KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

UZUN YAKIT DAĞITIM BORULARINA UYGULANAN DARBESEL ETKİ YERİNİN KABLOSUZ SENSÖRLER VE LORA RADYOSU KULLANARAK BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik-Elektronik Müh. Selim SAĞIR

ŞUBAT 2021
TRABZON

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

UZUN YAKIT DAĞITIM BORULARINA UYGULANAN DARBESEL ETKİ YERİNİN KABLOSUZ SENSÖRLER VE LORA RADYOSU KULLANARAK BELİRLENMESİ

Selim SAĞIR

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"ELEKTRONİK YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 04/01/2021
Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı : Prof. Dr. İsmail KAYA

Trabzon 2021

ÖNSÖZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında hazırlanan "*Uzun Yakıt Dağıtım Borularına Uygulanan Darbesel Etki Yerinin Kablosuz Sensörler ve Lora Radyosu Kullanarak Belirlenmesi"* konulu tezin ortaya çıkış sürecinde birçok kişinin önemli katkıları olmuştur. Öncelikle bilgi ve tecrübesini benimle paylaşan ve çok değerli zamanını benden esirgemeyen tez danışmanım Prof. Dr. İsmail KAYA'ya teşekkürü borç bilirim. Ayrıca değerli katkı ve eleştirileri için jüri üyelerine; bilgi ve donanımı ile ihtiyaç duyduğum her anımda tezime katkı sağlayan Sefa ÜNAL ve Cem ŞİŞMAN'a çok teşekkür ederim. Elbette her zaman olduğu gibi, tez süresince de maddi ve manevi olarak yanımda olan tüm aileme ve nişanlıma şükranlarımı sunuyorum.

Selim SAĞIR
Trabzon 2021

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum "*Uzun Yakıt Dağıtım Borularına Uygulanan Darbesel Etki Yerinin Kablosuz Sensörler ve Lora Radyosu Kullanarak Belirlenmesi*" başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. İsmail Kaya' nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 17.02.2021

Selim SAĞIR

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ III

TEZ ETİK BEYANNAMESİ IV

İÇİNDEKİLER V

ÖZET VIII

SUMMARY IX

ŞEKİLLER DİZİNİ X

TABLOLAR DİZİNİ XI

SEMBOLLER DİZİNİ XII

1. GENEL BİLGİLER 1

1.1. Giriş 1

1.2. Literatür Araştırması 3

1.3. LoRa Kablosuz Haberleşmesi 6

1.3.1. LoRa 6

1.3.1. RSSI ve LoRa İlişkisi 8

1.3.1. LoRa ve SNR İlişkisi 9

1.3.1. Alıcı Hassasiyeti 10

1.3.1. SNR ve Yayılım Faktörü 11

1.3.1. Bant Genişliği ve Chirp Oranı 12

1.3.1. Uyarlanabilir Data Oranı 13

1.4. LoRaWAN 14

1.4.1. LoRaWAN Sınıfları 15

1.5. LoRa Kablosuz Haberleşmesi Karşılaştırılması 15

1.6. Zaman Farkları Yöntemi ile Konumlandırma 17
1.7. Piezoelektrik Sensör 17
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR 19
2.1. LoRa Sınırlarının Testi 19
2.1. Ölçüm Senaryosu 19
2.1. Yükselteç 25
2.3.1. Yükselteç Tasarımı 25
2.3.1. Tasarlanan Yükseltecin Simülasyonu 26
2.1. Sensörler Arası Zaman Senkronizasyonu 28
2.5. Paket İletim Süresinin Hesaplanması ve Uygulanması 30
2.1. Katı Cisimler Üzerinde Ses Kaynağı Etkisinin Simülasyonu 31
2.1. Yükselteç Devresinin Kazanç İncelenmesi 33
2.5. Yükselteç Devresinin Piezoelektrik Sensör Çıkışına Etkisi 36
2.1. Kablosuz İletişimin Sağlanması 37
2.10. Yazılım 38
2.10.1. Geliştirme Platformu 39
2.10.1. Donanımsal Soyutlama Katmanı 39
2.10.1. Paket Yapısının Oluşturulması 40
2.10.1. Alınan Paketin Okunup Ayrıştırılması 42
2.10.1. Alınan Paketlerin Bilgisayar Arayüzü ile Görüntülenmesi 44
3. BULGULAR 47
3.1. RSSI Sonuçları 47
3.1. SNR Sonuçları 48
3.1. Sistem Ölçüm Sonuçları 48
4. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER 52

5. KAYNAKLAR 53
6. EKLER 57
ÖZGEÇMİŞ

Master Tezi

ÖZET

UZUN YAKIT DAĞITIM BORULARINA UYGULANAN DARBESEL ETKİ YERİNİN KABLOSUZ SENSORLER VE LORA RADYOSU KULLANARAK BELİRLENMESİ

Selim SAĞIR

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. İsmail KAYA
2021, 56 Sayfa, 5 Ek Sayfa

Bu tez çalışmasında katı cisimler üzerinde oluşan bir sesin kaynağının yerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Öyle ki; uzak mesafelere ulaşan su veya yakıt borusu gibi cisimlerin üzerinde ani darbe ile oluşan sesin konumunu bu cisimlere belirli aralıklarla yerleştirilmiş algılayıcılar kullanılarak algılamak hedeflenmiştir. Aynı zamanda algılayıcılar arasındaki haberleşme ve verilerin işlendiği işleme merkezi ile yapılacak haberleşme için birbirine ayrık olarak senkronlanmış LoRa radyoları kullanılmaktadır. Çalışmanın önemli bir kısmını katı cisimlerde ses kaynağının konumlandırması oluştururken kayda değer diğer bir kısmını da LoRA radyolarının senkronlanması ve alınan işaretlerin birlikte değerlendirmesi için yapılan çalışmalar almıştır. Bu haliyle çalışma ayrık zamanda çalışan algılayıcılar kullanılarak yapılan işaret kaynağı konumlandırması konusunda olmaktadır.

Esasen algılayıcılar arasındaki mesafeler arttığında, konumlandırma doğruluğu da artmaktadır. Mesafenin uzaması yankıların, gürültü ve gürültü gibi parazitlerin etkilerini de artırmaktadır. Buna rağmen, kablosuz radyo haberleşme verileri yoluyla konumlandırma, algoritmalarının konumlandırma yeteneğini genişlemiş ve doğrulukları oldukça güvenilir bir seviyeye gelmiştir. Dolayısıyla önerilen yöntemler ve yapılan çalışmalar, bir makinedeki bir çatlağın veya bir atölye alanındaki sorunlu yerin konumlandırılması gibi konumlandırma uygulamalarının kullanım alanlarının da genişletilmesini vaat etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Lora, Konumlandırma, Gerçek Zamanlı Saat, Kablosuz Haberleşme

Master Thesis

SUMMARY

DETERMINATION OF THE IMPACT DISTANCE APPLIED ON LONG FUEL DISTRIBUTION PIPES USING WIRELESS SENSORS AND LORA RADIO

Selim SAĞIR

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Electrical and Electronic Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. İsmail KAYA
2021, 56 Pages, 5 Appendix Pages

This thesis is aimed to determine the source of a sound occurred on solid objects. Such that; It is aimed to detect the position of the sound caused by sudden impact on objects such as water or fuel pipes reaching long distances by using sensors placed at certain intervals on these objects. At the same time, separately synchronized LoRa radios are used for communication between the sensors and the processing center where the data is processed. While a significant part of the work is the positioning of the sound source in solid objects, another noteworthy part has been the work done for the synchronization of LoRa radios and the evaluation of the received signals together. Therefore, the study is about the signal source positioning made by using the sensors working in discrete time.

In fact, as the distances between the sensors increase, the positioning accuracy also increases although the longer the distance, the greater the effects of echoes, noise and interference. However, positioning via wireless radio communication data has expanded the positioning ability of its algorithms, and their accuracy has reached a highly reliable level. Therefore, the proposed methods and studies promise to expand the usage areas of positioning applications such as locating a crack in a machine or a problem place in a workshop area.

Key Words: LoRa, Localization, RTC, Wireless Communication, Piezoelectric

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1. İki sinyal arası zaman farkı 2
Şekil 1.2. CSS modülasyonu 7
Şekil 1.3 SNR görselleştirilmesi 10
Şekil 1.4. LoRa bant genişliği ve frekans ilişkisi 13
Şekil 1.5. LoRaWAN teknoloji yapısı 14
Şekil 1.6. Piezoelektrik sensör modeli 17
Şekil 1.7. Uygulamada kullanılan piezoelektrik sensör 18
Şekil 2.1. Test noktaları 20
Şekil 2.2. İletişim noktaları arası yükselti profili 22
Şekil 2.3. Bir ekrana ve GPS modülüne bağlı B-L072Z-LRWAN1 kiti 24
Şekil 2.4. KiCad ile tasarlanan OPA2237 ile tasarlanan yükselteç devresi 25
Şekil 2.5. Yapılan yükseltecin 3-boyutlu görüntüsü ve gerçeklenmiş hali 26
Şekil 2.6. Ltspice üzerinde devrenin çizilmesi 27
Şekil 2.7. Simülasyon sonucunda giriş ve çıkış sinyalleri 28
Şekil 2.8. İki sensör arası zamansal senkronizasyonun temsili 29
Şekil 2.9. Simüle edilen metalin temsili 31
Şekil 2.10. Metal üzerinde iki farklı noktada ölçülen sinyaller 32
Şekil 2.12. Yükselteç çıkışı sinyalin osiloskop ile görüntülenmesi 34
Şekil 2.15. Çalışma sistemi temsili görüntüsü 38
Şekil 2.16. I-CUBE-LRWAN yazılımsal katmanların temsili 40
Şekil 2.17. Alıcı tarafta ayrıştırılması kolay paket yapısı 41
Şekil 2.19 Paket yapıları 43
Şekil 2.20. Değişkenler arası güvenlik boşlukları kaldırmak için uygulanan öznitelilik 44
Şekil 2.21. Mikroişlemciden alınan verilerin bilgisayarda görüntülenmesi 44
Şekil 2.22. ADC verisinin grafik olarak gerçek zamanlı çizilmesi 45
Şekil 2.23. Gerçek zamanlı zaman-sensör grafiği çizen program 46
Şekil 3.2. Sensör-2 ile okunan sinyalin RTC ile oluşturulan zamana göre çizimi 50
Şekil 3.3. Sensör-1'den gelen verilerin RTC ile oluşturulan zamana göre çizimi 50

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.1. LoRa modülasyonu farklı yayılım faktörüne göre RSSI değerleri 9
Tablo 1.2 Farklı yayılım faktörlerine göre SNR değerleri 12
Tablo 1.3. Farklı bant genişliklerine göre iletim süresi ve hassasiyet değişimi 13
Tablo 1.4. LoRa ve diğer kablosuz haberleşme teknolojilerinin karşılaştırılması 16
Tablo 2.1. Noktalar arası uzaklık 21
Tablo 2.2. İletişim konfigürasyonu 23
Tablo 2.3. Ölçümlenen frekan ve gerilim değerlerinin yanı sıra kazançlar 35
Tablo 3.1. RSSI test sonuçları(dBm) 47
Tablo 3.2. SNR test sonuçları 48

SEMBOLLER DİZİNİ

Lora	Long Rage
LoRaWAN	LoRa Range Geniş Alan Ağı
ADC	Analog Dijital Dönüştürücü
Rtc	Gerçek Zamanlı Saat
Ppm	Parts Per Million
ms	Mili Saniye
µs	Mikro Saniye
MHz	Mega Hertz
ISM	Endüstriye, Bilimsel ve Medikal
ADR	Adaptif Data Oranı
SF	Yayılım Faktörü
CSS	Chirp Yayılımlı Spektrum
BER	Bit Hata Oranı
PER	Paket Hata Oranı
PHY	Fiziksel Katman
STM	ST Microelectronics
LOS	Direk Görüş
CR	Kodlama Oranı
HAL	Soyut Donanım Katmanı
RTOS	Gerçek Zamanlı İşletim Sistemi
CMSIS	The Cortex Microcontroller Software Interface Standard
I2C	Inter-Integrated Circuit
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
PAL	Soyut Pin Katmanı
SPI	Serial Peripheral Interface
Opamp	Operasyonel Yükselteç

dB	Desibel
DSSS	Direkt Yayılımlı Frekans Spektrumu
BPSK	İkili Faz Kaydırmalı Anahtarlama
QPSK	Dörtlü Faz Kaydırmalı Anahtarlama
OFDM	Ortogonal Frekans Bölmeli Çoklama
QAM	Karesel Genlik Modülasyonu
GPS	Küresel Konumlama Sistemi
BW	Bant Genişliği
SNR	Sinyal Gürültü Oranı
RSSI	Alınan Sinyal Güç Göstergesi
MAC	Ortam Erişim Kontrolü

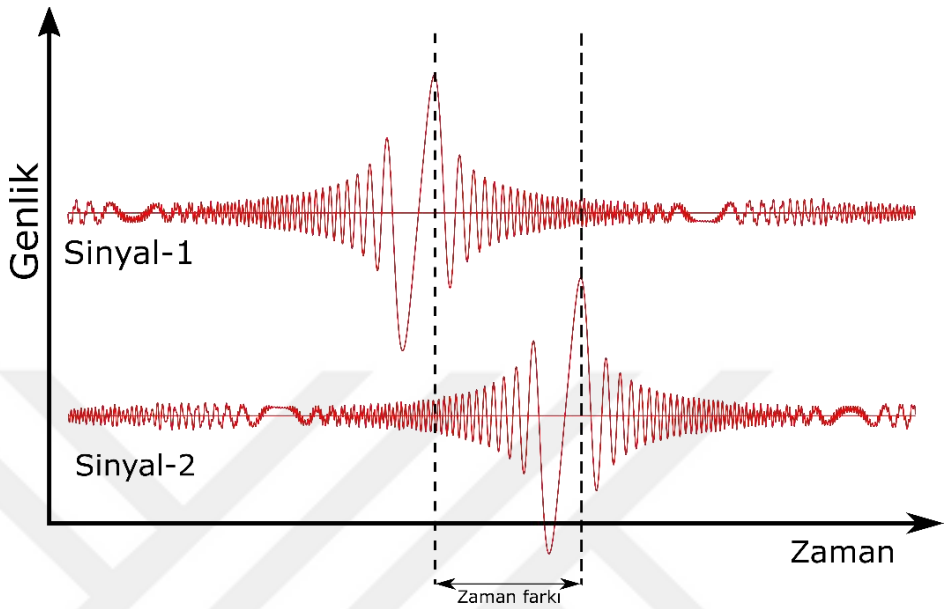
1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Günümüzde kablosuz teknolojilerin gelişimi hızla artarken, bunun yanı sıra kullanım miktarı da buna paralel olarak hız kazanmaktadır. Geçmişte birkaç teknoloji ile sınırlı olan kablosuz veri iletimi için, günümüzde artık her görev için farklı teknolojiler geliştirilmektedir. Bazı amaçlar için yüksek veri oranlarında iletim yapabilen teknolojilere ihtiyaç duyulurken diğerlerinde öne çıkan özellik iletişim mesafesi olabiliyor. Bu çalışma boyunca da iletişim mesafesinin yüksek olduğu, fakat veri iletim oranının muadillerine göre daha düşük olan bir kablosuz teknoloji olan LoRa kullanılmıştır.

Katı cisimler üzerinde ses kaynağının belirlenmesi, zorlu bir görevdir. Farklı değişkenlerden doğan küçük sapmalar dahi, kestirimi oldukça etkilemektedir. Tahmin için en az iki farklı noktadan zaman bilgisi alınmaktadır. Bu iki farklı nokta arasında olan ses kaynağının yeri, zaman farklarından yararlanılarak tahmin edilebilmektedir. Metal üzerinde oluşan titreşimler, iki noktada yer alan sensörlerde sinyaller oluşturur.

Senkron olarak çalışabilen iki sistem yapılarak, alınan sinyallerin zaman farklarının hesaplanması amaçlanmaktadır. İki farklı ve uzak noktadaki sistemlerin senkron olarak çalışabilmesi çalışmada en zorlu görevi oluşturmaktadır. İki farklı noktadaki işlemcilerin saatlerinin senkron çalışması kısa bir süre sürmektedir. Kablolu olarak sağlanan senkron sistemler yapılabilir. Fakat, uzun mesafeler göz önünde bulundurulduğunda, bu çözüm yüksek maliyeti de beraberinde getirmektedir. Bu sebeple, bu çalışmada maliyet bakımından çok daha düşük, kapalı sistem olarak çalışabilen, uzun süreli pil ömrüne sahip olabilen ve modüler olarak kullanılabilen bir çözüm üzerinde durulmuştur.



Şekil 1.1. İki sinyal arası zaman farkı

Üzerinde ses kaynağı tespiti yapılacak katı cisim çalışmada çelik bir boru olarak kabul edilmiştir ve çalışmalar buna uygun şekilde yapılmıştır. Bu işlem sırasında, ölçüm yapılan sensörlerin zaman değerlerinin eş olarak ilerlemesi kritik bir önem taşımaktadır. Sensörler arasındaki zaman referansı, sensörlere bağlı mikroişlemcilerin saatinden faydalanılarak oluşturulabilir. Mikroişlemciler bu işlem için RTC sunmaktadır. Fakat uzun süreler göz önünde bulundurulduğunda iki işlemci üzerinde çalışan bu saat şaşmaktadır. Bunun yanı sıra sıcaklık saatler arasındaki şaşmayı etkileyen çok önemli bir faktördür. RTC'nin sürülmesini sağlayan kristali keskin doğrulukla çalıştırmak için iki farklı kristalin aynı sıcaklıkta tutulması gerekmektedir. Bu gereklilik, farklı ortamlarda maliyete ve işlem karışıklığına sebep olmaktadır. Eş sıcaklıklar sağlansa dahi kristallerin senkron çalışması uzun sürmeyecektir. Bundan dolayıdır ki, çalışmaya kablosuz bir teknoloji katılarak hem veri iletimi sağlanması hem de düzenli şekilde cihazlar arasındaki zamanın senkron edilebilmesi amaçlanmıştır. Bu şekilde zamanda şaşmalar azaltılabilir ve daha doğru kestirimler yapılabilir.

1.1. Literatür Araştırması

Literatür araştırıldığında su veya gaz boruları üzerindeki kaçakların tespiti için farklı çalışmalar olduğu görülmektedir. Bu araştırmalarda, benzer şekilde birkaç sensör yardımı ile gerçekleştirilmektedir. Hasar gören yer tespiti için, basınç sensörleri veya ivme sensörleri kullanılmaktadır. Boru içerisindeki sıvı akışındaki basınç farkından yararlanılarak tespit çalışmalarıda bulunmaktadır. Bizim çalışmamız daha genel kapsamda düşünülmektedir. Herhangi uzun bir metal yüzeydeki hasarın anlık olarak tespit edilmesi amaçlandığından, metal borulardaki kaçağa sebep olan hasarlı bölgenin tespiti de, çalışmamız kapsamına girebilir.

Jiang ChunLei ve Jiang ChunLei tarafından yapılan makalede gaz borularındaki kaçağın tespiti ile ilgili öneriler verilmiş ve simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Makale incelendiğinde, akustik tespiti için piezoelektrik sensörler kullanıldığı görülmektedir. Ayrıca makalede gaz borularındaki kaçak tespitinin simülasyonu için prototip oluşturulmuştur ve üzerinde incelemeler yapılmıştır. Verilen grafiklerde, boru içerisinde normal akış ile hasar sonucu olan akış arasındaki akustik sensör ile fark açık şekilde görülmektedir [1].

Yapılan diğer bir makalede, mikrofon ve mikroişlemci yardımıyla ses kaynağı tespiti üzerine gerçekleştirilen çalışmalar belirtilmiştir [2]. Mikrofon yardımı ile dinlenen PVC ve metal boruların iki farklı durumu incelenmekte. Bu durumlardan bir tanesi, normal akış diğeri ise kaçak durumunu göstermektedir. Bu farklı olaylarda farklı frekansta grafikler sunarak bu iddiasını görselleştirmiştir. Grafikler, mikrofonla tespit edilen bilginin bir ADC ile dönüştürülmesi sonucu elde edilen frekans bilgisini içermektedir. Yani frekans farklarından faydalanılarak boru üzerinde hasar olup olmadığının tespiti amaçlanmaktadır. Toplam bir sistem oluşturan yazarın cihazı 3G ile haberleşme yeteneğine sahiptir. Bu şekilde GPS bilgisini uzak bir noktaya ulaştırmaktadır. GPS bilgisinin yanı sıra, günlük olarak toplanan bilgiler kullanıcıya sunulabilmektedir. Bu tez boyunca da benzer şekilde kablosuz bir teknolojiden faydalanılacaktır.

2017 yılında yayınlanan diğer bir makale, iki sensör arasındaki basınç farkından yararlanarak hasarlı bölge tespitini incelemektedir [3]. Zaman farkından kaynak tespiti yapılan çalışmada benzerlik göstermektedir. Deneysel olarak gözlem yapılırken, boru üzerine ikiden

fazla sensör yerleştirilmiştir. Sensörlerin ölçüm yapması için ise birden fazla delik açılmıştır. Fiziksel olarak yapılan testlerin sonuçları da grafikler yardımı gösterilmiştir. Zaman farkından yararlanılarak oluşturulan formüle göre alınan sonuçlarda, sensörlerin uzaklığının doğrulukla olan ilişkisi de gösterilmiştir.

Yazılan tezde kullanılan LoRa kablosuz iletişimi ile yapılan deneysel ve teorik çalışmalar vardır. Düşük güçlü LoRa üzerine çalışılan makalede teorik olarak bazı değerlendirmeler yapılmıştır [4]. Öyle ki, bu makalede bant genişliğine, yayılım faktörüne veya paket büyüklüğüne göre iletişim sınırları hesaplanmıştır. Diğer kablosuz teknolojiler ile karşılaştırma yapılarak LoRa'nın uzun mesafelere iletişim sunması öne çıkarılırken diğer yandan paket büyüklüğünün önemi olan uygulamalarda bu teknolojinin sınırlara takıldığı belirtilmiştir. LoRa ile iletilen bir paketin iletim süresi, yani time-on-air süresi, bant genişliğine ve yayılım faktörüne göre artmakta ya da azalmaktadır. Bu değer, gerçek zamanlı uygulamalarda fazlasıyla önem taşırken, bilginin bir yerde saklandığı ve işlendiği zamanın kritik bir öneme sahip olmadığı uygulamalarda önem taşımamaktadır. Bu makalede, verilen sonuçlar kısmında bant genişliğinin, paketim iletim süresini nasıl etkilediği grafik olarak sunulmuştur. Kodlama oranı ve yayılım faktörü sabit tutulurken, değişen bant genişliği ve paket büyüklüğünün, iletişimin tamamlanma süresini nasıl etkilediği görselleştirilmiştir. Paket iletim süresini etkileyen diğer değişkenler olan kodlama oranı ve yayılım faktörü de çalışmaya konu olmuştur. Çıkan sonuçlar grafikler halinde görselleştirilmiştir. Bunlara göre yayılım faktörü arttıkça paketin havada kalma süresi artmaktadır. Aynı şekilde kodlama oranının yukarı doğru değişimi iletim zamanını olumsuz şekilde etkilemektedir. Üç grafiğin ortak noktası ise, paket boyutunun artması iletim süresini arttırmaktadır.

LoRa ile ilgili pratik çalışmaların sonucunu sunan bir makale, verilen teorik sınırlar ile gerçek koşullar altındakileri karşılaştırmaktadır [5]. Yapılan uygulamada Karadeniz Teknik Üniversitesi ve çevresi çalışma alanı olarak seçilmiştir. Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'ne sabit olacak şekilde bir kit yerleştirilmiştir. Diğer bir kit ise gezgin olarak kabul edilmiştir ve 6 farklı noktadan sabit kit ile iletişim kurulmuştur. Gönderilen ve alınan paketler ile sinyal hata oranı ölçülmüştür. Bunun yanı sıra sinyal gücü de çalışma sırasında incelenmiştir. Makalede çevrenin fazlasıyla ağaçlı ve engebeli olduğunun göz önünde bulundurulması önemle belirtilmiştir. Bu zorlu şartlarda LoRa'nın nasıl sonuçlar vereceği incelenmiştir. Çünkü gerçek

şartlara uygun olduğu gözükmektedir. En yakını 651 metre en uzağı 2200 metre olacak şekilde farklı uzaklıklarda ölçümler yapılmıştır. Bu ölçümler yapılırken yayılım faktörü de 7 ile 12 arasında değiştirilmiştir. Teorik olarak yüksek yayılım faktörünün uzak mesafelere daha kolay iletişim kurmak olduğu bilinmektedir. Bu durumu inceleyen makale, sinyal gücünü referans alarak oluşturduğu tablolarda, bu durumu pratik çalışmada da kanıtlamıştır. Ayrıca yayılım faktörünün 7 olup iletişim kurulamayan noktalara yayılım faktörünü 12 yaparak iletişim sağlanmıştır. Çalışmanın sonucunda LoRa'nın uzun mesafeli fakat düşük paket gönderilecek ve alınacak uygulamalar için uygun bir iletişim teknolojisi olduğundan bahsedilmektedir.

Çalışmalar sırasında farklı mikrokontrolcüler arasında zaman farkının minimum seviyede olması en zorlayıcı görevi oluşturmaktadır. Mikroişlemciler içerisindeki kristaller yardımı ile zamansal değerler oluşturulabilir. Fakat osilatörlerin zamanla şaşması sebebi ile farklı noktalarda olan mikroişlemciler arasında zamansal farklar oluşmaktadır. Mikroişlemciler içerisinde bulunan RTC birimi ile zaman üretimi yapılmaktadır. Fakat RTC zaman geçtikçe şaşmaktadır ve doğruluğunu kaybetmektedir [6]. Ayrıca kristalin bulunduğu ortamın sıcaklığı da zamansal şaşmaya etki eder. Zamansal olarak şaşmanın engellenmesi için kristalin bulunduğu ortam sıcaklığı sabit tutulmalıdır. Bununla ilgili çalışmalarda açık olarak görüldüğü üzere sıcaklığın değişimi arttıkça sapmalarda artmaktadır [7]. Bu soruna çözüm amaçlı olarak sıcaklığa göre geri besleme yapan devreler kullanılmaktadır. Fakat, hassasiyetin önem taşıdığı çalışmalarda bu çözüm eksik kalabilmektedir.

Farklı noktalar arasında zamansal senkronizasyonu sağlamak için LoRa kablosuz haberleşmesi kullanılan bir örnek bulunmaktadır. Bu çalışmada öne sunulan algoritma ile belirli bir marjın dışına çıkılması durumunda sistem tekrardan senkronizasyon sinyali yollamaktadır [8]. Bir diğer önem taşıyan konu ise, çalışmanın mili saniye çözünürlüğünde yapılmış olmasıdır. Yapılacak çalışmada mikrosaniye çözünürlüğünde zaman elde edilmesi planlanmaktadır. Bahsi geçen makalenin sonuç bölümünde bu konudan bahsedilmiş ve gelecek çalışmalarda mikrosaniye olarak yeni deneyler yapılmasının daha doğru sonuçlar doğuracağını belirtmiştir. Yazarlar tarafından çıkarılan bir diğer sonuç ise, bu gibi bir senkronizasyon işleminin özellikle yüksek işlem gücüne sahip olmayan sistemlerde yararlı olacağıdır. Belki yüksek işlem güçlü sistemler ile sürekli şekilde zaman kaymasını hesaplayabilir ve sistem içerisinde senkronizasyonu sağlayabilirsiniz. Gerçekleştirilen çalışmalarda, benim de çalışmalarımda

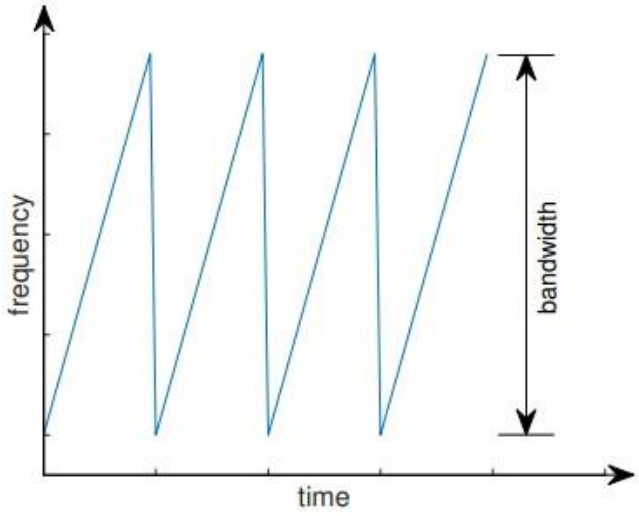
kullanacağım, SX1276 haberleşme çiplerinin yanı sıra ST firmasının düşük güçlü mikroişlemcisi olan STM32L0 serisi bir denetleyici kullanılmıştır. Kablosuz olarak yollanan bu sinyalde sinyalin ulaşma süresi göz önünde bulundurulmamıştır. Bu durum alıcı tarafa geç ulaşan sinyal sebebi ile ciddi gecikmelere yol açabilir. Çünkü LoRa ile yapılan bir kablosuz haberleşmede sinyalin havada kalma süresi ciddi süreler almaktadır [9]. Özellikle mikrosaniye veya milisaniye çözünürlüklerinde bu sorun ciddi bir problem yaratmaktadır.

1.3. LoRa Kablosuz Haberleşmesi

Son yıllarda Nesnelerin İnterneti cihazlarının sayısı ve kullanımı arttıkça, kablosuz olarak uzak mesafelere ulaşmak ihtiyacı artmaktadır. Bu yönde geliştirilen teknolojiler arasında, LoRa; rakiplerine göre ulaşabildiği mesafe avantajı ve düşük güç tüketimi sayesinde sivrilmiştir. Fakat, LoRa rakiplerine göre daha düşük bit oranı sunmaktadır. LoRa teknolojisi, Semtech tarafından patentlenmiş bir haberleşme şeklidir. Bu bölüm altında LoRa ve LoRaWAN hakkında bilgiler verilecektir.

1.3.1. LoRa

LoRa, Long-Range kısaltmasıdır. Uzun mesafelere haberleşmeyi sağlayan fiziksel haberleşmeyi sağlayan bir kablosuz haberleşme modülasyonudur. Sadece fiziksel katmanı temsil eder. Fakat tez boyunca haberleşmeden bahsederken bu terim kullanılacaktır.



Şekil 1.2. CSS modülasyonu

Doppler etkisi veya çoklu yol girişimi sinyalin zamanının frekansını değiştirebilir. Chirp oranı sabit olduğu için, CSS modülasyonunda zaman ve frekans arasında direk ilişki vardır. Bu özellik LoRa haberleşmesini girişme karşı güçlü yapar [10]. LoRa, CSS modülasyonunu geliştirerek gürültüye ve girişime karşı daha da güçlü olmak için çeşitli yöntemler kullanır. Bunlardan birisi LoRa modülasyonu sırasında gönderilen sembolleri kodlamaktır [11]. Her sembolü kodlamak için kullanılan bit sayısına yayılım faktörü denir. Yayılım faktörü bir LoRa cihazı için 7'den 12'ye kadar değişebilir. Daha yüksek yayılım faktörü sinyali gürültüye karşı dayanıklı hale getirir ve daha uzak mesafeli alıcıya ulaşmasını sağlar [12]. Fakat yayılım faktörü artarken, karşıya iletilebilecek paket büyüklüğü gittikçe azalır. Bunun anlamı, düşük yayılım faktörüne sahip bir iletişimle gönderilen paketi yüksek yayılım faktörü ile göndermek istersek daha uzun süre iletişimde kalmamız gerekir. Bu durum bazı dezavantajları da beraberinde getiririr. Bunlar aynı frekansı kullanan diğer cihazlara girişim oluşturma ve LoRa ağları için gereksiz trafik oluşturmadır. Bu sebeple ağı yapılandırırken önerilen adaptif şekilde data hızını ayarlamak olmalıdır. Bu şekilde bant genişliğini daha verimli şekilde kullanabilir ve güçten tasarruf edebiliriz. LoRa adaptif data oranı özelliğine sahiptir. ADR etkinleştirildiğinde cihaz efektif bir bağlantı için en düşük yayılım faktörünü seçecektir. Düşük yayılım faktörü ile kısa mesafeli iletişim sağlanırken daha yüksek büyüklüğe sahip paketler yollanabilir.

En yüksek değere yani 12'ye ayarlanmış bir LoRa haberleşmesi ile açık alanda 30 km'ye kadar iletişim kurulabilir [13]. Bazı deneylerde LoRa haberleşmesinin yüzlerce km'ye varan iletişimler sağlayabildiği görülmüştür. Buna örnek olarak yapılan bir haberleşmede dünya rekoru kırılmış ve 700 km mesafeye başarılı şekilde iletişim kurulmuştur [14].

Ülkeye ve bölgeye bağlı olarak LoRa 3 farkı ISM bandındayayın yapabilir. Bunlar Asya için 433MHz Avrupa için 868MHz ve Amerika için 915Mhz'dir.

1.3.1. RSSI ve LoRa İlişkisi

RSSI, received signal strength indication, alınan sinyalin gücü hakkında bilgi veren bir göstergedir. Her haberleşme çeşidi ve donanım üreticisi için RSSI aralığı farklıdır. RSSI hassasiyeti, alıcının alınan sinyali doğru şekilde dekod edebilmesi için kabul edileiblir bir bit hata oranı cinsinden minimum sinyal gücü seviyesini gösterir. RSSI negatif olarak temsil edilir ve 0'a yaklaştıkça sinyalin gücü artmaktadır [15][16]. RSSI dBm cinsinden gösterilmektedir. Semtech firmasının sunduğu LoRa çipleri RSSI değerlerini dönüştürerek sunmaktadır.

LoRa modülasyonunun sağladığı RSSI hassasiyeti, her yayılım faktörü için farklıdır. Tablo 1.1'de görüldüğü üzere yayılım faktörü arttıkça RSSI değeri düşmektedir. Bunun anlamı gürültü tabanının düşmesi ve gürültüye karşı direncin artmasıdır. Tablo 1.1'de bahsi geçen değerler görülmektedir.

Tablo 1.1. LoRa modülasyonu farklı yayılım faktörüne göre RSSI değerleri

Mod	Spreading Faktör	Data hızı(kb/s)	Hassasiyet(dBm)
FSK	-	1.2	-122
Lora	12	0.293	-137
	11	0.537	-134.6
	10	0.976	-132
	9	1757	-129
	8	3125	-126
	7	5468	-123

Tabloda görüldüğü üzere farklı yayılım faktörleri için farklı data hızları vardır. Bu hızlar denklem (1.1) ile hesaplanabilir. Denklemde BW yani bant genişliği kHz cinsindendir.

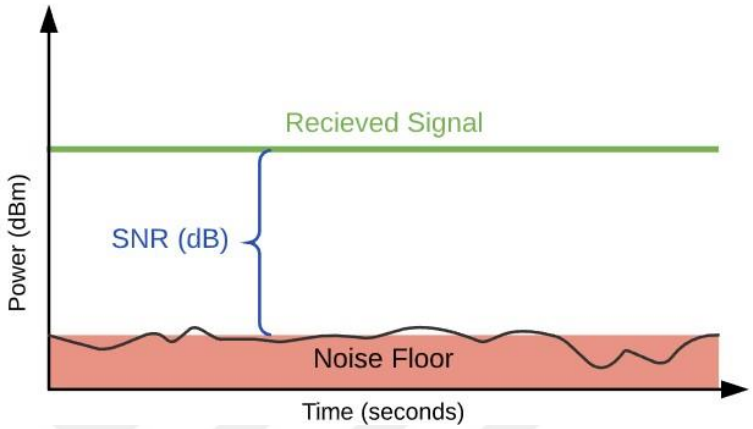
$$R_b = SF \cdot \frac{\frac{4}{4+CR}}{\frac{2^{SF}}{BW}} * 100 \quad (1.1)$$

1.3.1. LoRa ve SNR İlişkisi

SNR(Signal-to-Noise Ratio) alınan sinyal ile gürültü tabanının gücü arasındaki ilişkidir. Gürültü tabanı, iletilen sinyali bozabilen ve bu nedenle yeniden iletimlerlere sebep olabilecek istenmeyen girişime neden olan istenmeyen bir alandır. SNR 0'dan büyükse, alınan sinyal gürültü tabanının üstünde gerçekleşiyor demektir. 0'dan küçük ise, alınan sinyal, gürültü tabanının altında gerçekleşiyor demektir.

Normalde gürültü tabanı iletişim yapabilmek için sınırdır fakat LoRa haberleşmesi gürültü tabanının altında gerçekleşir. Genel olarak, LoRa için SNR değerleri -20dB ile +10dB arasında

değişir. +10dB'ye yaklaştıkça gelen sinyal daha az bozulmuştur. LoRa, gürültü tabanının -7.5 dB ila -20 dB altındaki sinyalleri demodüle edebilir.



Şekil 1.3 SNR görselleştirilmesi

SNR değerini bulmak için (1.2) kullanılır.

$$SNR = P_{sinyal} - P_{gürültü} \quad (1.2)$$

1.3.1. Alıcı Hassasiyeti

Alıcının hassasiyeti (1.3) eşitliğinden faydalanarak hesaplanır. İlk terim 1 Hz bant genişliğindeki termal gürültüdür ve sadece alıcının sıcakşığının değişiminden etkilenir.

$$S = -174 + 10\log_{10}(BW) + NF + SNR \quad (1.3)$$

İkinci terim olan ise alıcı bant genişliğinden yararlanarak hesaplanır. Üçüncü terim, NF, alıcı gürültü belirtecidir ve donanımsal olarak kullanıcıya sağlanan veridir. Son olarak SNR yani sinyal gürültü oranı, modülasyona bağlı olan bir değerdir. Sonuç olarak SNR ve bant genişliği kullanıcı tasarımlarında göz önünde bulundurulacak değişkenlerdir.

1.3.1. SNR ve Yayılım Faktörü

Yayılım faktörünün temel öncülü farklı çirplerde kodlanan bilgi bitleridir. LoRa modülasyonu için (1.4) eşitliğinde belirtilmiştir. Verilen formülde $\square$ bitleri temsil ederken $\square$ chirp oranını temsil etmektedir [26].

$$\square = 2^{(SF)} * \square \quad (1.4)$$

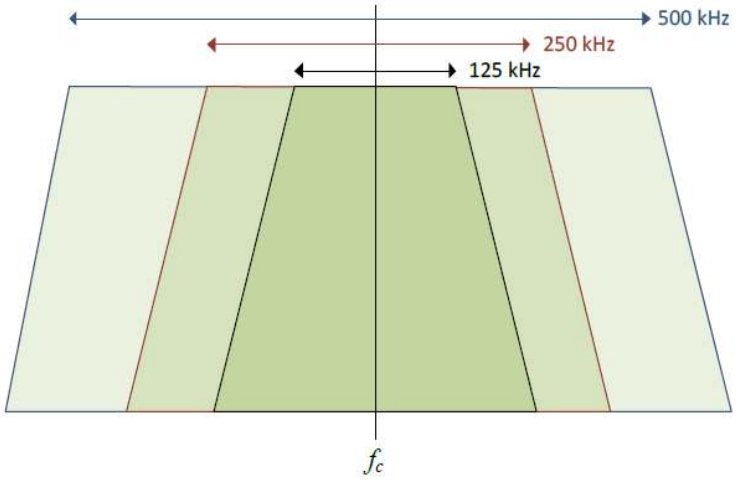
SNR sinyalin gücünün gürültü gücüne oranıdır. LoRa modülasyonun gücü ileri hata düzeltme (FEC) tekniğinden ve yayılım tayfı işlemi tarafından sağlanmaktadır. Bir geleneksel modülasyon yöntemi ve LoRa modülasyonu arasındaki SNR farkı Tablo 1.2'de gösterilmiştir. Negatif değerlere indikçe hassasiyet artmaktadır ve demodülasyon mümkün olmaktadır.

Tablo 1.2 Farklı yayılım faktörlerine göre SNR değerleri

Modülasyon	**SNR**
LoRa SF12	-20 dB
LoRa SF11	-17.5dB
LoRa SF10	-15 dB
LoRa SF9	-12.5
LoRa SF8	-10
LoRa SF7	-7.5
GMSK	9 dB

1.3.1. Bant Genişliği ve Chirp Oranı

Tek bitin birkaç chirp tarafından temsil edilmesi ya daha hızlı bit hızı ile yollamayı gerektirmektedir ya da sinyal daha fazla bant genişliği kaplayacağından iletim süresi arttırılmalıdır. Eşitlik (1.3) bant genişliğinin arttırılması ile hassasiyetin azaldığı görülmektedir. Bundan dolayı, dar bant seçimi kullanıcıya hızlı iletişim sağlarken aksi durumda paketin havada kalma süresini arttırmaktadır. Ayrıca bant genişliğinin artması gürültünün artmasına da sebep olduğundan alıcının hassasiyetini düşürmektedir. Şekil 1.4'de görüldüğü üzere bir SX1272 LoRa çipinde frekans arttıkça bant genişliği daralmaktadır [26].



Şekil 1.4. LoRa bant genişliği ve frekans ilişkisi

Tablo 1.3'de sabit yayılım faktöründe 10 baytlık bir verinin iletimine bant genişliğinin etkisi görülmektedir. Bu değerlerde yayılım faktörü 10 ve kodlama oranı 2'dir. Görüldüğü üzere düşük bant genişliği paketin iletim süresini arttırmaktadır.

Tablo 1.3. Farklı bant genişliklerine göre iletim süresi ve hassasiyet değişimi

Bant Genişliği	**Paketin İletim Süresi(ms)**	**Hassasiyet(dBm)**
125	264.2	-132
250	132.1	-129
500	66	-126

1.3.1. Uyarlanabilir Data Oranı

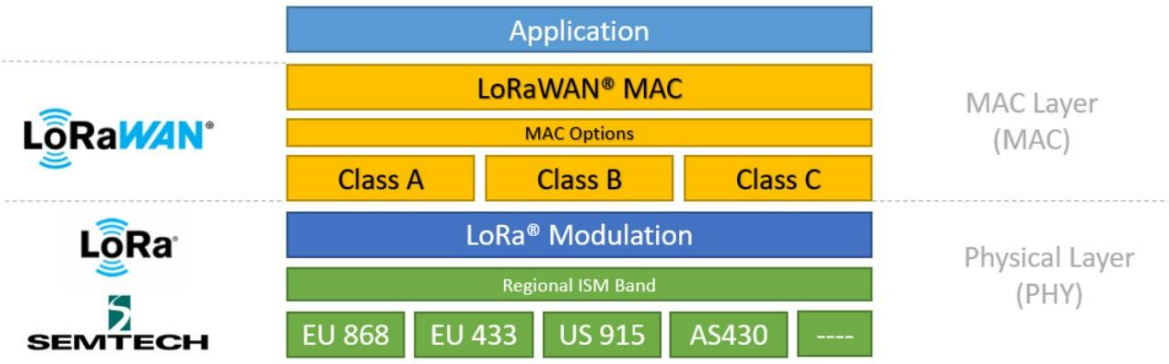
LoRa adaptif data oranı özelliğine sahiptir. ADR, düğümlerdeki iletim gücünü değiştirerek iki şey sağlar; ağın kapasitesini artırmak ve batarya ömürünü artırmak [27]. ADR bir düğüm ve ağ geçidi arasındaki kablosuz bağlantı tüm kazanç ve kayıpların toplamını tahmin

ederek bir link budget ayarlar. Örnek olarak, küçük bir paket iletilmesi gerekiyorsa düşük bir bant genişliği ayarlanır veya iletilecek düğüm yakında ise yayılım faktörü düşürülerek daha hızlı bir iletim sağlanır.

ADR, Lora düğümleri ve ağ arasında asenkron olarak çalışır. ADR ayarlanması genel olarak ağ tarafından yapılır ve algoritması LoRa Alliance tarafından belirlenmiştir fakat ağ kullanıcı algoritmayı kullanma şeklini değiştirebilir. Sunucu üzerinden yayılım faktörü ve iletim gücü değiştirilebilirken diğer yandan düğüm sadece yayılım faktörünü arttırabilir. [28]

1.1. LoRaWAN

LoRaWAN ağlarını tam olarak anlamak için teknoloji yapısına göz atarak başlayacağız. Şekil 1.5'de gösterildiği gibi, LoRa fiziksel (PHY) katmandır, yani uzun menzilli iletişim bağlantısını oluşturmak için kullanılan kablosuz modülasyondur. LoRaWAN, LoRa Alliance tarafından standartlaştırılan ve sürdürülen güvenli çift yönlü iletişim, mobilite ve yerelleştirme hizmetleri sunan açık bir ağ protokolüdür.



Şekil 1.5. LoRaWAN teknoloji yapısı

LoRaWAN kullanan bir uç cihaz, LoRa RF Modülasyonu kullanılarak radyo ağ geçitleri aracılığıyla bir LoRaWAN ağına kablosuz olarak bağlanan bir sensör veya aktüatördür. Uygulamaların çoğunda, son cihaz, fiziksel koşulları ve çevresel olayları dijitalleştiren kendi kendine işlem yapan ve genellikle pille çalışan bir sensördür. Aktüatör için kullanılan bazı

alanlar şunlardır: sokak lambaları, kablosuz kilitler, su vanası açma-kapatma, sızıntı önleme sistemleri.

LoRa tabanlı cihazlar üretilirken, kendilerine benzersiz olacak şekilde tanımlamalar yapılır. Bu tanımlayıcılar sayesinde, paketlerin özel veya yerel ağlar yanı sıra bulut sistemlerine güvenli şekilde aktarılmasını sağlanır.

1.4.1. LoRaWAN Sınıfları

LoRaWAN, geniş uygulama yelpazesinden dolayı üç farklı sınıfa sahiptir. Bunlar Sınıf A, Sınıf B, Sınıf C'dir.

- Sınıf A, çoklu iletişim yeteneğine sahiptir. Varsayılan olarak çalışan bu sistem, tüm LoRaWAN cihazları tarafından desteklenmektir. Son cihaz iletişimi başlatma yetkinliğine sahiptir. Güç tüketimi bu sınıfta düşüktür.
- Sınıf B, Sınıf A'ya ek olarak, ay anda mesaj alıp, yollama yetkinliğine sahiptir. Sunucu sabit aralıklarla iletişim başlatabilir. Bu sebeple bu sınıfta gecikme düşüktür [17].
- Sınıf C, diğer sınıflara göre daha fazla güç tüketimi yapmaktadır. İletişim sırasında gecikme yoktur. Haberleşme her hangi bir zamanda başlayabilir.

1.5. LoRa Kablosuz Haberleşmesi Karşılaştırılması

Nesnelerin İnterneti cihazlarının son yıllardaki yüksek artışı farklı haberleşme teknolojilerini de beraberinde getirmiştir. Bunlardan bazıları uzak mesafelerde iletişim sağlaması amacı ile piyasaya sürülürken, bazıları düşük güç tüketimi hedefi ile farklı amaçlara hizmet etmektedir. LoRa rakiplerine göre daha düşük paket boylarında iletişim sağlayabilmektedir fakat diğer yandan iletişim mesafesi ile bir çok rakibine üstün gelmektedir. Tablo 1.4'de bazı kablosuz haberleşme teknolojileri ve LoRa radyo haberleşmesinin karşılaştırılması görülmektedir[39].

Tablo 1.4. LoRa ve diğer kablosuz haberleşme teknolojilerinin karşılaştırılması

	LoRa	**ZigBee**	**Bluetooth**	**Wi-Fi**
Modülasyon	Chirp Spread Spectrum	DSSS BPSK O-QPSK	FHSS	QPSK OFDM QAM
Frekans	433 MHz 868 MHz	868 MHz 915 MHz 2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz 5 GHz
Mesafe	15km'ye kadar	10-100 m	10 m	100 m
Veri orani	50Kbps	250 Kbps	1Mbps	54Mbps
Güç Tüketimi	Düşük	Düşük	Orta	Yüksek

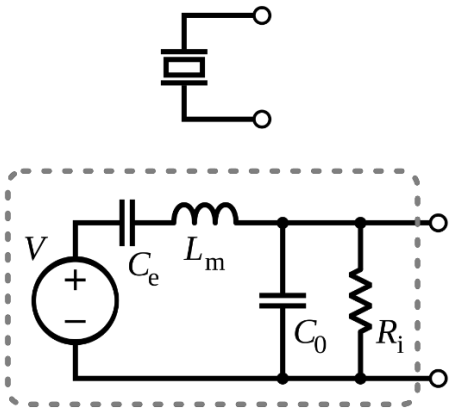
Nesnelerin internetine bağlanmak için hücresel ağlarda ciddi oranda kullanılmaktadır. Özellikle veri oranı bakımından üstün olan bu teknoloji, diğer yandan getirdiği maliyet ve kapsama alanı sınırı ile bazı durumlarda geçersiz kalmaktadır. Bunun yanı sıra, kapalı bir sistem oluşturma istenirse veya kırsal alanlarda uzak mesafeli çalışmalar yapılmak istenirse LoRa öne çıkmaktadır. LoRa teknolojisini kullanmak için en uygun alanlar, veri büyüklüğünün görece küçük olduğu, haberleşme sırasında oluşacak gecikmelerin göz ardı edilebileceği uygulamalardır. LoRa özellikle çok uzak mesafeler ele alındığında artan bir gecikmeye sahiptir. Yapılan çalışmada da bu göz önünde bulundurulmuştur ve farklı spreding factorler için gecikmeler hesaplanmış, yollanan zaman izinin yanında karşıya yollanarak iki noktadada bu gecikme işlenmiştir

1.5. Zaman Farkları Yöntemi ile Konumlandırma

Konumladırma kullanılarak canlıların veya cisimlerin konumlarını bir referans bilgiye ya da koordinat sistemine göre belirleyebiliriz [43]. Bu konumlandırma teknikleri günümüzde haberleşme, radar, güdüm teknolojileri gibi farklı alanlarda kullanılmaktadır [44]. Bu tekniklerden biri olan varış zamanlı konumlandırma ile ikiden fazla alıcıya ulaşan sinyallerin zamansal farklarından yararlanarak kaynağın konumu bulunabilir.

1.5. Piezoelektrik Sensör

Bir piezoelektrik sensör, basınç, hızlanma, sıcaklık, gerinim veya kuvvetteki değişiklikleri elektrik yüküne dönüştürerek ölçüm için piezoelektrik etkiyi kullanan bir cihazdır. Piezoelektrik sensörler çeşitli uygulamalarda ölçüm yapmak için kullanılan çok yönlü bir araçtır. Bu sensör, tıp, havacılık, nükleer uygulamalarda ve tüketici elektroniğinde veya cep telefonu dokunmatik yüzeylerinde basınç sensörü olarak kullanılır [18].



Şekil 1.6. Piezoelektrik sensör modeli

Bir piezoelektrik dönüştürücü, çok yüksek DC çıkış empedansının yanı sıra gerilim kaynağına ve filtre devresine sahiptir. Şekil 1.6'da piezoelektrik bir sensörün elektriksel modeli görselleştirilmiştir. Kaynak gerilimi, uygulanan kuvvete, basınca veya gerilime göre orantılı olarak değişir.

Şekil 1.7. Uygulamada kullanılan piezoelektrik sensör

Çıkış sinyali, uygulanan mekanik kuvvete göre bu eşdeğer devreden geçmiş gibi kabul edilir [19]. Şekil 1.7'de bahsi geçen sensörün uygulamalar sırasında kullanılan gerçek fotoğrafı görülmektedir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. LoRa Sınırlarının Testi

Yapılan çalışmada, ses kaynağının tespiti için kullanılan sistemler birbirine uzak mesafede yer almaktadır. Bu sistemlerin iletişimi için uygun haberleşme sistemi seçilmelidir. Bu iletişim kablolu veya kablosuz olarak olabilir. Fakat, çalışmanın amacı, özellikle uzak mesafeli iletişimler için fazlasıyla aaliyet yüküne sebep olan kabloyu sistemden çıkararak, sistemlerin hem maliyetini düşürmek hem de esneklik sağlamaktır. Böylece, oluşturulacak sistemin farklı bir ortama taşınması kolaylaşmaktadır..

Sensörlerden okunan bilgilerin yanı sıra, mikroişlemciler arası saat senkronizasyonunu sağlamak amacı ile LoRa kablosuz haberleşmesi seçilmiştir. Semtech tarafından LoRa için sunulan belgelerde uzak mesafe, düşük güç için bu haberleşme şekli uygun görülmektedir [20]. Teorik olarak sunulan bu özelliklerin gerçek şartlarda test edilerek yapılacak uygulama için uygulanabilir olup olmadığı test edilmelidir. Bunun için STM tarafından sunulan B-L072Z-LRWAN1 kitleri kullanılarak bir ölçüm senaryosu oluşturulmuştur. Semtech firmasının SX1276, LoRa ve LoRaWAN uyumlu çipini içeren bu kitler ile STM geliştirici ortamı birleşmektedir. Bu şekilde STM tarafından sunulan kütüphanelerde uygulamaya kolayca entegre edilebilir.

2.1. Ölçüm Senaryosu

Yapılacak testler için Karadeniz Teknik Üniversitesi ve çevresi seçilmiştir. Ağaçlık ve engebeli olan arazi, iletişim sırasında sinyallerde girişime sebep olacaktır. Ayrıca bu test, direk

görüşler engellenerek, çok uzun mesafelere iletişim sağlayan LoRa'nın böyle şartlarda kapsama mesafesinin ne kadar oranla düştüğünün pratik bir çalışması olacaktır.

Karadeniz Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği binası içerisine yerleştirilen bir kit sabit olarak durmaktadır. Diğer kiti ise farklı noktalara getirerek, farklı mesafeler için ölçümler alınmıştır.

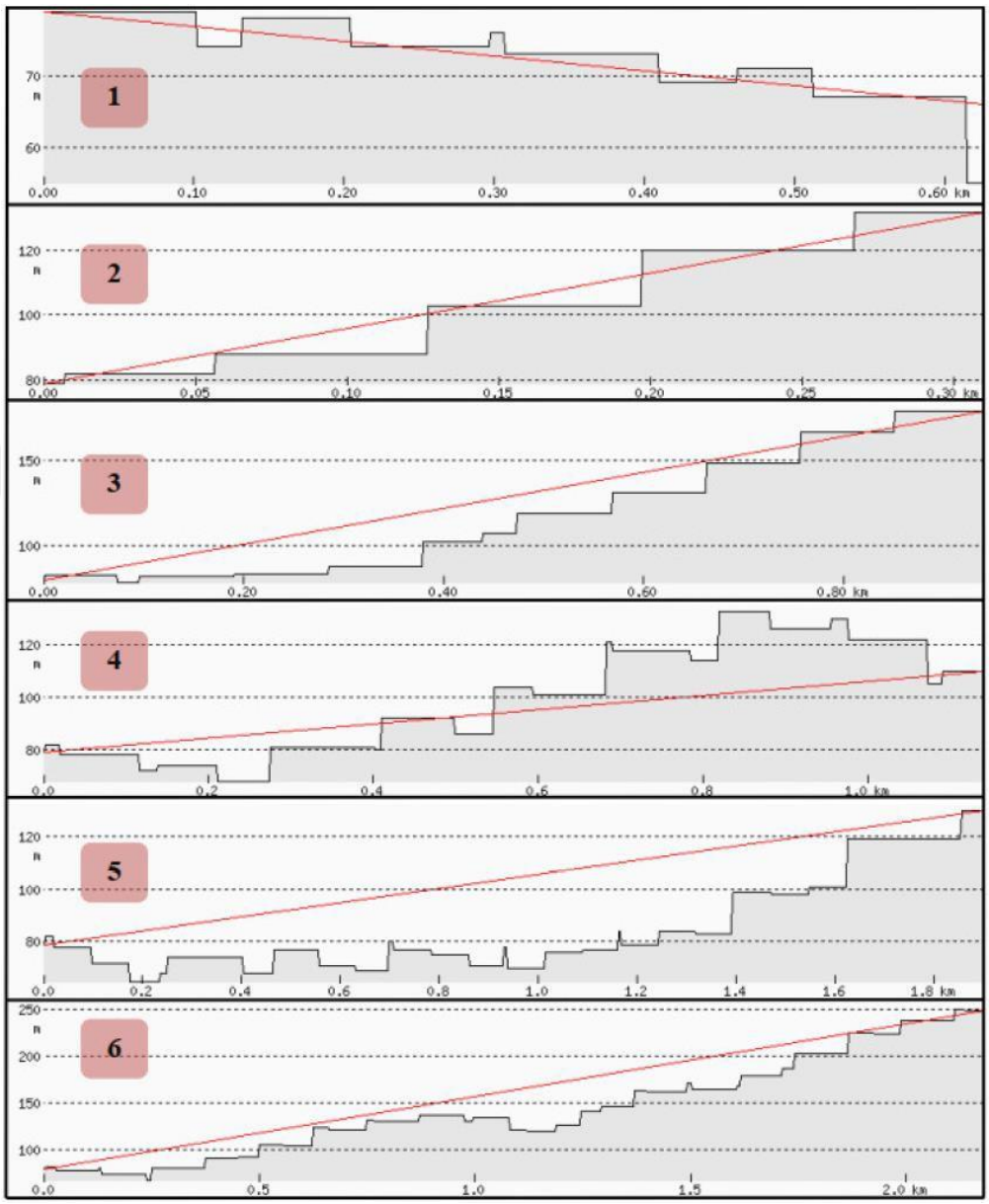
Şekil 2.1. Test noktaları

Şekil 2.1'de kırmızı ile gösterilen nokta, sabit duran kiti temsil etmektedir. Diğer 6 nokta ile kırmızı nokta arasında iletişim sağlanacak şekilde ayrı ayrı ölçümler yapılmıştır. Bu ölçümler ile yapılacak uygulamaya LoRa kablosuz iletişiminin uygun olup olmadığı deneysel olarak belirlenecektir. Şekil 2.1'de görüldüğü üzere, test bölgesi kentsel bir bölgedir. Sinyal için hiçbir noktada direk görüş yoktur.

Tablo 2.1. Noktalar arası uzaklık

Noktalar	Uzaklık(m)
1	651
2	371
3	944
4	1120
5	1910
6	2200

İletişim performasını değerlendirirken uzaklığın yanı sıra, yükselti profili de göz önünde bulundurulmalıdır. Test yapılan bölgede bazı bölgeler fazlasıyla engebeli arazidir. Bu sebeple alıcı ve verici arasındaki yükseklik profilini de göstermek yararlı olacaktır. Şekil 2.2'de noktalar arası yükselti profili gözükmektedir. Kırmızı arka plan ve sayı ile belirtilen grafik uzak noktadaki alıcı-verici cihazı temsil etmektedir.



Şekil 2.2. İletişim noktaları arası yükselti profili

Test sırasında 3 farklı yayılım faktörü ile denemeler yapılmıştır. Semtech tarafından yüksek yayılım faktörü ve iletişim mesafesi ilişkisi böylelikle test edilmiştir. Yayılım faktörleri 7,10 ve 12 olarak seçilmiştir. Test konfigürasyonu Tablo 2.2'deki gibidir.

Tablo 2.2. İletişim konfigürasyonu

İletişim gücü	20 dBm
Bant genişliği	125kHz
Kodlama oranı(CR)	4/8
Frekans	868MHz

Tablo 2.2'de seçilen kurulum en uzak mesafeli iletişim için seçilmiştir. LoRa kullanıcıya farklı iletişim güçleri, bant genişlikleri ve kodlama oranları sunmaktadır. Burada seçilen değerler en uzak mesafeye iletişim kurmak için belirlenmiştir.

Cihazlar birbirlerine sürekli olarak önceden belirlenmiş mesajı göndermeye çalışmaktadır. İki cihazda mesajı bildiği için, eksiksiz şekilde alınana kadar iletişim kurmaya çalışmaktadır. Aksi halde iletişim kurulmamış sayılmaktadır. Bu durumda, RSSI ve SNR değerlerini kullanıcıya vermemektedir. Ayrıca sistem tarafından sinyalin belirli bir sürede gelmesi beklenmektedir. Bu kullanıcı tarafından ayarlanabilir bir değerdir. Uzun mesafeli iletişim kurmak amaç olduğu için bu süre normalden uzun seçilmelidir.

ST firması tarafından sunulan, LoRa ve LoRaWAN haberleşmesi için yazılan kütüphaneler bu çalışmanın temelinde yer almaktadır. Bu kütüphane genel olarak LoRaWAN haberleşmesine uygun örnekler içermektedir. Bu örnekler, kullanıcıya herhangi bir sensörden okunan veriyi gateway yardımı ile uzak sunucudan erişebilir hale getirmektedir. Fakat bizim çalışmamızda sadece LoRa radyo haberleşmesi kullanıldığı için gereksiz kütüphaneler projeden çıkarılmalı ve bu şekilde çalışma yapılmalıdır.

Şekil 2.3'de görüldüğü gibi ST tarafından sunulan B-L072Z-LRWAN1 Discovery kiti çalışmalarda kullanılmıştır. Bunun yanı sıra GPS bilgisini okumak için bir ekran ve GPS modulü kite eşlik etmektedir. Bu kit ultra düşük güç ile çalışan STM32L072 mikroişlemciye sahiptir. LoRa'nın kullanım amacı ve uygulama alanları düşünüldüğde düşük güç tüketimi önemli bir unsurdur. Ayrıca bu kit Avrupa ISM bandına uygun şekilde 860 MHz – 930 MHz aralığında çalışmaktadır.

Şekil 2.3. Bir ekrana ve GPS modülüne bağlı B-L072Z-LRWAN1 kiti

B-L072Z-LRWAN1 kitinin başlıca özellikleri [21]:

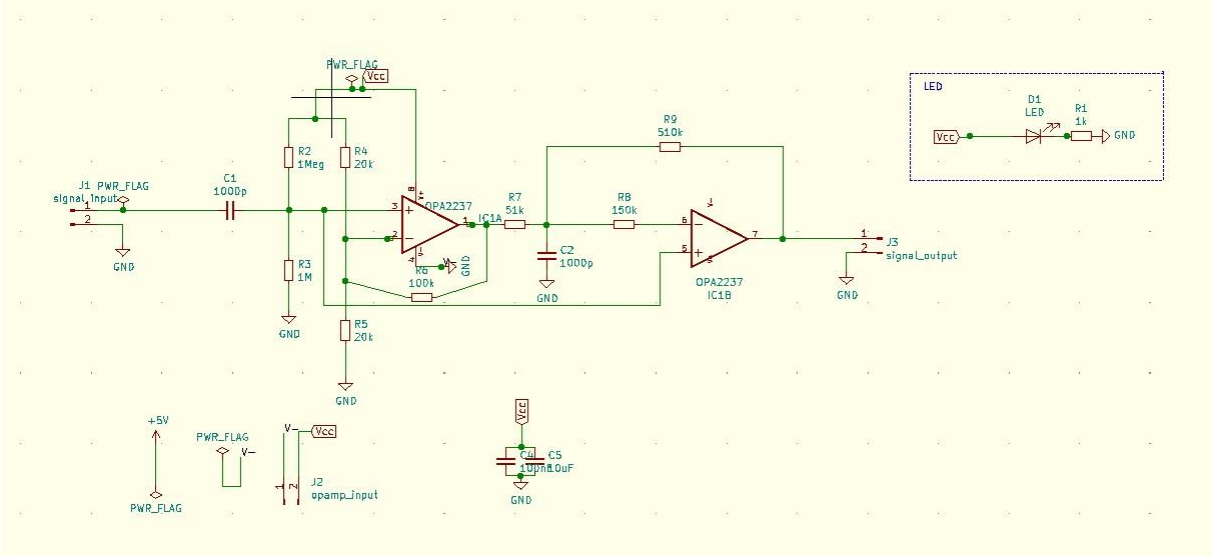
- CMWX1ZZABZ-091 LoRa®/Sigfox™ modulü içerir.
- Ultra düşük güçlü ARM Cortex M0+ STM32L072CZ işlemci
- Frekans çalışma aralığı; 860 MHz – 930 MHz
- 4 Kanal 12-bit Analog Dijital Dönüştürücü
- 6 bit timer yanı sıra I2C ve SPI
- Gömülü olarak SX1276 alıcı-verici çip
- LoRa, GMSK, FSK, MSK, GMSK ve OOK modülasyonunları ile çalışma
- 14dBm ile 20dBm arasınca seçilebilir çıkış gücü
- -137 dBm'e kadar hassasiyet
- LoRaWAN desteği
- 3 adet AAA tip pil ile bağımsız olarak çalışma

2.3. Yükselteç

Alınan sinyallerin güçlendirilmesi için bir çözüm olan op-amp devreleri ile tasarlanan yükselteç, yapılan çalışmalar boyunca yardımcı olmuştur. Bu bölümde ilgili tasarımlar ve simülasyon çalışmalarından bahsedilmiştir.

2.3.1. Yükselteç Tasarımı

Piezoelektrik sensörden okunan sinyallerin genliği oldukça küçüktür. Özellikle sensöre uzak olan noktalardan gelen sinyaller, bahsi geçen sensöre gelene kadar zayıflamaktadır. Bu sebeple sensörden alınan sinyaller bir yükselteçin girişine verilmeli ve çıkışından daha kuvvetli sinyaller alınarak işlemcide işlenmeden önce yükseltilmelidir. Bu sebeple bir yükselteç tasarımı yapılmıştır. Böylelikle uzak noktalardan gelen zayıf sinyallerin dahi görülebilir olması amaçlanmaktadır.



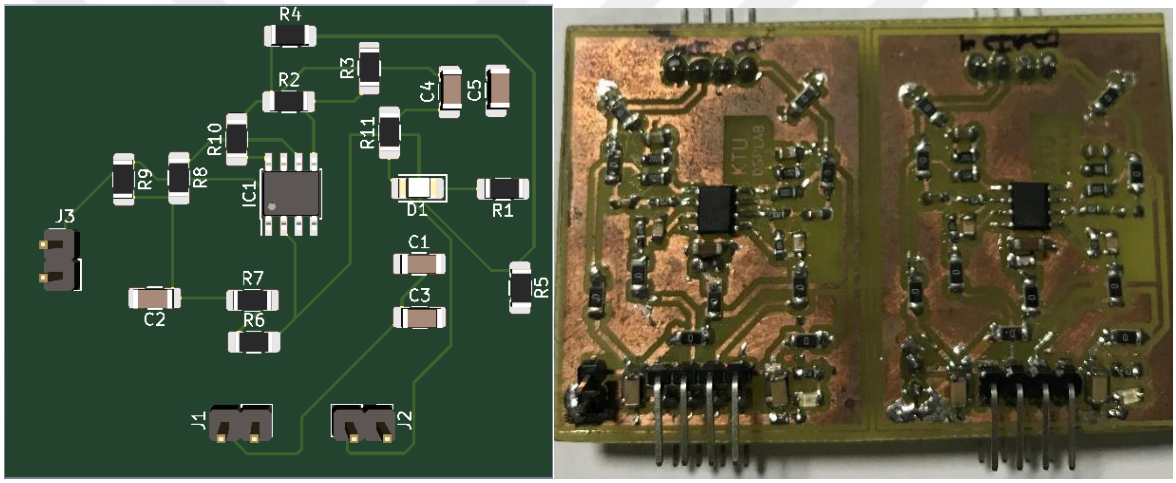
Şekil 2.4. KiCad ile tasarlanan OPA2237 ile tasarlanan yükselteç devresi

Şekil 2.4. tasarlanan yükselteci göstermektedir. Bu devre için Texas Instrument tarafından sunulan OPA2237 operasyonel yükselteci kullanılmıştır. Tek paket içerisinde yer

alan iki yükselteç sayesinde 100 kata kadar kazanç sağlanacak şekilde tasarım yapılmıştır. İki op-amp'ın kazancı eşit ve 10'dur.

$$A_{toplam} = A_{op1} * A_{op2} \quad (2.1)$$

Toplam kazancın (2.1) eşitliğinden yararlanarak 100 olduğunu görebiliriz. Şekil 2.5 tasarlanan yükseltecin 3 boyutlu bilgisayar üzerinde modellenmiş(solda) halini ve montajlı(sağda) halini göstermektedir.

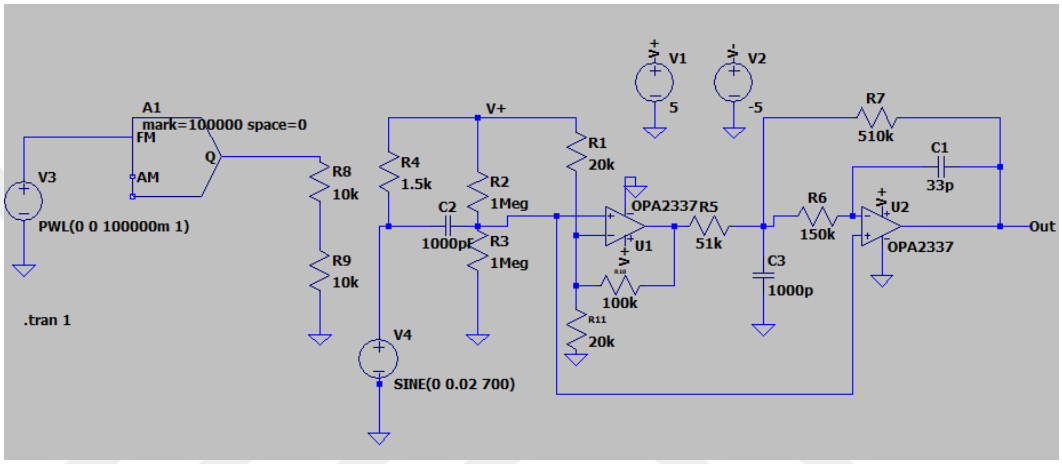


Şekil 2.5. Yapılan yükseltecin 3-boyutlu görüntüsü ve gerçeklenmiş hali

2.3.1. Tasarlanan Yükseltecin Simülasyonu

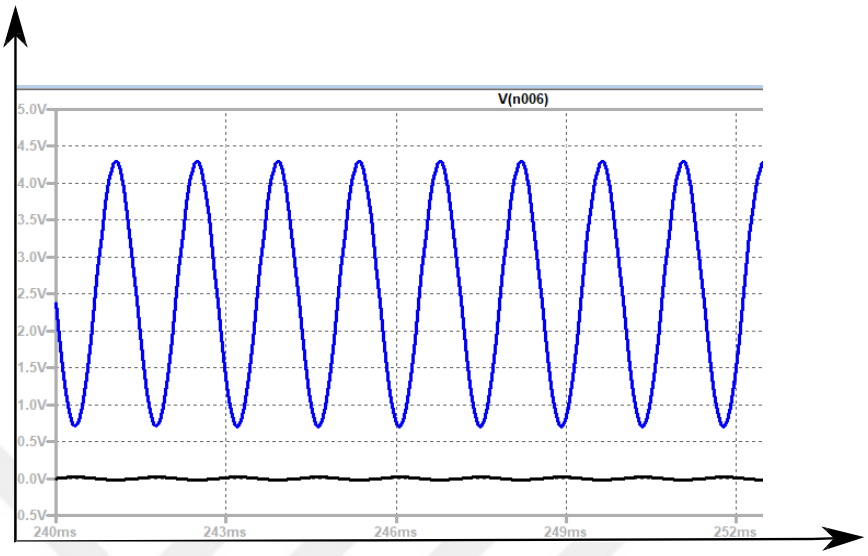
LTSpice, devre simülasyonu için kullanılan bir bilgisayar programıdır. Spice motorunu temel alarak çalışan bu program kolay ve etkili şekilde elektrik devrelerini simüle etmek için kullanılır. Bu program içerisinde dahili olarak regülator, yükselteç veya diğer elektronik komponentlerin kütüphanesi bulunur. LTspice, yarı iletken üreticisi Analog Devices (orijinal olarak Linear Technology tarafından) tarafından üretilen SPICE tabanlı bir analog elektronik devre simülatörü bilgisayar yazılımıdır [30]. Sektörde en çok dağıtılan ve kullanılan SPICE

yazılımıdır [31]. Ücretsiz bir yazılım olmasına rağmen, LTspice sınırsız yeteneklere (düğüm sınırı yok, bileşen sınırı yok, alt devre sınırı yok) sahiptir . Radyo frekansı elektroniği, güç elektroniği, ses elektroniği, dijital elektronik ve diğer disiplinler dahil olmak üzere birçok kullanıcı tarafından kullanılmaktadır. Simülasyonda kullanılan Ltspice XVII versiyonudur. Şekil 2.6'da simulator ile devrenin çizimi görselleştirilmiştir.



Şekil 2.6. Ltspice üzerinde devrenin çizilmesi

40mV olarak yükselteç girişine verilen sinyal çıkışta 100 kat yükselerek 4 Volt olarak çıkışta gözlemlenmiştir. Frekans olarak 700 Hertz, sinyal olarak sinüs sinyali seçilmiştir. Op-amp beslemeleri için +5V ve -5V olacak şekilde beslemeler yapılmıştır. Buna göre, Şekil 2.7 simülasyon çıktısını vermektedir.



Şekil 2.7.Simülasyon sonucunda giriş ve çıkış sinyalleri

2.1. Sensörler Arası Zaman Senkronizasyonu

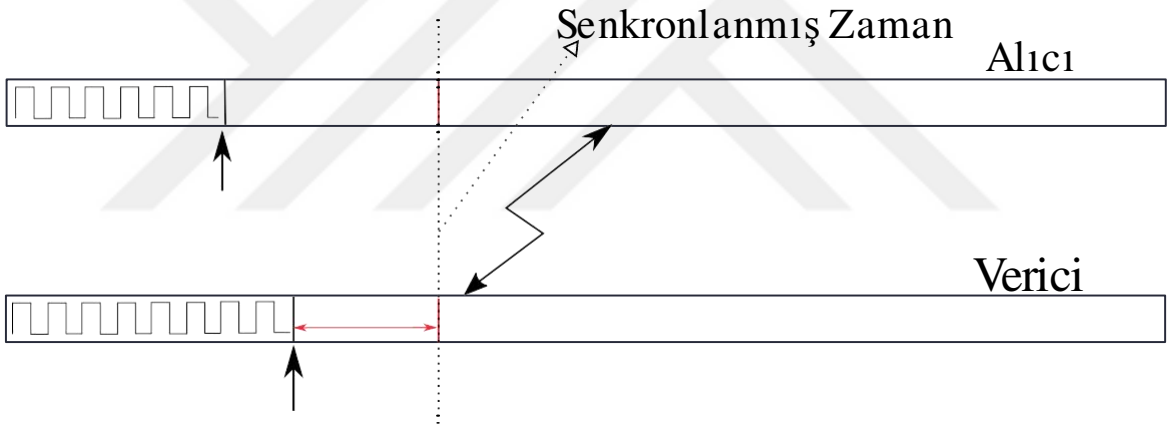
Referans alınacak zamanın iki farklı noktada eşit şekilde ilerlemesi zor bir görevdir. Kristalden gelen hatalar zamanla cihazlar arasındaki zaman farkını artıracak. Özellikle sıcaklık başta olmak üzere ortama bağlı etkiler kristaller üzerinde doğruluğu olumsuz yönde etkilemektedir [22]. Uzun süreli çalışacak sistemler göz önünde bulundurulduğunda bu gibi olumsuz etkiler zamanlama kritik bir çalışmada üzerinde durulması gerekli başlıca sorunu oluşturmaktadır.

Bazı senkronizasyon çalışmalarında yüksek doğruluğundan dolayı GPS kullanıldığı görülmektedir. GPS yardımı ile 1 saniyelik zamanlama hatası düşük sinyaller alınabilir [23]. Fakat metal üzerindeki sesin yayılım hıız düşünüldüğünde, 1 saniyelik sinyal mesafe tahmini için çözünürlüğümüzü oldukça düşürecektir. Bu çalışmada buna alternatif olarak LoRa ile sürekli bir zaman kontrolü ve gerekirse iki sensör tarafında da zamanı sıfırlama öne sürülmektedir.

Sensörleri okumak için gerekli olan mikroişlemci ile birlikte RTC 1ms'lik sinyal oluşturulabilmektedir. Bu görece daha kararlı bir referanstır [24]. Buna rağmen yapılan

deneylerde iki farklı işlemcinin RTCsi çalıştırıldığında zamanla kararsızlık gözlemlenmiş ve iki farklı işlemci arasında ki senkronizasyonun bozulduğu gözlemlenmiştir. Burada amaç iki sensör arasındaki senkronizasyonu oluşturan bu saatin doğruluğunu korumak olduğundan çözüm olarak LoRa düşünülmüştür. Fakat LoRa'nın beraberinde getirdiği yüksek time on air değerleri göz önünde bulundurularak algoritma oluşturulmalıdır. Bu değer yayılım faktörü arttıkça artmaktadır [25].

Eğer bir sensör diğerine o anki zamanını yollayacaksa, bu zamana paketin iletim süresini ekleyip alıcıya iletmelidir. Bu şekilde alıcı, vericinin zamanını öğrendiğinde, verici paketin havada kalma süresi kadar zaman geçirmiş olacaktır. Böylece alıcı kendini senkron ettiğinde, verici ile aynı zamana sahip olacaktır.



Şekil 2.8. İki sensör arası zamansal senkronizasyonun temsili

Şekil 2.8'de görüldüğü gibi sensörler arası zaman farkı oluşacaktır. Senkronizasyonu yeniden sağlamak için verici iletilecek paketin iletim süresini bildiği için, kendi zamanına bu süreyi ekleyip karşıya yollamaktadır.

(2.2)

$$\text{[illegible]} = \text{[illegible]} +$$

$$\text{[illegible]}$$

Mesafe kestiriminin çözünürlüğünü artırmak için milisaniye olarak artan zamanımızı, kullandığımız mikroişlemcinin sistem saatinden faydalanarak mikrosaniye çözünürlüğe

yükseltebiliriz. Böylece kestirim yapmak için çözünürlüğümüz artacaktır fakat bu durumda kararlılığı sağlamak daha da zorlaşacaktır.

2.5. Paket İletim Süresinin Hesaplanması ve Uygulanması

LoRa tarafındansunulan paketin havada kalma süresi (2.3) formulünden faydalanarak paket yollanmadan veya alınmadan önce bu süre hesaplanmalıdır. Bu sayede, iki sensörden gelen bilgi işlenirken bu zaman hesaba katılır ve ses kaynağının sensöre gerçek ulaşma süresi elde edilebilir. Bunun için Semtech çipleri için sunulan (2.3) eşitliğinden faydalanılır [29].

$$\text{Süre} = (\text{Pr} + 4.25) * \frac{2^{SF}}{W} + (8 + max(ceil(\frac{8PL - 4SF + 28 + 16 - 20H}{4(SF - 2DE)})(CR + 4), 0)) * \frac{2^{SF}}{W} \quad (2.3)$$

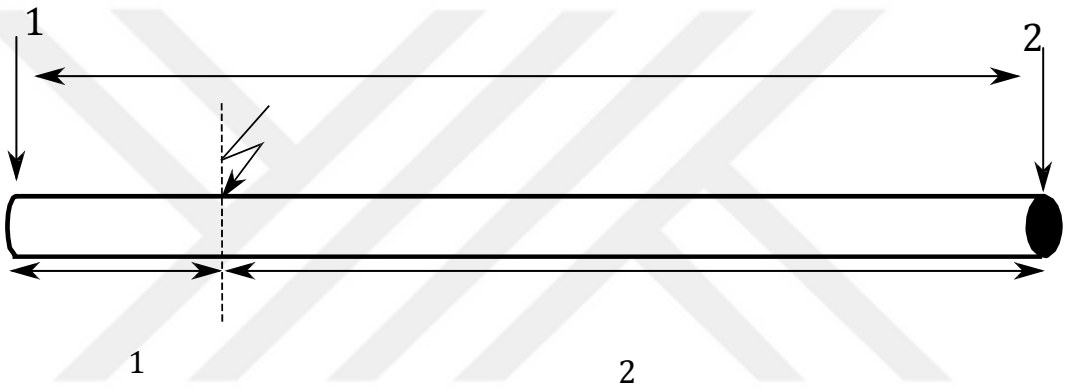
Bu eşitlikte:

- Pr programlanan preamble miktarınının ne olduğunu temsil eder.
- PL, paket büyüklüğünü verir.
- H, 0 ve 1 olmak üzere iki değer alır ve headerın olup olmadığını gösterir.
- DE, 0 ve 1 değerlerini alarak düşük data modunun açık olup olmadığını belirtir.
- W, paket genişiğinin değeridir.
- SF, yayılım faktörü(spreading factor) değerini gösterir.
- CR, kodlama oranını belirtir.

Bu formülü uygulamada kullanırken C dili ile program içerisinde hesaplanmaktadır. Ek 1.'de sunulmuştur.

2.5. Katı Cisimler Üzerinde Ses Kaynağı Etkisinin Simülasyonu

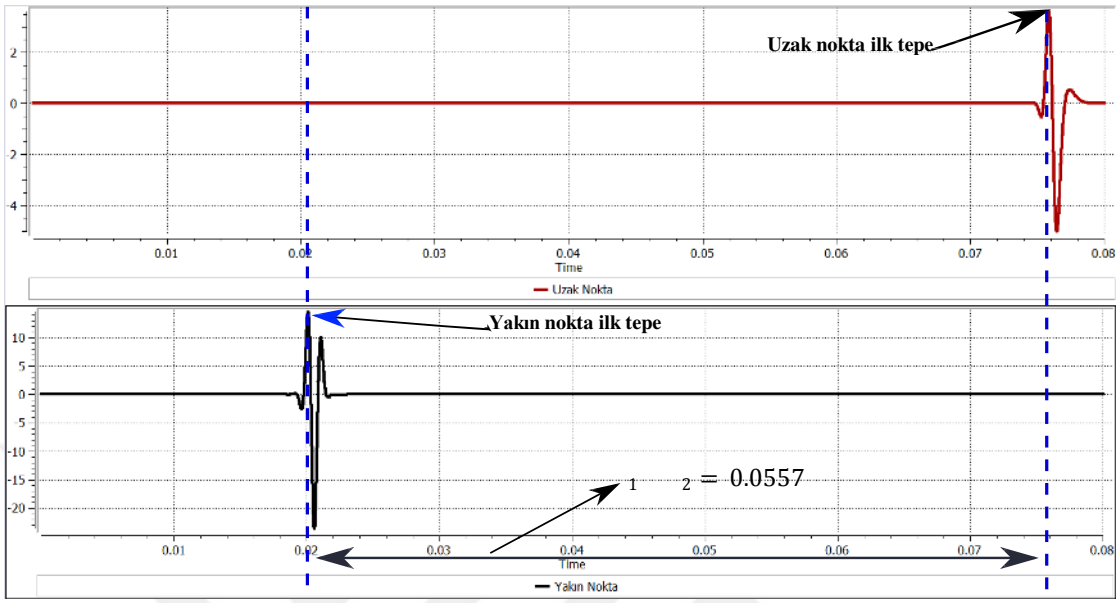
OnScale programı aracılığıyla çelik bir malzeme üzerine uygulanan basınç simüle edilmiştir. Daha sonrasında bu basınç ile oluşan sinyal iki noktadan gözlemlenmiştir. Sinyallerin ölçülen noktaya ulaşma zamanları farkından faydalanılarak, basınç uygulanan noktanın tahmini yapılmışıtır.



Şekil 2.9. Simüle edilen metalin temsili

Şekil 2.9'da görüldüğü üzere basınç uygulanan nokta bir noktaya daha yakın. Üzerine çalışılan metal boru simulasyonda çelik olarak kabul edilmiştir. Her metalin üzerinde sesin dağılım hızı farklı olduğundan, uzaklığı bulmak için yapılan algoritmada bu değer değiştirilmelidir. Simulasyon gerçekleştirilirken metal yüzeyde ses hızı; v=5900m/s olarak kabul edilmektedir. Metal borunun bir noktasından uygulanan basınç ile yayılan sinyal iki farklı noktadan ölçülmüştür. Bu noktalarda oluşan sinyalin, ilk tepe noktası işleme katılarak, noktalar arasındaki uzaklık bulunabilmektedir. Denklem (2.4) yardımıyla noktalar arasında ki uzaklık bulunduktan sonra metal borunun toplam uzunluğu bilindiği için ses kaynağının mesafesi kestirilebilir.

$$\Delta x = v * \Delta \tag{2.4}$$



Şekil 2.10. Metal üzerinde iki farklı noktada ölçülen sinyaller

Simulasyonda metalin boyu 500 m, eni ise 10 cm olarak girilmiştir. $x_1 = 100$ ve $x_2 = 400$ olacak şekilde simülasyon çalıştırılmıştır. Şekil 2.10'da, aşağıda bulunan grafikte incelendiği üzere, metale uygulanan basınç sonucu oluşan sinyal t_1'e t_1 sürede ve daha erken ulaşmıştır. Tam tersi olan t_2'ye t_2 sürede ulaşmıştır ve geç ölçülmüştür.

$$\Delta = |t_1 - t_2| \tag{2.5}$$

Denklem (2.5)'den faydalanılarak sinyaller arasındaki zaman farkı hesaplanmıştır ve sonuç 0,0557 olarak belirtilmiştir. Bulunan zaman farkı (2.4)'de yerine koyularak $\Delta x = |x_1 - x_2|$ denkleminin toplamı sonucu x_1 veya x_2 bulunabilir.

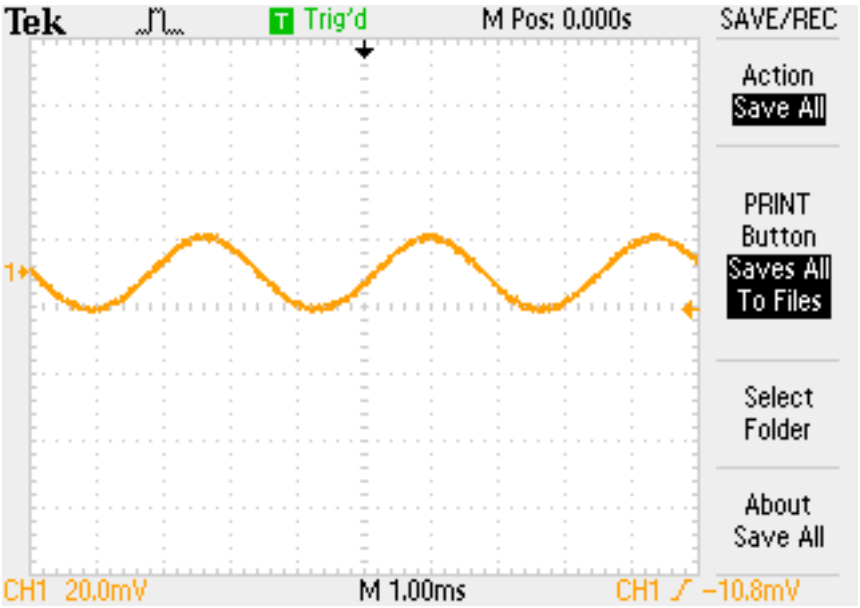
Hesaplamaların sonucunda, x_1 uzunluğu 86 ve x_2 uzunluğu 414 olarak bulunmuştur. Simülasyon sonucunda tahmin edilen sinyal kaynağı noktası 14 şaşmıştır. Daha önce ki

simülasyonlardan elde edilen tecrübeye göre metalin boyu uzadıkça bu hata miktarı artmaktadır. Daha kısa metallerde alınan ölçümlerde daha doğru kestirimler elde edilmişti.

Sinyalin yayılım mesafesi uzadıkça zayıfladığı simülasyonda gözlemlenebilmektedir. Yapılan çalışmalarda sensörde önce güçlü bir yükselteç kullanılarak sahip olunan sinyal güçlendirilmiştir ve okunması daha kolay hale getirilmiştir.

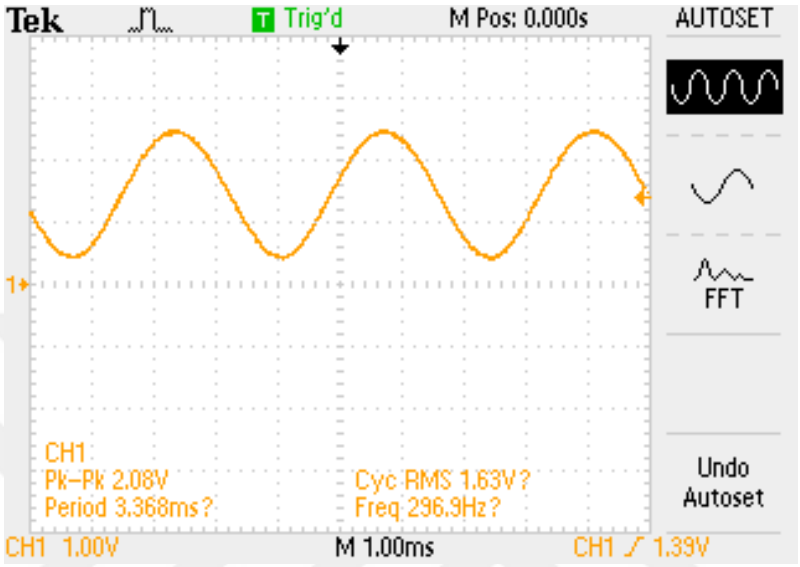
2.5. Yükselteç Devresinin Kazanç İncelenmesi

Yapılan yükselteç devresinin girişindeki sinyalin frekansı değiştikçe, çıkıştaki kazanç kullanılan op-amp'ın karakteristiğine göre değişmektedir. Tasarlanan devrenin de böyle bir davranışı olduğu bilindiği için bahsi geçen karakteristiği çıkarılmıştır. Şekil 2.11'de görüldüğü gibi belirli bir sinyal sinyal üreteci ile yükselteç girişine verilen sinyal görünmektedir.



Şekil 2.11. Yükselteç öncesi giriş sinyalinin osiloskop ile görüntülenmesi

Girişteki sinyalin tepeden tepeye gerilimi 20mV, frekansı ise yaklaşık 80Hz'dir. Yükseltecin çıkışındaki sinyal ise Şekil 2.12.'de görülmektedir.



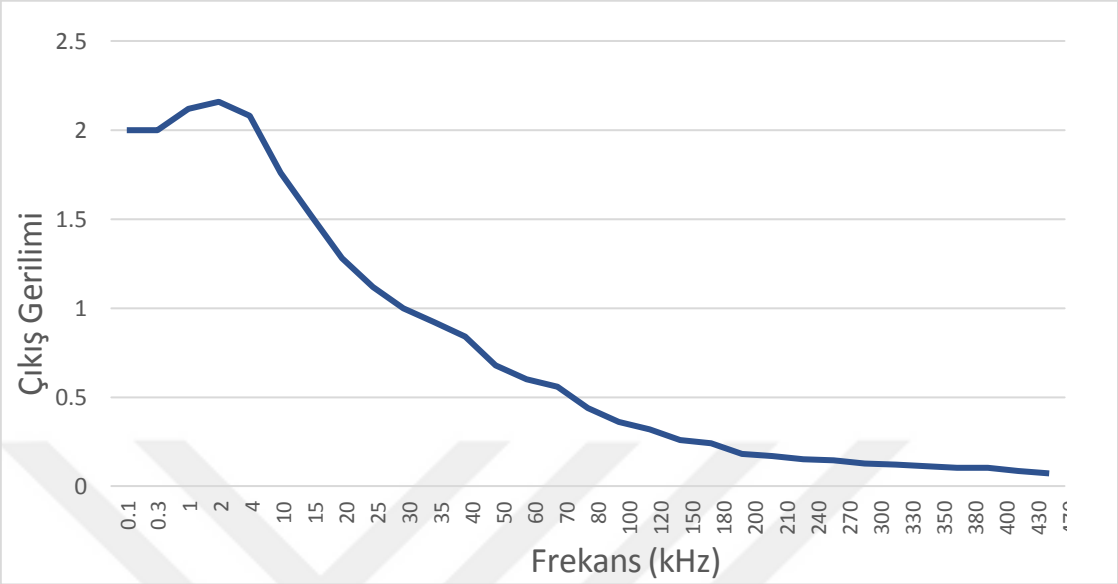
Şekil 2.12. Yükselteç çıkışı sinyalin osiloskop ile görüntülenmesi

Bundan yola çıkarak farklı frekanslar için çıkış gerilimi ölçülerek frekans-gerilim grafiği için veriler toplanmıştır. Elde edilen çıkış gerilimleri Tablo 2.3'de belirtilmiştir.

Tablo 2.3. Ölçümlenen frekan ve gerilim değerlerinin yanı sıra kazançlar

Frekans(kHz)	**Gerilim(V)**	**Kazanç**	**Frekans(kHz)**	**Gerilim(V)**	**Kazanç**
0.1	2	100	80	0.44	22
0.3	2	100	100	0.36	22
1	2.12	106	120	0.32	16
2	2.16	108	150	0.26	13
4	2.08	108	180	0.24	13
10	1.76	88	200	0.18	9
15	1.52	76	210	0.168	8.4
20	1.28	76	240	0.152	7.6
25	1.12	56	270	0.144	7.2
30	1	50	300	0.128	6.4
35	0.92	50	330	0.12	6
40	0.84	42	350	0.112	5.6
50	0.68	34	380	0.104	5.2
60	0.6	34	400	0.104	5.2
70	0.56	28	430	0.084	4.2
			470	0.072	3.6

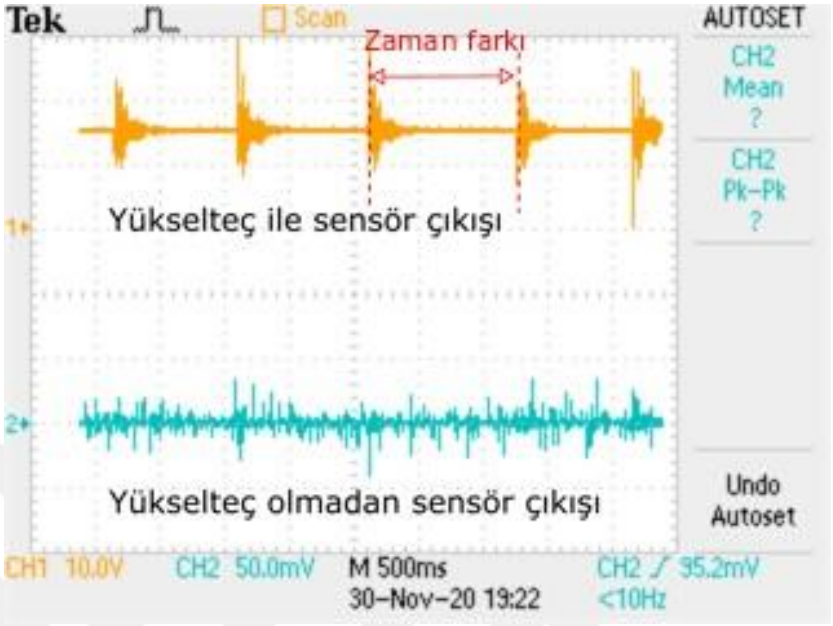
Tablo 2.13’de devre çıkışındaki gerilime göre kazançlar görülmektedir. Buna göre freakans arttıkça kazanç düşmektedir. Şekil 2.13’de bu kazanç eğrisi görülmektedir.



Şekil 2.13. Frekans-gerilim grafiği

2.5. Yükselteç Devresinin Piezoelektrik Sensör Çıkışına Etkisi

Gerçeklenen yükselteç bir piezoelektrik sensör çıkışına bağlanarak, osiloskop yardımı ile kazanç gözlemlenmiştir. Şekil 2.10'da görüldüğü üzere iki farklı sinyal ölçülmüştür.



Şekil 2.14. Sensör ve yükselteç çıkışı okunan sinyaller

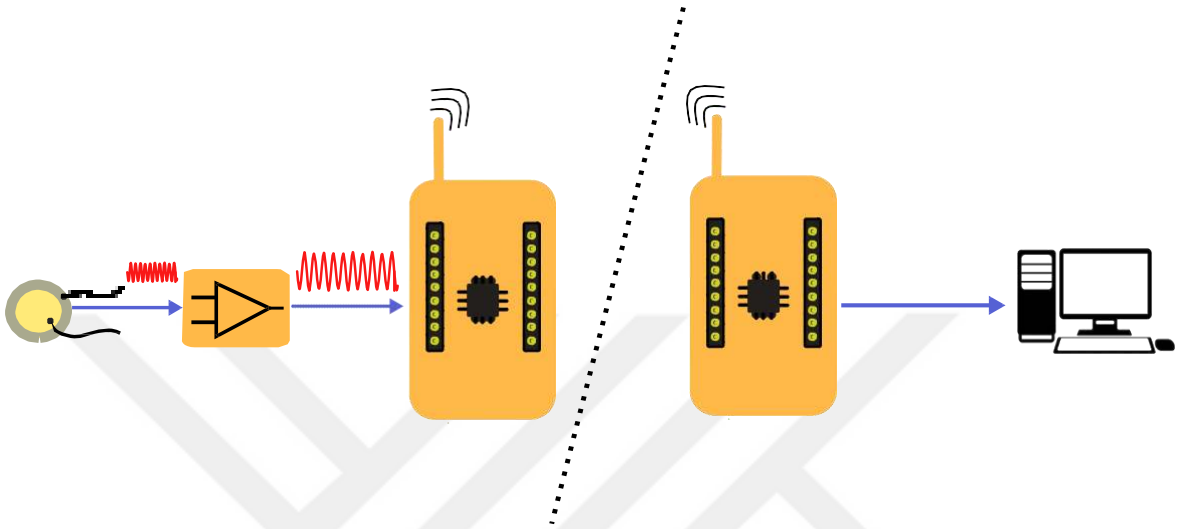
Buna göre sensör 5 kez titreşim ölçülmüştür. Üstte görünen sinyalde açıkca görülmektedir. Altta bulunan ve direk olarak sensör çıkışından okunan sinyalde ise bu vuruşlar gözlemlenememektedir. Bunun yanı sıra direk olarak sensör çıkışında ölçülen sinyalin gürültüsü göze çarpmaktadır. Yükselteç çıkışında bu gürültüler daha düşük seviyelerde çıkışa yansımaktadır. Bahsi geçen gürültüler yükselteç tarafından yükseltilmeyerek titreşim zamanları daha net şekilde görülmektedir.

Şekil 2.14'de vuruş anları arasındaki farkta açıkca görülmektedir. Kırmızı ile belirtilen iki sinyal arasında ki fark yaklaşık 900 ms'dir. Tek bir karenin 500 ms olduğu osiloskop bilgi ekranında görülmektedir.

2.5. Kablosuz İletişimin Sağlanması

ST tarafından sunulan B-L072Z-LRWAN1 geliştirme kitinin kullanıldığından daha öncesinde bahsedilmişti. İki kit ile sağlanan iletişimin bir tarafında ADC ile sensör okunur,

kablosuz olarak diğer tarafa, diğer kite iletilir. Burada alınan bilgi bilgisayara UART ile iletilir. Şekil 2.15'de sistem temsilen gösterilmiştir.



Şekil 2.15. Çalışma sistemi temsili görüntüsü

ADC ile sensör okuması yanı sıra RTC ile zamanın ölçülmesi gibi işlemler ST tarafından sunulan donanımsal soyutlama katmanı ile yapılmıştır. Kablosuz aktarım ve alım ile görevli yazılım ise Semtech tarafından sunulan kütüphanelerin HAL içerisine gömülmesi ile sağlanmıştır.

2.10. Yazılım

Sistemin çalışması için ST tarafından sunulan kütüphanelerin yanı sıra kullanıcı tarafından milisaniye, mikrosaniye ve nanosaniye okunan kütüphaneler yazılmıştır. Ayrıca kablosuz haberleşme için paket yapıları ve zamanın belirlenmesi için kütüphaneler tanımlanmıştır. Atollic TrueStudio ortamında geliştirmeler yapılmış olup CubeMX ile taslak proje üzerine değil, LoRa radyosu kütüphanelerinin olduğu taslak proje üzerine kütüphaneler eklenerek geliştirmeler yapılmıştır. Taslak proje B-L072-LRWAN1 kitine uygun kaydedicileri ve çevre birimlerini içerdiğinden sadece bu kit için uygundur.

2.10.1. Geliştirme Platformu

STM32L0 ST tarafından sunulan özellikle kablosuz haberleşmeler için sunulan düşük güçlü bir mikrodenetleyicidir. ARM-Cortex-M ailesinden olan bu mikrodenetleyicinin dahili donanımlarının kapsamından dolayı kaydedici düzeyinde geliştirme yapmak zordur. ARM Cortex-M mikroişlemcileri için sunulan CMSIS ve HAL kütüphanelerinin kullanılması proje geliştirme süresini kayda değer biçimde düşürmektedir [28]. Proje karmaşıklığına göre gerçek zamanlı işletim sistemi kullanılmasıda uygun olaiblir. Ancak, bu projede öyle bir durum söz konusu olmadığı için böyle bir çözüme gidilmemiştir.

2.10.1. Donanımsal Soyutlama Katmanı

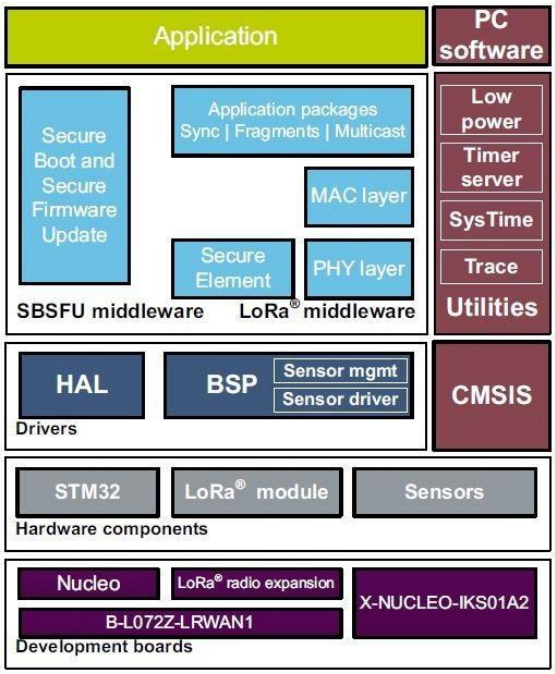
HAL kütüphanesi ST tarafından geliştirildiği için şirket tarafından sunulan mikroişlemciler ile tam uyumlu çalışmaktadır. Fakat driver kullanılması beraberinde bazı dezavantajları getirmektedir. Kullanıcı mikrodenetleyici kaydedicilerine direk olarak ulaşabileceği için geliştirilen yazılım o mikroişlemciye özel olur ve tam performans alınması sağlanır.

HAL tarafından sunulan ve proje kapsamında kullanılan sürücüler aşağıda sıralanmışıtr:

- I2C Driver : I2C sürerek ekran kullanımı
- RTC Driver : Real Time Clock okunarak süre elde edilmesi
- UART Driver : Paketlerin bilgisayara iletilmesi
- SPI Driver : SX1276 ile mikroişlemci haberleşmesi
- ADC Driver : analog bilginin dijital olarak elde edilmesi
- PAL Driver : çevre birimlerinin kontrol edilmesi

Sürücüler sayesinde istenilen zamanda kolayca donanımlara ulaşılması sağlanır. Bu sayede kullanıcı kolay şekilde proje için donanımları sisteme entegre edebilir ve üzerine hakimiyet sağlar.

Varsayılan olarak kullanılan HAL sürücüsü yanı sıra Semtech entegresinin ST mikrodenetleyicisi ile kullanılması için STM32Cube I-CUBE-LRWAN [32] kütüphanesi de proje içerisinde yer almaktadır. Bunun amacı SX1276 ve mikrodenetleyici haberleşmesinin kolaylaştırılmasıdır. Bu kütüphane HAL üzerine yazılmış bir kütüphanedir.



Şekil 2.16. I-CUBE-LRWAN yazılımsal katmanların temsili

Görsel olarak Şekil 2.16'da sunulan yapı ST tarafından sunulan LoRa ve LoRaWAN kütüphaneleri için geçerli katmanları temsil etmektedir.

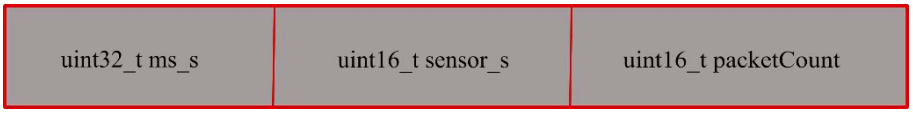
2.10.3. Paket Yapısının Oluşturulması

Yollanacak paket yapısı zamanın ve okunacak sensörün nasıl yollandığını yönettiği için önemlidir. Paketin yapısı program içerisinde yapısal olarak tanımlanmıştır. İşaret paketinin, karşı taraftan doğru şekilde okunması için verici ve alıcı tarafta yapı aynı şekilde inşa edilmiştir.

İşaret paketi aşağıda bulunan iblgileri içermektedir.

- Milisaniye : 32 bitsiz işaretsiz integer
- Saniye : 8 bitlik işaretsiz integer
- Dakika : 8 bitlik işaretsiz integer
- Saat : 8 bitlik işaretsiz integer
- Sensör : 16 bitlik işaretsiz integer

Bu paket yapısı zamanın her birimini ayrı ayrı yollamaktadır. Bu alıcı tarafta okuma sırasında alınan paketin işlenmesi sırasında işlem yüküne sebep olabilmektedir. Bu sebeple alıcı tarafta toplam olarak milisaniye cinsinden alınacak paket yapısıda yazılıma eklenmiştir. Bunun için öncelikle verici tarafta tüm zaman milisaniye cinsinden hesaplanmaktadır. Daha sonrasında aşağıda görselleştirildiği üzere paket yapısı oluşturulmuştur. Şekil 2.17'de görülen bu pakete ayrıca paket sayacı eklenmiştir. Bunun amacı paketleri verici tarafta lineer olarak artırarak, alıcı tarafta kaç paket eksik geliyor, hangi paketler eksik gelmiş gibi soruların çözümlerini kolaylaştırmaktır.



Şekil 2.17. Alıcı tarafta ayrıştırılması kolay paket yapısı

Bahsi geçen paket LoRa için paket yükünü ifade etmektedir. Bu pakete varsayılan olarak ve kullanıcı tarafından belirlenen paketlerde eklenerek yollanmaktadır.

Bütün olarak gelen paket, verici tarafta oluşturulan paket ile alıcı tarafta oluşturulan paketin aynı olması sayesinde parçalarına ayrılır ve gerekli veriler çıkarılır. Bunun için işlemcinin belleğindeki data LoRa alıcısı 8'er bit kaydırılır.

Oluşturulmuş paketlerin geliştirici ortamındaki görüntüleri Ek-2'de yer almaktadır.

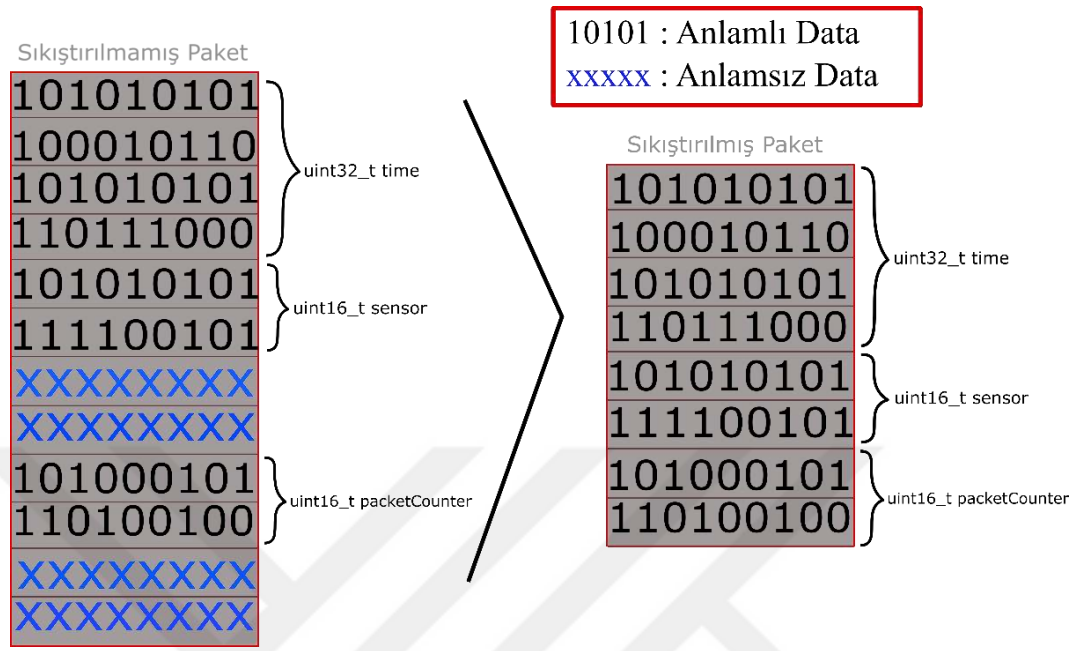
2.10.1. Alınan Paketin Okunup Ayrıştırılması

Paket Şekil 2.18'de görüldüğü üzere yapı şeklinde gönderildiği için bu paketin alıcı tarafta ayrıştırılıp işlem için hazır hale getirilmelidir. Bunun için yazılımda hafıza içerisinde olan datalar sola 8 bit kaydırarak paket dışa aktarılır.

```
void rec_packet (uint8_t Buffer)

{

uint32_t time = Buffer[0] | (Buffer[1] << 8) | (Buffer[2] << 16) | (Buffer[3] << 24);

uint16_t sensor = Buffer[4] + (Buffer[5] << 8);

uint16_t packetCounter = Buffer[6] + (Buffer[7] << 8);

}
```

Şekil 2.18. LoRa radyosu ile alınan paketlerin çözümlenmesi

Alınan paketleri LoRa radyosu 8 bit olarak SPI üzerinden ilettiği için bu paketleri direk olarak kullanmak mümkün değildir. Bu paketleri işlem yapmaksızın kullanmak sadece 8 bitlik değişkenler kullanarak mümkün olabilir. Fakat bu proje bazında böyle durum söz konusu değildir. Şekil 2.19'da görüldüğü üzere verilerimiz 32 ve 16 bit olarak tanımlanmıştır. Bu sebeple içerisine verileri aldığımız tampon alanı 8 bit şeklinde sola kaydırarak ve toplayarak ana verimizi elde etmiş oluruz. STM32L0 işlemcisinin belleğinin baytları düşük son haneli (little endian) olarak kodladığı bu işlem sırasında hatırlanmalıdır. En düşük olarak numaralandırılmış en önemsiz bayt iken, en yüksek numaralı bayt en anlamlı veridir [33].



Şekil 2.19 Paket yapıları

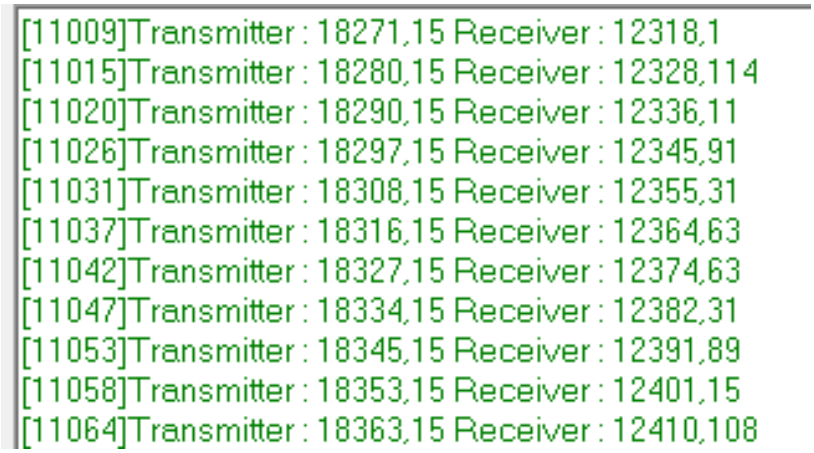
C ve C++ dilinde yapı oluşturma sırasında varsayılan olarak değişkenler arasında boşluklar bırakır[34]. Şekil 2.19'da sol paket yapıısnda tanumladığımız değişkenden bağımsız olarak bilgiler 32 bitlik bir yapıda tutulmaktadır. Örnek olarak 16 bit bir bilgiyi tutmak için ayrılan bellek bölgesinin kalan 16 bitlik kısmı anlamsız ve rasgele bilgiden oluşmaktadır. Bu durumu GNU tarafından sunulan _ *attribute ((packed))* öznitelilik sembolü ile birleşik hale getiririz. Aksi halde ilk durum alıcı kısımda paketi dışarı aktarma sırasında zorluk yaratmaktadır. Bu sebep ile Şekil 2.20'de görüldüğü üzere yapı sonuna *öznitelilik* eklemek yararlı olacaktır. Bununla birlikte veriler arasında güvenlik boşlukları ortadan kalkmış ve değişkenler aralıksız olarak hafızada ardı sıra sıralanmış olur.

```
struct ms_packet{
        uint32_t ms_s;
        uint16_t sensor_s;
        uint16_t packetCount;
```

Şekil 2.20. Değişkenler arası güvenlik boşlukları kaldırmak için uygulanan öznitelilik

2.10.1. Alınan Paketlerin Bilgisayar Arayüzü ile Görüntülenmesi

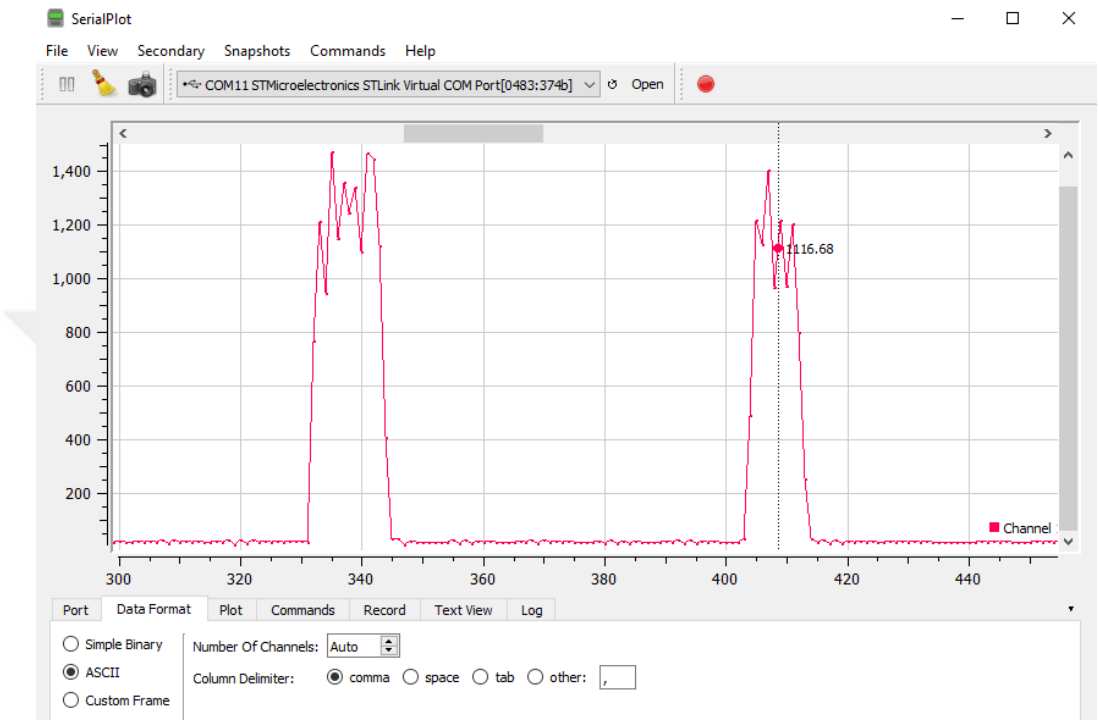
Elde edilen veriler COM Port üzerinden bilgisayara ulaştırılarak gözlemlenmektedir. Bu bilgiler isterse anlık olarak gerçek zamanlı biçimde gözlemlenir ve bununla birlikte istenilen durumlarda kayıt altına alınarak üzerinde çalışılabilir. Örnek olarak alınan paket Şekil 2.21'de görülmektedir.



Şekil 2.21. Mikroişlemciden alınan verilerin bilgisayarda görüntülenmesi

Kare parantez içerisinde paket sayacı görülmektedir. Daha sonrasında karşı kitten alınan zaman değeri ve hemen yanında analog verinin ADC ile örneklenmiş hali ekrana basılmaktadır.

En son ise alıcı taraftaki zaman verisi ve yine sensörden okunan verinin ADC ile örneklenmiş hali virgül ile ayrılmış olarak görülmektedir.

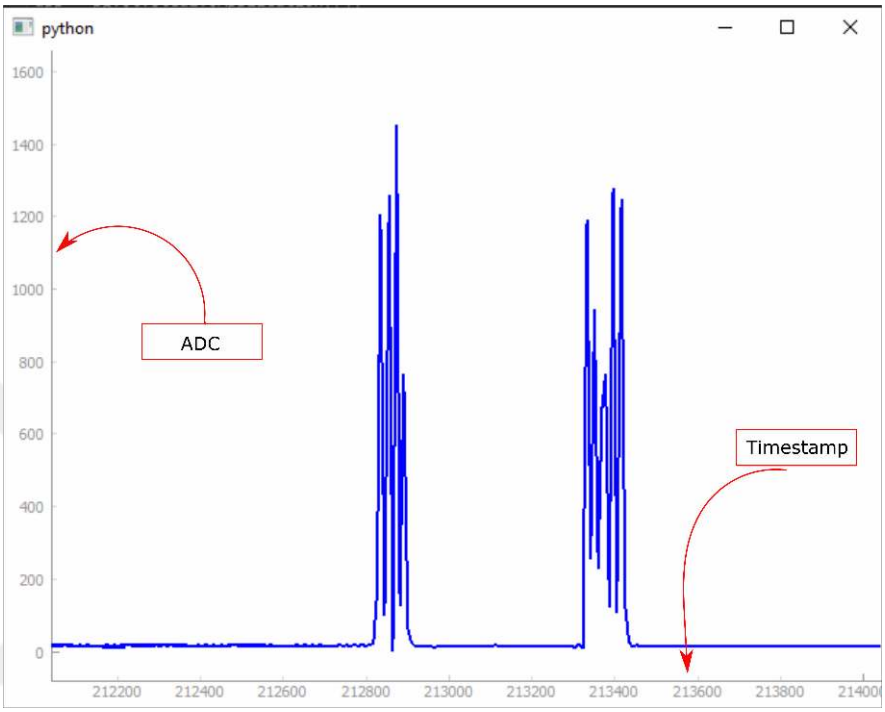


Şekil 2.22. ADC verisinin grafik olarak gerçek zamanlı çizilmesi

ADC datasının grafiksel bir arayüze aktarılıp çizilmesi SerialPlot programı ile mümkündür. Bu programa ASCII olarak yolladığımız datalar çok yüksek hıza rağmen atlama yapmadan çizilmektedir. Özellikle artışlar ve azalışları anlık olarak gözlemlemek için kullanışlı bir yöntem olarak bu programda çalışmalarda çok kere kullanışmıştır. Şekil 2.22'de örnek bir okumanın görseli göürnmektedir. İşaretsiz olarak tanımlanan değişken sebebi ile 0 ile 4096 arası örnekler görülebilmektedir. Bu durum işlemcinin 12 bit örneklemeye sahip olmasından kaynaklanmaktadır.

Yapılan çalışmada sensör verisinin yanı sıra bu verinin hangi zamanda geldiği daha fazla öneme sahip olduğu için gerçek zamanlı grafik çiziminde zaman ekseninde değişen ADC örneklemesini görmek uygulamanın amacına daha uygundur. Bir önceki çözüm yatay eksende örnek sayılarını göstermektedir. Fakay gerekli olan görsel arayüz yatay eksende zamanı ve bu

zamana karşılık gelen sensör verisini ekrana yansıtmalıdır. Bunun için Python kullanarak basit bir arayüz tasarlanmıştır.



Şekil 2.23. Gerçek zamanlı zaman-sensör grafiği çizen program

Şekil 2.23'de görülen grafikte y ekseni sürekli olarak değişken zamanı, x ekseni ise bu zamana karşılık gelen ADC ile örneklenmiş sensör bilgisini göstermektedir.

Yazılımda kullanılan Python kütüphaneler şunlardır:

- Numpy :Özellikle diziler ile çalışmada kolaylık sağlar [35]
- Pyqtgraph : Qt tarafından sunulan grafik çizim kütüphanesi [36]
- Serial : serial port okumak için kullanılan kütüphane [37]
- Scipy : Numpy kütüphanesini temel alan matematiksel kütüphane [38]

Ek-3 bölümünde yazılım öbeği dökümana eklenmiştir.

3. BULGULAR

3.1. RSSI Sonuçları

LoRa sınırlarının belirlenmesi testlerinde çıkan sonuçlar bu bölümde verilecektir. Buna göre Tablo 3.1'de görülen değerler farklı mesafeler için 3 farklı yayılım faktörüne göre değişiklik gösteren duyarlılık değerlerini göstermektedir. Bazı noktalarda hassasiyet sınırları aşıldığı için bağlantı kopmuş ve iletişim kesilmiştir. Bu noktalar gri ile taranarak gösterilmiştir. Semtech tarafından teorik olarak -136 dBm verilen en düşük hassasiyet değerine bahsi geçen test aşamalarında ulaşılmıştır. Bu bakımdan özellikle girişimin yüksek olduğu bölgelerde LoRa radyo haberleşmesinin uygun olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 3.1. RSSI test sonuçları(dBm)

Mesafe(mt) / SF	1 (651)	2 (371)	3 (944)	4 (1120)	5 (1910)	6 (220)
7		-105	-105	-112		
10	-113	-113	-125	-122		
12	-126	-109	-125	-129	-133	-126

Hassasiyet değerlerine ek olarak yayılım faktörü ve iletişim mesafesi arasındaki ilişkiye dair sonuçlar da test sırasında elde edilmiştir. Teorik olarak bahsi geçen mesafeler direk görüş olmayan bu test noktalarında test edilmiştir. Buna göre düşük yayılım faktörü ile ayarlanmış iletişim, yüksek yayılım faktörü ile ulaşılan noktalara ulaşamamıştır. Tablo 3.1, daha önce ilk bölümde sunulan Tablo 1.1 ile karşılaştırılarak teorik ve pratik sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ek olarak, direk görüş olan iletişimlerde bu mesafelerin daha da uzayacağı açıktır.

3.1. SNR Sonuçları

Sinyali bozacak her türlü etken gürültü olarak kabul edilmektedir. Sinyal-gürültü oranı (SNR) alınan sinyal gücü ile gürültü tabanı gücü arasındaki oranı belirtir. LoRa radyo haberleşmesinde bu gürültü tabanı düşüktür. Bu sayede gürültünün fazla olduğu iletişim koşullarında da demodülasyon yapıp iletişim sağlayabilir. Tablo 3.2'de pratik çalışmalar sırasında elde edilen SNR değerleri görülmektedir.3 farklı SNR değeri için farklı noktalarda ölçülen SNR değerleri görselleştirilmiştir. Bu değerler modül tarafından hesaplanarak kullanıcının kullanımına sunulmaktadır. Çalışmada bu değerler bilgisayar terminali ile gözlemlenmiştir.

Tablo 3.2. SNR test sonuçları

Mesafe(mt) / SF	**1 (651)**	**2 (371)**	**3 (944)**	**4 (1120)**	**5 (1910)**	**6 (220)**
7		-4	-5	-9		
10	-7	-9	-16	-16		
12	-8	0	-12	-17	-15	-13

Giriş bölümünde verilen Tablo 1.2 de görselleştirilmiş SNR değerleri ile Tablo 3.2 karşılaştırıldığında firma tarafından verilen verilerin uyumu görülmektedir. Gri ile renklendirilmiş noktalarda iletişim sağlanamadığı görülmektedir. Burada dikkat çekici olan bir nokta vardır. Tablo 1.2'de yayılım faktörü 7 için maksimum değer olan -7.5 değerinin üzerine 4 noktasına -9 SNR elde edilerek çıkılmıştır. Bu durumda iletişim başarıyla sağlanmıştır.

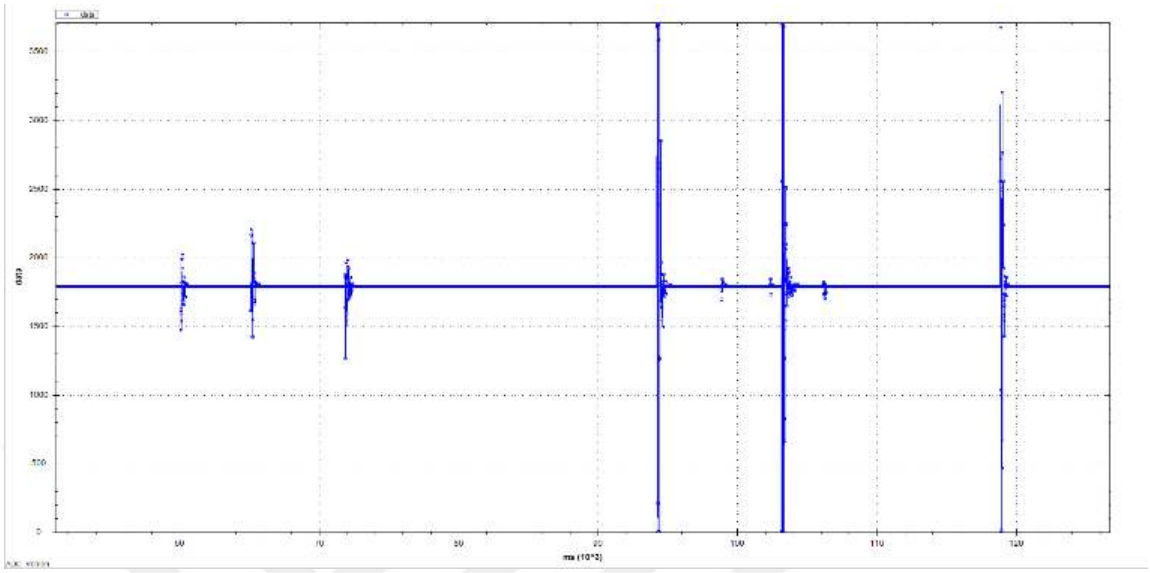
3.1. Sistem Ölçüm Sonuçları

Simülasyon çalışmasına benzer şekilde yapılan pratik çalışmada yaklaşık 10 cm genişliğinde ve 100 metre uzunluğunda bir demir üzerinde denemeler yapılmıştır. Deney ortamı

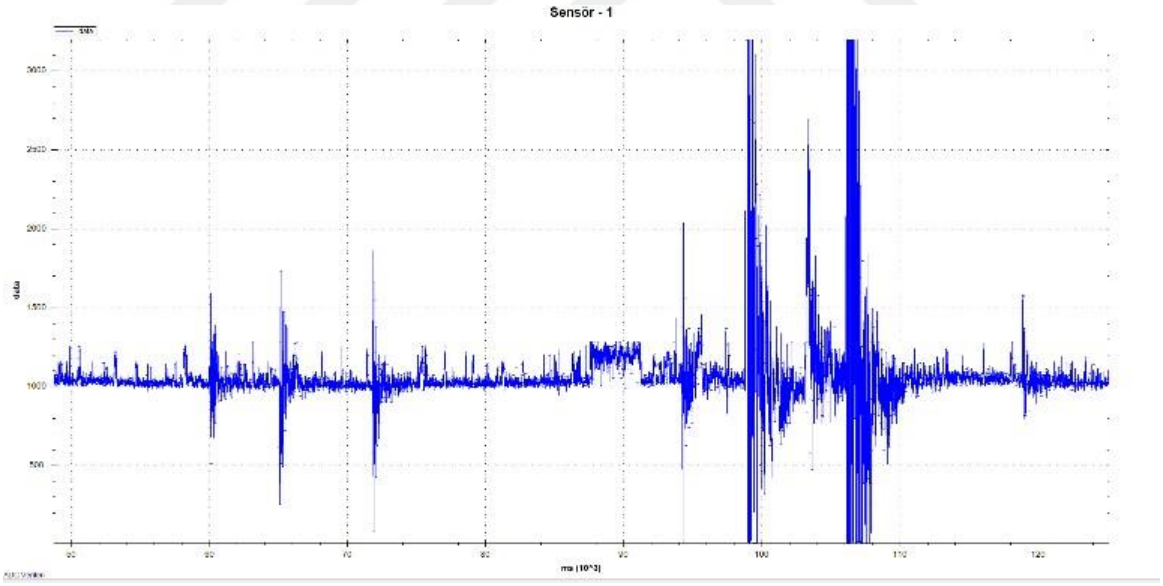
Şekil 3.1'de görülmektedir. İki uca yerleştirilen sensörlere gelen sinyaller 12 bit ADC'ye sahip mikroişlemci tarafından örneklenmiştir.

Şekil 3.1. Deney setinin kurulumu ve gerçekleştirilen ortam

Çalışma esnasında ST tarafından sunulan ve Semtech SX1276 LoRa çipine sahip B-L072Z-LRWAN1 geliştirici kiti kullanılmıştır. Bu geliştirici kiti STM32 ailesinden kablosuz uygulamalar için uygun olan düşük güçlü bir mikrodenetleyici kullanmakdadır.



Şekil 3.2. Sensör-2 ile okunan sinyalin RTC ile oluşturulan zamana göre çizimi



Şekil 3.3. Sensör-1'den gelen verilerin RTC ile oluşturulan zamana göre çizimi

Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'de görüldüğü üzere iki sensör ile de benzer sinyaller dinlenmiştir. Toplamda metal üzerine vurulan 6 noktada çok net şekilde görülmektedir. Sinyallerin gücünü göz önünde bulundurduğumuzda, uzun boylu metal üzerinde de sensörlerin, özellikle yükseltecin etkisiyle, kestirim yapmak için yeterli sinyalleri elde edilebileceği tahmin

edilmektedir. Deneyde karşılaşılan sonuçlardan yola çıkarak; işlemcilerin senkron şekilde açılmasının zorluğu gözlemlenmiştir. Bunun çözümü için cihazlar arasında ilk açılan, diğerinden gelen senkronizasyon verisini bekleyebilir. Bu durumda daha önce belirtilen (2.2) dikkate alınmalıdır. ADC çözünürlüğü daha yüksek bir işlemci ölçümlerin hassasiyetini artıracağından, bu gibi hassasiyet hedefi olan bir çalışma için kritik önem taşımaktadır. RTC ile saat, dakika, saniye, milisaniye elde edilebildiğinden bu zamanın milisaniye cinsinden toplanması işlemciye bir yük getirmektedir. Bu zorluk, işlem gücünü artırdığından zamanın çözünürlüğünün azalmasına sebep olmaktadır. Bunun için, işlemci gücünün artırılması, çözümün önemli bir parçası olabilir.

4. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

İlk olarak, LoRa radyosu iletişim sınırlarının belirlenmesi için kentsel ortam içerisinde testler yapılmıştır. Bu çalışmalarda bazı sonuçlar Semtech tarafından verilen veri föyünden daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Buna rağmen, özellikle yoğun kentsel alanlarda gerek binalardan gerekse ağaç gibi iletişimi olumsuz olarak etkileyecek etkenlerden dolayı ulaşılan sonuçlar iletişim mesafesinin düştüğünü işaret etmektedir. İncelenen çalışmalar genelde alıcı ve verici arasında açık görüş mesafesi olan çalışmalar olduğu için yaptığımız çalışma ile pratikte çalışmalar için daha iyi referans olacak sonuçlar elde edilmiştir. Bunun sonucunda bazı çalışmalarda [41,42] ve firma tarafından sunulan teorik sonuçlardan [40] daha kısa mesafelerde iletişimin mümkün olabildiği gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra yapılan testler gürültü performansında sözü edilen çalışmalardan daha iyi değerler sunmuştur. Sonuç olarak, düşük veri iletiminin ihtiyacı karşıladığı uygulamalarda, kablolu sistemler LoRa ile entegre edilirse maddi kazanç sağlanabilir. Çünkü LoRa radyosu ile kilometrelerce mesafelere iletişim sağlanması yerine aynı uzunlukta kablolu sistemler gerek masraf gerekse bakım ve onarım maliyetleri ile yük olabilir. Fakat yüksek veri iletiminin olduğu ve gecikme krıtik uygulamalarda bu teknolojinin kullanımı uygun olmaz.

Ses kaynağı mesafe kestirimi uygulamalarında LoRa çok uzun mesafeler için bir sonuç verebilir. Fakat kısa mesafeler için, ses metal üzerinde çok yüksek hızlarda ilerlediği için doğru sonuçlar elde etmek mesafe kısaldıkça zorlaşmaktadır. Sözü geçen kısa metaller için zaman mikro hatta nano saniye çözünürlüğüne düşürülmelidir ki doğru sonuçlar elde edilebilsin. Fakat bu zaman çözünürlüğü beraberinde sensörler arası zaman eşitlemesini hayli zorlaştırmaktadır. Çünkü zamanın elde edildiği osilatörler zamanla şaşmaktadır. Bu durumda sürekli olarak zaman sıfırlaması ve tekrardan bir eşitleme gerekmektedir. Diğer bir çözüm olarak GPS saati kullanılabilir. GPS 1Hz çözünürlüğünde zaman yollar ve bu zaman ile işlemcimizin zamanını senkron edebiliriz.

5. KAYNAKLAR

1. Chunlei J, Yuan W, The research of natural gas pipeline leak detection based on adaptive filter technology, In Proceedings of 2013 2nd International Conference on Measurement Information and Control, 2013, Bölüm 2:1229-1233.

2. Ng KS, Chen PY ve Tseng YC, A design of automatic water leak detection device. IEEE 2nd International Conference on Opto-Electronic Information Processing, Haziran 2017, Bildiriler Kitabı:70-73.

3. Wang J, Zhao L, Liu T, Li Z, Sun T ve Grattan KT, Novel negative pressure wave-based pipeline leak detection system using fiber Bragg grating-based pressure sensors, Journal of Lightwave Technology, 5(2016), 3366-3373.

4. Noreen U, Bounceur A ve Clavier L., A study of LoRa low power and wide area network technology, International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP), Mayıs 2017,Morocco, Bildiri Kitabı:1-6.

5. Sağır S, Kaya İ, Şişman C, Baltacı Y ve Ünal S., Evaluation of low-power long distance radio communication in urban areas: LoRa and impact of spreading factor. In2019 Seventh International Conference on Digital Information Processing and Communications (ICDIPC), Mayıs 2019, Bildiri Kitabı: 68-71.

6. Gut W, Hilber G, Gruber D, Kaufmann M, Rauchenecker A ve Ostermann T., Low power Real Time Clock with high accuracy over large supply voltage range, In NORCHIP, Kasım 2012, Bildiri Kitabı:1-4.

7. ULP Temperature-Compensated RTC on MSP430F6736 https://www.ti.com/lit/an/slaa596/slaa596.pdf?ts=1600690667669&ref_url=https%253A%252F%252F, Temmuz 2020

8. Tessaro L, Raffaldi C, Rossi M ve Brunelli D., Lightweight synchronization algorithm with self-calibration for industrial LORA sensor networks, Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT, Nisan 2018,Bildiri Kitabı:259-263.

9. Sartori B., Thielemans S., Bezunartea M., Braeken A. ve Steenhaut K., Enabling RPL multihop communications based on LoRa, IEEE 13th International Conference on

Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), Ekim 2017, Roma, Bildiri Kitabı:1-8.

10. LoRa Modulation Basics.Semtech Corporation Wireless Sensing and Timing Products Division, 2015.

11. Knight M, Seeber B., Decoding LoRa: Realizing a modern LPWAN with SDR, In Proceedings of the GNU Radio Conference, Eylül 2016, Bildiri Kitabı 1: 1,2.

12. Lam KH, Cheung CC ve Lee WC., LoRa-based localization systems for noisy outdoor environment, IEEE 13th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), Ekim 2017,Bildiri Kitabı: 278-284.

13. Petajajarvi J, Mikhaylov K, Roivainen A, Hanninen T ve Pettissalo M., On the coverage of LPWANs: range evaluation and channel attenuation model for LoRa technology, 14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST), Aralık 2015, Bildiri Kitabı: 55-59.

14. Thomas T. ve Slats L., Ground breaking world record! lorawan packet received at 702 km (436 miles) distance. https://www.thethingsnetwork.org/article/ ground-breaking-world-record-lorawan-packet-received-at-702-km-436-miles-distance, Eylül 2020.

15. Cisco, Radio Frequency Fundamentals, https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/solutions/Enterprise/Borderless_Networks/Unified_Access/CMX/CMX_RFFund.html, 9 Eylül 2020.

16. Türkoral T., Tamer Ö., Yetiş S., İnanç E. ve Çetin L., Alınan İşaret Güç Göstergesi (RSSI) Metriği Kullanılarak Kapalı Alan Mesafe Kestirimi Indoor Distance Estimation with Using Received Signal Strength Indicator (RSSI) Metric, National Conference on Electrical, Electronics and Biomedical Engineering (ELECO), Mart 2016, Bursa, Bildiri Kitabı:397-401.

17. LoRa Alliance, https://lora-alliance.org/about-lorawan , 9 Eylül 2020.

18. Moubarak P., Ben-Tzvi P. ve Zaghloul ME, A self-calibrating mathematical model for the direct piezoelectric effect of a new MEMS tilt sensor, IEEE Sensors Dergisi 2011, 12,5(Ekim),1033-1042.

19. Li J., Zhao J. ve Rogers J., Materials and designs for power supply systems in skin-interfaced electronics, Accounts of chemical research, 10, 52(2016) 53-62.

20. Semtech,https://semtech.my.salesforce.com/sfc/p/#E0000000JelG/a/2R0000001OJu/xvKUc5w9yjG1q5Pb2IIkpolW54YYqGb.frOZ7HQBcRc, 9 Eylül 2020.

21. ST microelectronics, https://www.st.com/en/evaluation-tools/b-l072z-lrwan1.html, 9 Eylül 2020

22. Taranchuk AA., Pidchenko SK. ve Khoptinskiy RP., Dynamics of temperature-frequency processes in multifrequency crystal oscillators with digital compensations of resonator performance instability, Radioelectronics and Communications Systems, 1, 58(2015) 250-7.

23. Osterdock TN., Kusters JA., Using a new GPS frequency reference in frequency calibration operations, IEEE International Frequency Control Symposium, Haziran1993, 33-39.

24. Park P., Ruffieux D. ve Makinwa K, A Thermistor-Based Temperature Sensor for a Real-Time Clock With 2 ppm Frequency Stability, IEEE Journal of Solid-State Circuits, 50,7 (2015) 1571-80.

25. Adelantado F., Vilajosana X., Tuset-Peiro P., Martinez B., Melia-Segui J. ve Watteyne T, Understanding the limits of LoRaWAN, IEEE Communications magazine, 8,55 (2017) 34-40.

26. Semtech, "SX1272/3/6/7/8 LoRa Modem Design Guide, AN1200.13, Revision 1", Temuuz 2013.

27. LoRa Alliance, LoRaWAN What is it? A technical overview of LoRa and LoRaWAN, https://www.lora-alliance.org/ portals/0/documents/whitepapers/LoRaWAN101.pdf, Kasım 2015,

28. Slabicki M., Premsankar G. ve Di Francesco M., Adaptive configuration of LoRa networks for dense IoT deployments, IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium, Tayvan, Nisan 2018, Bildiri Kitabı: 1-9.

29. Mikkelsen J., LTspice–An Introduction. Technical report, Institute of Electronic Systems, Aalborg University, Aalborg. 2005.

30. http://ltwiki.org/LTspiceHelpXVII/LTspiceHelp/html/Introduction.htm, Eylül 2020.

31. https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html, Ekim 2020.

32. https://www.st.com/en/embedded-software/i-cube-lrwan.html, Ekim 2020.

33. Ultra-low-power STM32L0x1 advanced Arm®-based 32-bit MCUs, https://www.st.com/resource/en/reference_manual/dm00108282-ultralowpower-stm32l0x1-advanced-armbased-32bit-mcus-stmicroelectronics.pdf, Kasım 2020.

34. https://gcc.gnu.org/onlinedocs/gcc-4.8.4/gcc/Structure-Packing-Pragmas.html, Aralık 2020.

35. https://numpy.org/doc/stable/reference/generated/numpy.array.html, Aralık 2020.

36. https://pyqtgraph.readthedocs.io/en/latest/introduction.html, Aralık 2020.

37. https://pythonhosted.org/pyserial/pyserial.html#overview, Aralık 2020.

38. https://www.scipy.org/getting-started.html, Aralık 2020.

39. Ali A., Partal S., Kepke S., ve Partal H., June. Zigbee and lora based wireless sensors for smart environment and IoT applications. In 2019 1st Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM) (pp. 19-23). IEEE.

40. Semtech, https://www.semtech.com/lora/why-lora, Kasım 2020

41. Widianto E., Pakpahan M. ve Septiana R., LoRa QoS Performance Analysis on Various Spreading Factor in Indonesia, International Symposium on Electronics and Smart Devices (ISESD), Endonezya, Eylül 2018, Bildiri Kitabı: 1-5.

42. Seye R., Ngom B., Gueye B ve Diallo M., A study of lora coverage: Range evaluation and channel attenuation model, 1st International Conference on Smart Cities and Communities (SCCIC), Burkina Faso, Haziran 2018, Bildiri Kitabı: 1-4.

43. Djuknic, G. M. ve Richton, R. E., Geolocation and Assisted GPS, IEEE Computer Society, 34,2 (2001) 123-125.

44. Çakır O, Kaya İ. ve Çakır Ö., Investigation the effect of the time difference of arrival sets on the positioning accuracy for source localization, 22nd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Trabzon, Nisan 2014, Bildiri Kitabı: 2249-225

6. EKLER

Ek 1, Lora Modülü

```
uint32_t SX1276GetTimeOnAir( RadioModems_t modem, uint8_t pktLen )
{
    double airTime = 0;

    switch( modem )
    {
    case MODEM_FSK:
        {
            airTime = round( ( 8 * ( SX1276.Settings.Fsk.PreambleLen +
                                     ( ( SX1276Read( REG_SYNCCONFIG ) & ~RF_SYNCCONFIG_SYNCSIZE_MASK )
+ 1 ) +
                                     ( ( SX1276.Settings.Fsk.FixLen == 0x01 ) ? 0.0 : 1.0 ) +
                                     ( ( ( SX1276Read( REG_PACKETCONFIG1 ) &
~RF_PACKETCONFIG1_ADDRSFILTERING_MASK ) != 0x00 ) ? 1.0 : 0 ) +
                                     pktLen +
                                     ( ( SX1276.Settings.Fsk.CrcOn == 0x01 ) ? 2.0 : 0 ) ) /
                                     SX1276.Settings.Fsk.Datarate ) * 1e3 );
        }
        break;
    case MODEM_LORA:
        {
            double bw = 0.0;
            // REMARK: When using LoRa modem only bandwidths 125, 250 and 500 kHz are supported
            switch( SX1276.Settings.LoRa.Bandwidth )
            {
            //case 0: // 7.8 kHz
            //    bw = 78e2;
            //    break;
            //case 1: // 10.4 kHz
            //    bw = 104e2;
            //    break;
            //case 2: // 15.6 kHz
            //    bw = 156e2;
            //    break;
            //case 3: // 20.8 kHz
            //    bw = 208e2;
            //    break;
            //case 4: // 31.2 kHz
            //    bw = 312e2;
            //    break;
            //case 5: // 41.4 kHz
            //    bw = 414e2;
            //    break;
            //case 6: // 62.5 kHz
            //    bw = 625e2;
            //    break;
            case 7: // 125 kHz
                bw = 125e3;
                break;
            case 8: // 250 kHz
                bw = 250e3;
                break;
            case 9: // 500 kHz
                bw = 500e3;
                break;
```

```
            }

            // Symbol rate : time for one symbol (secs)
            double rs = bw / ( 1 << SX1276.Settings.LoRa.Datarate );
            double ts = 1 / rs;
            // time of preamble
            double tPreamble = ( SX1276.Settings.LoRa.PreambleLen + 4.25 ) * ts;
            // Symbol length of payload and time
            double tmp = ceil( ( 8 * pktLen - 4 * SX1276.Settings.LoRa.Datarate +
                                 28 + 16 * SX1276.Settings.LoRa.CrcOn -
                                 ( SX1276.Settings.LoRa.FixLen ? 20 : 0 ) ) /
                                 ( double )( 4 * ( SX1276.Settings.LoRa.Datarate -
                                 ( ( SX1276.Settings.LoRa.LowDatarateOptimize > 0 ) ? 2 : 0 ) ) ) ) *
                                 ( SX1276.Settings.LoRa.Coderate + 4 );
            double nPayload = 8 + ( ( tmp > 0 ) ? tmp : 0 );
            double tPayload = nPayload * ts;
            // Time on air
            double tOnAir = tPreamble + tPayload;
            // return ms secs
            airTime = floor( tOnAir * 1e3 + 0.999 );
        }
        break;
    }
    return (uint32_t) airTime;
}
```

Ek 2., Paket Yapısı

```
union tempframe{
         struct  Mpacket {
                uint32_t subsec;
                uint8_t sec;
                uint8_t min;
                uint8_t hour;
                uint16_t sensor;
        }  attribute  ((packed)) frame ;
        unsigned char data[9];
}dat;

struct ms_packet{
                uint32_t ms_s;
                uint16_t sensor_s;
                uint16_t packetCount;
}  attribute  ((packed)) data_s;
```

Ek 3., Sinyal Görselleştirme

```
import numpy as np
import pyqtgraph as pg
import serial
#from scipy import signal
import scipy.signal
from scipy.signal import find_peaks

app = pg.Qt.QtGui.QApplication([])
p = pg.plot()
p.setWindowTitle('live plot from serial')

curve = p.plot(pen=pg.mkPen('b', width=2))
p.setBackground('w')
data = [0]
tdata = [0]
temp = [0]
datax = [0]
datay = [0]
peaks_positive = [0]
temp = 0
now = 0
k = 0
raw=serial.Serial('COM11',921600, timeout=None)
while p.isVisible():
    line = raw.readline().decode('utf-8').strip()
    #print("raw line:", line)
    line = str(line)
    #print("str line:", line)
    line = line.split(':')
    #print("splitted line:", line)
    if len(line) == 2 :
        print("line>2:", line)
        tdata = line[0]  #timestamp
        data = line[1]   #ADC data
       # print("line[0]; line[1]:", tdata, line)
        tdata = int(tdata)
        data = int(data)
       # print("int(tdata)", tdata)
       # print("int(line)", data)
        datax.append(int(tdata))
        datay.append(int(data))
        xdata = np.array(datax, dtype='float64')
        ydata = np.array(datay, dtype='float64')
        p.setXRange(tdata-2000, tdata, padding=0)
       # p.setYRange(data-100,data+100,padding = 0)
#        win1 = signal.hann(50)
#        win2 = signal.hann(500)
#        filteredx = signal.convolve(xdata, win, mode='same') / sum(win1)
```

```
#         filteredy = signal.convolve(ydata, win, mode='same') / sum(win2)
#         peaks_positive, _ = scipy.signal.find_peaks(ydata, height = 4095,
threshold = None)
#         peaks,_= find_peaks(ydata,threshold=20)
         curve.setData(xdata, ydata)
         #print("now will refresh the plot")
         app.processEvents()
    else:
         print("line not equal to 2:", line)
```

ÖZGEÇMİŞ

Lise eğitimini Gazi Anadolu Lisesinde tamamladı ve aynı yılda Karadeniz Teknik Üniversitesi Elektrik- Elektronik Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 2016 yılında lisans eğitimini bitirdi ve 2017 yılında Elektronik Mühendisliği Anabilim dalında Tezli Yüksek Lisans yapmaya hak kazandı. TÜBİTAK 2209-B Sanayi Odaklı Lisans Bitirme Tezi Destekleme Programı kapsamında Zigbee Kablosuz Ağı ile Haberleşen Otonom Araçların Birbirine Bağımlı Hareketlerinin Sağlanması adlı lisans bitirme projesi desteklenmiştir.