



**FATİH SULTAN MEHMET VAKIF ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
BİYOMEDİKAL MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
BİYOMEDİKAL MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI**

**TEK BOYUTLU(1D) INDIRECT TIME-OF-FLIGHT(iToF)
TABANLI SENSÖR UYGULAMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Abdul Kadir MUTLU

İSTANBUL, 2021



**FATİH SULTAN MEHMET VAKIF ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
BİYOMEDİKAL MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
BİYOMEDİKAL MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI**

**TEK BOYUTLU(1D) INDIRECT TIME-OF-FLIGHT(iToF)
TABANLI SENSÖR UYGULAMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Abdul Kadir MUTLU
(180231006)**

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Ebubekir KOÇ**

İSTANBUL, 2021

05/ 11/2021

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE

Biyomedikal Mühendisliği Anabilim Dalı'nda 180231006 numaralı Abdul Kadir MUTLU'nun hazırladığı "Noktasal Mesafe Ölçme Sistemleri Kullanılarak Sensör Geliştirilmesi" konulu Yüksek Lisans tezi ile ilgili Tez Savunma Sınavı, 05/11/2021 Cuma günü saat 10:00'da yapılmış, sorulara alınan cevaplar sonunda adayın tezinin **KABULÜNE** karar verilmiştir.

Düzeltilme verilmesi halinde:

Adı geçen öğrencinin Tez Savunma Sınavı .../.../20... tarihinde, saat ...:.. da yapılacaktır.

Tez Adı Değişikliği Yapılması Halinde: Tez adının "Tek Boyutlu (1D) Indirect Time-of-Flight(iToF) Tabanlı Sensör Uygulaması" şeklinde değiştirilmesi uygundur.

Jüri Üyesi	Tarih	İmza
(Danışman) Dr. Öğr. Üyesi Ebubekir KOÇ	05/11/2021	KABUL
Prof. Dr. Bahattin KARAGÖZOĞLU	05/11/2021	KABUL
Doç. Dr. Sadullah ÖZTÜRK	05/11/2021	KABUL
(İkinci Danışman) */ .../20...
*/ .../20...

*2. Danışman varsa doldurulacak

ETİK BİLDİRİM

Bu tezin yazılmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğunu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bağlı olduğum üniversite veya bir başka üniversitedeki başka bir çalışma olarak sunulmadığını beyan ederim.

Abdul Kadir MUTLU

İmza

Ali Efe ve Ömer'e..

Tek Boyutlu(1D) Indirect Time-of-Flight(iToF) Tabanlı Sensör Uygulaması

Abdul Kadir MUTLU

ÖZET

Tez çalışmasında, ışık kaynağının kullanıldığı ölçüm yöntemlerinin biyomedikal alandaki kullanımları belirtilip uçuş süresi(time-of-flight) yöntemiyle çalışan tek boyutlu ölçümler yapabilen bir sensör geliştirilmiştir. Uçuş süresi yöntemiyle birlikte yoğunluk tabanlı(intensity-based), üçgenleme(triangulation), eş odaklı(confocal) ve interferometrik(interferometric) yöntemlerin de çalışma prensipleri ve biyomedikal çalışmaları anlatılmıştır.

Uçuş süresi ölçüm yönteminde mesafe ölçümü, ışık kaynağından çıkan dalgaların hedefe çarpıp geri dönmesi arasında geçen süreyi veya gönderilen ve alınan dalga arasındaki faz farkını hesaplanarak bulunur. Ölçümün temeli iki sinyal arasındaki süre veya faz farkının hesaplanması dayanır. Hesaplama işlemleri özel üretilmiş entegreler aracılığıyla yapılır.

Uçuş süresi prensibine dayanan sensörlerin, günümüzde otonom araçlardan tarım sektörüne kadar çok geniş bir uygulama alanları bulmaktadır. Biyomedikal alanda ise hasta izlemesi ve konumlandırılması, akıllı algoritmalarla hastada olabilecek atakların tespiti, radyasyon dozunun optimum olarak ayarlanması için hasta vücut hacminin ölçümü, fizik tedavide yapılacak hareketlerin uzaktan doğru açılarla yapılmasının kontrolü, çeşitli hibrit sensörle tümörlerin saptanması, bebeklerde solunum takibi gibi birçok uygulaması bulunmaktadır.

Bu çalışmada, uçuş süresi yöntemiyle çalışan, gönderilen ve yansıyan sinyallerin faz farkını hesaplayarak mesafe ölçümü yapan bir sensör geliştirilmiştir. Sensörden belli uzaklıklarda ölçümler alınmıştır. Bu ölçümlerde sensörün 10 cm ile 250 cm arasındaki mesafelerde ortalama hata yüzdesi %0.44 olduğu, uzak

mesafelere(>5m) ıkıldığında ise ortalama hata yüzdesi %1.63 olduğu gözlemlenmiştir.

Çalışmada elde edilen bilgiler ve sonuçlar, ileride yapılacak 3D ToF kamera için zemin oluşturacaktır. Bununla da biyomedikal alandaki çeşitli sorunlara daha ucuz ve hızlı çözümler sunulacağı gibi yeni kullanım alanları da doğuracaktır.

Anahtar kelimerler; Time-of-Flight, ToF Kamera, LiDAR, Optik lm Yöntemleri, Biyomedikal Alanda Optik Sensörlerin Kullanımı,

One-Dimensional (1D) Indirect Time-of-Flight (iTOF) Based Sensor Application

Abdul Kadir MUTLU

ABSTRACT

In the thesis study, a sensor that can make one-dimensional measurements working with the time-of-flight method has been developed by specifying the biomedical uses of the measurement methods in which the light source is used. Along with the time-of-flight method, the working principles and biomedical studies of intensity-based, triangulation, confocal and interferometric methods are also explained.

In the time-of-flight measurement method, distance measurement is found by calculating the time elapsed between the waves coming out of the light source hitting the target and returning, or the phase difference between the transmitted and received wave. The basis of the measurement is based on the calculation of the time or phase difference between two signals. Calculations are made by means of special ICs.

Today, sensors based on the time-of-flight principle find a wide range of applications, from autonomous vehicles to the agricultural sector. In the biomedical field, there are many applications such as patient monitoring and positioning, detection of possible attacks in the patient with smart algorithms, measurement of patient body volume for optimum adjustment of radiation dose, control of movements to be performed in physical therapy at precise angles, detection of tumors with various hybrid sensors, respiratory monitoring in infants.

In this study, a sensor that works with the time-of-flight method and measures the distance by calculating the phase difference of the transmitted and reflected signals has been developed. Measurements were taken at fixed distances from the

sensor. In these measurements, the average error rate at the distances of 10 cm to 250 cm from 10 cm to 250 cm was 0.44%, while the average error rate was 1.63% for far-off distances ($> 5\text{m}$).

The information and results obtained in the study will form the basis for the 3D ToF camera to be made in the future. With this, cheaper and faster solutions will be offered to various problems in the biomedical field, as well as new areas of use.

Keywords; Time-of-Flight, ToF Camera, LiDAR, Optical Measurement Methods, Optical Sensor use in Biomedical Field

ÖNSÖZ

Tez konusu, günümüzde her geçen gün artan otonom sistemler için hayati öneme sahip sensörlerin teknik altyapıyla ilgilidir. Amacımız bu tekniğin detaylı bir şekilde inceleyip ülkemizde yapılacak çalışmalara bir nebze olsun katkı sağlamaktır.

Tez çalışması esnasında herhangi bir konuda sıkıştığımızda desteğini hiç esirgemeyen, ara ara sunduğumuz mazeretlere müsamaha ile yaklaşıp bizi tekrar konunun içine çekip bilgi ve tecrübelerini paylaşan değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Ebubekir KOÇ'a çok teşekkür ederim.

Yüksek lisans sürecimizde birçok konuda bize yardımcı olan, dersleri biraz ara verdiğimizde bizi arayan ve derslere çağıran değerli bölüm başkanımız Prof. Dr. Bahattin KARAGÖZOĞLU hocama teşekkür ederim.

Tez yolculuğunda ve birçok işte beraber çalıştığımız ve sürekli fikir alışverişinde bulunduğum Cihad SÜRMEİ'ye teşekkür ederim.

Hayatın tüm süreçlerinde beraber yol aldığımız, tez sürecinde destekteğini hiç esirgemeyip birçok fedakarlık yapan değerli eşime çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	v
ABSTRACT	vii
ÖNSÖZ.....	ix
SEMBOLLER	xiii
TABLO LİSTESİ	xiv
KISALTMALAR	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvi
GİRİŞ	1
1. MESAFE ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ	4
1.1. YOĞUNLUK TABANLI (INTENSITY-BASED).....	5
1.1.1. Çalışma Prensibi	5
1.1.2. Yoğunluk Tabanlı Sensörler	5
1.1.3. Kullanım Alanları.....	6
1.1.4. Literatür Çalışmaları	6
1.2. ÜÇGENLEME (TRIANGULATION).....	7
1.2.1. Çalışma Prensibi	7
1.2.1.1. Pasif Üçgenleme (Passive Triangulation).....	7
1.2.1.2. Aktif Üçgenleme (Active Triangulation).....	8
1.2.2. Üçgenleme Sensörleri	9
1.2.2.1. Kızılötesi (Infrared)	9
1.2.2.2. Lazer (Laser).....	11
1.2.3. Kullanım Alanları	12
1.2.4. Literatür Çalışmaları	13
1.3. EŞ ODAKLI (CONFOCAL).....	13
1.3.1. Çalışma Prensibi	13
1.3.2. Eş Odaklı(Confocal) Sensörler	15
1.3.3. Kullanım Alanları	15

1.3.4. Literatür Çalışmaları	16
1.4. İNTERFEROMETRİK (INTERFEROMETRIC)	17
1.4.1. Çalışma Prensibi	17
1.4.2. İnterferometrik (Interferometric) Sensörler	18
1.4.3. Kullanım Alanları	18
1.4.4. Literatür Çalışmaları	19
1.5. UÇUŞ SÜRESİ (TIME-OF-FLIGHT)	20
1.5.1. Çalışma Prensibi	21
1.5.1.1. Direct Time-of-Flight (dToF)	21
1.5.1.2. Indirect Time-of-Flight (iToF)	22
1.5.1.3. ToF Metotlarının Karşılaştırılması	23
1.5.2. ToF Sensörler	24
1.5.2.1. LiDAR	24
1.5.3. Kullanım Alanları	27
1.5.4. Literatür Çalışmaları	30
1.6. ÖLÇÜM YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI	32
2. DONANIM TASARIMI	33
2.1. TIME-OF-FLIGHT ENTEGRELERİ	33
2.1.1. Texas Instruments	33
2.1.2. STMicroelectronics	35
2.1.3. Renesas Electronics	37
2.2. KULLANILACAK DONANIM ELEMANLARI	37
2.2.1. Pmod ToF	37
2.2.2. ISL29501	38
2.2.3. MCU	42
2.2.4. Kızılötesi Yayıcı ve Fotodiyot	44
2.2.4.1. SFH 4550	45
2.2.4.2. SFH 213 FA	45
2.2.5. EEPROM	46
2.3. BASKI DEVRE KARTI (PCB)	48
2.3.1. İşlemci Kartı	48

2.3.2. PMOD ToF Modülü.....	51
3. YAZILIM.....	53
3.1. MCU YAZILIMI.....	53
3.1.1. USB.....	54
3.1.1.1. USB Mimarisi	55
3.1.1.2. USB Sınıfları.....	57
3.1.2. I2C	58
3.1.2.1. Genel Özellikler	58
3.1.2.2. Veri Transfer Formatı	59
3.1.2.3. İletişim Temelleri.....	60
3.1.2.4. Adresleme	61
3.2. BİLGİSAYAR YAZILIMI.....	62
4. GERÇEKLEME.....	64
4.1. 3D BASKI	64
4.2. ÖLÇÜM SONUÇLARI VE ANALİZ	66
SONUÇ.....	75
KAYNAKÇA	77
EKLER.....	83

SEMBOLLER

c	: Işıık Hızı
$\Delta\varphi$: Faz Kayması
f_m	: Modülasyon Frekansı

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1 - Farklı mesafelerdeki ölçüm sonuçları	69
Tablo 2 - 10cm için gerçek mesafe, ortalama ve ölçülen mesafe ilişkisi.....	70
Tablo 3 - 50cm için gerçek mesafe, ortalama ve ölçülen mesafe ilişkisi.....	70
Tablo 4 - 100cm için gerçek mesafe, ortalama ve ölçülen mesafe ilişkisi.....	70
Tablo 5 - 250cm için gerçek mesafe, ortalama ve ölçülen mesafe ilişkisi.....	71
Tablo 6 - 500cm için gerçek mesafe, ortalama ve ölçülen mesafe ilişkisi.....	71
Tablo 7 - 800cm için gerçek mesafe, ortalama ve ölçülen mesafe ilişkisi.....	71
Tablo 8 - Gerçek mesafe ve ortalama	72
Tablo 9 - Mesafe, ortalama, fark, yüzelik fark ve standart sapma tablosu	72
Tablo 10 - Mesafe ve hata yüzdesi ilişkisi	73
Tablo 11 - Yüzelik fark ve standart sapma	73

KISALTMALAR

ToF	Time-of-Flight
LED	Light Emitting Diode
CCD	Charge Coupled Device
IR	Infrared
PSD	Position Sensitive Diode
OCT	Optical Coherence Tomography
dToF	Direct Time-of-Flight
iToF	Indirect Time-of-Flight
LiDAR	Light Imaging Detection and Ranging
MRI	Magnetic Resonance Imaging
CT	Computed Tomography
MCU	Microcontroller Unit

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1 - Yoğunluğa bağlı sensörlerin çalışma prensibi. (a) Tipik yoğunluk tabanlı sensör. (b) Yaygın olarak kullanılan fiber modelleri [4]	5
Şekil 2 - MTI-2100 Fotonik Sensor	6
Şekil 3 - Pasif üçgenleme yönteminin çalışma prensibi [9].....	7
Şekil 4 -Aktif üçgenleme çalışma prensibi [9].....	8
Şekil 5 - Görünür ve kızılötesi dalga boyu aralıklarını gösteren elektromanyetik spektrum [13].....	10
Şekil 6 - Sharp firmasına ait IR sensörler	10
Şekil 7 - Sharp kızılötesi sensörlerinin karşılaştırılması [15]	11
Şekil 8 - Acuity AR700 Laser Triangulation Sensor	12
Şekil 9 – Eş odaklı sensörün çalışma prensibi [22]	14
Şekil 10 – Hedefteki malzemenin yüksekliğine göre yansıtıcı ışığın değişimi [22]..	14
Şekil 11 – Micro-Epsilon firmasının eş odaklı sensörleri.....	15
Şekil 12 - Konfokal lazer tarama mikroskopisi prensibinin şematik diyagramı [24]	16
Şekil 13 - Michelson İnterferometresi [27].....	17
Şekil 14 - SIOS SP 15000 NG marka lazer interferometre.....	18
Şekil 15 - OCT çalışma prensibi [29]	19
Şekil 16 - Time-of-Flight Ölçüm Prensibi [31]	20
Şekil 17 - Direct ToF ölçüm prensibi [33].....	22
Şekil 18 – Indirect ToF yönteminin gösterilmesi [3].....	22
Şekil 19 - Direct ve Indirect ToF metotlarının darbeli ve sürekli modülasyonları [32]	23
Şekil 20 - ToF metotlarının karşılaştırılması [32].....	24
Şekil 21 - Benewake TFmini PLUS 1D LiDAR Sensörü [36]	25
Şekil 22 - ToF prensibyle çalışan LiDAR çeşitleri [37]	25
Şekil 23 - (a) Flash LiDAR; (b) OPA LiDAR; (c) Mechanical LiDAR; (d) MEMS LiDAR [41].....	27
Şekil 24 - Velodyne firmasına ait LiDAR sensörler [42]	28
Şekil 25 - Hasta görüntüleme sistemi [47].....	30
Şekil 26 - Optik yöntemlerin karşılaştırılması [2].....	32
Şekil 27 - OPT3101 için uygulama blok diyagramı [55].....	35
Şekil 28 - ST ToF Sensörleri [57].....	36
Şekil 29 - ISL29501 Fonksiyonel Diyagramı [59].....	37
Şekil 30 - PMOD ToF Görünümü [60].....	38
Şekil 31 - ISL29501 Blok Diyagramı [59].....	39
Şekil 32 - İletilen ve yansıyan sinyal [59].....	40
Şekil 33 - Sinyalin I ve Q olarak işlenmesi [59]	41

Şekil 34 - PIC18F25K50 Pin Diyagramı [62].....	43
Şekil 35 - AT24C04D entegresinin pin gösterimi [65].....	47
Şekil 36 - İşlemci Devre Şeması	49
Şekil 37 - Devre baskı devre görünümü.....	49
Şekil 38 – Devrenin baskı sonrası görünümü	50
Şekil 39 - PMOD ToF modülüne ait devre şeması [66].....	51
Şekil 40 - PMOD ToF Baskı devre görünümü [67].....	52
Şekil 41 - USB versiyonları göre konektörler [69]	55
Şekil 42 - Micro-B detaylı konektör görünümü ve bağlantı pinleri [70]	55
Şekil 43 - USB katmanlı yapısı [68]	56
Şekil 44 - NRZI ile kodlanan veri [68]	57
Şekil 45 - I2C Bağlantı Şeması [61]	59
Şekil 46 - I2C Veri İletim Formatı [72]	59
Şekil 47 - I2C ile Byte Transferi [72]	60
Şekil 48 - Bit Adresleme ile Veri İletimi [72].....	61
Şekil 49 - Bit Adresleme ile Veri İletimi [72].....	62
Şekil 50 - Uygulamanın ekran görüntüsü.....	63
Şekil 51 - Tasarım üstten görünümü	64
Şekil 52 - Baskının üstten görünümü	65
Şekil 53 - Tasarımın izometrik görünümü	65
Şekil 54 - Baskının izometrik görünümü	66
Şekil 55 - 10 cm ölçümü	67
Şekil 56 - 50 cm ölçümü	68
Şekil 57 - 250 cm ölçümü	68

GİRİŞ

Günümüz teknoloji dünyasında yaşanan baş döndürücü gelişmeler hayatın birçok alanını etkilemiştir. Bu gelişmelerle insan gücüyle yapılan bazı işler, yerlerini otonom sistemlere bırakmaya başlamıştır. Otonom veya akıllı olarak tanımlanan sistemlerin çalışmasında önemli rol oynayan donanım elemanlarından biri sensörlerdir.

Sensörler ya da algılayıcılar, buldukları ortamdaki sıcaklık, basınç, hareket gibi değişiklikleri algılayarak farklı şekillerde çıkış sinyali veren sistemlerdir. Bunlar insan duyu sistemine benzer şekilde çalışırlar. Nasıl ki insan önünden geçen hareketli bir şeyi algılayabiliyorsa, hareketi algılayabilen sensörler de aynı durumu benzer şekilde algılayıp bağlı oldukları sistemlere bilgi verirler.

Sensörler, çok farklı türdeki değişiklikleri algılayabilecek şekilde üretilebilirler. Bu değişiklikler kimyasal, manyetik, elektriksel veya mekanik olabilirler. Bunlar içerisinde belli bir mesafeyi ölçmek için geliştirilmiş çeşitli sensör tasarımları da bulunur.

Mesafe sensörü, ölçülmek istenen hedefin ölçülmek istenen noktayla arasındaki farkın sayısal bir büyüklükle ifade edildiği sensör türüdür. Bu sensörler de mesafe ölçümü farklı yöntemler kullanılarak elde edilirler. Yöntemlerin farklı olması gibi ölçüm yapılırken kullanılan kaynaklarda farklılık gösterir. Bu kaynaklara örnek olarak ışık, mikrodalga ve ses verilebilir.

Işık, mesafe ölçümlerinde çok yaygın olarak kullanılarak araçlardan biridir. Sensör tipine göre kızılötesi ışıklar kullanılabilirdiği gibi farklı dalga boyuna sahip ışıklar da tercih edilir. Işık kullanılarak yapılan mesafe ölçüm sensörlerinin sayısız kullanım alanı bulunur. Endüstri, robotik, otomotiv, medikal, tarım, askeri sistemler gibi sektörler kullanım alanlarına örnek verilebilir.

Işık kaynağının kullanıldığı sensörlerin çeşitli çalışma yöntemleri bulunmaktadır. Bu yöntemlerdeki temel prensipler ışık dışındaki

kaynaklarda(örneğin ultrasonik ölçüm sistemleri) da kullanılmaktadır. Ölçüm yöntemlerinin çalışma prensipleri farklı olmasının yanında ölçülecek mesafe, gürültüden etkilenmeme, sistemin kurulum maliyetleri gibi farklılıkları da vardır. Bu durumda sensörün kullanım alanlarını belirlemektedir.

Tez çalışmasında, ışık kaynağı kullanılarak yapılan mesafe ölçüm yöntemlerinin biyomedikal kullanımlarından bahsedilecektir. Özellikle de ölçüm yöntemlerinden biri olan uçuş süresi (time-of-flight - ToF) yöntemi üzerine durulup, sistemin nasıl çalıştığını gösterecek örnek bir sensör uygulaması yapılacaktır. Bu konu çevresinde tez çalışması beş bölümde incelenecektir.

Tez çalışmasının ilk bölümünde mesafe ölçüm yöntemlerinden bahsedilecektir. Bu kısımda yoğunluk tabanlı, üçgenleme, eş odaklı, interferometrik ve uçuş süresi yöntemleri incelenecektir. Öncelikle her bir yöntemin çalışma prensibi anlatılacaktır. Ardından bu yöntemle üretilen sensörler hakkında bilgiler verilecektir. Sonrasında sensörlerin kullanım alanları özetlenecektir. Her yöntemin sonunda ölçüm yöntemine ilişkin yapılan literatür çalışmaları özetlenecektir.

İlk bölümde son anlatılacak ölçüm yöntemi uçuş süresidir. Bu yöntem tezin uygulama alanında örnek tasarımı yapılacak yöntemdir. Uçuş süresi ölçüm yöntemi medikal birçok alanda aktif olarak kullanılmakla birlikte hem pandemi koşulları hem de gelişen sensör örnekleriyle çok daha yaygın kullanım alanı bulmaktadır. Özellikle bu yöntemle üretilen sensörlerin ebatlarının küçülmesiyle mobil tabanlı sağlık uygulamaları daha da önem kazanmıştır.

İkinci bölümde tez kapsamında tasarlanan ürünle ilgili yapılan donanım çalışmaları anlatılacaktır. İlk olarak ToF ölçümü yapacak entegrelerin araştırılmasında değerlendirmeye alınan entegrelerin özellikleri özet bir şekilde ifade edilecektir. Ardından uygulaması yapılacak sistemde hazır olarak kullanılacak ToF modülüyle beraber mikrodenetleyici, eeprom, kızılötesi verici LED ve fotodiyot hakkında bilgiler verilecektir. Sonrasında yapılacak elektronik karta ait şematik ve baskı devre görüntüleri verilip devreler hakkında bilgiler verilecektir.

Üçüncü bölümde tasarımı tamamlanan devrenin çalışması için yapılacak mikrodenetleyici ve bilgisayar yazılımları hakkında bilgiler verilecektir. Bu kısımda

işlemci yazılımında, işlemcinin bilgisayar ve ToF modülüyle bağlantısında kullanılacak iletişim protokolleri anlatılacaktır.

Bu bölümün son alt başlığında tasarım yapılacak kartın ve modülün içerisinde bulunacağı kutunun SolidWorks tasarımları ve 3D baskı çıktılarının görselleri verilecektir.

Dördüncü bölümde tasarımı yapılacak kartın ve modülün içerisinde bulunacağı kutunun SolidWorks tasarımları ve 3D baskı çıktılarıyla birlikte ürünle ilgili çeşitli ölçümler yapılacaktır. Bu kısımda farklı uzunluklarda yapılan ölçümler karşılaştırmalı olarak sunulacak yorumlanıp sonuçları tartışılacaktır.

Son bölümde ise tez kapsamında yapılan çalışmaların sonuçları paylaşılacaktır. Bu kısımda yöntemin başarısını ifade edilip biyomedikal çalışmalarda ne gibi alanlarda kullanılabileceği ifade edilecektir. Ayrıca gelecekte yapılacak çalışmalar hakkında bilgiler verilecektir.

Sonuç olarak bu tezde, uçuş süresi yöntemi kullanılarak bir boyutlu (1D) sensör uygulaması gerçekleştirilmiştir. Tezin temel amaçlarından biri uçuş süresi yönteminin yeni gelişen teknolojilerdeki konumunu vurgulayıp, ileride yapacağımız 3D ToF kamera için zemin oluşturmaktadır. Tez sürecinde yöntemin teorik ve uygulama örnekleri bu amaç doğrultusunda ifade edilmiştir. İkinci bir amaç olarak, ölçme yöntemlerinin ve özellikle uçuş süresi yönteminin biyomedikal alandaki kullanımını ifade etmektir. Böylelikle ileride bu konu ile ilgili yapılacak yeni çalışmalara bir katkı sağlayıp, uçuş süresi teknolojisinin biyomedikal sorunlara yenilikçi çözümler sunabileceği gösterilecektir.

1. MESAFE ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

Mesafe kelimesi sözlükte “uzaklık, ara” olarak tanımlanır. İki yer arasındaki uzaklığı ifade etmektedir. Mesafe ölçümü ise iki yer arasındaki uzaklığı bir büyüklükle ifade edilmesidir.

İnsanlar tarih boyunca uzunlukları ölçme ihtiyacı hissetmişlerdir. Bu ihtiyaç bir mimari eserin yapımında ortaya çıktığı gibi iki şehir arasındaki mesafenin bilinmesinde de görülmektedir. Bunun da insanlar mesafeleri ölçmek için çeşitli yöntemler geliştirmiştir. Bu gelişim içerisinde ölçtükleri mesafeleri tanımlamak ve birleştirmek için de birtakım standartlar geliştirmişlerdir. Adımların, karışların ve nesnelerin standart kabul edildiği ölçümler yapılmıştır [1].

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte birçok mesafe ölçme yöntemi geliştirilmiştir. Bu bölümde ise optik yöntemlere anlatılacaktır. Çünkü temassız bir yöntemle çok hızlı ve otomatik ölçüm yapılmak istediğinde veya çok uzun ve çok kısa mesafeler için optik sensörler en iyi çözümü sunmaktadır [2].

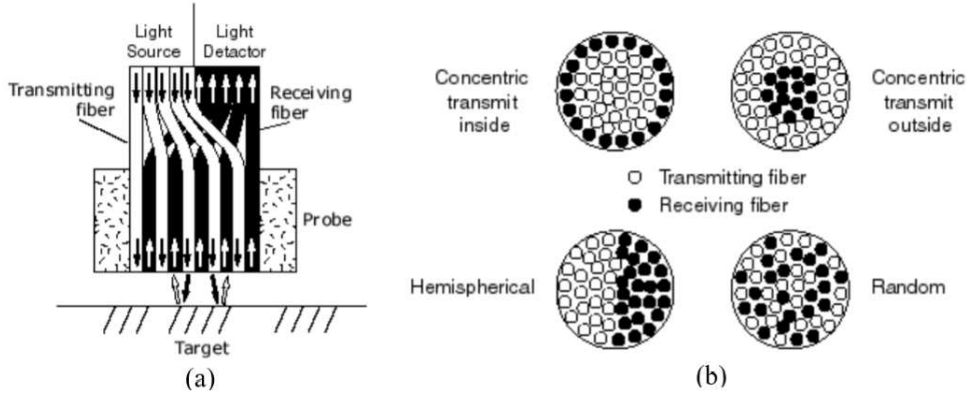
Optik mesafe ölçüm yöntemleri, pasif ve aktif olarak iki kategoriye ayrılır. Pasif teknikte, ölçüm esnasında hedefe bir ışık gönderilmez, hedeften gelen ışık ya hedeften yansıyan ortam ışığıdır ya da hedefin kendisi tarafından üretilen ışıktır. Aktif yöntemde ise, ölçüm sırasında hedef aydınlatılır. Kullanılan tekniğe bağlı olarak ışık monokromatik (monochromatic), polikromatik (polychromatic), sürekli (continuous), darbeli (pulsed) gibi farklı kombinasyonlarda olabilir [3].

Bu bölümde optik sensör yöntemlerinden yoğunluk tabanlı (intensity-based), eş odaklı (confocal), üçgenleme (triangulation), interferometrik (interferometric) ve uçuş süresi (time-of-flight) anlatılacaktır. Her bir yöntem için çalışma prensibi, yöntemle üretilen sensörler, kullanım alanları ve literatür çalışmalarından bahsedilecektir. Literatür çalışmalarında kullanılan yöntemle ilgili endüstri ve biyomedikal çalışmalardan bahsedilecektir.

1.1. YOĞUNLUK TABANLI (INTENSITY-BASED)

1.1.1. Çalışma Prensibi

Yoğunluk tabanlı sensörler, ortak bir probta bir ışık kaynağı bir de yoğunluğun algılandığı bir detektörden oluşurlar. Bu sensörlerde ışığı ölçülmek istenen nesneye aktarmak ve yansıyan ışınları da detektöre iletmek için fiber optikler kullanılır. Uzun yıllardır üretilen bu sensör optik sistemler içinde en basit yöntemdir [2].



Şekil 1 - Yoğunluğa bağlı sensörlerin çalışma prensibi. (a) Tipik yoğunluk tabanlı sensör. (b) Yaygın olarak kullanılan fiber modelleri [4]

Şekil 1’de yoğunluk tabanlı sensörün çalışma mantığı görülmektedir. Burada ortak bir probta yer alan ışık kaynağının fiberler aracılığıyla ölçülmek istenen nesneye yönlendirilir. Nesne yüzeyinden yansıyan ışınlar fiberler aracılığıyla alınıp yoğunluk algılayıcı detektörlere gönderilir. Burada elde ölçülen yoğunluk değeri, prob ucu ile nesne arasındaki mesafenin bir fonksiyonudur [2].

1.1.2. Yoğunluk Tabanlı Sensörler

Yoğunluk tabanlı yöntemler üretilen sensörlerin neredeyse 60 yıllık bir mazisi bulunmaktadır. Bundan dolayı yöntemin patenti çok uzun zaman önce alınmıştır. Piyasada bu sensörlere “Fotonik (Fotonic) sensör” ismi verilmektedir. Bu yöntemle ilgili zaman içerisinde birçok çalışma yapılmıştır. Fakat ticari olarak nispeten daha az ürün ortaya çıkmıştır [5].



Şekil 2 - MTI-2100 Fotonik Sensor

1.1.3. Kullanım Alanları

Yoğunluk tabanlı tekniği kullanılarak üretilen sensörler, AR-GE, kalite ve proses kontrolünde çözümler sunmaktadır. Titreşim, model analiz, mikro konumlandırma, yer değiştirme, kusur algılama, rezonans analizi, hız algılama, yüzey işlem analizi, kenar algılama vb. birçok işlemde kullanılmaktadır [6].

1.1.4. Literatür Çalışmaları

Bu başlık altında yoğunluk tabanlı fiber optik sensörlerle alakalı daha önce yapılmış çalışmalar hakkında bilgi verilecektir. Burada önce endüstride ne gibi çalışmalar yapıldığı ardından biyomedikal/medikal alandaki örnekler incelenecektir.

- Endüstriyel uygulamalar için hacimsel şişelerde sıvı tespitini yoğunluk tabanlı sensörlerle yapılabilirliği incelenmiştir [7]. Amaç bu gibi ihtiyaçlara ucuz maliyetli çözüm sunmaktır. Elde edilen sonuçlar, sensörün sıvı seviye ölçümlerinde kullanılabilmesi yönündedir. Ayrıca araştırma kapsamında kablosuz bir sensör ağı oluşturularak düşük maliyetle endüstriyel prosesler için optik sensörler uygulanabilir olduğunun fizibilitesi yapılmıştır.
- Lomber omurga bükülmesi, üst ve alt ekstremitte takibi, solunum ve kalp atış hızı izleme dahil dört farklı sağlık izleme uygulaması için yoğunluk ayarlı fiber optik sensörlerle ile optik olmayan sensörlerin karşılaştırmalı bir analizi yapılmıştır [8]. Araştırma sonucunda yoğunluk modülasyonuna dayalı fiber optik sensörün sağlık uygulamalarında kullanımı basit yapı, kolay algılama,

küçük sensör ve tek bir fiber eleman kullanarak çoklu algılama alanları gibi avantajları vardır. Ancak algılama temel olarak ışık şiddeti şeklinde olduğundan çeşitli nedenlerden öngörülemez ışık kayıpları ortaya çıkabilir. Bu nedenle tasarlanacak bir sensör uygulamasında fiber tipi ve modu, dalga boyu çalışma aralığı, detektör ve diğer konuların seçimine dikkat edilmelidir.

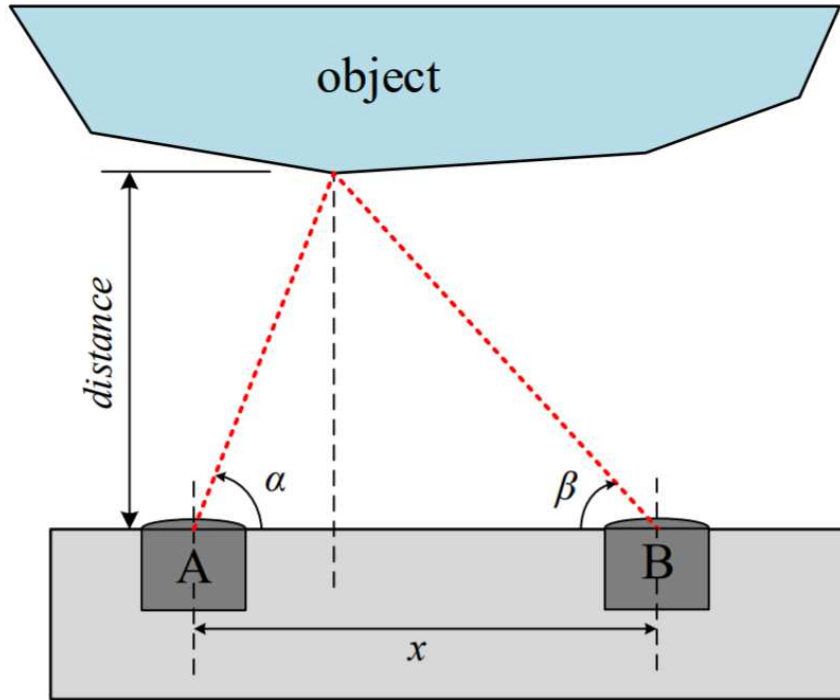
1.2. ÜÇGENLEME (TRIANGULATION)

Üçgenleme yöntemi, pasif üçgenleme (passive triangulation) ve aktif üçgenleme (active triangulation) olmak üzere ikiye ayrılır. Bu bölümde bu iki yöntemin çalışma prensipleri, kullanım alanları, örnek sensörler hakkında bilgiler ve literatür taramasından bahsedilecektir.

1.2.1. Çalışma Prensibi

1.2.1.1. Pasif Üçgenleme (Passive Triangulation)

Pasif üçgenleme yöntemi, insan görsel duygunun temel prensibine dayanan, ışığa ihtiyaç duymadan gözlemlenen noktadan gelen ışınların geliş açısına duyarlı iki gözlemci tarafından alınıp işlenmesi prensibine dayanır [9].



Şekil 3 - Pasif üçgenleme yönteminin çalışma prensibi [9]

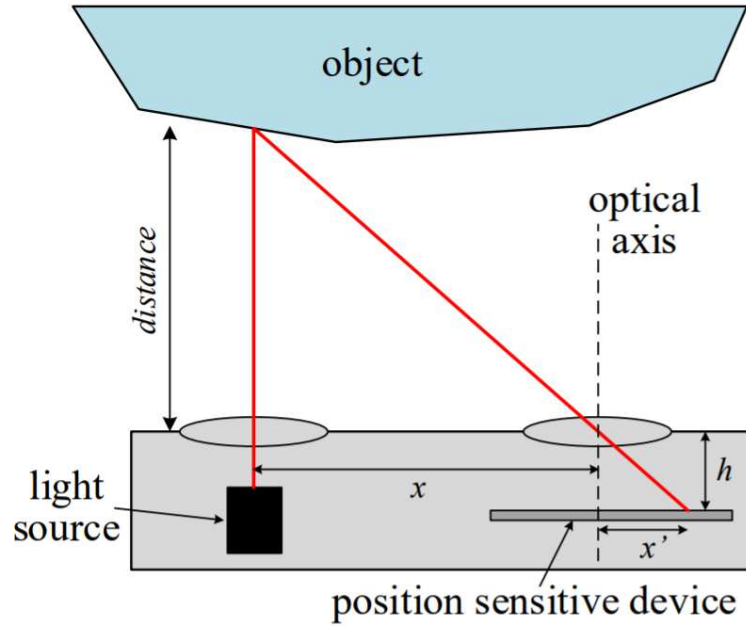
Şekil 3'te bu tekniğin temel çalışma prensibi görülmektedir. Burada iki gözlemci nokta arasındaki mesafe biliniyor olup x ile gösterilmiştir. Ölçülmek istenen noktaya iki gözlemci de bilinen farklı açılarla (α ve β) bakmaktadır. Ölçülmek istenen nokta ve iki gözlemci arasında bir üçgen oluşmaktadır [3]. Buradan bilinmeyen uzaklık değeri şu formüller hesaplanır:

$$d = \frac{x}{\frac{1}{\tan\alpha} + \frac{1}{\tan\beta}}$$

Pasif üçgenleme yöntemini, computer stereo vision uygulamalarında kullanılan temel prensiptir. Computer stereo vision, Şekil 3'te gösterilen iki gözlemci noktasında CCD kamera bulunur. Buralardan çekilen iki görüntünün konumları hesaplanıp karşılaştırılır. Ardından aynı işlemi birden fazla noktaya yaparak hedefe ait 3 boyutlu bilgiler elde edilir [3].

1.2.1.2. Aktif Üçgenleme (Active Triangulation)

Üçgenleme yöntemi, benzer üçgenler mantığına dayanan bir ölçüm yöntemidir. Tarihte ilk olarak M.Ö. 600 yıllarda Yunan filozof-matematikçi Milet Thales tarafından kullanılmıştır. Thales bu yöntemle Mısır'da yer alan Giza piramitlerinin yüksekliği ölçtüğü bilinmektedir [2].



Şekil 4 -Aktif üçgenleme çalışma prensibi [9]

Üçgenleme tabanlı optik sensörler genellikle Şekil 4’de gösterildiği şekilde çalışır. Işık kaynağından (IR veya lazer) çıkan ışınlar engele çarpar. Engelden geri yansıyan ışınlar sensörün alıcı tarafından alınır. Engelin uzaklığına göre ise geri dönen ışınların alıcı üzerinde düştüğü konum değişir. Burada oluşan benzer üçgenler yardımıyla da uzaklık hesaplanır.

Üçgenleme yönteminde yansıyan ışınların üzerine düştüğü alıcı, bir lens ve pozisyona duyarlı detektördür (position-sensitive dedector-PSD) [10]. PSD, üzerine düşen ışığın konumunu ölçebilen bir optik konum sensörüdür [11].

Şekil 4’de “distance” ile gösterilen yer ölçmek istenilen mesafeyi temsil etmektedir. “x” ile gösterilen verici kaynak ile alıcı kaynak arasındaki mesafeyi, “h” ile lens ile PSD arasındaki mesafeyi, “x’” ise gelen ışının PSD’deki konumunun referans noktaya olan mesafesi temsil eder. Burada B, C ve D ait mesafe bilgileri bilinmektedir. A ise şu formüller hesaplanır:

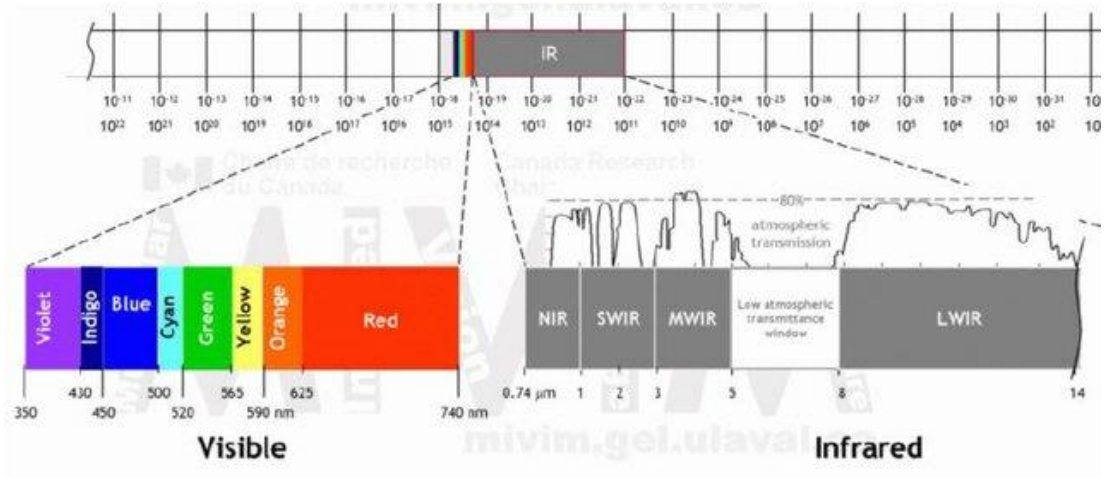
$$d = \frac{x \cdot h}{x'}$$

1.2.2. Üçgenleme Sensörleri

Farklı ışık kaynakları ile üçgenleme yöntemini kullanan çeşitli sensörler üretilmektedir. Burada en çok bilinen kızılötesi (infrared - IR) ve lazer (laser) hakkında bilgi verilecektir.

1.2.2.1. Kızılötesi (Infrared)

Şekil 5’te elektromanyetik spektrumun görünür ve kızılötesi dalga boyu aralıkları gösterilmektedir. Infrared (kızıl ötesi), sözlükte “Dalga boyları kırmızı ışığından uzun, radyo dalgalarından kısa, cisimlerin ve insanın içine nüfuz eden, ısıtma etkisine sâhip, çıplak gözle görülemeyen ışık cinsi, enfraruj.” olarak tanımlanmaktadır [12].



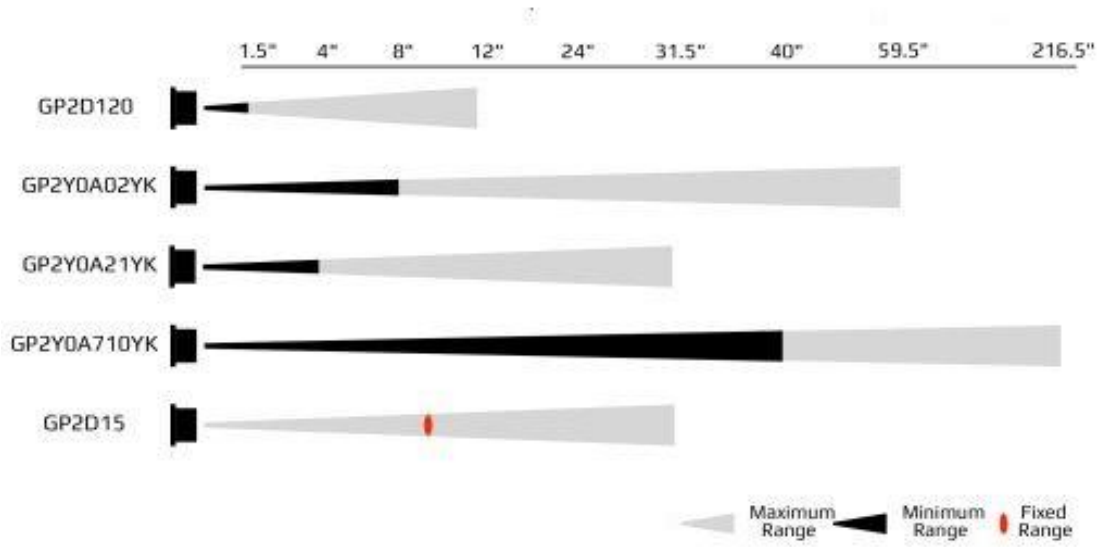
Şekil 5 - Görünür ve kızılötesi dalga boyu aralıklarını gösteren elektromanyetik spektrum [13]

IR mesafe ve yakınlık sensörleri, kızılötesi dalga boyunu kullanırlar. Bundan dolayı optik sensörler grubundadırlar. Sensörün mesafe ölçüm yöntemi ise genellikle üçgenleme ilkesine dayanır. Infrared sensörler yaygın olarak verici kaynak ve PSD tek bir form içerisinde bulunurlar. Bu da onun hem hafif hem de küçük yapıda olmasını sağlamaktadır. Bu yapıda sensör üreten Sharp firmasına ait sensör örneği Şekil 6’da görülmektedir.



Şekil 6 - Sharp firmasına ait IR sensörler

Şekil 7’de Sharp firmasına ait bazı sensörlerin karşılaştırması yer almaktadır. Bu sensörler ölçüm aralıklarda doğrusal olmayan voltaj çıkışına sahiptirler. Çözünürlükleri de yakın mesafelerde daha iyi iken uzak mesafelerde azalmaktadır [14].



Şekil 7 - Sharp kızılötesi sensörlerinin karşılaştırılması [15]

1.2.2.2. Lazer (Laser)

İngilizcesi “laser” olan lazer, ismini “*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*” tamlamasından almaktadır; bu kısaltma “Uyarılmış Radyasyon Emisyonu ile Işık Amplifikasyonu” anlamına gelmektedir [16]. Lazer, atomları veya molekülleri belirli dalga boylarında ışığa ile yükseltilmesini sağlayan ve tipik olarak çok dar bir radyasyon ışını üreten cihazdır. Emisyon genellikle son derece sınırlı bir görünür, kızılötesi veya ultraviyole dalga boyları aralığını kapsar. Çok çeşitli özelliklere sahip farklı lazer türleri geliştirilmiştir [17].

Lazerlerin birden fazla mesafe ölçüm yöntemi bulunmaktadır. Bu yöntemlerin kendilerine özel ölçüm aralıkları, çalışma şartları ve sınıflandırmaları vardır. Ölçüm yapılan nesnede de herhangi bir hasar veya aşınım oluşturmamaktadırlar. Lazerler için ölçüm yöntemleri teknik olarak 4 kategoriye ayrılabilir: üçgenleme (triangulation), uçuş süresi ölçümü (time-of-flight), interferometri (interferometry) ve faz kayması (phase shift) yöntemleri. Üçgenleme yöntemi, diğer yöntemlerle karşılaştırıldığı zaman ortamdaki bağımsız, insan sağlığına ve hedefe zararsız ve daha ekonomik elemanlara sahiptir. 10 metreden kısa mesafeleri ölçmek için en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir [18].



Şekil 8 - Acuity AR700 Laser Triangulation Sensor

Lazerler ölçüm yönteminin diğer ölçüm yöntemlerine göre çeşitli avantajları bulunmaktadır. Bunlardan ilki ölçüm aralığı ve hassasiyetidir. Çok uzak mesafelerden çok hassas ve hızlı ölçümler yapabilmektedir. Bundan dolayı hareketli nesnelere kullanılmaktadır. Ayrıca lazer ışınlarının dalga boyları küçüktür. Bu da daha ufak nesnelere ölçümünde kolaylık sağlamaktadır.

Lazer ölçümün bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Öncelikle maliyetleri diğer ölçüm yöntemlerine göre yüksektir. Lazer ışınları güçlü darbeleri formda kullanımlarında insan gözüne zarar verebilmektedir.

1.2.3. Kullanım Alanları

IR üçgenleme sensörler genellikle yakınlık algılama ve robotik uygulamalarda engellerden kaçınma amacıyla kullanılmaktadır. Bunun dışında otomatik yana açılır cam kapılarda güvenlik amacıyla da kullanılmaktadır.

Lazer üçgenleme sensörleri konum, yer değiştirme, boyutlar, yüzey profili, deformasyon, titreşim, nesnelere sınıflandırılması gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

1.2.4. Literatür Çalışmaları

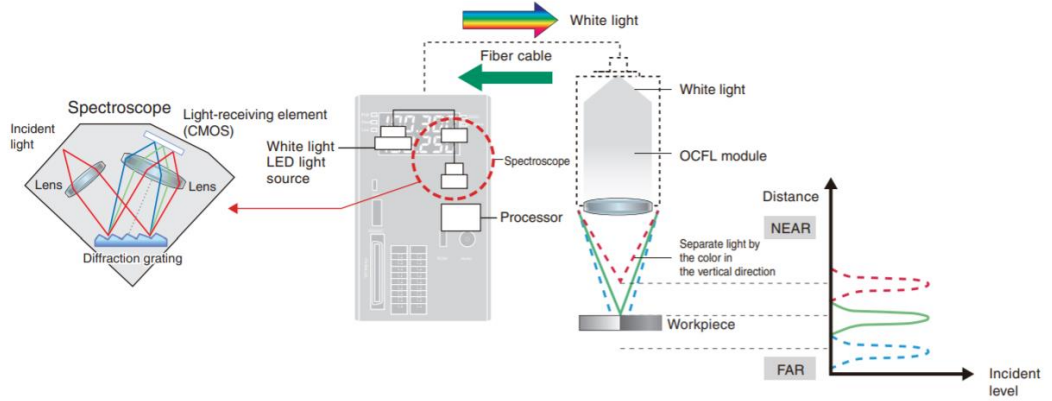
Bu başlık altında üçgenleme sensörlerle alakalı daha önce yapılmış çalışmalar hakkında bilgi verilecektir. Burada önce endüstride ne gibi çalışmalar yapıldığı ardından biyomedikal/medikal alandaki örnekler incelenecektir.

- Rüzgâr türbinlerindeki titreşimleri ölçmek için lazer üçgenleme sensörü kullanılmıştır [19]. Rüzgâr türbinlerindeki kanatlar, esnek ve hafifi malzemedен üretildiğinden rüzgâr hızı yüksek olduğunda titreşimlerin etkilerine maruz kalarak yorulma hasarına oluşmaktadır. Bu da kanatın işlevselliğini ve aerodinamik verimliliği etkilemektedir. Çalışmada dört lazer üçgenleme sensörü kullanılarak ölçümler yapılır. Elde edilen sonuçlarla optik sensörün büyük rüzgâr türbini kanatlarının titreşim ölçüm sistemi olarak uygulanabileceğini ortaya çıkarmıştır.
- Lazer üçgenleme ve CMOS görüntü sensörü kullanılarak cilt yüzeyindeki mikro titreşimlerinden non-invazif ve temassız bir şekilde alteriyel nabız ölçüm sistemi tasarlanmıştır [20]. Bilek ekleminde nabız ölçümü yapılacak nokta(lar), geleneksel Çin tıbbından faydalanılarak tespit edilmiştir. Tasarlanan alteriyel nabız ölçüm sisteminin performansını değerlendirmek için testler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlarda sistemin μm düzeyinde ölçüm yaptığı, farklı koşullarda çıkış darbe frekans ve genliğinin değiştiği, sistemin performansının oldukça iyi olduğunu göstermektedir. Alteriyel nabız ölçümü için optik üçgenleme ve CMOS görüntü sensörünün kullanılabilirliği gösterilmiştir.

1.3. EŞ ODAKLI (CONFOCAL)

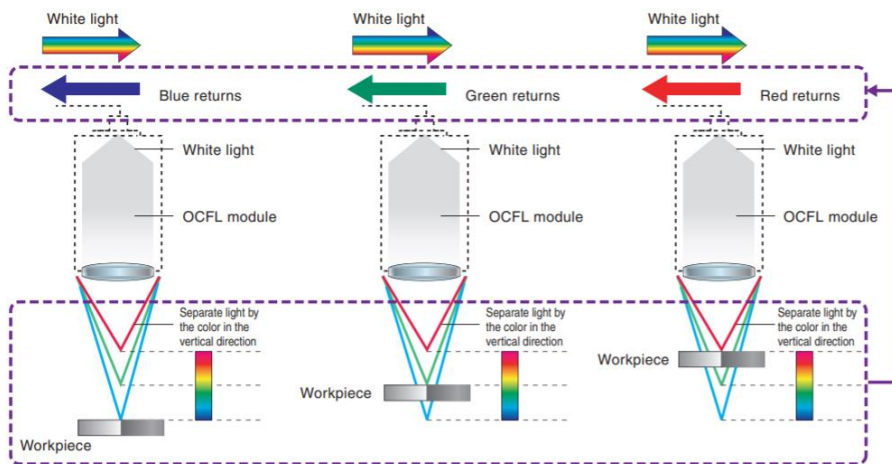
1.3.1. Çalışma Prensibi

Eş odaklı sensörler, mesafe ve kalınlığı ölçmek için geliştirilmiş mikrometre hassasiyete sahip kromatik sapma ilkesine göre çalışan optik ölçüm tekniğidir [21]. Sensör genellikle polikromatik (polychromatic) olarak tarif edilen ışığın çoklu dalga boylarını kullanan versiyonu bulunmaktadır. Bu versiyona eş odaklı kromatik sensör (confocal chromatic sensor) olarak bilinir.



Şekil 9 – Eş odaklı sensörün çalışma prensibi [22]

Şekil 9’da eş odaklı kromatik sensörün genel çalışma prensini görülmektedir. Burada led kaynağından yayılan (Led light source) beyaz ışık özel bir lens vasıtasıyla farklı renk ve dalgalara ayrılır. Beyaz ışığın her bir dalga boyu (ve renk) için odak noktasını OCFL modülü kontrol eder. Sonrasında sensörün uç tarafında farklı ışık renkleri oluşur. Ölçülmek istenen hedefe hangi ışık dalgası çarparsa o ışık dalgası sensöre geri yansır. Geri yansıyan ışığın rengine göre spektroskop (spectroscope) ve işlemciyle (processor) mesafe hesaplanır [22]. Şekil 10’da malzeme yüksekliğine göre geri dönen ışığın değişimi gösterilmiştir.



Şekil 10 – Hedefteki malzemenin yüksekliğine göre yansıtıcı ışığın değişimi [22]

1.3.2. Eş Odaklı(Confocal) Sensörler

Eş odaklı yöntemle üretilen sensörler, genellikle eş odaklı kromatik sensör (confocal chromatic sensor) ismiyle anılmaktadır. Piyasada micro-epsilon (Şekil 11), sick, omron gibi firmalarda farklı büyüklük, ölçüm aralığı, çözünürlükte olan ürünler bulunmaktadır.



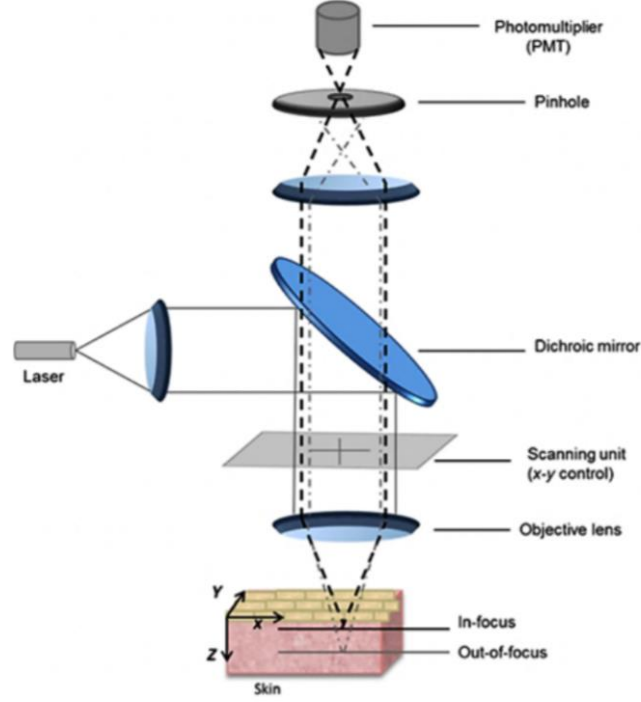
Şekil 11 – Micro-Epsilon firmasının eş odaklı sensörleri

1.3.3. Kullanım Alanları

Eş odaklı kromatik sensörler genellikle şeffaf malzemelerin mesafe ölçümü ve kalınlık ölçümünde kullanılır. Yarı iletken endüstrisinde, cam endüstrisinde, tıp mühendisliğinde, plastik üretiminde vb. birçok sektörde uygulama alanı bulmaktadır.

Medikal alanda aktif kullanıldığı örneklerden biri lazer taramalı konfokal mikroskobudur. Hücre biyolojisi, genetiği, mikrobiyoloji ve gelişim biyolojisi gibi birçok biyolojik alanda aktif olarak kullanılmaktadır [23]. Şekil 12’de mikroskobun çalışma diyagramı görülmektedir. Bu mikroskopta aydınlatma, numune boyunca hizalandırılmış bir lazer ışınıyla sağlanır. Lazer ışınları dikrotik (dichroic) aynadan yansyarak numune içinde belirli derinlikte tanımlanmış noktaya odaklanmış objektif lensinden geçerek ulaşır. Numuneye ulaşan ışınlar floresan probu uyarır. Sonrasında ışık dikrotik aynadan geçebilen daha uzun dalga boyunda yayılarak küçük delikten

(confocal pinholes) doğru yönelir. Burada, odak dışı sinyaller kesilerek yalnızca odaklanılmış noktadan yansıyan ışınlar detektöre girer. Böylece bu mikroskopla numunelerden yüksek çözünürlüklü (yanal, ~ 140 nm; aksenal, ~ 1 μm) görüntüler elde edilebilir [24].



Şekil 12 - Konfokal lazer tarama mikroskopisi prensibinin şematik diyagramı [24]

1.3.4. Literatür Çalışmaları

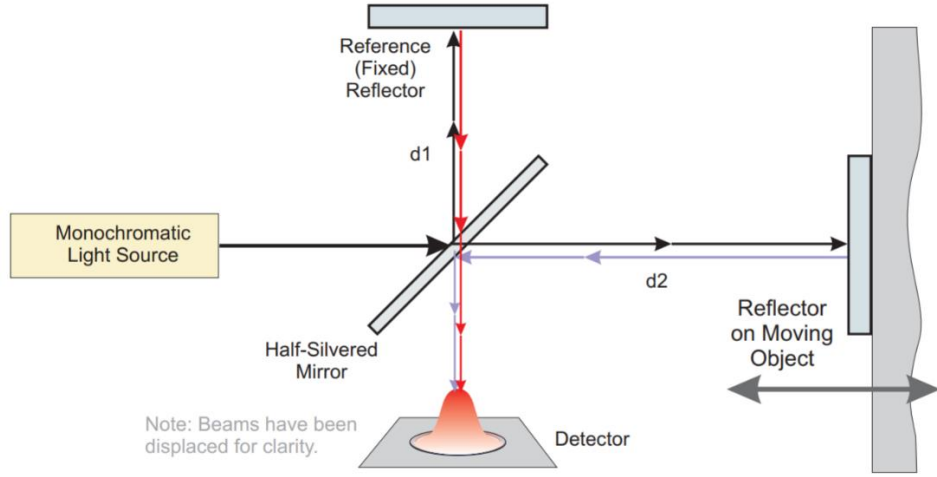
Bu başlık altında eş odaklı sensörlerle alakalı biyomedikal/medikal alanda yapılan çalışmalar incelenecektir.

- Eş odaklı yöntem kullanılarak ağız içi optik tarayıcının geliştirilmesi ve doğrulanmasını amaçlanmaktadır [25]. Çalışmada geliştirilen cihazın opto-mekanik tasarımları detaylı bir şekilde açıklanıp performansı değerlendirme yapılmıştır. Piyasada ağız görüntülemesinde kullanılan intraoral tarayıcılarla yapılan çalışma karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak tasarlanan cihazın piyasadaki örnek teknolojilerle rekabet edeceği gösterilmiştir.

1.4. İNTERFEROMETRİK (INTERFEROMETRIC)

1.4.1. Çalışma Prensibi

İnterferometrik ölçüm yöntemi, dalgalardan birinin bilindiği iki dalga arasındaki faz farkının ölçülmesi ilkesine dayanır [10]. İlk interferometre uygulamaları Michelson İnterferometresi ile başlar. Albert Abraham Michelson tarafından 1887 yılında icat edilmiştir. Bu icat Michelson'a Nobel ödülü kazandırmıştır [26].



Şekil 13 - Michelson İnterferometresi [27]

Şekil 13'te temel Michelson interferometresi görülmektedir. Burada tek dalga boylu (monochromatic) ışık kaynağı hareketli objenin değişimine bağlı olarak detektörde dalga boyu değişmektedir. Sabit aynada ise kaynaktan gönderilen ışık yansıtılarak detektöre gelir. Sabit kaynaktan gelen dalga boyu ile hareket sonucu nesneden yansıyan dalga boyu arasında faz farkı oluşur. Detektörde iki ışık arasındaki faz farkı belirlenerek mesafe hesaplanır [28].

Michelson interferometresinden sonra zaman içerisinde farklı interferometre çeşitleri de ortaya çıkmıştır. Bunlar arasında Fabry-Perot interferometresi, Fizeau interferometresi ve Mach-Zehnder interferometresi örnek olarak verilebilir. Bu interferometre yöntemleri birbirlerinden farklı olsa da yukarıda ifade edilen ilkelere göre çalışmaktadırlar.

1.4.2. İnterferometrik (Interferometric) Sensörler

İnterferometrik sensörler, optik sistemin çok kararlı bir şekilde kurulması gerektiğinden ticari olarak yoğun kullanılmazlar. Piyasada satılan interferometrik sensörler çoğunluklu düşük tutarlılık (low-coherence) kaynağına dayanırlar. Bu interferometrik sensörlerin farklı çeşitleri olmakla birlikte konuyu inceleyen kişilerce farklı farklı isimlendirilmişlerdir. Örneğin ilk çalışmalarda beyaz ışık interferometrisi (white-light interferometry-WLI) tercih edilirken daha yakın zamanda özellikle medikal uygulamalarının artmasıyla optik koherens tomografi (optical coherence tomography-OCT) adı kullanılmaya başlanmıştır [2]. Şekil 14'te ticari bir interferometre örneği görülmektedir.



Şekil 14 - SIOS SP 15000 NG marka lazer interferometre

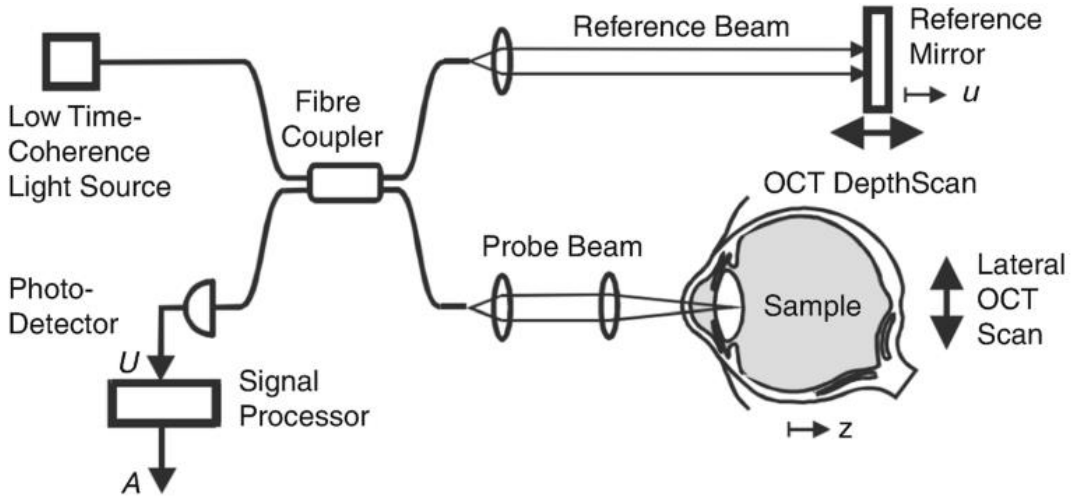
1.4.3. Kullanım Alanları

İnterferometrik sensörler, ölçüm ve konumlandırma işlemleri, mikroskop aşamaları, takım tezgahlarındaki uzunluk ölçümü cihazların kalibrasyonu, eksantriklik ve eş merkezlik ölçümleri gibi alanlarda kullanılmaktadır.

İnterferometrik yöntemin medikal alanda uygulama yöntemlerinden biri OCT cihazıdır. Bu cihazla temassız ve non-invazif bir şekilde yüksek çözünürlüklü kesitsel görüntüleme elde edilmektedir. Cihaz, genel olarak biyopsi gibi geleneksel

mikroskopik doku teşhisinin mümkün olmadığı insan gözü gibi organlarda teşhis için kullanılır.

Şekil 15’de OCT’nin çalışma prensibi görülmektedir. Burada düşük tutarlılıklı bir kaynaktan gelen ışık (low time-coherence light source) fiber kuplör kısmında iki kola ayrılır. İlk kola ayrılan ışınlar referans aynaya (reference mirror), ikinci kola ayrılanlar ise göze gider. İki koldan yansıyan ışıklar birleştirilerek detektör tarafından kaydedilir. Numuneye ait derinlik taraması elde edilmek istendiğinde referans ayna kolunun değiştirilmesi gerekir. Lateral tarama yapılmak istenirse de bu sefer gözün pozisyonu değiştirilmelidir [29].



Şekil 15 - OCT çalışma prensibi [29]

1.4.4. Literatür Çalışmaları

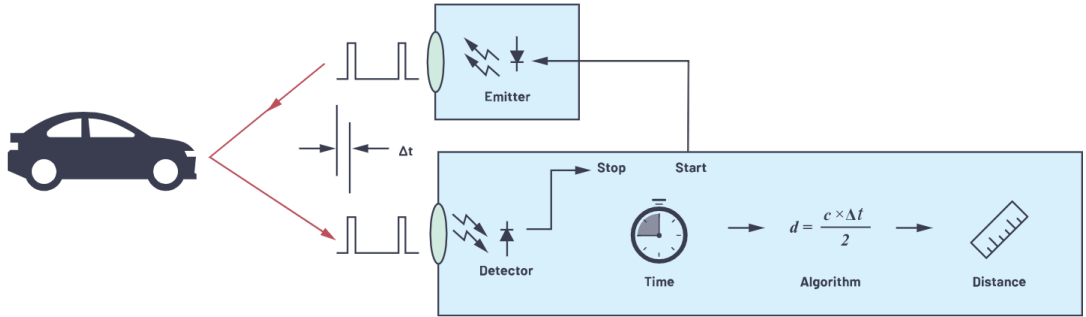
Bu başlık altında interferometrik sensörlerle alakalı biyomedikal/medikal alanda yapılan çalışmalar incelenecektir.

- İnterferometrinin optik üretim, veri depolama, takım tezgahları gibi endüstri alanlarından sıklıkla kullanıldığı ve uzun zamandır da mikroskopun içinde kullanıldığı bahsedilmektedir [30]. Araştırmada çeşitli interferometrik yöntemler hakkında bilgi verilmektedir. Ayrıca tekniklerin gelişmesiyle hücre ve dokulara görüntülenmesi sağlandığını bahsedilmektedir. Makalede interferometri yöntemleriyle yapılan mikroskoplar anlatılıp hücre ve dokuların bu yöntemle ölçülmesini örnekleri gösterilmiştir. Özetle ifade

edilen temel görüş, endüstride ölçüm tekniği olarak kullanılan yöntem yıllar içerisinde teknolojinin de gelişmesiyle biyomedikal alanda sınırsız uygulama alanı açmıştır.

1.5. UÇUŞ SÜRESİ (TIME-OF-FLIGHT)

Uçuş süresi ölçüm yönteminde ölçülmek istenen bir nesneye elektromanyetik dalgalar gönderilmesi ve gönderilen dalgaların nesneden yansıyıp ana kaynağa gelmesi için geçen süre hesaplanır. Bu süre daha sonra mesafe birimine çevrilmektedir. Burada gönderici kaynak optik olarak görünür ışık, IR veya lazer olabileceği gibi ses dalgası da olabilir. Özellikle lazer teknolojisinin ortaya çıkmasıyla bu yöntemle yapılan ölçüm sistemleri daha da gelişmiştir [2].



Şekil 16 - Time-of-Flight Ölçüm Prensipleri [31]

Şekil 16'da temel ToF çalışma prensibi görülmektedir. Burada verilen formüle göre, örneğin 1.5m uzaklıktaki bir nesneyi ölçmek için şu kadarlık bir gecikme yaşanır:

$$\Delta t = \frac{2 * 1.5 \text{ m}}{300.000.000 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 1 * 10^{-8} \text{ s} = 10 \text{ ns}$$

Buradaki hesaba bakıldığında 1.5m için gerekli uçuş süresi temel bir mikrodenetleyicinin hesaplayabilmesi çok zordur. Bu görevi yerine getiren analog devreler tasarlanabileceği gibi bu işlemi yapan özel entegrelerde bulunmaktadır. Tez kapsamında bu işlem özel bir entegreyle yapılacaktır.

ToF ölçüm yöntemleri temelde 2 başlık altında incelenmektedir. Bunlardan ilki gönderilen sinyalle gelen sinyal arasındaki zaman farkını hesaplarken, diğeri iki

sinyal arasındaki faz kaymasını hesaplayarak mesafe ölçümü yapmaktadır. Ayrıca bu iki ölçüm yöntemi de darbeleri veya sürekli modülasyon kullanmaktadırlar [32].

Aşağıda bu iki yöntemin çalışma prensipleri, kullanım alanları ve örnek sensörler hakkında bilgiler verilecektir. Son kısımda ise özellikle medikal alandaki uygulama örnekleri anlatılıp genel kullanımlarından bahsedilecektir.

1.5.1. Çalışma Prensibi

1.5.1.1. Direct Time-of-Flight (dToF)

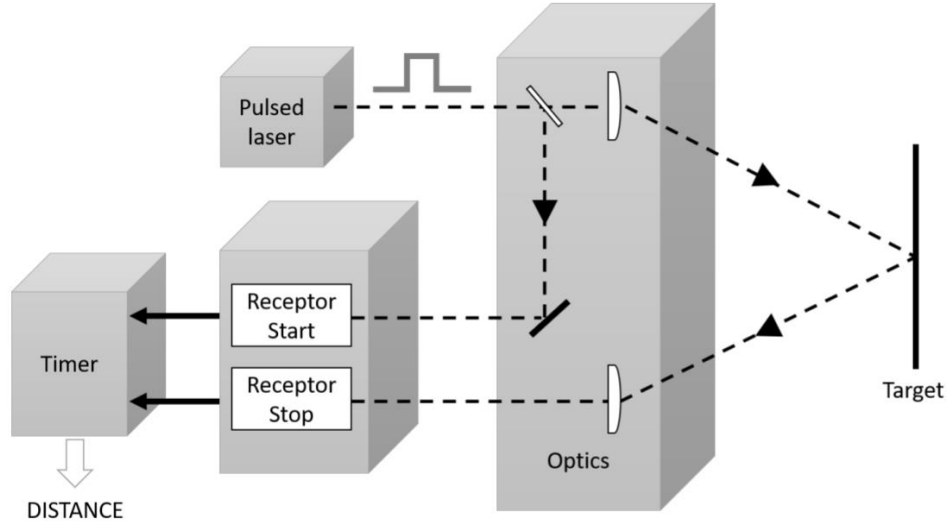
Direct ToF yönteminde, ölçülecek nesneye nanosaniye süren ışık darbeleri gönderilmesi ile nesneye çarpan ışınların bir kısmının geri dönmesi için geçen süreyi ölçerler (Şekil 17). Bu yöntemde mesafe hesaplanırken aşağıdaki formül kullanılmaktadır:

$$d = t * \frac{c}{2}$$

Formülde d nesne ile kaynak arasındaki mesafe, c ise ışığın boşluktaki hızı ($c=3 \times 10^8$ m/s) ve t ise ışığın kaynaktan çıkıp nesneye çarpıp tekrar kaynağa dönünceye kadarki süredir. Buradan hareketle de sensörün çözünürlüğü, t değerini hesaplayan elektroniğin çözünürlüğüne bağlıdır. Aynı şekilde ölçülebilecek maksimum mesafede zaman sayacının ölçülebilir maksimum zamanı ile sınırlıdır [33].

Bu yaklaşımla, 50m'den uzun mesafeleri ölçülebilir. Çünkü gidiş dönüş süreleri daha uzun olacaktır. Bunu ölçmek içinde basit detektörlerle ve elektronik cihazlar yeterlidir. Fakat daha yakın mesafeleri ölçmek için zamansal darbe şeklini hesaba katmak gerekir [2].

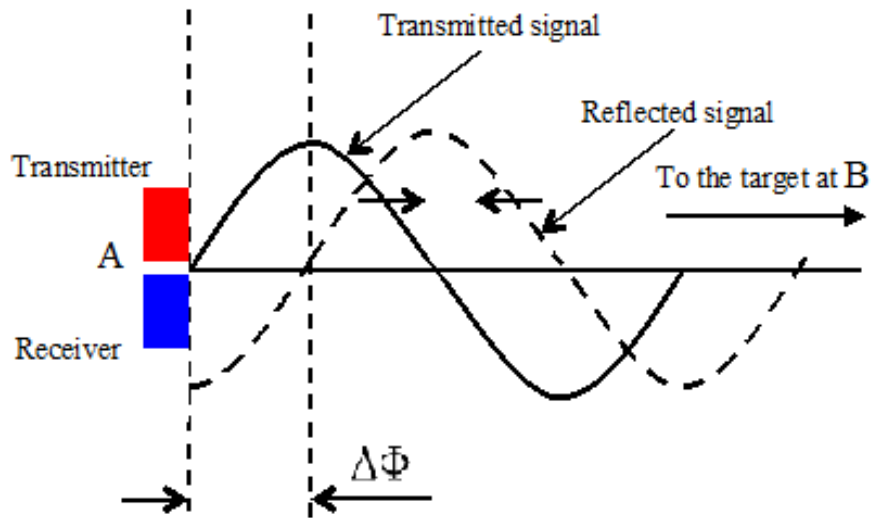
Bu yaklaşımın avantajları, kararlı, sağlam ve sistemin kurulumunun basit olmasıdır. Dezavantaj olarak uzun mesafe ölçümlerinde düşük sinyal gürültü oranı (SNR) ve göz sağlığı için sabitlenen emisyon sınırıdır [33].



Şekil 17 - Direct ToF ölçüm prensibi [33]

1.5.1.2. Indirect Time-of-Flight (iToF)

Indirect ToF yönteminde, sürekli dalga genliği modüle edilmiş ışığın ölçülecek nesneye gönderilmesi ile yansıyan dalganın arasındaki fazın ölçülmesi ilkesine dayanır. Şekil 18'de gönderilen ve gelen dalgalar arasındaki faz farkı görülmektedir. Bu ilkeye, continuous wave (CW) modülasyonu, faz ölçümü veya genlik modülasyonlu sürekli dalga (AMCW) ismi de verilmektedir [33].



Şekil 18 – Indirect ToF yönteminin gösterilmesi [3]

Indirect ToF yönteminde gönderilen sinyal ile yansıyan sinyal arasındaki faz farkı şu formülle hesaplanır:

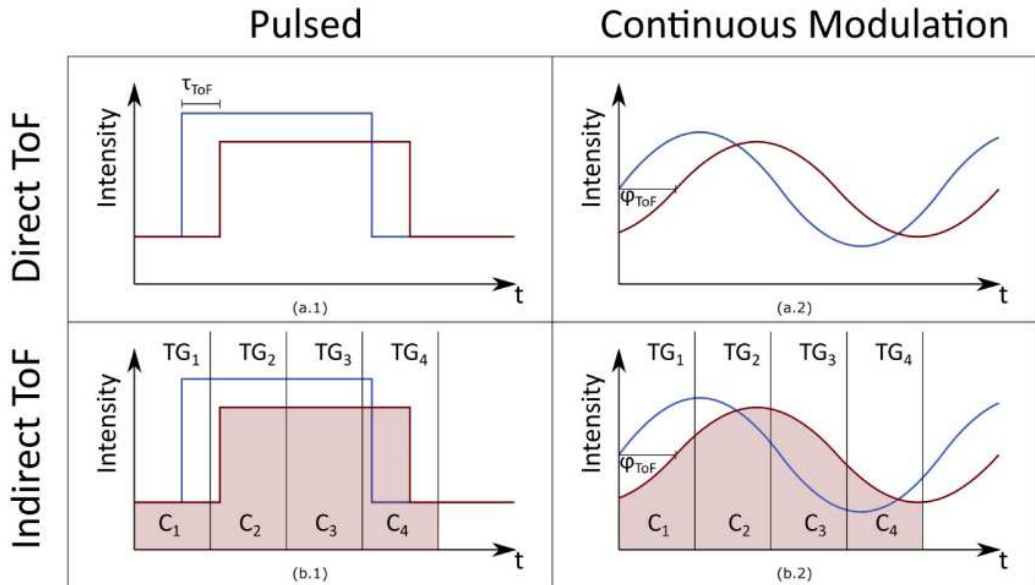
$$d = c * \frac{\Delta\phi}{4 * \pi * f_m}$$

Formülde d nesne ile kaynak arasındaki mesafe, c ise ışığın boşluktaki hızı ($c=3 \times 10^8$ m/s), f_m modülasyon frekansı ve $\Delta\phi$ ise faz kaymasını ifade etmektedir. Bu sensörün çözünürlüğü, modülasyon frekansı ve faz ölçerin çözünürlüğü ile belirlenir. Ayrıca bu sistemde optik güç modülasyon frekansı ile modüle edilir. Bundan dolayı da gönderilecek sinyal modülasyon frekansının sinüs veya kare dalgası olabilir [33].

Bu yaklaşım, birkaç metreden 50 m'ye kadar olan mesafeleri ölçmek için pratiktir. Fakat modülasyon hızı gigahertz aralığına yaklaştığında ise 1m'den kısa mesafeler için ölçüm daha zordur [2].

1.5.1.3. ToF Metotlarının Karşılaştırılması

Yukarıdaki başlıklarda anlatılan 2 ToF yaklaşımı, birbirinden farklı tekniklerde çalışıyor olup farklı kullanım alanları bulunmaktadır. Şekil 19'da direct ve indirect ToF metotlarının darbeli ve sürekli modülasyon örnekleri gösterilmektedir. Şekil 20'de ise bu iki yöntemin karşılaştırması yer almaktadır.



Şekil 19 - Direct ve Indirect ToF metotlarının darbeli ve sürekli modülasyonları [32]

Parameter	iToF	dToF
Acquisition Speed	Long Integration Time	Fast Acquisition
Range Ambiguity	Yes	No
Detect Multiple Echoes	No	Yes
Pixel Count	Large	Smaller
Data Volume	Small	Larger
Operation in Strong Ambient Light	OK	Good

Şekil 20 - ToF metotlarının karşılaştırılması [32]

1.5.2. ToF Sensörler

ToF yöntemleri kullanarak birçok farklı sensör veya cihaz yapılabilmektedir. Bu başlık altında LiDAR konusu işlenecektir. Fakat bu yöntem IR mesafe ölçümlerinde veya lazerlerde sıklıkla kullanılmaktadır.

Uçuş süresi yöntemiyle mesafe ölçümü yapılabilen fakat ölçüm için herhangi bir elektromanyetik dalga kullanmayan sensörlerde vardır. Bunlara en güzel örnek ultrasonik sensörlerdir. Sensör, ses dalgalarını kullanarak mesafe ölçümü yapmaktadır. Bu sensörler, hassas ölçümün gerekmediği ve düşük maliyetli çözüm istenen yerlerde kullanılabilir. Otomobillerdeki park sensörleri bu sensörlere örnek verilebilir.

1.5.2.1. LiDAR

LiDAR, ismini *Light Imaging Detection and Ranging* veya *Lazer Imaging Detection and Ranging* tamlamasının kısaltılmasından almaktadır; bu kısaltma *Işık/Lazer Tespiti ve Uzaklık Tayini* anlamına gelmektedir. Bazen uçuş süresi (ToF), 3D lazer tarama (laser scanning), 3D tarama(scanning) veya lazer tarama (laser scanning) gibi isimlerle de anılmaktadır [34].

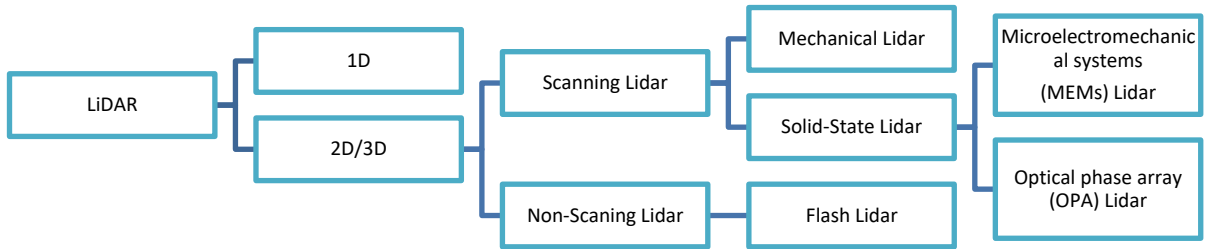
LiDAR sensörleri, en basit ifadeyle mesafe ölçümü esnasında bir dizi noktayı ölçmeye çalışırlar (Şekil 21). Doğrudan mesafe ölçümü yapılmak istendiğinde ise ölçülmek istenen hedefe doğrultularak ölçüm gerçekleştirilir. Burada mesafe ölçerken tek boyutlu sensörler kullanılır. Eğer verici sinyaller bir düzeyde hareket ettirilirse bu sefer mesafeyle birlikte açısal bir gösterim de elde edilir. Bu şekilde çalışan sensörlere 2D LiDAR veya 2D lazer tarayıcı sensörleri denir. LiDAR sensörleri, üçüncü boyutu ise döndürüldüklerinde elde ederler. Burada üçüncü boyutu döndürme yerine farklı yöntemlerle elde edebilirler [35].

Tez kapsamında time-of-flight ölçüm yönteminin anlaşılması ve bu yöntemin medikal alanda kullanımları anlatılmaya çalışılmaktadır. Bu kapsamda tezde 1D LiDAR tasarımı yapıp ölçümler alınacaktır. Bu LiDAR türü otomotiv sektöründe kullanılmamaktadır. Otomotiv sektöründe genellikle 2D/3D LiDARlar kullanılmaktadır.



Şekil 21 - Benewake TFmini PLUS 1D LiDAR Sensörü [36]

LiDAR sensörleri, temel olarak time-of-flight prensipleriyle çalışanları olduğu gibi farklı yöntemlerde örnekleri bulunmaktadır. Bu kısımda sadece ToF prensibiyle çalışan 2D/3D LiDARlar hakkında kısaca bilgi verilecektir.



Şekil 22 - ToF prensibiyle çalışan LiDAR çeşitleri [37]

Şekil 22’de LiDAR türleri gösterilmektedir. LiDAR türlerinin özelliklerini şöyle açıklanabilir:

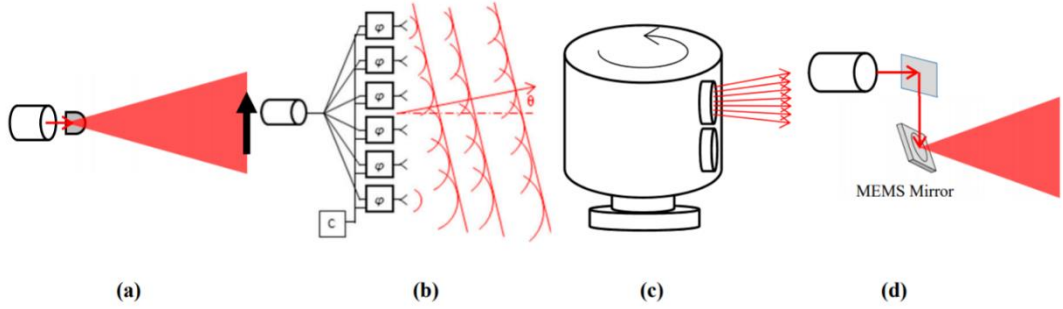
- **Scanning LiDAR:** Uçuş süresi prensibini kullanan bu LiDARlar, ışığın hedefe gidiş dönüş süresini hesaplarlar. Bu ölçümde gönderilen lazer ışınları her seferinde tek bir noktayı da aydınlatabilir, birden fazla noktayı da

aydınlatabilir. İki aydınlatma türünün sonunda hedefin 3 boyutlu nokta bulut haritası çıkarılır [38].

- **Mechanical LiDAR:** Dönen bir mekanik sistemle 360 derecelik geniş görüş alanı elde edilebilen LiDAR türüdür. Bu türde verici ve alıcı ışıklar döndürüldüğü gibi ışığı yönlendirecek aynalar da döndürülebilmektedir. Geniş görüş alanı nedeniyle çevrenin haritalandırmasını başarılı bir şekilde yaparken, fiyatlarının yüksek olması, yapısının karmaşıklığı ve büyük boyutları gibi nedenlerden dolayı mobilite ve otomotiv sektöründe daha az tercih edilmektedir [39].
- **Solid-State LiDAR:** Mekanik bileşenleri olmayan ve görüş alanı azaltılmış LiDAR türüdür. Bu tür bir aracın dört tarafına takıldığında mekanik LiDARın görüş alanına ulaşabilir [40]. Mekanik parça içermediğinden daha düşük maliyetli üretilebilirler. Bu LiDAR türünün birden fazla uygulama yöntemi bulunmaktadır.
 - **Microelectromechanical systems (MEMs) LiDAR:** Küçük aynaların voltaj gibi uyarıcıyla tetiklenmesiyle eğim açısının değiştirerek tarama yapan LiDAR türüdür. Aynalar, ışığı kontrol etmesinin yanı sıra ışığı yönlendirirler, modüle edebilir ve değiştirebilirler. Aynaların hareket ettirerek ışığı yönlendirme teknolojisi LiDARların dışında projektörlerde, ekranlarda ve fiber optik iletişimde kullanılmaya başlanmıştır. Sistemin en önemli özelliği küçük olmasıdır. Bu da maliyetin açısından özellikle mechanical LiDARlara göre üstünlük kazandırmaktadır [41].
 - **Optical phase array (OPA) LiDAR:** Işığın optik faz modülatörü aracılığıyla hızı kontrol edilerek gönderilecek ışınların belli gecikmelerle gönderildiği LiDAR türüdür. Şekil 23-b’de görüldüğü gibi üst taraftaki ışınlarda gecikme olmazken aşağı tarafa doğru gecikmeler olmaktadır. Bu

şekilde ışınların yönlendirilmesi ışığın farklı noktalara gitmesini sağlar. Hedefe çarpıp geri dönen ışınlar alıcı sistemler tarafından alınarak işlenirler [40].

- **Flash LiDAR:** Geniş açılı bir ışın göndererek önündeki alanı aydınlatıp çarpan ışınları odak düzlemindeki fotodetektörlerle alındığı LiDAR türüdür. Detektörler yansıyan sinyallerle görüntü mesafesini, konumu ve yansıyan ışık yoğunluğu yakalarlar. Bu LiDAR türünde elde edilecek görüntü tek bir led flaşıyla yapıldığında titreşim gibi görüntüyü bozacak etkenlerden etkilenmezler.



Şekil 23 - (a) Flash LiDAR; (b) OPA LiDAR; (c) Mechanical LiDAR; (d) MEMS LiDAR [41]

1.5.3. Kullanım Alanları

ToF yönteminin sayısız kullanım alanı bulunmaktadır. Bunları maddeler halinde şöyle ifade edebiliriz:

- **Tüketici Elektronikleri:** Artırılmış gerçeklik ve sanal gerçeklik uygulamalarında elde edilen derinlik bilgisine ek olarak kullanıcılara gerçek anlamda gerçeklik boyutu sağlar. Akıllı telefonlar ise gelişmiş fotoğraf çekimi imkânı vermektedir. Günümüzde çıkan telefonlarda (Samsung Note 10+, iPhone Pro Max gibi) bu yöntemle çalışan sensörleri kullanılmaya başlanmıştır.
- **Otomobil:** Bu sektörde çok gelişmiş kontrol ve algılama işlevlerinde kullanılmaktadır. Çarpışma uyarısı ve kaçınma sistemleri, kör nokta monitörleri, şeritte kalma yardımı, şeritten ayrılma uyarısı ve uyarlanabilir hız sabitleyici, sürücülere yardımcı olan ve belirli sürüş görevlerini

otomatikleştirerek sürüşü daha güvenli ve kolay bir deneyim haline getiren yerleşik özelliklere örneklerdir [40].



Şekil 24 - Velodyne firmasına ait LiDAR sensörler [42]

- **Robotik:** Robotların çevrelerini algılayarak güvenli ve optimum bir şekilde görevlerinin tamamlamasına yardımcı olarak kullanılır. Ayrıca 3D görüntüleme ile de insan ve robotların birlikte çalıştığı uygulamalarda güvenlik özellikleri amacıyla kullanılabilir [43].
- **Güvenlik:** Yüksek çözünürlüklü görüntü algılama teknikleriyle nesnelere ile insanların güvenli ve başarılı bir şekilde sınıflandırılmasında kullanılır. Ayrıca giriş/çıkıştan (güvenlik ve gözetim için) düşen veya kendilerine zarar veren kişilerin tespit edilmesine (tıbbi uygulamalar için) kadar birçok uygulama kullanım durumunda kullanılabilir [43].
- **Askeri:** Askeri birliklerin araziye anlamak ve savaş alanlarını incelemek için yüksek çözünürlüklü haritalar oluşturulurken LiDAR sensörler kullanılır.
- **Biyomedikal ve Sağlık Hizmetleri:** ToF yöntemi ile uzaktan mesafe ve derinlik ölçümü teknolojisi, özellikle pandemi sürecinde çeşitli sağlık hizmetlerinde daha önemli hale geldi. Bebeklerde solunum izlenmesi, sosyal

mesafenin takip edilmesi, çeşitli kontrollerin temassız bir şekilde hareketlerle yapılması sağlık kullanımları örnek verilebilir [43].

ABD Deniz Kuvvetleri Komutanlığına ait bir patentte [44], kanserli tümörlerin gibi nesnelere varlığını tespit ve kanserli tümörlerle ilgili bilgileri ise doku tarafından oluşturulan ışık saçılımından ayırt etmek için hibrit LiDAR-radar sistemi geliştirilmiştir. Burada dokuların içindeki tümörlerin saptanması için çözünürlük ve hassasiyeti geliştirmek için LiDAR ve radar sistemi birleştirilmiştir.

LiDAR teknolojisinin tablet ve telefonlarda kullanılmaya başlamasıyla yaralanma veya ameliyattan sonra iyileşen hastaların yapması gereken hareketlerin aralıklarının doğru ve anında ölçülmesini sağlayan yazılımlar geliştirilmektedir [45].

Tayvan merkezli bilgisayar donanımları üretip dağıtımını yapan Gigabyte firmasının geliştirdiği bir ürün [46], hastanelerde, yaşlı bakım evlerinde veya evde hasta izleme gibi alanlarla sağlık personellerinin uzaktan non-invaziv ve güvenilir bir şekilde hastanın sağlık durumunu izlenmesinde kullanılır. Aynı zaman tedavi gerektirdiğinde gerçek zamanlı uyarılarda gönderebilmektedir.

ToF kameralar ile elde edilen 3D görüntüleme verileriyle hasta izleme ve konumlandırmanın yanında vücut ölçümleri ve X-ışını teşhisi gibi farklı uygulama alanları da bulunmaktadır. ToF kameralarla MRI (Manyetik rezonans görüntüleme) veya BT (Bilgisayarlı tomografi) gibi görüntüleme sistemlerinde hastanın doğru konumlandırılması amacıyla kullanılmaktadır. Bu kameralar ayrıca yoğun bakım ünitelerinde hastanın uzaktan izlenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Burada akıllı algoritmalarla yaklaşmakta olan epileptik ataklar veya endişe edici hayati parametreler hakkında bilgi alınabilmektedir [47]. Şekil 24'de velodyne firmasına ait LiDAR sensörler [42] ve bir hasta görüntüleme sistemi (25) görülmektedir.



Şekil 25 - Hasta görüntüleme sistemi [47]

ToF kameraların medikal kullanımlarından bir diğeri ise X-ışını görüntüleme sistemlerinde radyasyon dozunun doğru ayarlanmasıdır. Standart makinelerde doz miktarı teknisyen tarafından ayarlanırken, bu kameralarla vücudun hacmi belirlenerek ve görüntü alınacak konum kesin belirlendiğinde optimal doz seviyesi ayarlanabilmektedir [47].

- Tarımda arazinin üç boyutlu yükseklik haritasının oluşturulması; arkeolojide yüzeylerin daha iyi anlaşılması ve mikro topografyaların tespiti; video oyunlarda modellemenin daha gerçekçi yapılması; şehir planlama yapılırken şehrin haritasının çıkarılmasında; dronelarda daha güvenli iniş yapmasında; özellikle ormanlardaki canlı çeşitliliğinin bulmada yardımcı olmak gibi farklı alanlarda ToF tabanlı sensörlerin birçok kullanım alanı bulunmaktadır [48].

1.5.4. Literatür Çalışmaları

Bu başlık altında ToF sensörlerle alakalı daha önce yapılmış çalışmalar hakkında bilgi verilecektir. Burada önce endüstride veya biyomedikal/medikal alandaki örnekler incelenecektir.

- Hastanın pozisyonu önceden bilinen bir referans yüzeye göre düzeltmek için ToF teknolojisi kullanılmıştır [49]. ToF kameranın kullanıldığı çalışmada, robot kola bağlanan bir fantomla hasta kişi örneklenerek, olası rotasyon ve translasyon hareketlerinin doğru bir şekilde hesaplanması sağlanmıştır. Yapılan testler sonucunda fantom için 2,88mm ve 0.28 derecelik bir hata ile karşılaşılırken, insan deneylerinde ortalama 3,38mm bir kayıt hatası çıkmıştır. Bu önerilen sistemin sağlamlığı ve kararlılığı göstermekle birlikte radyoterapi ve multimodal görüntü alımında potansiyel uygulama olarak kullanılabilceği belirtilmiştir.
- Bu kısımda, ToF tabanlı kameralarla ilgili Almanya kanser araştırma merkezinin veri bilimi ve dijital onkoloji birimin bölüm başkanlığını yapan Prof. Dr. Lena Maier-Hein yaptığı çalışmalar özetlenecektir. Öncelikle yaptığı çalışmalarla ilgili bir röportajında [50], ToF kameraların konumsal verileri gerçek zamanlı olarak elde edebilmesinden dolayı hasta konumu ve takibi bağlamında geleneksel tıbbi görüntüleme yöntemlerine alternatif olabileceğini belirtmektedir. ToF kameraların sahnedeki bağımsız gerçek zamanlı derinlik bilgisi elde etmesini en büyük avantajı olduğu belirtildikten sonra mesafe ölçmek için kamera kullanımında donanımın fazla olduğu, ancak ToF kameralarda tek bir çipte bu işin yapılabildiği vurgulanmıştır.

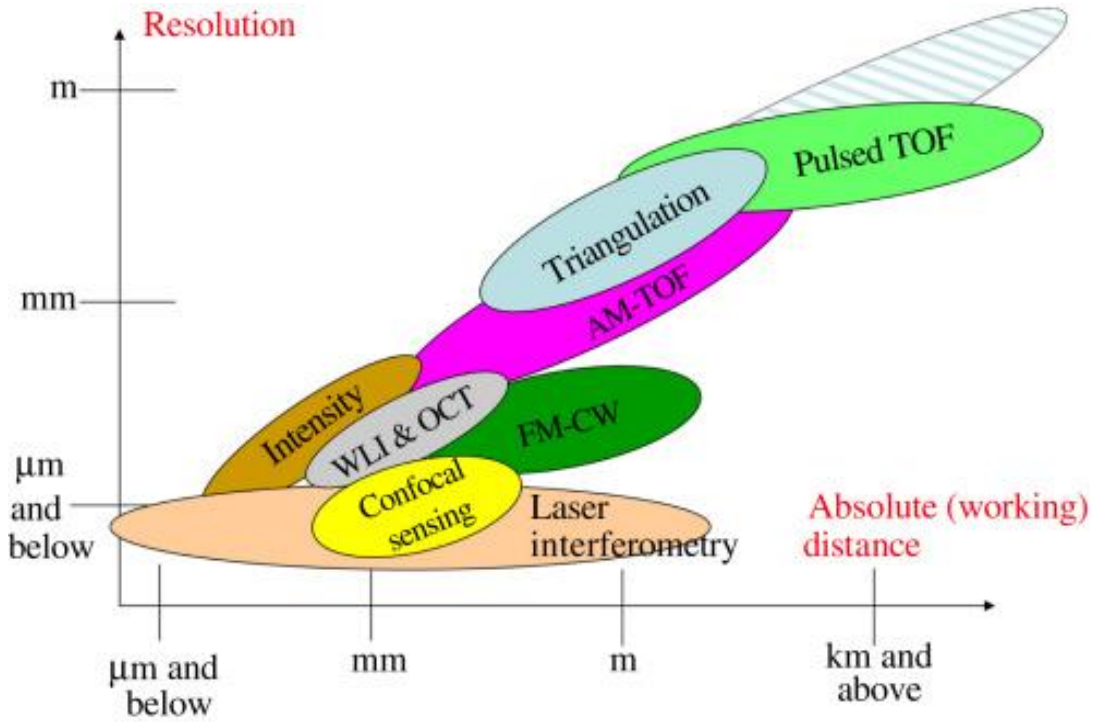
ToF kameraların, geleneksel tıbbi görüntüleme yöntemlerinden (BT, ultrason gibi) farkının düşük maliyetli, gerçek zamanlı ve hastaya veya doktora zararlı olabilecek radyasyona maruz bırakmaması olarak ifade edilmiştir. Ayrıca ToF kameralar, ultrason cihazları gibi hastaya temasla elde edilen görüntü yöntemleri aksine temas gerektirmeden görüntü elde etmektedirler.

Röportajın ToF kameralarla ilgili olarak ameliyathane izleme, iş akış analizi için personel takibi, yaşlı bakımı ve rehabilitasyon çalışmaları olduğu ifade edilmiştir. Ekip olarak çalıştıkları konu ise medikal verilerin hasta konumu ve organ takibi için sezgisel olarak görselleştirilmesidir. Ayrıca mobil artırılmış gerçeklik üzerine çalıştıkları ifade edilmiştir.

Bu çalışmada [51] ise Prof. Dr. Lena Maier-Hein ve ekip arkadaşlarıyla, ToF görüntüleme ve RGB sensör bir araya getirilerek 3D endoskopi çalışması yapılmıştır. Burada geliştirilen yöntemle ToF sensörlerin düşük mekânsal çözünürlüklerin ve zayıf gürültü bastırma oranının(SNR) üstesinden geldiği ifade edilmiştir.

1.6. ÖLÇÜM YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Yukarıdaki başlıklarda mesafe ölçümlerinde kullanılan optik yöntemlerden en bilinenleri anlatılmıştır. Bu kısımda yöntemlerin ölçüm mesafeleri ve hassasiyetleri karşılaştırılacaktır. Şekil 26'da ölçüm yöntemlerinin diyagramı görülmektedir. Bu kısımda gösterilen bölgeler yaklaşık değerlerdir. Kesin sınırları ifade etmemektedir.



Şekil 26 - Optik yöntemlerin karşılaştırılması [2]

Şekil 26'da görüldüğü üzere genelde çalışma mesafesi arttıkça ürünlerin çözünürlükleri artmaktadır. Buna genellemeye istisna teşkil eden lazer interferometresidir. Çünkü bu yöntemle geniş mesafelerde hassas ölçüm yapabilmektedir. Fakat diğer yöntemlerden daha karmaşık ve maliyetlidir.

2. DONANIM TASARIMI

Bu başlık altında tek boyutlu time-of-flight sensör uygulamasını gerçekleştirmek için yapılan donanım çalışmalarından bahsedilecektir. Çalışmaya ilk olarak time-of-flight entegreleri ile ilgili yapılan araştırmalardan bahsedilecektir. Bu araştırmalar sonucu kullanılacak entegrenin özellikleri açıklanacaktır.

Uygulamada kullanılacak ToF modülü ve o modül üzerinde yer alan ve devrede kullanılacak ToF entegresi, IR alıcı ve verici gözler, mikrodenetleyici ve eepromdan bahsedilecektir. Mikrodenetleyici seçimi yapılırken işlemcinin bilgisayarda doğrudan haberleşmesi için USB modüllü bir işlemci seçilmesine dikkat edilecektir. EEPROM ise ToF entegresinin kalibrasyon değerlerinin kaydedilmesinde kullanılacaktır.

Gerekli donanımlar seçildikten sonra baskı devre kartının tasarımına başlanacaktır. Burada ToF modülüyle haberleşip bilgisayara veri gönderen işlemci kartı tasarlanacaktır. Modül kartının ve tasarlanacak kartın şematik ve baskı devre kartları gösterilip bilgiler verilecektir.

2.1. TIME-OF-FLIGHT ENTEGRELERİ

Time-of-Flight çalışmalarına başlarken ilk olarak piyasada bulunan entegreler incelenmiştir. Bu entegrelere ilk olarak global elektronik malzeme satış sitelerinden (mouser.com vb.) bakılmıştır. Entegre üretici tüm firmaların time-of-flight için ürettikleri ürünlerin özellikleri incelenmiştir. Aşağıda incelenen firmalar, ürettikleri ürünler ve ürün özellikleri yer almaktadır:

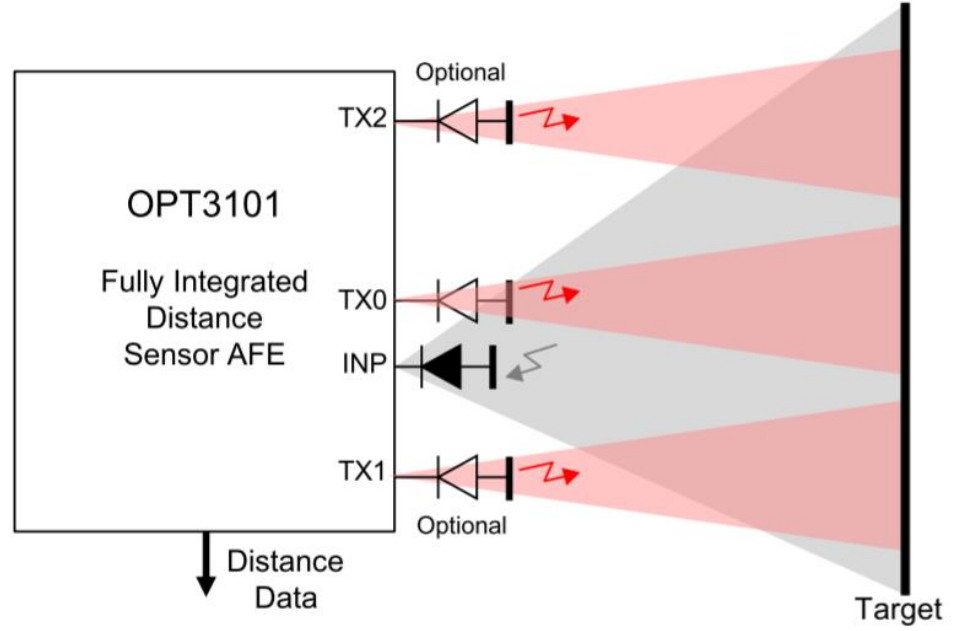
2.1.1. Texas Instruments

Texas Instruments (TI), ABD merkezli yarı iletken sanayi, mikrodenetleyici, işlemci, hesap makinesi, bilgisayar malzemeleri vb. birçok entegre üretimi gerçekleştiren firmadır.

TI, time-of-flight alanında 4 entegre geliştirmiştir. 4 üründe aktif durumda olup satışına devam edilmektedir. Entegreler ve özellikleri maddeler halinde şöyle sıralayabiliriz:

- **OPT8320:** Bu entegre 3D time-of-flight uygulamaları için geliştirilmiş sensör ve kontrolcünün tek bir kılıfta (system-on-chip) olduğu üründür. Ürünün çözünürlüğü 80x60'dır. Ürün 3D tarama, 3D bilgisayarlı görü (machine vision), konumlama, gesture, yaklaşım (proximity) vb. alanlarda derinlik algılamada kullanılır [52].
- **OPT8241:** Bu entegre 3D time-of-flight sensördür. Ürünün çözünürlüğü 320x240'dır. Entegre çıkış ham kolerasyon verilerinden oluşmaktadır. Bu veriler bir sonraki madde anlatılacak entegre uyumlu çalışırlar. Ürün bir önceki entegre gibi 3D tarama, 3D bilgisayarlı görü (machine vision), konumlama, gesture, yaklaşım (proximity) vb. alanlarda derinlik algılamada kullanılır [53].
- **OPT9221:** Bu entegre OPT8241 entegresinin kontrolcüsüdür. OPT8241 veya başka bir entegreden gelen ham verileri işleyip derinlik verileri çıkarmaktadır. Buradan elde edilen verilerle 3D görüntüleme uygulamaları yapılmaktadır [54].
- **OPT3101:** Bu entegre sürekli dalga (continuours-wave), time-of-flight tabanlı yakınlık algılama (proximity) ce mesafe bulma için geliştirilmiş yüksek hızlı ve yüksek çözünürlüklü AFE (analog front end)'dir. Tez kapsamında yapılması planlanan ürün için uygun entegrelerden biri budur. Bu entegrede bağlanacak verici ledler için dahili sürücüye sahiptir. Aynı anda 3 tane verici led bağlanabilmektedir. Böylece çok bölgeli çalışabilmektedir. Ayrıca sıcaklık ve karışmalardan (crosstalk) kaynaklanan karışıkları önlemek için gerekli kalibrasyon ayarlarını desteklemektedir.

OPT3101 entegresi (Şekil 27), hassas uzun menzilli mesafe ölçümleri için uygundur. Örnek uygulama alanı olarak yüksek hızlı konveyör batta sayma işlemleri, hassas yer değiştirme durumlarını algılama, zorlu koşullarda temassız mesafe ve seviye ölçümü yapabilmektedir. Bunun dışında dronelar için hassas iniş için mesafe ölçümü, akıllı süpürgelerde uçurum ve kenar tespiti ve çeşitli uygulamalarda engel algılaması yaptırılabilir [55].



Şekil 27 - OPT3101 için uygulama blok diyagramı [55]

2.1.2. STMicroelectronics

STMicroelectronics, Fransız-İtalyan çokuluslu bir şirket olup Avrupa'nın en büyük yarı iletken firmasıdır. Firma başta mikrodenetleyiciler olmak üzere otomobil, IOT, endüstri, bilgisayar vb. birçok alanda gerekli entegreleri üretmektedir.

ST firmasının time-of-flight üzerine çeşitli entegreleri bulunmaktadır. ToF teknolojisini "FlightSense" isimli ticari bir markayla sunmaktadır. Dünya üzerindeki 1 numaralı ToF sensör tedarikçisidir. 15'in üzerinde akıllı telefon üreticisinde 170'den fazla telefonda bu teknoloji kullanılmaktadır [56].

ST ToF sensörleri, kolay, uygun maliyetli ve alıcı-verici sistemlerinin tek kılıf içerisinde olan ve bundan dolayı da az yer kaplayan sensörlerdir. Bu sensörlerin çeşitli avantajlı olduğu noktalar vardır [57]:

- Sensörler hedefin büyüklüğü, renk ve yansımadan bağımsız doğru mesafe ölçümleri yapabilmektedir.
- ST'nin patenli histogram algoritmalarıyla doğru bir şekilde birden fazla nesnenin tespiti ve ölçümü yapılabilmektedir. Ayrıca bu algoritmalarla,

endüstriyel şartlarda meydana gelen kirlenmelere karşı gerçek zamanlı leke bağıışıklığı (Smudge immunity) özelliği bulunmaktadır.

- Maksimum 8 metreye kadar yüksek hızlı mesafe ölçümü gerçekleştirebilmektedir.
- Hepsi bir arada (all-in-one) yapıda tasarlanmıştır. Alıcı ve verici tek kılıf içerisinde.
- 940nm dalga boylu görünmez ışık kullanmaktadır.
- Düşük güç tüketmektedir.

ST ToF sensörler, birçok alanda kullanım alanı bulmaktadır. Robotik ve dronler için engel algılama, hareket (gesture) kontrolü), sıvı seviye ölçümü, envanter yönetimi, yaklaşım algılama, kamera otomatik odaklama yardımcısı vb. birçok uygulamada kullanılmaktadır [57].

Şekil 28’de ST firmasının ürettiği ToF sensörler görülmektedir. Son çıkardığı “VL53L5CX” ürünü FlightSense teknolojisinin 4. nesil ürünüdür. Bu sensörle 4m’ye kadar 64 bölge mini derinlik haritası çıkarılabilmektedir.

	VL6180X Proximity sensor + Ambient light sensor	VL6180 Proximity sensor	VL53LOX Ranging sensor	VL53L1X Ranging sensor	VL53L3CX Proxy + Multi target sensor	VL53L1 Long Distance + Multi target sensor	VL53L5CX Multizone sensor
Part number	VL6180XV0NR/1	VL6180V1NR/1	VL53L0CXV0DH/1	VL53L1CXV0FY/1	VL53L3CXV0DH/1	VL53L1CBV0FY/1	VL53L5CXV0GC/1
Max distance	20 cm	60 cm	200 cm	400 cm	500 cm	800 cm	400 cm
Ambient light sensing	•						
Close distance detection	•	•	•		•		
Multi-target detection					•	•	•
Multi-zone						•	•
Programmable FoV				•		•	
Lower power mode	•	•	•	•			•

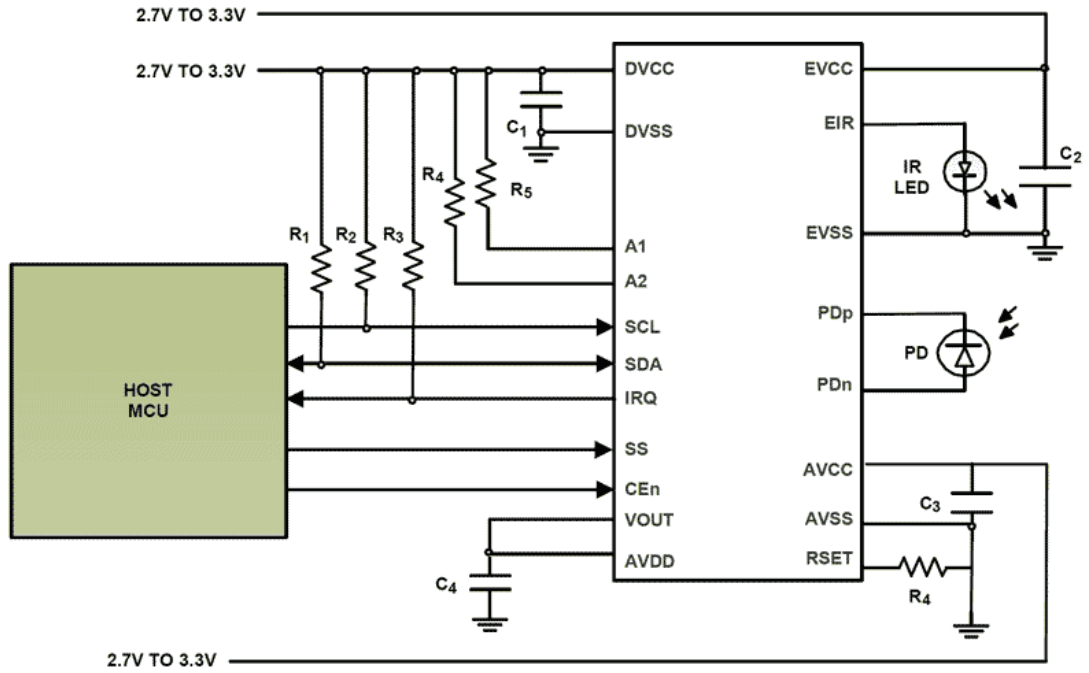
Şekil 28 - ST ToF Sensörleri [57]

2.1.3. Renesas Electronics

Renesas Electronics, Japon merkezli yarı iletken üreticisidir. 2010 yılında NEC Electronics ile birleşen firma dünya birçok yerinde imalat, tasarım ve satış yapmaktadır. Firma otomotiv, endüstriyel, teknolojik altyapı ve IOT alanında aktif ürünler üretmektedir. Öyle ki 2014 yılında dünyanın en büyük otomotiv yarı iletken üretici ve dünyanın en büyük mikrodenetleyici üreticisiydi [58].

Renesas Electronics, time-of-flight tabanlı tek bir entegresi bulunmaktadır. Tez kapsamında bu entegre kullanılarak uygulama gerçekleştirilecektir. Entegre ToF tabanlı sinyal işleme entegresidir. Yakınlık algılama ve mesafe ölçümlerinde kullanılır.

Entegrenin uygulama alanları olarak mobil tüketici uygulamaları, endüstriyel yakınlık algılanması, güç yönetimi ve ev otomasyonunda ifade edilebilir.



Şekil 29 - ISL29501 Fonksiyonel Diyagramı [59]

2.2. KULLANILACAK DONANIM ELEMANLARI

2.2.1. Pmod ToF

PMOD ToF, Digilent firmasına ait bir ToF tabanlı bir sensördür. Digilent firması, National Instruments firmasının bir yan kuruluşudur. Genel olarak FPGA ve

SoC tabanlı donanım ve yazılım sistemleri ürünler, araçlar ve uygulama bilgileri sağlamaktadır.

PMOD ToF (Şekil 30), düşük güçte optik araçlar kullanılarak mesafe ölçümlerinin yapılabileceği bir sensördür. Üzerinde Renesas firmasına ait ISL29501 (Şekil 29) dijital sinyal işlemcisi bulunmaktadır. Bu modül kartla 5 metreye kadar mesafe ölçümü yapılabilmektedir [60].

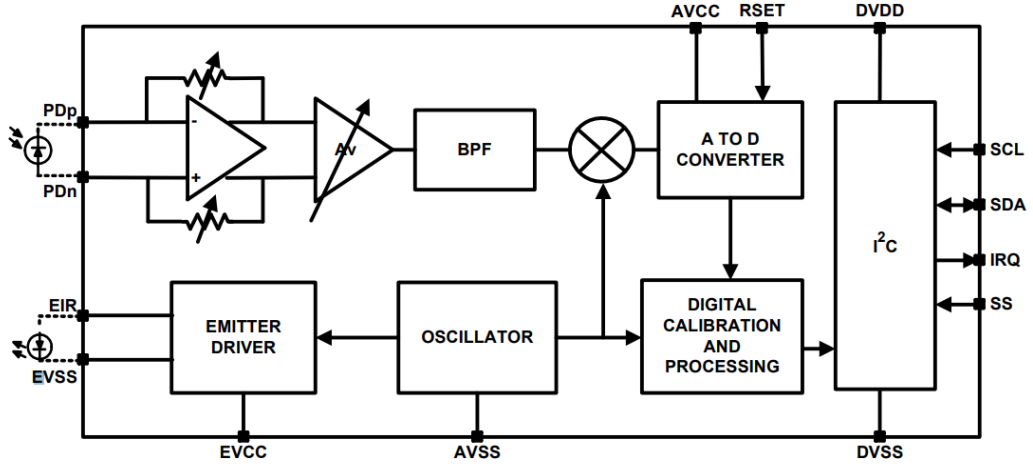


Şekil 30 - PMOD ToF Görünümü [60]

Tez kapsamında bu modül kullanılarak ölçümler yapılacaktır. Modül üzerindeki temel malzemeler hakkında bilgiler verilecektir. Malzemeler ToF entegresi olarak ISL29501, kızılötesi led, fotodiyot ve kalibrasyon sonrası verilerin tutulduğu hafıza(eeprom) elemanından oluşur.

2.2.2. ISL29501

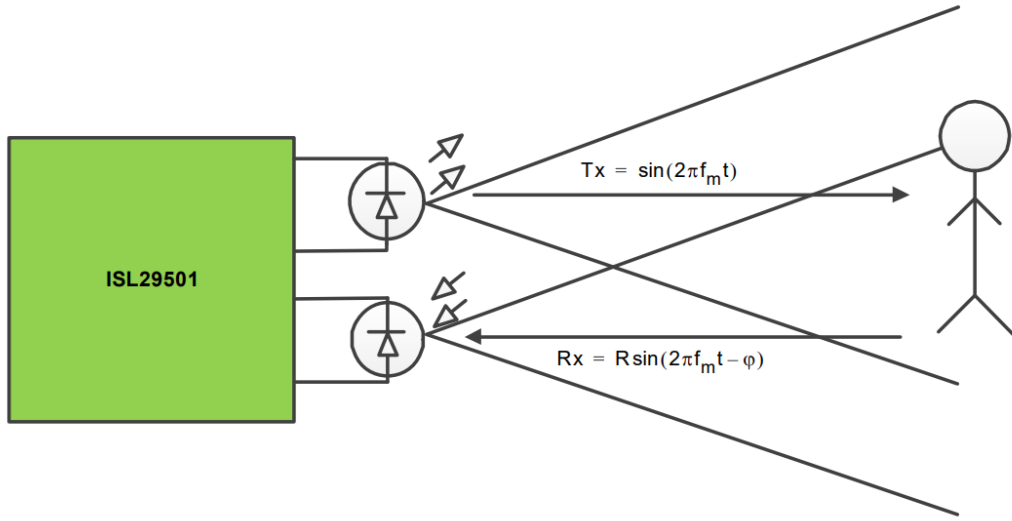
ISL29501, ToF tabanlı bir sinyal işleme entegresidir. Sensöre harici verici ve alıcı led bağlanarak uygun maliyette, düşük güçte ve uzun mesafede algılama yapılabilmektedir (Şekil31).



Şekil 31 - ISL29501 Blok Diyagramı [59]

ISL29501, kare dalga modülasyonlu uçuş süresi (Square Wave Modulated Indirect Time of Flight, SWM-IToF) ilkesiyle çalışmaktadır. Sensör frekans alanında (frequency domain) çalışır ve faz kaymasından mesafe ölçümü yapmaktadır.

Entegre, mesafe ölçümleri için harici bir verici ve alıcı kullanarak gerçekleştirir (Şekil 32). Harici verici entegre içindeki sürücüyle çalışır. Sistem vericiyle belli bir frekansta (f_{mod}) modüle edilmiş kare dalga gönderir. Hedefe çarpıp yansıtıcılığına bağlı olarak faz kayması ve zayıflama ile geri dönen sinyalle gönderilen sinyal arasındaki faz farkı, frekans alanında belirlenir ve mesafe ölçüm işlemine başlanır. Ölçüm ise dahili DSP (digital signal processing) kullanılarak hesaplanarak I2C aracılığıyla çıkışa aktarılır. Şekil 2’de bir f_{mod} frekansında bir kare dalga tarafından modüle edilerek gönderilen ışığın (Tx), engele çarptıktan sonra zayıflatılmış R genliği ve faz kaymasıyla yansıyan ışık (Rx) gösterilmektedir.



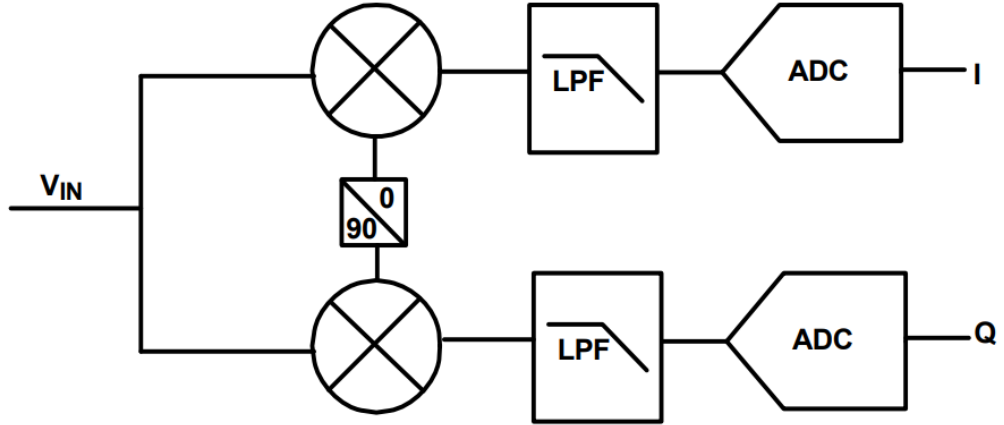
Şekil 32 - İletilen ve yansıyan sinyal [59]

Entegre faz kaymasını belirleyerek nesneye olan mesafeyi şu formüller hesaplar:

$$D = \frac{C}{4 * \pi * f_{mod}} * \Delta\varphi$$

Formülde D ile gösterilen ölçülmek istenen mesafe, c ışık hızı, f_{mod} modülasyon frekansı ve $\Delta\varphi$ ise gönderilen ve yansıyan sinyal arasındaki faz farkıdır. Modülasyon frekans ise bu entegre için 4.5 MHz'dir. Formül incelendiğinde c ve f_{mod} bilinen değerler olduğu görülmektedir. Mesafe için bilinmeyen değer faz kaymasıdır. Bunun hesaplanması için de analog karesel sinyal işleme (analog quadrature signal processing) tekniklerinden faydalanır.

AFE (analog front-end), fotoakımı iki aşamada bir voltaja dönüştürür (Şekil 33). İlk aşamada fotodiyot akımını voltaja dönüştüren transempedans yükselteçtir (Transimpedance Amplifier-TIA). İkinci aşama ise bu voltajı analog sinyal zincirinin geri kalanı için tamponlayan düşük gürültü yükseltecidir (Low Noise Amplifier-LNA). Sonrasında demodülatör (demodulator) tarafından faz (phase-I) ve karesel (Quadrature-Q) olarak ikiye ayırır. Bu iki değer filtrelenerek ADC biriminde sayısallaştırılır.



Şekil 33 - Sinyalin I ve Q olarak işlenmesi [59]

ISL29501 entegresindeki giriş sinyali, sinyal gürültü oranı (SNR) optimize etmek için değişken kazanç (A_v) ve otomatik kazanç kontrolü (AGC) döngüsüyle AFE'yi takip etmektedir. Ayrıca AGC elde edilen kazanç, uygulama tasarımında farklı detektörlerin seçimine izin verir.

ToF Entegresi, verici çıkışı ve alıcı (fotodiyot) girişleri farklı donanımlara uygun olacak şekilde tasarlanmıştır. Bunun için giriş kısmında AFE ve AGC döngüleri, çıkışta ise programlanabilir çıkış sürücüsü kullanılmaktadır.

ISL29501 entegresinin dahili verici sinyal sürücü birimi bulunmaktadır. Bu kısma kızılötesi (IR), dikey boşluklu yüzey yayan lazerler (vertical-cavity surface-emitting lasers) ve uygun lazer cihazları bağlanabilmektedir. Kullanılması düşünülen donanım belirlendikten sonra istenen yayıcı darbe sürücü akımı ve entegre içinde yer alan DAC(digital-analog converter) aracılığıyla da istenen darbe verilebilmektedir.

ISL29501 entegresi, tek atış (single shot) ve sürekli (continuous) olmak üzere iki moda çalışır. Tek atış modu, tek ölçüm yapılıdır. Örnekleme periyodu işlemci tarafından kontrol edilir. Bu da güç tüketimini esnek bir şekilde kontrol edilmesini sağlar. Sürekli ölçüm modunda ise önceden tanımlanmış örnekleme periyodu doğrultusunda sürekli ölçüm yapılan çalışma modudur. Bu moda örnekleme periyodu sonunda oluşan mesafe bilgisi işlemci tarafından okunabilmektedir. Eğer entegrenin kesme pini aktif edilirse her ölçüm sonrasında kesme pini aktif olur. Bu ölçüm modunda ölçümler arası maksimum süre 3.5s'dir.

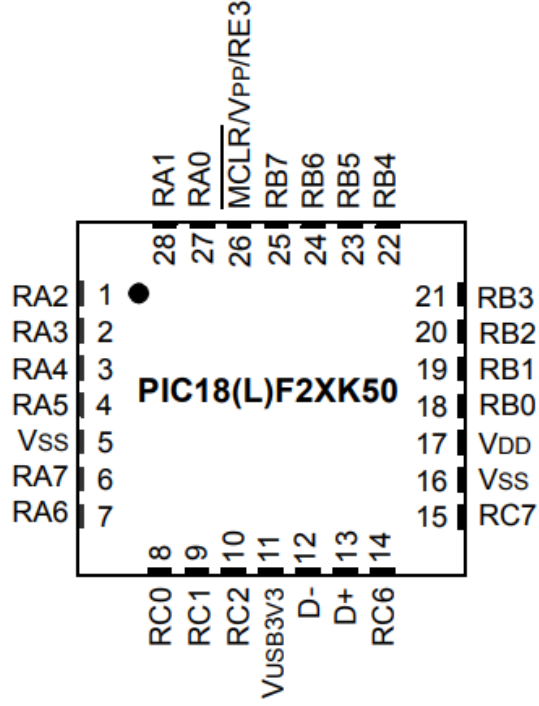
ISL29501 entegresi ile ölçüm yapılmadan önce standart kalibrasyon değerleri yüklenmesi gerekir. Entegre için 3 standart kalibrasyon ayarı bulunmaktadır. Bunlar birçok uygulama için sensör her çalıştırıldığında gerek duyulmaktadır. Fakat yakınlık algılamak için tüm kalibrasyon ayalarının yapılmasına gerek yoktur. Bunun yerine belirlenmiş standart kalibrasyon değerler kümesi sensör başlamadan önce yüklenebilir. Ayrıca entegrenin kalibrasyon değerlerini enerji kesildiğinde belleğinde tutacak bir donanım bileşeni bulunmamaktadır. Bunun için kalibrasyon değerleri her enerji verildiğinde entegreye yüklenmelidir.

2.2.3. MCU

Mikrodenetleyiciler, bilgisayar üzerinde bulunan CPU, giriş/çıkış(I/O) ve bellek elemanlarını tek bir devre üzerinde üretilmiş haline denir. Üretilen entegre üzerinde belirli sayıda giriş/çıkış birimi, işlemcilerden daha az bellek, analog ve dijital işlemler için dönüştürücüler, PWM, UART, SPI, I2C, CAN ve daha birçok özelliği bulunan küçültülmüş işlemcidir. Bu şekilde üretilmesi ise maliyeti düşürmekle birlikte kullanıcılara tasarım, yer tasarrufu, programlamanın basitleşmesi gibi kolaylıklar getirmiştir. Mikrodenetleyiciler, elektronik kontrolün yapıldığı otomobillerde, kameralarda, cep telefonlarında, beyaz eşya teknolojisinde, televizyonlarda, biyomedikal cihazlarda ve daha sayısız elektronik cihazda kullanılmaktadır [61].

Tez kapsamında Microchip firmasına ait PIC18F25K50 mikrodenetleyicisi kullanılacaktır. Bu entegreyi kullanmanın birkaç nedeni bulunmaktadır:

- Mikrodenetleyicinin teminin ülke içinde kolaylıkla yapılıyor olmasıdır. Aynı görevi yerine getiren fakat tedarik etmesinde bazen kolay olmamaktadır. Ülke içinde temin edilmesi fiyat avantajı da sağlamaktadır.
- Mikrodenetleyicinin dahili USB modülünün olmasıdır. Çünkü yapılacak devredeki sensör bilgileri bilgisayara gönderilecektir.
- Microchip firmasına ait PIC mikrodenetleyici ailesinin geniş bir kullanıcı kitlesi bulunmaktadır. Bu da ürünlerle ilgili doküman, örnek çalışma ve teknik soru(n)lara hızlı cevaplar bulunmasını sağlamaktadır.



Şekil 34 - PIC18F25K50 Pin Diyagramı [62]

PIC18F25K50 mikrodenetleyicisinin (Şekil 34) genel özelliklerini şöyle sırlayabiliriz [62]:

- Denetleyici programlamak için gerekli komut sayısı (Instruction Set) 75'dir.
- Veri yolu uzunluğu 8 bit, program sayacı (Program Counter, PC) ise 21 bit uzunluğundadır. 16 bit komut kelime boyuna sahiptir.
- Bellek yapısı olarak, 32K*16 sözcüğü (words) kadar yazılabilecek FLASH program belleğine, 16384 adet genel amaçlı kaydedicisine, 256 baytlık EEPROM veri belleğine sahiptir. Ayrıca yığın (stack) belleğinin seviyesi 31'dir.
- 2.3V – 5.5V gerilim aralığında çalışabilmektedir. Güç tasarruflu uyku modu bulunmaktadır.
- Programlanabilir BOR Reset (Brown-Out Reset), Düşük Güçlü BOR(LPBOR), Genişletilmiş WDT (Watch Dog Timer), POR (Power On Reset), Gelişmiş Düşük Voltaj Programlama (LVP) ve PWRT (Power-Up Timer) özellikleri bulunmaktadır.

- Mikrodenetleyicinin dahili 16 MHz osilatörü bulunmaktadır. Bu osilatörü 31 kHz ile 16 MHz arasında yazılımla değiştirilebilmektedir. Ayrıca PLL birimiyle çalışma frekansı 48 MHz'e çıkarılabilmektedir.
- 25 adet giriş/ çıkış pini bulunmaktadır. Sink ve Source akımları 25 mA'dir. Programlanabilir pull-up girişleri bulunmaktadır.
- Denetleyici içerisinde 2 adet 8 bitlik, 2 adet 16 bitlik zamanlayıcı/sayıcı birimleri bulunmaktadır.
- Mikrodenetleyicide Capture/Compare/ PWM (CCP) ve Gelişmiş CCP (Enhanced CCP) birimleri bulunmaktadır.
- Mikrodenetleyicinin SPI (Master/Slave) ve I2C (Master/Slave) seri iletişim kanalları bulunmaktadır. Ayrıca gelişmiş EUSART (Enhanced Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter) birimi bulunmaktadır. Bu birim RS232, RS485 ve LIN ile uyumlu çalışabilmektedir.
- Mikrodenetleyicide USB 2.0 ile uyumlu çalışan USB birimi bulunmaktadır. Bu birimin düşük hızı (low speed) 1.5 Mb/s ile tam hızı (full speed) 12 Mb/s'dir.
- 10 bitlik çözünürlüğe sahip 14 harici kanala sahip ADC (Analog Digital Converter) bulunmaktadır. Ayrıca dahili voltaj referans birimi bulunmaktadır.
- Denetleyici 28 pin SPDIP, SOIC, SSOP ve QFN kılıflarında üretilmektedir. Tez kapsamında QFN kılıf kullanılacaktır.

2.2.4. Kızılötesi Yayıcı ve Fotodiyot

PMOD ToF modülünün üzerinde bir adet kızılötesi yayıcı (infrared emiter) ve bir adet fotodiyot (photodiode) bulunmaktadır. Kızılötesi yayıcı, görünür ışıktan daha büyük dalga boyuna sahip olan kızılötesi ışınları kullanan ışık yayan diyot (LED) türüdür. Bu led türü dalga boylarına göre kullanım alanları değişiklik göstermektedir. Uzaktan kumanda, video kameralarda, alarm sistemleri, mesafe ölçüm sistemleri, optik anahtarlama gibi uygulama alanları bulunmaktadır. Fotodiyotlar ise yüzeyine düşen ışık/foton düştüğünde elektrik akımı üreten diyot türüdür. Bu tür diyotlarda üzerine düşen ışık miktarıyla akım değeri doğru orantılıdır.

PMOD ToF modülünde kızılötesi yayıcı olarak OSRAM firmasına ait SFH 4550, fotodiyot olarak da yine OSRAM firmasına ait SF 213 FA isimli ürünü kullanılmaktadır. Bu iki ürüne ait özellikleri kısaca şöyle ifade edebiliriz:

2.2.4.1. SFH 4550

SFH 4550 kızılötesi verici ledi 850nm dalga boyuyla çalışmaktadır. Güvenlik sistemleri, duman detektörleri, beyaz eşya, endüstriyel otomasyon gibi çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. DIP kılıfta üretilmiştir. Temel özelliklerini şöyledir [63]:

- **Radyan Yoğunluğu(Radiant Intensity):** 1100 mW/sr
- **Yarım Açı(Half Angle):** 3°
- **Yükselme Süresi(Rise Time):** 12ns
- **Düşme Süresi(Fall Time):** 12ns
- **İleri Akım(If - Forward Current):** 100 mA
- **İleri Voltaj(Vf - Forward Voltage):** 1,5 V
- **Güç Tüketimi(Power Consumption):** 180 mW
- **Çalışma Sıcaklığı(Operating Temperature):** -40 +100 °C

2.2.4.2. SFH 213 FA

SFH 213 FA fotodiyotu 750nm ila 1100nm arasında dalga genişliğinde çalışmaktadır. Maksimum hassasiyetin algılandığı dalga boyu 900nm'dir. Verici kızılötesi ledde olduğu gibi duman detektörleri, beyaz eşya, endüstriyel otomasyon gibi kullanım alanları bulunmaktadır. Bu diyotta DIP kılıfta üretilmiştir. Temel özellikleri ise şöyledir [64]:

- **Radyan Duyarlılık Alanı(Radiant Sensitive Area):** 1.0 mm²
- **Yarım Açı(Half Angle):** 10°
- **Karanlık Akımı(Dark Current):** 1 nA
- **Ters Voltaj(Vr – Reverse Voltage):** 20 V

- **Güç Tüketimi(Power Consumption):** 150 Mw
- **Yükselme Süresi(Rise Time):** 5ns
- **Düşme Süresi(Fall Time):** 5ns
- **Çalışma Sıcaklığı(Operating Temperature):** -40 +100 °C

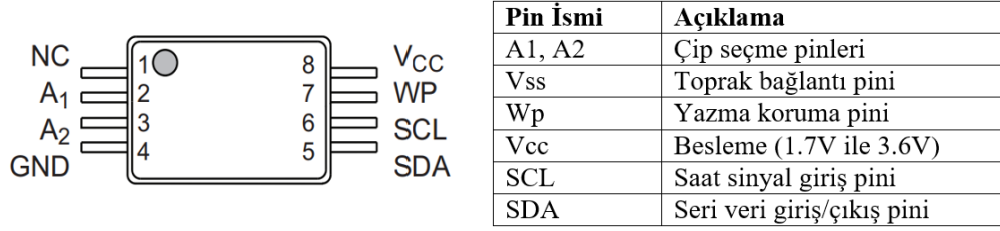
2.2.5. EEPROM

EEPROM (Electrically Erasable Programmable Ready Only Memory) bellekler, elektrik sinyallerini kullanarak defalarca silinip programlanabilen bellek türüdür. Bu bellekler diğer ROM belleklerde olduğu gibi enerji kesildiğinde bellekte bulunan veriler silinmez. EPROM belleklerini silmek için ihtiyaç duyulan ek donanım gerek duymadan veriler bellekten silinebilir. Ayrıca bu belleklerde, EPROM belleklerde olduğu gibi tüm belleği sildikten sonra programlanması gerek yoktur. İçerisinde bilgiler bulunan bellek üzerine programlama yapmak mümkündür. Ek olarak bu belleklerde istenen herhangi byte silinebileceği gibi değiştirmek de mümkündür. Yani bellekteki tüm verileri bir anda değiştirmek yerine istenilen yer de değiştirilebilir. Son olarak da bu bellekler üzerinde işlem yapılırken EPROM belleklerdeki gibi belleği sistemden çıkarmaya gerek yoktur. Sistem üzerinde uygun bacaklara elektrik sinyalleri verilerek bellek üzerine işlem yapılabilir [61].

EEPROM bellekler günümüzde birçok firma tarafından üretilmektedir. Bunlardan birkaçı şöyle sıralanabilir: Microchip Technology, STMicroelectronics, Samsung Electronics, NXP Semiconductors, Renesas Technology gibi.

Tez kapsamında kullanılacak PMOD ToF üzerinde Microchip/Atmel firmasına ait AT24C04D EEPROM entegresi kullanılacaktır (Şekil 35). Bu entegreye kalibrasyon ayarları kaydedilecektir. Aşağıda entegreye ait bilgiler yer almaktadır:

AT24C04D EEPROM entegresi, Microchip/Atmel firmasına ürettiği 4K(512*8) hafıza alanına sahip seri EEPROM entegresidir. Bu entegreye I²C protokolü ile erişim sağlanabilmektedir. EEPROM belleğin pin bağlantıları ve bu bağlantıların görevlerini şu şekilde ifade edilebilir:



Şekil 35 - AT24C04D entegresinin pin gösterimi [65]

EEPROM belleğe Vcc bacağından besleme, Vss bacağından ise toprak bağlantısı yapılır. A1 ve A2 pinleri, kullanılan entegreye slave entegre(ler) takılmayacaksa toprağa bağlanır. SCL ve SDA pinleri EEPROM belleğinde I²C iletişim için gerekli olan veri iletiminin yapıldığı ve saat hattının bağlandığı bacaklardır. Bu pinler denetleyici de bulunan SCL ve SDA pinlerine bağlanabileceği gibi yazılımsal olarak iletişim kurulup istenen pinlere de bağlanabilir. Wp pini ise EEPROM belleği yazılımsal olarak yazmaya karşı korumak için kullanılır. Eğer belleği yazmaya karşı korumak isteniyorsa Wp pinin lojik-1, yazmaya karşı koruması istenmiyorsa lojik-0 yapılır.

AT24C04D EEPROM entegresinin genel özellikleri şu şekilde sıralanabilir [65]:

- AT24C04D entegresi, 1.7V ile 3.6V gerilimler aralığında çalışabilmektedir. Ultra düşük yazma akımı 1mA'dir. Bekleme konumundaki(standby) ise tipik çekilen akım 0.8 μ A'dir.
- I²C iletişim protokolü ile uyumlu çalışmaktadır. EEPROM belleğe okuma/yazma işlemleri bu iletişim türü kullanılarak yapılır.
- Gürültüyü bastırmak için Schmitt trigger girişleri bulunmaktadır.
- 100 kHz ve 400 kHz frekanslar ile uyumu çalışabilmekle birlikte uygun gerilim aralığında ($V_{cc} > 2.5V$) 1 MHz ile de çalışmaktadır.
- EEPROM bellekte donanımsal yazma koruması bulunmaktadır.
- EEPROM belleğe "Page Write" yazma türü ile 16 byte veri yazılabilir. Sayfa yazma süresi tipik olarak 5ms'dir.

- 1 milyondan fazla silme/yazma işlemleri yapılabilir. Ayrıca EEPROM belleğine kaydedilen veriler 100 yıl boyunca saklanabilmektedir.
- Entegre 8 bacaklı PDIP, SOIC, TSSOP, UDFN ve VFBGA ve 5 bacaklı SOT23 kılıfları bulunmaktadır. PMOD ToF modülünde TSSOP kılıfı kullanılmaktadır.
- Entegrenin endüstriyel çalışma ortamındaki çalışma sıcaklık aralığı -40 ila +85 derece arasındadır.

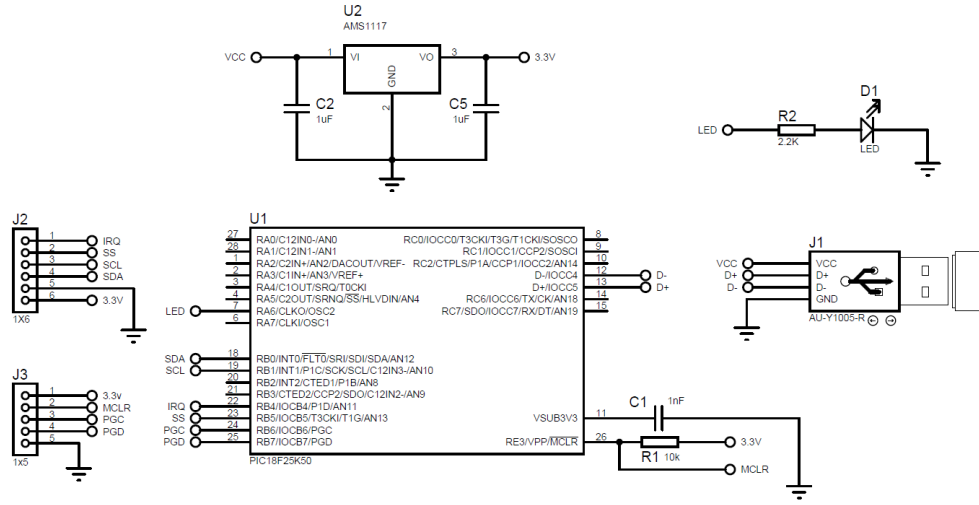
2.3. BASKI DEVRE KARTI (PCB)

Tez kapsamında, PMOD ToF kartının çalıştırıp okuduğu mesafe bilgilerini bilgisayara gönderen bir kart tasarlanacaktır. Bu kart için öncelikle şematik çizim, çizimde dikkate alınmış noktalar, kartın baskı devre görünümü ve PMOD ToF kartının şematik çizimi anlatılacaktır.

Tasarlanacak kart için İngiltere merkezli Labcenter Electronics Ltd. tarafından geliştirilen Proteus Design Suite programı kullanılacaktır. Bu programla hem şematik tasarım hem de baskı devre kartının tasarımı yapılacaktır. Kullanılan programın sürümü ise 8.7'dir.

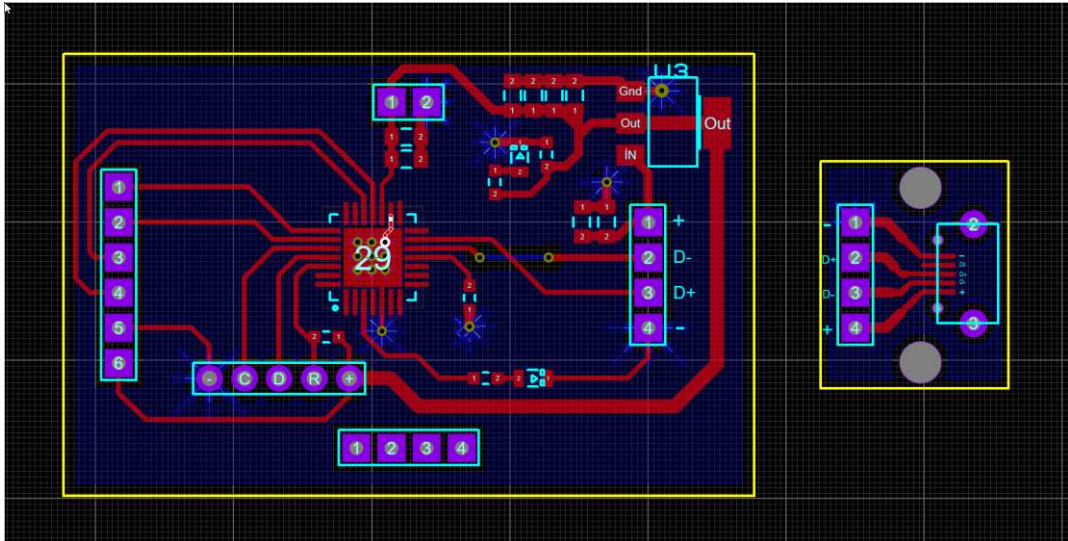
2.3.1. İşlemci Kartı

İşlemci kartı, ToF modülü ile iletişime geçip mesafe bilgilerini bilgisayara göndermektedir. Devre üzerinde ToF modülünün bağlantısının yapılacağı soketler bulunmaktadır.



Şekil 36 - İşlemci Devre Şeması

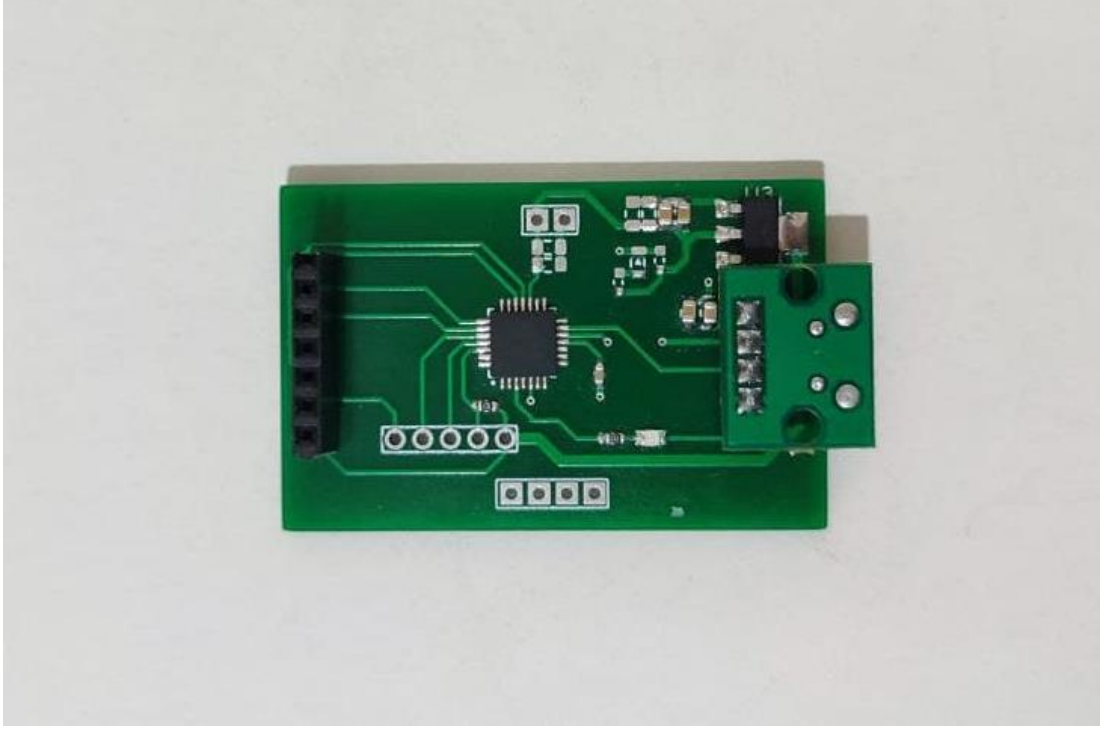
Şekil 36’da devrenin şematik tasarımı görülmektedir. Burada USB bağlantısı ile veri iletişimi ve devreye gerekli enerjisi sağlanmaktadır. USB’den gelen 5V DC voltaj, şekilde U2 ile gösterilen AMS1117-3.3V lineer regülatör entegresiyle 3.3V DC gerilime düşürülmektedir. Bunun nedeni ToF kartının 3.3V DC gerilimle çalışmasıdır. Devrede ek olarak çeşitli işlem adımlarını takip edebilmek için bir adet led kullanılmıştır.



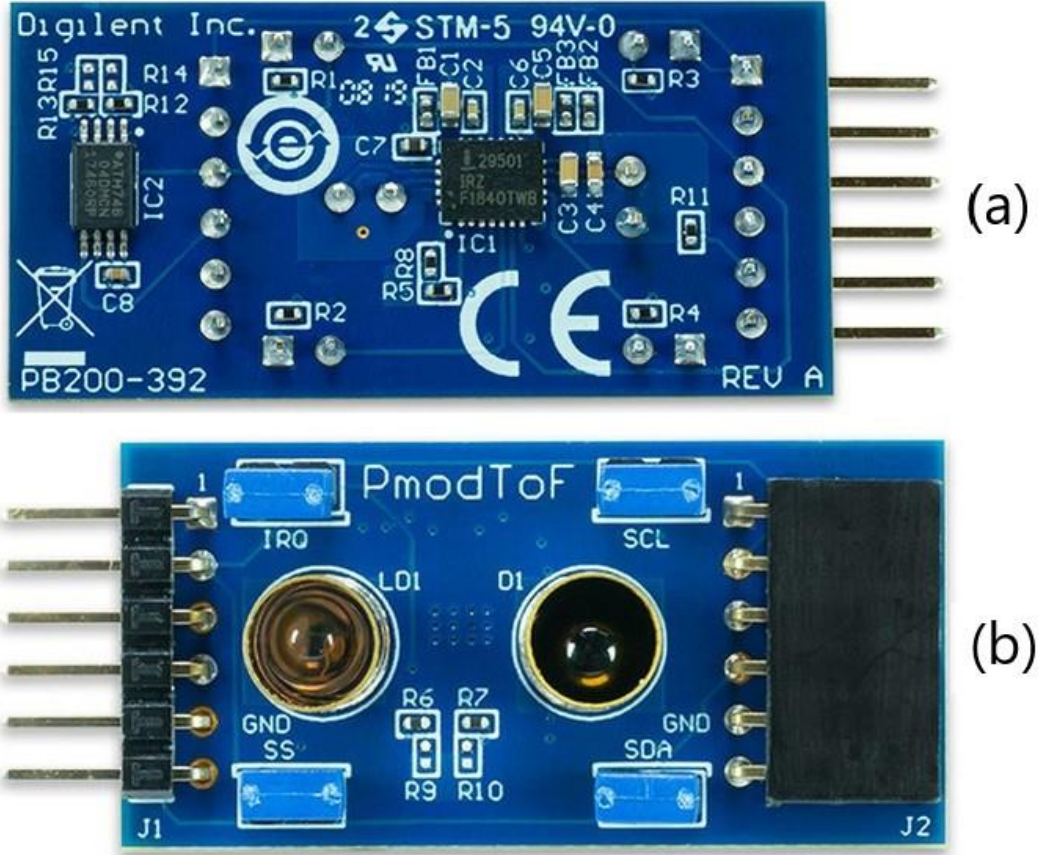
Şekil 37 - Devre baskı devre görünümü

Şekil 37’de devrenin baskı devre ve Şekil 38’de baskı sonrası görülmektedir. Burada USB bağlantısı ayrı bir PCB şekilde tasarlanıp devreye bağlantısı

yapılacaktır. Bunun nedeni micro usb socketinin olası bozulmalara karşı değiştirilmesinin kolay olması ve USB takıp çıkarırken ek dayanak noktalarıyla mukavemetin yüksek olması amaçlanmıştır.



Şekil 38 – Devrenin baskı sonrası görünümü



Şekil 40 - PMOD ToF Baskı devre görünümü [67]

Şekil 40-a'da PMOD ToF devresinin arka yüzeyi görülmektedir. Burada merkezde ISL29501 entegresi yer almaktadır. Sol taraf IC2 olarak gösterilen ise AT24C04D eeprom entegresidir. Şekil 40-b'de ise kızılötesi yayıcı led ile fotodiyot yer almaktadır.

3. YAZILIM

Tez kapsamında, PMOD ToF kartının çalıştırıp okuduğu bilgileri bilgisayara göndermesi sağlayan işlemci yazılımı ile gelen bilgileri hesaplayarak ekrana mesafe bilgisi, büyüklük bilgisi gibi farklı bilgileri görüntülenmesini sağlayan bilgisayar yazılımı yazılacaktır.

Mikrodenetleyici yazılımı yapılırken öncelikle işlemcinin ToF modülü ve bilgisayarla iletişimde kullanılacak iletişim protokolleri hakkında bilgi verilecektir. Yazılım Amerikan merkezli Custom Computer Servives Inc. firmasına ait CCS C derleyici programı kullanılacaktır. Kullanılan programın sürümü 5.051'dir.

Bilgisayar yazılımı, Microsoft firmasına ait Visual Studio programı kullanılarak C# yazılım dilinde yazılacaktır. Yazılım yapılırken kullanılan grafik ve usb bağlantısı için hazır kütüphaneler kullanılmıştır.

Mikrodenetleyici ve bilgisayar yazılımları ek olarak tezin sonuna eklenecektir.

3.1. MCU YAZILIMI

Mikrodenetleyici yazılımı yapılırken ilk olarak PMOD ToF modülünün üzerinde yer alan ISL29501 sinyal işleme entegresinin ürün sayfasında (datasheet) verilen kayıtlar (register) incelenmiştir. Burada entegre ile ilgili yapılacak ayarlamaları, kalibrasyon komutlarını ve mesafe okumalarından sonra kaydedilen bilgilerin adresleri gibi bilgiler elde edilebilmektedir. Entegre ile işlemci arasında I2C iletişim protokolü kullanılmaktadır. Ayrıca I2C iletişimiyle eepromla da iletişim kurulacaktır.

Mikrodenetleyici ISL29501 entegresinden okuduğu bilgileri USB bağlantısıyla bilgisayara göndermektedir. Bu kısımda USB seri iletişim protokolü kullanılmaktadır. Denetleyici içerisinde USB birimiyle HID sınıfında bir uygulama gerçekleştirilecektir.

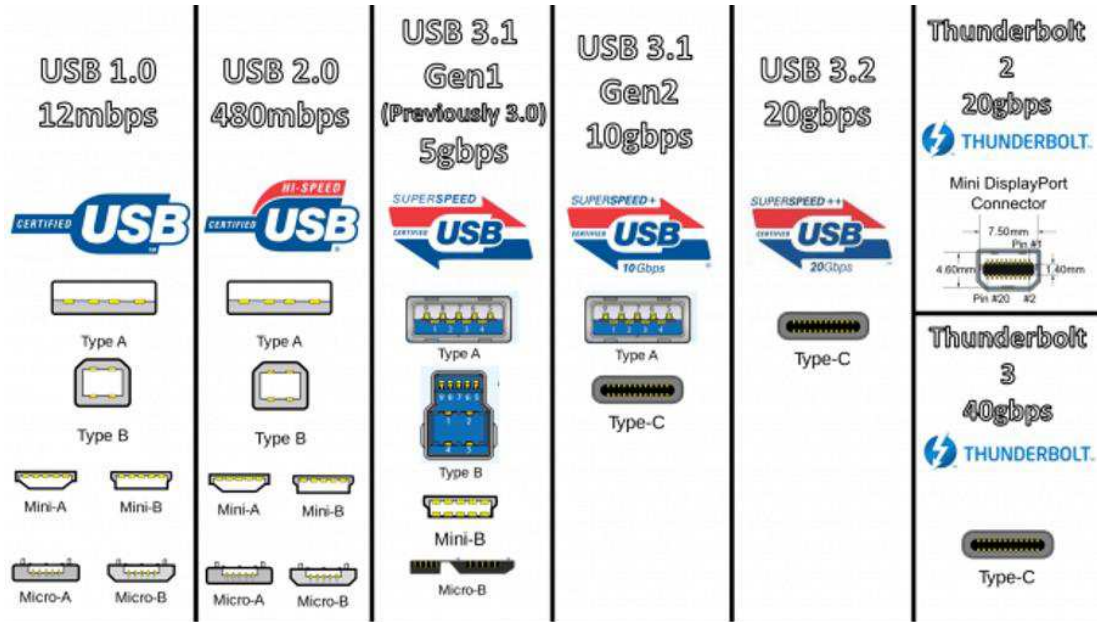
Aşağıda mikrodenetleyici yazılımında kullanılan iki iletişim protokolü hakkında bilgiler verilecektir. Bu bilgiler doğrultusunda denetleyici yazılımı tamamlanacaktır.

3.1.1. USB

USB (Universal Serial Bus – Evrensel Seri Yolu), günümüzde bilgisayarın çevre birimlere bağlanmasında kullanılan en yaygın endüstri standardıdır. Bu standart bundan önce kullanılan farklı tipte konektörü bulunan seri ve paralel gibi bağlantı noktaları yerine hızlı, küçük ve tek tip bir bağlantı noktası olması amacıyla geliştirilmiştir. İlk olarak Compaq, DEC, IBM, Microsoft, Intel, NEC ve Nortel şirketleri tarafından 1994 yılında geliştirilmeye başlanmıştır. Ardından 1995 yılında Ajay Bhatt önderliğinde Intel şirketi tarafından ilk USB desteği sağlayan entegre devreler üretildi. 1996 yılında ise ilk defa piyasa sürülen USB standardı, kâr amacı gütmeyen bir organizasyon olan USB IFRICTS FORUM (USB-IF) tarafından korunmaktadır [68, 61].

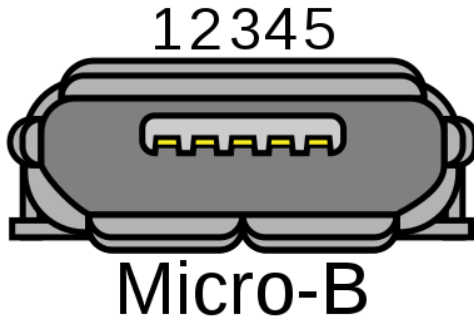
USB standardının şu ana kadar 4 versiyonu bulunmaktadır. Bunlar USB 1.x, USB 2.0, USB 3.x ve USB4'dür.

- **USB 1.x:** USB 1.0, 1996 yılında piyasaya sürülmüştür. En düşük 1.5 Mbit/s (Low Speed) ve en yüksek 12 Mbit/s (Full Speed) hız desteği bulunmaktadır. USB 1.1, 1998 yılında çıkarılmış olup bir önceki versiyondaki açıklıklar kapatılıp iyileştirmeler yapılmıştır.
- **USB 2.0:** 2000 yılında piyasa sürülmüştür. 480 Mbit/s (High Speed) hız desteği sağlamaktadır. Bu da saniyede maksimum 60 MB dosya transferine izin vermektedir. Bu sürüm bundan önceki sürümlerle uyumlu çalışmaktadır.
- **USB 3.x:** USB 3.0, 2008 yılında piyasaya sürülmüştür. 5 Gbit/s (Super Speed) hız desteği sağlamaktadır. Bu da saniyede maksimum 625 MB dosya transferine izin vermektedir. Bu sürümde kendisinden önceki sürümlerle uyumlu çalışmaktadır. USB 3.1, 2013 yılında çıkarılmıştır. Bu sürümde 10 Gbit/s (Super Speed Plus) hız desteği bulunmaktadır. USB 3.2 ise 2017 yılında tanıtılmış olup maksimum 20Gbit/s hız desteği vermektedir.
- **USB 4.0:** 2019 yılında piyasaya sürülmüştür. 40 Gbit/s hız desteği sağlamaktadır. Thunderbolt 3 protokolüyle çalışmaktadır. Diğer sürümlerde olduğu gibi eskiye uyumluluğu bulunmaktadır.



Şekil 41 - USB versiyonları göre konektörler [69]

Şekil 41’de USB versiyonlarına göre kullanılacak konektör tipi görülmektedir. Tez kapsamında USB 2.0 kullanılacak olup micro-b tip konektör kullanılacaktır. Şekil 42’de Mikro-B konektör pinleri görülmekte birlikte bağlantı bilgisi gösterilmiştir.



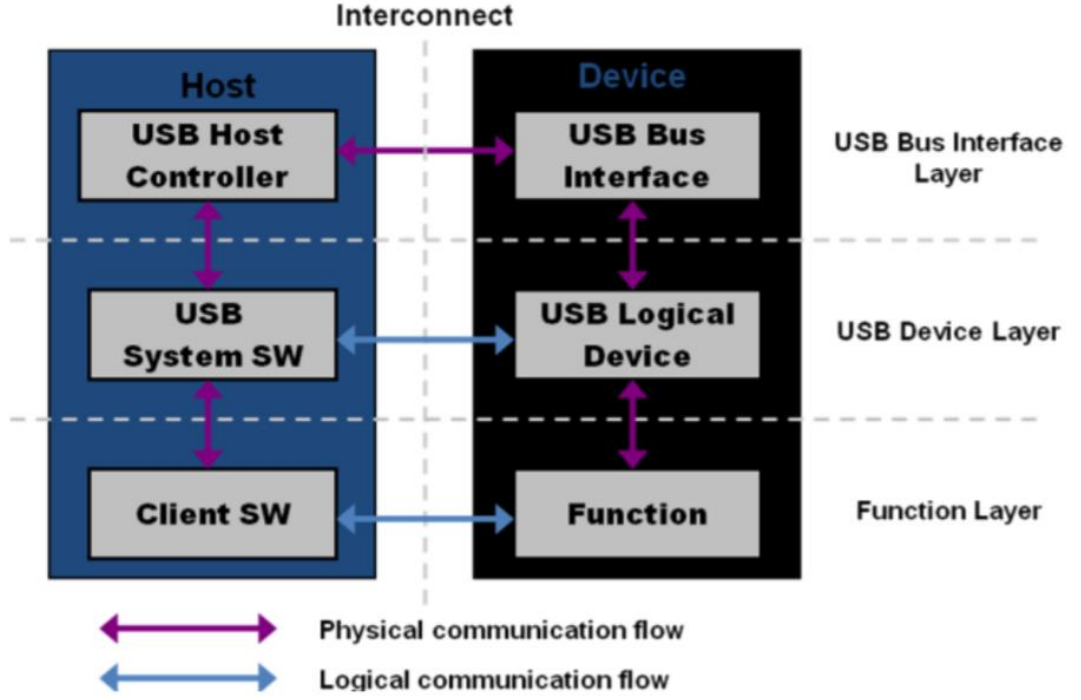
Pin	İsim	Renk	Fonksiyon
1	GND	Siyah	Ground
2	ID	NA	Not connected
3	D+	Yeşil	Data(+)
4	D-	Beyaz	Data(-)
5	Vbus	Kırmızı	5V

Şekil 42 - Micro-B detaylı konektör görünümü ve bağlantı pinleri [70]

3.1.1.1. USB Mimarisi

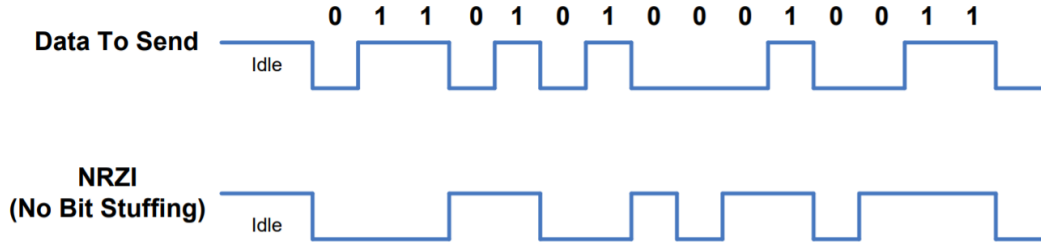
USB mimarisi, çok katmalı bir yapıdan oluşur. Şekil 43’te bir bilgisayarın (host) bir cihaza (device) bağlanması gösterilmektedir. Burada katmanlar arası sürekli bir etkileşim olmaktadır. Veri yolu arayüzü (bus interface) katmanı, bilgisayarla cihaz arasındaki fiziksel bağlantı, elektrik sinyalleri ve paket bağlantısı ile ilgili işlemleri yerine getirmektedir. Aygıt (device) katmanı ise USB sistem yazılımının USB işlemlerini gerçekleştirmek için sahip olduğu katmandır. Son olarak

Fonksiyon (function) katmanı, eşleştirilmiş cihazın yazılım tarafını temsil etmektedir.



Şekil 43 - USB katmanlı yapısı [68]

Veri yolu ara yüzü katmanı, bilgisayarla cihaz arasındaki fiziksel bağlantıyı temsil etmektedir. USB veri transferini, Şekil 43’de gösterilen enerji hatları ve 2 sinyal hattı (D+ ve D-) üzerinden gerçekleştirir. Bu katmanda, bit doldurma (bit stuffing) ile kodlanmış sıfır olmayan ters çevrilmiş (Non Return-to-Zero Invert - NRZI) olan diferansiyel iletim kullanılır. Bu kodlamada ‘1’ seviyesindeki bitlerle bir değişiklik olarak ifade edilmezken ‘0’ seviyesindeki bitlerle bir değişiklik olarak işlenmektedir. Bit doldurma işlemi ise altı ardışık ‘1’ seviyesindeki bilgiden sonra ‘0’ ekleyerek gerçekleştirilir. Buradaki amaç, USB donanımının senkronizasyonunu için faz kilitli döngü (phase-locked loop - PLL) korumaktır.



Şekil 44 - NRZI ile kodlanan veri [68]

Aygıt katmanı, bilgi alma ve gönderme gibi USB işlemlerini gerçekleştirir. USB iletişiminde tüm veri yolu işlemleri paketler hâklinde gerçekleşir. Bu paketler token (jeton), veri ve handshake (el sıkışma) paketleridir. Her bir paketin farklı görevleri bulunmaktadır. Token paketi adres bilgileri tutma, veri paketi verileri tutma ve ek sıkışma paketi ise iletişimi sonlandırma görevi vardır. USB mimarisinde dört temel veri transfer türü bulunmaktadır. Bunlar yığın (bulk), kesme (interrupt), kontrol (control) ve eşzamanlı (isochronous) transferleridir. Yığın transferi ile büyük boyutlu veriler iletimi gerçekleştirilir. Yazıcılar veya tarayıcılar bu yöntemi kullanırlar. Kesme transferi ile küçük boyutlu verilerin hızlı bir şekilde iletiildiği iletişim türüdür. Kontrol transferi ile host ile cihaz arasındaki kurulum ve konfigürasyon ayarlarının yapılması için kullanılan transfer şeklidir. Eşzamanlı transferle ise verilerin çok hızlı bir şekilde belirlenen zaman içerisinde periyodik olarak gönderilirken oluşabilecek küçük hatalara izin verilir. Ses ve video iletiminde bu yöntem kullanılır [61].

3.1.1.2. USB Sınıfları

USB sınıfları, USB-IF tarafından tanımlanan, bir aygıtın işlevselliğinin tanımlanması ve ona uygun sürücünün nominal olarak yüklemek için kullanılan sınıf kodları içermektedir [71]. Sınıf kodlarına USB-IF internet adresinden [71] erişilebilmektedir. Tüm işletim sistemleri, özel sürücü gerektirmeksizin bu sınıflara ait sürücü içinde barındırırlar. Bu sınıflar içerisinde en çok kullanılan cihaz sınıfları İnsan Arabirim Aygıtı (Human Interface Device-HID), Yığın Depolama Aygıtı (Mass Storage Device-MSD), Haberleşme Aygıtı Sınıfı (Communication Device Class -CDC) ve Satıcı (Vendor)'dır [68].

Tez kapsamında İnsan Arabirim Aygıtı sınıfı kullanılacaktır. HID, kullanıcının kontrolüne bırakılmış USB portların tanımlandığı sınıftır. Bu sınıf kullanıcıların host üzerine veri göndermesine izin verir. Bu tip aygıtların gönderdiği verilere olan tepki çok hızlı gerçekleşmektedir. Bilgisayar tarafından herhangi bir gecikme uygulanması söz konusu değildir. Kullandığımız mouse ve klavyeler HID uyumlu aygıtlardır.

3.1.2. I2C

Inter Integrated Circuit (I2C, I2C veya IIC) Philips tarafından geliştirilmiş yakın mesafe iletişim protokolüdür. Philips şirketi, I2C protokolünü ürettiği elektronik cihazların çevre birimler ile iletişimi için geliştirmiştir. Daha sonraları diğer şirketler tarafından da kabul görebilen evrensel bir protokol olmuştur.

I2C protokolü, bir arada çalışması gereken sürekli iletişimin gerekmediği elektronik cihazların minimum kablo ve donanım gereksinimiyle iletişimin gerçekleşmesini sağlar. Genel olarak veri alışveriş hızının önemli olmadığı, kullanılacak mikrodenetleyici de daha az pin gerektiren devrelerde kullanılan, basit yapılı ve düşük bant genişliğine sahip bir protokoldür [61].

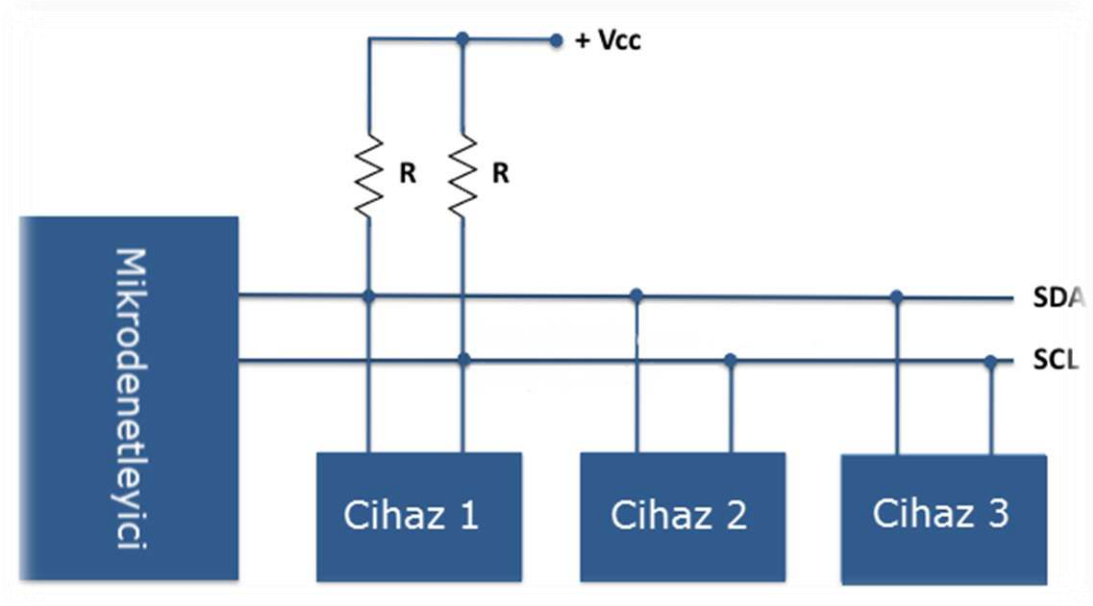
3.1.2.1. Genel Özellikler

I2C protokolünde iletişim; Serial Data Line (SDA) ve Serial Clock Line (SCL) olmak üzere iki hat üzerinden gerçekleşir. SDA, veri alışverişinin yapıldığı, SCL ise veri iletim zamanlamasının ayarlandığı hattır. Gerilim hattından SDA ve SCL hattına dirençler ile pull-up yapılıdır. Yalnızca bu iki hat kullanılarak birden fazla cihazın kontrolü sağlanabilmektedir.

I2C’de iletişimin kontrolünün sağlayan ve zamanlamayı ayarlayan cihaz master, kontrol edilen cihaz ise slave olarak adlandırılır. Genel olarak master cihaz mikrodenetleyici olmaktadır. Slave cihazlar ise harici EEPROM, LCD veya yine bir mikrodenetleyici olabilmektedir. Ayrıca birden fazla master cihazın olması durumu multi-master, bir tane master cihazın bulunması durumu ise single-master olarak adlandırılır. Cihazlara veri iletimi SDA hattından olmakla birlikte iletilen her verinin her slave cihaz tarafından alınmaması için bu cihazlara birer adres verilir. Gönderilen adrese göre ilgili cihaz aktif olur ve iletişim gerçekleşir. Mikrodenetleyici ürettiği

clock(saat) sinyalini SCL hattından göndererek iletişim hızını belirler. Saat sinyali olmazsa veri iletimi de olmaz. Tetikleme, veri iletim zamanlaması bu sinyalle ayarlanır.

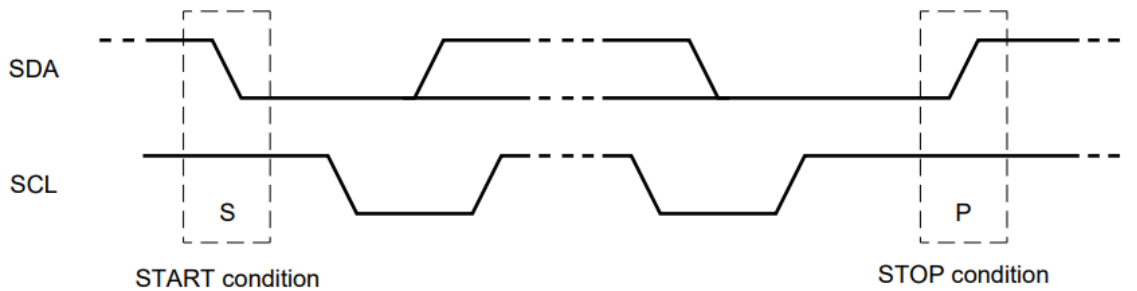
Bağlantı şeması Şekil 45'te gösterilen I2C protokolünde 4 farklı hız modu bulunmaktadır. Standart Mod (Standard Mode) en fazla 100Kbps, Hızlı Mod (Fast Mode) en fazla 400Kbps, Artı Hızlı Mod (Fast Mode Plus) en fazla 1Mbps, Yüksek Hız Modu (High Speed Mode) ise en fazla 3.4Mbps veri iletim hızını destekler.



Şekil 45 - I2C Bağlantı Şeması [61]

3.1.2.2. Veri Transfer Formatı

Veri transferi sırasında ilk olarak start biti, ardından adres biti, sonra veri bitleri ve en son da stop biti gönderilir. Start ve stop bitlerinin oluşabilmesi için SDA ve SCL bacaklarının senkronize olarak gerekli değerleri alması gerekir.



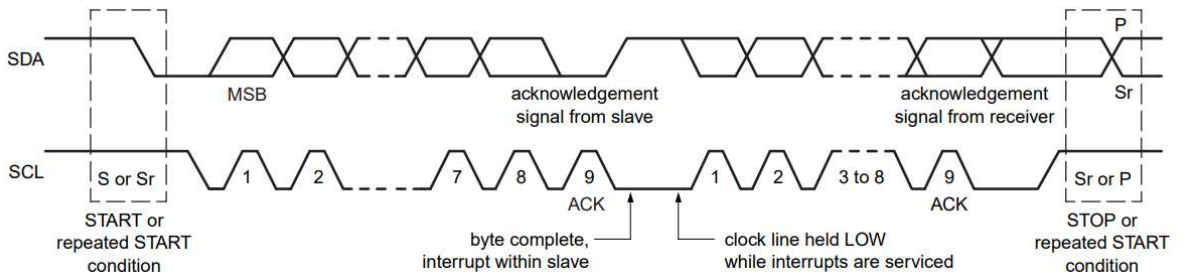
Şekil 46 - I2C Veri İletim Formatı [72]

Şekil 46’da start ve stop şartları görülmektedir. SCL (clock) hattı lojik-1 seviyesindeyken SDA (veri hattı) lojik-0 seviyesine çekilmesiyle start koşulu sağlanır ve iletişim başlar. SCL hattı lojik-0 seviyesindeyken SDA hattı lojik-0 durumundan lojik-1 seviyesine çekilmesiyle stop koşulu sağlanır ve veri iletimi sonlanır. Ayrıca SDA hattındaki mantıksal değişimler sadece SCL hattı lojik-0 durumundayken olabilir. SCL hattı lojik-1 durumundaysa SDA hattı aynı bit seviyesinde kalır, lojik-1 veya lojik-0 durumunu değiştiremez.

Başlangıç ve bitiş bitleri her zaman master cihazlar tarafından üretilir. Bu zaman aralığında ise veri yolu meşguldür ve başka bir işlemi yapacak durumda değildir. Başka bir veri transferinin olabilmesi için mevcut iletişimin sona ermesi gerekmektedir.

3.1.2.3. İletişim Temelleri

I2C protokolünde veri iletimi Şekil 47’de görüldüğü gibi 8 bitlik veri büyüklük formatında gönderilmektedir. Gönderilecek her veri için saat sinyali üretilir ve bu sinyal eşliğinde veri transferi gerçekleşir. Gönderilen her saat darbesi slave olan cihazın tetiklenmesini sağlar. Bu sayede veri iletimi gerçekleşir. Veri transferinde ise byte sınırı bulunmamaktadır. Bir defada peş peşe veriler gönderilebilir. Veri öncelikle MSB (en öncelikli bit) gönderilecek şekilde iletilir. Slave olan cihaz bir veri alırken başka bir veri alamaz. Bu koşulun sağlanabilmesi için SCL hattı lojik-0 konumunda tutulur ve bu durumda master cihaz bekleme moduna geçer. Slave cihazın işi bittiğinde ise SCL hattı tekrar lojik-1 konumuna getirilir ve hat yeni bir veri transferi için hazırda bekler.



Şekil 47 - I2C ile Byte Transferi [72]

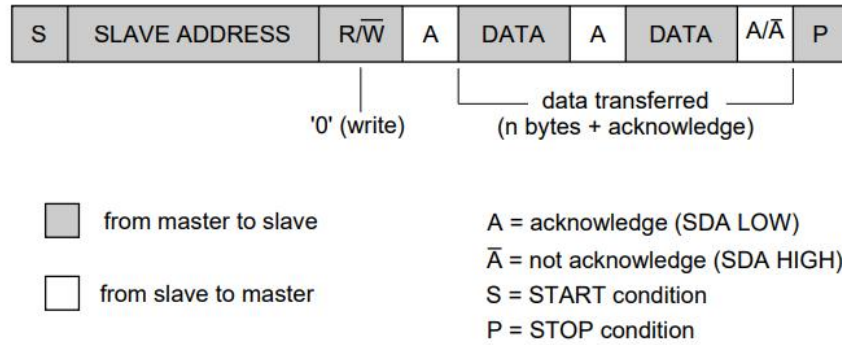
Veri transfer sırasında her zaman Acknowledge (ACK) biti kullanılır. ACK, iletilen her 1 byte’lık verinin ardından veriyi alan tarafın karşı tarafa gönderdiği

bittir. Verinin sağlıklı bir şekilde alındığının gönderici tarafa bildirilmesini sağlar. Bu şekilde veri transferi devam eder. Veri iletimi gerçekleşmemiş ise Not Acknowledge (NACK-A) biti gönderilir. Böyle bir durumda master cihaz veri iletimini durdurmalı ya da tekrar start biti göndererek tekrar veri transferini gerçekleştirmeye çalışmalıdır. ACK biti alıcının SDA hattını lojik-0 seviyesine çekmesiyle anlaşılır. Lojik-0 seviyesinde kaldığı süre zarfında alıcı tarafından yeni bir veri alınamaz. Veri almaya hazır olduğunda ise SDA hattını tekrar lojik-1 seviyesine çekilir ve veri transferi devam eder. NACK-A şartı ise alıcı cihazın SDA hattını lojik-0 seviyesine çekmemesiyle anlaşılır. Lojik-1 seviyesinde kalan hat veriyi gönderen cihaz tarafından verinin gönderilemediği şeklinde yorumlanır.

I2C iletişimi kullanan cihazların datasheetlerinde iletişim alt başlığında genellikle veri gönderilmesi ve veri okunmasının nasıl yapılacağına dair bilgiler Şekil 48’de görüldüğü şekilde verilmektedir.

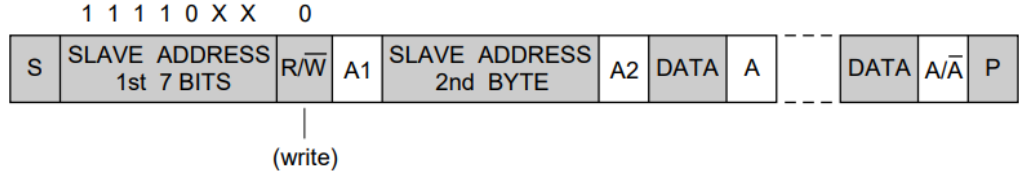
3.1.2.4. Adresleme

I2C iletişimde hatta bağlı olan cihazların adresleri bulunmaktadır. Adresler üretici firma tarafından datasheetlerde paylaşılmaktadır. Adresler genellikle 7 bit veya 10 bit şeklinde olmaktadır.



Şekil 48 - Bit Adresleme ile Veri İletimi [72]

Şekil 48’de 7 bit adreslemeli standart bir yazma işlemi örneği verilmiştir. Master cihazın gönderdiği veriler koyu renkle slave cihazın gönderdiği veriler ise açık renkle gösterilmiştir. Eğer yazma yerine okuma işlemi yapılsaydı veriler slave cihaz tarafından ACK bitleri ise master cihaz tarafından gönderilecekti.

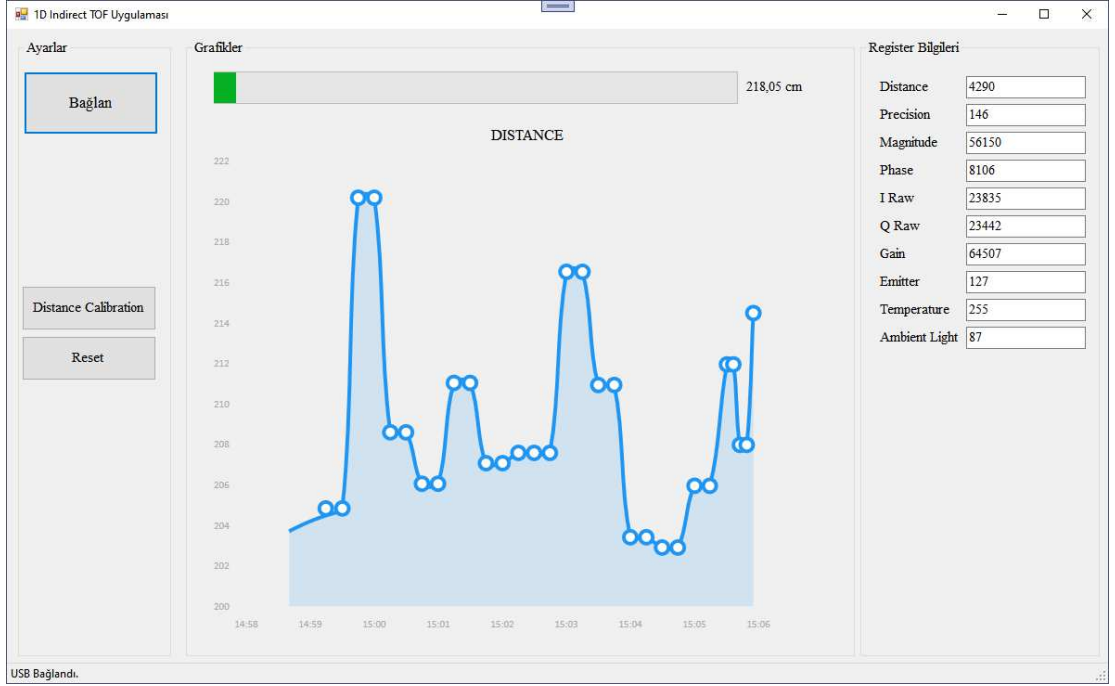


Şekil 49 - Bit Adresleme ile Veri İletimi [72]

Şekil 49’da 10 bitlik adresleme ve veri transferi daha ayrıntılı bir biçimde anlaşılmaktadır. Bu şemada master cihazın slave cihazdan veri yazma adımları gösterilmektedir. Master cihaz ilk olarak start biti ile iletişimi başlatır ve 7 bitlik slave cihazın adresini ve R/W bitini gönderir. Bu bit, yazma modunda kullanıldığı için lojik-0 seviyesinde olmalıdır. Gönderilen 8 bitten sonra slave cihaz verinin alındığını belirtmek için ACK biti gönderir. Bu komutu alan master cihaz adresin kalan 8 bitini slave cihaza gönderir, slave cihaz ACK biti ile karşılık verir. Adresleme kısmı sona erdikten sonra veriler gönderilir.

3.2. BİLGİSAYAR YAZILIMI

Tez kapsamında yazılacak bilgisayar programında işlemciden gelen veriler grafik şeklinde ekranda görüntülenecektir. Bu kısımda gelen verilerin grafik halinde görüntülemek için NuGet paketleri içerisinde LiveCharts indirilerek grafik görüntüleri elde edilmiştir. İşlemciden gelen verileri bilgisayarda işlemek içinse şu siteden [73] indirilen UsbLibrary.dll dosyası kullanılmıştır.



Şekil 50 - Uygulamanın ekran görüntüsü

Şekil 50’de uygulamanın ekran görüntüsü görülmektedir. Burada sol kısımda ayarlar kısmı bulunmaktadır. Bağlantı ayarları, kalibrasyon ayarları ve görüntüleme ayarları yer almaktadır. Orta kısımda en üste ölçülen mesafe bir çubuk grafik şeklinde gösterilip yanına ölçülen mesafe bilgisi yazılmıştır. Grafikler ise mesafe ve dönen sinyalin büyüklüğü gösterilmektedir. En sağ kısımda ise ISL29501 ürün sayfasında yer alan veri çıkış kayıtlarının (data output registers) görüntülenmektedir.

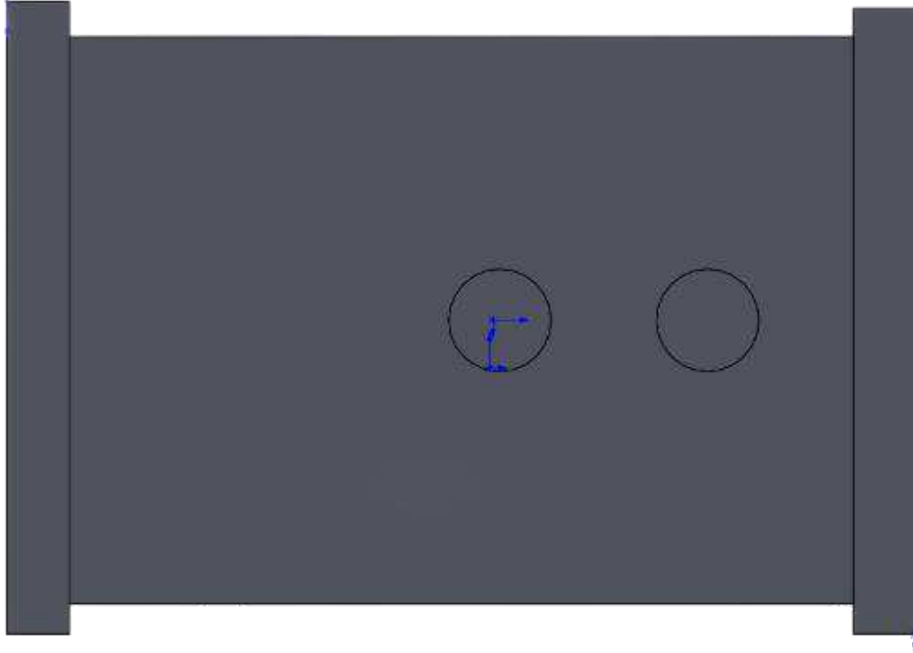
4. GERÇEKLEME

Bu bölümde tez kapsamında geliştirilen tek boyutlu(1D) uçuş süresi tabanlı sensörün testleri yapılacaktır. Testleri yapılmadan önce ürünün çalışması ve test edilmesi için gerekli mekanik düzenekler hazırlanacaktır. Bunun için SolidWorks tasarımı yapıp 3D yazıcıdan çıktı alınacaktır.

Test için gerekli mekanik tasarımlar tamamlandıktan sonra ürünle belli mesafelerden mesafe ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ölçüm sonuçları yorumlanıp sonuçları tartışılmıştır. Testler yapılırken referans ölçüler için öncelikle şerit metre ve hassas ölçüm yapabilen lazer metre kullanılacaktır.

4.1. 3D BASKI

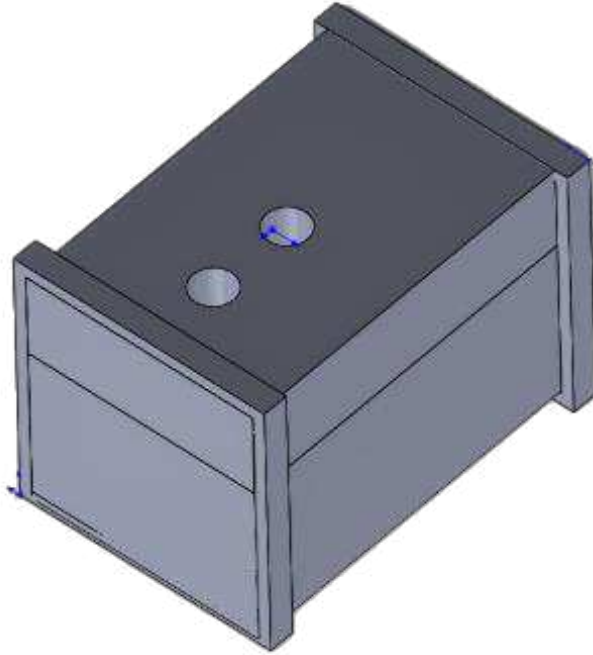
Tez kapsamında ölçümler yapılacak elektronik kart için 3D printer kullanılarak plastik kutu tasarlanmıştır. Tasarımlar SolidWorks 2018 kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aşağıdaki şekillerde (Şekil 51 – 54) SolidWorks tasarımları ve bu tasarımları baskıları gösterilmektedir.



Şekil 51 - Tasarım üstten görünümü



Şekil 52 - Baskının üstten görünümü



Şekil 53 - Tasarımın izometrik görünümü

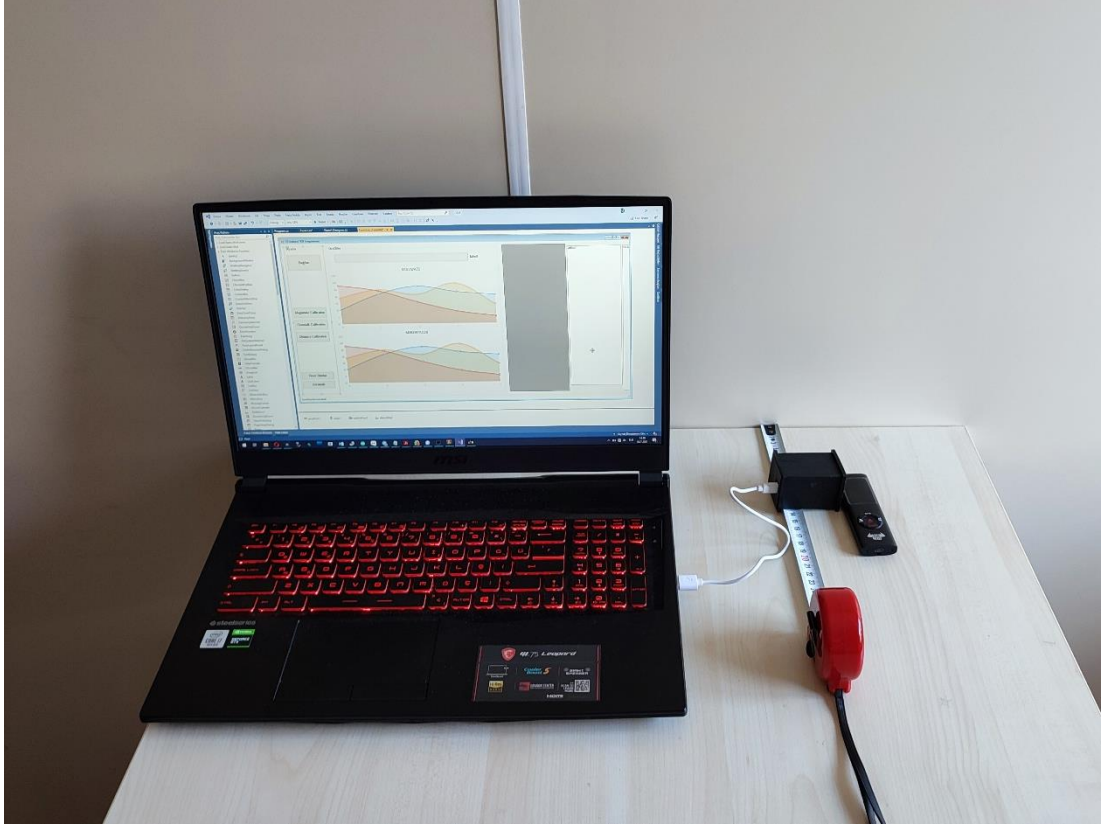


Şekil 54 - Baskının izometrik görünümü

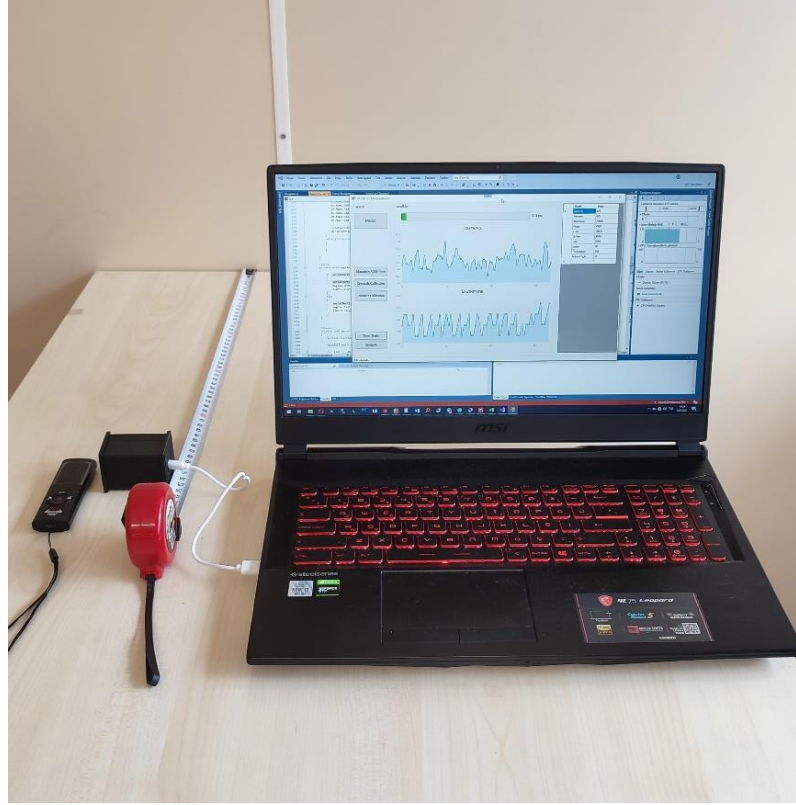
4.2. ÖLÇÜM SONUÇLARI VE ANALİZ

Sensörün testi için 10 cm ile 800 cm arasında ölçümler yapılacaktır. Test edilecek mesafe aralıkları, kısa mesafeden başlayarak uzuna doğru devam edecektir. Ayrıca sensörle mesafe ölçümlerine başlamadan önce mesafe (distance) kalibrasyon ayarı yapılacaktır. Bu kalibrasyonda sensör bilinen bir mesafeyle getirilerek belli ölçümler alınır. Alınan ölçümlerle sensör, kalibrasyon öncesi değerle yeni durumun farkını hesaplayarak kayıt (register) alanlarına kaydeder. Bundan sonra yapılacak mesafe ölçümlerinde sensör bu farkı göz önünde bulunduracaktır.

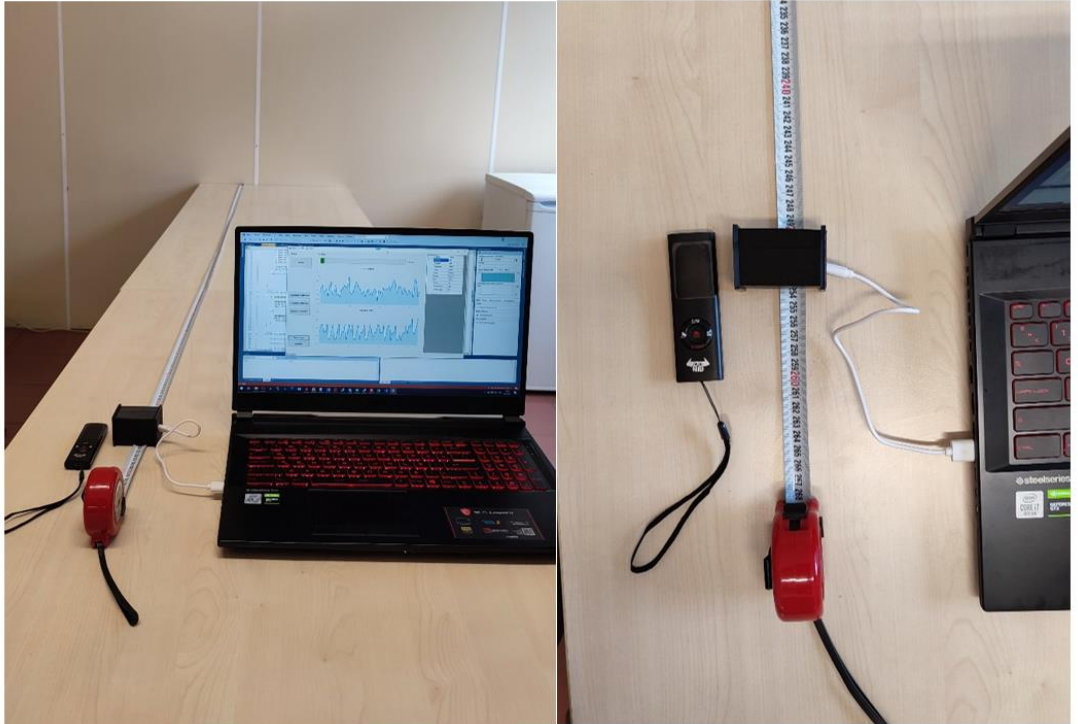
Aşağıdaki şekillerde (Şekil 55 – 57) farklı uzunluklarda yapılan ölçümler görülmektedir.



Şekil 55 - 10 cm ölçümü



Şekil 56 - 50 cm ölçümü

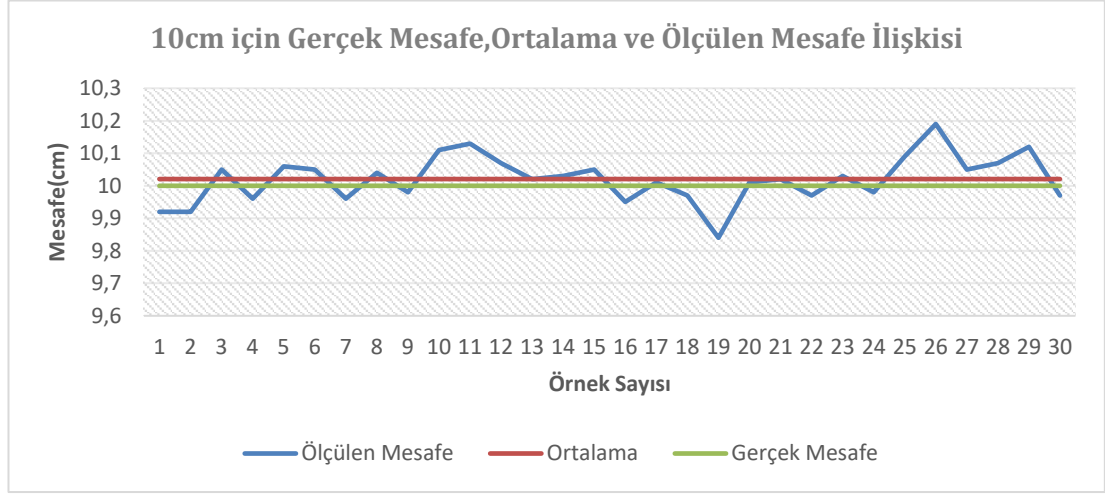


Şekil 57 - 250 cm ölçümü

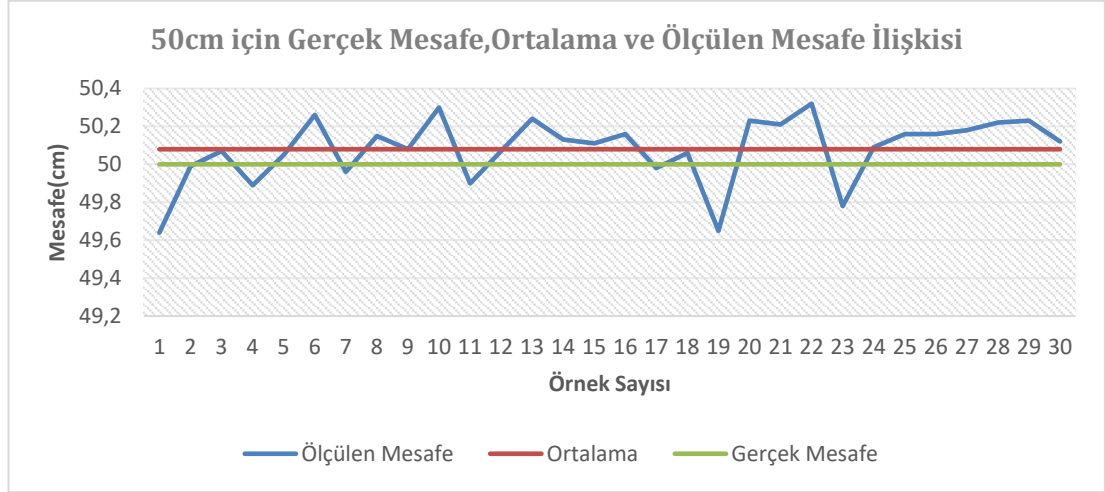
Tablo 1 - Farklı mesafelerdeki ölçüm sonuçları

Ölçüm Sayısı	10cm	50cm	100cm	250cm	500cm	800cm
1	9,92	49,64	100,09	250,87	523,22	761,31
2	9,92	49,99	100,35	253,89	519,94	761,53
3	10,05	50,07	100,36	252,77	514,35	760,2
4	9,96	49,89	100,16	254,58	517,68	746,01
5	10,06	50,05	100,42	252,06	503,07	760,35
6	10,05	50,26	100,48	253,43	514,75	759,96
7	9,96	49,96	100,31	251,08	521,76	751,42
8	10,04	50,15	100,39	253,16	518,43	758,24
9	9,98	50,08	100,25	252,95	520,11	760,06
10	10,11	50,3	100,49	250,05	522,27	759,09
11	10,13	49,9	100,26	255,4	506,38	756,41
12	10,07	50,07	100,07	252,86	517,28	765,54
13	10,02	50,24	100,26	249,04	518,35	757,58
14	10,03	50,13	100,27	255,01	517,15	755,57
15	10,05	50,11	100,6	253,33	510,1	759,49
16	9,95	50,16	100,35	254,07	520,84	759,07
17	10,01	49,98	100,34	251,16	510,65	764,96
18	9,97	50,06	100,54	250,97	516,39	765,95
19	9,84	49,65	100,52	252,76	515,51	759,66
20	10,01	50,23	100,49	254,64	519,88	772,38
21	10,02	50,21	100,79	251,16	514,68	773,86
22	9,97	50,32	99,97	250,77	513,46	761,37
23	10,03	49,78	99,51	255,56	516,06	758,93
24	9,98	50,09	99,97	255,57	518,26	754,39
25	10,09	50,16	100,5	250,76	511,21	757,15
26	10,19	50,16	100,1	253,26	506,67	756,91
27	10,05	50,18	100,33	253,2	507,52	752,93
28	10,07	50,22	100,34	255,75	514,63	758,54
29	10,12	50,23	100,03	253,34	510,2	746,86
30	9,97	50,12	100,39	250,67	508,52	772,85
Ortalama	10,0206667	50,0796667	100,297667	252,804	514,977333	759,619

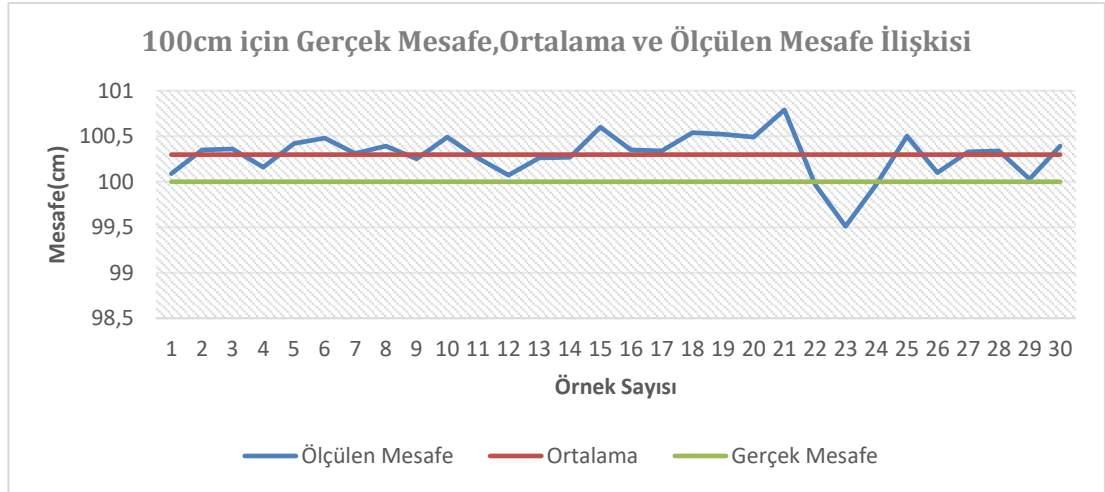
Tablo 2 - 10cm için gerçek mesafe, ortalama ve ölçülen mesafe ilişkisi



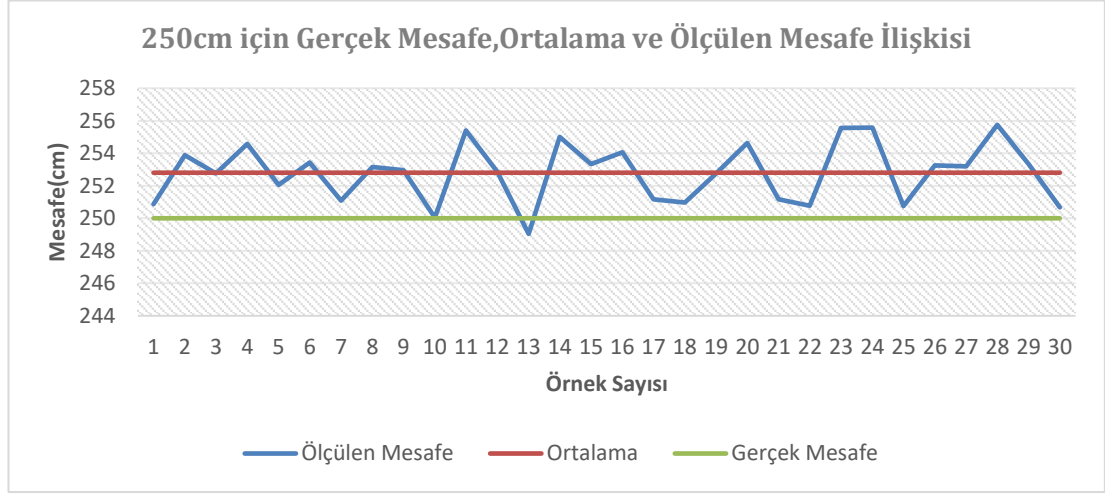
Tablo 3 - 50cm için gerçek mesafe, ortalama ve ölçülen mesafe ilişkisi



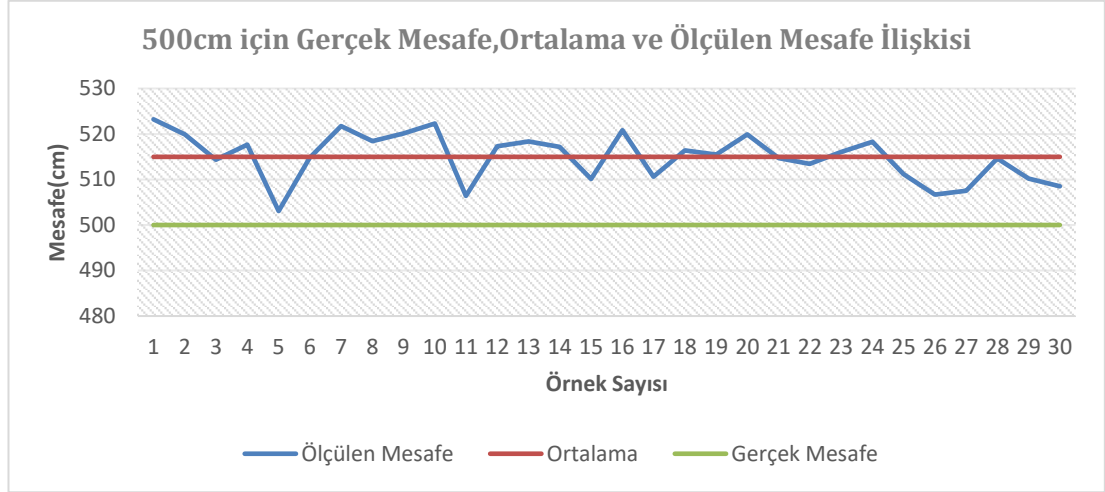
Tablo 4 - 100cm için gerçek mesafe, ortalama ve ölçülen mesafe ilişkisi



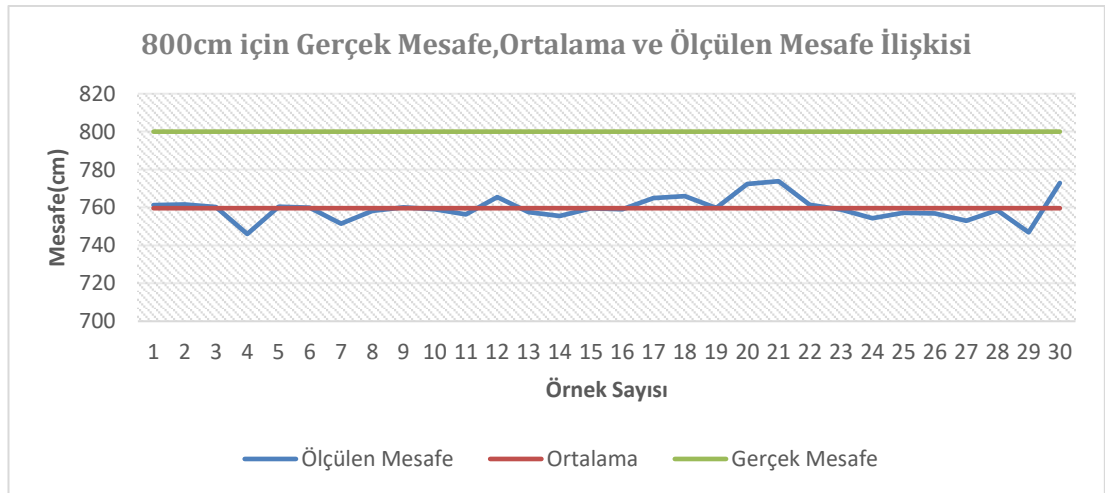
Tablo 5 - 250cm için gerçek mesafe, ortalama ve ölçülen mesafe ilişkisi



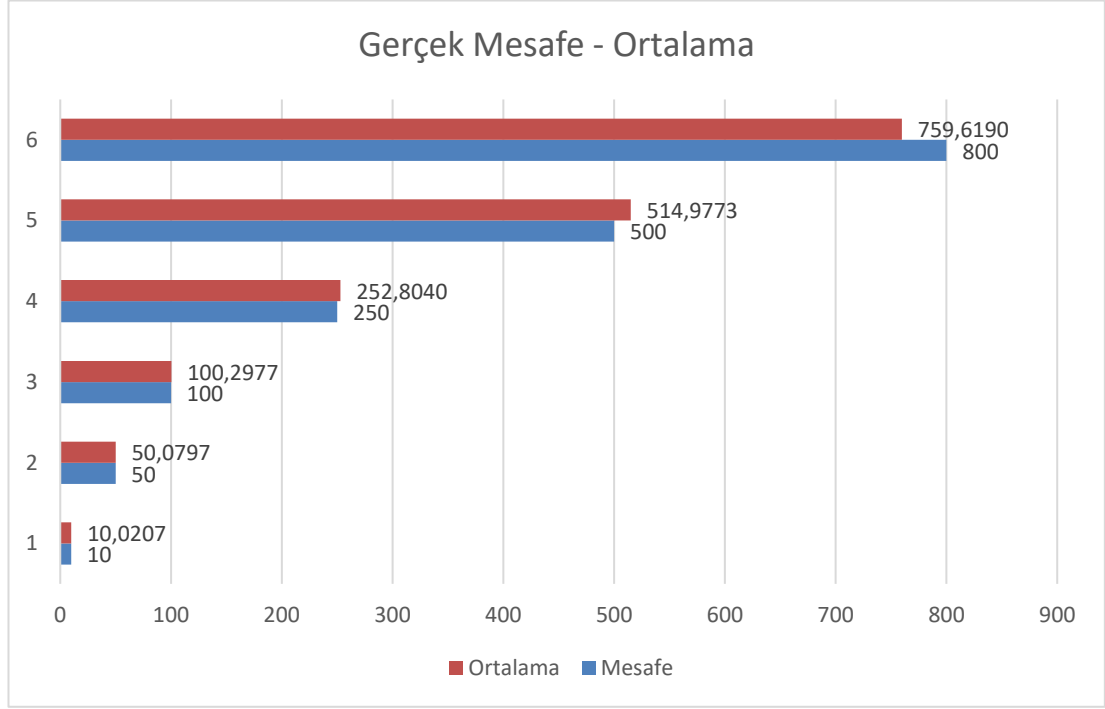
Tablo 6 - 500cm için gerçek mesafe, ortalama ve ölçülen mesafe ilişkisi



Tablo 7 - 800cm için gerçek mesafe, ortalama ve ölçülen mesafe ilişkisi



Tablo 8 - Gerçek mesafe ve ortalama

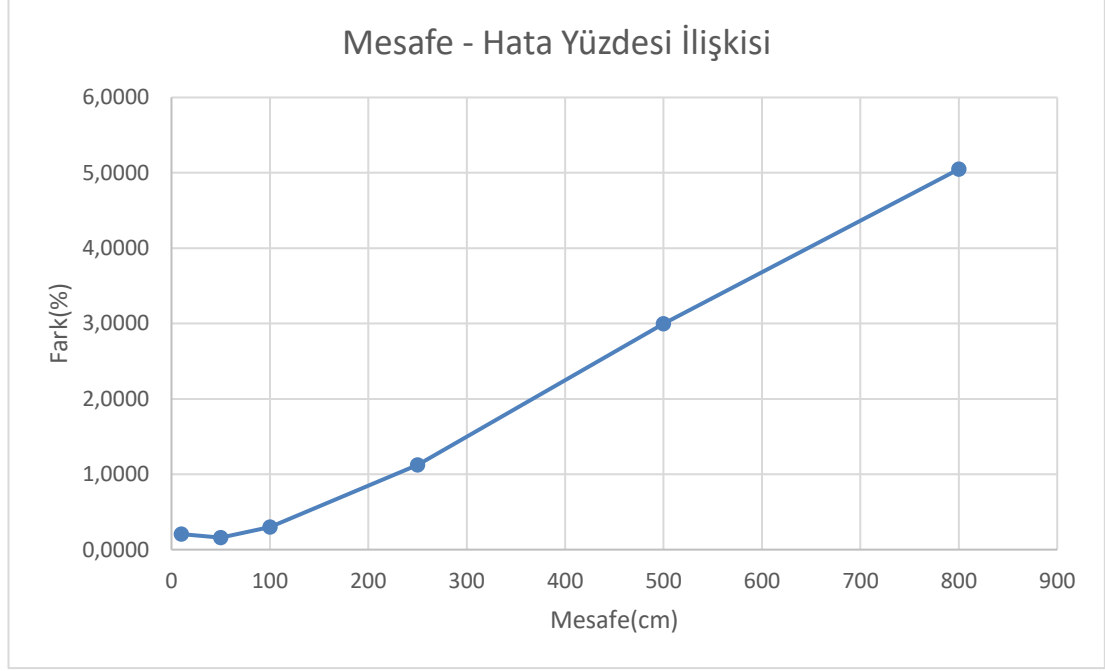


Tablo-1’de 10cm, 50 cm, 100 cm, 250 cm, 500 cm ve 800 cm için yapılmış 30 ölçümün sonuçları gösterilmektedir. Tablo 2’den Tablo 7’e kadar olan kısımda ise her bir ölçüm mesafesinin gerçek mesafesi, ortalaması ve ölçülen sonuçları gösterilmiştir. Tablo 2’de ise tüm sonuçların ortalamasıyla gerçek değerler beraber gösterilmiştir.

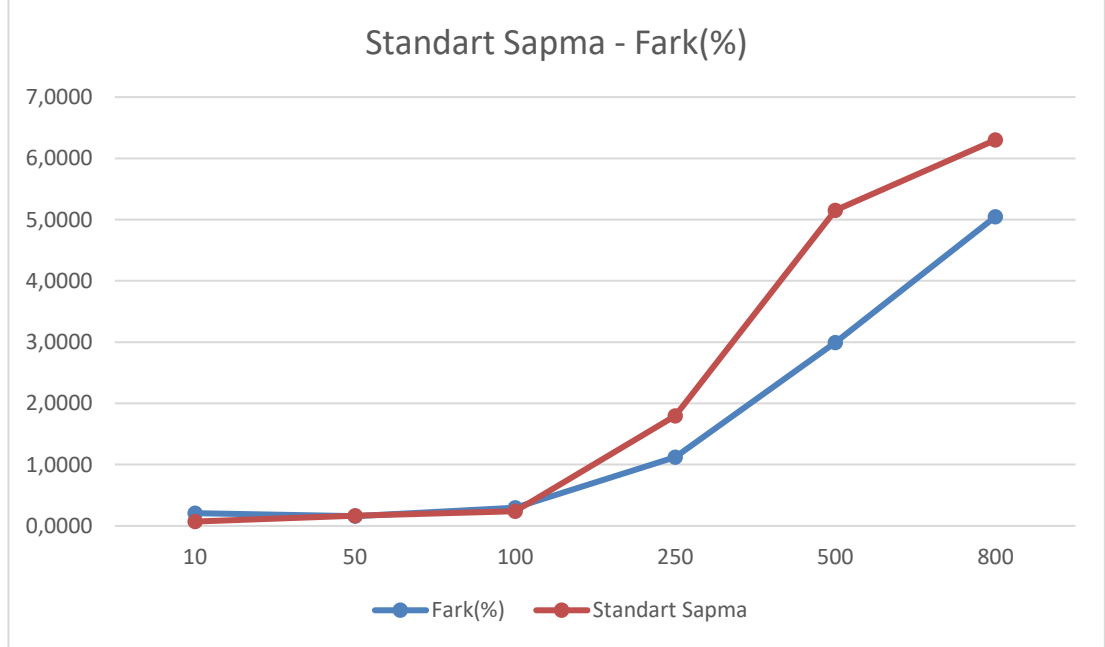
Tablo 9 - Mesafe, ortalama, fark, yüzdelik fark ve standart sapma tablosu

Mesafe	10	50	100	250	500	800
Ortalama	10,0207	50,0797	100,2977	252,8040	514,9773	759,6190
Fark	0,0207	0,0797	0,2977	2,8040	14,9773	40,3810
Hata Yüzdesi	0,2067	0,1593	0,2977	1,1216	2,9955	5,0476
Standart Sapma	0,0708	0,1689	0,2382	1,7979	5,1506	6,3004

Tablo 10 - Mesafe ve hata yüzdesi ilişkisi



Tablo 11 - Yüzelik fark ve standart sapma



Tablo 9’da ölçüm alınan noktaların ortalamalarıyla arasındaki farkları, yüzelik farklar ve standart sapma değerleri gösterilmiştir. Tablo 10’da ise mesafe ve hata yüzdesi grafiği gösterilmiştir. Tablo 11’de standart sapma ile yüzelik farkın grafiği gösterilmiştir.

Tablo 10’da görüldüğü gibi mesafe arttıkça hata oranı da artmaktadır. Bu ToF tabanlı sensörlerin genel özelliğidir. Bunu önlemek için yazılımsal önlemler alınabilir. Bu önlemlerden ilk olanı hata fonksiyonunu çıkarıp ölçümlerde ölçülen değerin gerçeğe yakın olması sağlanabilir. Tablo 2 ile Tablo 7 arasında ölçümlerde görülen ölçülen değer ile gerçek değer arasındaki ufak değişiklikler ise belli ölçüm alıp ortalaması alınarak gönderildiğinde hata daha az olacaktır. Özetle hata oranını en aza indirmek için hata oranı fonksiyonu ve belli bir ölçümün ortalaması alınarak daha gerçekçi değerler elde edilebilir.

Tez kapsamında geliştirdiğimiz ToF kartıyla 8m’e kadar ölçüm alınmıştır. Daha uzun mesafeler için bu sensör çok elverişli değildir. Burada ölçüm mesafesini arttırmak için IR LED yerine lazer kaynağı kullanılabilir. Ayrıca daha güçlü sinyal gönderebilen IR LED’ler tercih edilebilir. Son olarak ise IR LED’lerin mesafesini arttırmak için mercekler de kullanılabilir.

SONUÇ

Tez çalışmasının temelde iki amacı bulunmaktadır. Bunlardan ilki optik yöntemlerin biyomedikal kullanımlarını ifade etmektir. İkinci olarak, optik yöntemler içerisinde yer alan time-of-flight yönteminin birçok biyomedikal uygulamaya çözüm sunabileceğini göstermektir. Çünkü yöntemin günümüzde gelişen teknolojiyle kullanım alanları her geçen arttırmaktadır. Özellikle akıllı telefonlar içerisinde bu yöntemle çalışan sensörler yer almaya başlaması, çeşitli sağlık kontrollerinin uzaktan yapılmasına olanak sağlayacaktır.

Tezin amaçları doğrultusunda, ToF tabanlı sensör çalışması yapılmıştır. Burada tasarlanan sensörle teknolojik yöntemin tanıtılması ve nasıl çalıştığı gösterilmiştir. Sensör temelde tek boyutlu olduğu için biyomedikal alanda belli nesnelerin ölçülmesinde kullanılabilir. Ölçüm sonuçlarında 100 cm'den kısa mesafeler için ortalama hassasiyetin +1.3mm olduğu görülmüştür. Ölçümlerde maksimum 800 cm'ye kadar yapılmıştır. Fakat burada elde edilen sonuçların hassas bir işte kullanılamayacağını sonucuna varılmıştır. Uzun mesafelerde hassas sonuç elde edebilmek için devrede IR LED yerine lazer, daha güçlü IR LED veya LED'lerin önüne mercekle konularak sağlanabilir. Ayrıca yazılımsal olarak belli bir ölçümün ortalaması ve hata fonksiyonu yazılıma işlenerek daha gerçekçi çözümler elde edilebilir.

Tez çalışmasında yapılan uygulamada tek boyutlu ölçümler yapılabilmektedir. Bu tez çalışmasında da yapılmak istenen ve gelecekte yapacağımız çalışma 3D ToF uygulamasıdır. Fakat bu uygulamanın geliştirme maliyetleri şimdilik çok yüksektir. Örneğin uygulamada kullanacağımız bir entegrenin (MLX75026RTH) birim fiyat ~87€ iken entegrenin geliştirme kartının (EVK75026) fiyatı ~2300€ bulunmaktadır. Bunlara ek olarak, yapılacak kart tasarımların PCB ve üretim masrafları da çoktur.

İleri bu konularda yapılacak çalışmalar 3D ToF Kamera ve 3D LiDAR üzerine olmalıdır. Örneğin Basler firmasına ait blaze-101 isimli ürünü gibi farklı

amaçlarda kullanılabilir bir ürün geliştirilmesi gerekmektedir. Böylece bir ürünle birçok farklı sektörün ihtiyacını karşılanabilmektedir. 3D LiDAR ise başka savunma sanayisi olmak üzere otomotiv, tarım gibi birçok alanda aktif olarak kullanılmaktadır. Bu alanda tasarlanacak bir ürün ihtiyaçlara yerli çözüm olacaktır.

Sonuç olarak, ToF yöntemi günümüzde birçok alanda yeni uygulama imkânları bulmaktadır. Tez bu yöntemin anlaşılmasına yardımcı olup ileride yapılacak gerek biyomedikal gerekse başka alanlardaki çalışmalara katkı sağlamayı hedeflemektedir. Buna ek olarak biyomedikal alanda ülkemiz literatür çalışmalarına bir nebze katkısı olmasını arzulanmaktadır.

KAYNAKÇA

- [1] T. Yandayan, «1 MetreNeye Eşittir?»,» *Bilim ve Teknik Dergisi*, no. 538, pp. 40-45, 2012.
- [2] G. Berkovic ve E. Shafir, «Optical methods for distance and displacement measurements»,» *Advances in Optics and Photonics*, cilt 4, no. 4, pp. 441-471, 2012.
- [3] S. Piatek, 02 04 2015. [Çevrimiçi]. Available: <https://hub.hamamatsu.com/us/en/application-note/measuring-distance-with-light/index.html>. [Erişildi: 05 04 2021].
- [4] [Çevrimiçi]. Available: https://www.efunda.com/designstandards/sensors/fotonic/fotonic_intro.cfm. [Erişildi: 05 04 2021].
- [5] B. Culshaw, «Fiber Optics in Sensing and Measurement»,» *IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS*, cilt 6, no. 6, pp. 1014-1021, 2000.
- [6] *MTI-2100 Fotonic Sensor Brochure*, MTI Instruments.
- [7] C. Vázquez ve D. S. Montero, «Polymer Optical Fiber Intensity-Based Sensor for Liquid-Level Measurements in Volumetric Flasks for Industrial Application»,» *International Scholarly Research Notices*, cilt 2012, pp. 1-7, 2012.
- [8] E. Lewis, S. O’Keeffe ve M. A. Zawawi, «Intensity-modulated fiber optic sensor for health monitoring applications: A comparative review»,» *Sensor Review*, cilt 33, no. 1, pp. 57-67, 2013.
- [9] H. L. d. S. Pinto, *Underwater Sea-floor Mapping for a Robotic Application, using Visual Information*, 2016.
- [10] J. Fonseca, A. Baptista, M. J. Martins ve J. P. N. Torres, «Distance measurement systems using lasers and their applications»,» *Applied Physics Research*, cilt 4, no. 9, pp. 33-73, 2017.
- [11] «Wikipedia»,» [Çevrimiçi]. Available:

- https://en.wikipedia.org/wiki/Position_sensitive_device. [Erişildi: 13 04 2021].
- [12] İ. Ayverdi ve A. Topaloğlu. [Çevrimiçi]. Available: <http://lugatim.com/s/kızılötesi>. [Erişildi: 05 04 2021].
- [13] M. A. Akhloufi ve A. Bendada, «Fusion of active and passive infrared images for face recognition,» 2013.
- [14] *GP2Y0A21YK0F Datasheet*, Sharp.
- [15] [Çevrimiçi]. Available: <https://acroname.com/articles/sharp-infrared-ranger-comparison>. [Erişildi: 01 06 2021].
- [16] [Çevrimiçi]. Available: <https://tr.wikipedia.org/wiki/Lazer>. [Erişildi: 13 04 2021].
- [17] J. Hecht. [Çevrimiçi]. Available: <https://www.britannica.com/technology/laser>. [Erişildi: 13 04 2021].
- [18] E. Kumbay, *Lazerle Üçgenleme Yöntem Tabanlı Mesafe Ölçüm Sensörlerinin Doğrusallaştırma Yöntemlerinin Geliştirilmesi*, Bursa, 2010.
- [19] V. Moreno-Oliva, O. Flores-Diaz, E. Román-Hernández, M. Campos-García, E. Campos-Mercado, J. Dorrego-Portela, Q. Hernandez-Escobedo, J. Franco, A.-J. Perea-Moreno ve A. García, «Vibration Measurement Using Laser Triangulation for Applications in Wind Turbine Blades,» *Symmetry*, cilt 13, no. 1017, pp. 1-15, 2021.
- [20] J.-H. Wu, R.-S. Chang ve J.-A. Jiang, «A Novel Pulse Measurement System by Using Laser Triangulation and a CMOS Image Sensor,» *Sensors*, cilt 7, no. 12, pp. 3366-3385, 2007.
- [21] [Çevrimiçi]. Available: <https://www.micro-optronic.com/technology/Konfokale-Sensoren/>. [Erişildi: 20 04 2021].
- [22] *Omron Displacement Sensor Technical Guide*, Omron.
- [23] [Çevrimiçi]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Confocal_microscopy#cite_note-10. [Erişildi: 23 04 2021].
- [24] F. C. Rossetti, L. V. Depieri ve M. V. L. B. Bentley, «Confocal Laser Scanning Microscopy as a Tool for the Investigation of Skin Drug Delivery Systems and Diagnosis of Skin Disorders,» %1 içinde *Confocal Laser Microscopy - Principles and Applications in Medicine, Biology, and the Food Sciences*, Croatia, 2013, pp. 99-140.

- [25] K. S. D. C. R. G. R. H. Michael Zint, «Development and verification of a snapshot dental intraoral three-dimensional scanner based on chromatic confocal imaging,» *Medical Imaging*, cilt 6, no. 3, pp. 1-13, 2019.
- [26] [Çevrimiçi]. Available: <https://www.renishaw.com.tr/tr/interferometrik-sistemler-nasil-calisir--38612>. [Erişildi: 01 05 2021].
- [27] D. Y. Abramovitch ve R. Loughridge, «A Tutorial on Laser Interferometry for Precision Measurements,» %1 içinde *American Control Conference(ACC)*, Washington, 2013.
- [28] *İmalat Metrolojisinde Laser Kullanarak Yapılan Ölçme Teknikleri*, Tübitak, Ulusal Metroloji Enstitüsü(UME).
- [29] S. A. D. F. Müller, «Optical Coherence Tomography (OCT): Principle and Technical Realization,» %1 içinde *High Resolution Imaging in Microscopy and Ophthalmology*, Cham, Springer, 2019, pp. 54-85.
- [30] J. C. Wyant, «The evolution of interferometry from metrology to biomedical applications,» %1 içinde *Proceedings of the SPIE*, 2016.
- [31] T. Brand, «Time of Flight System for Distance Measurement and Object Detection,» [Çevrimiçi]. Available: <https://www.analog.com/en/technical-articles/tof-system-for-distance-measurement-and-object-detection.html>. [Erişildi: 10 05 2021].
- [32] *Direct Time-of-Flight Depth Sensing Reference Designs*, ON Semiconductor, 2020.
- [33] S. Royo ve M. Ballesta-Garcia, «An Overview of Lidar Imaging Systems for Autonomous Vehicles,» *Applied Sciences*, cilt 9, no. 4093, pp. 1-36, 2019.
- [34] [Çevrimiçi]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Lidar>. [Erişildi: 15 05 2021].
- [35] *SICK AG WHITEPAPER - LiDAR SENSOR FUNCTIONALITY AND VARIANTS*, SICK, 2018.
- [36] [Çevrimiçi]. Available: <https://www.ti.com/tool/BW-3P-TFMINI-PLUS>. [Erişildi: 18 05 2021].
- [37] *LiDAR for Automotive and Industrial Applications*, YOLE Developpement.
- [38] C. Rablau, «LIDAR – A new (self-driving) vehicle for introducing optics to broader engineering and non-engineering audiences,» %1 içinde *Fifteenth Conference on Education and Training in Optics and Photonics*, 2019.

- [39] [Çevrimiçi]. Available: <https://leddartech.com/why-lidar/>. [Erişildi: 18 05 2021].
- [40] M. Khader ve S. Cherian, *An Introduction to Automotive LIDAR*, TI, 2020.
- [41] C. W. a. H. X. Ding kang Wang, «MEMS Mirrors for LiDAR: A Review,» *Micromachines*, cilt 11, no. 456, pp. 1-24, 2020.
- [42] [Çevrimiçi]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Velodyne_Lidar. [Erişildi: 19 05 2021].
- [43] [Çevrimiçi]. Available: <https://www.analog.com/en/applications/technology/3d-time-of-flight.html>. [Erişildi: 19 05 2021].
- [44] L. Mullen, V. Contarino ve P. Herczfeld, «Hybrid lidar-radar for medical diagnostics». US Patent: US20040019282A1, 29 07 2002.
- [45] [Çevrimiçi]. Available: <https://3d4medical.com/apple-launch-2020>. [Erişildi: 19 05 2021].
- [46] [Çevrimiçi]. Available: <https://www.gigabyte.com/Industry-Solutions/Healthcare/medical-care-patient-monitoring-system>. [Erişildi: 20 05 2021].
- [47] M. Gramatke, *Applications for Time-of-Flight Cameras in Robotics, Logistics and Medicine*, Basler AG.
- [48] [Çevrimiçi]. Available: <https://thinktech.stm.com.tr/detay.aspx?id=307>. [Erişildi: 20 05 2021].
- [49] A. A. J. P. J. H. Christian Schaller, «Time-of-Flight sensor for patient positioning,» %1 içinde *The International Society for Optical Engineering*, 2009.
- [50] [Çevrimiçi]. Available: https://www.dkfz.de/de/cami/research/CAI/pdfs/time-of-Flight_pdf.pdf. [Erişildi: 25 05 2021].
- [51] T. & H. S. & B. S. & W. J. & K. T. & M.-H. L. & F. H. & H. J. Köhler, «ToF Meets RGB: Novel Multi-Sensor Super-Resolution for Hybrid 3-D Endoscopy,» 2013.
- [52] *OPT8320 Datasheet*, Texas Instruments.
- [53] *OPT8241 3D Time-of-Flight Sensor*, Texas Instruments.
- [54] *OPT9221 Time-of-Flight Controller*, Texas Instrumnets.
- [55] *OPT3101 ToF-Based Long-Range Proximity and Distance Sensor AFE*, Texas

Instruments.

- [56] *FlightSense technology - ST's Time-of-Flight ranging sensors*, https://www.youtube.com/watch?v=gwVD_v-JGIE, 2020.
- [57] [Çevrimiçi]. Available: <https://www.st.com/en/imaging-and-photonics-solutions/time-of-flight-sensors.html#>. [Erişildi: 25 05 2021].
- [58] [Çevrimiçi]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Renesas_Electronics. [Erişildi: 01 06 2021].
- [59] *ISL29501 Datasheet*, Renesas.
- [60] [Çevrimiçi]. Available: <https://reference.digilentinc.com/pmod/pmodtof/start>. [Erişildi: 01 06 2021].
- [61] A. Mutlu ve C. Sürmeli, *Mikrodenetleyiciler ile Seri İletişim*, İstanbul: KODLAB Yayınları, 2015.
- [62] *PIC18(L)F2X/45K50 Datasheet*, Microchip Technology Inc..
- [63] *SFH 4550 Datasheet*, OSRAM Opto Semiconductors.
- [64] *SFH 213 Datasheet*, OSRAM Opto Semiconductors.
- [65] *AT24C04D Datasheet*, Microchip Technology Inc..
- [66] *PmodToF Schematic (Rev. A)*, Digilent Inc..
- [67] [Çevrimiçi]. Available: <https://reference.digilentinc.com/pmod/pmodtof/start>. [Erişildi: 03 06 2021].
- [68] *USB 101: An Introduction to Universal Serial Bus 2.0*, Cypress Semiconductor Corp..
- [69] [Çevrimiçi]. Available: https://www.cambrionix.com/help_pages/connecting-devices/usb-specs-usb-connectors. [Erişildi: 05 06 2021].
- [70] [Çevrimiçi]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/USB#Device_classes. [Erişildi: 05 06 2021].
- [71] [Çevrimiçi]. Available: <https://www.usb.org/defined-class-codes>. [Erişildi: 05 06 2021].
- [72] *I2C-bus specification and user manual*, NXP.
- [73] [Çevrimiçi]. Available: <https://320volt.com/en/ccs-c-usb-hid-uygulamasi-c-sharp-pic18f2550/>. [Erişildi: 01 06 2021].

[74] H. AKAY, Kitap, İstanbul: FSMVÜ, 2019.

[75] İ. Ayverdi ve A. Topaloğlu. [Çevrimiçi]. Available:
<http://lugatim.com/s/mesafe>. [Erişildi: 01 04 2021].

[76] [Çevrimiçi]. Available: <https://mtiinstruments.com/products/non-contact-measurement/fiber-optic-sensors/fiber-optic-mti-2100-fotonic-sensor/>. [Erişildi: 05 04 2021].

EKLER

EK – 1: Mikrodenetleyici Kodu

```
#include <18F25k50.h>

#use delay(internal=48MHz,USB_FULL,ACT=USB)

#use i2c(master, sda=PIN_B0, scl=PIN_B1, FAST=100000)

#define USB_CONFIG_VID 0x0033
#define USB_CONFIG_PID 0x0461
#define USB_CONFIG_BUS_POWER 500
#define USB_STRINGS_OVERWRITTEN

char USB_STRING_DESC_OFFSET[]={0,4,22};

char const USB_STRING_DESC[]={
    //string 0 - language
    4, //length of string index
    0x03, //descriptor type (STRING)
    0x09,0x04, //Microsoft Defined for US-English
    //string 1 - manufacturer
    18, //length of string index
    0x03, //descriptor type (STRING)
    'F',0,
    'S',0,
    'M',0,
    'V',0,
    'U',0,
    '-',0,
    'Y',0,
    'L',0,
    //string 2 - product
    14, //length of string index
    0x03, //descriptor type (STRING)
    '1',0,
    'D',0,
    ',',0,
    'T',0,
    'O',0,
    'F',0
};

#define USB_CONFIG_HID_TX_SIZE 24
#define USB_CONFIG_HID_RX_SIZE 24
```

```

#include <pic18_usb.h>
#include <usb_desc_hid.h>
#include <usb.c>

#include <math.h>

#define LED PIN_A4

#define IRQ PIN_B6
#define SS PIN_B5

#define i2c_address 0xAE

int8 in_data[24];
int8 registerData[24];

int8 kalibrasyonAdresleri[] = {0x10, 0x11, 0x13, 0x60, 0x18, 0x19, 0x90, 0x91,
0x2F, 0x30};
int8 kalibrasyonVerileri[] = {0x04, 0x6E, 0x71, 0x01, 0x22, 0x22, 0x0F, 0xFF,
0x0E, 0xE8};

void write_reg(int8 reg, int8 val)
{
    i2c_start();
    i2c_write(i2c_address);
    i2c_write(reg);
    i2c_write(val);
    i2c_stop();
}

int8 read_reg(int8 reg)
{
    int8 data = 0x00;

    i2c_start();
    i2c_write((i2c_address));
    i2c_write(reg);
    i2c_stop();

    i2c_start();
    i2c_write((i2c_address+1));
    data=i2c_read(0);
    i2c_stop();

    return data;
}

```

```

void TumRegisterOku()
{
    i2c_start();
    i2c_write((i2c_address));
    i2c_write(0xD1);

    i2c_start();
    i2c_write((i2c_address+1));
    for(int a=0; a<22; a++)
    {
        registerData[a] = i2c_read();
    }
    registerData[22]=i2c_read(0);
    i2c_stop();
}

void ToF_Begin()
{
    write_reg(0x01, 0x00);
    write_reg(0xB0, 0xD1);

    for (int i = 0; i < 10; i++)
    {
        write_reg(kalibrasyonAdresleri[i], kalibrasyonVerileri[i]);
    }
}

void ToF_start(void)
{
    write_reg(0x13, 0x7D);

    write_reg(0x60, 0x01);

    read_reg(0x69);

    output_low(SS);
    delay_us(5600);
    output_high(SS);
    delay_us(14400);
}

void ToF_calibrate_distance(int8 avg_nr)
{
    int8 interrupt_ctrl = read_reg(0x60);
    int8 measurement_mode = read_reg(0x13);
}

```

```

float avg = 0;
int8 MSB, LSB;
for (int i = 0; i < avg_nr; i++)
{
    ToF_start();
    while (input(IRQ) != 0);

    MSB = read_reg(0xD8);
    LSB = read_reg(0xD9);

    avg += (float)(_mul((int)MSB, 256) + (int)LSB);
}

avg /= avg_nr;

avg = avg - (float)((0.1 * 1967.45722));

MSB = (((int16)avg & 0xFF00) >> 8);
LSB = ((int16)avg & 0x00FF);

write_reg(0x2F, MSB);
write_reg(0x30, LSB);

write_reg(0x60, interrupt_ctrl);
write_reg(0x13, measurement_mode);
}

void main()
{
    output_drive(LED);
    output_drive(SS);

    output_float(IRQ);
    output_high(SS);

    usb_init();
    usb_task();
    usb_wait_for_enumeration();

    output_high(LED);
    delay_ms(100);
    output_low(LED);
    delay_ms(100);

    ToF_begin();
    delay_ms(1000);
}

```



```

while(TRUE)
{
    while(usb_enumerated())
    {
        if(usb_kbhit(USB_HID_ENDPOINT))
        {
            usb_get_packet(USB_HID_ENDPOINT, in_data,
USB_CONFIG_HID_RX_SIZE);

            if(in_data[0] == 0x29)
            {
                reset_cpu();
            }
            else if(in_data[0] == 0x58)
            {
                ToF_calibrate_distance(100);
                output_high(LED);
                delay_ms(1000);
                output_low(LED);
                delay_ms(1000);
            }
        }

        output_low(LED);
        delay_ms(250);
        output_high(LED);
        delay_ms(250);

        ToF_start();
        while (input(IRQ) != 0);

        TumRegisterOku();
        usb_put_packet(1, registerData, 24, USB_DTS_TOGGLE);
    }
}
}

```

EK – 2: C# Kodu

```
using LiveCharts;
using System;
using System.Threading;
using System.Windows.Forms;
using LiveCharts.Configurations;
using LiveCharts.Wpf;

namespace YL4
{
    public partial class Form1 : Form
    {
        public class MeasureModel
        {
            public System.DateTime DateTime { get; set; }
            public double Value { get; set; }
        }

        public ChartValues<MeasureModel> ChartValues { get; set; }
        public System.Windows.Forms.Timer Timer { get; set; }
        public Random R { get; set; }

        SeriesCollection series = new SeriesCollection();

        public Form1()
        {
            InitializeComponent();

            var mapper = Mappers.Xy<MeasureModel>()
                .X(model => model.DateTime.Ticks) //use DateTime.Ticks as X
                .Y(model => model.Value); //use the value property as Y

            //lets save the mapper globally.
            Charting.For<MeasureModel>(mapper);

            //the ChartValues property will store our values array
            ChartValues = new ChartValues<MeasureModel>();
            cartesianChart1.Series = new SeriesCollection
            {
                new LineSeries
                {
                    Values = ChartValues,
                    PointGeometrySize = 18,
                    StrokeThickness = 4
                }
            };
        }
    }
}
```

```

cartesianChart1.AxisX.Add(new Axis
{
    DisableAnimations = true,
    LabelFormatter = value => new
System.DateTime((long)value).ToString("mm:ss"),
    Separator = new Separator
    {
        Step = TimeSpan.FromSeconds(1).Ticks
    }
});

SetAxisLimits(System.DateTime.Now);

//The next code simulates data changes every 500 ms
Timer = new System.Windows.Forms.Timer
{
    Interval = 250
};
Timer.Tick += TimerOnTick;
R = new Random();
//Timer.Start();
}

protected override void OnHandleCreated(EventArgs e) // Windows üzerinden
varolan kütüphanemizi tanıtıyoruz.
{
    base.OnHandleCreated(e);
    usbHidPort1.RegisterHandle(Handle);
}

protected override void WndProc(ref Message m) // Daha sonra USB HID
aygıtımızı aktif hale getiren bir mesaj yolluyoruz.
{
    usbHidPort1.ParseMessages(ref m);
    base.WndProc(ref m);
}

private void usbHidPort1_OnSpecifiedDeviceArrived(object sender, EventArgs
e) // Karta tanımlı USB bağlandığında bunu yakalayıp bildirir.
{
    if (InvokeRequired)
    {
        Invoke(new EventHandler(usbHidPort1_OnSpecifiedDeviceArrived), new
object[] { sender, e });
    }
    else
    {

```

```

        toolStripStatusLabel1.Text = "USB Bağlandı.";
    }
}

private void usbHidPort1_OnDeviceArrived(object sender, EventArgs e)
{
    toolStripStatusLabel1.Text = "USB Bağlandı.";
}

private void usbHidPort1_OnDeviceRemoved(object sender, EventArgs e)
{
    toolStripStatusLabel1.Text = "USB Çıkarıldı.";
}

private void usbHidPort1_OnSpecifiedDeviceArrived_1(object sender,
EventArgs e)
{
    toolStripStatusLabel1.Text = "USB Bağlandı.";
}

private void usbHidPort1_OnSpecifiedDeviceRemoved(object sender,
EventArgs e)
{
    toolStripStatusLabel1.Text = "USB Çıkarıldı.";
}

private void Form1_Load(object sender, EventArgs e)
{
    toolStripStatusLabel1.Text = "USB Bağlantı Kurulamadı.";
}

string gVeri;
double distance;
int[] registerBilgileri = new int[23];
byte[] outData = new byte[25];

private void usbHidPort1_OnDataRecieved(object sender,
UsbLibrary.DataRecievedEventArgs args)
{
    try
    {
        CheckForIllegalCrossThreadCalls = false;

        gVeri = "";

        for (int m = 1; m < usbHidPort1.SpecifiedDevice.InputReportLength;
m++)//

```

```

    {
        gVeri += args.data[m].ToString("X2");

        //if(m%2 == 1)
        // registerBilgileri[m-1] = int.Parse(gVeri.Substring(m-1, 2),
System.Globalization.NumberStyles.HexNumber);
    }

    for (int i = 0; i < 22; i++)
    {
        registerBilgileri[i] = int.Parse(gVeri.Substring(i*2, 2),
System.Globalization.NumberStyles.HexNumber);
    }

    distance = ((double)registerBilgileri[0] * 256 +
(double)registerBilgileri[1]) / 65536 * 3331;

    progressBar1.Value = (int)(distance);

    distanceRegister.Text = (((registerBilgileri[0] & 0xff) << 8) |
(registerBilgileri[1] & 0xff)).ToString();
    precisionRegister.Text = (((registerBilgileri[2] & 0xff) << 8) |
(registerBilgileri[3] & 0xff)).ToString();
    magnitudeRegister.Text = (((registerBilgileri[5] & 0xff) << 8) |
(registerBilgileri[6] & 0xff)).ToString();
    phaseRegister.Text = (((registerBilgileri[7] & 0xff) << 8) |
(registerBilgileri[8] & 0xff)).ToString();
    irawRegister.Text = (((registerBilgileri[10] & 0xff) << 8) |
(registerBilgileri[11] & 0xff)).ToString();
    qrawRegister.Text = (((registerBilgileri[13] & 0xff) << 8) |
(registerBilgileri[14] & 0xff)).ToString();
    gainRegister.Text = (((registerBilgileri[20] & 0xff) << 8) |
(registerBilgileri[21] & 0xff)).ToString();
    emitterRegister.Text = registerBilgileri[15].ToString();
    tempRegister.Text = registerBilgileri[16].ToString();
    lightRegister.Text = registerBilgileri[17].ToString();

    uzunlukBilgi.Text = String.Format("{0:0.00}", Math.Round(distance,
2).ToString()) + " cm";
    }
    catch (Exception ex)
    {
        MessageBox.Show(ex.Message);
    }
}

```

```

private void SetAxisLimits(System.DateTime now)
{
    CheckForIllegalCrossThreadCalls = false;
    cartesianChart1.AxisX[0].MaxValue = now.Ticks +
TimeSpan.FromSeconds(1).Ticks; // lets force the axis to be 100ms ahead
    cartesianChart1.AxisX[0].MinValue = now.Ticks -
TimeSpan.FromSeconds(8).Ticks; //we only care about the last 8 seconds
}

private void TimerOnTick(object sender, EventArgs eventArgs)
{
    var now = System.DateTime.Now;

    ChartValues.Add(new MeasureModel
    {
        DateTime = now,
        Value = distance//R.Next(0, 10)
    });

    SetAxisLimits(now);

    //lets only use the last 30 values
    if (ChartValues.Count > 30) ChartValues.RemoveAt(0);
}

private void baglan_Click(object sender, EventArgs e)
{
    try
    {
        usbHidPort1.VendorId = 0x0033;
        usbHidPort1.ProductId = 0x0461;

        usbHidPort1.CheckDevicePresent();

        Timer.Start();
    }
    catch (Exception)
    {
        MessageBox.Show("Id girişleri yapiniz.");
    }
}

private void distanceCalibrationButton_Click(object sender, EventArgs e)
{
    CheckForIllegalCrossThreadCalls = false;
    if (usbHidPort1.SpecifiedDevice != null)
    {

```

```

        for (int i = 1; i < 25; i++)
        {
            outData[i] = 0x58;
        }

        usbHidPort1.SpecifiedDevice.SendData(outData);
    }
}

private void resetButton_Click(object sender, EventArgs e)
{
    CheckForIllegalCrossThreadCalls = false;
    if (usbHidPort1.SpecifiedDevice != null)
    {
        for (int i = 1; i < 25; i++)
        {
            outData[i] = 0x29;
        }

        usbHidPort1.SpecifiedDevice.SendData(outData);
    }
}
}
}
}

```