

**T.C.
MALTEPE ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KABLOSUZ SENSÖR AĞ UYGULAMALARI İÇİN DÜĞÜM
MODÜLÜ TASARIMI**

**HAKAN SEFA UZUN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSTANBUL
2016**

T.C.
MALTEPE ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ

KABLOSUZ SENSÖR AĞ
UYGULAMALARI İÇİN DÜĞÜM MODÜLÜ
TASARIMI


HAKAN SEFA UZUN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI:
YARD. DOÇ. DR. ALİ AKMAN

2016

T.C. Maltepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü'ne,

29.06.2016 tarihinde tezinin savunmasını yapan Hakan Sefa UZUN'a ait "Kablosuz Sensör Ağ Uygulamaları İçin Düğüm Modülü Tasarımı" başlıklı çalışma, Jürimiz tarafından Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programında Yüksek Lisans Tezi Olarak **Oy Birliği/Oy Çokluğuyla** Kabul Edilmiştir.



Yrd. Doç. Dr. Ali AKMAN
(Danışman)



Yrd. Doç. Dr. Burhan Demir ÖNER
(Üye)



Yrd. Doç. Dr. Umut Engin AYTEN
(Üye)

ÖZET

Günümüzde kablosuz sensör ağ uygulamaları gün geçtikte yaygınlaşmaktadır. Kablosuz sensör ağ için temel bileşen olan kablosuz sensör ağ düğümleri, kullanılacağı ağa göre; veri aktarım hızı, çıkış gücü, güç tüketimi gibi farklı özelliklerde bulunmaktadır.

Bu tez çalışmasındaki ana hedef, yüksek çıkış gücünde bir sensör düğümü tasarlamak ve RF kanal anahtarlama yöntemi ile tipik bir veri aktarımı uygulaması gerçekleştirmektir. Tasarlanan kablosuz sensör düğümleri, donanımsal olarak benzer yapıda, fakat çalışma bakımından üç farklı rolde olacak şekilde tasarlanmıştır.

Kablosuz sensör düğümlerinden ilki “verici” rolüne sahip sensör düğümüdür. Kendisine bağlı olan sensörden aldığı dijital veriyi, RF alıcı verici modülü ile GFSK modülasyonu kullanarak anten vasıtasıyla ilgili sensör düğümüne iletir. İletilen bu veriyi, diğer bir sensör düğümü olan “akıllı tekrarlayıcı” rolüne sahip sensör düğümü alır ve RF sinyali demodüle ederek veriyi doğrular. İkinci aşamada da göndermesi gereken veriyi RF ortamda ilgili sensör düğümüne gönderir. Bu noktada sensör düğümü, WiFi modem gibi diğer elektronik cihazlardan gelen RF sinyalin bozucu etkilerini azaltmak için, kablosuz iletim hattında tekrarlanmış olduğu veriyi, RF kanalını anahtarlaraarak farklı bir kanal üzerinden göndermektedir.

Kablosuz sensör ağında bulunan diğer sensör düğümü de “alıcı” rolüne sahip sensör düğümüdür. Bu düğüm “Akıllı tekrarlayıcı” sensör düğümünden aldığı sinyali RF kanalı üzerinden alarak son kullanıcının uygulamasına hazır hale getirir. Bu yöntem sayesinde tüm kablosuz sensör ağında daha uzak mesafelerdeki veri alış verişi güvenli ve şeffaf bir şekilde gerçekleşmiş olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Kablosuz Sensör Ağları, Kablosuz Sensör Düğümü, Sensör Düğüm Tasarımı, nRF24L01 RF Modülü, SPI Programlama

SUMMARY

In the present study, I have studied on establishing a wireless sensor network with sensor nodes designed as a part of this thesis. I have mainly focused on embedded design of wireless sensor nodes. This wireless sensor network, designed to specify three main sensor nodes.

There are three different nodes, they have basically same hardware however their role are differ from each other according to their responsibility within the sensor network such as one of the node is sensor transmitter, which receives and process the digital signal from sensors and modulate this digital data with FSK modulation technique and transmit RF signal to the air. Second one is an “intelligent repeater node”, which receives the RF signal from the “transmitter sensor nodes”, and decodes the RF signal corrected and demodulated then retransmitted. The intelligence is retransmitted RF signal switch between the channels to reduce node to node interferences which may caused by noise or RF signal from other electronic devices such as WiFi modems, handheld terminal, etc. The last sensor node is “receiver node”. Which receives the modulated RF signal from “intellinet repeater nodes” and finally demodulated sensor signal as the original one, ready for he and of user application.

The whole wireless sensor network system is totally secure and transparent the user sensor data, with a benefit of range extension.

Keywords: Wireless Sensor Network , Wireless Sensor Node, Sensor Node Designs, nRF24L01 RF Modules, SPI Programming

TEŞEKKÜR

“Kablosuz Sensör Ağ Düğümü Tasarımı” konulu tez çalıőmasının seçiminde, yürütülmesinde, sonuçlandırılmasında ve sonuçlarının değerlendirilmesinde destek ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Ali Akman’a teşekkür ederim.

Göstermiş olduğu desteklerinden dolayı aileme ve sevgili eőim Ceysu UZUN’ a en içten teőekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iii
SUMMARY	iv
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
TABLolar DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Kaynak Araştırması	3
1.2. Problemin Tanımı	5
2. KABLOSUZ SENSÖR DÜĞÜMÜ TEMELLERİ	6
2.1. Kablosuz Sensör Ağlar	6
2.2. Kablosuz Sensör Ağ Mimarileri	7
2.3. Kablosuz Sensör Ağ Uygulamaları	9
3. KABLOSUZ SENSÖR AĞ DÜĞÜMÜ	11
3.1. Kablosuz Sensör Ağ Düğüm Mimarileri	11
3.2. Kablosuz Sensör Ağı Katmanları	13
3.2.1. Fiziksel Katman (PHY)	13
3.2.2. Ortam Erişim Yönetimi Katmanı (MAC)	13
3.3. Kablosuz Sensör Ağı Protokolleri	13
3.3.1. IEEE 802.15.4 Protokolü	13
3.3.2. ZigBee Protokolü	15
3.4. nRF24L01 Enhanced Shockburst Protokolü	16
3.4.1. Enhanced ShockBurst™ Veri Paketi	17
3.4.1.1. Enhanced ShockBurst Akış Şemaları	17
4. LPC1343 KABLOSUZ SENSÖR DÜĞÜM TASARIMI	22
4.1. LPC1343 Sensör Düğümü Mimarisi	22
4.2. LPC1343 Kablosuz Sensör Düğümü Donanım Mimarisi	23
4.2.1. LPC1343 Sensör Düğümü Çevre Birimleri Haberleşmesi	29
4.3. nRF24L01 Alıcı Verici Modülü	32
4.4. LPC1343 Kablosuz Sensör Düğümü Yazılım Mimarisi	37
4.4.1. LPC1343 Kablosuz Sensör Düğümü Veri Paketi	41
5. SONUÇLAR	43
6. TARTIŞMA VE ÖNERİLER	46



SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

<u>Simgeler ve</u> <u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklamalar</u>	<u>İngilizce Karşılığı</u>
A	Amper	Ampere
ACK	Kabuledilebilir	Acknowledgement
ADC	Analog Dijital Dönüştürücü	Analog Digital Converter
ALU	Aritmetik Lojik Birim	Arithmetic Logic Unit
ARC	Otomatik Tekrar Gönderme Sayacı	Automatic Retransmit Counter
ARD	Otomatik Tekrar Gönderme Gecikmesi	Auto Retransmit Delay
ART	Otomatik Tekrar Gönderme	Auto Retransmit
ASCII	Amerikan Standart Kodlama Sistemi	American Standard Code For Information Interchange
CE	Çipi Aktif Et	Chip Enable
CLK	Saat	Clock
CRC	Döngüsel Artma Denetimi	Cyclic Redundancy Check
CSMA	Çoklu Giriş Taşıyıcı Algılama	Carrier Sense Multiple Access
CSMA-CA	Çoklu Giriş Taşıyıcı Algılama-Çakışma Önleyici	Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance
CSN	Çip Seçili Değil	Chip Select Not
dB	Desibel	Decibel
DC	Doğru Akım	Direct Current
EEPROM	Silinip Programlanabilir Salt Okunur Bellek	Electrically Erasable Programmable Read Only Memory
FIFO	İlk Giren İlk Çıkar	First In, First Out
FM	Frekans Modülasyonu	Frequency Modulation
FSK	Frekans Kaydırma	Frequency Shift Keying
FRAM	Ferroelektrik Rastgele Erişimli Bellek	Ferroelectric Random Access Memory
GFSK	Gauss Frekans Kaydırma	Gaussian Frequency Shift Keying
GND	Toprak	Ground
Hz	Herz	Hertz
IRQ	Kesme Cevabı	Interrupt Request
ISM	Endüstriyel Bilimsel Tıbbi Band	Industrial Scientific Medical Band
I/O	Giriş/Çıkış	Input / Output
Kb	Kilo Bayt	Kilo Byte
Kbps	Saniyede Bir Kilobit	Kilobit Per Second
kHz	Kilo Herz	Kilo Hertz
LNA	Düşük Gürültülü Kuvvetlendirici	Low Noise Amplifier
m	Metre	Meter
MAC	Ortam Erişim Kontrolü	Media Access Control
MB	Mega Bayt	Mega Byte
Mbps	Saniyede Bir Megabit	Megabit Per Second
MCU	Mikrodenetleyici Birim	Microcontroller Unit
MHz	Mega Herz	Mega Hertz
MISO	Sahip Giriş, Bağımlı Çıkış	Master In Slave Out
MOSI	Sahip Çıkış, Bağımlı Giriş	Master Out Slave In
mW	Miliwat	Mili Watt

PA	Güç Kuvvetlendirici	Power Amplifier
PCB	Baskı Devre	Printed Circuit Board
PCM	Darbe Kod Modülasyonu	Pulse-Code Modulation
ppm	Her Bir Milyon Parça	Parts Per Million
PID	Paket Tanımlama Biti	Packet Identity Bits
PRX	Birincil Alıcı	Primary RX
PTX	Birincil Verici	Primary TX
PWM	Darbe Genlik Modülasyonu	Pulse Code Modulation
RF	Radyo Frekansı	Radio Frequency
RIFF	Kaynak Değişimi Dosya Biçimi	Resource Interchange File Format
RISC	Azaltılmış Komut Seti	Reduced Instruction Set Computing
RX	Alıcı	Receiver
RX_DS	Alıcı Veri Almaya Hazır	Receive Data Ready
s	Saniye	Second
SoC	Çip Üzerinde Sistem	System On Chip
SPI	Çevresel Seri Haberleşme Arayüzü	Serial Peripheral Interface
TOA	Havada Kalma Zamanı	Time On-Air
TX	Gönderici	Transmitter
TX_DS	Verici Verici Gönder	Transmit Data Sent
USB-HID	Evrensel Seri Veriyolu- İnsan Arayüz Cihazı	Universal Serial Bus- Human Interface Device
USART	Evrensel Senkron/Asenkron Alıcı/Verici	Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter
V	Volt	Volt
WAV	Dalga Biçiminde Ses Dosyası Formatı	Waveform Audio File Format
WiFi	Kablosuz Uygunluk	Wireless Fidelity
Ω	Ohm	Ohm

ŞEKİLLER LİSTESİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.2. Mesh ağ topolojisi [31]	8
Şekil 2.2. Yıldız - Mesh ağ topolojisi [31]	8
Şekil 2.3. Temel Savunma Uygulaması Kablosuz Sensör Ağ [39]	10
Şekil 4. LPC1343 Kablosuz Sensör Düğümü Mimarisi	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
Şekil 5. LPC1343 Sensör Düğümü Programlama Butonu ve Debug LED	25
Şekil 6.6. nRF24L01 RF Alıcı Verici Modülü Şeması	26
Şekil 4.7. LPC1343 Kablosuz Sensör Ağ Modeli	42

TABLÖLAR LİSTESİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
Tablo 1.1. Popüler Kablosuz Sensör Ağ Düğümleri [2,35]	4
Tablo 1.2. LPC1343 Kablosuz Sensör Düğümü Teknik Verileri	4
Tablo 3. Enhanced ShockBurst Veri Paketi [28, 29]	17
Tablo 4.1. Hafıza Elemanlarının Karşılaştırılması.....	32



1. GİRİŞ

Kablosuz haberleşme sistemleri günümüz teknolojisinde yoğun kullanılan sistemler olarak karşımıza çıkmaktadır. Kullanım alanlarına göre sistem alt bileşenlerini oluşturan kablosuz cihazlar farklılık gösterebilmektedir. Birçok kablosuz haberleşme cihazı arasından en uygunun seçilerek haberleşme sisteminin oluşturulması, sistemin performansını ve sağlıklı çalışmasını doğrudan etkileyen en büyük faktör olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu kapsamda haberleşme mesafesi, güvenli veri transferinin sağlanabilmesi ve güç tüketimi cihaz seçiminde öne çıkan parametrelerdir. Gerçekleştirilecek sistemlerde bu parametreler değerlendirilmekte ve sisteme en uygun kablosuz haberleşme cihazı seçilerek kullanılmaktadır.

Kablosuz haberleşme cihazlarının yoğun olarak kullanıldığı uygulamalarından bir tanesi olan kablosuz sensör ağı uygulamaları temelde kablosuz sensör ağ düğümlerinden oluşmaktadır. Kablosuz sensör ağ düğümleri uygulama çeşitliliğine göre farklılık gösterebilmektedir. Medikal alanında, otomasyon sistemlerinde, savunma sanayinde ve hatta günümüzde spor müsabakalarında bu ağ düğümleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Kullanım alanının iyi tespit edilip kablosuz sensör ağ topolojisinin uygulamaya yönelik tasarlanarak kurulması, haberleşme sisteminin performansı açısından kritik önem taşımaktadır.

Kablosuz sensör düğümlerinin donanımları üretici tarafından sağlanmış olan hazır bir yazılım yığınıyla uygulama özelinde seçilerek kullanılmaktadır. Donanıma izin verildiği kadar hâkim olmak zorunda olan ağ tasarımcısı, kendisine sunulan yazılım yığınının uygulamaya yönelik özelleştirilememesi uygulamada yaratıcılığı kısıtlamaktadır. Bu noktada tasarımcının seçtiği RF donanımının uygulamaya yönelik olmasının yanı sıra düğüm üzerinde koşacak olan yazılım yığınının da hem uygulamaya hem de ağ yapısına uygun olması gerekmektedir. Aksi takdirde uygun donanım seçilmesine rağmen güvenli veri iletimi, haberleşme mesafesi ve güç tüketimi gibi parametrelerde optimizasyon imkanları kısıtlı olmaktadır.

Bu tez kapsamında, karşılaşılan bu gibi olumsuzluklara karşı uygulamaya yönelik seçilen RF donanım üzerinde koşan, güvenli veri iletimi ile haberleşme mesafesi bakımından optimize edilen, yazılım yığını geliştirilerek tipik bir veri aktarım uygulaması gerçekleştirilmiştir.

Tezin I. bölümünde yapılan literatür taramasına göre kablosuz sensör ağ düğümleri hakkında bilgiler verilmiştir. Bu bilgiler doğrultusunda sensör düğümlerinde kullanılacak mikroişlemci ve yazılım dilleri hakkında bilgiler sunulmuştur.

Tezin II. Bölümünde; kablosuz sensör ağ düğümlerinin desteklemiş olduğu protokoller, ağ yapıları ve tipik kablosuz sensör ağ uygulamaları hakkında bilgiler verilmiştir. Desteklemiş olduğu protokollerin veri gönderme alma aşamalarındaki paketleri ve haberleşme tekniklerinden bahsedilmiştir. Ayrıca tez kapsamında tasarlanan sensör düğümünde kullanılan RF alıcı verici modülü ve kullanımı hakkında bilgiler de bu bölümde verilmiştir.

Tezin III. Bölümünde; tez kapsamında tasarlanacak olan sensör düğümünün donanım ve yazılım mimarileri detaylı olarak anlatılmıştır. Donanım tasarımı aşamasında ilk tasarımda farklı mikroişlemci ve ağ mimarisi kullanılmıştır. İkinci aşamada bu tasarımdan vazgeçilip daha teknolojik ve geliştiriciye esneklik tanıyan mimariye geçilmiştir. Bu donanım tasarımına göre de uygun yazılım mimarisi ve veri alış verişinde kullanılan veri paketi hakkında bilgiler verilmiştir.

Tezin IV. Bölümünde ise tasarım sonucu oluşan LPC1343 sensör düğümlerinin teknik verileri, tipik bir uygulama ve sistemde yapılabilecek iyileştirmeler hakkında bilgilere yer verilmiştir.

1.1. Kaynak Araştırması

Kablosuz Sensör Ağları (Wireless Sensor Network, WSN) kavramı 1980 yılının başlarında karşımıza çıkmıştır. Mikro elektro-mekanik (MEMS) sistemlerdeki yaşanan gelişmeler ve kablosuz haberleşme sistemlerindeki çeşitlilikle beraber ilerlemeler 1990 yılından sonra önemli bir araştırma alanı haline gelmeye başlamıştır. Araştırılmaya çalışılmalarına başlandığı ilk zamanlarda askeri sensör ağları; zamanla maliyetlerinin düşmesi ile çok yaygın olarak farklı uygulamalarda da kullanılmaya başlanmıştır[1].

Dünya genelinde hali hazırda kullanılan farklı özelliklere sahip pek çok kablosuz sensör düğümü bulunmaktadır. Bu düğümler kullanıcı talebine ve düğümün kullanılacağı sahaya göre değişiklik göstermektedir[2].

Kablosuz sensör düğümü olarak literatürde tanımlı pek çok sensör düğümü bulunmaktadır.

Kablosuz sensör ağ düğümleri ile uygulama geliştiriciler “C” , “C++”, “nesC” ya da “C#” gibi farklı yazılım dillerini kullanarak uygulamalar için yazılım geliştirebilirler. Bu nedenle literatürdeki sensör düğümlerinin her biri farklı kullanıcı grubuna hitap etmekte ve kullanılacağı yere göre farklı düğümler tercih edilebilmektedir[2]. Yine de bu düğümler içerisinde, daha fazla kullanıcı dostu olan ve en fazla rağbet gören “TelosB” sensör düğümüdür. Ancak bu sensör düğümünün bile uygulama alanları sınırlıdır ve çözümsüz kaldığı ya da kullanıcıyı kısıtladığı pek çok konu bulunmaktadır. Çünkü hâlihazırda kullanılan TelosB gibi sensör düğümleri üzerinde sadece sıcaklık, ışık ve nem sensörleri kullanılabilmektedir[2, 42, 43].

Tablo 1.’de de görüldüğü üzere her bir düğümün kullanmış olduğu mikrodenetleyici ve radyo frekans alıcı-verici(rf transceiver) özellikleriyle farklılıklar göstermektedirler.

Kablosuz sensör ağ düğümleri Tablo 1.1.’de görüleceği üzere bir birilerine göre avantaj ve dezavantajları olan düğümler karşılaştırılmış olarak görülmüştür. Tez kapsamında tasarlanan kablosuz sensör ağ düğüm modülü LPC1343 Sensör düğümü olarak adlandırılmış ve düğüme ait elektriksel karakteristik bilgileri de Tablo 1.2.’de görülmektedir.

Tablo 1.1. Popüler Kablosuz Sensör Ağ Dügümleri [2,35]

SENSOR NODE	MCU	RF Transceiver	Data Rate Speed (Kbps)	RAM (Kbit)	Flash (Kbit)	EEPROM (Kbit)	RF Power (mW)	COM Port
Rene	AT90L	TR1000	250	512	8	32	60	SPI
Dot	ATmega8535	TR1000	250	1	16	32	60	SPI
MICA	ATmega103	TR1000	250	4	128	512	27	UART
MICA 2	ATmega128	CC1000	38	4	128	512	89	UART
Imote	ATM7TDMI	Zeavo BT	250	-	64	512	120	UART
TelosB	MSP430	CC2420	250	10	48	1024	32	USB
MicaZ	ATmega128	CC2420	250	4	128	4	32	UART
IRIS	ATmega230	ATRF 230	250	8	640	4	90	UART

Tablo 1.2. LPC1343 Kablosuz Sensör Dügümü Teknik Verileri

SENSOR NODE	MCU	RF Transceiver	Data Rate Speed (Kbps)	RAM (Kbit)	Flash (Kbit)	EEPROM (Kbit)	Power (mW)	COM Port
LPC1343 Sensor Node	ARM Cortex M3	nRF24L01	250, 1000, 2000	512	8	1024	140	SPI, I2C, USART, USB

Tipik bir uygulamada hali hazırda kullanılan kablosuz sensör ağındaki sensör düğümleri, herhangi ihtiyaç doğrultusunda yeni bir sensör veya sensör düğümü eklenmesi ve bu eklemenin kablosuz sensör ağ sisteme entegrasyonu teorik olarak mümkün olmakla birlikte pratikte yazılım-donanım uyumsuzlukları nedeniyle hatalarla karşılaşmakta ve sistem etkin şekilde yönetilememektedir.

Bu durumdaki en büyük sorunlardan biri de farklı haberleşme ara yüzleri kullanan sensörlerin, hatasız ve herhangi bir elektriksel hataya yol açmadan haberleşmeye ve veri aktarımına devam etmelerini sağlamaktır[5].

Düğüme dâhil edilen sensör sayısının artması farklı haberleşme ara yüzlerinin aynı anda kontrol edilmesini gerektirdiğinden farklı haberleşme ara yüzlerinin sisteme eklenmesi, düğüm yapısını karmaşıklaştırmakta ve hem yazılım hem de donanım açısından kullanıcıların ve sensör düğümünü kontrol eden sistemlerin işini zorlaştırmaktadır[5]. Bu nedenle teoride bir sensör düğümüne ilave edilecek sensör sayısı yüzlerce olabilecekken zorluklardan dolayı bu sayı her zaman onlu sayılarda kalmaktadır ve karmaşık sistemlerin kontrolünde birden fazla sensör düğümünün sisteme entegre edilmesi gerekmektedir[3,7]. Mevcut düğümlerde sensörler, sensör

düğümüne sınırlı sayıda bağlanan ve sistem kontrolünü ya da genişlemesini büyük ölçüde zorlaştıran bir tasarım sonucu cihaza bağlanmaktadır[3].

Tablo 1.1.'de görülmekte olan tüm sensör düğümlerinin ortak noktası 802.15.4 ZigBee haberleşme protokolünü kullanıyor olmasıdır[2, 9, 35]. Bu haberleşme protokolünde oluşabilecek en büyük problem EMI problemleri[44], aynı frekansta haberleşen düğümlerin haberleşememesidir.

Tasarlanmış olan sensör düğümünde dışarıya açılan genel amaçlı giriş çıkış portları ve haberleşme portları sayesinde mevcut sistemlere kolayca entegre edilebilir olması ve bu sayede çoklu sensör algılama sistemlerine uygun yapıda olmasıyla bu olumsuzluklar giderilmiştir.

Ayrıca olası RF girişim durumlarında oluşacak olan haberleşmenin kopması[44], aynı frekansta haberleşen tüm sensör ağı olumsuz etkileyecektir. Tasarlanan kablosuz sensör ağ düğümlerinin her biri kendi aralarında tek frekansta haberleşebilmesi sayesinde frekansı verimli kullanma yönünden zayıf olsa da sensör ağın tamamının kopması gibi olumsuzlukları gidermesi yönünden avantaj sağladığı düşünülmektedir.

1.2. Problemin Tanımı

Kablosuz sensör Ağlarının çalışma performansı, verimliliği, sensör ağında kullanılan kablosuz sensör düğümlerine bağlıdır. Tipik bir kablosuz sensör ağda, düğümler arası veri aktarmada gecikmelerin yaşanmaması, veri iletiminde kayıpların yaşanmaması ve sensör düğümlerinin bu ağda ekonomik kullanımı sensör ağın verimliliği açısından önemlidir.

Tez kapsamında yapılan çalışmada kullanılan RF modül sayesinde veri iletimlerinin hızları 250 Kbps, 1Mbps ve 2Mbps olmak üzere ayarlanabilmektedir. Bu sayede veri uygulamaya göre hızlı veya yavaş iletilebilmektedir. Sensör düğümleri kendi aralarında veri transferlerini; tasarlanan yazılım yığınıyla(stack) doğrulamalar yapılarak ve RF kanalı anahtarlanarak gerçekleştirmektedir. Bu sayede haberleşme güvenliliği arttırılmıştır. Seçilen RF modülün PA(power amplifier) katı olması sebebiyle daha az sensör düğümü kullanılarak verinin daha uzak mesafelere iletilmesi sağlanmıştır. Tasarımda kullanılan LPC1343 işlemcisinin USB-HID özelliğini kullanarak USB üzerinden yazılım güncelleyerek sensör düğümüne kolayca alıcı, verici veya tekrarlayıcı olabileme rolünün verilebilmesi sağlanmıştır.

2. KABLOSUZ SENSÖR DÜĞÜMÜ TEMELLERİ

2.1. Kablosuz Sensör Ağlar

Güncel yaşamda ölçülmesine ihtiyaç duyduğumuz sıcaklık, nem, ışık, ses, basınç, titreşim, nesne hareketleri gibi parametrelerin izlenmesi için sensör kullanan ve bağımsız çalışan elektriksel bileşenler içeren kablosuz ağlara "Kablosuz Sensör Ağı" denir[1, 2, 42].

Kablosuz sensör ağlarda kullanılan, hesaplama, algısal bilgi toplama ve ağdaki diğer bağlantılı düğümlerle haberleşme yeteneklerine sahip düğümlere ise sensör düğümü denir. Tipik bir sensör düğümü mikro denetleyici, RF alıcı-verici, bellek, güç kaynağı ve sensör ana bileşenlerinden meydana gelmektedir[2, 9, 42].

Kablosuz sensör ağlar günümüzde birçok uygulamada hali hazırda kullanılmaktadır. Savunma sanayi, medikal elektronik ve çevre olaylarının raporlanması kablosuz sensör ağlarının yaygın kullanıldığı alanlar olarak karşımıza çıkmaktadır.

Savunma sanayisinde; savaş alanlarının gözetim altına tutulması, düşman hareketlerinin izlenmesi, arazi hakkında keşifte bulunmak, personel ve askeri araçların takip edilmesi, dost kuvvetlerin izlenmesi ve hedeflerin hız ve konumlarının tespit edilmesini içeren askeri uygulamalarda kullanılmaktadır[26, 24].

Çevresel olayların gözlemlenip raporlanmasında; hava durumu, hava kirliliğinin tespiti, sel, deprem, orman yangını gibi doğal afetlerin takip edilmesinde kullanılmaktadır[30].

Medikal alanlarda; hastanede bulunan doktorlar ve hemşirelerin yerinin tespit edilmesi ve çağrı sistemlerinde, hastaların durumlarının takip edilmesi, yaşlıların gözetim altında tutulması ve çeşitli medikal parametrelerin takip edilmesini içeren sağlık uygulamalarında "Kablosuz Sensör Ağları" kullanılmaktadır[24, 10].

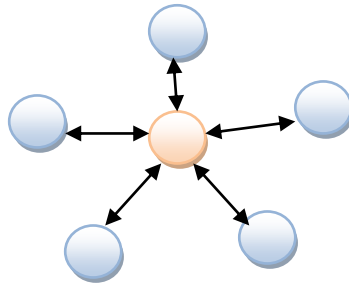
2.2. Kablosuz Sensör Ağ Mimarileri

Kablosuz iletişimde birçok farklı ağ iletişim yöntemi mevcuttur. Kablosuz algılayıcı ağlarının yapısı diğer uygulama alanlarından farklı olduğu için genellikle; yıldız, mesh, yıldız-mesh hibrit ağ mimarileri kullanılmaktadır[19, 20].

Şekil 2.1.' de görüldüğü üzere yıldız ağ, bir merkez istasyonundan birçok düğüm kontrol noktasına mesaj göndermek veya mesaj almak biçiminde işleyen ağ bağlantı türüdür.

Bu ağ bağlantı türünde, düğüm noktaları sadece merkez istasyon ile arasında veri aktarımı yapabilir. Her düğüm kendi arasında veri aktarımı yapamaz. Bu bağlantı türünün kablosuz algılayıcı ağları için avantajı; düğümlerin güç tüketimlerini basit bir şekilde kontrol altında tutabilmesidir. Ayrıca merkez istasyon ile düğüm arasındaki veri aktarım gecikmesi de oldukça düşüktür. Olumsuz yanı ise bütün düğümlerin merkez istasyonunun kapsama alanı içerisinde bulunması gereksinimidir[31, 43].

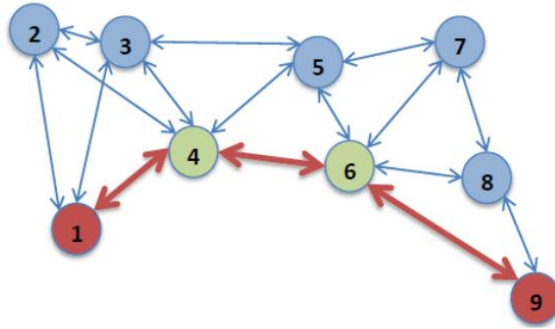
Diğer bir ağ türü olan mesh ağ bağlantı türünde herhangi bir düğümün kapsama alanı içinde bulunan bir düğümün diğer bir düğüm ile iletişim kurabilmesine izin vermektedir. Bu yöntem geniş alan kablosuz algılayıcı ağlarında oldukça tercih edilen bir yöntemdir. Eğer bir kablosuz algılayıcı kapsama alanı dışında kalan diğer bir algılayıcı ile bağlantı kurmak istiyorsa diğer algılayıcı düğümlerini köprü olarak kullanır ve radyo dalgalarının kapsama alanı dışında kalan algılayıcı düğümü ile iletişim kurar. Bu yöntem ile oldukça geniş mesafelerde düşük güç harcayarak iletişim kurmak mümkün olmaktadır[5, 6,43].



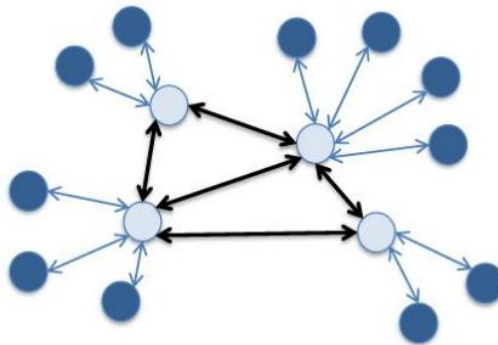
Şekil 2.1. Yıldız Topolojisi [31]

Yön istek yayını alan diğer cihazlar, yalnızca yön istek paketini gönderen kaynağa gitmek istediği cihaza gidebileceği yönü metrik bilgisiyle iletir. Birden fazla cihazdan yön istek paketine cevap alındığında, metrik maliyeti en düşük olan yoldan veri paketi yollar[20, 23, 24]. Şekil 2.2.'de mesh ağ topolojisine örnek bir ağ yapısı görülmektedir. Yıldız ağı ile Mesh ağı birlikte kullanıldığı takdirde kapsama alanının maksimum, enerji tüketiminin de minimum seviyede tutulabilecek kablosuz ağ bağlantı yöntemi oluşturulmaktadır, bu yapıya yıldız-mesh ağ yapısı denir[6, 23].

Şekil 2.3.'de görüldüğü üzere yıldız-mesh ağ topolojisinde düşük güçlü düğümlerin kendi veri aktarımı dışında diğer düğümlerin kendi üzerinden bağlantı kurmasına izin verilmez. Doğrudan yüksek güçlü diğer bir düğüm üzerinden erişmek istedikleri düğüm ile bağlantı kurarlar. Bu yöntem ile geniş bir alanda kurulan kablosuz algılayıcı ağında kullanılan düğümlerin büyük oranda düşük güç tüketmesi sağlanır[6, 20, 24].



Şekil 2.2. Mesh ağ topolojisi [31]



Şekil 2.3. Yıldız - Mesh ağ topolojisi [31]

2.3. Kablosuz Sensör Ağ Uygulamaları

Kablosuz sensör ağ uygulamaları izleme ve takip uygulamaları olarak iki kategoriye ayrılabilir. İzleme uygulamaları; iç ve dış mekân çevre izleme, sağlık ve sağlıklı yaşam izleme, enerji izleme, envanter konumunu izleme, fabrika ve proses otomasyonu, sismik ve yapısal sağlık izlemeyi içermektedir. Takip uygulamaları ise nesnelere, hayvanları, insanları ve araçları takip etmeyi içermektedir.

Kablosuz teknoloji endüstriyel otomasyon dâhil olmak üzere pek çok endüstriyel uygulama alanında başarıyla kullanılmaya başlanmıştır. Bu aynı zamanda kablosuz sensör ağ teknolojilerini içermektedir. Örneğin, Siemens Endüstriyel Otomasyon Bölümü'nde otomasyon ortamlarında kullanmak için kablosuz teknolojileri değerlendirmektedir[40].

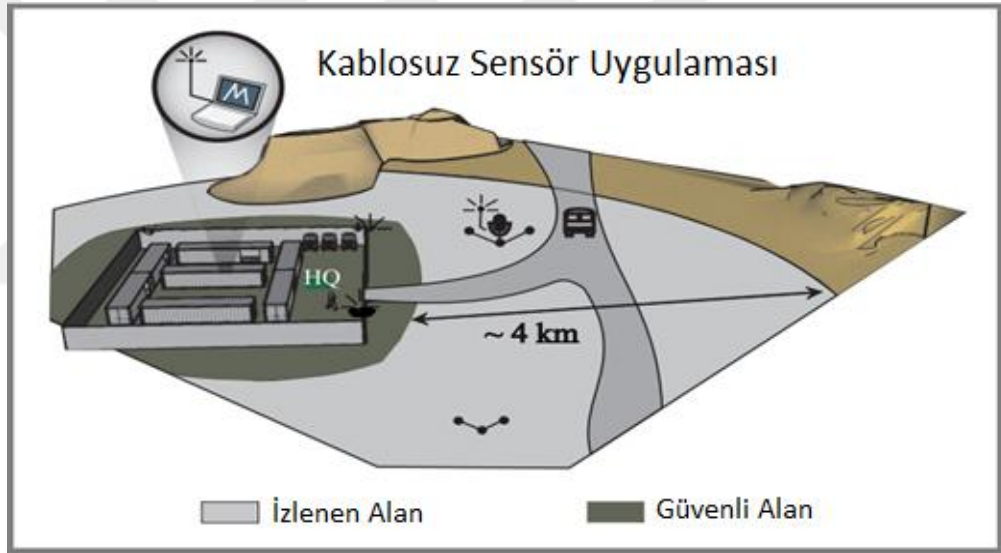
IEEE 802.15.4 standardı zaten tanınmış bir endüstri standardı haline gelmiştir. IEEE 802.15.4 standardının üstüne inşa edilmiş açık bir belirtimi olan Düşük Hızlı Kablosuz Kişisel Alan Ağları (Low-Rate Wireless Personal Area Networks - LR-WPANs) ağ kurulması ve bakımı üzerinde durulmaktadır. Bu standardın temel tasarım amaçlarından biri enerji tasarrufudur. WirelessHART daha karmaşık ağ protokolleri tanımlamak için IEEE 802.15.4 standardının alt katmanında kullanılmaktadır[40].

Tesis altyapısı eskidikçe donanım arızaları daha fazla olacak ve bunun sonucunda da plansız kesintiler meydana gelecektir. Amerika'da ARC danışmanlık Grubu Kuzey Amerika'daki üretimin yaklaşık %5'inin plansız kesinti kaybı nedeniyle durduğunu tahmin etmektedir. Makinelerin içine gömülü olarak yerleştirilerek kullanılan kablosuz sensör ağları sistemleri sağlıklı izleme işlemini ekonomik hale getirmektedir. Bu sayede pahalı, zaman alıcı ve güvenilmesi zor olan manuel izleme metotlarının yerine kablosuz sensör ağları ile izleme yöntemi kullanılmaktadır. Petrol ve gaz sektöründe boru hatları, tanklarda yaşlanma süreçlerinin izlenmesinde bu yöntem başarıyla kullanılabilir. Günümüzde Rohrbach Cosasco Sistemleri (RCS) korozyon izleme teknolojisi konusunda kablosuz algılayıcı ağları kullanma konusunda dünya lideri konumundadır[41].

İlk kablosuz algılayıcı ağ, askeri uygulamalar için kullanılmış olması nedeniyle Askeri Sensör Ağlar, Kablosuz Sensör Ağlarının birincil uygulama alanı olarak kabul edilmektedir[39].

Şekil 2.4.'deki senaryoda saldırıya uğramamak için algılayıcıların bir alanda uygun şekillerde dağıtılmış olması gerekmektedir. Askeriye çevresinde arazi dalgalı ve dağlık olabilir, ormanlarla çevrilmiş olabilir, bitki örtüsü ile gizlenmiş olabilir. Saldırı yaya militan şeklinde olabilir ya da gruplar halinde motorlu araçlarla gelebilir. Bu gibi tehditlere karşı erken teşhis sistemi için kablosuz algılayıcı ağlar 10 km alanda 4km'yi kapsayacak şekilde bir kemer halinde planlanarak uygulanmaktadır[39].

Teknolojik yeniliklerin ilk uygulandığı alan olan savunma sanayinde kablosuz sensör ağ uygulamaları tipik olarak akustik, titreşim, manyetik, kızılötesi sensörler ve dolayısıyla sensör düğümleri kullanılmaktadır.



Şekil 2.4. Temel Savunma Uygulaması Kablosuz Sensör Ağ [39]

3. KABLOSUZ SENSÖR AĞ DÜĞÜMÜ

3.1. Kablosuz Sensör Ağ Düğüm Mimarileri

Tipik bir kablosuz sensör ağ, üç farklı tipte düğümlerden oluşmaktadır. Bunlar sensörün bağlı olduğu verici düğüm, sensörden gelen veriyi işleyen alıcı düğüm ve verici düğüm ile alıcı düğüm arasındaki mesafenin yetmediği veya farklı bir alıcıya yönlendirilmesi istendiği durumlarda da kullanılan yönlendirici düğümden oluşmaktadır. Kablosuz sensör düğümleri tasarımı birbirinden farklı mimarilerde gerçekleştirilebilir. Kablosuz sensör ağın, ağ yapısı topolojisine bağlı olarak, düğüm tipleri ve adetleri artabilir veya azalabilir.

Şekil 3.1.'de mikrodenetleyici birim ve RF alıcı verici modül ayrı ayrı iki farklı baskı devrelerde olmak üzere düğüm tasarımı görülmektedir. Bu tasarım mikrodenetleyici ve çevre birimlerinin bulunduğu bir PCB ile nRF24L01 RF alıcı verici modülünün bulunduğu bir başka PCB ile SPI bus ile haberleşebilir yapıda bir sensör düğümüdür. Sensörler bu tasarım modelinde mikrodenetleyicinin bulunduğu PCB ye bağlanabilir yapıdadır. Alıcı verici modülde RF kısmı nRF24L01 entegresi, Düşük Gürültülü Kuvvetlendirici (DGK, Low Noise Amplifier, LNA) ve Güç Kuvvetlendirici(GK, power amplifier, PA) bulunmaktadır. DGK ve GK sayesinde gönderilmek istenen veri mesafesi arttırılmıştır.

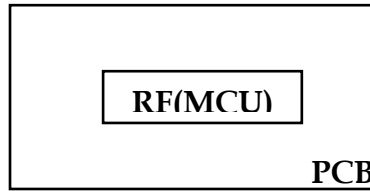


Şekil 3.1. İki ayrı PCB olmak üzere mikrodenetleyici ve RF birimler

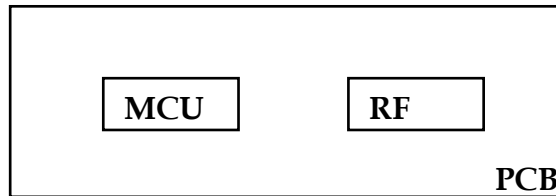
Şekil 3.2.'de tek bir PCB üzerinde ve SoC üzerinde dâhili RF anteni olan RF MCU kategorisinde bir mikrodnetleyici üzerinde bulunacak şekilde tasarım görülmektedir. Bu yapıda RF alıcı verici yongası; aynı zamanda üzerinde GPIO, ADC gibi çevrebirimleri içeren bir mikrodnetleyicidir. Bu tasarım modelinde, ayrıca bir mikrodnetleyici kullanılmadan, bazı uygulamalarda performans açısından yeterli olabilmesi ve devre tasarımındaki optimizasyon açısından ufak boyutlarda olması sensör düğümü tasarımı için önemli bir avantaj sağlamaktadır. SoC yapıda olmasının avantajlarının yanı sıra, kapasite gerektiren uygulamalarda mikrodnetleyicisinin yetersiz kalması gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Bu durumlarda mutlaka ayrıca bir DSP veya mikrodnetleyiciye ihtiyaç duyulmaktadır.

Şekil 3.3.'de tek bir PCB üzerinde mikrodnetleyici ve RF alıcı verici yongası üzerinde olacak şekilde düğüm tasarımı görülmektedir. Mikrodnetleyici modülü ile RF modülün, bir birine konektör bağlantısı sayesinde modüler yapıdadır. Bu tasarım modeli Şekil 3.1. ve Şekil 3.2.'deki blok tasarımlara göre EMI açısından daha efektif yapıdadır[44]. Mikrodnetleyici modülün RF modül kısmından ayrılması, daha önceki edinilen tecrübelerden edinilen bilgiler ışığında gürültü gibi bir birine negatif etkide bulunmasına engel olacağı bilinmektedir.

Bu tez çalışmasında yapılan tasarımda Şekil 3.1.'deki tasarım modeli olarak alınmıştır.



Şekil 3.2. Tek PCB olmak üzere RF mikrodnetleyici



Şekil 3.3. Tek PCB olmak üzere RF kısım ve mikrodnetleyici

3.2. Kablosuz Sensör Ağı Katmanları

3.2.1. Fiziksel Katman (PHY)

Radyo frekans kontrolü, kanal seçimi, ortamın veri iletimi için uygunluğunun kontrolü (clear channel assesment), verilerin modülasyonu ve demodülasyonu, sinyal yayılımı, yayın alma ve yayın verme işlemlerinin yapıldığı katmandır[4, 26].

3.2.2. Ortam Erişim Yönetimi Katmanı (MAC)

Güvenilir ve güvenli iletişimi sağlayan katmandır. Her cihazın bir MAC adresi mevcuttur. Bu MAC adresleri 64 bit (long address) ya da 16 bit (short address) olabilmektedir. Bu katmanda paket kriptolama işlemi ve cihazlar arası güvenilir erişim kontrolü yapılır. 802.15.4 standardında MAC katmanı tarafından çeşitli güvenlik servisleri uygulanır. Cihazlar kendilerine gelen paketlere cevap verirken paketler içinde bulunan karşı tarafın MAC adreslerini dikkate alırlar.

Bu durumda MAC adresleri özgün, eşsiz olduğundan paketlerin farklı cihazlara gitmesi mümkün değildir[4, 26]. MAC katmanında 3 çeşit güvenlik modu vardır. Bunlar:

- Güvensiz Mod: Herhangi bir güvenlik servisi sağlanmadan MAC paketçiklerinin açık metin olarak gönderilmesidir[4, 23, 26].
- Erişim Kontrol Listesi Modu (Access Control List Mode): Her bir cihazın MAC adresinin listelenerek, haberleşmesi istenen cihazların donanımlarına yüklenmesiyle sağlanır. Böylelikle yabancı bir cihaz sisteme dâhil olamaz[4, 26].
- Güvenli Mod: Bu modda MAC paketçikleri kriptolanır. Kriptolamada AES standardı kullanılır[4, 17, 26].

3.3. Kablosuz Sensör Ağı Protokolleri

3.3.1. IEEE 802.15.4 Protokolü

IEEE 802.15.4 standardı, kablosuz kişisel yerel ağlarında fiziksel (PHY) ve ortam erişim yönetimi (MAC) katmanları için oluşturulmuştur. Standardın

oluşturulma amacı düşük alt yapı maliyetli, aktarım hızı yavaş ve düşük güç tüketimli kişisel kablosuz ağlar oluşturulmasıdır. 802.15.4 ün özellikleri [4, 12, 15]:

- 3 farklı ISM (Endüstri, Bilim ve Tıp Bandı) bandı bulunmaktadır ve bunlar telsiz haberleşmesinde herhangi bir sertifika veya lisansa ihtiyaç kalmadan sadece belirli bir çıkış gücü sınırlamasına uyularak kullanılan frekans bantlarıdır[12, 15]. Bunun için 3 farklı frekans bandı vardır:
 - 868-868.8 MHz aralığı Avrupa'da kullanılır ve sadece 1 kanal içerir. Veri aktarım hızı 20 Kbps'dır[11, 15].
 - 902-928 MHz aralığı Kuzey Amerika'da kullanılır ve öncesinde 10 kanal vardı, 2006 yılı itibarıyla 30 kanal içerir. Veri aktarım hızı 40 kbps'dır[11, 15].
 - 2400-2483.5 MHz aralığı dünya genelinde kullanılır ve 16 kanal içerir. Veri aktarım hızı maksimumda 250 Kbps'dır[11, 15].
- Dinamik adresleme yapabilir[11, 15].
- Yıldız (star), örgü (mesh) ve noktadan noktaya (peer-to-peer) ağ yapılarını destekler[19].
- CSMA-CA 'yı destekler. CSMA mekanizmasında, paket transfer etmek isteyen düğüm ilk olarak Clear Channel (kanal temiz mi?) keşif prosedürünü uygular. Bunun için ortamı belli bir süreliğine dinler. Eğer medya temiz ve boş, herhangi bir veri transferi söz konusu değilse düğüm paketini iletir. Fakat başka bir düğüm tarafından veri iletimi var ise; düğüm veri iletiminden vazgeçer, belli bir süre bekler, tekrardan Clear Channel prosedürünü uygular. Ayrıca aynı anda 2 ya da daha fazla düğümün paketlerini iletmeleri durumda veriler üst üste gelebilir, bu olay verilerin çarpışmasına (collision) ve paketlerin düşmesine yol açar. Eğer kayıpsız bir iletim isteniyorsa, bu çarpışmalar fark edilmeli ve düşen paketler yeniden iletilmelidir[4, 15]. CSMA-CA algoritması bu noktada oluşabilecek sorunları önler ve kayıpsız veri iletimini sağlar[4].
- Güvenli ve güvenilir bir iletişim sağlar[4, 12].

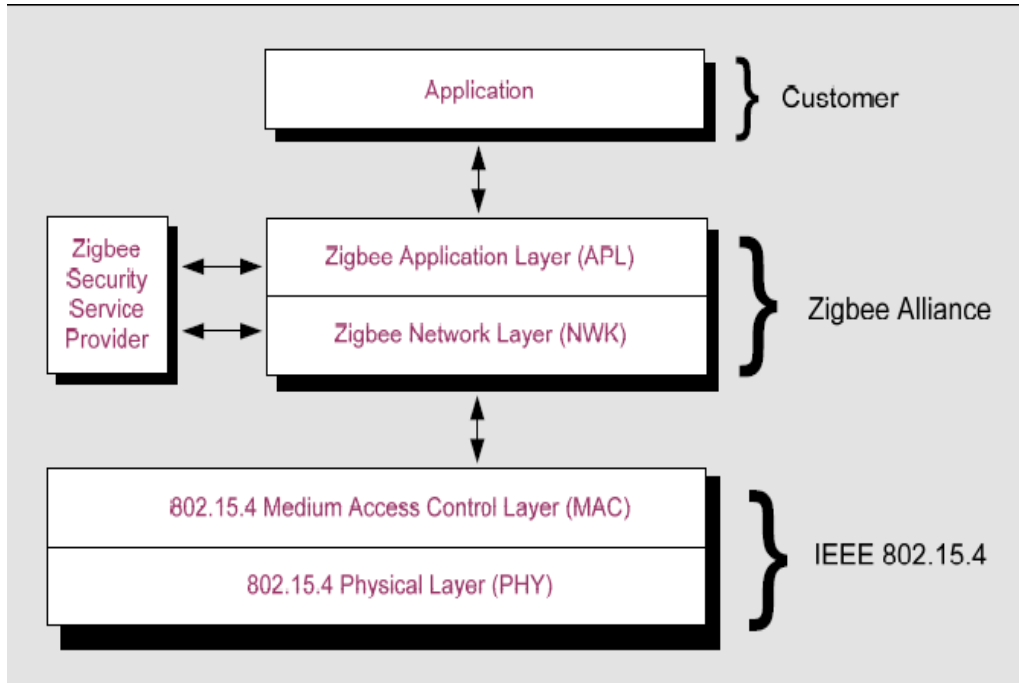
IEEE 802.15.4 standardı yukarıdaki işlemleri iki katmanda gerçekleştirir.

3.3.2. ZigBee Protokolü

ZigBee standardı, kablosuz haberleşme teknolojilerinde düşük hız kablosuz kişisel yerel ağ (LR-WPAN, Low-Rate Wireless Personal Area Network) haberleşmesi olarak bilinir[12]. ZigBee teknolojisi, küçük boyutta veri alışverişi ile gerçekleştirilmesi mümkün uygulamalarda düşük maliyetli olması, minimum güç tüketme prensibine dayanması, kurulumunun kolay ve esnek yapıda olması açısından büyük oranda tercih edilmektedir[11, 12]. Bu teknoloji sayesinde karmaşık ağ yapıları kurmak, bunları genişletmek ve bu yapıların diğer teknolojilerle haberleşmesini sağlamak mümkündür[4].

ZigBee Düşük veri aktarım hızı, düşük güç tüketimli, düşük maliyetli, otomasyon ve uzaktan kontrol uygulamaları için kablosuz ağ protokolünü amaçlayan bir teknolojidir. Bu sistem IEEE 802.15.4. standardı olarak geliştirilmiştir[7, 15].

IEEE 802.15.4 standardı ZigBee teknolojisinin MAC ve PHY katmanını oluşturur. ZigBee standardı ise daha üst seviye katmanlar olan ağ ve uygulama katmanlarını tanımlar. Şekil 3.4.'de görüleceği üzere en üst katman kullanıcı uygulamaları için ayrılmıştır[27].



Şekil 3.4. 802.15.04 Standardında ZigBee Katmanı

Diğer katmanları kısaca özetlersek;

- Ağ Katmanı: Kompleks ağ topolojilerinde haberleşme düzenini oluşturur[26].
- Uygulama Katmanı: Ağ yönetim fonksiyonlarını, mesaj formatlarını, güvenlik uygulamalarını belirler[26].

ZigBee, 802.15.4'ün üzerine mantıksal ağ topolojisi kurma, güvenlik ve uygulama özelliklerini ekler. ZigBee ve IEEE 802.15.4'ün amacı düşük güç tüketimini, düşük maliyeti, geniş mantıksal topolojileri sağlamak, birçok uygulamaya yönelik esnek protokolleri oluşturmaktır[8, 10].

3.4. nRF24L01 Enhanced Shockburst Protokolü

Enhanced ShockBurst™, paket tabanlı veri bağlantı katmanıdır. Otomatik paket işleme ve zamanlama, paketlerin otomatik onayı ve yeniden iletilmesi özelliklerine sahiptir. Aynı zamanda çok düşük güç tüketimi sağlamaktadır.

İletim sırasında, ShockBurst™ paketi toplar ve iletim için bitleri veri paketlerinin içerisine ekler. Alım sırasında ise demodüle edilmiş sinyalden sürekli geçerli bir adres arar. Geçerli bir adres bulunduğunda paketin geri kalanını işler ve CRC tarafından doğrular. Eğer paket geçerliyse yük RX FIFO içine taşınır.

Enhanced ShockBurst™ paket işlemi, alıcı ve verici birimler arasında bir paket alışverişidir. Bu işlem her zaman paket iletimi için vericiden başlatılır ve alıcının vericiden bir onay paketi almasıyla tamamlanır[28, 29].

Otomatik paket işlemi aşağıdaki gibi çalışır:

- Kullanıcı tarafından vericiden alıcıya iletilecek bir paket olduğunda bu işlem başlatılır. Enhanced ShockBurst™ onay paketini beklemesi için vericiyi otomatik olarak alıcı moduna ayarlar.
- Eğer paket alıcı tarafından alınır, Enhanced ShockBurst™ otomatik olarak paketi toplar ve alıcı moduna dönmeden onay paketini vericiye gönderir.
- Eğer verici onay paketini belirli bir süre içinde almazsa Enhanced ShockBurst™ otomatik olarak orijinal veri paketini yeniden gönderir ve onay paketini beklemesi için vericiyi alıcı moduna ayarlar[28, 29].

3.4.1. Enhanced ShockBurst™ Veri Paketi

Tablo 3. Enhanced ShockBurst Veri Paketi [28, 29]

Preamble	Address	Packet Control Field	Payload	CRC
1 Byte	3-5 Byte	9 Bit	0-32 Byte	1-2 Byte

Enhanced ShockBurst™ veri paketi 5 bölümden oluşmaktadır. Bu bölümler Tablo 3’te verilmiştir.

Preamble alıcıda 0 ve 1 seviyelerini tespit etmek için kullanılan 1 bayt uzunluğundaki bit dizisidir. Bu veri alıcının uyarılmasını sağlayarak alıcı ve verici kısımlar arasında senkronizasyonu sağlamaktadır. Eğer adresin ilk biti 1 ise Preamble otomatik olarak ikilik sayı sisteminde “(10101010)“ kodu ve eğer ilk bit 0 ise “(01010101)“ koduyla ayarlanır. Preamble alıcı modülün aldığı dijital verinin stabilize edilmesi için kullanılır. Adres kısmı verinin istenilen hedefe gönderilmesi sağlamaktadır. Alıcı modülün yapılandırıldığı adres bilgisine göre istenen veri paketi alınmaktadır. Paket kontrol alanı 6 bit yük uzunluğu alanı, 2 bit PID alanı ve 1 bit NO_ACK bayrağını içerir. Bu 6 bitlik alan yük uzunluğunu belirtir. Yük uzunluğu 0-32 bayt arasında değişebilir. Bu alan yalnızca dinamik yük uzunluğu fonksiyonu etkinse kullanılır. PID alanı alınan paketin yeni veya yeniden iletilen olduğunu tespit etmek için kullanılır. Alıcının MCU’ ya aynı yükü göndermesini önler. Otomatik onay özelliğini NO_ACK bayrağı kontrol eder. Bayrak yüksek seviyeye ayarlanarak paketin otomatik olarak kabul edilmesi engellenir. Yük, kullanıcı tanımlı paket içeriğidir. 0 ile 32 bayt arası genişlikte olabilir. CRC paket hata algılama mekanizmasıdır. 1 veya 2 bayt olabilir. CRC hatalı olursa hiçbir paket Enhanced ShockBurst™ tarafından kabul edilmez[28, 29, 30].

3.4.1.1. Enhanced ShockBurst Akış Şemaları

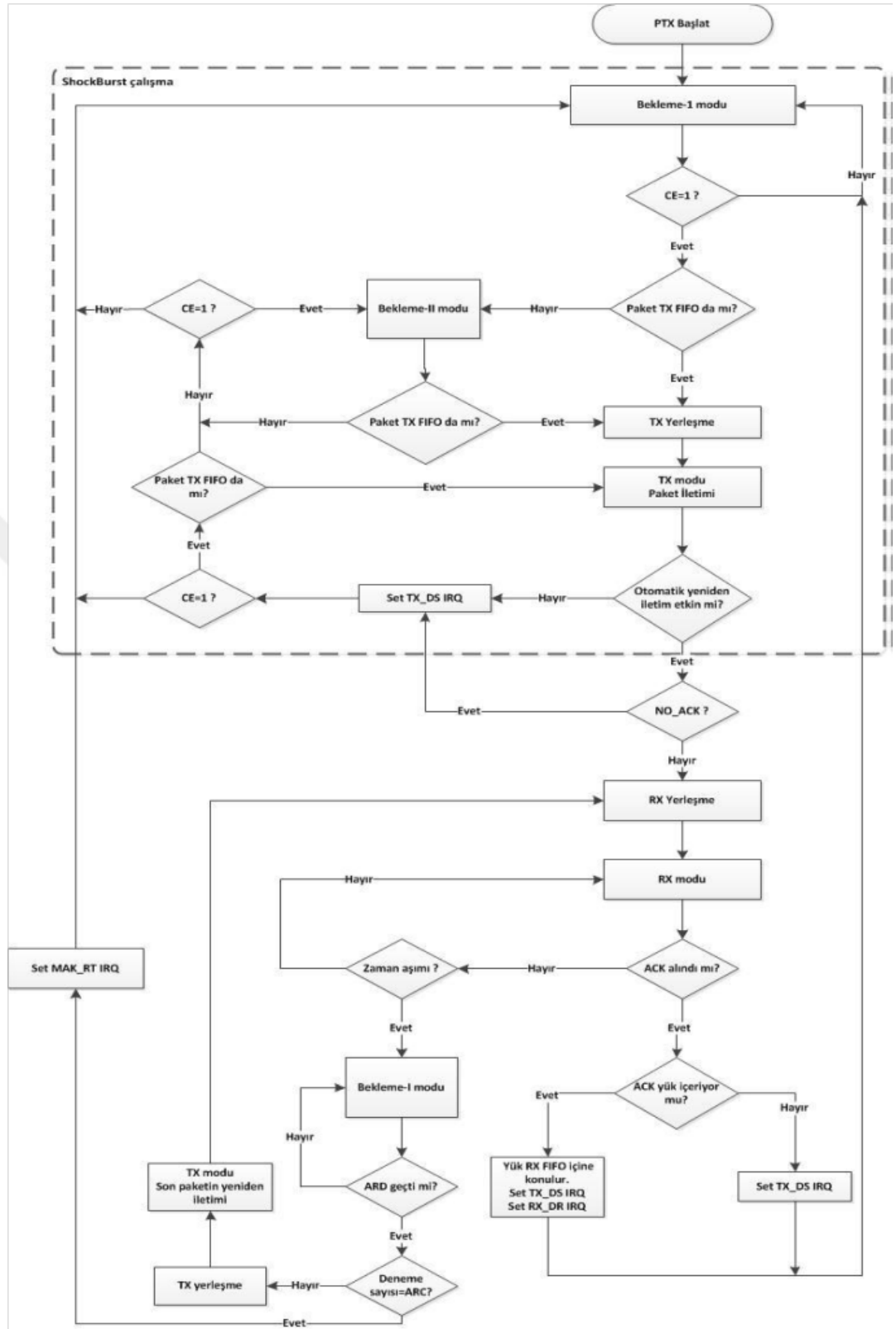
Bu bölümde PTX ve PRX işlemi için akış diyagramları gösterilmiştir. Enhanced ShockBurst™ işlemi akış diyagramları bir kesik çizgili kareyle gösterilmektedir.

Şekil 3.5.'de nRF24L01'in bekleme-1 moduna girdikten sonra PTX olarak yapılandırılmasının akış şeması gösterilmektedir[29].

Bu akış diyagramından (Şekil 3.5. nRF24L01 PTX Enhanced ShockBurst Akış Şeması) da görüleceği üzere PTX modunu etkinleştirmek için CE ucu lojik '1' yapılır. Eğer TX FIFO' da bir paket mevcut ise nRF24L01 TX moduna girer ve paketi iletir. Otomatik yeniden aktarım etkinse, NO_ACK bayrağı lojik-1 durumuna getirilirse, durum makinesi kontrol eder. Bu lojik-1 durumuna geçmemişse, nRF24L01 bir ACK paketi almak için RX moduna girer. Alınan ACK paketi boşsa, sadece TX_DS IRQ lojik-1 durumuna getirilir. ACK paketi bir yük içeriyorsa TX_DS IRQ ve RX_DR IRQ, nRF24L01 bekleme-I moduna dönmeden önce aynı anda lojik-1 durumuna getirilir.

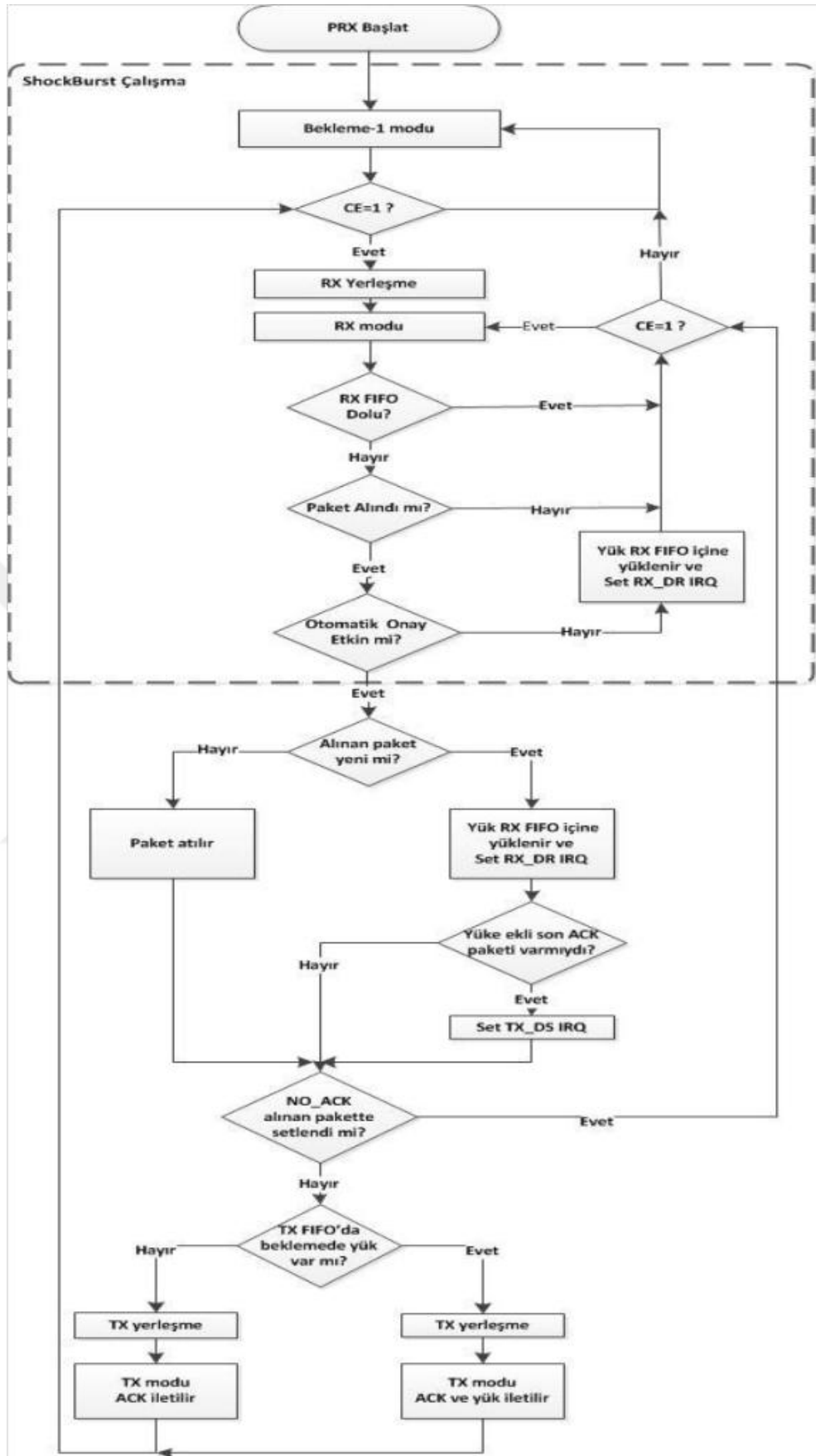
Zaman aşımı oluşmadan önce ACK paketi alınmazsa, nRF24L01 bekleme-I moduna döner ve ARD geçene kadar bekleme-I modunda kalır. Yeniden iletim sayısı ARC' ye ulaşmazsa, nRF24L01 TX moduna girer ve bir kez daha son paketi iletir.

Otomatik yeniden aktarım özelliği yürütülürken, yeniden iletim sayısı ARC olarak tanımlanan maksimum sayıya ulaşabilir.



Şekil 3.5. nRF24L01 PTX Enhanced ShockBurst Akış Şeması [29]

Şekil 3.6.'da nRF24L01'in bekleme-1 moduna girdikten sonra PRX olarak yapılandırılmasının akış diyagramı gösterilmektedir. CE ucu lojik '1' yapılarak PRX modu etkinleştirilir. nRF24L01 RX moduna girer ve paketleri aramaya başlar. Bir paket alınır ve otomatik onay etkinse nRF24L01 paketin yeni ya da daha önce alınan paketin bir kopyası olduğuna karar verir. Eğer paket yeniyse, yük RX FIFO için hazırlanır ve RX_DR IRQ lojik-1 durumuna getirilir. Vericiden son alınan paket kabul edilirse TX_DS IRQ lojik-1 durumuna getirilir ve PTX' in yük ile ACK paketini aldığı gösterir. Eğer NO_ACK bayrağı(NO ACK Flag) alınan paketin içinde lojik-1 seviyesine çekilmezse; PRX, TX moduna girer. TX FIFO içinde bekleyen yük varsa bu ACK paketine eklenir. Sonra ACK paketi iletilir ve nRF24L01 RX moduna döner. ACK paketinin kaybolması durumunda, daha önce alınan paketin bir kopyası alınmış olabilir. Bu durumda, PRX alınan paketi atar ve RX moduna dönmeden önce bir ACK paketi gönderir.



Şekil 3.6. nRF24L01 PRX Enhanced ShockBurst Akış Şeması [29]

4. LPC1343 KABLOSUZ SENSÖR DÜĞÜM TASARIMI

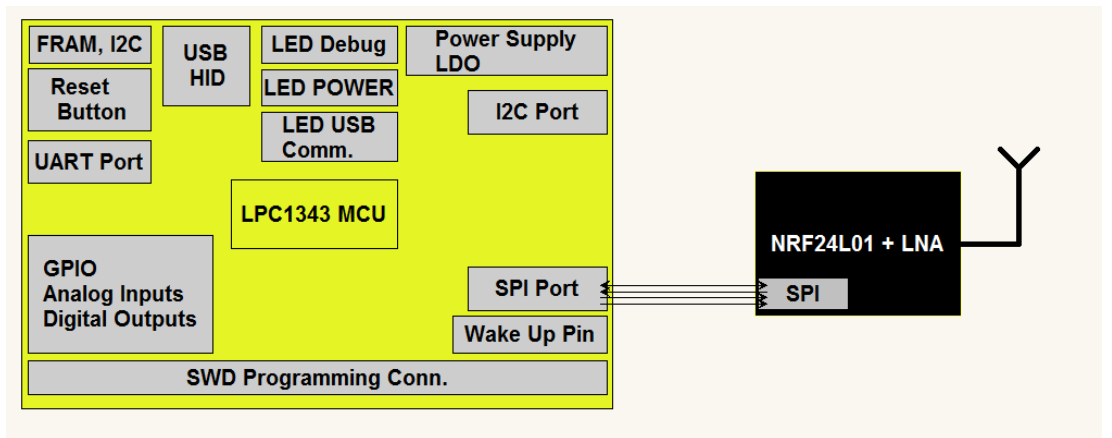
4.1. LPC1343 Sensör Düğümü Mimarisi

Kablosuz sensör düğümü tasarımında “MCU + RF Transceiver” topolojisi kullanılmıştır. Mikrodenetleyici olarak 32 Bit’ lik, özellikle sensörden alınan verilerin bilgisayar ortamında rahatça işlenebilmesi açısından üzerinde dâhili USB HID çevre birimi bulunan ARM Cortex M3 ailesinden LPC1343 mikrodenetleyicisi kullanılmıştır.

Tasarımda ayrıca gerektiği durumlarda kayıt tutulması istenen dijital veriler için EEPROM’a göre çok daha fazla okuma yazma yapılabilen FRAM hafıza elemanı kullanılmıştır. Kablosuz haberleşmeyi sağlamak için tek yonga üzerinde alıcı verici ve anten pini olan nRF24L01 alıcı verici entegrasyonu kullanılmaktadır. Bu alıcı verici ile SPI bus üzerinden haberleşmektedir. Sensör düğümünün sistem blok diyagramı Şekil 4.1.’ de görülmektedir.

Kullanılan RF modülün üzerinde LNA Power Amplifier olması sebebiyle çıkış gücü +20dBm kuvvetlenmektedir.

RF modülün veri iletim hızını artırma ve azalma gibi esnekliğe sahip olması sebebiyle, veri aktarım hızı en düşük 250 Kbps olarak ayarlandığında iki düğümün haberleşme mesafesi açık alanda 800m gibi uzaklıklara ulaşmaktadır.



Şekil 1.1. LPC1343 Kablosuz Sensör Düğümü Mimarisi

Bu özelliği ile diğer sensör düğümlerine önemli avantaj oluşturmuş olmasının yanında, bu güçlerde güç tüketmesi sebebiyle RF modül devreden 50 mA ile 100 mA arası akım çekmektedir. Bu durumda da yüksek güç tüketmektedir.

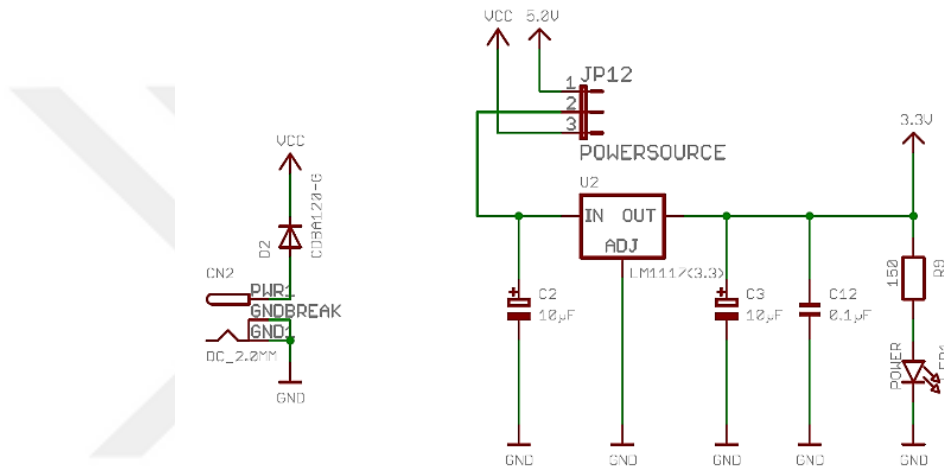
Kablosuz sensör ağ uygulamalarında, düğümlerin bir birleriyle haberleşmesinde gürültü veya farklı girişimler olabilir. Tipik bir kablosuz sensör ağ uygulamasında aynı frekansta haberleşen düğümler, çeşitli güvenlik algoritmaları geliştirilerek haberleşmelerdeki veri kayıpları engellenmektedir. Aynı frekansta haberleşen sensör düğümlerinin yeterli güçte bir sinyal haberleşmeyi bozabilir ve veri aktarımı başarılı bir şekilde yapılamaz. Bu durumlardaki aksaklıkları minimuma indirmek için her bir düğüm çifti farklı kanallarda haberleşerek, sensör ağın haberleşmesinin durması yerine, sensör düğümlerinin haberleşmesinde aksaklıklar oluşturacaktır. Bu aksaklıklar ayrıca raporlanacak, gerekli önlemlerin alınarak haberleşme de kaldığı yerden devam edilmesi sağlanacaktır.

4.2. LPC1343 Kablosuz Sensör Düğümü Donanım Mimarisi

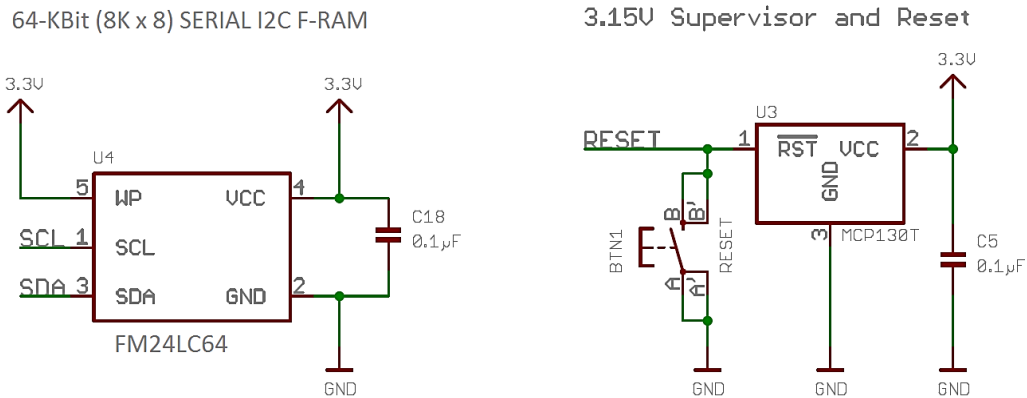
Tez çalışmasında birkaç farklı sensör düğüm tasarımı gerçekleştirilmiştir. İlk tasarımda model alınan tip mikrodenetleyici ayrı, RF alıcı verici modül ayrı bir PCB de olmak üzere bir düğüm tasarımı yapılmıştır. İlk yapılan tasarımda mikrodenetleyici ve RF alıcı verici modül farklı özelliklerde seçilerek kullanılmıştır. Kullanılan mikrodenetleyicinin 8 Bit ve mimari olarak düşük güçlü uygulamalara uygun olmadığından, ayrıca yazılım geliştirmelerinde üretici firmadan yeterli destek alınamadığından mikrodenetleyicinin değiştirilmesine karar verilmiştir. Kullanılan MRF24J40 alıcı verici modülü 802.15.4 ZigBee protokolünü desteklemiş olup, microchip firmasının patentli haberleşme protokolü olan MiWi protokolüne ait stack bulunmaktadır. Yapılan testlerde RF çıkış gücünün yeterli olmadığı görülmüş ve RF modülün değiştirilmesine karar verilmiştir.

Tez çalışması boyunca yapılan testler revizyonlar sonucu şematik olarak sensör düğümüne ait besleme katı, sensör düğümünün RF hattına gürültü yaymaması için lineer topolojide tasarlanmıştır. Besleme kısmına ait şematik tasarım Şekil 4.2.'de görülmektedir.

Sensör düğümü PCB tasarımına göre istenildiğinde harici kaynak (Pil, Akü, Adaptör) veya USB üzerinden de beslenerek çalıştırılabilmektedir. Sensör düğümü üzerinde gerektiğinde verilerin hafızada saklanması için EEPROM'a göre daha teknolojik ve bu tarz sıklıkla veri yazma, okuma işlemlerinde kullanılması gereken FRAM bulunmaktadır. Ayrıca sensör düğümüne herhangi sebepten dolayı yaşanabilecek voltaj düşmelerinde aksiyon alınabilmesi için veya sisteme ihtiyaç durumunda reset atılabilmesi için gerekli şematik tasarım Şekil 4.3.'de görülmektedir.



Şekil 4.2. LPC1343 Sensör Düğümü Besleme Şeması

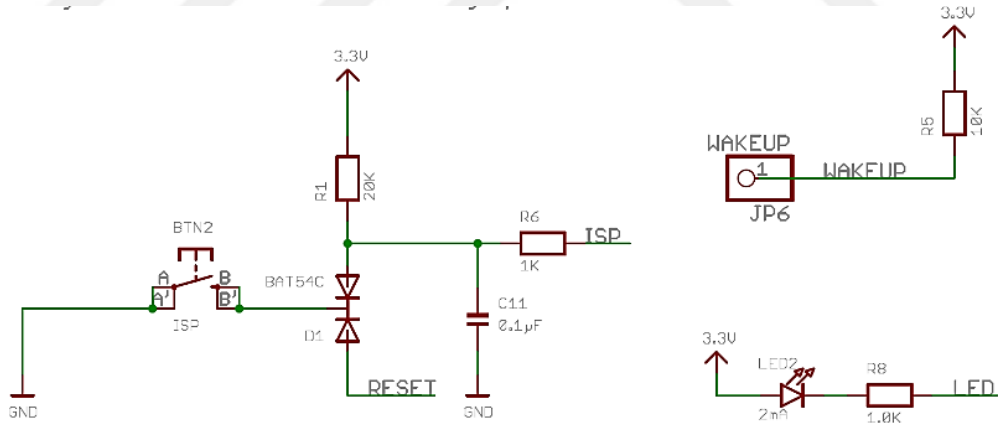


Şekil 4.3. LPC1343 Sensör Düğümü Hafıza ve Reset Şeması

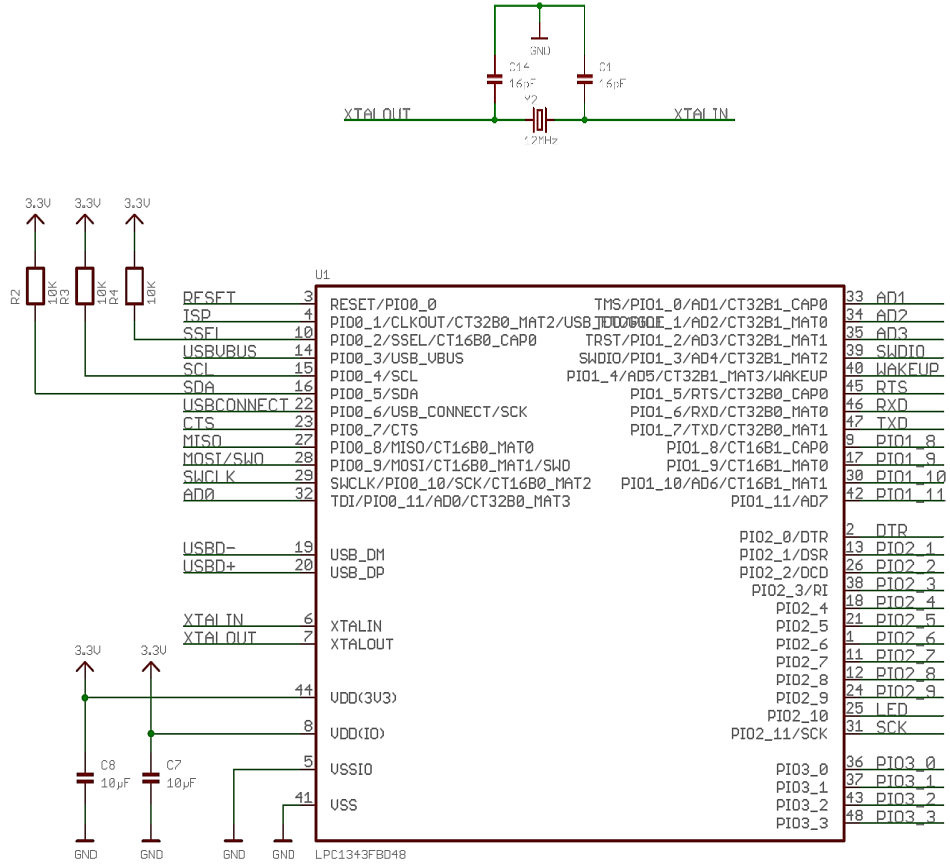
Sensör ağı tasarımcıları için yazılım geliştirmeleri esnasında kolaylık sağlaması açısından LED ve “wake-up” interruptlarının gözlemlenebilmesi için gerekli tasarımlar yapılmıştır. Tipik bir kablosuz sensör ağında adet olarak fazla sayıda sensör düğümü kullanılabilir. Bu durumlarda ürün geliştiricilerin belirlenmiş olan yazılımları hızlıca güncelleyebilmesi için USB üzerinden programlanabilme özelliğini kullanabilecekleri uygun tasarım yapılmış olup, Şekil 4.4.’de görülmektedir. Ayrıca standart Debug işlemlerinin sağlanabilmesi açısından da SWD konektörü bu tasarımda kullanılmıştır.

Sensör düğümünde kullanılan MCU tarafına ait şematik tasarım da Şekil 4.5.’de görülmektedir. Tüm pinleri dış dünyaya açılacak şekilde tasarlanmıştır.

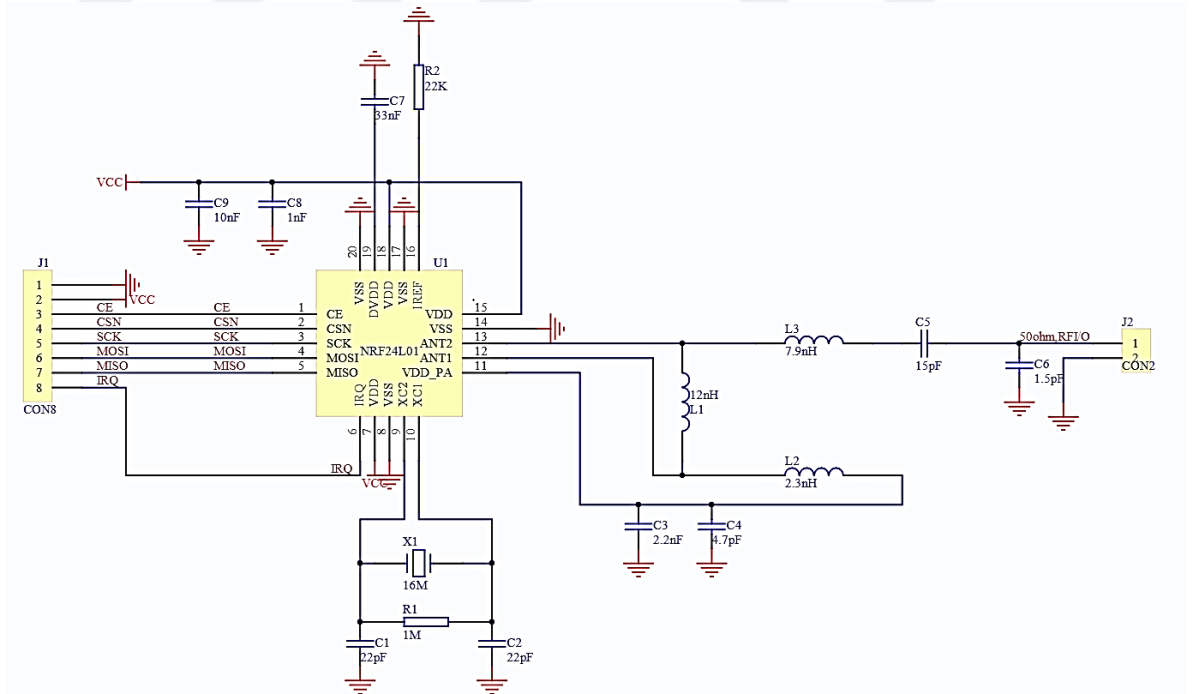
Sensör düğümünde kullanılan RF alıcı verici modülünün Altium Designer programında tasarlanan şematik tasarımı Şekil 4.6.’da görülmektedir. RF modül, sensör düğümü ana kartına SPI pinleri üzerinden konektör ile takılarak kullanılmaktadır.



Şekil 4.4. LPC1343 Sensör Düğümü Programlama Butonu ve Debug LED



Şekil 4.5. LCP1343 Sensör Dügümü Mikrodnetleyici Şeması

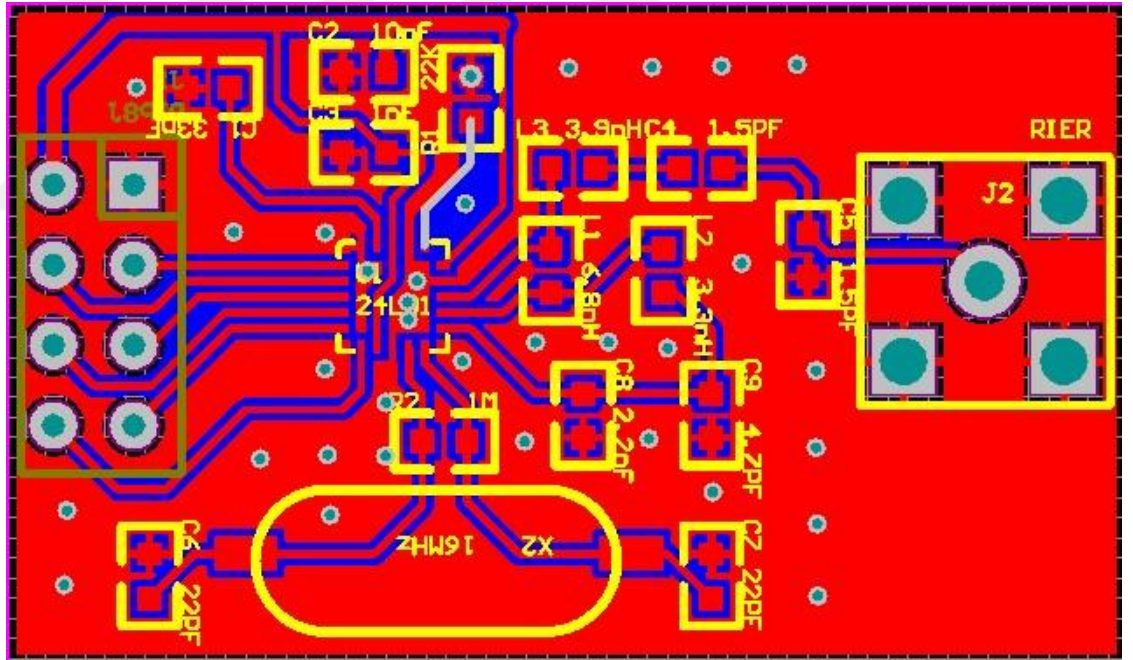


Şekil 4.6. nRF24L01 RF Alıcı Verici Modülü Şeması

nRF24L01 RF alıcı verici modülüne ait PCB tasarımı Şekil 4.7.'de görülmektedir. PCB tasarımında nRF24L01 RF çıkış kısmının 50Ω çıkış empedansı için gerekli hesaplamalar için "AWR Microwave Office " programı kullanılmıştır. Buna göre kart tasarımının alt kısmı komple toprak sinyallerde üst katmanda olmak üzere iki katlı devre tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Sensör düğümünün mikrodenetleyici kısmıyla, RF alıcı verici kısmının birbiri ile haberleşebilmesi kullandıkları SPI ara yüzü için Şekil 4.7.'deki tarafta görülen konektör ile sağlanmaktadır. RF çıkışı da sağ tarafındaki SMA tipi konektör ile kazançlı bir anten ile sağlanmaktadır.

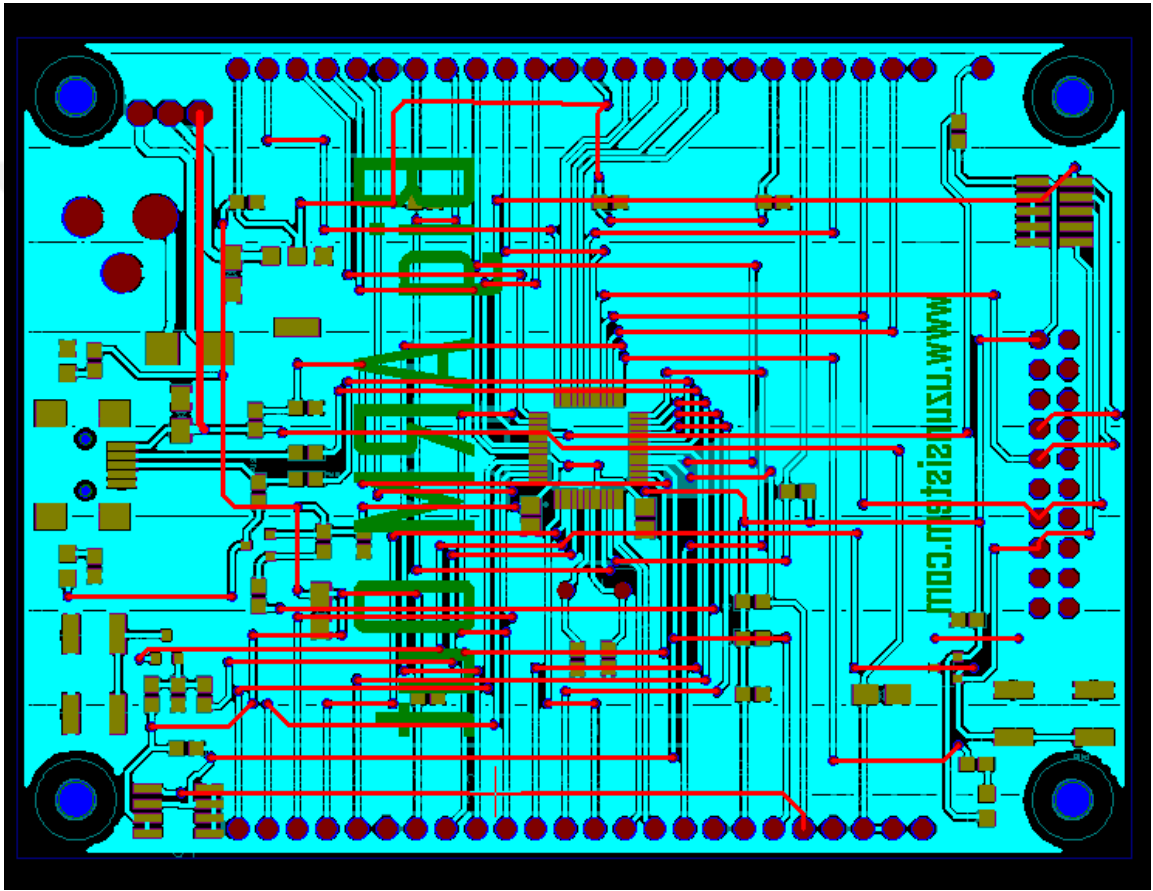
Sensör düğümlerinin PCB tasarımı Cadsoft Eagle kullanarak tasarlanmış olup, çift yüzü bir PCB tasarımı gerçekleştirilmiştir. PCB tasarımına ait resimler alt ve üst katman olarak sırasıyla Şekil 4.8. ve Şekil 4.9.'da görülmektedir.



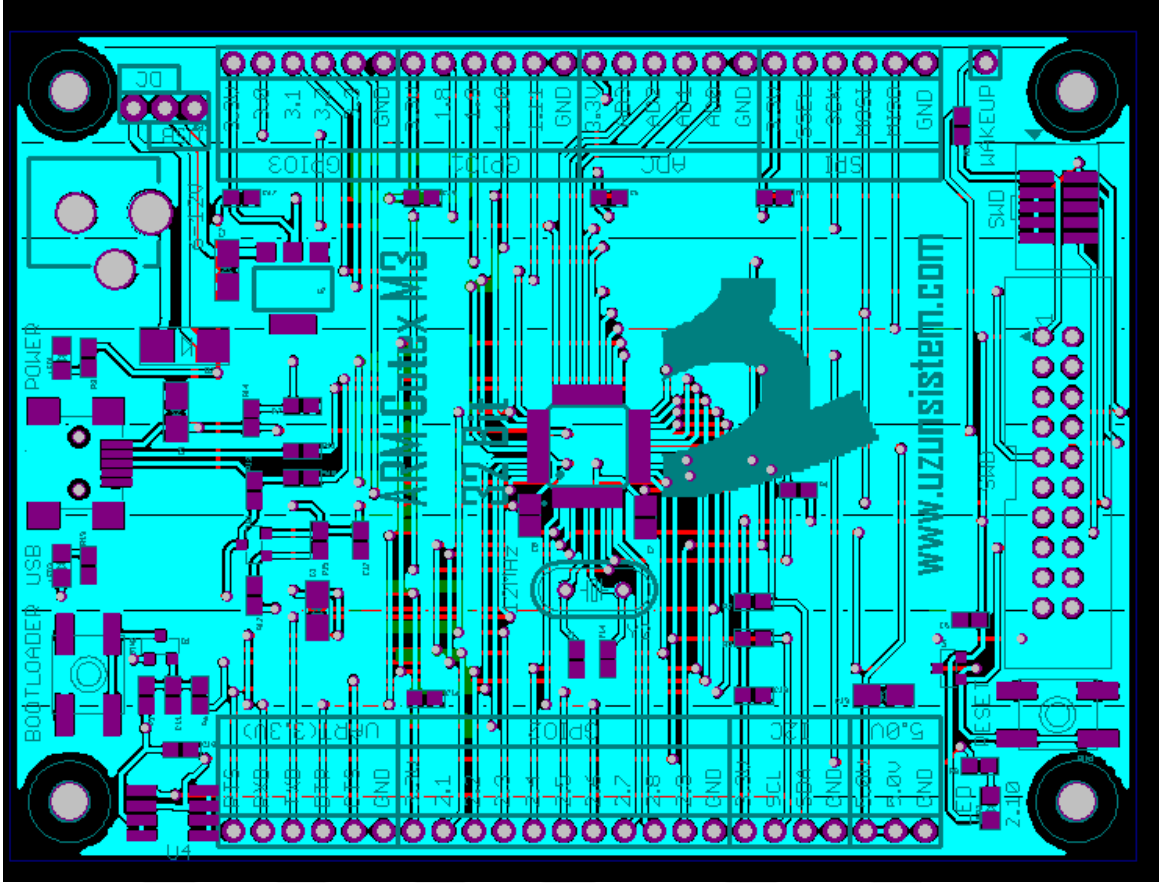
Şekil 4.7. nRF24L01 RF Alıcı Verici PCB Görüntüsü

Sensör düğümünün mikrodenetleyici kısmını ile RF alıcı verici modül kısmı üst üste gelecek şekilde bağlanacak olup, fiziksel bağlantılar için PCB tasarımında dört köşeye montaj delikleri bırakılmıştır. Toplam PCB tasarımının kapladığı alan RF alıcı verici modülü dahil olmak üzere 80x100x50mm ölçüsündedir.

Mikrodenetleyici kartında hafıza elemanları, voltaj regülatörü SWD programlama veya bootloader programlama gibi Şekil 4.1. 'deki blok diyagramda bulunan tüm çevre birimler kart üzerinde yer almaktadır.



Şekil 4.8. LPC1343 Mikrodenetleyici Modülü PCB Alt Katmanı



Şekil 4.9. LPC1343 Mikrodnetleyici Modülü PCB Üst Katmanı

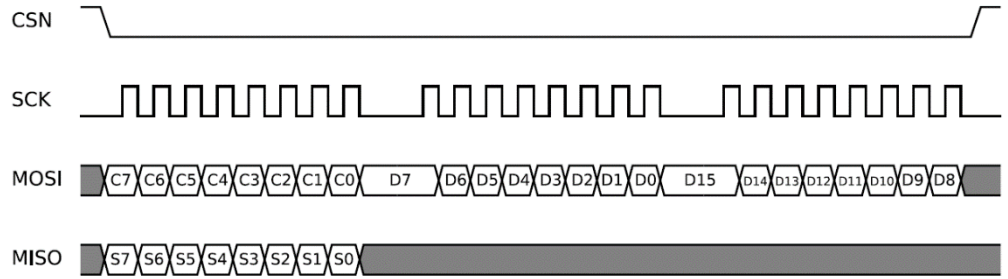
4.2.1.LPC1343 Sensör Düğümü Çevre Birimleri Haberleşmesi

LPC1343 Sensör düğümü mikrodnetleyici modülü ile nRF24L01 RF alıcı verici entegresi, SPI haberleşmesi ile veri alış verişi sağlamaktadır.

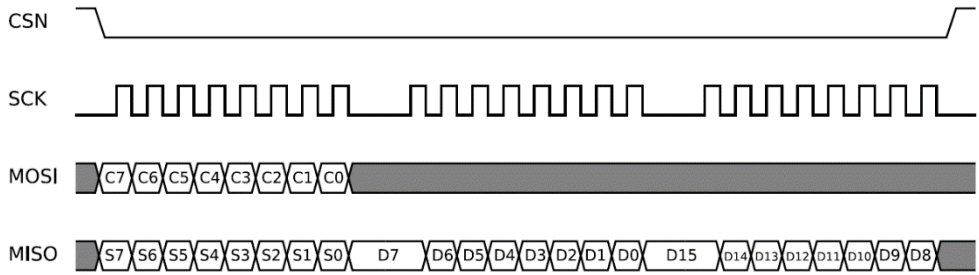
Haberleşmenin sağlanabilmesi için kullanılması gerekli clock timing diyagramları SPI yazma ve SPI okuma olmak üzere sırasıyla Şekil 4.10. ve Şekil 4.11.'de görülmektedir.

Sistem mimarisi olarak sensör düğümüne bakıldığında belli durumlarda taşınan verinin kayıt edilmesi ihtiyacı oluşmaktadır. Olası veri kaybında, verinin tekrar gönderilmesi veya verilerin bir araya toplanıp analiz edilmesinde hafıza elemanının kullanımı gereklidir.

Tasarlanmış olan sensör düğümünde F-RAM hafıza elemanı kullanılmıştır. Sensör düğümündeki verilerin toplanıp analiz edilmesi, hızlı örnek alma gibi verilerin hızlı okunup saklanması gibi ihtiyaçların olduğu uygulamalar için bu hafıza elemanının kullanımı önemlidir. 10 milyondan fazla okuma yazma işlemlerinin gerçekleştirilebilmesi açısından sensör düğümünde başarıyla kullanılmaktadır.



Şekil 4.10. nRF24L01 Radyo Frekans Alıcı Verici Modülü SPI Hat Yazma Saat Diyagramı

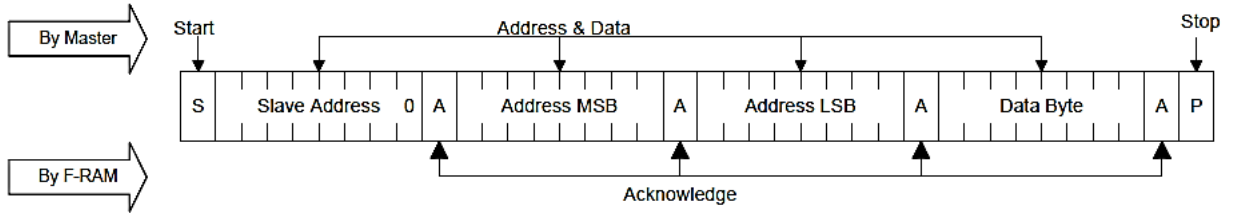


Şekil 4.11. nRF24L01 Radyo Frekans Alıcı Verici Modülü SPI Hat Okuma Saat Diyagramı[29]

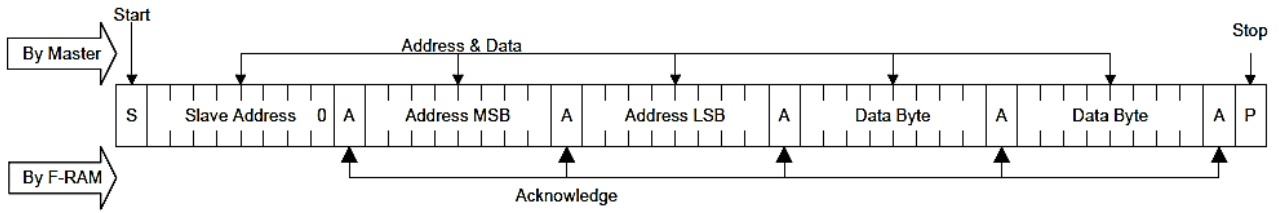
F-RAM' e okuma yazma işlemleri I2C seri haberleşme protokolü üzerinden sağlanmaktadır. Şekil 4.12.'de 1 Byte veri yazma işlemi için uygulanması gereken clock timing diagramı görülmektedir.

Şekil 4.13.' de birden fazla veri yazılmak istendiğinde çoklu veri yazma işlemi için uygulanması gereken clock timing diagramı görülmektedir[36].

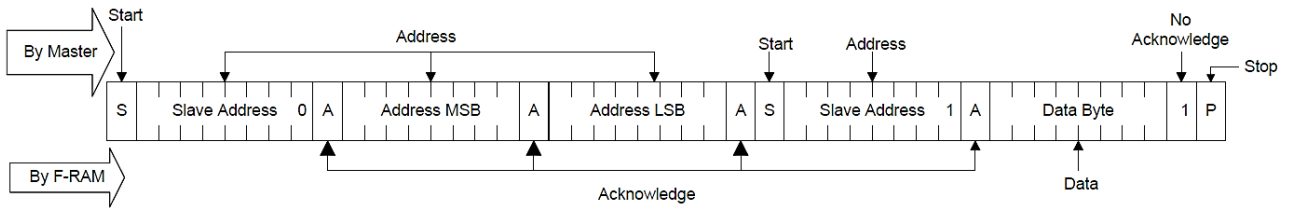
F-RAM 'e yazılan verileri gerektiğinde hafızanın istenen yerinden okunması için uyulması gereken clock timing diagramı Şekil 4.14'da görülmektedir[36].



Şekil 4.12. FM24LC64 FRAM Entegresine I2C İle 1-Byte Yazma Saat Diyagramı [36]



Şekil 4.13. FM24LC64 FRAM Entegresine I2C İle Çoklu Veri Yazma Saat Diyagramı



Şekil 4.14. FM24LC64 FRAM Entegresine I2C İle Veri Okuma Saat Diyagramı

Tablo 4.1. Hafıza Elemanlarının Karşılaştırılması

Memory Type	Non-Volatile	Write Endurance	Write Speed (13 kB)	Avarage Active Power (uA/MHz)	Dynamics Bit Addressable Programmability
FRAM	YES	10 ¹⁵	10mS	80	YES
SRAM	NO	Unlimited	< 10mS	<60	YES
EEPROM	YES	~500 000	2s	>10mA	NO
FLASH	YES	10 000	1s	260	NO

F-RAM Elektronik devre elemanının diğer hafıza elemanları ile karşılaştırıldığında okuma yazma ömürleri ve okuma yazma işlemleri için geçen süreler göz önünde bulundurulduğundan bariz üstünlükleri bulunmaktadır [37].

Özellikle kablosuz sensör düğümleri gibi otonom çalışıp, veri yazma okuma işlemlerinin sık yapıldığı elektronik devre elemanlarında kullanımı kritiktir. Tablo 4.1.' de FRAM gibi hafıza elemanlarının karşılaştırılması görülmektedir [37].

Tablo 4.1.'de geçici hafızaların yazılabilme ömürleri de görülmektedir. Tez kapsamında kablosuz sensör ağı uygulamalarında yazma-okuma işleminin yoğun olarak kullanılacağı için FRAM tipi seçilmiştir. Seçilen FRAM, LPC1343 kablosuz sensör düğümü mikrodenetleyici biriminde aynı PCB üzerinde olacak şekilde tasarlanmıştır.

4.3. nRF24L01 Alıcı Verici Modülü

Bu bölümde oluşturulan sistemde kablosuz haberleşmeyi sağlamak amacıyla kullanılan RF modüllerden ve teknik özelliklerinden bahsedilecektir. Sistemde kablosuz veri aktarımını sağlayan Nordic Semiconductor firmasının üretmiş olduğu nRF24L01 RF alıcı verici modülü kullanılmaktadır. Bu modül ses gibi yüksek veri aktarım hızı gerektiren sistemlerde kullanılabilen bir RF modülüdür.

Tablo 4.2. nRF24L01 modülünün teknik özellikleri [3]

Radyo	<ul style="list-style-type: none">· 2.4 - 2.4835 GHz ISM bandı kullanımı· GFSK Modülasyonu· 126 RF haberleşme kanalı· 0.25, 1, 2 Mbps veri iletim hızı· Ortak RX ve TX pinleri
Verici	<ul style="list-style-type: none">· Programlanabilir LNA kazancı· Programlanabilir 0, -6, -12 veya -18dBm çıkış gücü· 0 dBm çıkış gücünde 11.3mA akım çekmektedir.
Alıcı	<ul style="list-style-type: none">· Entegre kanal filtreleri· 2 Mbps de 12,3 mA· 2 Mbps de -82 dBm duyarlılık· 1 Mbps de -85 dBm duyarlılık· 250 Kbps de -94 dBm duyarlılık
RF Sentezleyici	<ul style="list-style-type: none">· Tam entegre sentezleyici· ± 60ppm 16MHz kristal
ShockBurst Protokol	<ul style="list-style-type: none">· 1 ila 32 bayt arası dinamik yük uzunluk· Otomatik paket işleme
Güç yönetimi	<ul style="list-style-type: none">· Entegre voltaj regülatörü· 1.9 V-3.6V besleme aralığı

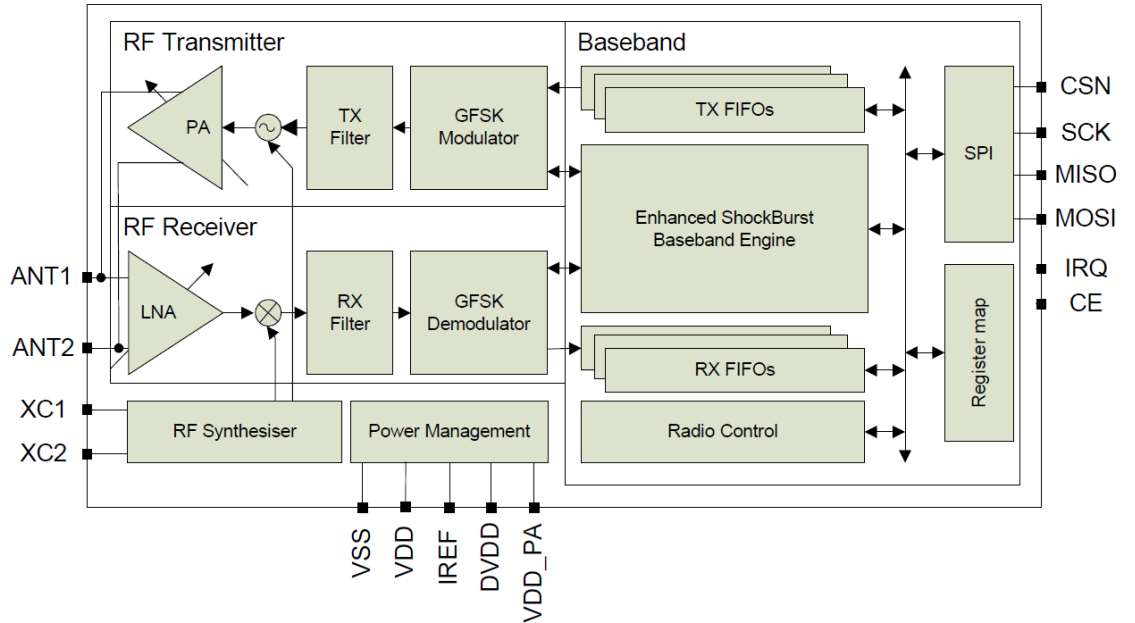
nRF24L01, dünya genelinde lisans gerektirmeyen 2.4GHz ISM bandında çalışan tek çipli RF alıcı-verici modüldür [28]. Son derece düşük güç harcamaktadır ve RX / TX tepe akımları 14mA'den daha düşüktür. Besleme aralığı 1.9V ile 3.6V arasındadır. nRF24L01 RF modülü, RF sentezleyici ile tam entegredir ve Enhanced ShockBurst™ donanım protokolü hızlandırıcısını içerir. nRF24L01, SPI ile yapılandırılır ve işletilir.

nRF24L01’de GFSK modülasyonunu kullanmaktadır. Besleme voltajı tipik olarak 3.3 voltur. Havadaki veri iletim hızı 250Kbps, 1Mbps ve 2Mbps’dir. 126 adet RF kanalı mevcuttur[28, 29]. Tablo 4.2’de nRF24L01 modülünün genel teknik özellikleri verilmektedir.

nRF24L01 ayarlanabilir LNA kazancı ile çıkış gücü seviyesine göre kısa ve orta mesafedeki uygulamalarda sistem optimizasyonu yapılabilmesine katkı sağlar.

Örneğin; yakın mesafede yüksek güçte veri iletimi yapmak, verici modülün fazla akım çekmesine sebep olacaktır. Kısa mesafelerde haberleşmek için verici modülün yüksek güçte RF çıkışı yapmasına gerek olmayacağından, LNA kazancı ayarlanıp, çıkış gücü düşürülecektir ve dolayısıyla verici modülün daha az akım tüketmesi sağlanacaktır.

Şekil 4.15.’ de nRF24L01 radyo frekans alıcı verici modülünün sistem blok diyagramı görülmektedir[29].



Şekil 4.15. nRF24L01 Sistem Blok Diyagramı [29]

Tablo 4.3. nRF24L01 Alıcı Verici Entegresi Pin Özellikleri [29]

PIN #	PIN AÇIKLAMASI	PIN FONKSİYONU	AÇIKLAMA
1	CE	Dijital Giriş	“Chip Enable” Alıcı veya verici modu aktif eder
2	CSN	Dijital Giriş	SPI Çipini Seçme Girişi
3	SCK	Dijital Giriş	SPI Clock Sinyal Girişi
4	MOSI	Dijital Giriş	SPI Slave Data girişi
5	MISO	Dijital Çıkış	SPI Slave Data çıkışı
6	IRQ	Dijital Çıkış	Maskelenebilir kesme pini
7	VDD	Güç	Giriş Beslemesi (1.9 V, 3.6 V)
8	VSS	Güç	Toprak (0V)
9	XC2	Analog Çıkış	Kristal Pin 2
10	XC1	Analog Giriş	Kristal Pin 1
11	VDD_PA	Güç Çıkışı	Güç Kaynağı Çıkışı (1.8V) Dâhili nRF24L01 Güç Amplifikatörü için
12	ANT1	RF	Anten 1
13	ANT2	RF	Anten 2
14	VSS	Güç	Toprak (0V)
15	VDD	Güç	Giriş Beslemesi (1.9 V, 3.6 V)
16	IREF	Analog Giriş	Referans Akımı. Toprağa 22kΩ direnç ile bağlanır
17	VSS	Güç	Toprak (0V)
18	VDD	Güç	Giriş Beslemesi (1.9 V, 3.6 V)
19	DVDD	Güç Çıkışı	Dekuplaj amaçlı dâhili dijital besleme çıkışı
20	VSS	Güç	Toprak (0V)

Aşağıdaki Tablo 4.3.’de nRF24L01’e ait uçların isimleri ve fonksiyonları verilmektedir.

Tablo 4.4. nRF24L01 Alıcı Verici Entegresi Mod Seçimleri [29]

MOD	PWR_UP Kaydedicisi	PRIM_RX Kaydedicisi	CE Pini	FIFO Durumu
Alıcı Modu	LOJIK 1	LOJIK 1	LOJIK 1	-
Verici Modu-1	LOJIK 1	LOJIK 0	LOJIK 1	Veri TX FIFO'dadır. TX FIFO her düzeyde boşaltılır.
Verici Modu-2	LOJIK 1	LOJIK 0	Minimum 10uS Yükselen Kenar	Veri TX FIFO'dadır.
Bekleme Modu-1	LOJIK 1	LOJIK 0	LOJIK 1	TX FIFO Boş
Bekleme Modu-2	LOJIK 1	-	LOJIK 0	Devam eden paket gönderimi yok
Güç Kesme	LOJIK 0	-	-	-

nRF24L01 RF modülünün çalışma modlarının yapılandırılması aşağıdaki Tablo 4.4.'de açıklanmaktadır [29].

Verici Modu-1' de CE ucu lojik '1' yapılırsa TX FIFO boşaltılır ve onay paketi ile yeniden iletilenler atılır. İletim olduğu sürece TX FIFO doludur. CE ucu lojik '1' olduğunda TX FIFO boş ise nRF24L01 bekleme-II moduna girer. Bu modda bir iletim paketi için CSN ucu lojik '1' yapıldıktan sonra TX FIFO için bir paket yükleme en kısa sürede başlatılır[28, 29].

Verici Modu-2'de CE'yi en az 10µs için lojik '1' seviyesinde tutar. Bu bir veri paketi aktarılmasına olanak sağlar. Bu normal çalışma modudur. Paketin iletilmesinden sonra nRF24L01 bekleme -I moduna girer [28, 29].

nRF24L01 RF alıcı verici entegresi, çalışma sırasında önemli anahtarlama sürelerine sahiptir ve bu süreler yazılımda dikkate alınmalıdır. Zamanlama bilgisi modlar arasındaki geçişler ve CE ucunun zamanlaması ile ilgilidir[28, 29].

Aşağıdaki Tablo 4.5.'de nRF24L01 anahtarlama ve bekleme süreleri verilmektedir.

Tablo 4.5. nRF24L01 Mod Geçiş Süreleri [29]

Bekleme Adı	nRF24L01	Maksimum	Minimum	Açıklama
Tpd2stby	Güç kesme → Bekleme	15 mS		Dâhili kristal osilatör
Tpd2stby	Güç kesme → Bekleme	150 uS		Harici clock sinyali
Tstby2a	Bekleme → Verici/Alıcı	130 uS		
Thce	CE yükselen kenar olma süresi		10 uS	
Tpece2csn	CE → CSN		4 uS	

4.4. LPC1343 Kablosuz Sensör Düğümü Yazılım Mimarisi

Sensör düğümlerinin üç farklı mimaride olduğu ikinci bölümde bahsedilmiştir. Buna göre tez kapsamında tasarlanacak olan kablosuz sensör düğümü; verici sensör düğümü, alıcı-verici sensör düğümü ve alıcı sensör düğümü olmak üzere üç farklı kablosuz sensör düğümü ve bunların yazılım mimarisi ortaya çıkmış olacaktır.

Yazılım mimarisinde nRF24L01 RF alıcı verici çipi ile LPC1343 mikrodenetleyicisi, tezin “4.2. LPC1343 Kablosuz Sensör Düğümü Donanım Mimarisi” bölümünde de bahsedildiği gibi SPI üzerinden haberleşebilmektedir.

Tez çalışmasında nRF24L01 RF alıcı verici entegresi ile haberleşebilmesi için hazır stack yerine RF alıcı verici entegreye daha hâkim oluna bilineceği ve geliştiriciye esneklik kazandırabileceği düşünülerek stack yazılmıştır. Yazılan yazılım hakkında ilklendirme ve RF çıkış ayaları hakkında yazılımlar tezin “EKLER” kısmında yer almaktadır. Tasarlanan yazılım mimarisi, nRF24L01 RF alıcı verici entegresinin çıkış gücünün ayarlanması, RF kanal seçilebilmesi gibi tüm özellikleri kullanılabilir yapıda tasarlanmıştır.

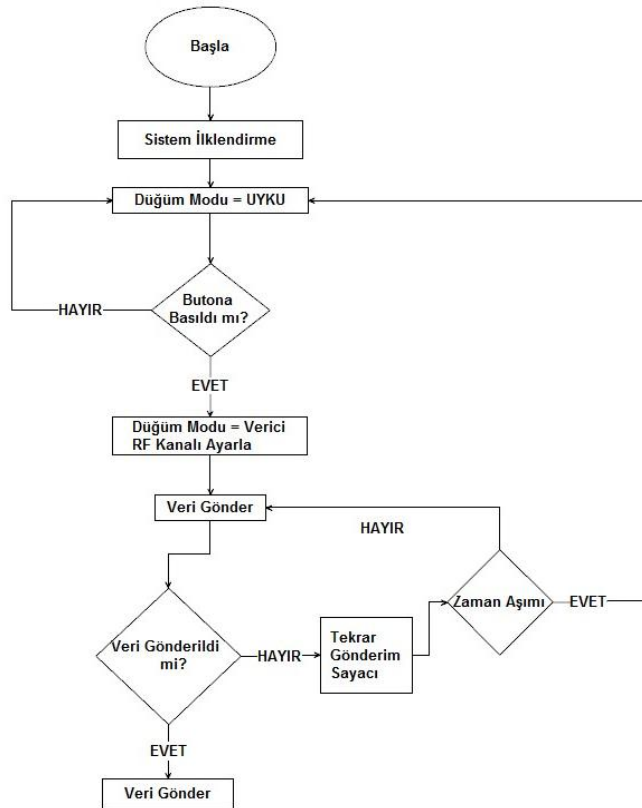
Yazılım mimarisinin sağladığı diğer bir avantaj da, her bir sensör düğümü farklı kanallarda haberleşerek, herhangi RF kanalda oluşabilecek haberleşme kopukluklarının, tüm kablosuz sensör ağa etkilememesi sağlanmıştır. 125 farklı kanalda haberleşmeye olanak sağlayan nRF24L01 alıcı verici entegresi sayesinde

çok uzak mesafelere datanın taşınması gibi uygulamalarda da rahatlıkla kullanılabilir yapıdadır.

Tez kapsamında teorik alt yapıyı uygulamalı örneklendirmek gerekirse, kablosuz sensör ağında kullanılacak olan üç farklı tipte düğüm ve bunların yazılım algoritmaları bulunmaktadır. Şekil 4.16. 'da verici düğüme ait olan algoritma görülmektedir.

Sistem boş durumda yani, herhangi veri gönderme isteği bulunmadığında uyku modunda kalacaktır. Bu durumda güç tüketimi uA'ler mertebesindedir. Örnek uygulama olarak verici kablosuz sensör düğümünde butona basıldığında, bir bit verinin düğümler arası hangi aşamalardan geçip başarı ile alıcı sensör düğümüne iletilmesi durumunu modelleyebiliriz.

Gerçek hayattaki uygulamada; butona basılma durumu, verici sensör düğümünün üzerinde bağlı olduğu sensörden güncel olarak okumuş olduğu değer bir önceki okuduğu değerden farklı olması durumunda veri göndermesini örnekleyebiliriz[6].



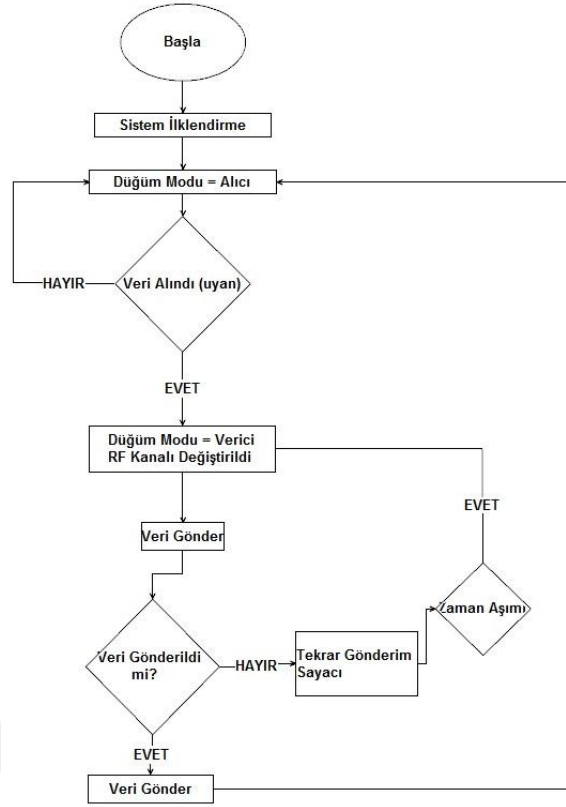
Şekil 4.16. Verici Düğümü Algoritması

Tek bir sensör düğümünün, her ne kadar yasal standartlar gereği radyo frekans sinyali olabildiğince kuvvetlendirilmiş olarak gönderilse de direkt olarak alıcı sensör düğümüne veri aktarması mümkün olmayabiliyor.

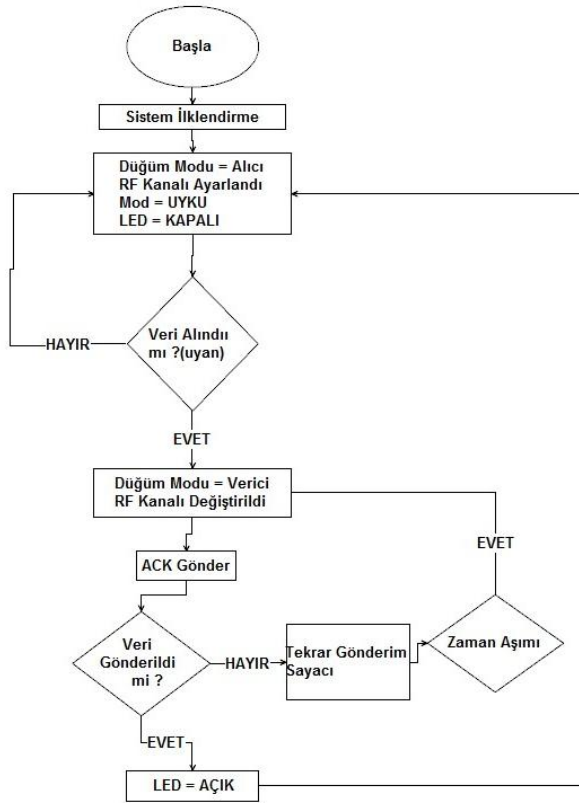
Bu gibi durumlarda kablosuz sensör ağlarda yönlendirici düğümler bulunmaktadır. Tez kapsamında tasarlanmış olan düğümde de benzer görevi üstlenen sensör düğümü bulunmaktadır. Alıcı verici sensör düğümü; daha önceden sensör ağın tasarımcısı tarafından belirlenmiş olan senaryoya göre, belirlenmiş olan verici sensör düğümüyle aynı frekansta haberleşip, almış olduğu veriyi kablosuz sensör ağdaki alıcı sensör düğümüne iletmekle görevlidir.

Alıcı-verici sensör düğümüne ait yazılım akış diyagramı Şekil 4.17. 'de görülmektedir. Bu haberleşme işlemlerinde minimum güç tüketmek için, verici sensör düğümü butona basılmadan önce uyku modunda beklemede, basıldıktan sonra verici düğüm olarak görevini sürdürmekte olup, alıcı verici düğümünde ise genel olarak düğüm alıcı olarak atanıp, veri gelene kadar uyku modunda beklemektedir[6].

Son olarak, kablosuz sensör ağlarda aldığı bilgiyi işlenip gerçek dünyaya açan sensör düğümü olan alıcı sensör düğümünün yazılım işleyişi Şekil 4.18.' de görülmektedir. Normal durumda sensör düğümü uyku modunda olup, gelecek olan RF verisi ile uyku modundan uyanıp aldığı veriyi işler.



Şekil 4.17. Tekrarlayıcı Sensör Düğümü Algoritması



Şekil 4.18. Alıcı Sensör Düğümü Algoritması

4.4.1. LPC1343 Kablosuz Sensör Dügümü Veri Paketi

Tablo 4.6. LPC1343 Sensör Dügümü Veri Paketi

Preamble	Mode	Channel	Data Rate	Address	Address Width	CRC Enable
----------	------	---------	-----------	---------	---------------	------------

LPC1343 Sensör düğümü sensörden aldığı bilgiyi radyo frekans ile gönderileceğinde nRF24L01 RF alıcı verici modülüyle SPI veri hattı üzerinden haberleşeceği konusunda “4.3.nRF24L01 Alıcı Verici Modülü” kısmında bilgiler verilmiştir. Bu haberleşmede veri gönderimi ve verinin alınmasında kullanılacak olan veri paketi Tablo 4.6.’da görülmektedir.

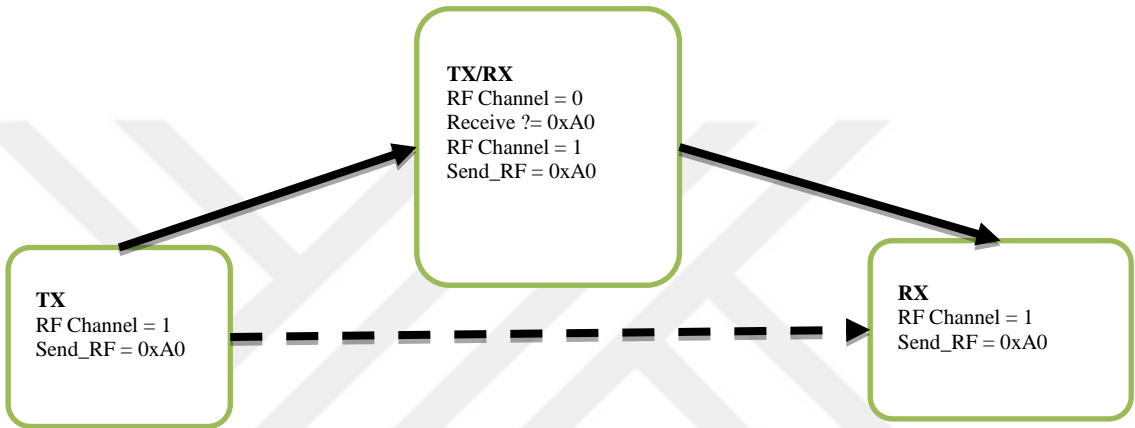
Veri paketindeki “Channel” bölgesinde(Channel Field) yapılacak olan seçim ile LPC1343 sensör düğümlerinin hangi frekansta veri taşıyabileceği belirlenmiştir. Taşınan verinin hangi hızlarda gönderilebileceği de geliştirici tarafından belirlenebilir olup “Data Rate” bölgesi(Data Rate Field) 250Kbps, 1Mbps ve 2Mbps hız seçeneklerinden uygulamaya göre uygun veri aktarım hızı seçilebilir. Veri aktarım hızı, geliştirici tarafından alıcı sensör düğümünün, hassas bir şekilde veriyi alabilmesi için gereklidir. Düşük hızdaki veri aktarımında daha hassas veri alış verişi olduğu “nRF24L01 Alıcı Verici Modülü” bölümünde nRF24L01 alıcı verici entegresinin teknik özelliklerinden bahsederken verilmiştir.

LPC1343 Sensör düğümü yazılım algoritması, “4.4.LPC1343 Kablosuz sensör Dügümü Yazılım Mimarisi” bölümündeki şekillerde yer alan akış diyagramlarında görülmüştür. Sensörün bağlı olduğu sensör düğümü “TX”, sensörden gelen dijital veriyi alacak olan sensör düğümü ise “RX” olarak adlandırılmıştır.

Sensörden gelen veriyi, alıcı sensör düğümüne gönderilme durumu her zaman mümkün olmayabilmektedir. Verici sensör düğümü, radyo frekans çıkış gücü, ortamdaki gürültü veya diğer elektronik cihazlardan çıkan RF sinyallerin oluşturduğu etkilerden dolayı göndermek istediği veriyi gönderemeyebilir. Bu gibi durumları gidermek için TX/RX sensör düğümü bulunmaktadır. Bu sensör düğümü Şekil 4.19’deki gibi TX sensör düğümün, RX sensör düğümüne göndermek istediği veriyi kanal değiştirerek göndermektedir. Bu sayede uzak mesafede veri aktarımına ve RF

kanal anahtarlama yaparak da verici sensör düğümünün havaya yaydığı RF sinyalin bulunduğu RF kanalında olası bir girişimlerde diğer sensör düğümleri etkilenmeden veri alış verişine devam edebilecektir.

Haberleşmenin sağlanamadığı RF kanalı için de TX/RX sensör düğümü RX sensör düğümüne uyarı verecek ve bu sayede kablosuz sensör ağ sisteminin tekrardan kararlı çalışabilmesi alıcı sensör düğümünde raporlama sistemi oluşturulabilecektir.

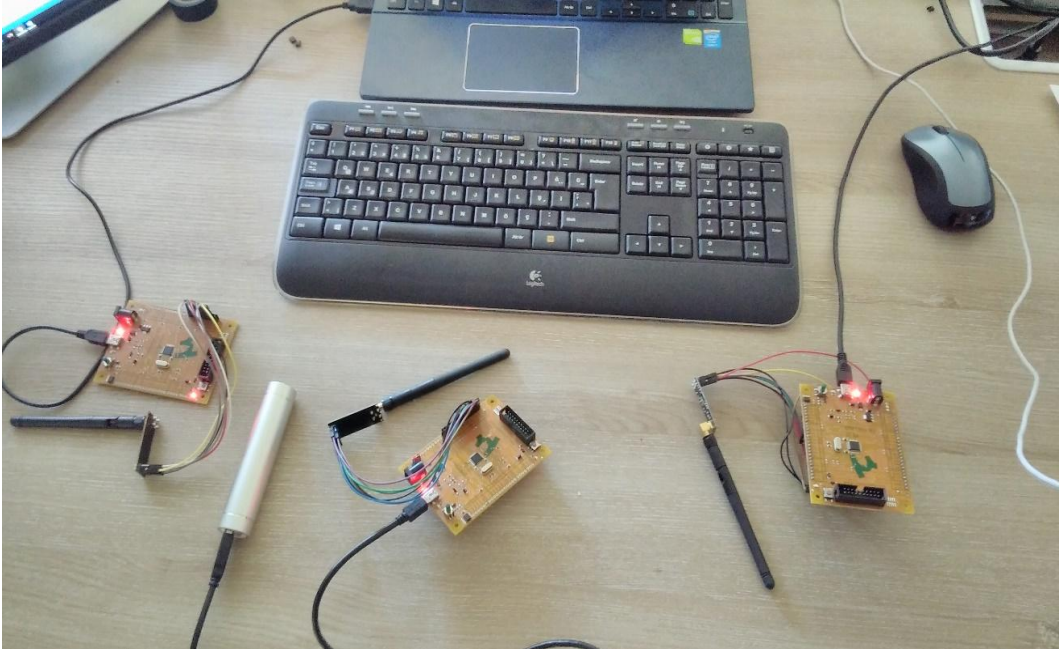


Şekil 4.19. LPC1343 Kablosuz Sensör Ağ Modeli

5. SONUÇLAR

Tez çalışmasında ana hedefim olan kablosuz sensör ağı düğümü tasarımı üç farklı rolü olan sensör düğümleri başarıyla tasarlanmıştır. Tipik uygulama olarak bir verici, bir tekrarlayıcı ve bir adet alıcıdan oluşan sensör düğümleri ile kablosuz sensör ağı Şekil 5.1.'de kurulu ve çalışır durumda görülmektedir. Kurulan test sistemi açık alanda yapılan testlerde maksimum RF çıkış gücünde, minimum veri aktarım hızı olan 250 Kbps olarak ayarlandığında, iletim veri iletim mesafesi 700mt üzerindedir.

LPC1343 Kablosuz sensör düğümlerinden “verici sensör düğümü” RF çıkış karakteristiği ve çıkış gücü spektrum analizörde test edilmiştir. Yapılan testte kullanılan sensör düğümü, verici sensör düğümüdür. Verici sensör düğümü bir butona basıldığında RF çıkışı maksimum seviyede olacak şekilde ve RF 0. kanaldan yani, 2.4GHz frekansında olacak şekilde ayarlanmıştır. Sensör düğümünün RF çıkış gücü, sensör düğümünün RF modülündeki SMA çıkış konektörünün düşük kayıplı 50 Ω ’ luk kabloya bağlanması ile spektrum analizör üzerinden ölçülmüştür.

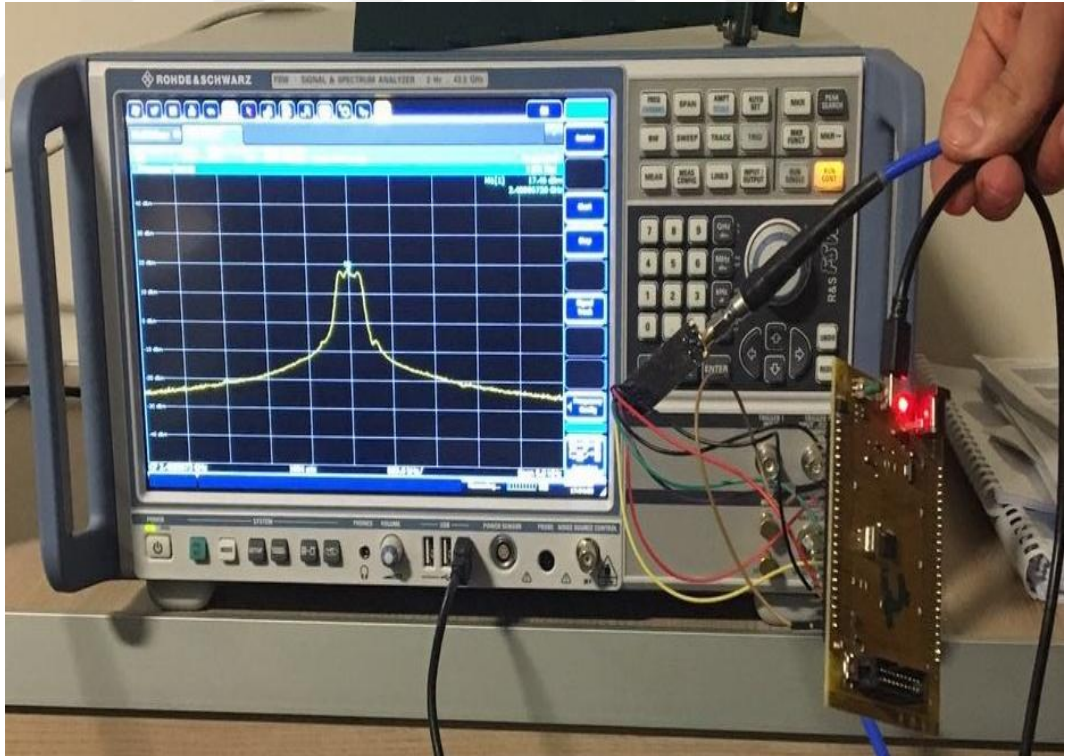


Şekil 5.1. LPC1343 Kablosuz Sensör Düğümleri ile Oluşturulmuş Sensör Ağ

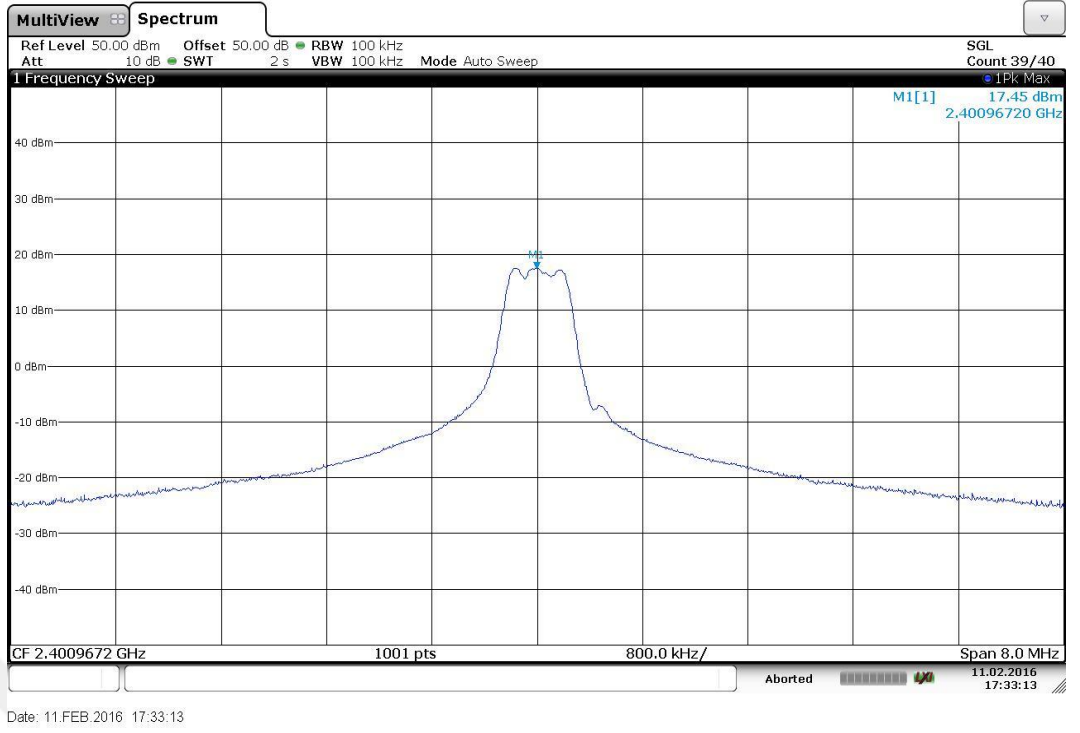
Test sonucu belirlenmiş olan 17.8 dBm yaklaşık 20 dBm çıkışı ve GFSK için Gaussian dalga formu spektrum analizörde doğrulanmıştır. Yapılan ölçümlere ait görüntüler Şekil 5.2.'de görülmektedir.

Ayrıca laboratuvar ortamında yapılan RF ölçümlerin sonucu olan ekran görüntüsü Şekil 5.3.'de görülmektedir. Burada RF kanalı seviyesi ve bant genişliğine dair bilgiler daha net olarak görülebilmektedir. Test ölçümleri kurulan kablosuz sensör ağ düğümlerinden verici düğüme ait sonuçlardır.

Tasarım boyunca kullanılan RF modül, MCU gibi devre elemanları “fiyat performans” dengesi ile seçilmiş ve buna göre tasarım yapılmıştır. LPC1343 kablosuz sensör düğümü; alıcı, verici ve tekrarlayıcı birimleri donanımsal olarak birbirlerinin neredeyse aynısıdır. Yapılan test sonuçları ve çalışma performansı göz önüne alınarak sensör düğümünün birim maliyeti olarak yaklaşık 17 dolardır.



Şekil 5.2. LPC1343 Verici Kablosuz Sensör Düğümü Ölçümü



Şekil 5.3. LPC1343 Verici Sensör Dügümü RF Çıkışı Spektrum Analizör Testi

6.TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında LPC1343 kablosuz sensör düğümü, daha ileriki aşamalarda uygulama ve ticari açıdan bakıldığında, farklı tiplerde sensör ağ modellerinde kullanılabilir yapıda tasarlanmıştır.

LPC1343 kablosuz sensör düğümü günümüzde asansör kabin içi panik butonu, hastanelerde hemşire çağrı butonu, bina otomasyonlarında engelli tuvaletlerinde el terminali olarak kullanılmaktadır. Bu tarz uygulamaların ortak noktası kapalı ortamlarda kablosuz haberleşme mesafesinin kısılmasından dolayı uzak menzilli veri aktarabilen RF cihazlara ihtiyaç duyulmasıdır. Bu tez kapsamında tasarlanan sensör düğümü bu olumsuzluklar göz önüne alınarak geliştirilmiştir. Sensör düğümünün çeşitli uygulamalarda kablosuz sensör ağ düğümü olarak kullanıma uygun hale getirilmek için RF gücü yükseltilmiş ve genel amaçlı kullanılabilen portlar eklenmiştir.

LPC1343 Kablosuz sensör düğümünün yazılım tasarımında veri aktarımı için kullanılan kanal anahtarlama yöntemi uygulamaya göre kullanımı fayda sağlayacaktır. Bu kapsamda tipik kablosuz sensör ağ uygulamalarında veri aktarımı için çeşitli yazılım algoritmaları geliştirilmiş ve kullanılmıştır.

Genellikle sensör düğümleri aynı haberleşme frekansı kanalını kullanmaktadırlar. Bu nedenle kullanılan kanalda oluşabilecek enterferelerde (girişim) tüm kablosuz sensörlerin haberleşmesi etkilenmektedir. Gelişmiş sensör düğümlerinde bu durumu engellemek adına haberleşmenin olduğu RF kanalın uygun olup olmaması kontrol edilerek veri aktarımı sağlanmaktadır. LPC1343 Kablosuz sensör düğümü RF haberleşme kanalının sınırlı sayıda olması sebebiyle kısıtlı sayıda kablosuz sensör düğümü kullanımına izin vermektedir. Bu olumsuzluğu gidermek için veri aktarım gücünü arttırıp yönlendirici sensör düğümünden daha az kullanılması sağlanmak istenmiştir.

Yüksek çıkış gücünün getirmiş olduğu avantajın yanında dezavantajı da vardır. RF kuvvetlendirme kısmında bir kablosuz sensör düğümü için yüksek düzeyde akım tüketilmektedir. Bu da pil ile çalışan sensör düğümleri için enerji sarfiyatına yol açmaktadır. Enerji tasarrufu için çeşitli yazılımsal iyileştirmeler yapılırsa da RF çıkışın sağlanması için 20mA ile 80mA arası akım tüketilmektedir.

LPC1343 Kablosuz sensör düğümünde, yakın gelecekte, enerji hasadı modülleri kullanılarak, tüketilecek olan enerjinin belli bir kısmının çevreden sağlanması ve bu sayede optimum tasarıma ulaşılması hedeflenmektedir. Bunun yanı sıra tasarlanan LPC1343 sensör düğümünde bulunan haberleşme portları dış dünyaya açılarak ve daha düşük güç tüketen bir mikrodenetleyici seçilerek daha performanslı sensör düğümleri tasarlanabilir.



EK-I LPC1343 ile nRF24L01 C KODU

```
// "nRF24L01.c" DENEME KODU
```

```
void NRF24L01_Init(char Device_Mode, char CH, char DataRate,
    char *Address, char Address_Width, char Size_Payload) {
    device_mode_init = Device_Mode;
    NRF24L01_CE_OUT;
    NRF24L01_Set_ShockBurst(_ShockBurst_OFF);
    NRF24L01_WriteReg(W_REGISTER | RF_SETUP, 0b00100111 | DataRate);
    NRF24L01_Set_Address_Width(Address_Width);
    NRF24L01_Set_RX_Pipe(0, Address, Address_Width, Size_Payload);
    NRF24L01_Set_CH(CH);
    NRF24L01_Set_TX_Address(Address, Address_Width);
    NRF24L01_WriteReg(W_REGISTER | CONFIG, 0b0001010 | Device_Mode);
}
```

```
// "main.c" DENEME KODU
```

```
void NRF24L01_Receive_RXTX(char Buf[_Buffer_Size]) {
    NRF24L01_CE_HIGH;
    Delay_us(200);
    while ( ((NRF24L01_Get_Status() & _RX_DR) != _RX_DR) &&
ReceiveTimeout>5){ReceiveTimeout--;}
    ReceiveTimeout = 5000;
    NRF24L01_CE_LOW;
    NRF24L01_Read_RX_Buf(Buf, _Buffer_Size);
    NRF24L01_Clear_Interrupts();
}
```

```
void NRF24L01_Send_RXTX(char Buf[_Buffer_Size]) {
    NRF24L01_Write_TX_Buf(Buf, _Buffer_Size);
    NRF24L01_RF_TX();
    Delay_us(50);
    while ( ((NRF24L01_Get_Status() & _TX_DS) != _TX_DS) &&
TransmitTimeout>5){TransmitTimeout--;}
    TransmitTimeout = 5000;
    NRF24L01_Clear_Interrupts();
}
```

```
void NRF24L01_Receive(char Buf[_Buffer_Size]) {
    NRF24L01_CE_HIGH;
    Delay_us(200);
    while ((NRF24L01_Get_Status() & _RX_DR) != _RX_DR);
    NRF24L01_CE_LOW;
    NRF24L01_Read_RX_Buf(Buf, _Buffer_Size);
    NRF24L01_Clear_Interrupts();
}
```

```
void NRF24L01_Send(char Buf[_Buffer_Size]) {
    NRF24L01_Write_TX_Buf(Buf, _Buffer_Size);
    NRF24L01_RF_TX();
    Delay_us(50);
    while ((NRF24L01_Get_Status() & _TX_DS) != _TX_DS);
    NRF24L01_Clear_Interrupts();
}
```

```
void Led_Blink(void) {
```

```

    LED_ON;
    Delay_us(50000);
    LED_OFF;
    Delay_us(50000);
}

#ifdef TX_NODE
int main(void) {
    char Buf[_Buffer_Size];
    char Address[_Address_Width] = { 0x11, 0x22, 0x33, 0x44, 0x55 };
    Buf [0] = 0x48;
    SSPInit();
    Delay_Init();
    LED_DIR_OUT;
    Led_Blink();
    NRF24L01_Init(_TX_MODE, 1, _1Mbps, Address, _Address_Width, _Buffer_Size);
    while (1) {
        LED_OFF;
        if(GPIOGetValue(2,1) == 0){
            NRF24L01_Send_RXTX(&Buf[0]);
            Delay_us(100000);
            LED_ON;
        }
    }
}
#endif

#ifdef RX_NODE
int main(void) {
    char Buf[_Buffer_Size];
    SSPInit();
    Delay_Init();
    LED_DIR_OUT;
    Led_Blink();
    char Address[_Address_Width] = { 0x11, 0x22, 0x33, 0x44, 0x55 };
    NRF24L01_Init(_RX_MODE, 2, _1Mbps, Address, _Address_Width, _Buffer_Size);
    strcpy(Buf, 0x00);
    while (1) {
        Buf[0] = 0x00;
        NRF24L01_Flush_RX();
        NRF24L01_Receive_RXTX(&Buf[0]);
        NRF24L01_Set_Power(_POWER_UP);
        if(Buf[0] == 0xAB)
            LED_ON;
        else
            LED_OFF;
    }
}
#endif

```

```

#ifdef RX_TX_NODE
int main(void) {
    char Buf[_Buffer_Size];
    char Buf2[_Buffer_Size];
    extern char device_mode_init;
    Buf2[0] = 0xAB;
    SSPInit();
    Delay_Init();
    LED_DIR_OUT;
    Led_Blink();
    char Address[_Address_Width] = { 0x11, 0x22, 0x33, 0x44, 0x55 };
    NRF24L01_Init(_RX_MODE, 1, _1Mbps, Address, _Address_Width, _Buffer_Size);
    Delay_us(250);
    while (1) {
        if(device_mode_init == _TX_MODE ){
            LED_ON;
            Delay_us(1000);
            NRF24L01_Send_RXTX(&Buf2[0]);
            Delay_us(50000);
            Led_Blink();
            NRF24L01_Init(_RX_MODE, 1, _1Mbps, Address, _Address_Width, _Buffer_Size);
            Delay_us(50000);
        }
        else if(device_mode_init == _RX_MODE ){
            LED_OFF;
            Delay_us(10000);
            NRF24L01_Receive_RXTX(Buf);
            if (Buf[0] == 0x48) {
                Led_Blink();
                Buf[0] = 0;
                Delay_us(50000);
                NRF24L01_Init(_TX_MODE, 2, _1Mbps, Address, _Address_Width,
                _Buffer_Size);
                Delay_us(50000);
            }
        }
    }
}
#endif

```

KAYNAKLAR

1. Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., Cayirci, E., “Wireless Sensor Networks-A Survey”, Elsevier Computer Networks, Vol. 38, 393-422, Mart 2002.
2. Mridula Maurya, Shri R. N. Shukla, “Current Wireless Sensor Nodes (Motes): Performance metrics and Constraints”, IJARECE, Volume 2, Issue 1, January 2013
3. Dipanjan Bhattacharjee, Akash Kumar, “Design and Development of Wireless Sensor Node”, IJCSE, Vol. 02, No. 07, 2010
4. Ken Masica, “Recommended Practices Guide For Securing Zigbee Wireless Networks in Process Control System Environments”, Lawrence Livermore National Laboratory, April 2007
5. Yingwei Yao and Georgios B. Giannakis,” Energy-Efficient Scheduling Protocols for Wireless Sensor Networks”, IEEE Trans. on Commun., 51(8):1389–1398, Aug. 2005
6. Christophe J. Merlin, Wendi B. Heinzelman, “Schedule Adaptation of Low-Power-Listening Protocols for Wireless Sensor Networks”, IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 9, no. 5, pp. 672-685, May 2010
7. J. Rabaey et al., “PicoRadio Supports Ad Hoc Ultra-Low Power Wireless Networking”, IEEE Computer, vol. 33, no. 7, pp. 42-48, July 2000
8. Jan M. Rabaey, Josie Ammer, Tufan Karalar, Suetfei Li, Brian Otis, Mike Sheets, Tim Tuan, “PicoRadios for Wireless Sensor Networks: The Next Challenge in Ultra-Low Power Design”, 2002 IEEE International Solid-State Circuits Conference
9. Li, M., Yang, B.,“A Survey on Topology Issues in Wireless Sensor Networks”, ICWN, Las Vegas, Nevada, USA, Haziran 2006.Rajasekaran.S , Kumaran.P , Premnath.G , Karthik.M, “Human Health Monitoring Using Wireless Sensors Network (WSN)”, IJARECE, Volume 2, Issue 12, December 2013
10. Karasulu, B., Toker L., Korukoğlu S., 2009, “ZigBee - IEEE 802.15.4 Standartı Temelli Kablosuz Algılayıcı Ağları” XIV. Türkiye'de İnternet Konferansı - Inet-tr'09, İstanbul
11. Tayşi, Z. C., ”Telsiz Algılayıcı Düğüm Tasarımı ve Gerçeklenmesi” Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 2006
12. Lee, B.H., Lai, R.L., Wu, H.K., Wong, C.M., 2010,”Study on Additional Carrier Sensing for IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks” Moleculer Diversity Preservation International, Switzerland
13. Chandra, P., Dobkin, D. M., Bensky, A., Olexa, R., Lide, D. A., Dowla, F., “Wireless Networking” Elsevier, USA, 2008
14. Wirz, M., 2007, “BTnode Application for Automated Link Measurements” Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Germany
15. Kazavsky, G. L., Cheng, N., Shaw, W., Gutierrez, D., Wong, S.,“Broadband Optical Access Networks” Wiley, Canada, 2011,
16. Sercan VANÇİNA, Ebubekir ERDEM, “Design and Simulation of Wireless Sensor Network Topologies Using the ZigBee Standard”, IJCNA, Volume 2, Issue 3, May – June (2015)

17. Buratti, C., Conti, A., Dardari, D., Verdone, R., 2009, "An Overview on Wireless Sensor Networks Technology and Evolution" Moleculer Diversity Preservation International, Switzerland
18. Bhattacharyya, D., Kim, T., Pal, S., 2010, "A Comparative Study of Wireless Sensor Networks and Their Routing Protocols" Moleculer Diversity Preservation International, Switzerland
19. Okdem, S., Karaboga, D., 2009, "Routing in Wireless Sensor Networks Using an Ant Colony Optimization (ACO) Router Chip" Moleculer Diversity Preservation International, Switzerland
20. X. Wang and S. Zhang, "Comparison of Several Sensor Deployments in Wireless Sensor Networks", International Conference on E-Health Networking, Digital Ecosystems and Technologies, Vol. 1, pp 236 – 239, 2010
21. Figueiredo, C. M. S., Nakamura, E. F., Loureiro A. A. F., 2009, "A Hybrid Adaptive Routing Algorithm for Event Driven Wireless Sensor Networks" Moleculer Diversity Preservation International, Switzerland
22. S. Kumagai and H. Higaki, Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS), 8th International Conference, Vol. 8, pp 1-8, 2014
23. A. Koubaa, A. Cunha, M. Alves, "A Time Division Beacon Scheduling Mechanism for IEEE 802.15.4/ZigBee Cluster-Tree Wireless Sensor Networks", in Euromicro Conference on Real-Time Systems (ECRTS 2007), Pisa (Italy), July 2007
24. W. B. Heinzelman, A. P. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "An application-specific protocol architecture for wireless micro sensor networks," IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 1, No. 4, pp. 660–670, 2002
25. Figueiredo, C. M. S., Nakamura, E. F., Loureiro A. A. F., 2009, "A Hybrid Adaptive Routing Algorithm for Event Driven Wireless Sensor Networks" Moleculer Diversity Preservation International, Switzerland
26. ISO/IEC IEEE-802-11, "Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications," IEEE standard for Information Technology, 1999.
27. Kamran Javed, "ZigBee suitability for Wireless Sensor Networks in Logistic Telemetry Applications", Technical report, IDE0612, January 2006
28. Peilin Zhang, "WIRELESS SENSOR SYSTEM FOR MONITORING AND CONTROL", Vaasa, March 20, 2014.
29. nRF24L01 Single Chip 2.4GHz Transceiver, Product Specification v2.0, July 2007
30. Microchip, "Microchip MiWi™ Wireless Networking Protocol Stack", AN1066, 2010
31. Jennic, Jennic's ZigBee e-learning Course, Şubat 2009
32. Microchip, "Microchip MiWi™ P2P Wireless Protocol", AN1204, 2010
33. NORDIC Semiconductor, "Introduction to wireless networks", White Papers, September 2004
34. Johanson Technology, Impedance Matched Balun Filter Integrated Passive for Nordic's nRF24L01 and nRF24L01+ Chipsets, November 2009
35. https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_wireless_sensor_nodes
36. Cypress, "FM24CL64B 64-Kbit (8 K × 8) Serial (I2C) F-RAM" Technical Datasheet, August 6, 2015
37. Harsha Medu, Cypress, "Comparison of Cypress F-RAM and EEPROM", White Paper, October 2014

38. Sham P Nayse, Mohammad Atique , Anita Agrawal, “Power Aware Wireless Sensor Node Design Using PSoC”, IJRSET, Vol. 2, Issue 4, April 2013
39. Michael Winkler, Klaus-Dieter Tuchs, Kester Hughes, and Graeme Barclay, “Theoretical and practical aspects of military wireless sensor networks”, Journal of Telecommunications and Information Technology, vol 2, 2008
40. Phoebus Wei-Chih Chen, “Wireless Sensor Network Metrics for Real-Time Systems”,UCB/EECS-2009-75, May 20, 2009
41. Merret, D. G., Tan, D. Y., "*Wireless Sensor Networks: Application-Centric Design*", India: InTech, ISBN 978-953-307-321-7, 2010
42. Ozan ARSLAN, “ZIGBEE ile Bina İçi Güvenlik Otomasyon Sistemi”, Mayıs 2009
43. Doç.Dr. Cüneyt BAYILMIŞ, Kablosuz Ağ Teknolojileri ve Uygulamaları, BSM453,
44. N. Azmi, L.M. Kamarudin, M. Mahmuddin, A. Zakaria, A.Y.M. Shakaff, S. Khatun, K. Kamarudin, M.N. Morshed, “Interference Issues and Mitigation Method in WSN 2.4GHz ISM Band: A Survey” International Conference on Electronic Design(ICED), August, 19-21, 2014, Penang, Malaysia

ÖZGEÇMİŞ

Hakan Sefa UZUN, 1 Kasım 1990 yılında İstanbul, Üsküdar 'da doğdu. İlk ve ortaokulu Yılmaz Soyak İlköğretim okulunda tamamladıktan sonra lise eğitimini Göztepe İhsankurşunoğlu lisesi Fen Bölümünde tamamladı. 2007 yılında liseden mezun olduktan sonra T.C. Maltepe Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliğinde lisans öğrenimine başladı. Lisans yıllarının son senesinde özel sektörde genellikle araştırma geliştirme ve tasarım mühendisi olarak çalışmaya başlamıştır. Lisans eğitimini 2011-2012 döneminde tamamlamıştır.

2013 yılında lisans eğitimini aldığı üniversitede Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde tezli yüksek lisans eğitimine başladı. Yüksek lisans tez konusunu, akademik danışmanının da uygun görmesi üzerine daha önceden de projeler geliştirmiş olduğu kablosuz haberleşme ve sensörler ile alakalı olan kablosuz sensör ağ düğüm modülü tasarlanması olarak kararlaştırılmıştır.

2015 Yılına kadar; öğrenim hayatında ve sektörde yaklaşık 5 yıllık edinmiş olduğu, tecrübe ve bilgi birikimi ile Bilim Sanayi Teknoloji Bakanlığına sunmuş olduğu özel bir proje ile destek kazanmış bu sayede MEGORAS Teknoloji AR. GE. SAN. LTD. ŞTİ. firmasını kurmuştur. 2016 Nisan ayında, BCS Teknoloji(Hitachi Kokusai Electric Turkey) firmasından, araştırma geliştirmeye mühendisi görevinden ayrılmış, bakanlık destekli kurulan firmasıyla iş hayatına devam etmektedir.