldırı gerçekleştirilmesi için çok uygundur. Açık alanda bırakılan sensör birimleri potansiyel saldırganlara karşı savunmasız kalmaktadır ve müdahaleye açık durumda bulunmaktadır. Aynı zamanda kontrolsüz KSA'lar saldırganlar tarafından fark edildiğinde sisteme uzaktan müdahale edilebilir ve hassas sensör verileri çalınabilir veya veriler değiştirilebilir.

2.6.2 Güvenlik Gereksinimleri

KSA'larda güvenlik kısıtlamaları beraberinde bazı gereksinimler doğurmaktadır. Bunlardan en önemlisi veri gizliliğidir. Veri gizliliği, KSA'ların sensör verilerini sadece veriyi alması gereken birime göndermesi ve gönderilen verinin belirli bir şifreleme algoritması

ile şifrelenmesi olarak tanımlanmaktadır. Hassas verilere sahip askeri veya tıbbi uygulamalarda bu husus önem teşkil etmektedir.

Bunlara ek olarak birimler arası zaman senkronizasyonu sağlanması güvenlik açısından önem teşkil etmektedir. Bu senkronizasyon sayesinde sensör birimlerinden alınan verilerin düzgün zamanda alındığından da emin olunabilmektedir. Ek olarak sensörler arası gecikme hesaplanarak yabancı kişilerin sisteme müdahil olması da engellenebilmektedir.

Bir başka güvenlik gereksinimi de aynı sistem altında konumlanmış olan birimlerin birbirini tanıması ve herkese ait ortak kimlik bilgisi olmasıdır. Buna aynı zamanda gönderilecek olan sensör verilerine göndericinin kimlik bilgilerinin de eklenmesi dahil edilebilir.

2.6.3 Güvenlik Saldırıları

Sensör ağları birkaç saldırı türüne karşı özellikle savunmasızdır. Saldırıları daha çok servis saldırıları, trafik analizi, fiziksel saldırılar olarak gerçekleşmektedir.

Sistem saldırıları tüm sisteme veya tek birime yapılan saldırılardır. Bunların sonucunda sistem yararsız hale gelmektedir, tüm ve kısmi bir şekilde çalışmasını durdurmaktadır. Hasta sağlık durumu takibinde, önemli trafik yollarında veya askeri uygulamalarda bu durum hayati önem taşımaktadır. Bu saldırı türünde saldırgan sürekli olarak yapay sinyaller üreterek sensör birimlerinin iletişimine engel olmaktadır. Bu hem kablosuz iletişim kanalında veri çarpışmalarına neden olurken, hem de sensör birimi tarafından gönderilecek olan verinin sürekli gönderilmesi sonucunda zaten az olan güç kaynakları da tükenmiş olmaktadır.

Bildiğimiz üzere KSA'larda sensör birimleri kablosuz olarak haberleşen düşük güçte sinyal üreten birimlerden oluşmaktadır. Bir diğer saldırı türünde saldırgan KSA'larda gerçekleşen haberleşmeleri uzaktan analiz etmekte ve haberleşmenin en yoğun olduğu birimi hedef almaktadır. Daha sonra birime gönderilen yüksek güçte bozucu sinyal sonucunda sistem komple çalışamaz hale gelmektedir.

Sensör birimleri genellikle kullanıcıdan uzakta faaliyet göstermekte ve kullanıcı KSA

ile uzaktan iletişim kurmaktadır. Bu durumu KSA'ları fiziksel saldırılara karşı çok savunmasız hale getirmektedir. Saldırgan basitçe kurulu olan birimleri tespit edip onlara çalışamaz hale getirerek kendi kaçak yazılımı yükleyebilmekte veya sensör birimlerinden kaydedilen verileri kimsenin haberi olmadan çalabilmektedir.

2.6.4 Savunma Yöntemleri

Güvenlik saldırıları ve sistem gereksinimleri belirtildikten sonra saldırılara karşı yapılabilecek savunma yöntemlerini tanımlamak gerekmektedir.

Kablosuz sistemlerde verilerin şifrelenmesi ve alınmış verilerin deşifrelenmesi için anahtar kullanılmaktadır. Sensör birimlerinin bu anahtarı kullanması için anahtarın önceden sistemde bulunan tüm birimlere tanıtılmış olması veya daha sonradan sisteme kullanıcı tarafından gönderilmesi gerekmektedir. Buna benzer anahtarlar kullanılarak şifreleme yöntemleri olarak genelde asimetrik kriptografi kullanılmaktadır. Bu yöntemde biri genel, diğeri de birime özel olmakla iki anahtar kullanılmakta olduğundan şifreleme/deşifreleme yoğun aritmetik işlemler barındırmaktadır. İşlem yoğunluğundan dolayı bu yöntem güc kapasitesi düşük olan sensör birimlerinde kullanmak pratik olarak uygun değildir. Bunun yerine simetrik şifreleme yöntemleri kullanımı KSA'lar için daha uygundur. Bu tür yöntemlerde şifreleme ve deşifreleme daha az işlem gerektirdiğinden KSA'larda kullanımı uygundur. Veri Şifreleme Standardı (Data Encryption Standard, DES), 3DES, RC5, AES ve başka şifreleme yöntemleri simetrik şifrelemeye örnek olarak gösterilebilir [54].

Çok karşılaşılan saldırı türlerinden biri klasik yayın bozulmasıdır. Bu tür saldırılarda bir veya birkaç sensör birimi ile haberleşme yapılamama sonucu sistemde iletişim kopmaktadır. Bu tür saldırılara karşı en iyi strateji etkilenmiş birimleri tespit etmek ve onları sistemden uzaklaştırmaktır. [55]'de bu sorunun üstesinden gelmek için yöntem verilmiştir. Bu yöntemde etkilenmiş sensör birimlerinin komşuları durum hakkında sisteme bilgi vermekle veri kullanımı için ortaklaşa güvenli yol seçmektedir.

Bahsedildiği üzere bazı saldırılarda saldırgan sistemin veri akışını takip ederek merkezi birimi bulmakta ve bu birime zarar vermektedir. Bu tür saldırılara karşı farklı savunma yöntemleri geliştirilmiştir. [56]'da buna örnek olarak iki yöntem gösterilebilmektedir. İlk

yöntemde sensör birimi değişen zaman aralıklarında göndermesi gereken veriyi farklı bir birime göndermektedir. Bunun sonucunda saldırgan trafiğin yönünü tespit edemeyerek merkezi istasyon konumunu bulamayacaktır. Diğer yöntemde de gerçek sensör verisi dışında sahte veri üreterek onu komşu birimlerden herhangi birine rastgele göndermektedir. Sistemdeki tüm sensör birimlerinde bu böyle devam etmektedir.

KSA'nın uzun süreli denetimsiz çalışabilme özelliği bu tür sistemlerin fiziksel saldırılara karşı savunmasını zorlaştırmaktadır. Düşen sensör birimi maliyetleri sensörlerde daha dayanıklı parçaların kullanılmasını kolaylaştırmaktadır. Kurcalanmaya karşı dayanıklı dış kutu ve yazılım kullanımı birim güvenliğini önemli ölçüde artırmaktadır. Fiziksel saldırılara karşı başka bir yöntem birimin kendisini kullanılmaz hale getirmektir. Bu yöntemde sensör birimi fiziksel bir hareket veya izinsiz kullanım algıladığında sakladığı veriler, şifreler ve güvenlik anahtarları ile beraber yok etmesidir. Bu uygulamanın daha çok birim sayısı çok olan ve kaybedilen birimin tüm sistemi etkilemeyeceği KSA'larda kullanılması uygundur. Gönderilen verinin yönlü antenler vasıtasıyla iletilmesi de bir başka güvenlik yöntemi olarak düşünülebilir. Bu durumda gönderilen veri sadece belirli bir birime iletilerek kenar saldırıların sinyali bulması zorlaşmaktadır.

2.7 Sensör Ağları Uygulamaları

Gelişen mikro-elektronik alanı ile beraber sensör birimleri sıcaklık, nem, ışık seviyesi, basınç, mekanik stres gibi çok farklı fiziksel parametreleri ölçebilecek hale gelmiştir. Bunlarla beraber fiziksel boyutları da önemli miktarda azalan sensör birimleri önceden kullanılamayan uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır. Büyük yapıların yapısal kontrolü, boru hattı denetimi (su, petrol, doğal gaz), yanardağ gözlemleri, askeri ve endüstriyel uygulamalar bunlara örnek olarak gösterilebilir.

Yapısal kontrol için yapılmış ilk KSA prototiplerinden biri Wisden'dir [31]. Bu KSA ağı sismik araştırmalar için kullanılmıştır. Testler kapalı bir alanda yapılmış olup sistemde toplam 25 birim kullanılmıştır. Sensör birimleri ağaç topolojisi altında birleştirilmiş ve veri kaydı için 16 bitlik titreşim kartı kullanılmıştır. Bir diğer uygulamada meşhur Golden Gate Köprüsü'nün yapısal bütünlüğü incelenmiştir [32]. Bu çalışmada toplam 64 sensör birimi kullanılmış olup kendi alanında yapılmış olan en geniş çaplı uygulama özelliğini

taşımaktadır. [33]'te KSA kullanılarak yapısal kontrol yapılması ile ilgili ek bilgiler bulunmaktadır.

KSA'ların ulaşılması zor alanlarda kolay kullanımı ve bakım gereksinimlerinin düşük olması gibi özellikleri onların yanardağ gözlemlenmesi gibi uygulamalarda kullanılmasını kolaylaştırmaktadır. Harvard Üniversitesindeki araştırmacılar 2006 senesinde Ecuador arazisinde bulunan iki yanardağa gözlem amaçlı KSA yerleştirilmiştir. [34] Sensör birimleri 3 haftalık kısa sürede 230 volkanik olay kaydetmiştir. Araştırma sonunda KSA'ların anlık gerçekleşen olayların kaydedilmesindeki yüksek performansı gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra uzun süreli verilerin izlenmesindeki performansları yeterli bulunmamıştır.

Boru hattı altyapılarında zamanla yaşlanmadan, tıkanıklıklardan ve diğer ortam koşullarından kaynaklanan sorunlar oluşmaktadır. Bu sistemleri gözlemlemek ve oluşabilecek sorunları öngörmek bakım maliyetlerini önemli ölçüde etkilemektedir. Imperial College London, Intel Research ve MIT tarafından ortaklaşa geliştirilmiş PipeNet sistemi şehir alanlarında konumlanmış boru hatlarının gerçek zamana yakın gözlemlenmesini ve otomatik olarak hat kaçaklarının bulunmasını sağlamaktadır [35].

Enerji iletim hattı gözlemlenmesi elektrik sisteminin düzgün çalışmasını, kaçakların bulunmasını ve arıza durumlarında noktasal tespit yapılmasını kolaylaştırmaktadır. Bu amaç için kullanılan KSA birimlerinin tasarımı oldukça basittir: ölçülecek gücü veya voltajı ölçen birim ve iletişim birimi. İletişim birimi için kablolu sistem kullanılması kurulum ve maliyet açısından öngörülmemektedir. Bunun yerine KSA'larda kullanılmak üzere tasarlanmış IEEE 802.15.4 veya GSM gibi kablosuz iletişim protokolleri kullanılabilir. Voltaj veya akım ölçümleri için uygun olarak güç trafoları (Potential Transformers, PT) ve akım trafoları (Current Transformers, CT) kullanılmaktadır. Farklı değer aralıkları için kullanılan sensör de uygun olarak seçilebilmektedir. Güç ölçümlerine ek olarak hatta olan kaçakları da bulabilecek bir tasarım [30]'de tanıtılmıştır. Bu tasarımda işlemci olarak 8051 mikrodenetleyicisi, kablosuz iletişim için ise GSM modülü kullanılmıştır. Daha farklı tasarımlar ve çözümler [36, 37, 38, 39, 40]'de bulunabilir.

Müttefik kuvvetlerin korunması, asker erken uyarı sistemleri, geniş alanda saha gözlemlenmesi gibi çeşitli askeri uygulamalarda KSA kullanılmaktadır. Hızlı yerleştirme,

kendi kendini düzenleme ve hata toleransı gibi  zellikler KSA'ları bu alanda kullanmak için yeri doldurulamaz sistemler yapmaktadır. Bu tür a ların tasarımı normal sistemlere göre daha zordur. Bunun temel nedeni kullanılacak olan sistemlerin savaş alanlarına yerle tirilece i için dayanıklılık, güç kapasitesi gibi konularda yüksek performans sağlanması gerekti indendir [41, 42]. Smart Dust ilk KSA uygulamalarından biri olup DARPA tarafından geliştirilmiştir. Sisteme ait sensör birimi toplam 100 mm³ hacme ve iki tane yongaya sahiptir [12, 43].

Sağlık alanındaki KSA uygulamaları genelde hastanın sağlık durumunu takip eden sensörlerden oluşmaktadır. Sensörler kullanım kolaylığı açısından giyilebilir veya kısa alıcı kabloları ile hastanın yakınında bulunabilmektedir. Kaydedilen veriler sayesinde doktorun hastaya ula madı ı durumlarda bile teşhis koyması kolaylaşmaktadır. Bu durum acil müdahale gerektiren hastalıklarda hayati önem arz etmektedir [44, 45].

Gelişmiş ülkelerde trafik sorunu günlük hayatı olumsuz yönde etkileyen önemli faktörlerden biridir. Bu amaçla kav aklarda trafik ışıklarını kontrol eden sistemler ile akıllı trafik denetim altyapısı geliştirilmeye ba lanmı tır. Trafik akışı bu sistemlerde kamera, endüktif halka veya ultrasonik sistemler ile gözlemlenmektedir. Yapılan bazı çalışmalar bu sensör verilerini bir KSA altında toplayıp trafiğin akışını daha iyi tahmin ederek sorunun azalmasına yardımcı olmaktadır [46, 47].

Elektronik ve yonga teknolojisinin gelişmesiyle maliyet ve kullanım kolaylığı açısından KSA'lar tabiat gözlemlenmesi için uygun hale gelmiştir. Geçmişte sahadan kaydedilen veriler ancak cihaza ulaşıp doğrudan alınması ile incelenebilirken günümüzde sensörlere ba lanan alıcı-verici birimleri vasıtasıyla artık canlı olarak saha durumu takibi yapılabilir. Bu uygulama sayesinde ormanda çıkan yangınlara erken müdahale, aktif volkan arazilerinde durum kontrolü, sel felaketlerini boyutlarını öğrenme gibi çeşitli alanlarda gelişme kaydedilmiştir [48, 49].

3. SİSTEM TASARIMI

Bu tez kapsamında açık alan veya kapalı bir yapı içerisinde belirli noktalarda konumlanmış sensör birimlerinden oluşan KSA tasarlanmıştır. KSA'ya ait birimler aynı anda 4 farklı kanaldan analog gerilim değerlerini ölçebilecek kapasitededir. Ölçülen analog veriler dahili ADC ile dijital sinyale çevrilmekte ve komşu sensör birimleri aracılığıyla merkezi istasyona iletilmektedir. Merkezi istasyon alınmış sensör birim verilerini ve saat bilgilerini uygun formatta kaydetmektedir. Bu bölümde tasarlanmış sistemin tüm yapım aşamaları ayrıntılı biçimde ele alınmıştır.

3.1 İşlemci

Piyasa araştırması yapılırken seçilecek olan işlemcinin maliyetinin uygun olması ve kullanıcının onu kolay elde edebilmesi göz önünde bulundurulmuştur. Tez kapsamında Bölüm 2.5.2 baz alınmış ve en uygun aday olarak Atmel şirketine ait 'Atmega328/P' marka işlemci seçilmiştir.

Atmel'in seçilmesinin bir diğer nedeni yonga dahilinde 6 analog veri girişi yoluna sahip Analog-Sayısal Dönüştürücü (Analog to Digital Converter, ADC) olmasıdır. ADC'nin çözünürlüğü 10 bit olup bu özelliği sayesinde sensör birimlerinde voltaj verilerinin örneklenmesi için fazladan devre elemanları kullanılmamış, böylece maliyet ve güç tüketimi azaltılmıştır. ADC'nin bu uygulamadaki görevi dış ortamdan alınan analog voltaj değerlerini dijital sinyale çevirerek işlemciye iletmektir.

Seçilmiş mikrodenetleyici ayrıca SPI ve I²C haberleşmelerini desteklemektedir. Merkez biriminde bulunan SD kart okuyucu, RTC saat birimi ve iletişim birimi haberleşme için bu protokolleri kullanacaktır.

3.2 İletişim Sistemi

Bu sistem tasarlanacak olan KSA'nın belki de en önemli kısmıdır. KSA'lar kablosuz iletişim ile birbiriyle bağlantı kurduklarından kullanılan güç büyük ölçüde iletim aşamasında harcanmaktadır. Dolayısıyla bu sistemin olabileceği kadar düşük güç tüketmesini ve bunun yanında bize istenilen performansı da sağlamasını gerekmektedir.

2'de verilmiş bilgiler ışığında tez kapsamında kullanılmak üzere Nordic Semiconductor'a ait nRF24L01+ modülü seçilmiştir. Bu modül 2 Mbps iletim hızına kadar çıkabilme ve 1km mesafeye veri iletebilme kapasitesine sahiptir. Buna karşılık maksimum akım tüketimi 13 mA olup, düşük enerji modunda bu değer 900 nA'e kadar düşebilmektedir. Modülün çalışma frekansı 2400-2525 MHz'dir ve ayarlanabilen 126 iletim kanalından oluşmaktadır. Modülasyon olarak bu birim Gaussian Frequency-Shift Keying (GFSK) kullanmakta ve birimin iletim gücü 0 - 18 dBm arası 4 farklı seviyeye ayarlanabilmektedir.

İletişim birimi haberleşme için SPI protokolünü kullanmaktadır. Bu birim işlemciden gelen verileri işleyerek gönderim için 32 bit'lik paketler halinde getirmektedir. Daha sonra uygun modülasyon kullanarak bu verileri diğer sensör birimlerine iletmektedir.

Modül hakkında daha detaylı bilgi Ek B'de verilmiştir.

3.3 İkincil Birimler

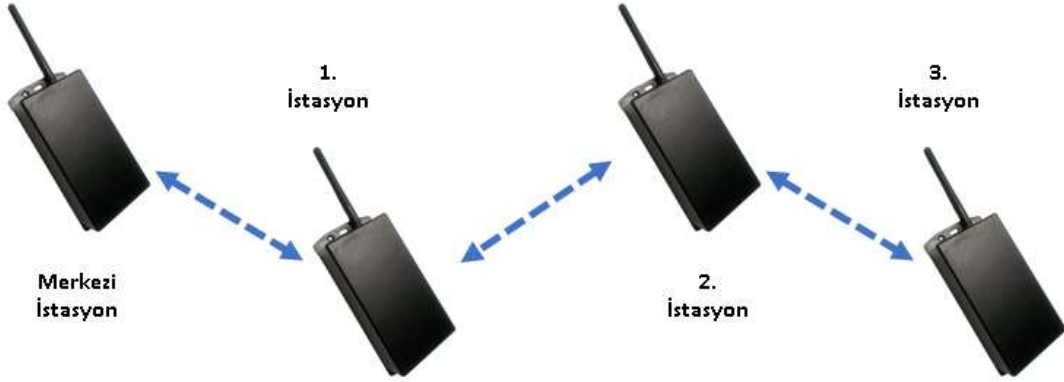
Projede ana birimler dışında yardımcı sistemler de bulunmaktadır. Bunlar merkezi birimde kullanılan saat ve SD kart okuyucu modülleridir.

KSA'lar sensör birimlerinden oluşmakta ve bu birimler belirli aralıklarla kurulduğu ortamdan veri toplamaktadır. Verileri anlamlandırmak için aynı zamanda tarih ve saat bilgilerinin de veriler ile beraber kaydedilmesi gerekmektedir. Hazırlanmış prototipte bu görevi merkezi birime eklenmiş Gerçek Zamanlı Saat (Real Time Clock, RTC) birimi yapmaktadır. RTC olarak Adafruit şirketine ait PCF8523 modeli seçilmiştir [59]. Bu modül üzerinde pil yuvası barındırmaktadır. Bu pil sayesinde sensör biriminde olabilecek anlık güç kayıplarında sistem zaman verisi kaybolmayacaktır.

Bahsedildiği üzere bağımsız çalışan KSA'larda veriler belirli aralıklarla kaydedilmektedir. Uygulamaya göre ölçülmüş veriler ya her bir sensör biriminde, ya da tek bir merkezde kaydedilebilir. Bu prototipte verilerin merkezi istasyonda kaydedilmesi uygun görülmüştür ve bu amaçla SD kart okuyucu modülü kullanılmıştır [58]. Merkezi birimde konumlanmış birim aracılığıyla sensör birimlerinden alınan veriler hafıza kartına 'text' formatında kaydedilmektedir.

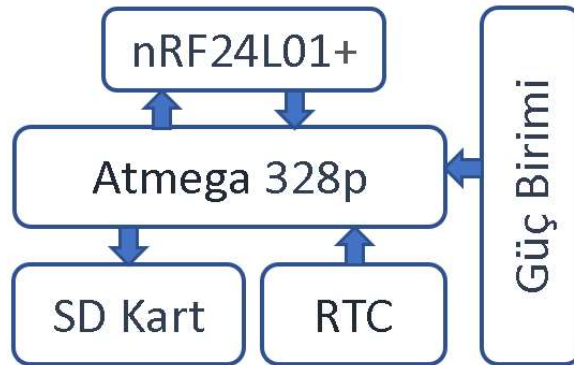
3.4 Sistem Mimarisi

Sistem temel olarak kullanıcı tarafından kontrol edilen veya bağımsız çalışabilen merkezi istasyondan ve bu istasyona kablosuz ağ ile bağlı alt birimlerden oluşmaktadır. Bu yapı Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



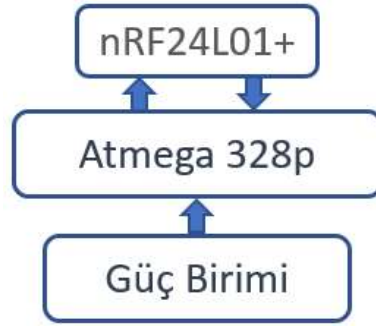
Şekil 3.1. Genel sistem yapısı.

Her bir alt birimde güç birimi, kablosuz iletişim modülü (nRF24L01+) ve mikroişlemci (ATmega328/P) bulunmaktadır. Buna ek olarak merkezi istasyona ait birimde verilerin kaydedilmesi için SD kart okuyucu ve sistemin zaman bilgisini alacağı modül de eklenmiştir. RTC üzerinde sistemde olabilecek ani güç kayıplarının sistem saatini etkilememesi için ek pil mevcuttur. Merkezi istasyonun genel şeması Şekil 3.2’de, diğer istasyonların şeması ise Şekil 3.3’te gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Merkezi istasyonun mimarisi.

Şekil 3.1’den anlaşıldığı üzere alt birimler merkezi istasyon ile komşu birimler aracılığı-



Şekil 3.3. Diğer istasyonların mimarileri.

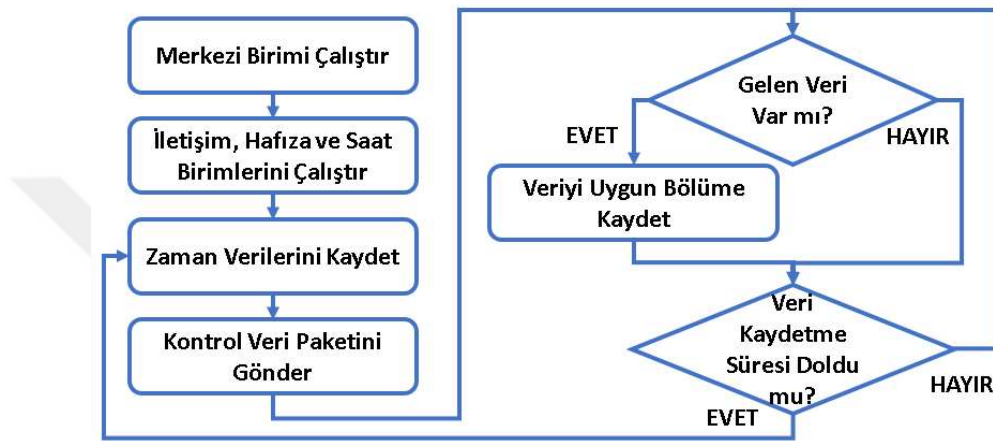
ğıyla haberleşmektedir. Kullanıcı tarafından gönderilen komutlar önce birinci alt birime ulaşmaktadır. Daha sonra bu birim komutu bir sonraki birime iletmekte ve bu iletişim tüm hat boyunca aynı algoritma ile devam etmektedir. Haberleşmenin merkezi birim tarafından tetiklenmesinden sonra birimler arası veri akışının zamana göre durumu Şekil 3.4'te verilmiştir.

Zaman Birimi	Merkezi İstasyon	1. Sensör Birimi	2. Sensör Birimi	3. Sensör Birimi
t0	K. V. P.			
t1		K. V. P.		
t2	1. SBV		K. V. P.	
t3		2. SBV		K. V. P.
t4	2. SBV		3. SBV	
t5		3. SBV		
t6	3. SBV			

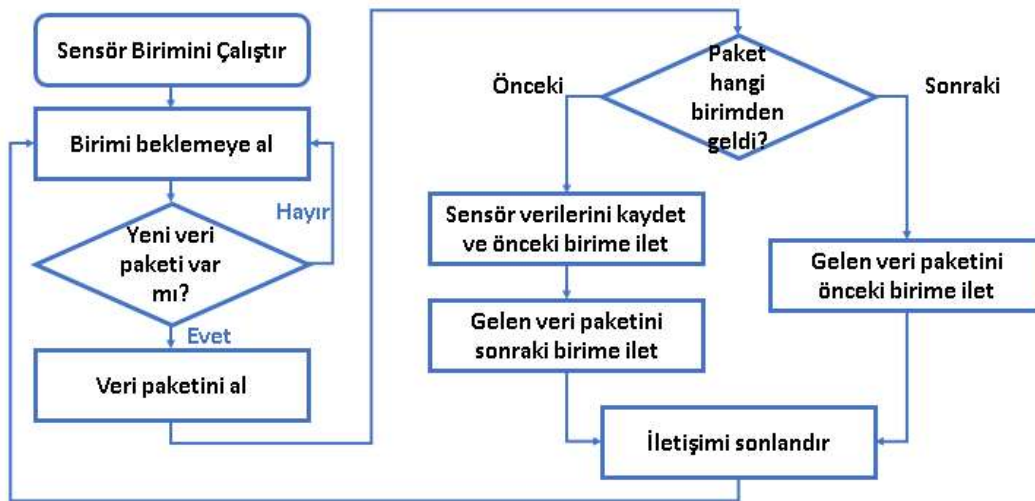
Şekil 3.4. Zamana göre birimler arası haberleşme.

Burada K.V.P Kontrol Veri Paketini, S.B.V ise Sensör birimi Verisini belirtmektedir. Resimden de anlaşıldığı üzere sistemde sensör birim sayı arttıkça merkezi istasyondan tüm sensör birimlerine ait verilerin okunması için gereken süre da aynı oranda artmaktadır.

Sensör birimleri kablosuz ağdan aldığı veri doğrultusunda iki işlemten birini yapmaktadır. Eğer alınan veri K.V.P ise sensör birimi voltaj değerlerini kaydederek önceki birime iletecek ve K.V.P'ni bir sonraki birime aktaracaktır. Diğer seçenek olarak sensör birimine S.B.V paketi gelecektir. Bu durumda veri alındığı gibi önceki birime iletilmektedir. Sensör birimlerinin karar verme mekanizması akış şeması biçiminde Şekil 3.6'da daha açıklayıcı biçimde gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Merkezi birimin çalışma akışı.



Şekil 3.6. Sensör birimlerin çalışma akışı.

Birimlerden alınmış veriler merkezi istasyonda kart okuyucu ile SD karta text dosyası halinde kaydedilmektedir. Alınmış her yeni veri zaman bilgisi ile beraber yeni satıra kay-

dedilmektedir. Hatırlatmak gerekiyor ki zaman bilgileri üzerinde batarya bulunan RTC biriminden alınmaktadır. Veri yapısı Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Burada ilk sütun verilerin kaydedildiği zamanı, diğer sütunlar ise sırasıyla ilgili sensör birimlerinden alınmış verileri göstermektedir. Veriler kısmına sensör birimlerinin 4 kanaldan okuduğu voltaj değerleri kaydedilmektedir.

3.5 Donanım

Tez kapsamında dış ortamda veya kapalı bir alan içerisinde çalışacak KSA tasarlanacaktır. Kullanılacak olan donanımın tüm bu farklı ortam koşulları altında sorunsuz çalışması beklenmektedir.

Donanım tasarımına sensör birimi içindeki alt birimlerin bağlanacağı çift katmanlı baskı devre tasarımı ile başlanmıştır. Devreye ait tasarım detayları ve çizimleri bu bölümde ayrıntılı biçimde incelenmiştir.

Devre kartı seçilmiş Arduino UNO mikrodenetleyici kartı ile uyumlu olacak şekilde tasarlanmıştır [66]. nRF24L01, güç birimi, analog voltaj girişi, RTC ve SD kart okuyucu giriş çıkışları kart üzerinde konumlanmıştır. Kartın alt kısmında ise Arduino UNO’ya bağlanacak çıkışlar bulunmaktadır. Tasarımı Altium Designer yazılımı ile yapılmış ve devreye ait 3 boyutlu görünüm Şekil 3.7’de gösterilmiştir [67].

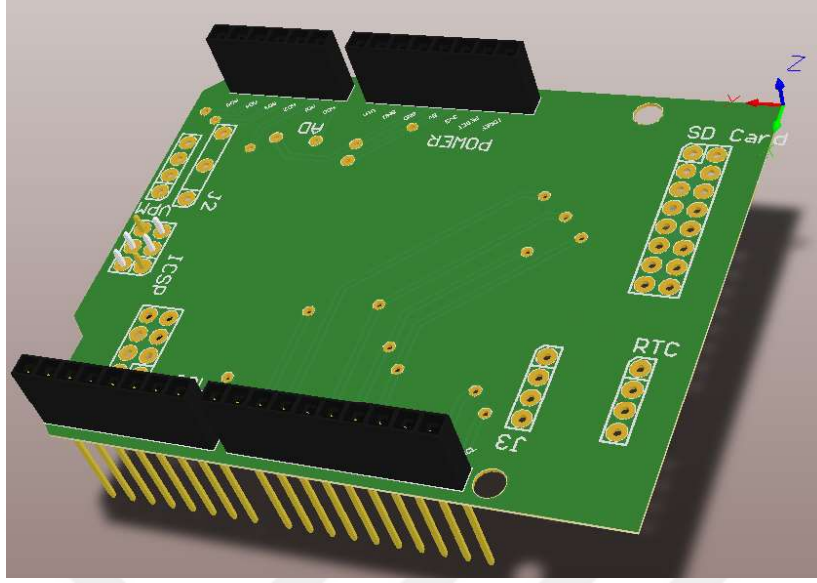
Bu yapı iki katmanlı Baskı Devre Kartından (Printed Circuit Board, PCB) oluşmaktadır. Üst ve alt katmanlara ait çizim Şekil 3.8’de gösterilmiştir. Bu çizimde üst katmana ait veri yolları kırmızı, alt katmana ait çizimler ise mavi renk ile gösterilmiştir.

’Shield’ Arduino kartına uzun bacaklı dişi pinler vasıtasıyla bağlanacaktır. İletişim birimi ve voltaj ölçüm birimi ’Shield’ın sağ tarafında, LCD ekran modülü, RTC ve SD kart okuyucu birimleri ise sol tarafında konumlandırılmıştır. İki katmana ait veri ve güç yolları 16 ’Via’ ile birbirine bağlanmış ve oluşabilecek arızalara karşı üst ve alt yüzey tamamen topraklanmıştır.

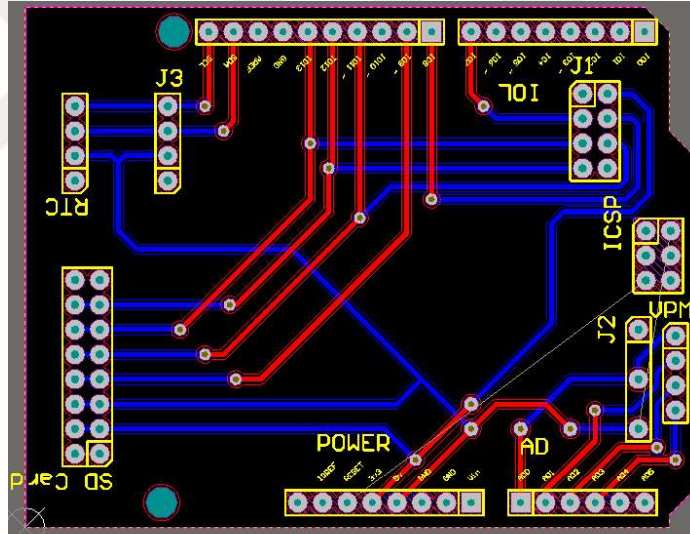
Baskı devresi ve üzerinde konumlanan bileşenlerin pozisyonları belirlendikten sonra sisteme uygun kutu seçimi yapılmıştır. Seçim yapılırken belirlenecek kutunun su geçir-

Çizelge 3.1. Kaydedilmiş Sensör Verisi Örneği.

Tarih ve Saat	1. Sensör Birimi Verisi	2. Sensör Birimi Verisi	3. Sensör Birimi Verisi
2017/10/8 3:0:36	1 1.09 1.14 1.11 1.13	2 1.36 1.33 1.291.25	3 1.35 1.38 1.49 1.45
2017/10/8 3:0:40	1 1.08 1.13 1.09 1.11	2 1.36 1.32 1.281.25	3 1.36 1.38 1.49 1.46
2017/10/8 3:0:43	1 1.32 1.37 1.34 1.37	2 1.39 1.35 1.311.27	3 1.35 1.38 1.49 1.45
2017/10/8 3:0:46	1 1.58 1.59 1.52 1.49	2 1.33 1.30 1.251.22	3 1.37 1.39 1.49 1.46
2017/10/8 3:0:49	1 1.41 1.42 1.35 1.32	2 1.32 1.29 1.251.22	3 1.36 1.38 1.49 1.45
2017/10/8 3:0:52	1 1.23 1.30 1.26 1.27	2 1.38 1.34 1.301.26	3 1.35 1.37 1.49 1.45
2017/10/8 3:0:55	1 1.35 1.40 1.32 1.30	2 2.54 2.37 2.202.00	3 1.37 1.40 1.51 1.47
2017/10/8 3:0:59	1 1.56 1.63 1.54 1.50	2 1.89 1.77 1.641.49	3 1.34 1.36 1.47 1.43
2017/10/8 3:1:2	1 1.69 1.75 1.67 1.62	2 1.38 1.32 1.271.24	3 1.36 1.38 1.49 1.45
2017/10/8 3:1:5	1 1.03 1.12 1.07 1.07	2 1.35 1.32 1.281.24	3 1.35 1.38 1.49 1.46
2017/10/8 3:1:8	1 1.34 1.40 1.30 1.26	2 1.32 1.29 1.251.22	3 1.36 1.38 1.50 1.46



Şekil 3.7. Arduino UNO 'Shield' 3 boyutlu görüntüsü.



Şekil 3.8. Arduino UNO 'Shield' PCB çizimi.

mez olmasına ve sistemin dış ortamda çalışacağına göre ortam koşullarında bozulmayacak kalitede olmasına dikkat edilmiştir. Aynı zamanda KSA'nın modüler bir yapıda olması istendiğinden hem merkezi, hem de ikincil birimlerde aynı kutunun kullanılmasına özen gösterilmiştir. Bu isterler göz önünde bulundurularak tez kapsamında kullanılmak üzere ebatları 68x130x44 mm, malzemesi ABS olan kutular seçilmiştir. Seçilmiş kutulara ait teknik çizim ve boyutlar EK D'de verilmiştir. Üretilmiş olan prototip KSA birimine

ait dış görünümü Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



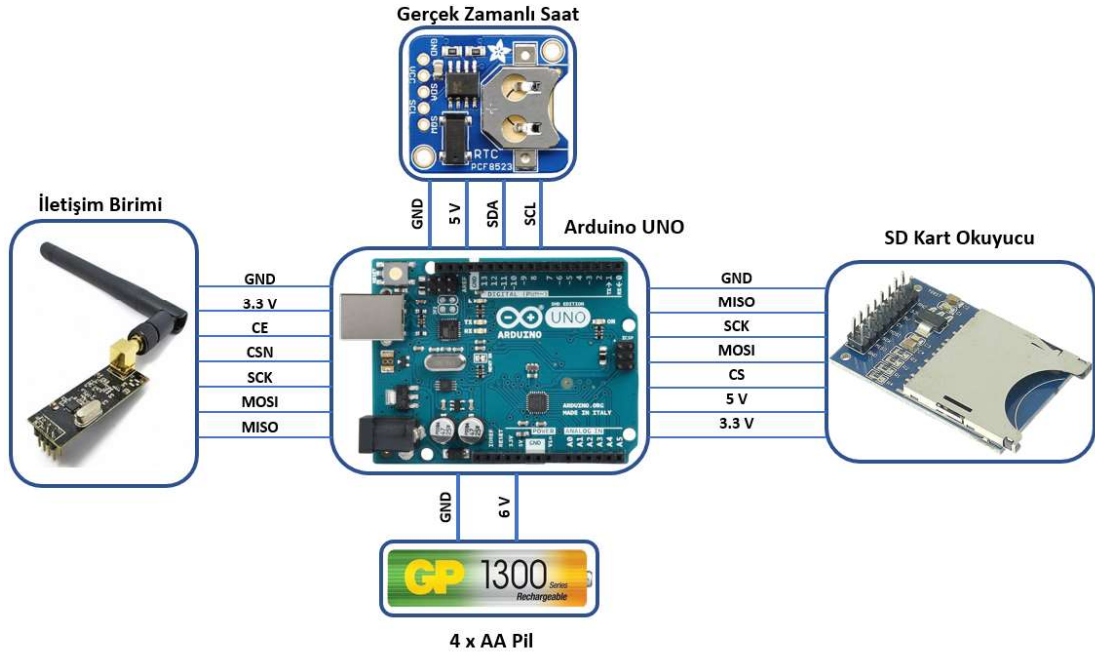
Şekil 3.9. KSA Birimi Dış Görünümü.

Tasarlanmış alt birimlerin detaylı iç yapısı tüm veri güç iletim hatları ile birlikte şematik olarak Şekil 3.10'da ve Şekil 3.11'de gösterilmiştir.

3.6 Yazılım

Donanım tasarımı bittikten sonra Arduino UNO'da kullanılan Atmel işlemcisi için kod yazılmıştır. Kodların derlenmesi için Arduino IDE derleyicisi kullanılmıştır [60]. Merkezi istasyona ve diğer alt birimlere ait geliştirilmiş kaynak kodları EK C'de verilmiştir. Bu bölümde kodlarda yer alan bazı önemli kısımlar ve kodlama detayları hakkında bilgi verilecektir.

Kablosuz iletişim birimi için kütüphane olarak kullanım kolaylığı, hatasız çalışma, diğer yazılımlarla olan uyumluluğu göz önünde bulundurularak [61]'de belirtilen kaynak kullanılmıştır. Buna ek olarak kablosuz iletişim biriminin ve SD kart okuyucunun işlemci ile haberleşmesi için SPI kütüphanesi [63], RTC kullanımı için I²C [64] kütüphaneleri kullanılmıştır.



Şekil 3.10. KSA Merkezi İstasyon Yapısı.



Şekil 3.11. KSA Diğer İstasyonların Yapısı.

Merkezi istasyon kodunda ilk olarak yukarıda belirtilmiş kütüphaneler tanımlanmıştır. Daha sonra *RF24radio(7, 8)* satırı ile kullanılacak olan haberleşme modülünün bir obje olarak yazılım tarafından tanınması sağlanıyor. Burada 7 ve 8 değerleri haberleşme modülünün CE ve CSN pinlerinin işlemcinin hangi bacaklarına bağlanacağını göstermektedir. CE pini modülün veri gönderim ve alım akışını kontrol etmektedir. CSN (Chip Select Not) pini ise SPI haberleşmesinde gelen verileri okumak için kullanılmaktadır. Benzer işlem SPI haberleşmesini kullanan RTC birimi için de yapılmıştır. Sonraki aşamada gönderim kanalının adres numarası tanımlanmıştır. Bu adres numarası sayesinde aynı frekansta birden fazla cihaz sorunsuz şekilde haberleşebilmektedir. Daha

sonra iki kısımdan oluşan 'Structure' veri yapısı tanımlanmaktadır. Daha sonra birimlerin kimlik ve sensörlerden okunan verileri bu yapıya kaydedilecek ve iletişim zamanı bu veri yapısında kayıtlı veriler gönderilecektir. Hatırlatmak gerekir ki nRF24L01+ modülü birim zamanda en fazla 32 bit veri gönderme kapasitesine sahiptir.

Bir sonraki kısımda modüle ait güç, hız ve adres ayarları yapılmıştır. Güç ayarını yapmak için '*radio.setPALevel(RF24_PA_MAX)*' satırı kullanılmış ve seçilebilecek 4 güç seviyesinden 0 dBm'e tekabül eden en yüksek seviye seçilmiştir. Enerji kısıtlaması olan uygulamalarda daha düşük akım tüketimi için bu değer daha düşük olarak da ayarlanabilir. Bu da doğal olarak iletim mesafesini belirli bir miktar azaltacaktır. İletişim için seçilebilecek üç hız ayarından 250 kbps hız seçilmiş ve '*radio.setDataRate(RF24_250KBPS)*' ile ayarlanmıştır. Bundan farklı olarak birim 1 ve 2 mbps hızlarında iletim yapabilme kapasitesine sahiptir. İletişim hızı yükseldikçe iletişim kanalının hassaslığı azaldığı için en uzun iletişim mesafesi için 250 kbps hızı seçilmiştir. İletişim modülünün seçilmiş hızda kullandığı bant genişliği maksimum 800 kHz olması sayesinde komşu kanallar ile frekans karışması ihtimali ortadan kalkmıştır. Bu hızın bir diğer seçilme nedeni de diğer iletim hızlarına göre daha düşük elektrik tüketimine sahip olmasıdır. Hız seçildikten sonra kullanılan kanal ayarı yapılmıştır. İletişim modülü 2400 ile 2525 MHz arasında ayarlanabilen 126 kanal kullanabilmektedir. Bu frekans aralığı genel kullanım için açık olduğundan ortamda olan diğer cihazlar tarafından da kullanılmaktadır, dolayısıyla iletişim için sistemin kullanılacağı ortama göre daha az yoğun olan veya hiç kullanılmayan kanal seçilmelidir.

nRF24L01+ modüllerinin birbiri ile iletişim sağlayabilmesi için birimlerin iletim frekansları ve hızlarının aynı olması gerekmektedir. Bu ayarlar seçildikten sonra haberleşme için sanal 'Boru' yapısı oluşturulmaktadır. İletişim bu sanal yapılar üzerinden sağlanmaktadır. Her bir yapı özel Adres numarasına sahiptir ve bu her 'Boru'dan aynı zamanda iki yönlü iletişim yapılabilir. Adres tanımlaması sayesinde aynı frekansta olan farklı birimler birbiri ile veri kaybı olmadan iletişim sağlayabilmektedir.

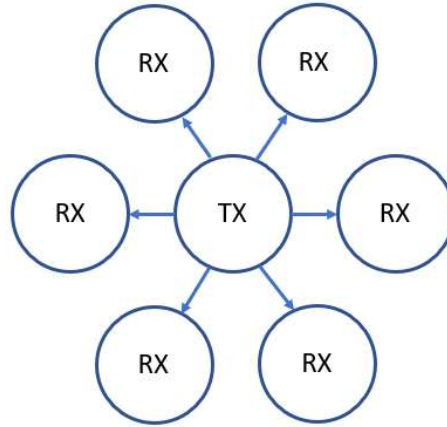
Bu ayarlardan sonra SD kart ve RTC birimleri ile haberleşme başlatılır. RTC'nin hangi tarih ve saatten itibaren çalışmaya başlayacağı kod tarafından ilk açıldığında belirlenir. RTC üzerinde ayrı pil bulunduğundan istasyonun gücü kesilse bile RTC'de kayıtlı tarih

ve saat korunacaktır ve zaman kesintisi olmayacaktır.

Bundan sonra kullanıcı tarafından belirtilmiş aralıklarla çalışacak olan ve Şekil 3.5'de belirtilmiş algoritma devreye giriyor. Bu algoritma verilerin gönderilmesi ve geri alınmış voltaj değerlerinin SD karta yazılmasından sorumludur.

Üstte belirtilmiş anlatım merkezi istasyon kodu için yapılmıştır. Diğer istasyonlarda çalışma şekli farklıdır. Burada kod aynı şekilde kullanılacak kütüphanelerin ve iletişim biriminin tanımlanması ile başlamaktadır. Daha sonra birimin haberleşeceği önceki ve sonraki birime ait iki adet adres numarası belirlenmektedir. Bunların ardından veri yapısı ve iletişim birim ayarları gelmektedir. Tüm bunlardan sonra birimin kullanacağı Şekil 3.6'da belirtilmiş algoritma kodlanmıştır. Her iki kod Ek C'de verilmiştir.

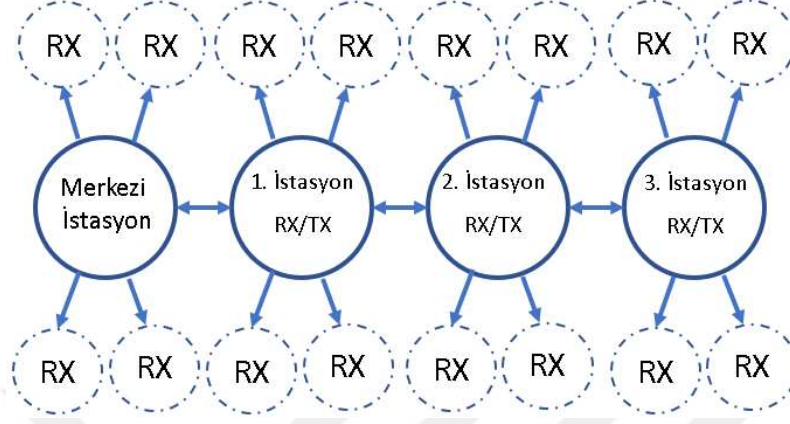
Normal durumda bir nRF24L01+ modülü aynı zamanda en fazla 6 birim ile haberleşebilmektedir. Bunu sağlayan yapı MultiCeiver™ olarak tanımlanmaktadır ve bağlantı şeması Şekil 3.12'de grafiksel olarak verilmiştir. MultiCeiver™ hakkında daha ayrıntılı bilgi ekte bulunmaktadır.



Şekil 3.12. MultiCeiver™ yapısı.

Bu yapıda alıcı birimler aynı zamanda verici olmamaktadır. Dolayısıyla bu sistemi bizim uygulamamızda kullanmak ilk başta uygun değildi. Sorunu çözmek için kullanılan haberleşme kanalı aynı zamanda hem alıcı, hem de verici görevini üstlenmesi gerekiyordu. Bu sorun kodlama yapılırken uygun birimlerin gerekli olduğu zaman alıcı, diğer zamanlarda da verici olarak ayarlanarak çözülmüştür. Buna ait detaylar Şekil 3.5 ve

Şekil 3.6'da verilmiştir. Bu uygulama sonucu oluşturulmuş yeni yapının genel şeması Şekil 3.13 gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Tezde kullanılan haberleşme yapısı.

Çizimden de gözüktüğü gibi yeni yapı seri şekilde birleştirilmiş MultiCeiver™ birimlerinden oluşmaktadır. Bu tasarım sayesinde çok sayıda sensör birimi sisteme entegre edilebilir.

3.7 Prototip Kullanımı

Bu bölümün başında belirtildiği üzere prototipi hazırlanacak olan KSA açık veya kapalı alanda kullanılacaktır. KSA kullanımı uygulamaya göre iki şekilde olabilir: Denetimsiz ve Denetimli çalışma.

3.7.1 Denetimsiz Kullanım

Açık alan uygulamalarında KSA tüm birimleri ile beraber veri toplayacağı alana kurulur. Birimlerin çalıştığı üzerinde bulunan LED'den anlaşılmaktadır. Uygulamaya göre değişiklik gösterse de genelde kurulacak olan sistem uzun süreli olarak sahada kalmaktadır ve tüm bu zaman aralığında da kullanıcı KSA'ya müdahale etmemektedir. Bu tür sistem kullanımı 'Denetimsiz Kullanım' olarak adlandırılmaktadır. Bu uygulamada KSA kullanıcı tarafından belirlenmiş aralıklarda sensör verilerini merkezi istasyonda bulunan hafıza kartına otomatik olarak kaydetmektedir. Daha sonra kullanıcı istediği zaman gelip hafıza kartından bu verilere ulaşabilmektedir.

3.7.2 Denetimli Kullanım

Bazı uygulamalarda sistemin sürekli olarak hem çalışması, hem de gözlemlenmesi gerekmektedir. Bu durumda Merkezi İstasyon kullanıcının bilgisayarına seri haberleşme bağlantısı ile bağlı oluyor ve gelen veriler anlık olarak uygulama arayüzüne aktarılıyor ve gerektiğinde sisteme müdahale ediliyor. Bu tür kullanım bizim uygulamamızda 'Denetimli Kullanım' olarak adlandırılmaktadır. MATLAB programı ile geliştirilen arayüz sayesinde kullanıcı sensör birimlerinden gelen verileri kolaylıkla inceleyebilmekte, görsel olarak yorumlayabilmekte ve istediği zaman kaydedebilmektedir. Arayüze ait ekran görüntüsü Şekil 3.14'da verilmiştir.



Şekil 3.14. MATLAB Kullanıcı Arayüzü.

Kullanıcı verileri okumak için ilk önce merkezi istasyonun bilgisayara bağlı olduğu Port numarasını arayüzde bulunan uygun kutucuğa girdikten ve 'Start' düğmesine bastıktan sonra program otomatik olarak sensör birimine bağlanacak ve tüm sensör birimlerine ait verileri anlık olarak görüntüleyecektir. Sensör birimlerine ait veriler arayüzün üst kısmında bulunan alanlarda anlık olarak gösterilecektir. Kullanıcı alınan sensör birim verilerini grafiksel olarak görüntülemek istediğinde uygun sensör biriminin yanında bulunan onay butonunu işaretlemelidir. Bu veri akışı kullanıcı 'Stop' düğmesine basana kadar devam etmektedir. Bu düğme basıldığı anda sensör birimlerinden veri akışı durmakta ve o ana kadar alınmış tüm veriler uygulama arayüzünde kaydedilmektedir. Kullanıcı

istendiği zaman 'Save' düğmesi ile süreç boyunca kaydedilmiş sensör verilerini tarih ve saat verileri ile text dosyasına kaydedilebilir.



4. TESTLER

Önceki bölümde tez kapsamında tasarlanacak olan KSA'nın tasarım aşamaları detaylı biçimde anlatılmıştır. Bu tasarım aşamalarından sonra tez kapsamında 4 adet sensör biriminden oluşan KSA prototipi üretilmiştir. Bu bölümde üretilmiş olan KSA'nın performans ölçümü için yapılmış testler hakkında bilgiler bulunmaktadır. Bu testler sonucunda prototipin güç tüketimi, yayın mesafesi, frekans seçimi ve başka parametreleri belirlenmiştir. Tasarlanmış Kablosuz Sensör Ağı teknik özellikleri Çizelge 4.1'de verilmiştir

Çizelge 4.1. Prototip Kablosuz Sensör Ağı Teknik Özellikleri.

Topoloji Türü	Zincir Topolojisi
Birim Sayısı	1 Merkezi, 3 İkincil İstasyon
Birim Ağırlıkları	Merkezi Birim: 290 g 1. İstasyon: 220 g 2. İstasyon: 210 g 3. İstasyon: 260 g
Birim Boyutları (Antensiz)	156 x 68.30 x 43.50 mm
Çalışma Frekansı	2400 - 2525 MHz
İletişim Hızı	250 kbps 1 mbps 2 mbps
Modülasyon	GFSK
Anten Kazancı	2 dBi
Çıkış Gücü	0- -18 dBm
Çalışma Mesafesi	0-1000 metre
Kullanıcı Arayüzü	MATLAB GUI Seri Port

4.1 Teknik Performans Testleri

Bölüm 3'te verildiği üzere haberleşme modülünün 4 farklı çıkış gücü seçeneği vardır. Bunlar sırasıyla 0 dBm, -6 dBm, -12 dBm ve -18 dBm'dir. Kullanılan birimlerin gerçek çıkış güçleri bu değerler baz alınarak Rohde & Schwarz NRP-Z56 model Termal güç

sensörü ile test edilmiştir. Çıkan sonuçlar Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. nRF24L01+ modülü deneysel çıkış gücü seviyeleri.

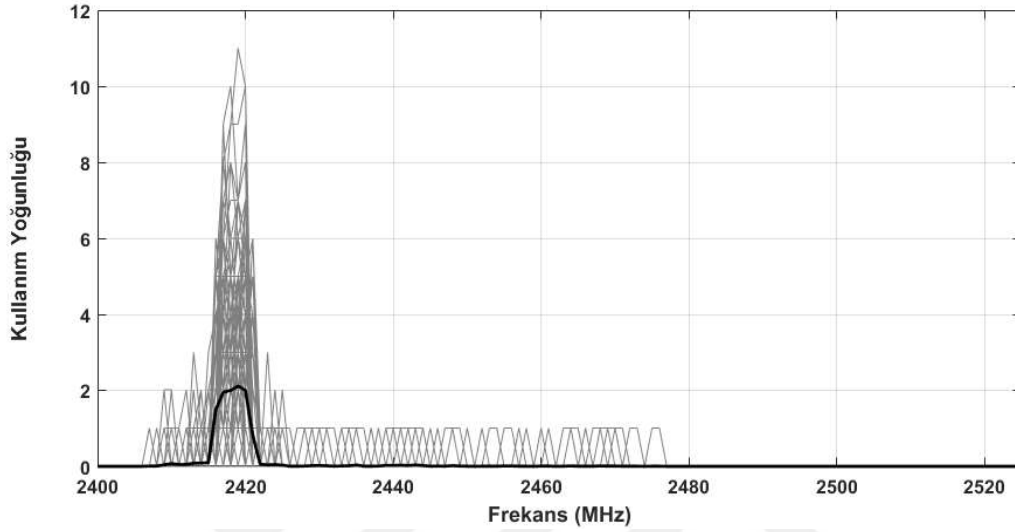
Güç Ayarı	Maksimum Çıkış Gücü (dBm)			
	Merkezi İstasyon	1. Sensör Birimi	2. Sensör Birimi	3. Sensör Birimi
Maksimum	-2.94	-2.82	-3.98	-4.58
Yüksek	-7.54	-9.41	-8.73	-9.58
Düşük	-13.91	-17.91	-15.11	-15.73
Minimum	-22.01	-23.17	-23.78	-24.32

Bu değerler ölçülürken geçiş kaybı 1.8 dB olan kablo kullanılmıştır. Çizelgede verilmiş değerlere bu kayıp eklendiğinde ortalama olarak verilmiş teorik değerden sapma -2.05 dB olarak bulunmaktadır. Haberleşme biriminin kullanım kılavuzunda ± 4 dB olarak verilmiş RF güç hassasiyeti baz alınır ise ölçülmüş değer normal aralıkta olduğu söylenebilir.

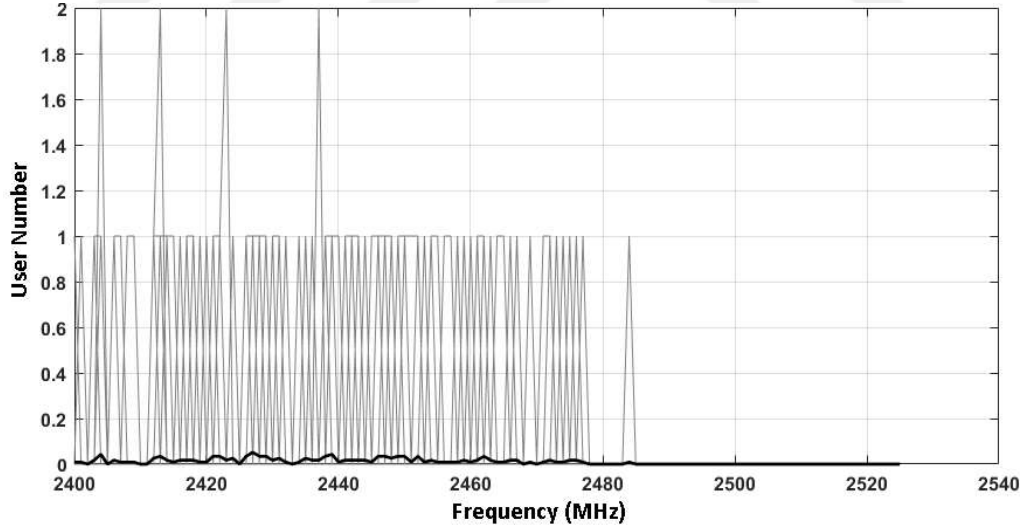
Birimler arası haberleşme zamanı sistemin kodu çalıştırması, veri paketini göndermesi, gelen veri paketinin demodüle edip işlemlerinden dolayı belirli bir gecikme meydana gelmektedir. Bu süre çok kısa olsa da uygulama alanına göre önem arz edebilir. Bizim uygulamamızda bu süreyi ölçmek için sistem öncelikle normal çalışma durumunda kurulmuştur. Daha sonra Merkezi İstasyon’dan kontrol verisi gönderilerek gönderim zamanı kaydedilmiştir. Aynı zamanda sensör birimlerinden gelen mesajların da gelme zamanları kaydedilerek her mesajın Merkezi İstasyona ulaşma süresi iki zaman arasındaki farktan bulunmuştur. Bu işlem 50 kez tekrar edilerek ortalaması alınmıştır. Bu işlemler sonucunda 1., 2. ve 3. Sensör biriminden Merkezi İstasyona verilerin gönderim süreleri uygun olarak 54 ms, 107 ms ve 145 ms olarak bulundu.

Son olarak üretilmiş sensör birimlerinin ağırlıkları ölçülmüştür. Merkezi birimin ağırlığı 0.29 kg, 1., 2. ve 3. sensör birimlerinin ağırlıkları ise sırasıyla 220 g, 210 g ve 260 g olarak ölçülmüştür.

Daha sonra frekans yoğunluğu şehir ortamında test edilmiştir ve sonuçları Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Son test yüksek gerilim trafosunun ve iletim hattının bulunduğu ortamda yapılmıştır ve sonuçları Şekil 4.3’te gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Yaşam alanı kullanım yoğunluk grafiği.



Şekil 4.3. Açık alan kullanım yoğunluk grafiği.

Beklenildiği üzere en yoğun kullanım ortamı Beytepe kütüphanesinde kaydedilmiştir. Burada 2400-2420 MHz frekans aralığı çok yüksek yoğunluğa sahiptir. 2480-2520 MHz arası ise kullanıcı sayısı neredeyse yok seviyesindedir. Yaşama alanı ortamında genel yoğunluğun kütüphaneye göre daha az olduğu gözlemlenmiştir. Burada daha çok

2420 MHz etrafındaki frekanslar kullanılmıştır. 2440 MHz ve sonrası tüm frekanslar sistem kullanımı için uygun gözükmemektedir. Son olarak beklenildiği üzere açık alanda neredeyse tüm ISM bandında kullanıcı yok seviyesindedir. Bu ortamda verilmiş frekans bandından herhangi bir frekans sistemde kullanmak için uygundur.

4.3 Veri Paketi Hata Oranı

Tez kapsamında iletişim kanalı performans ölçümü için Paket Kayıp Oranı (PKO) ölçeği kullanılmıştır. PKO özetle belirli bir süre zarfında verilmiş birimler arası iletilen paket sayısı belirtmektedir. PKO hesaplanırken verici birim sabit bit konuma yerleştirilmiş ve 1 saniyelik aralıklarla kontrol paketi göndermek üzere ayarlanmıştır. Alıcı birimi ise belirli mesafelerde konumlandırılarak vericiden 1 dakika içinde alınan paketlerin sayısını hesaplamaktadır. Bunun sonucunda verilmiş iletişim ayarları ve mesafe için PKO oranı hesaplanmıştır. [62]'de Zincir Tipi topolojilerde dayanıklılığın belirli eşik değerinden sonra düştüğü gösterilmiştir. Bizim uygulamamızda da yapılan testlerde PKO değerlerinde belirli bir mesafeden sonra ani düşüş yaşanmıştır. Bu düşüşten sonra hesaplanan değerler anlamlı olmadığından test sonucu olarak sadece PKO düşüş mesafesini verilmiştir. Verilmiş ayarlarda bu mesafeden daha kısa aralıkta iki birim arasında 0%'lık bir PKO gözlemlenmiştir. Veri PKO test düzeneğine ait fotoğrafı Şekil 4.4'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Farklı Haberleşme Ayarlarında Paket Kayıp Oranı kritik mesafesi (Metre).

İletişim Hızı \ RF Çıkış Gücü	0 dBm	-6 dBm	-12 dBm	-18 dBm
2 mbps	365	330	281	239
1 mbps	440	371	325	286
250 kbps	452	445	412	366

4.4 İletim Mesafesi Testi

Bir sonraki test olarak kablosuz iletişim modüllerinin maksimum iletim mesafesinin bulunması hedeflenmiştir. Hatırlatmak gerekiyor ki nRF24L01+ modülleri 4 farklı güçte ve 3 farklı iletişim hızında haberleşebilmektedir. Her ayar iletim mesafesi üzerinde farklı etki göstereceğinden tüm ayarların test edilmesi ve kullanım için uygun olan optimal



Şekil 4.4. Veri PKO test düzeneği.

değerlerin seçilmesi gerekmektedir. İletişim modülünün veri kitapçığından alınan güç seviyesi ve alıcı hassasiyeti değerleri Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.4. nRF24L01+ modülü güç seviyeleri.

Seviye	RF Çıkış Gücü (dBm)	DC Akım Tüketimi (mA)
Maksimum	0	11.3
Yüksek	-6	9.0
Düşük	-12	7.5
Minimum	-18	7.0

Değerlerden de gözüktüğü gibi yüksek güç ve düşük iletişim hızı seçimi iletişim modüllerinin haberleşme mesafesinin en yüksek seviyeye çıkartacaktır. Diğer taraftan gücün

Çizelge 4.5. nRF24L01+ modülü alıcı hassasiyeti verileri.

İletişim Hızı	Alıcı Hassasiyeti (dBm)
2 mbps	-92
1 mbps	-95
250 kbps	-104

yükseltilmesi ve iletişim hızının düşürülmesi tüketilen ortalama akımı da artıracaktır. Alıcı antene ulaşan güç miktarı Denklem 4.1 ile hesaplanabilmektedir.

$$P_{Rx} = P_{Tx} + G_{Tx} + G_{Rx} - L_{FSPL} - L \quad (4.1)$$

Burada P_{Tx} verici gücünü, G_{Tx} ve G_{Rx} uygun olarak verici ve alıcı anten kazançlarını, L_{FSPL} FSPL'den kaynaklanan kayıpları, L ise diğer kayıpları belirtmektedir.

Bu tablodan haberleşme frekansı artırıldığında sistemin FSPL kaybının da yükseldiği gözükmemektedir. Bu kayıp aynı zamanda da iletişim mesafesi ile de düz orantılıdır.

Maksimum haberleşme menzili için yapılan açık saha testi Konya'da yapılmıştır. Bu testte verici birim sahada bulunan yapının çatısında yerden yaklaşık olarak 5 metre yükseklikle sabit noktada konumlandırıldı. Birimin konumu sabit GPS antenlerinden tayin edildi. Alıcı birim hareketli olup yerden yaklaşık olarak 2 metre yükseklikte konumlandırılmıştır. Bu birimin konumu mobil GPS alıcıları tarafından belirlendi. Sonraki aşamada alıcı birimi konumlanma yüksekliğini değiştirilmeyecek şekilde açık alanda verici biriminden uzaklaştırılmak suretiyle hareket ettirildi. Aynı anda verici birimi 1 saniyelik aralıklarla alıcı birime kontrol verici göndermekteydi. Bu test birimler arası iletişimin koptuğu ana kadar yapıldı ve haberleşmenin kesildiği konum GPS verilerinden bulunarak birimler arası mesafe kaydedildi. Aynı test 4 farklı güç seviyesi ve 3 farklı frekans için tekrar edildi. Yapılan testlerde 250 kbps hız ve 0 dBm çıkış gücü kullanılarak 2.4 GHz frekansında 1100 metrelik bir mesafede iletişim yapılabilmiştir. Farklı modül ayarları için maksimum iletişim mesafesi Çizelge 4.6'da metre cinsinden verilmiştir.

Çizelge 4.6. Farklı Haberleşme Ayarlarında Maksimum Haberleşme Menzili (Metre).

İletişim Hızı \ RF Çıkış Gücü	0 dBm	-6 dBm	-12 dBm	-18 dBm
2 mbps	816	505	605	519
1 mbps	900	559	686	551
250 kbps	1100	896	841	881

4.5 Sistem Saha Testi

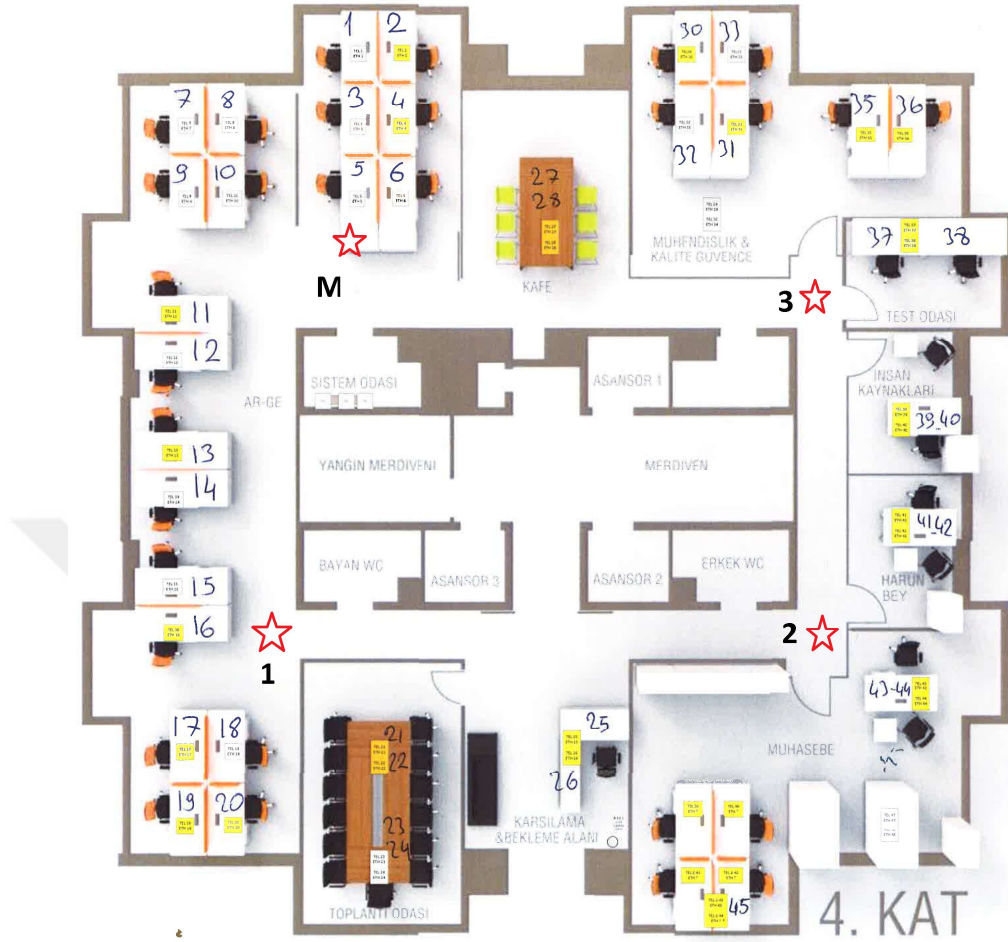
Belirli bir ortam için frekans seçimi ve iletişim mesafesi testleri yapıldıktan sonra şartlar uygun ise KSA kurulumu gerçekleştirilebilir. Tez kapsamında üretilmiş prototip 3 farklı ortamda tüm 4 sensör birimi ile beraber gerçek şartlar altında test edilmiştir. Bu ortamlar sırasıyla kapalı oda/kat ve iki farklı açık hava sahalarıdır.

İlk test için İstanbul'da bulunan bir ofis kullanılmıştır ve 4 sensör birimi ile tüm sistem testi yapılmıştır. Testin yapıldığı ofisin planı ve sensör birimlerinin konumları Şekil 4.5'de verilmiştir.

Burada Merkezi istasyon ile 1. birim arasında 9 metre, bir ile ikinci birim arasında 12 metre ve son olarak ikinci ile üçüncü birimler arasında 8 metre bulunmaktadır. Yapılan testte başarılı bir biçimde tüm sensörlerin 4 analog girişlerinden voltaj değerleri doğru biçimde okunmuştur.

İkinci test olarak Konya'da açık alanda toplam 4 birim Şekil 4.6'te verilmiş noktalarda konumlandırılmıştır. Test zamanı fotoğraflanmış 1 numaralı sensör birimine ait görseli Şekil 4.7'de görülmektedir.

Bu testte merkezi istasyon ile 1. birim arası mesafe 90 metre, 1. ve 2. birim arası mesafe 70 metre, 2. ve 3. birimler arası mesafe ise 80 metre olarak ayarlanmıştır. Test 2.4 GHz'de gerçekleştirilmiştir. İletişim gücü olarak 0 dbm ayarlanmıştır. Sistem ayarları yapıldıktan sonra merkez istasyondan iletişim başlatılmıştır ve sensör birimlerinden veriler okunmaya çalışılmıştır. Test sonucunda her sensör birimine bağlanmış örnek voltaj değerleri başarılı ve düzgün biçimde okunmuştur.



Şekil 4.5. Kapalı ofis test planı.

Son saha testi Hacettepe Üniversitesi Beytepe kampüsü arazisinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.8’de sensör birimlerinin konumlandırıldığı noktalar görülmektedir.

Bu testte merkezi istasyon ile 1. birim arası mesafe 90 metre, 1. ve 2. birimler arası mesafe 140 metre, 2. ve 3. birimler arası mesafe ise 130 metre olarak ölçülmüştür. Testte başarılı bir şekilde 3 sensör biriminden 4’er adet voltaj verisi ölçülmüştür.

2. sensör birimini testte yerden 40 santimetre yükseklikte konumlandırılmıştır. Bundan dolayı test sırasında ara-sıra 1. birim ile görüş açısını kapatacak engeller geldiğinden (sahada bulunan insanlar) iletişimde kopmalar gözlemlenmiştir.



Şekil 4.6. Konya açık alan test sahası.



Şekil 4.7. Konya açık alan test sahası.



Şekil 4.8. Beytepe açık alan test sahası.

5. SONUÇLAR

Kablosuz haberleşme, dijital elektronik gibi alanlarda olan gelişmeler sayesinde daha ucuz ve kompakt elektronik bileşenler üretilmektedir. Kablosuz Sensör Ağları uygulamaları da bu gelişmelerden etkilenmiş ve önceden uygulanması pratik olmayan tasarımlar çok düşük maliyetler ile üretilmeye başlanmıştır. Bunun sonucunda günlük yaşamda, endüstriyel sistemlerde, tıp ve askeri uygulamalarda KSA'lar geniş ölçüde kullanılmaya başlanmıştır.

Bu tez kapsamında arazi uygulamalarında kullanılacak, birden fazla sensör biriminde oluşan ve kablosuz olarak haberleşebilen KSA tasarımı yapılmış ve yapılan tasarım baz alınarak 4 sensör biriminden oluşan prototip üretilmiştir. Tasarlanmış Kablosuz Sensör Ağı teknik özellikleri tablo halinde Çizelge 4.1'de verilmiştir. Sistemde bulunan birimler boyutu 156x68.30x43.50 mm olan kutu halinde üretilmiştir. Birimlerin ortalama ağırlığı 0.22 kg'dır. Sensör birimlerde merkezi işlemci olarak Atmel mikrodenetleyicisi kullanılmıştır. Bu işlemcide bulunan 10 bit'lik çözünürlüğe sahip ADC sayesinde birimler anlık olarak 4 farklı kanaldan analog voltaj verisi örnekleyebilme ve dijital sinyale çevirebilme kapasitesine sahiptir. Örneklenmiş dijital veriler daha sonra 2.4-2.5 GHz ISM bandından haberleşen iletişim birimi aracılığıyla uygun veri paketi halinde komşu birimlere iletilmektedir. Ayarlanabilen gönderim frekansı sayesinde gürültü seviyesi yüksek olan ortamlarda veri kaybı en aza indirilebilmektedir. GFSK modülasyonu kullanarak 2 mbps iletişim hızına kadar çıkabilen birim sayesinde KSA anlık ölçüm gerektiren uygulamalarda kolaylıkla kullanılabilir. Sistem iletişim hızı 2 mbps'e ek olarak 250 kbps ve 1 mbps'e de ayarlanabilmektedir. Sistemde iletişim zamanı oluşabilecek hatalı veri gönderimi bulunması için CRC evrişimli kodlaması kullanılmaktadır. Alınan veride hata tespit edildiği zaman sensör birimi kullanıcı tarafından belirlenmiş zaman aralıklarında yeniden mesajı iletmektedir. Bu sayede kanal kalitesini düşük olduğu durumlarda veri kaybı önlenmekte ve hatalı veri alımı engellenmektedir. Kullanılan alıcı verici modülü 1 veya 2 bit CRC paketi üretebilme kapasitesine sahiptir. Birimin çıkış gücü de ayarlanabilir olup, en yüksek çıkış gücü ayarında (0 dBm) 1000 metreden fazla mesafede iletişim sağladığı gösterilmiştir. Sistem testlerinde bir merkezi ve 3 ikincil sensör biriminden oluşan prototip farklı ortamlarda başarılı bir şekilde test edilmiştir. 145 ms'lik kısa bir süre

içerisinde sistemde bulunan tüm sensör birimlerinden kaydedilmiş verilerin merkezi istasyona ileildiği gösterilmiştir. Merkezi birimde bulunan hafıza kartı ve zaman modülü sayesinde kaydedilmiş analog voltaj değerleri uygun formatta kaydedilmekte ve istenildiği zaman kullanıcı tarafından okunabilmektedir. Sistem kontrolü ve takibi hem seri arayüz tarafından, hem de geliştirilmiş MATLAB kullanıcı arayüzü tarafından yapılmaktadır. MATLAB tarafından yapılan işlemlerde sensör birimlerinden alınan analog voltaj değerleri anlık olarak çizilebilmekte ve kaydedilebilmektedir.

Bu tez kapsamında anlatıldığı üzere bir merkezi üç ikincil istasyondan oluşan KSA prototipi üretilmiştir. Prototipte iletişim birimi olarak dipol anten kullanılmıştır. Yönsüz anten olan dipol yerine yönlü anten kullanılarak sensör birimlerinin kapsama alanı artırılabilir. Bu durum aynı zamanda veri güvenliğini de artıracaktır. Sensör birimlerine güneş panelleri konularak denetimsiz kullanım durumunda KSA'nın daha uzun süre çalışma imkanı sunulabilir. Ayrıca birimlerdeki yazılıma güç tüketim protokolleri eklenerek daha az enerji ile daha uzun servis süresi elde edilebilecektir. Önerilen bu geliştirmeler ile daha verimli güç tüketimine sahip, kapsama alanı daha geniş bir ürün elde edilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Akyildiz, I.F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., Cayirci, E., Wireless sensor networks: a survey, *Computer Networks*, 38, 393-422, **2002**.
- [2] Chong, C.Y., Kumar, S.P., Sensor Networks: Evolution, Opportunities, and Challenges, *Proceedings of the IEEE*, 91, 8, 1247 - 1256, **2003**.
- [3] Dargie, W., Poellabauer, C., *Fundamentals of Wireless Sensor Networks: Theory and Practice*, 1.Baskı, John Wiley & Sons, **2010**.
- [4] Krishnamachari, B., Estrin, D., Wicker, S., The Impact of Data Aggregation in Wireless Sensor Networks, *Proceedings 22nd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops*, 575-578, **2002**.
- [5] Roundy, S., Steingart, D., Frechette, L., Wright, P., Rabaey, J., Power Sources for Wireless Sensor Networks, *Wireless Sensor Networks. EWSN 2004. Lecture Notes in Computer Science*, 1-17, **2004**.
- [6] Dargie, W., Poellabauer, C., *Fundamentals of wireless sensor networks: theory and practice*, John Wiley & Sons, **2010**.
- [7] Gavrilovska, L., Krco, S., Milutinovic, V., Stojmenovic, I., Trobec, R., *Application and multidisciplinary aspects of wireless sensor networks: concepts, integration, and case studies*, Springer Science & Business Media, **2010**.
- [8] Baronti, P., Pillai, P., Chook, V.W.C., Chessa, S., Gotta, A., Hu Y.F., Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15. 4 and ZigBee standards, *Computer Communications*, 30, 7, 1655-1695, **2007**.
- [9] Whitman, E.C., Sosus: The 'secret weapon' of undersea surveillance, *Undersea Warfare*, 7, 2, 256, **2005**.
- [10] Rashid, R.F., George G.R., Accent: A communication oriented network operating system kernel, 15, 5, 64-75, **1981**.
- [11] Woo A., Culler D., A transmission control scheme for media access in sensor networks, *In Proceedings of ACM MobiCom01*, **2001**.
- [12] Kahn J.M., Katz R.H., Pister K.S., Next century challenges: mobile networking for Smart Dust, *In Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*, 271-278, **1999**.
- [13] Yang X., Ong K.G., Dreschel W.R., Zeng K., Mungle C.S., Grimes C.A., Design of a wireless sensor network for long-term, in-situ monitoring of an aqueous environment, *Sensors*, 2, 11, 455-472, **2002**.
- [14] Sun Z., Akyildiz I.F., Underground wireless communication using magnetic induction, *In Communications*, 2009, 1-5, **2009**.

- [15] Wade G, *Signal coding and processing*, Cambridge university press, **1994**.
- [16] Rappaport TS, *Wireless communications: principles and practice*, New Jersey: Prentice Hall, **1996**.
- [17] Xiong F., Xiong F., Xiong F., *Digital modulation techniques*, Boston: Artech House, **2000**.
- [18] Ye W., Heidemann J., Estrin D., An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks, *Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, 3, 1567-1576, **2002**.
- [19] Polastre J., Hill J., Culler D., Versatile low power media access for wireless sensor networks, *InProceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*, 95-107, **2004**.
- [20] Kim Y, Shin H, Cha H, Y-mac: An energy-efficient multi-channel mac protocol for dense wireless sensor networks, *InProceedings of the 7th international conference on Information processing in sensor networks*, 53-63, **2008**.
- [21] Rhee I, Warrier A, Aia M, Min J, Sichitiu ML, Z-MAC: a hybrid MAC for wireless sensor networks, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 16, 3, 511-524, **2008**.
- [22] Anonim, TI CC4220 Alici-Verici, <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2420.pdf>, (Ağustos, **2017**).
- [23] Farshchi, S., Nuyujukian, P.H., Pesterev, A., Mody, I., Judy, J.W., A TinyOS-enabled MICA2-BasedWireless neural interface, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 53, 7, 1416-1424, **2006**.
- [24] Lewis, F.L., Wireless Sensor Networks, *Smart Environments: technologies, protocols and applications*, 11-46, John Wiley & Sons, **2005**.
- [25] Akyildiz, I.F., Vuran, M.C., *Wireless sensor networks*, John Wiley & Sons, **2010**.
- [26] Shrestha, A., Xing, L., A Performance Comparison of Different Topologies for Wireless Sensor Networks. *2007 IEEE Conference on Technologies for Homeland Security*, 280-285, **2007**.
- [27] Sharma, Divya., Verma, S., Sharma, K., Network Topologies in Wireless Sensor Networks: A Review, *International Journal of Electronics & Communication Technology*, 4, 3, 93-97, **2013**.
- [28] Akyildiz, I.F., Wang, X., A survey on wireless mesh networks, *IEEE Communications Magazine*, 43, 9, S23-S30, **2005**.
- [29] Jin H., Jiang, W., Handbook of Research on Developments and Trends in Wireless Sensor Networks: From Principle to Practice, *IGI Global*, **2010**.

- [30] Yerra, R.V.P., Bharathi, A.K., Rajalakshmi, P., Desai, U.B., WSN Based Power Monitoring in Smart Grids, *2011 Seventh International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP)*, 401-406, **2011**.
- [31] Xu N, Rangwala S, Chintalapudi KK, Ganesan D, Broad A, Govindan R, Estrin D, A wireless sensor network for structural monitoring, *InProceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*, 13-24, **2004**.
- [32] Kim, S., Pakzad, S., Culler, D., Demmel, J., Fenves, G., Glaser, S., Turon, M., Health Monitoring of Civil Infrastructures Using Wireless Sensor Networks, *Proceedings of the 6th international conference on Information processing in sensor networks*, 254-263, **2007**.
- [33] Lynch, J.P., Loh, K.J., A Summary Review of Wireless Sensors and Sensor Networks for Structural Health Monitoring, *The Shock and Vibration Digest*, 38, 91, **2006**.
- [34] Werner-Allen G, Lorincz K, Ruiz M, Marcillo O, Johnson J, Lees J, Welsh M, Deploying a wireless sensor network on an active volcano, *IEEE internet computing*, 10, 2, 18-25, **2006**.
- [35] Stoianov I, Nachman L, Madden S, Tokmouline T, Csail M, PIPENET: A wireless sensor network for pipeline monitoring, *InInformation Processing in Sensor Networks*, 2007, 264-273, **2007**.
- [36] Fateh, B., Govindarasu, M., Ajarapu, V., Wireless Network Design for Transmission Line Monitoring in Smart Grid, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 4, 2, 1076-1086, **2013**.
- [37] Jing, C., Shu, D., Gu, D., Design of streetlight monitoring and control system based on wireless sensor networks, *2007. ICIEA 2007. 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 57-62, **2007**.
- [38] Yang, Y., Divan, D., Harley, R.G., Habetler, T.G., Power line sensornet-a new concept for power grid monitoring, *2006. IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 1-8, **2008**.
- [39] Hung, K.S., Lee, W.K., Li, V.O.K., Pong, P.W.T., Wong, K.K.Y., Yang, G.H., Zhong, J., On Wireless Sensors Communication for Overhead Transmission Line Monitoring in Power Delivery Systems, *2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, 309-314, **2010**.
- [40] Gungor, V.C., Lu, Bin., Hancke, G.P., Opportunities and Challenges of Wireless Sensor Networks in Smart Grid, *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, 57, 10, 3557-3564, **2010**.
- [41] Lee, S.H., Lee, S., Song, H., Lee, H.S., Wireless Sensor Network Design for Tactical Military Applications: Remote Large-Scale Environments, *Military Communications Conference, 2009. MILCOM 2009. IEEE*, 1-7, **2009**.

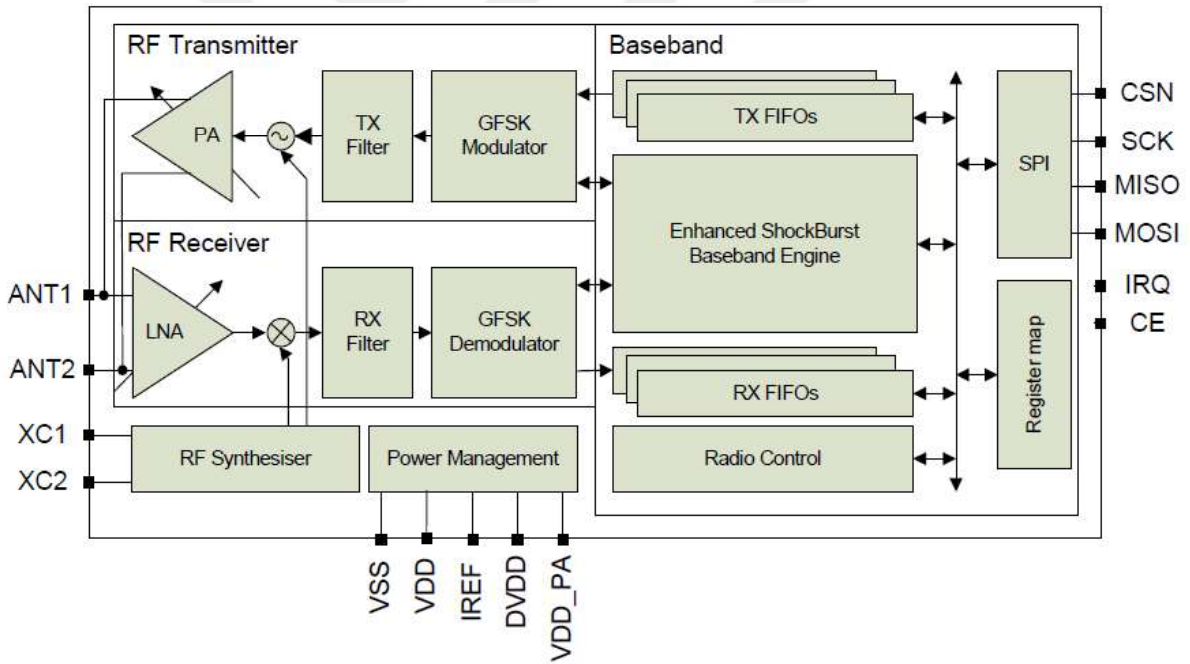
- [42] Durisic, M.P., Tafa, Z., Dimic, G., Milutinovic, V., A Survey of Military Applications of Wireless Sensor Networks, *2012 Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*, 196-199, **2012**.
- [43] Warneke B, Last M, Liebowitz B, Pister KS, Smart dust: Communicating with a cubic-millimeter computer, *Computer*, 34, 1, 44-51, **2001**.
- [44] Darwish, A., Hassanien, A.E., Wearable and Implantable Wireless Sensor Network Solutions for Healthcare Monitoring, *Sensors*, 11, 5561-5595, **2011**.
- [45] Virone, G., Wood, A., Selavo, L., Cao, Q., Fang, L., Doan, T., He, Z., Stoleru, R., Lin, S., Stankovic, J.A., An Advanced Wireless Sensor Network for Health Monitoring , *Transdisciplinary conference on distributed diagnosis and home healthcare (D2H2)*, 2-4, **2006**.
- [46] Wenjie, C., Lifeng, C., Zhanglong, C., Shiliang, T., A Realtime Dynamic Traffic Control System Based on Wireless Sensor Network, *Proceedings of the 2005 International Conference on Parallel Processing Workshops (ICPPW 05)*, 258-264, **2005**.
- [47] Yousef, K.M., Al-Karaki, J.N., Shatnawi, A.M., Intelligent Traffic Light Flow Control System Using Wireless Sensors Networks, *JOURNAL OF INFORMATION SCIENCE AND ENGINEERING* , 26, 753-768, **2010**.
- [48] Oliverira, L.M.L., Rodrigues, J.P.C., Wireless Sensor Networks: a Survey on Environmental Monitoring, *JOURNAL OF COMMUNICATIONS*, 6, 2, 143-151, **2011**.
- [49] Mainwaring, A., Polastre, J., Szewczyk, R., Culler, D., Anderson, J., Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring, *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications*, 88-97, **2002**.
- [50] Anonim, Nordic Semiconductor nRF24L01+ Ultra low power 2.4GHz RF Transceiver IC, <http://www.nordicsemi.com/eng/Products/2.4GHz-RF/nRF24L01P> (Nisan, **2017**)
- [51] Anonim, Texas Instruments CC2500, <http://www.ti.com/product/CC2500> (Nisan, **2017**).
- [52] Anonim, Atmel AT86RF233, <http://www.microchip.com/wwwproducts/en/AT86RF233> (Nisan, **2017**).
- [53] Walters, J.P., Liang Z., Shi W., Chaudhary V., Wireless sensor network security: A survey, *Security in distributed, grid, mobile, and pervasive computing*, 1:367, **2007**.
- [54] Schneier, B., *Applied Cryptography*, 2. Baskı, John Wiley & Sons, **1996**.
- [55] Wood A.D., Stankovic J.A., Denial of service in sensor networks, *computer*, 35, 10, 54-62, **2002**.

- [56] Deng J., Han R., Mishra S., Countermeasures Against Traffic Analysis Attacks in Wireless Sensor Networks, CU-CS-987-04, **2004**.
- [57] Anonim, LCD ekran, <https://www.direnc.net/2x16-lcd-display-sol-ust-mavi-qapass> (Ekim, **2017**).
- [58] Anonim, SD kart okuyucu, <https://www.direnc.net/arduino-sd-kart-modulu> (Ekim, **2017**).
- [59] Anonim, Gerçek Zamanlı Saat Modülü, <https://www.adafruit.com/product/3295> (Ekim, **2017**).
- [60] Anonim, Arduino IDE, <https://www.arduino.cc/en/main/software> (Nisan, **2017**).
- [61] Anonim, Optimized High Speed NRF24L01+ Driver Class Documenation, <http://tmrh20.github.io/RF24/>, (Nisan, **2017**).
- [62] Cai J., Song X., Wang J., Gu M., Reliability analysis for chain topology wireless sensor networks with multiple-sending transmission scheme. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 1, 156, **2014**.
- [63] Anonim, SPI library, <https://www.arduino.cc/en/Reference/SPI>, (Nisan, **2017**)
- [64] Anonim, Wire Library, <https://www.arduino.cc/en/reference/wire>, (Nisan, **2017**)
- [65] Anonim, Library for the LiquidCrystal LCD display connected to an Arduino board, <https://github.com/fdebrabander/Arduino-LiquidCrystal-I2C-library>, (Nisan, **2017**)
- [66] Anonim, Arduino UNO Board, <https://www.arduino.cc/en/main/arduinoBoardUno>, (Mayıs, **2017**)
- [67] Anonim, Atium Designer, <http://www.altium.com/altium-designer/overview>, (Mayıs, **2017**)
- [68] Anonim, Computer Simulation Technology, <https://www.cst.com/>, (Mayıs, **2017**)
- [69] Balanis C.A., *Antenna Theory*, 4. Baskı, John Wiley & Sons, **2016**.

EK A

A.1 Kablosuz İletişim Modülü: nRF24L01+

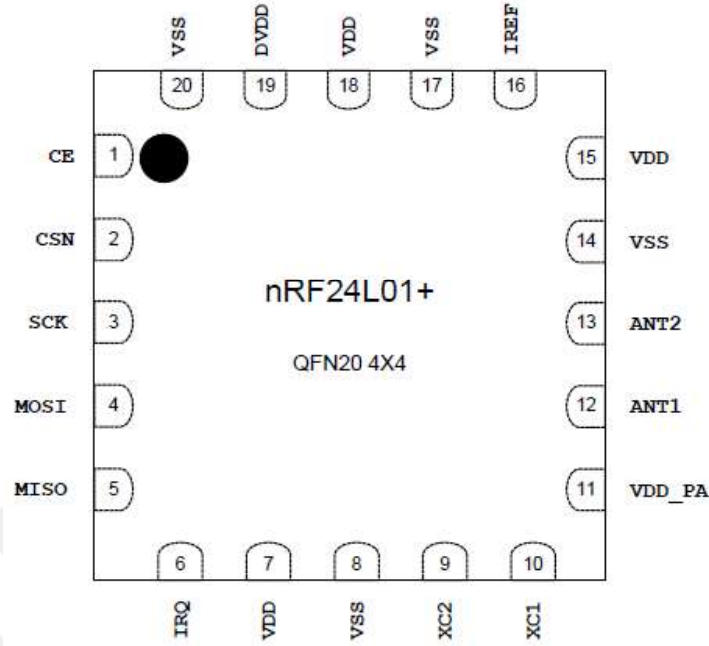
nRF24L01+, ultra düşük güç kablosuz uygulamalar için tasarlanmış 2.4 GHz alıcı-verici yongasıdır. Bu yonga, bir mikro denetleyici ve bir kaç harici pasif bileşen ile tam kapsamlı çalışan bir kablosuz iletişim sistemi olarak kullanılabilir. nRF24L01 Seri çevre birimi arabirimi (Serial Peripheral Interface, SPI) ile ayarlanmaktadır. Arka planda kalan ve yüksek hız gerektiren işlemler gömülü anaband protokol motoru (Enhance ShockBurst™) tarafından kullanıcıya gözükmeden, arka planda yapılmaktadır. Bu modül haberleşme için GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying) modülasyonu kullanmaktadır ve 2 Mbps gibi bir hızla haberleşme sağlayabilmektedir. Şekil A.1'de nRF24L01+ yongasına ait blok şemasını görebilirsiniz.



Şekil A .1. nRF24L01+ Blok Şeması [50].

A.1.1 nRF24L01+ Özellikleri

nRF24L01 modülünün pin dizilişi Şekil A.2'de verilmiştir. Bu yonganın pin sayısı 20 olup SPI haberleşme için 6, anten bağlantıları için 2 pin ayrılmıştır.



Şekil A .2. nRF24L01+ QFN20 4x4 paketinin pin dizilişi [50].

Bu pinlere ait daha detaylı bilgi Çizelge A.1’de verilmiştir. Tabloda verilmiş bilgiler kendini açıklar durumdadır. Tezin ilerleyen bölümlerinde gereklikçe daha fazla detay verilecektir.

nRF24L01+ yongasına ait mutlak değerler Çizelge A.2’de verilmiştir. Bu değerlerde bir veya birkaçının geçilmesi durumunda yongada kalıcı hasarlar meydana getirebilir.

Düşük güç durumunda yonga 900 nA elektrik harcamaktadır. Bu tüketim bekleme durumunda 26 ile 320 μA ’e arasında değişmektedir. Veri iletimi sırasında seçilmiş gönderim gücüne göre tüketilen akım miktarı 7 ile 11.3 mA aralığında kalmaktadır. Veri alımı sırasında bu değerler alım hızına göre 12.6 ile 13.5 mA arasında değişip, ortalama tüketilen akım değeri 8.9 mA olarak verilmiştir.

nRF24L01+ yongası 2400 mHz ile 2525 mHz frekans arasında konumlanmış 126 kanal ile haberleşme yapabilme kapasitesine sahiptir. Haberleşme hızı 250 kbps ile 2000 kbps arasında seçilebilir. Modülasyonlu taşıyıcı bant genişliğinin maksimum değeri 2 Mbps hızında 2000 kHz, 1 Mbps’de 1000 kHz ve 250 kbps’de 800 kHz olarak tanımlanmıştır. Aynı şekilde alıcı hassasiyeti iletim hızı azaldığında -82 dBm’den -94 dBm’e

Çizelge A .1. nRF24L01+ pin görevleri.

Pin	İsim	Pin Görevi	Açıklama
1	CE	Dijital Giriş	Yonga onayı RX ve TX mod aktifleşmesi
2	CSN	Dijital Giriş	SPI yonga seçimi
3	SCK	Dijital Giriş	SPI saat
4	MOSI	Dijital Giriş	SPI köle veri girişi
5	MISO	Dijital Çıkış	3 durum seçimli SPI köle veri çıkışı
6	IRG	Dijital Çıkış	Maskelenebilen interrupt pini. Aktif düşük
7	VDD	Güç	Güç Kaynağı (+1.9V - +3.6V DC)
8	VSS	Güç	Topraklama (0V)
9	XC2	Analog Çıkış	Kristal Pin 2
10	XC1	Analog Giriş	Kristal Pin 1
11	VDD_PA	Güç Çıkış	Dahili Güçlendirici için Güç kaynağı Çıkışı
12	ANT1	RF	Anten arayüzü 1
13	ANT2	RF	Anten arayüzü 2
14	VSS	Güç	Topraklama (0V)
15	VDD	Güç	Güç Kaynağı (+1.9V - +3.6V DC)
16	IREF	Analog Giriş	Referans Akım
17	VSS	Güç	Topraklama (0V)
18	VDD	Güç	Güç Kaynağı (+1.9V - +3.6V DC)
19	DVDD	Güç Çıkış	De-coupling amaçlı dahili dijital güç çıkışı
20	VSS	Güç	Topraklama (0V)

Çizelge A .2. Mutlak Maksimum Değerleri.

Çalışma Şartları	Minimum	Maksimum	Birim
Güç Kaynakları			
VDD	-0.3	3.6	V
VSS		0	V
Giriş Voltajları			
V _I	-0.3	5.25	V
Çıkış Voltajları			
V _O	VSS'den VDD'ye	VSS'den VDD'ye	V
Toplam Güç Harcaması			
P _O (T _A =85 °C)		60	mW
Sıcaklıklar			
Çalışma Sıcaklığı	-40	+85	°C
Koruma Sıcaklığı	-40	+125	°C

kadar düşmektedir.

Önceden de belirtildiği üzere nRF modülü 3 farklı hızda (250 kbps, 1 Mbps, 2 Mbps) veri iletişimi yapmaktadır. Düşük hızda iletişim yapılması daha iyi alıcı hassasiyeti sağlasa da, yüksek hızların daha düşük akım tüketimi ve hava çarpışması olasılığı gibi avantajları da vardır. İletim hızı RF_SETUP registerindeki RF_DR bitini ayarlamakla seçiliyor. İki modülün birbiri ile haberleşmesi için aynı iletim hızında ayarlanmaları gerekmektedir.

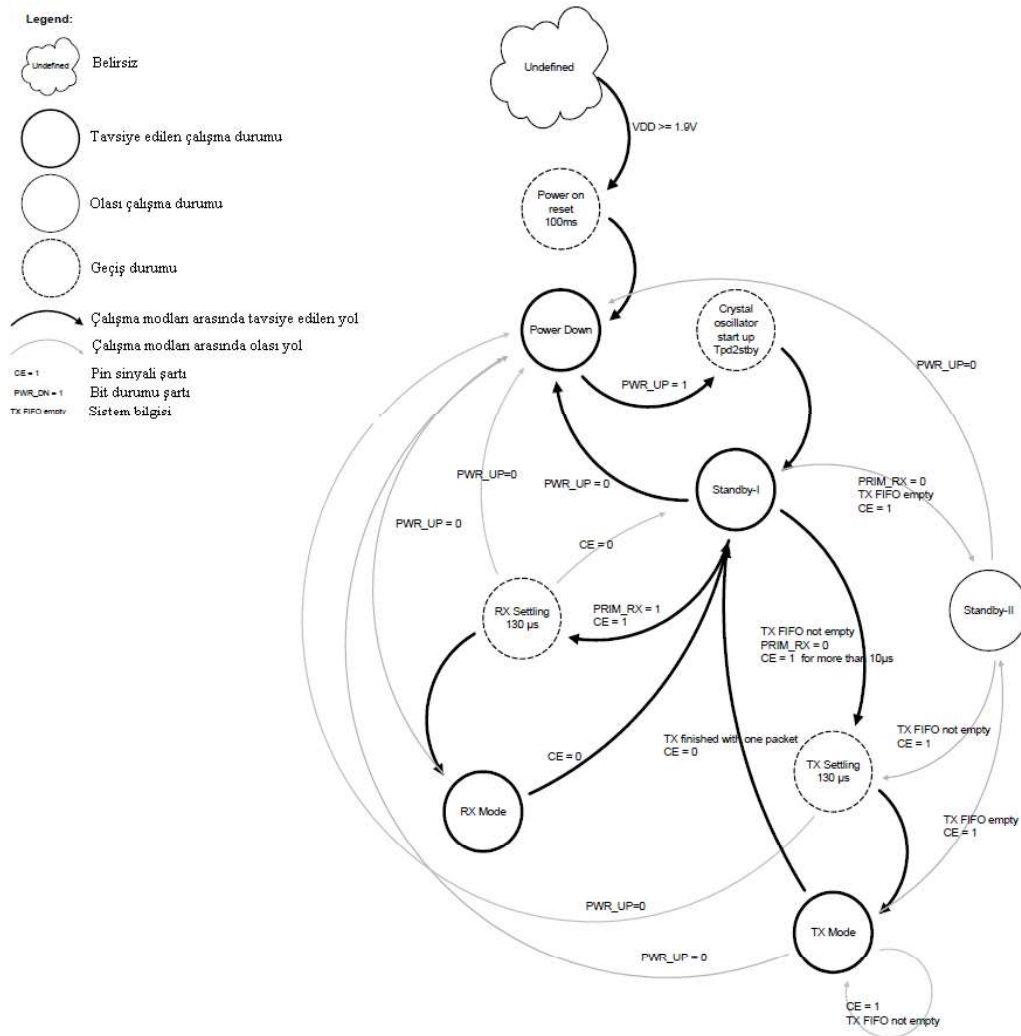
nRF modülünün çalışma frekansı 1 MHz hassasiyet ile 2.4 GHz - 2.525 GHz bandında seçilebilmektedir. Haberleşme hızına göre bant genişliği farklılık göstermektedir. 250 ve 1000 kbps hızlarında 1 MHz, 2000 kbps hızında ise bant genişliği 2 MHz'e yükselmektedir. Dolayısıyla 2 Mbps hızında iletişim yapıldığı zaman sinyallerin diğer kanallarla üst üste binmemesine dikkat edilmelidir.

nRF24L01+ modülünün Güç amplifikatörü (Power Amplifier, PA) 0, -6, -12 ve -18 dBm gibi 4 farklı seviyeye ayarlanabilir. Bu seviyelere ait akım tüketimleri sırasıyla 11.3, 9.0, 7.5 ve 7.0 mA'dir.

A.1.2 nRF24L01+ Kontrolü

Bu bölümde nRF24L01+ modülünün çalışma durumları ve modülü kontrol etmek için kullanılan parametreler açıklanmıştır. İletişim modülü gömülü durum makinesine sahiptir. Bu makine kullanıcı tanımlı register'lerden ve dahili sinyaller vasıtasıyla kontrol edilmekte ve modülün farklı çalışma durumları arasında geçişini sağlamaktadır.

Şekil A.3'de bu olası durumları, bu durumlar arasındaki olası geçişleri ve bu geçişleri sağlayan şartları gösterilmiştir.



Şekil A .3. Modül kontrolü durum diyagramı [50].

iletişim modülünde 3 farklı durum ihtimali vardır:

- **Tavsiye Edilen Çalışma Durumu:** normal operasyon sırasında tavsiye edilen durumları belirtmektedir.
- **Olası Çalışma Durumu:** olası çalışma durumunu belirtmektedir. Bu durum normal operasyon sırasında kullanılmamaktadır.
- **Geçiş Durumu:** zaman sınırlı durum olup osilatörün çalışmaya başlaması zamanı ve PLL sabitlemesi sırasında kullanılmaktadır.

VDD 1.9V veya daha yüksek voltaj değerine ulaştığında nRF24L01+ modülü 'Power on reset' durumuna geçiyor ve bu durumda 'Power Down' durumuna geçene kadar bekliyor.

A.1.2.1 Power Down Durumu

Bu durumda iken nRF24 modülü en düşük akım tüketimini yapmaktadır. Aynı zamanda tüm register değerleri ulaşılabilir olup, SPI haberleşmesi aktif durumda ayarlanmıştır. Bunun sayesinde durum değişimi yapılabilmekte ve veri registerlerine ulaşılabilir. Power Down durumuna CONFIG registerindeki PWRUP bitini sıfıra ayarlamakla giriliyor.

A.1.2.2 Standby Durumu

CONFIG registerindeki PWRUP bitine 1 değeri atandığında cihaz Standby-I durumuna geçmektedir. Bu durum kısa başlatma süresini korurken ortalama tüketilen akım değerini düşük tutmak için kullanılır. Bu durumda iken kristal osilatörün sadece bir kısmı aktif olarak çalışmaktadır. Aktif duruma değişim ancak CE pini yüksek seviyeye atandığında oluyor. Eğer bu bit RX ve TX durumlarında düşük seviyeye atandığında cihaz standby-I durumuna geçmektedir.

Standby-II durumunda ekstra saat buffer'leri aktif olduğu için standby-I durumuna göre daha fazla akım tüketmektedir. Eğer CE pini yüksek seviyede tutulursa ve TX FIFO bölümü boş ise nRF modülü standby-II durumuna geçiş yapıyor. TX FIFO bölümüne yeni paket eklendiğinde PLL normal düzenlenme (130 μ s) zamanından sonra paket gönderilmektedir.

Her iki durumda da register değerleri sürdürölmekte ve SPI aktif edilebilmektedir.

A.1.2.3 RX Durumu

nRF modöölü alıcı olarak kullanıldığında RX durumu aktif durum olarak ayarlanmaktadır. PWR_UP biti, PRIM_RX biti ve CE pini yüksek seviyeye tanımlandığında modöl RX durumuna geçiyor. Bu durumda olan nRF cihazı tanımlı kanaldan gelen RF sinyallerini demodöüle edip bu verileri anaband protokol motoruna iletmektedir. Aynı zamanda bu motor sürekli olarak aldığı veriler arasından geçerli bir paket aramaktadır (Adres eşlenmesi ve uygun CRC olması). Uygun paket bulunduğu halde boş olan RX FIFO'lerden birine gönderilir. RX FIFO'ların dolu olduğu durumunda alınmış paket siliniyor.

Denetleyici durumu standby-I veya Power Down moduna almadığı sürece modöl RX durumunda kalacaktır. Eğer anaband protokol motorunda otomatik protokol özelliği (Enhanced Shockburst™) etkinleştirildi ise nRF modöölü protokolü uygulamak için farklı durumlara da geçebilir.

Alınan Güç Dedektörü (Received Power Detector, RPD) sinyali RX durumunda ulaşılabilir olmaktadır. Eğer verilmiş kanaldan alınan sinyalin gücü -64 dBm'den daha yüksek ise RPD sinyali yüksek seviyeye ayarlanmaktadır.

A.1.2.4 TX Durumu

nRF modöölü verici olarak kullanıldığında TX durumu aktif durum olarak ayarlanmaktadır. Bu duruma girmek için PWR_UP biti yüksek, PRIM_RX bitini düşük seviyeye ayarlamak, TX FIFO'da bir yükün olması ve CE'de 10 μ s'den daha uzun süre bir sinyal olması gerekmektedir.

nRF modöölü bu durumda veriyi tam gönderip bitirene kadar kalmaktadır. Eğer CE pini düşük seviyede ise nRF standby-I moduna dönecektir. CE pininin yüksek seviyede olması modöl TX FIFO'nun doluluğuna göre iki duruma geçebilir. Eğer TX FIFO boş değil ise modöl TX durumunda kalıp TX FIFO'daki paketleri gönderecektir. Tam tersi eğer TX FIFO boş ise nRF modöölü standby-II durumunda geçecektir.

nRF modöölünün TX durumunda 4 ms'den fazla bekletilmemesi gerekmektedir. Enhan-

ced ShockBurst™ etkinleştirildiğinde modül hiçbir zaman TX durumunda 4ms'den fazla bekletilmeyecektir.

A.1.3 Enhanced ShockBurst™

Enhanced ShockBurst™ otomatik paket montajı ve zamanlaması, otomatik onaylama ve paketlerin yeniden gönderilmesine dayanan bir paket tabanlı veri bağlantısı katmanıdır. Enhanced ShockBurst™ özellikleri, ana bilgisayar denetleyicisi tarafında karmaşıklık yaratmadan çift yönlü ve tek yönlü sistemler için güç verimliliğinde belirgin bir iyileşme sağlar.

Enhanced ShockBurst™ otomatik paket kontrolü ve zamanlama için ShockBurst™ kullanıyor. Alıcı operasyonu zamanı ShockBurst™ demodüle edilmiş sinyalde uygun adres bilgilerini arıyor. İstenilen bilgiler bulunduğu zaman paketin geri kalanı işlenerek CRC kodu ile kontrol edilmektedir. Tüm kontroller tamamlandıktan sonra paket boş RX FIFO'lardan birine kaydedilmektedir. Yüksek hızlı bit kontrolü ve zamanlama ShockBurst™ tarafından kontrol edilmektedir.

Enhanced ShockBurst™ ShockBurst™'den farklı olarak çift yönlü haberleşmelerde paket kontrolünü sağlamaktadır. Bu özellik her zaman verici modülü tarafından başlatılmaktadır. Gönderi tamamlandığı zaman alıcı modülü otomatik onaylama paketi (ACK packet) gönderiyor. Vericinin bu paketi alması gönderinin başarıyla tamamlandığını belirtmektedir. Ek olarak istenildiği zaman verici tarafı ACK paketine kullanıcı verisi de ekleyebilmektedir.

Otomatik paket alış veriş işlemleri aşağıda sıralanmıştır:

1. İletişim PTX modülünden paketin PRX modülüne gönderilmesi ile başlıyor. Daha sonra PTX modülü PRX'den gelecek ACK paketini bekleme durumuna geçiyor.
2. PRX PTX'den aldığı paket sonrasında Enhanced ShockBurst™ tarafından otomatik olarak hazırlanmış ACK paketini PTX modülüne gönderiyor.
3. PTX ayarlandığı sürede ACK paketini almadığı halde önceden gönderdiği paketi yeniden PRX modülüne gönderiyor. Yeniden gönderim süresi ve deneme sayısı

kullanıcı tarafından ayarlanmaktadır.

A.1.3.1 Enhanced ShockBurst™ Paket Formatı

Enhanced ShockBurst™ PTX ve PRX modülleri arasında kullanılmak üzere standart bir paket formatı kullanıyor. Bu pakete 1 bayt uzunluğunda başlangıç (Preamble) bölümü, 3-5 bayt uzunluğunda adres bölümü, 9 bit uzunluğunda paket kontrol alanı, 32 bayta kadar çıkabilen veri gönderim bölümü ve 1-2 bayt uzunluğunda Döngüsel yedeklilik kontrolü (Cyclic Redundancy Check, CRC) bölümleri dahildir.

Enhanced ShockBurst™ paketi Başlangıç olarak adlandırılan kısım ile başlamaktadır. Bu kısmın uzunluğu 1 bayt olup ya 01010101 ya da 10101010'dan oluşmaktadır. Bu kısmın pakete dahil edilmesindeki neden iki sistem arasındaki zamanlamayı senkronize etmektir. Adres bölümündeki ilk bit 0 ise Başlangıç paketi 01010101, 1 ise 10101010 olarak atanıyor.

Alıcı verici modüllerinin adres verileri bu kısımda tanımlanmaktadır. İki modülün birbiri ile haberleşmesi için adreslerinin aynı olması gerekmektedir. Bu kısım tanımlanırken dikkat edilmesi gereken bazı hususlar var. Bunlardan ilki tekrarlanmayan adres isimleri (000FFFFFFF) veya sürekli tekrarlanan (000F0F0F0F) isimlerin kullanılması Başlangıç kısmı ile karışıklığa yol vereceği için hata oranını yükseltmektedir.

Bu alan 9 bitten oluşmakta ve kendi içinde 3 kısma ayrılmaktadır. Bu kısımlar sırasıyla 6 bitlik veri uzunluğu, 2 bitlik paket kimliği ve 1 bitlik NO_ACK bayrağı alanından oluşmaktadır.

Gönderilen veri uzunluğu önceden de belirtildiği üzere 0 ile 32 bayt arasında değişmektedir. Bu alanda uzunluğun ikili sistemde yazıldığı şekli ile gönderilmektedir. 000000 boş veriye (Sadece boş ACK paketlerinde kullanılıyor), 100000 ise 32 bayt uzunluğundaki veriye tekamül etmektedir. 100001 özel 'İlgilenmiyorum' (Don't Care) koşulunu belirtmektedir. Bu alan sadece Dinamik Veri Uzunluğu (Dynamic Payload Length) fonksiyonu etkinleştirildiğinde kullanılıyor.

2 bit uzunluğundaki Paket Kimliği alanı paketin yeniden mi gönderildiğini yoksa yeni bir

paket mi olduğunu belirtmek için kullanılıyor. Bu kısmın içeriği tamamen TX modülü tarafından kontrol edilmektedir. Alıcı bu bölümle beraber CRC bölümündeki veriyi kontrol ederek gönderilmiş olan paketin yeni olup olmadığına bakıyor. Bu iki kısmın aynı olması durumunda paket önceden gönderilmiş kabul ediliyor ve siliniyor.

Otomatik Onaylama Bayrağı Paket Kontrol Alanının son bitini oluşturmaktadır. Bu alan sadece otomatik onaylama açık olduğunda kullanılmaktadır ve bitin '1' olarak ayarlanması otomatik onaya gerek olmadığını belirtmektedir. PTX bu özellik açık olduğu zaman gönderdiği mesajlarda onay gelmesini beklemeden direk standby-I durumuna geçiş yapmaktadır. PRX kısmı ise aldığı paketlerde bayrağın '1' olarak ayarlandığını algıladığında Onay paketini göndermemektedir.

Bu alana uzunluğu 32 bayta kadar çıkabilen ve kullanıcı tarafından belirlenmiş veriler yazılıyor. Enhanced ShockBurst™ veri uzunluğu için iki seçenek sunmaktadır: Sabit ve Değişken.

Varsayılan özellik olarak Sabit uzunlukta veri alanı tanımlanmıştır. Verici tarafında gönderilen veri uzunluğu TX_FIFO'ya yazılmış bayt sayısı belirliyor ve bu uzunluk alıcı tarafında tanımlı olan RX_PW_Px registerinde tanımlı olan değere eşit olmalıdır.

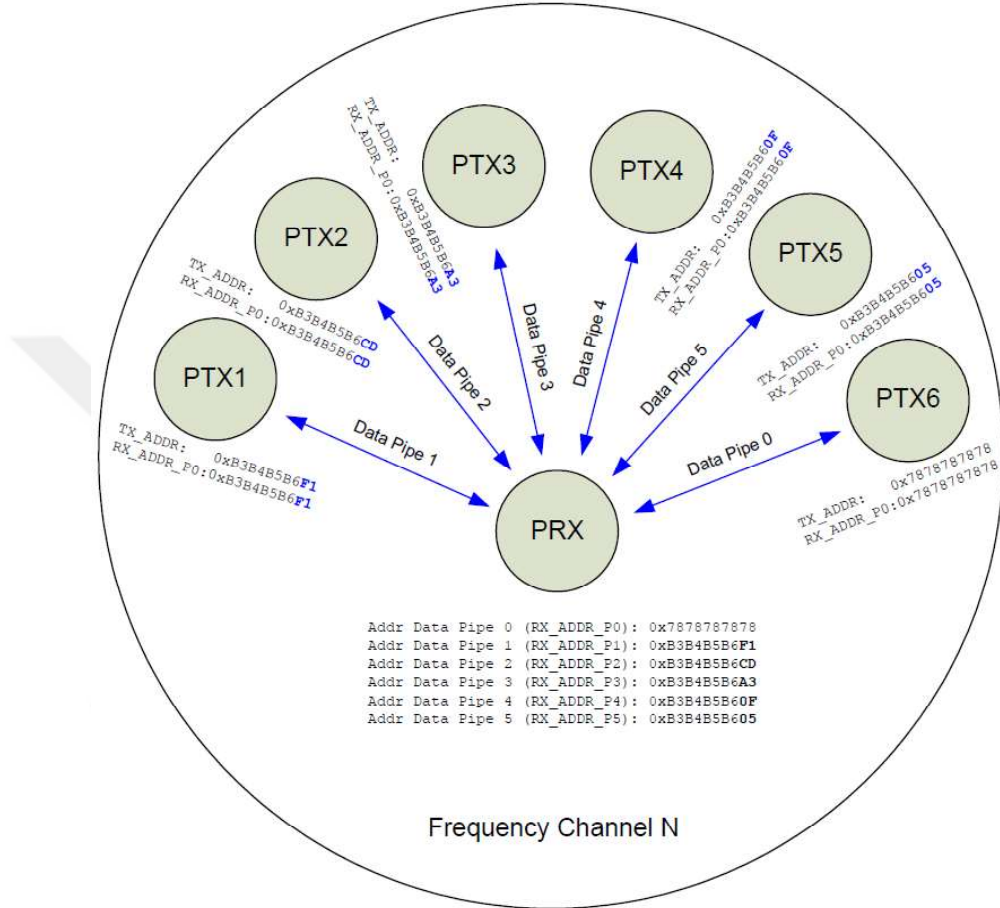
Değişken veri uzunluğu gönderme özelliği kullanıldığı zaman gönderilen verinin uzunluğu 32 bayttan daha küçük olacak şekilde tanımlanıyor. Bu durumda alıcı tarafındaki mikrodenetleyici aldığı verinin uzunluğunu önceden belirlemelidir. Eğer veri uzunluğu bayttan daha uzun ise gönderimde bir hata olduğu varsayılmalı ve alınan veri silinmelidir.

Döngüsel Yedeklilik Kontrolü (Cyclic Redundancy Check, CRC) veri paketinde kullanılan zorunlu hata bulma mekanizmasıdır. Bu alan adres, Paket Kontrol Alanı ve Veri bölümündeki bilgiler kullanılarak 1 veya 2 bayt uzunluğunda hesaplanıyor. 1 bayt için kullanılan polinom

$$\text{Bir Bayt için polinom} = X^8 + X^2 + X + 1. \text{ Başlangıç değeri } 0xFF \quad (\text{A.1})$$

$$\text{İki Bayt için polinom} = X^{16} + X^{12} + X^5 + X + 1. \text{ Başlangıç değeri } 0xFFFF \quad (\text{A.2})$$

nRFL01+ modülü MultiCeiver™ sayesinde aynı zamanda 6 farklı verici biriminden sinyal alma kapasitesine sahiptir. Verici birimleri farklı adreslere sahip veri yolları ile alıcı birime bağlanmıştır. Bu bağlantı şeması Şekil A.4’de grafiksel olarak verilmiştir.



Şekil A .4. Multiceiver™ yapısı [50].

CRC özellikleri, RX adres uzunlukları, kullanılan frekans, hava gönderim hızı ve LNA kazancı tüm bağlı verici birimlerinde aynı ayarlanmaktadır. Bu kısımda en önemli husus verici birimlerinin adreslerinin doğru olarak tanımlanmasındadır. 0. veri yolu özel adrese sahiptir. Diğer 5 veri yolunun adreslerindeki ilk 5 bayt aynı olmak zorundadır. Tanımlarken onların adres isminde sadece son 1 bayt değiştirilmelidir. Bir diğer önemli husus ise alıcı aynı anda sadece 1 vericiden veri alabilmektedir. Bu o demektir ki bir verici göndereceği sinyali bitirmeyene kadar alıcı diğer vericilerde sinyal okuyamamaktadır. Alıcının diğer vericilerden sinyal okuması için aktif vericinin sinyali gönderip bitirmesi gerekmektedir.

EK B

Bu ekte tez kapsamında Arduin IDE yazılımı ile geliştirilmiş kaynak kodları verilmiştir. Bunlar merkezi istasyon ve sensör alt birim istasyonları olarak ayrılmıştır.

Merkezi istasyon kaynak kodu aşağıda verilmiştir:

```
#include <SPI.h>          // spi haberleşme kütüphanesi
#include <nRF24L01.h>      // nRF modülü kütüphanesi
#include <RF24.h>          // nRF modülü kütüphanesi
#include <SD.h>            // SD kart kütüphanesi
#include <Wire.h>          // I2C kütüphanesi
#include "RTClib.h"        // RTC kütüphanesi

File myFile;              // Veri dosyası tanımlanması

RF24 radio(7, 8);         // nRF pin tanımlanması
RTC_PCF8523 rtc;          // RTC tanımlanması

int CS1 = 8;              // nRF SPI pini
int CS2 = 9;              // RTC SPI pini

// nRF gönderim adresi
const uint64_t PTXpipe = {0xB3B4B5B6F1LL};

unsigned long previousMillis = 0;
const long interval = 100;

struct dataStruct {        //Gönderilecek paket yapısı
float data1;               //Voltaj değeri değişkeni kanal 1
float data2;               //Voltaj değeri değişkeni kanal 2
float data3;               //Voltaj değeri değişkeni kanal 3
float data4;               //Voltaj değeri değişkeni kanal 4
int value;                 //Birim numarası
} myData;
```

```

void setup()
{
    // nRF modülü ayarlanması
    radio.begin();           //Haberleşmenin başlatılması
    radio.setPALevel(RF24_PA_MAX); //Güç seviyesi seçimi
    radio.setDataRate(RF24_250KBPS); //İletişim hızı ayarı
    radio.setChannel(1);     //Kanal seçimi
    radio.setRetries(15, 15); //Gönderim denemesi ayarı
    radio.openWritingPipe(PTXpipe);
    radio.openReadingPipe(0, PTXpipe);

    // SD kart okuyucu ayarlanması
    if (!SD.begin(CS2) ) {
        return;
    }

    // RTC başlatılması ve zaman ayarı
    if (!rtc.begin()) {
        return;
    }
    if (! rtc.initialized()) {
        //Başlangıç saati ayarı
        rtc.adjust(DateTime(2017, 10, 8, 3, 0, 0));
    }
}

void loop()
{
    radio.stopListening(); //Kanalı dinlemesini durdurması
    unsigned long currentMillis = millis();

    if (currentMillis - previousMillis >= interval) {

```

```

previousMillis = currentMillis;

myData.value = 0;

// Verinin saat bilgisi ile birlikte
// SD karta yazılması
digitalWrite(CS1, HIGH);
digitalWrite(CS2, LOW);
myFile = SD.open("veri.txt", FILE_WRITE);

if (myFile) {
  DateTime now = rtc.now();
  myFile.println();
  myFile.print(now.year(), DEC);
  myFile.print('/');
  myFile.print(now.month(), DEC);
  myFile.print('/');
  myFile.print(now.day(), DEC);
  myFile.print("\t");
  myFile.print(now.hour(), DEC);
  myFile.print(':');
  myFile.print(now.minute(), DEC);
  myFile.print(':');
  myFile.print(now.second(), DEC);
  myFile.print("\t");
  myFile.close();
} else {
  //Hata kontrol satırı
}

digitalWrite(CS2, HIGH);
digitalWrite(CS1, LOW);
delay(20);

```

```

if (!radio.write( &myData, sizeof(myData) )) {
//Hata kontrol satırı
}
}

radio.startListening();          //Kanalı dinleme başlaması

unsigned long started_waiting_at = millis();
boolean timeout = false;

while ( ! radio.available() ) {          //Zaman aşımı ayarı yapılması
if (millis() - started_waiting_at > 200 ) { //0.2 saniye içinde cevap
    beklenmektedir
    timeout = true;
    break;
}
}

if ( timeout ) {
//Haberleşmenin zaman aşımına uğraması
} else {
radio.read( &myData, sizeof(myData) );

digitalWrite(CS1, HIGH);
digitalWrite(CS2, LOW);
myFile = SD.open("veri.txt", FILE_WRITE);
if (myFile) {
//Verilerin SD karta yazılması
myFile.print("\t");
myFile.print(myData.value);
myFile.print(myData.data1);
myFile.print(myData.data2);
myFile.print(myData.data3);
}
}

```

```

myFile.print(myData.data4);
myFile.close();
} else {
//Hata kontrol satırı
}
digitalWrite(CS2, HIGH);
digitalWrite(CS1, LOW);
}
}

```

Sensör alt birimi istasyonları merkezi istasyona bağlı ve üzerinde voltaj sensörlerinin olduğu birimlerdir. Bu birimlerin sayısında sınır olmamakla beraber kaynak kodları aynıdır. Değişen sadece istasyonlara ait adres numaraları ve istasyon numarası bilgileridir. Kullanılmış kaynak kodları aşağıda verilmiştir:

```

#include <SPI.h> //SPI haberleşme kütüphanesi
#include <nRF24L01.h> //nRF24L01+ kütüphanesi
#include <RF24.h> //nRF24L01+ kütüphanesi

RF24 radio(7, 8); //nRF modülü tanımlanması

//Haberleşme adreslerinin tanımlanması
//Farklı alt birimlerde sadece bu kısım değiştirilmelidir
const uint64_t rAddress[] = { 0xB3B4B5B6F1LL, 0xB3B4B5B6CDLL };

struct dataStruct { //Gönderilecek paket yapısı
float data1; //Voltaj değeri değişkeni kanal 1
float data2; //Voltaj değeri değişkeni kanal 2
float data3; //Voltaj değeri değişkeni kanal 3
float data4; //Voltaj değeri değişkeni kanal 4
int value; //Birim numarası
} myData;

```

```

void setup()
{
  radio.begin();           //Haberleşmenin başlatılması
  radio.setPALevel(RF24_PA_MAX); //Güç seviyesi seçimi
  radio.setDataRate(RF24_250KBPS); //İletişim hızı ayarı
  radio.setChannel(1);     //Kanal seçimi
  radio.setRetries(15, 15); //Gönderim denemesi ayarı
  radio.openReadingPipe(0, rAddress[0]);
  radio.openReadingPipe(1, rAddress[1]);

  radio.startListening();  //Modülün dinleme moduna alınması
}

void loop()
{
  byte pipeNum = 0;       //Haberleşme 'Boru' numarası

  //Haberleşme algoritması
  while (radio.available(&pipeNum)) {
    radio.read( &myData, sizeof(myData) );
    delay(10);
    if (pipeNum == 0 ) {
      myData.value = 1;
      int data1 = analogRead(A0);
      myData.data1 = fmap(data1, 0, 1023, 0.0, 5.0);
      int data2 = analogRead(A1);
      myData.data2 = fmap(data2, 0, 1023, 0.0, 5.0);
      int data3 = analogRead(A2);
      myData.data3 = fmap(data3, 0, 1023, 0.0, 5.0);
      int data4 = analogRead(A3);
      myData.data4 = fmap(data4, 0, 1023, 0.0, 5.0);
      radio.stopListening();
      radio.openWritingPipe(rAddress[pipeNum]);
    }
  }
}

```

```

radio.write( &myData, sizeof(myData));

radio.stopListening();
radio.openWritingPipe(rAddress[1]);
radio.write( &myData, sizeof(myData));
radio.startListening();
} else if (pipeNum = 1) {
radio.stopListening();
radio.openWritingPipe(rAddress[0]);
radio.write( &myData, sizeof(myData));
radio.startListening();
}
}
}

float fmap(float x, float in_min, float in_max, float out_min, float out_max)
{
return (x - in_min) * (out_max - out_min) / (in_max - in_min) + out_min;
}

```

Sensör birimi istasyonları birbiri ile kablosuz haberleşmekte ve her bir haberleşme kanalına özel adres numarası tanımlanmıştır. Bu adres numaraları aşağıdaki tabloda verilmiştir.

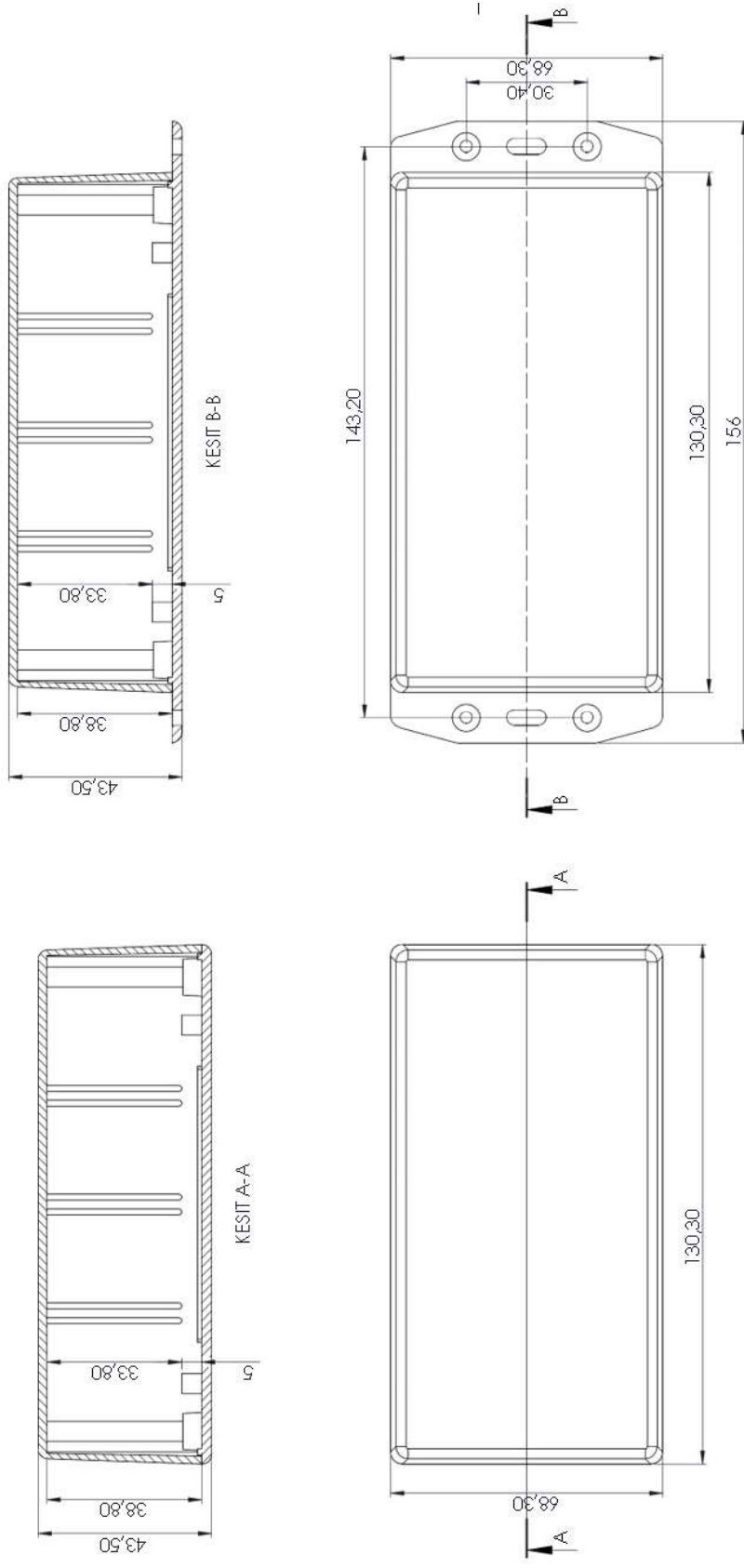
Çizelge B .1. Sensör Birimleri adres bilgileri.

İstasyon Numarası	Verici Adresi	Alıcı Adresi
2	0xB3B4B5B6F1LL	0xB3B4B5B6CDLL
3	0xB3B4B5B6CDLL	0xB3B4B5B6A3LL
4	0xB3B4B5B6A3LL	0xB3B4B5B60FLL
5	0xB3B4B5B60FLL	0xB3B4B5B615LL
6	0xB3B4B5B615LL	0xB3B4B5B616LL

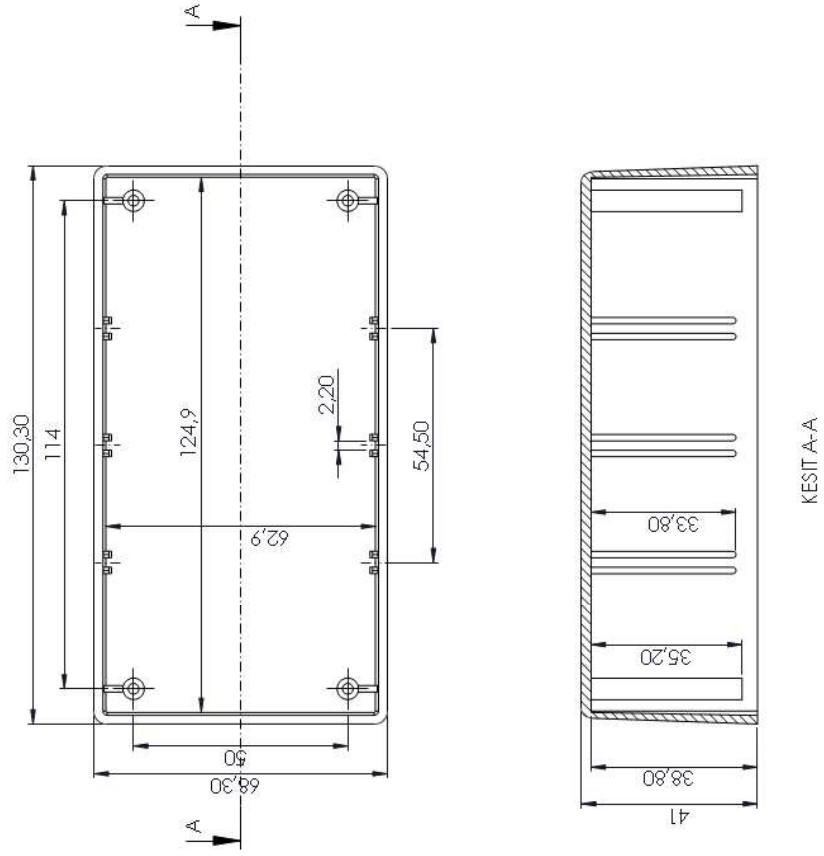
EK C

C.1 Sensör Kutusu Teknik Çizimleri

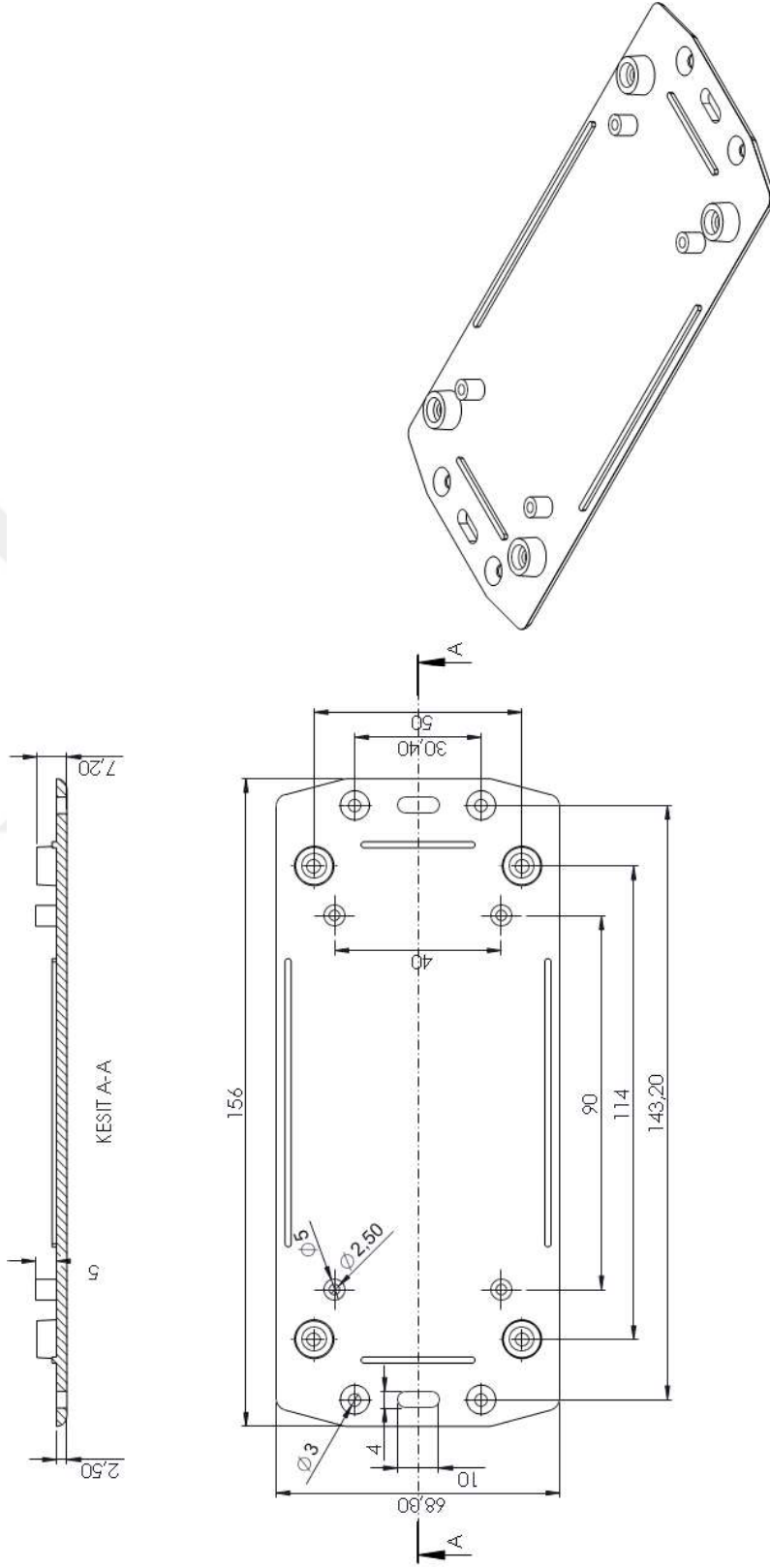




Şekil C .1. Sensör Birimi Dış Görünümü.



Şekil C .2. Sensör Birimi Dış Görünümü.



Şekil C .3. Sensör Birimi Dış Görünümü.

EK D

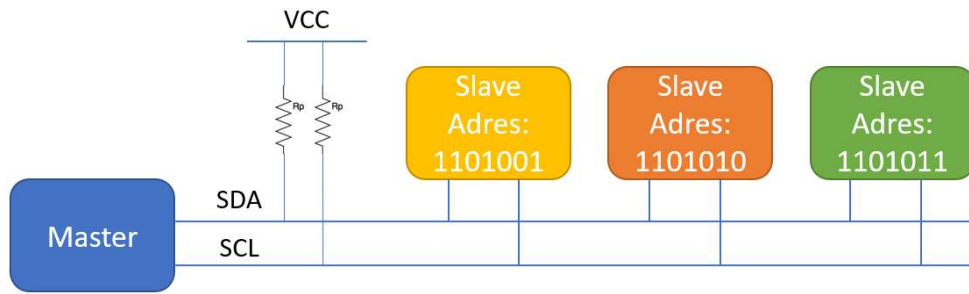
Bu bölümde tez kapsamında kullanılan ve verilmiş sistemin anlaşılması ve konu bütünlüğünün sağlanması için SPI ve I2C haberleşme protokolleri ile ilgili temel bilgiler verilmiştir.

D.1 I2C

I2C ismi Inter-Integrated Circuit'in kısaltmasından gelmektedir. Philips Semiconductors tarafından, sadece iki ortak kablo kullanılarak aynı devre kartı üzerinde merkezi bir işlemci ve çoklu IC'ler (Integrated Circuit, Entegre Devre) arasında veri aktarımı için geliştirilmiş bir iletişim protokolüdür. Bu haberleşme protokolü sadeliği sayesinde mikrodenetleyiciler ve sensör dizileri, ekranlar, IoT cihazları, EEPROM'lar tarafından geniş kullanım alanı bulmuştur. I2c seri haberleşme protokolüdür. Bu veri bitlerinin, bir referans saat çizgisi tarafından belirlenen zaman aralıklarında tek tek aktarıldığı anlamına gelmektedir.

D.1.1 I2C Donanımı

I2C Bus (Arabirim kabloları) sadece iki kablodan oluşur ve Seri Saat Hattı (SCL) ve Seri Veri Hattı (SDA) olarak adlandırılmaktadır. Aktarılacak veriler SDA kablosu üzerinden gönderilmekte ve SCL'den saat sinyali ile senkronize edilmektedir. I2C ağındaki tüm cihazlar, Şekil D.1'de gösterildiği gibi aynı SCL ve SDA hatlarına bağlanır:



Şekil D .1. I2C Master-Slave bağlantı şeması.

I2C veriyoluna bağlı cihazlar, master veya slave olarak kategorize edilir. Herhangi bir anda, sadece bir ana master I2C veriyolunda aktif kalır, SCL saat hattını kontrol eder

ve SDA veri hattında hangi işlemin yapılacağına karar verir.

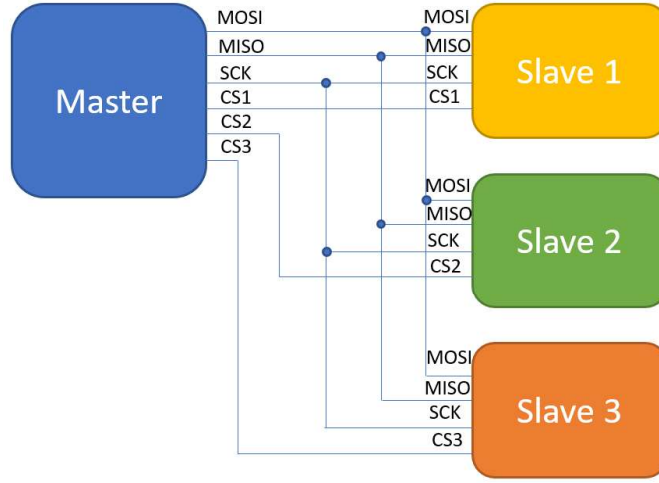
D.1.2 Haberleşme Akışı

I2C haberleşmesinde haberleşme her zaman Master tarafından başlatılır. Bu işlem SCL hattını düşük gerilime geçirmeden önce SDA hattını yüksek seviyeden düşük seviyeye geçirerek yapılmaktadır. Bu işlem yapıldığında Slave birimlerinin hepsi uyku durumunda olsa bile beklemeye alınmakta ve kendi adres verisini beklemeye geçmektedir.

Gönderilecek verinin ilk kısmını 7 bitlik adres bloğu oluşturmaktadır. Bu blokta Master biriminin haberleşmek istediği Slave biriminin adresi yer almaktadır. Adres verisinden sonra Okuma/Yazma biti gönderilmektedir. Master veri okumak istediğinde bu biti '1' değerine, veri göndermek istediğinde ise '0' değerine ayarlamaktadır. Bir sonraki bit 'ACK-/NACK' olarak tanımlanmış olup sistemde gönderilen adrese uygun Slave biriminin olup olmadığını göstermektedir. Kontrol bitlerinden sonra 8 bitlik veri paketi gönderilmektedir. Bu paket 'ACK/NACK' biti ile beraber haberleşme bitene kadar gönderilmektedir. İstenilen veri paketlerinin gönderilmesi bittiğinde Master SDA hattı gerilimini düşük seviyeden yüksek seviyeye çekiyor ve hemen bundan sonra SCL hattı gerilimi de yüksekten düşük seviyeye indiriliyor.

D.2 SPI

SPI veya Serial Peripheral Interface, Motorola tarafından 1980'lerde Mikrodenetleyici ve IC'ler arasında standart, düşük maliyetli ve güvenilir bir arabirim olarak geliştirilmiştir. Basit arayüzü, esnekliği ve kullanım kolaylığı nedeniyle SPI bir standart haline geldi ve geniş kullanım alanı buldu. Bu protokolda sadece bir Master birimi olmaktadır. I2C'den farklı olarak bu protokol 4 veri hattı kullanmaktadır: Master-Out / Slave-In (MOSI), Master-In/Slave-Out (MISO), Seri Saat pini (SCLK) ve Çip Seçimi pini (CS). Master-Out / Slave-In hattı adından da anlaşıldığı üzere Master biriminden Slave birimine veri gönderimi için kullanılmaktadır. Master-In/Slave-Out hattı ise tam tersi istikamette veri taşımaktadır. Bu hatların yönleri farklı olsa da iki hattın kontrolü Master tarafından yapılmaktadır. Bir Master ve 3 Slave biriminin bulunduğu sisteme ait görsel Şekil D.2'de verilmiştir.



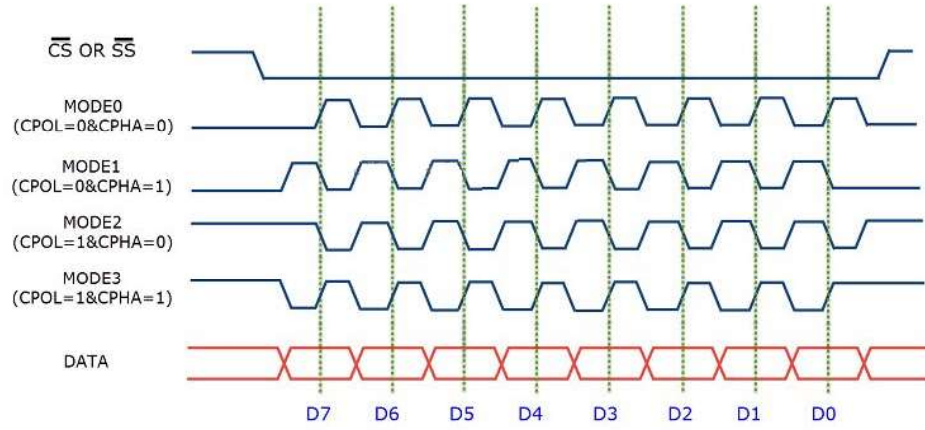
Şekil D .2. SPI 1 Master 3 Slave bağlantı şeması.

SPI protokolünde saat Master tarafından üretildiğinden, veri akışı master tarafından kontrol edilmektedir. Her saat döngüsü için, bir bit veri Master'dan Slave'e iletilir ve bir bit veri Slave'den Master'a iletilmektedir. Bu işlem eş zamanlı olarak gerçekleşir ve 8 saat döngüsünden sonra, her iki yönde de bir veri baytı iletilir ve dolayısıyla SPI, tam çift yönlü bir iletişimdir.

D.2.1 SPI Haberleşme Modları

Master ve Slave birimlerinin haberleşebilmesi için zaman ayarı dışında birimler arası senkronizasyon yapılması da gerekmektedir. Bunun için Master saatinin Polarite (Clock Polarity, CPOL) ve Faz (Clock Phase, CPHA) ayarlarının belirlenmesi gerekmektedir. CPOL Master biriminin saat durumunu, CPHA ise saat geçişlerinin belirtmektedir. Bu değişkenlerin farklı değerleri için toplam 4 farklı Mod mevcuttur. Bu modlar haberleşmenin hangi anda gerçekleşeceğini belirlemektedir.

SPI haberleşmesi için sistem gereksinimleri düşüktür ve uygulanması diğer protokollere göre daha kolaydır. Bu protokol aynı zamanda Full-Duplex haberleşmeyi desteklemekte ve bunun sayesinde de yüksek hızda veri aktarımı sağlayabilmektedir. Haberleşme ağında her birime özel bir CS pini olduğu için birimlerin adresleme gereksinimi bulunmamaktadır. Haberleşecek birim sayısının fazla olduğu uygulamalarda bu özellik aynı zamanda bir dezavantaj olarak sayılabilmektedir. Slave birimlerinden veri paketinin



Şekil D .3. SPI Haberleşme Modları.

alındığına dair bir onay mesajı gelmemesi de sistemin bir diğer dezavantajıdır. Ayrıca SPI haberleşmesinin hızı en yavaş cihaza göre ayarlanmaktadır.

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı: Seymur SHUKUROV

Doğum Yeri: BAKI

Medeni Hali: Bekar

E-posta: seymur.shukurov91@gmail.com

Adresi: Lütfüpaşa Sk. No:14/2 Molla Gürani Mahallesi, 34093, Fatih/İstanbul

Eğitim

Lise: Bakü Türk Anadolu Lisesi, BAKI

Lisans: Hacettepe Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, ANKARA

Yüksek Lisans: Hacettepe Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, ANKARA

Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce : İyi

Türkçe : İyi

Rusça : İyi

Almanca : Başlangıç

İş Deneyimi

PROFEN İletişim Hizmetleri Ltd. Şti., Mart 2016 - Haziran 2017: RF Saha Mühendisi, KONYA

PROFEN İletişim Hizmetleri Ltd. Şti., Temmuz 2017 : RF Anten Tasarım Mühendisi, İSTANBUL

Deneyim Alanları

-

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

-

Tezden Üretilmiş Yayınlar

-

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

Arazi Uygulamaları İçin Çok Noktalı Veri Toplama ve Kablosuz İletim Sistemi Geliştirilmesi ve Uygulanması, *S. Shukurov, U. Baysal*, GAPYENEV 2018, Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ve Enerji Verimliliği Kongresi, Şanlıurfa, Türkiye





HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ve ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 21/09/2018

Tez Başlığı / Konusu: Arazi Uygulamaları İçin Çok Noktalı Veri Toplama ve Kablosuz İletim Sistemi Geliştirilmesi ve Uygulanması

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 55 sayfalık kısmına ilişkin, 20/09/2018 tarihinde tez danışmanım tarafından *Turnitin* adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı %2 'dir.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç
- 3- 5 kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Tarih ve İmza

Adı Soyadı: Seymur Shukurov

21.09.2018

Öğrenci No: N13227117

Anabilim Dalı: Elektrik ve Elektronik Mühendisliği

Programı: Elektrik ve Elektronik Mühendisliği

Statüsü: ☒ Y.Lisans ☐ Doktora ☐ Bütünleşik Dr.

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.

Prof. Dr. Uğur BAYSAK

(Unvan, Ad Soyad, İmza)