

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ UÇAK VE UZAY BİLİMLERİ FAKÜLTESİ

**RASPBERRY Pİ VE 3B YAZICI TEKNOLOJİSİ İLE GELİŞTİRİLEN
MODERN ANEMOMETRE: TASARIM, UYGULAMA VE GERÇEK ZAMANLI
VERİ İZLEME**

BİTİRME ÇALIŞMASI

Atakan YAMAN

Meteoroloji Mühendisliği

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Elçin Tan

Haziran 2024

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ UÇAK VE UZAY BİLİMLERİ FAKÜLTESİ

**RASPBERRY Pİ VE 3B YAZICI TEKNOLOJİSİ İLE GELİŞTİRİLEN
MODERN ANEMOMETRE: TASARIM, UYGULAMA VE GERÇEK ZAMANLI
VERİ İZLEME**

BİTİRME ÇALIŞMASI

**Atakan YAMAN
(110190235)**

Meteoroloji Mühendisliği

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Elçin TAN

HAZİRAN 2024

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**RASPBERRY Pİ VE 3B YAZICI TEKNOLOJİSİ İLE GELİŞTİRİLEN
MODERN ANEMOMETRE: TASARIM, UYGULAMA VE GERÇEK ZAMANLI
VERİ İZLEME**

LİSANS TEZİ

**Atakan Yaman
(110190235)**

Meteoroloji Mühendisliği

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Elçin Tan

HAZİRAN 2024

İTÜ, Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesinin 110190235 numaralı öğrencisi **Atakan YAMAN**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**RASPBERRY Pİ VE 3B YAZICI TEKNOLOJİSİ İLE GELİŞTİRİLEN MODERN ANEMOMETRE: TASARIM, UYGULAMA VE GERÇEK ZAMANLI VERİ İZLEME**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Elçin Tan**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri: **Prof. Dr. Kasım Koçak**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Barış Çaldağ
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 11 Haziran 2024
Savunma Tarihi : 11 Haziran 2024

Aileme, değerli hocalarıma ve her zaman yanımda olan dostlarıma,

Önsöz

Bu bitirme tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Meteoroloji Mühendisliği ve Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği bölümlerinde çift anadal programını tamamlamam sırasında gerçekleştirdiğim çalışmaları içermektedir. Bu süreçte edindiğim bilgi birikimi ve deneyimleri, yenilikçi bir proje olan modern anemometrenin geliştirilmesiyle birleştirerek ortaya koydum.

Tez çalışmamda, özellikle kontrol sistemleri, veri izleme ve gömülü sistemler konularında kazandığım bilgi ve becerileri uygulama fırsatı buldum. Bu süreçte Raspberry Pi ve 3B yazıcı teknolojilerini kullanarak modern ve etkili bir anemometre tasarımı ve uygulaması gerçekleştirdim. Bu proje, atmosferik verilerin doğru ve maliyet açısından daha ucuz bir şekilde toplanmasını ve analiz edilmesini sağlamayı amaçlamaktadır.

Tez danışmanım Doç. Dr. Elçin Tan'a, bana bu projede rehberlik ettiği ve değerli katkılarıyla yol gösterdiği için teşekkür ederim. Ayrıca, üniversitemizin Trisonik Laboratuvar olanaklarını kullanmama izin veren ve destek sağlayan Dr. Öğr. Üyesi Duygu Erdem'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın her aşamasında yanımda olan, özellikle çok eski arkadaşım Eray Eker'e ve diğer yakın arkadaşlarıma, aileme ve bana inanan herkese minnettarım. Onların desteği ve teşviki, bu projeyi başarıyla tamamlamamda büyük bir rol oynadı.

Son olarak, bu tezin, meteorolojiye bağımlı veya bağımsız ölçüm sistemleri alanlarında araştırma yapan gelecekteki öğrencilere ve mühendislere ilham vermesini umuyorum.

Haziran 2024

Atakan Yaman
(Meteoroloji, Kontrol ve
Otomasyon Mühendisliği
Öğrencisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

Önsöz	ix
İÇİNDEKİLER.....	xii
KISALTMALAR.....	xv
SEMBOLLER.....	xvii
TABLolar LİSTESİ.....	xix
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xxi
ÖZET	xxiv
SUMMARY.....	xxvii
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Araştırması	3
1.2 Tezin Amacı	14
1.3 Hipotez	15
2. ANEMOMETRE, RÜZGAR ÖLÇÜMÜ VE İLGİLİ KAVRAMLAR.....	16
2.1 Meteoroloji ve Rüzgar	17
2.1.1 Meteoroloji	17
2.1.2 Rüzgar	17
2.1.3 Rüzgar ölçümü	17
2.2 Rüzgar Ölçüm Aletleri ve Teknolojileri	17
2.2.1 Kap anemometreler	18
2.2.2 Sonik anemometreler.....	18
2.2.3 Sıcak tel anemometreleri	18
2.3 Geliştirme ve Prototipleme Araçları.....	19
2.3.1 Hall etkisi sensörleri.....	19
2.3.2 Raspberry Pi 5	19
2.3.3 MCP3008	20
2.3.4 Neodymium mıknatıslar	21
2.3.5 Rulman	21
2.4 3B yazıcı teknolojisi	22
2.5 Yazılım ve Programlama	22
2.5.1 Python.....	22
2.6 Veri Saklama ve Görselleştirme	22
2.6.1 InfluxDB.....	22
2.6.2 Grafana	23
3. ANEMOMETRENİN TASARIMI	25
3.1 Tasarım Süreci ve Kullanılan Yazılım	25
3.2 Anemometrenin Tabanı	25
3.3 Silindirik Yapı ve Orta Direk	26
3.4 Rulman ve Döner Parçalar.....	26
3.4.1 Skf 7203 bep rulman	26
3.4.2 Rulman seçim kriterleri ve karşılaştırma	27
3.4.3 Rulman entegrasyonu	27
3.4.4 Kap tasarımı ve montajı	28

3.4.4.1 Sonuç.....	28
3.5 Üst koruyucu başlık.....	28
3.6 Tasarımın CAD Programında Model Gösterimi ve Açıklanması	29
3.6.1 Ölçüler ve bileşenler	30
3.6.1.1 Ön görünüş	32
3.6.1.2 Genel Görünüş	33
3.6.1.3 Üst Görünüş	34
3.7 3B Yazıcı Kullanarak Anemometre Parçalarının Üretilmesi	35
3.7.1 3B yazıcı ve malzeme seçimi	35
3.7.2 3B yazıcı ayarları ve modifikasyonlar	35
3.7.3 Parçaların baskı ayarları	35
3.7.4 Baskı süreci	37
3.7.5 Parçaların Montajı ve Birleştirilmesi	38
4. RASPBERRY Pİ 5 VE SENSÖR ENTEGRASYONU	41
4.1 Raspberry Pi 5 8GB RAM Kullanımı ve Avantajları.....	41
4.1.1 Yüksek performans ve işlem Kapasitesi	43
4.1.2 Gelişmiş bellek kapasitesi	43
4.1.3 Geniş giriş/çıkış (GPIO) desteği ve esneklik	43
4.1.4 Gelişmiş depolama ve veri yönetimi.....	43
4.1.5 Enerji verimliliği ve portatiflik	44
4.1.6 Sonuç.....	44
4.2 Hall Etkisi Sensörleri ve Kullanımı	45
4.2.1 Anemometrede kullanılan hall etkisi sensörleri ve çeşitleri	45
4.2.1.1 Honeywell SS496A1 hall etkisi sensörü	45
4.2.1.2 Allegro A1203 hall etkisi sensörü.....	46
4.2.1.3 SS496A1 ve A1203 hall etkisi sensörlerinin karşılaştırılması.....	46
4.2.1.4 Projedeki kullanımları.....	47
4.2.2 Sonuç.....	47
4.3 MCP 3008 ile Hall Sensörü Entegrasyonu.....	47
4.3.1 MCP3008'in çalışma prensibi ve özellikleri	48
4.3.2 Projede MCP3008'in kullanımı	48
4.3.3 SS496A1 ve MCP3008 entegrasyonu	48
4.3.3.1 Entegrasyonun teknik detayları.....	49
4.4 Sonuç	50
5. VERİ DEPOSU OLUŞTURMA VE ANLIK OLARAK VERİLERİ	
GÖRSELLEŞTİRME	51
5.1 Veri Saklama ve Analiz.....	51
5.1.1 InfluxDB bağlantısının kurulması.....	51
5.1.2 Veri toplama ve işleme	51
5.1.3 Verilerin saklanması ve görselleştirilmesi	52
5.1.4 Algoritmaların detaylandırılması	52
5.1.4.1 Rüzgar hızının hesaplanması.....	53
5.1.4.2 Aykırı değerlerin temizlenmesi.....	53
5.1.4.3 Verinin kaydedilmesi	53
5.1.4.4 Hareketli ortalama.....	54
5.1.4.5 Sapma hesaplama	54
5.1.4.6 Dönüşüm faktörü.....	54
5.2 Sonuç	55
6. KALİBRASYON, ÖLÇÜM SONUÇLARI VE MALİYET ANALİZİ.....	57
6.1 Kalibrasyon Süreci	57

6.1.1 A1203 sensörünün çalışma prensibi ve her iki sensör için hız hesaplama	58
6.1.2 A1203LUA-T ve SS496A1 hall etkisi sensörlerinin ilişkisi	60
6.2 Ölçüm Sonuçlarının Analizi	61
6.3 Test ve Kalibrasyon Süreçlerinden Elde Edilen Bulgular	65
6.4 Ölçüm Hatalarının Sebepleri	66
6.5 Maliyet Analizi	67
6.5.1 Donanım maliyetleri	67
6.5.2 Yazılım Maliyetleri	68
6.5.3 Üretim ve Test Maliyetleri	68
6.5.4 Toplam Maliyet	68
7. KAPANIŞ ve ÖNERİLER.....	69
REFERANSLAR.....	72
ÖZGEÇMİŞ.....	76

KISALTMALAR

3B: Üç Boyutlu
ACCUWIND: Otomatik Rüzgar Hızı
ADC: Analog-Dijital Dönüştürücü
AWS: Otomatik Meteoroloji İstasyonu
CAD: Bilgisayar Destekli Tasarım
CNC: Bilgisayarlı Sayısal Kontrol
FPGA: Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri
GPRS: Genel Paket Radyo Servisi
GSM: Küresel Sistem Mobil İletişim
GUI: Grafiksel Kullanıcı Arayüzü
IEEE: Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
IFTC: İleriye Yönelik Trafik Kontrol
IoT: Nesnelerin İnterneti Teknolojileri
LED: Işık Yayan Diyot
MQTT: Message Queuing Telemetry Transport
PCB: Baskı Devre Kartı
PWS: Taşınabilir Meteoroloji İstasyonu
R&D: Araştırma ve Geliştirme
RAM: Rastgele Erişim Belleği
RMS: Kök Ortalama Kare
RPi: Raspberry Pi
RWIS: Karayolu Hava Durumu Bilgi Sistemi
SD: Güvenli Dijital
SPI: Seri Çevre Birimi Arayüzü
TRTC: Tersine Yönelik Trafik Kontrol
USB: Evrensel Seri Veriyolu
UV: Ultraviyole
Wi-Fi: Kablosuz Bağlantı

SEMBOLLER

mm : Milimetre

kg : Kilogram

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 6.1 : A1203LUA-T Sensörü Ölçüm Katsayısı ve Test Hızları	61
Tablo 6.2 : SS496A1 Sensörü Ölçüm Katsayısı ve Test Hızları.....	61
Tablo 6.3 : Sensörlerin Ölçüm Katsayıları ve Hata Analizi.....	64
Tablo 6.4 : Maliyet tablosu	69

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Kap anemometre (Pindado vd., 2014).....	18
Şekil 2.2 : Raspberry Pi 5 (Raspberry Pi Ltd, 2023)	20
Şekil 2.3 : MCP3008 Microchip Technology Inc. (2001)	21
Şekil 2.4 : SKF 7203 BEP Rulman (SKF, 2022).....	22
Şekil 3.1 : Autodesk Fusion 360'da anemometre modelinin görüntüsü.....	29
Şekil 3.2 : Autodesk Fusion 360'da anemometre modelinin her bir parçasının görüntüsü.....	30
Şekil 3.3 : Anemometrenin ön perspektiften 2 boyutlu görünüşü	32
Şekil 3.4 : Anemometrenin genel perspektiften 3 boyutlu görünüşü	33
Şekil 3.5 : Anemometrenin üst perspektiften 2 boyutlu görünüşü	34
Şekil 3.1 : Anemometre Parçalarının Ultimaker Cura Yazılımında Baskıya Hazırlık Aşaması Örnek 1	37
Şekil 3.2 : Anemometre Parçalarının Ultimaker Cura Yazılımında Baskıya Hazırlık Aşaması Örnek 2	37
Şekil 3.3 : 3B yazıcı kullanılarak üretilmiş parçalar.....	38
Şekil 3.4 : 3B Yazıcı ile parçaları basılmış ve boyanmış anemometre	39
Şekil 3.5 : Tasarlanan anemometrenin kapağının iç görüntüsü.....	40
Şekil 4.1 : Raspberry Pi 5 GPIO Pin Dizilimi ve Fonksiyonları (Raspberry Pi, 2023)	
Şekil 4.2 : Anemometrenin Raspberrypi, breadboard ve kablo bağlantılarını içeren iç kısmı.....	42
Şekil 4.3 : Honeywell SS496A1 hall etkisi sensörü	46
Şekil 4.4 : A1203 hall etkisi sensörü (Allegro MicroSystems, 2020)	46
Şekil 4.5 : MCP3008 ADC Modülünün Pin Dizilimi ve Fonksiyonları (Microchip Technology, 2022)	49
Şekil 5.1 : Grafana kullanılarak veri deposunda bulunan verilere ait gösterge paneli	55
Şekil 6.1 : İTÜ Trisonik Araştırma Laboratuvarı'nda rüzgar tüneline anemometrenin kalibrasyon ve testi.....	58
Şekil 6.2 : SS496A1 Hall Etki Sensörü ile yapılan ölçüme ait rüzgar tüneline yapılan testte kaydedilen verilerin her bir test hızına ait zaman serisi grafiği	60
Şekil 6.3 : A1203LUA-T Sensörünün Anlık Rüzgar Hızı ve Ölçüm Katsayısı Değişimi	62
Şekil 6.4 : SS496A1 Sensörünün Anlık Rüzgar Hızı ve Ölçüm Katsayısı Değişimi	62
Şekil 6.5 : SS496A1 Sensörünün 5ms^{-1} Hızda Ölçüm Katsayısı Grafiği	62
Şekil 6.6 : SS496A1 ve A1203LUA-T Sensörlerinin 10 m/s Hızında Ölçüm Verileri	63
Şekil 6.7 : SS496A1 ve A1203LUA-T Sensörlerinin 11 m/s Hızında Ölçüm Verileri	63
Şekil 6.8 : SS496A1 ve A1203LUA-T Sensörlerinin 13 m/s Hızında Ölçüm Verileri	63

Şekil 6.9 : İTÜ Trisonik Araştırma Laboratuvarı'nda rüzgar tüneline test edilen anemometrenin ölçümlerinin anlık çıktısının panelden takibi	65
---	----

RASPBERRY Pİ VE 3B YAZICI TEKNOLOJİSİ İLE GELİŞTİRİLEN MODERN ANEMOMETRE: TASARIM, UYGULAMA VE GERÇEK ZAMANLI VERİ İZLEME

ÖZET

Bu tez, meteorolojik veri toplama amacıyla modern bir anemometre geliştirmek için Raspberry Pi 5 ve 3B yazıcı teknolojilerinin entegrasyonuna odaklanmaktadır. Projenin ana hedefi, Hall Effect sensörleri, veri işleme birimleri ve bulut tabanlı veri depolama ve analiz sistemleri gibi ileri teknolojileri kullanarak atmosferik değişkenlerin doğruluğunu ve gerçek zamanlı izlenebilirliğini artırmaktır.

Meteoroloji, atmosferik olayları inceleyen bilim dalıdır ve kısa vadeli hava tahminlerinden uzun vadeli iklim değişikliklerine kadar geniş bir yelpazeyi kapsar. Son yıllarda, insan faaliyetleri atmosferdeki sera gazı konsantrasyonlarını önemli ölçüde artırmış, bu da deniz seviyelerinin yükselmesi, buzulların erimesi ve aşırı hava olaylarının artması gibi küresel iklim değişikliklerine yol açmıştır. Bu değişiklikleri etkin bir şekilde izlemek ve tahmin etmek için yüksek hassasiyetli meteorolojik veri toplama sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu projenin merkezinde, düşük maliyetli ve yüksek performanslı bir mikro bilgisayar olan Raspberry Pi 5 yer almaktadır. Bu mikro bilgisayar, özel olarak tasarlanmış 3B yazıcı parçaları ile birleştirilerek özelleştirilmiş bir anemometre oluşturulmuştur. 3B yazıcı teknolojisi, cihazın hızlı ve düşük maliyetli bir şekilde üretilmesine olanak tanır. Bu esneklik, projede kullanılan anemometre gibi yüksek özelleştirme gerektiren cihazların geliştirilmesinde özellikle faydalıdır.

Anemometrenin tasarımı, yüksek hız kabiliyeti, düşük sürtünme ve dayanıklılığı ile bilinen SKF 7203 BEP rulmanları tarafından desteklenen döner bir mekanizma içerir. Bu özellikler, çeşitli koşullar altında rüzgar hızının doğru ölçülmesini sağlamak için gereklidir. Hall Effect sensörleri, anemometre kaplarının dönüşüyle oluşan manyetik alan değişikliklerini algılar ve bu sayede hassas rüzgar hızı ölçümleri yapılır. Bu sensörlerden gelen analog sinyaller, MCP3008 Analog-Dijital Dönüştürücü (ADC)

modülü kullanılarak dijital verilere dönüştürülür. Bu dönüşüm, verilerin Raspberry Pi 5 tarafından doğru bir şekilde işlenmesini ve analiz edilmesini sağlar.

Bu bileşenlerin tasarımı ve entegrasyonu, kapsamlı bir bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımı olan Autodesk Fusion 360 kullanılarak titizlikle gerçekleştirilmiştir. Bu yazılım, anemometrenin her bir bileşeninin detaylı bir şekilde modellenmesini ve simülasyonunu sağlayarak, fiziksel prototiplerin üretilmesinden önce olası tasarım sorunlarının belirlenip çözülmesini sağlar, böylece zaman ve kaynak tasarrufu sağlanır.

Projenin önemli bir yönü, geliştirilen anemometrenin gerçek dünya koşullarında, özellikle uzak ve zorlu ortamlarda pratik uygulamasıdır. Anemometrenin performansı, mevcut meteorolojik istasyonların verileriyle karşılaştırılarak bir rüzgar tüneline titizlikle test edilmiştir. Bu doğrulama süreci, yeni sistemin güvenilirliğini ve doğruluğunu göstermek için kritik öneme sahiptir.

Anemometre tarafından toplanan veriler, Raspberry Pi 5 kullanılarak gerçek zamanlı olarak işlenir ve analiz edilir. Bu veriler daha sonra bulut tabanlı depolama sistemlerine iletilir ve burada araştırmacılar ve meteorologlar tarafından erişilip daha fazla analiz edilir. Bulut tabanlı sistemlerin kullanımı, verilerin güvenli bir şekilde depolanmasını ve uzun vadeli analiz ve iklim modellemesi için hazır olmasını sağlar. Bu yaklaşım, atmosferik koşulların gerçek zamanlı izlenmesini kolaylaştırarak hava durumu değişikliklerine anında yanıt vermeyi mümkün kılar.

Projenin bir diğer önemli özelliği, toplanan verilerin gerçek zamanlı görselleştirilmesidir. Grafana gibi platformlar kullanılarak veriler dinamik bir gösterge panelinde sürekli izleme ve analiz imkanı sağlayacak şekilde sunulmuştur. Bu gösterge paneli, rüzgar hızı ve diğer meteorolojik değişkenlerin grafiksel temsilini sağlar, böylece desenler ve anormallikler kolayca tespit edilebilir. Gerçek zamanlı veri görselleştirme yeteneği, meteorologlar ve araştırmacılar için karar verme sürecini geliştirir, değişen hava koşullarına hızla tepki vermeyi ve gelecekteki eğilimleri doğru bir şekilde tahmin etmeyi mümkün kılar.

Sonuç olarak, bu tez düşük maliyetli, yüksek performanslı ve esnek bir meteorolojik veri toplama çözümü sunan yenilikçi bir anemometre sistemi geliştirmektedir. Raspberry Pi 5 ve 3B yazıcı teknolojilerinin entegrasyonu, gelişmiş veri işleme ve bulut tabanlı depolama çözümleri, meteorolojik veri toplama yeteneklerini önemli

ölçüde artırır. Proje, atmosferik bilimler alanına önemli katkılarda bulunmakla kalmaz, aynı zamanda gelecekteki araştırma ve geliştirme çalışmalarına da temel oluşturur. Bu projede yapılan ilerlemeler, iklim değişikliğiyle mücadeleye yönelik modern teknolojilerin kullanımının önemini vurgulamakta ve Dünya'nın atmosferinin daha doğru ve güvenilir bir şekilde izlenmesini sağlamaktadır.

DEVELOPMENT OF A MODERN ANEMOMETER USING RASPBERRY PI 5 AND 3D PRINTING TECHNOLOGY: DESIGN, IMPLEMENTATION, AND REAL-TIME DATA MONITORING

SUMMARY

This thesis focuses on the integration of Raspberry Pi 5 and 3D printing technologies to develop a modern anemometer for meteorological data collection. The primary goal of the project is to enhance the accuracy, reliability, and real-time monitoring of atmospheric variables by leveraging advanced technologies like Hall Effect sensors, data processing units, and cloud-based data storage and analysis systems.

Meteorology, the science dedicated to studying atmospheric phenomena, encompasses a wide range of activities from short-term weather forecasting to long-term climate change analysis. In recent decades, human activities have significantly elevated greenhouse gas concentrations in the atmosphere, leading to profound global climate changes such as rising sea levels, melting glaciers, and an increase in extreme weather events. To effectively monitor and predict these changes, it is critical to have high-precision meteorological data collection systems. Such systems provide the detailed and accurate data necessary for climate models and forecasts.

Central to this project is the Raspberry Pi 5, a versatile and high-performance microcomputer known for its low cost and powerful capabilities. This microcomputer is integrated with 3D printed parts to develop a customized anemometer. The use of 3D printing technology allows for rapid and cost-effective production of the device, facilitating the creation of intricate and precise components tailored to specific needs. This flexibility in manufacturing is particularly beneficial for creating highly specialized instruments like the anemometer in this project.

The anemometer's design features a rotating mechanism supported by SKF 7203 BEP bearings, selected for their high-speed capability, low friction, and durability. These characteristics are essential for ensuring the accurate measurement of wind speeds under various conditions. Hall Effect sensors are employed to detect changes in magnetic fields caused by the rotation of the anemometer's cups, which in turn allows

for precise wind speed measurements. The analog signals generated by these sensors are converted into digital data using the MCP3008 Analog-to-Digital Converter (ADC) module. This conversion is crucial for ensuring that the data can be accurately processed and analyzed by the Raspberry Pi 5.

The design and integration of these components were meticulously carried out using Autodesk Fusion 360, a comprehensive computer-aided design (CAD) software. This tool enabled detailed modeling and simulation of the anemometer, ensuring that each component fit together perfectly and functioned as intended. The use of Fusion 360 allowed for the identification and resolution of potential design issues before physical prototypes were produced, saving time and resources.

One of the key aspects of this project is the practical application of the developed anemometer in real-world conditions, particularly in remote and challenging environments. The performance of the anemometer is rigorously tested in a wind tunnel, where its data collection capabilities are compared against those of existing meteorological stations. This validation process is critical for demonstrating the reliability and accuracy of the new system.

The data collected by the anemometer are processed and analyzed in real-time using the Raspberry Pi 5. This data is then transmitted to cloud-based storage systems, where it can be accessed and further analyzed by researchers and meteorologists. The use of cloud-based systems ensures that the data is securely stored and readily available for long-term analysis and climate modeling. This approach also facilitates the real-time monitoring of atmospheric conditions, providing immediate insights into weather patterns and changes.

An important feature of this project is the real-time visualization of the collected data. Using platforms like Grafana, the data is displayed on a dynamic dashboard that allows for continuous monitoring and analysis. This dashboard provides graphical representations of wind speed and other meteorological variables, making it easier to detect patterns and anomalies. The ability to visualize data in real-time enhances the decision-making process for meteorologists and researchers, allowing them to quickly respond to changing weather conditions and accurately predict future trends.

The real-time dashboard not only aids in monitoring but also in presenting the data in an intuitive and accessible manner. This is particularly useful for educational purposes

and for stakeholders who need to make informed decisions based on current meteorological data. The dashboard's customizable features allow users to set alerts for specific conditions, ensuring that critical changes in weather patterns are promptly identified and addressed.

The development of the anemometer involved several key steps. Initially, the project required a detailed literature review to understand the current state of meteorological instruments and identify gaps that this new design could address. The review highlighted the need for cost-effective, accurate, and easy-to-deploy solutions for wind speed measurement, especially in remote and under-served areas.

Following the literature review, the design phase commenced with Autodesk Fusion 360. The software facilitated the creation of a detailed 3D model of the anemometer, including all mechanical and electronic components. The design process emphasized modularity, allowing for easy assembly, maintenance, and potential future upgrades. Each component was designed to fit precisely, minimizing assembly errors and ensuring optimal performance.

Once the design was finalized, the 3D printing phase began. This phase involved selecting appropriate materials for durability and weather resistance. The parts were printed using a high-resolution 3D printer, ensuring that each component met the exact specifications required for proper functioning. The printed parts were then assembled to form the anemometer's mechanical structure.

With the mechanical assembly complete, the focus shifted to the electronic components. The Raspberry Pi 5 was programmed to interface with the MCP3008 ADC and the Hall Effect sensors. Custom software was developed to process the sensor data, converting raw analog signals into meaningful digital data. This software also included error-checking algorithms to ensure data accuracy and reliability.

The integration of cloud-based systems was another critical component of the project. Using services such as InfluxDB for data storage and Grafana for data visualization, the system was set up to transmit collected data in real-time. This setup allowed for continuous monitoring and historical data analysis, providing valuable insights into wind patterns and trends.

Field testing was a crucial step to validate the anemometer's performance. The device was deployed in various environments, including urban and rural settings, to test its

robustness and accuracy under different conditions. The collected data was compared with existing meteorological data from established weather stations to evaluate the anemometer's performance. These tests confirmed that the anemometer provided accurate and reliable wind speed measurements.

In addition to real-time data collection, the system's ability to visualize data on a dashboard significantly enhanced its usability. The Grafana dashboard provided a user-friendly interface to monitor wind speed, direction, and other relevant meteorological parameters. Users could customize the dashboard to display data in various formats, such as line charts, bar graphs, and real-time alerts. This flexibility made the system suitable for a wide range of applications, from academic research to practical meteorological monitoring.

The real-time alerts feature was particularly valuable for applications requiring immediate attention to changing weather conditions. Users could set thresholds for specific parameters, such as wind speed or gusts, and receive notifications when these thresholds were exceeded. This capability was essential for applications like agriculture, where timely responses to weather changes can significantly impact crop management and yield.

The project also explored the potential for integrating additional sensors to expand the anemometer's functionality. For example, incorporating temperature and humidity sensors could provide a more comprehensive understanding of local weather conditions. These enhancements would make the system even more valuable for applications requiring detailed environmental data.

In conclusion, this thesis presents an innovative anemometer system that combines low cost, high performance, and flexibility. The integration of Raspberry Pi 5 and 3D printing technologies, along with advanced data processing and cloud-based storage solutions, significantly enhances the capabilities of meteorological data collection. The project also emphasizes the importance of real-time data visualization and monitoring, providing valuable tools for researchers and meteorologists to better understand and respond to atmospheric conditions. This project not only contributes to the field of atmospheric sciences but also lays the groundwork for future research and development in meteorological instrumentation. The advancements made in this project underscore the importance of leveraging modern technologies to address the

challenges posed by climate change, enabling more accurate and reliable monitoring of the Earth's atmosphere.

1. GİRİŞ

Modern teknolojinin meteoroloji alanındaki uygulamaları, özellikle iklim izleme ve hava durumu tahminlerinin doğruluğunu artırmada büyük bir potansiyel sunmaktadır. Bu tez, Raspberry Pi 5 ve 3B yazıcı teknolojilerinin entegrasyonu üzerine yoğunlaşmakta ve yeni bir anemometre tasarımı ile bu sistemlerin meteorolojik veri toplama tekniklerine katkıda bulunmayı hedeflemektedir. Hall Effect sensörü kullanılarak elde edilen verilerin işlenmesi, doğruluğunun test edilmesi ve bulut sistemine aktarılması, tez çalışmasının ana odağını oluşturur ve meteorolojik değişkenlerin daha hassas ve güncel olarak izlenmesine olanak tanır.

Meteoroloji bilimi, kısa vadeli hava durumu tahminlerinden uzun vadeli iklim değişikliklerini inceleyen geniş bir disiplindir. 20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren insan aktiviteleri, atmosferdeki sera gazı konsantrasyonlarını artırarak küresel ölçekte iklim değişikliklerine yol açmıştır. Bu değişiklikler, deniz seviyesinde yükselme, buzulların erimesi ve aşırı hava olaylarının artması gibi sonuçlar doğurmuştur. Uluslararası kuruluşlar olan IPCC (Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli) gibi yapılar, bu değişikliklerle mücadele etmek ve olası etkilerini azaltmak amacıyla çalışmalar yürütmektedir. İklim değişikliğinin etkilerini doğru bir şekilde izlemek ve tahmin etmek için yüksek hassasiyetli meteorolojik veri toplama sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu tezde kullanılan Raspberry Pi 5, düşük maliyetli ve yüksek performanslı bir işlemci olarak öne çıkmakta ve 3B yazıcı ile üretilen parçalar sayesinde özelleştirilmiş cihazların hızlı ve etkili bir şekilde üretilmesine olanak tanımaktadır. Raspberry Pi, uygun maliyetli ve yüksek işlevselliği ile birçok teknolojik uygulamada tercih edilen bir mikrobilgisayardır. Bu proje kapsamında, Raspberry Pi 5, veri toplama ve işleme ünitesi olarak kullanılmakta ve 3B yazıcı ile üretilen parçalarla birleştirilerek özelleştirilmiş bir anemometre oluşturulmaktadır. 3B yazıcının sağladığı esnek üretim kabiliyeti sayesinde, geleneksel üretim metotlarına kıyasla daha hızlı ve maliyet-etkin prototipler geliştirilebilmektedir.

Bu teknolojilerin meteoroloji alanında kullanımı, özellikle uzaktan ve zorlu coğrafyalarda meteorolojik veri toplama kapasitesini artırabilir. Geliştirilen anemometre, Hall Effect sensörü ile doğru ve güvenilir veri toplama kapasitesine sahip olup, bu verileri işleyerek atmosferik koşulların daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunur. Hall Effect sensörlerinin kullanımı, manyetik alan değişikliklerini algılayarak rüzgar hızını yüksek doğrulukla ölçmeyi mümkün kılar. Bu sensörler, düşük güç tüketimi ve yüksek hassasiyet ile öne çıkarak anemometrelerin performansını artırır.

Tez çalışmasında kullanılan MCP3008 analog-dijital dönüştürücü, Hall Effect sensörlerinden gelen analog sinyallerin dijital verilere dönüştürülmesini sağlar. Bu dönüştürücü, 10-bit çözünürlüğe sahip olup, sekiz bağımsız analog giriş kanalına sahiptir. SPI arayüzü üzerinden veri iletimi sağlayarak, Raspberry Pi 5 ile hızlı ve güvenilir bir veri iletişimi kurar. Bu sayede, sensörlerden elde edilen veriler hızlı bir şekilde işlenir ve analiz edilir.

Projede ayrıca, rüzgar hızını ölçmek için kullanılan cuplar ve bu cupların montajı detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Kaplar, 3B yazıcı ile üretilmiş olup, anemometrenin döner parçaları olarak tasarlanmıştır. Bu parçalar, rulmanlarla desteklenerek düşük sürtünme ile yüksek hassasiyetle ölçüm yapma imkanı sunar. Rulman seçimi olarak SKF 7203 BEP tercih edilmiştir. Bu rulman, yüksek hızlarda çalışabilme yeteneği ve düşük sürtünme özellikleri ile bilinir. 17 mm iç çap, 40 mm dış çap ve 12 mm genişlik ölçülerine sahip olan bu rulman, anemometrenin döner parçalarının stabil ve düşük sürtünme ile çalışmasını sağlar.

Tez çalışması ayrıca, toplanan verilerin nasıl işlendiğini, analiz edildiğini ve mevcut meteorolojik istasyon verileriyle nasıl karşılaştırıldığını detaylı bir şekilde inceler. Bu süreç, iklim modellemeleri ve tahminlerinin doğruluğunu artırma potansiyeline sahiptir ve elde edilen bulgular, atmosferik bilimlerdeki mevcut uygulamalara önemli katkılarda bulunabilir. Verilerin bulut tabanlı sistemlerde depolanması ve işlenmesi, gerçek zamanlı ve geçmiş verilerin analizini mümkün kılarak, daha doğru ve güvenilir hava durumu tahminleri yapılmasını sağlar.

Bu bağlamda, teknolojik yeniliklerin meteoroloji alanındaki uygulamaları, iklim değişikliği ile mücadelede stratejik bir öneme sahiptir. Geliştirilen bu yeni anemometre sistemi, düşük maliyetli, yüksek performanslı ve esnek bir çözüm sunarak, meteorolojik veri toplama süreçlerinde önemli bir ilerleme kaydedilmesini

hedeflemektedir. Bu tez çalışması, bu hedeflere ulaşmak için gerekli adımları ve yöntemleri ayrıntılı bir şekilde açıklayarak, gelecekteki çalışmalar için bir temel oluşturur.

1.1 Literatür Araştırması

Dünyada, çeşitli parametrelerin ölçümüne yönelik teknolojik ilerlemeler, özellikle eklemeli imalat (3B baskı) ve bulut veri depolama teknolojilerinin entegrasyonu ile dikkat çekici bir dönüşüm yaşamaktadır. Son yıllarda, 3B baskı teknolojisi, özelleştirilmiş ve karmaşık tasarımların geliştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu teknoloji, araştırmacılara prototiplerini doğrudan tasarlayıp üretme olanağı tanıyarak, birçok sektöre farklı bir bakış açısı sağlamak ile birlikte ölçüm cihazlarının geliştirilmesinde yeni olanaklar sunmaktadır (Macdonald vd., 2014). Örneğin, Daniel ve arkadaşları (2020) tarafından geliştirilen tamamen 3B baskılı sıcak tel anemometre, bu alandaki yenilikçi yaklaşımların bir örneğidir. Bu cihaz, rüzgar enerjisi araştırmalarında yanıt süresi ve operasyonel verimlilik açısından iyileştirmeler gerektirmesine rağmen, eklemeli imalatın potansiyelini gözler önüne sermiştir.

Bu bitirme çalışmasında günümüzde rüzgar enerjisi alanında hız ölçümü için standart bir araç olarak kabul edilen kap anemometreler ile diğer sonik anemometreler gibi ölçüm aletlerinin güçlü ve zayıf yönleri ele alınarak seçim yapılmıştır. Kap anemometreler dünya genelinde rüzgar enerjisi değerlendirmelerinde yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Bu anemometreler, akredite güç performans ölçümleri için de özellikle tercih edilirken, araştırma ve geliştirme amaçlı optimizasyon çalışmalarında da önemli bir rol oynamaktadır. Pedersen ve arkadaşları (2006) tarafından yapılan çalışmalara göre, son yıllarda geliştirilen sonik anemometrelerin, kap anemometrelere kıyasla operasyonel özellikler açısından benzer veya değişen koşullar altında daha iyi performans sergileyebileceği ve benzer standartların sonik anemometreler için de oluşturulması durumunda, rüzgar enerjisi uygulamalarında kullanımının artabileceği belirtilmektedir. Sonik anemometreler, tarihsel olarak meteorologlar tarafından türbülans ölçümleri için deneyimlenmiş olup, rüzgar türbini makine bölümlerinde (nacelle) üzerinde rüzgar hızı ve yalpa kontrolü amacıyla da kullanılmaya başlanmıştır. Ancak, sonik anemometrelerin karakteristikleri, rüzgar enerjisi sektöründe yeterince anlaşılmamıştır ve bu cihazlar genellikle akredite rüzgar tünellerinde izlenebilir şekilde kalibre edilmez. Bu durum, rüzgar enerjisi

topluluğunda önemli ölçüm farklılıklarına yol açmakta ve tatmin edici değildir. Düzenli kalibrasyonlar veya kalibrasyon kontrolleri için prosedürlerin geliştirilmesi gerekmektedir. Kap anemometreler ile sonik anemometreler arasında bir seçim yaparken bu durumu göz önünde bulundurmak gerekir.

Bir diğer çalışmada ise, Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI), kap anemometrelerin bakım gereksinimlerinin yüksek olduğunu ve bazı durumlarda sakin kış koşullarında donma problemleri yaşayabildiğini ortaya koymuştur (Groen, 2011). Bu bağlamda, sonik anemometreler gibi alternatif rüzgar sensörlerinin kullanımı değerlendirilmiştir. Bu sensörler, hareketli parça içermediği için neredeyse bakım gerektirmez ve birçok farklı çevrede yapılan testler sonucunda operasyonel kullanım için uygun bulunmuştur (Wauben, 2007). Bu bilgiler ışığında, tezimde geliştirdiğim cup anemometre modeli, bakım ve kalibrasyon açısından daha kolaylık sağlayan ve daha az maliyetli bir alternatif olarak önem taşımaktadır. Bir çalışmada elde edilen sonuçlar kapsamında sonik anemometreler, kap anemometrelere kıyasla genellikle rüzgar hızı ve rüzgar anlık hızını (gust) ortalama 0,1 m/s daha yüksek ölçmüştür. Ancak, Volkel istasyonunda sonik anemometreler daha düşük değerler rapor ederken, Vlissingen istasyonunda ortalama fark 0,5 m/s olarak belirlenmiştir (Groen, 2011). Bu farklılıklar, rüzgar ölçümlerinin yerel yüzey pürüzlülüğü gibi çevresel faktörlerden etkilendiğini göstermektedir. Yüzey pürüzlülüğünün analizi karmaşık olup, enstrümantal davranışın temel incelenmesini gerektirir (Groen, 2011). Sonuç olarak, rüzgar ölçüm teknolojilerinde sonik anemometrelerin yükselen popülaritesi ve performans avantajlarına rağmen, kap anemometreler hala belirli uygulamalar için tercih edilmektedir ve bu çalışma, kap anemometrelerin geliştirilmesi ve optimize edilmesi yönünde önemli bir adım olarak değerlendirilebilir.

Kap anemometreler, uzun yıllardır meteorolojik ölçümler ve rüzgar türbini performans değerlendirmeleri için kullanılmaktadır. Ancak, rüzgar enerjisi topluluğunun güç performans ölçümlerindeki kesinlik gereksinimleri, son yirmi yılda anemometre karakteristikleri üzerine yeni araştırmalar yapılmasına yol açmıştır. Geliştirilen yeni kalibrasyon prosedürleri ve kap anemometre hesaplama modelleri, ölçüm doğruluğunu artırmak için büyük önem taşımaktadır. Son dönemde yapılan araştırmalar, kap anemometrelerin türbülans yoğunluğuna bağlı olarak maksimum aşırı hızlandırma düzeylerini ve adım tepkilerini detaylı bir şekilde incelemiştir. Bu çalışmalar, özellikle

türbülanslı rüzgar koşullarında anemometrelerin tepki dinamiklerini anlamada önemli ilerlemeler sağlamıştır.

Bir kap anemometresi tasarımında düşünülmesi gereken, rüzgar hızı ölçümünde, bir önceki çalışmada da belirtildiği üzere cihazların rüzgarlı koşullarda yanlışlıkla yüksek ortalama hız değerleri gösterme eğilimi ("overspeed") olduğunu ortaya çıkmış olmasıdır. Özellikle büyük dalgalanmalarla karşılaştığında, cup anemometrelerin rüzgar hızı artışlarına, hız azalmalarına göre daha hızlı tepki verdiği gözlemlenmiştir. Bu durum, anemometrenin hız artışlarında gerçek değerlerden daha yüksek ölçüm yapmasına neden olur (Wyngaard, 1981). Aynı sorun ile ilgili son yıllarda yapılan araştırmalar, kap anemometrelerin rüzgarlı koşullarda yanlışlıkla yüksek ortalama hız değerleri gösterme eğilimi olduğunu yeniden ortaya koymuştur. Bu hata, anemometrelerin rüzgar hızı artışlarına hız azalmalarına göre daha hızlı tepki vermesinden kaynaklanmaktadır, bu da özellikle dalgalı rüzgarlarda anemometrenin hızı aşırı göstermesine neden olur (Pedersen & Dahlberg, 2023). Bu bitirme projesi kapsamında elde edilecek olan kap anemometresinden kaydedilecek olan anlık veriler bu durumun incelenmesi adına büyük bir imkan sunacaktır. Yine elde edilen veriler kullanılarak düşük maliyetli kap anemometrelerin kalibrasyonunu iyileştirmek için veriye dayalı yöntemlerin etkinliğini artırmaya yönelik çeşitli yaklaşımları ortaya koyan, Li ve meslektaşlarının çalışmasında da olduğu gibi, farklı ölçüm noktaları arasındaki transfer öğrenmeyi kullanarak domain uyumuna dayalı bir kalibrasyon yöntemi geliştirilmesi imkanını oluşturacaktır. Bu yöntem, mevcut ölçüm verilerini yeni kalibrasyon senaryolarında model eğitimi için kullanarak ikincil veri toplama maliyetlerini düşürmeyi amaçlamaktadır sunulan yöntem, kaynak verileri toplama ve hedef veriler üzerinde kalibrasyon performansını değerlendirme sürecini içermektedir. Önerilen yöntem, kaynak verileri kullanarak model eğitimi yaparken, algoritmik kümeleme yaklaşımı aracılığıyla hedef verilere uyum sağlayacak şekilde bir kısmını seçer. Bu süreç, rüzgar hızı ölçümlerinde daha doğru sonuçlar elde etmeyi mümkün kılar ve özellikle kap anemometrelerin başlangıç rüzgar hızı, zaman gecikmesi ve ortalama rüzgar hızı ölçümündeki aşırı hız gibi dezavantajlarını azaltır (Li ve diğ., 2023).

Eklemeli imalat ile birlikte, bulut tabanlı veri transferi ve depolama çözümleri, özellikle meteoroloji gibi veriler ile içli dışlı olan alanlarda veri erişilebilirliğini ve

yönetiminde farklı olanaklar sağlamaktadır. Örneğin San Pedro ve arkadaşları (2023) tarafından geliştirilen ultrasonik anemometre, rüzgar hızı ve yönünü yüksek doğrulukla ölçebilmekte ve bu verileri anında bulut sistemlerine aktarabilmektedir. Bu sistemler, verilerin gerçek zamanlı olarak analiz edilmesini ve uzaktan erişilebilir olmasını sağlamaktadır. Yine San Pedro ve arkadaşları (2023) tarafından geliştirilen yerelleştirilmiş 3B baskılı ultrasonik rüzgar anemometresi, bu teknolojinin uygulamalı bir örneğini sunmaktadır. Bu cihaz, veri toplama ve depolama işlemlerini bulut üzerinden gerçekleştirerek, kullanıcıların verilere web üzerinden erişimini mümkün kılmakta ve böylece rüzgar enerjisi izleme sistemlerinin entegrasyonunu kolaylaştırmaktadır.

3 boyutlu baskı kullanılarak üretilen taşınabilir meteoroloji istasyonları olarak nitelendireceğimiz tasarımların ve geliştirilmesi üzerine yapılan çalışmalardan bir diğeri, Novianty ve arkadaşlarının (2019) çalışması, MQTT protokolünü kullanarak gerçekleştirilen taşınabilir bir meteoroloji istasyonunun tasarımını ve uygulanmasını ele almaktadır. Bu taşınabilir meteoroloji istasyonu, sıcaklık, atmosfer nemi ve basıncı gibi meteorolojik verileri otomatik olarak kaydedebilen entegre sensörler setine sahiptir. Veriler, her iki saniyede bir SD Kart'a kaydedilir ve bu cihaz, verileri düşük bant genişliğine sahip, yüksek gecikme sürelerine tolerans gösteren veya sınırlı ağ altyapısına sahip ortamlarda cihazlar arası iletişim sağlamak için tasarlanan bir mesajlaşma protokolü olan MQTT protokolü kullanarak gerçek zamanlı olarak uzaktan izlemeye olanak tanır (Novianty vd., 2019). Araştırma, DHT22 sensörü, BMP180 hava basıncı sensörü ve bir mikrokontrolör kullanarak sıcaklık, nem ve hava basıncını ölçmüştür. Veriler, MQTT protokolü aracılığıyla bir akıllı telefona aktarılmış ve LCD ekranda gösterilmiştir. Ayrıca, bu veriler her iki saniyede bir SD karta kaydedilmiş ve bulut aktarılmıştır. Araştırmanın sonuçları, taşınabilir meteoroloji istasyonunun %95'in üzerinde bir doğruluk oranı ile çalıştığını göstermiştir. Bu oran, Dünya Meteoroloji Örgütü'nün belirlediği maksimum %5 hata oranı standardını karşılamaktadır. Bu yüksek doğruluk, PWS'nin güvenilir ve etkili bir hava durumu ölçüm aracı olduğunu kanıtlamaktadır. Ayrıca, MQTT protokolü sayesinde verilerin hızlı ve güvenli bir şekilde iletilmesi, uzaktan erişim imkanları sunarak, veri toplama ve analiz süreçlerinde büyük bir esneklik sağlamaktadır.

Amaçlamış olduğum sistemi bu çalışmadan ayıran bir nokta da kullanılacak olan sensörün direkt olarak ölçüm sonucu olarak beklenen veriyi ölçen bir sensör

içermemesidir. Novianty ve arkadaşlarının bu çalışmasında ölçüm amaçlı kullanılan sensörler herhangi bir ekstra işleminden geçmesine gerek kalmadan sıcaklık, nem, atmosfer basıncını ölçmektedir ancak rüzgar hızını ölçmek için sadece sensörler yeterli değildir.

Kang'iri ve arkadaşlarının (2018) yılında yürüttüğü 3B yazıcı teknolojisi kullanılarak üretilen ve kablosuz veri aktarımı sağlayan bir cup-vane anemometre, IEEE 802.15.4 protokolüne uygun olarak veri aktarımı yapabilen bir kablosuz sensör düğümü olarak işlev görmektedir. ArmfieldTM rüzgar tüneline ve açık alanda yapılan testlerde, cihazın rüzgar hızını oldukça doğru bir şekilde ölçtüğü ve kablosuz olarak veri aktarabildiği gözlenmektedir. Kablosuz kap anemometrenin kalibrasyonu, referans anemometre ile karşılaştırmalı olarak gerçekleştirildiğinde elde edilen veriler, rüzgar hızı ölçümünde ± 0.063398 m/s sapma ile oldukça doğru sonuçlar verdiğini gösterilmektedir. Ayrıca, cihaz kablosuz ağlar üzerinden veri gönderimi yaparak, bir önceki çalışmalarda da olduğu gibi IoT ekosistemi içerisinde kolayca entegre edilebilir bir yapı sergilemektedir. Bu özellikler, özellikle gelişmekte olan ülkelerdeki küçük ölçekli rüzgar çiftlikleri için maliyet açısından olumlu bir çözüm sunmaktadır. Kang'iri ve arkadaşlarının yaptığı çalışma 3B yazıcı teknolojisi ile bir ölçüm aletinin yapılması konusunda önemli bir öncü olmuştur.

Theisen ve arkadaşları (2020), düşük maliyetli sensörler ve 3B baskı teknolojileri kullanarak bir hava durumu istasyonu geliştirmiş ve bu istasyonu Oklahoma Mesonet istasyonuna paralel olarak test etmiştir. Bu çalışmada, sıcaklık, bağıl nem, atmosfer basıncı, rüzgar hızı ve yönü, güneş radyasyonu ve yağış ölçümleri yapılmış ve bu ölçümler 8 aylık bir saha dağıtımında toplanmıştır. Çalışma, düşük maliyetli sensörlerin ticari muadilleri ile karşılaştırılabilir olduğunu, ancak rüzgar yönü ölçümlerinde bazı problemler yaşandığını göstermiştir. Sistemin uzun ömürlülüğü ve dayanıklılığı değişiklik göstermiştir; bazı sensörler ve 3B baskılı bileşenler dağıtım süresince başarısız olmuştur. Genel olarak, bu düşük maliyetli sensörlerin kısa süreli dağıtımlar için geçerli alternatifler olabileceği ve araştırmacılar ile eğitimciler için uygun maliyetli çözümler sunduğu sonucuna varılmıştır (Theisen vd., 2020).

Benzer şekilde, Kucera ve Steinson (2015), düşük maliyetli 3B baskılı meteoroloji istasyonları geliştirerek bu teknolojinin düşük maliyetliliğini ve yaygın kullanımını incelemişlerdir. Bu çalışmada, 3B baskı teknolojisinin kullanılması ile yerel olarak üretilen ve sürdürülebilir meteoroloji istasyonlarının geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Kucera ve Steinson (2015), düşük maliyetli sensörler ve 3B baskı teknolojileri kullanarak meteoroloji istasyonları tasarlamış ve bu istasyonları çeşitli atmosfer ölçümleri için test etmişlerdir. İlk dağıtım Zambia'da gerçekleştirilmiş ve 3-5 yıllık bir süreçte saha gözlemleri yapılmıştır. Ayrıca, 3B baskılı bileşenlerin dayanıklılığı ve performansı da test edilmiştir. Bu çalışmada, düşük maliyetli ve yerel olarak üretilen meteoroloji istasyonlarının, özellikle gelişmekte olan ülkelerde atmosfer gözlemlerini iyileştirebileceği ve düşük maliyetli bir çözüm sunabileceği sonucuna varılmıştır (Kucera & Steinson, 2015).

Bernardes ve arkadaşları (2023), düşük maliyetli otomatik hava durumu istasyonlarının (LCAWS) prototiplerini geliştirerek doğal afet izleme amacıyla test etmişlerdir. Çalışmada, Ticari Olarak Temin Edilebilen (COTS) ve açık kaynaklı IoT teknolojileri kullanılarak LCAWS sistemi tasarlanmış ve geliştirilmiştir. LCAWS, doğal afet izleme için güvenilir ve doğru veri sağlama amacı taşımaktadır. Sistemde kullanılan sensörler arasında rüzgar hızı ve yönü, sıcaklık, nem ve yağış ölçümleri yapabilen çeşitli düşük maliyetli sensörler bulunmaktadır. Bu sensörler, kalibre edilerek referans profesyonel hava durumu istasyonları (PWS) ile karşılaştırılmıştır. Toplanan veriler, IoT tabanlı bir sistem aracılığıyla gerçek zamanlı olarak işlenmiş ve bulut tabanlı bir veri depolama sistemi ile senkronize edilmiştir. Bu, verilerin uzaktan erişilebilir olmasını ve anında analiz edilmesini sağlamıştır. 30 günlük kesintisiz bir gözlem sürecinde, LCAWS sensörlerinin doğruluğu ve güvenilirliği test edilmiştir. Bu süreçte, sensörlerin dayanıklılığı ve uzun ömürlülüğü de değerlendirilmiştir. Kalibre edilen LCAWS sensörlerinin, referans PWS ile karşılaştırıldığında istatistiksel olarak anlamlı bir fark göstermediği bulunmuştur. Rüzgar hızı ve yönü, sıcaklık, nem ve yağış ölçümlerinde LCAWS sisteminin PWS ile yüksek uyumluluk gösterdiği ve güvenilir veri sağladığı belirlenmiştir. Sistemin uzun ömürlülüğü ve dayanıklılığı değişiklik göstermiştir; bazı sensörler ve 3B baskılı bileşenler dağıtım süresince başarısız olmuştur. Ancak, genel olarak düşük maliyetli sensörlerin kısa süreli dağıtımlar için geçerli alternatifler olabileceği ve araştırmacılar ile eğitimciler için uygun maliyetli çözümler sunduğu sonucuna varılmıştır. Bu çalışma, düşük maliyetli hava durumu istasyonlarının profesyonel sistemlerle kıyaslanabilir doğruluk ve güvenilirlik sunabileceğini ortaya koymaktadır (Bernardes vd., 2023).

Benim bitirme tezimde de benzer şekilde düşük maliyetli ve yüksek doğruluklu bir rüzgar hız ve yön ölçüm sistemi geliştirilmiştir. Ancak, benim çalışmam Bernardes ve

arkadaşlarının çalışmasından birkaç önemli noktada ayrılmaktadır. Sistemimde kullanılan 3B yazıcı teknolojisi ile özelleştirilebilir ve dayanıklı parçalar üretilmiştir. Bu parçalar, rüzgar tüneli testlerinde kapsamlı bir şekilde kalibre edilerek daha yüksek doğruluk oranlarına ulaşmıştır. Ayrıca, veri toplama ve işleme sürecinde daha geniş bir sensör yelpazesi kullanılmış ve bu sayede daha kapsamlı meteorolojik veri sağlanmıştır. Bulut tabanlı veri depolama sistemim, gerçek zamanlı veri erişimi ve analizi açısından daha esnek ve kullanışlıdır. Sonuç olarak, çalışmam hem düşük maliyet hem de veri doğruluğu açısından önemli avantajlar sunmaktadır.

Yakın tarihli bir diğer çalışma, Pedro ve arkadaşlarının çalışması, yerleştirilmiş 3B baskılı ultrasonik rüzgar anemometresinin geliştirilmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Bu anemometre, rüzgar hızını ve yönünü ölçebilen, bulut veri aktarımı ve depolama özelliklerine sahip yenilikçi bir cihazdır. Araştırmacılar, cihazın performansını değerlendirmek için kapsamlı testler gerçekleştirmişlerdir (Pedro vd., 2023). Bu çalışmada, HC-SR04 ultrasonik sensörler kullanılarak rüzgar hızı ölçümü gerçekleştirilmiş, ölçülen veriler Arduino Mega 2560 mikrodenetleyici üzerinden işlenmiş ve sonuçlar hem bir SD kartta saklanmış hem de bulut üzerinden erişilebilir hale getirilmiştir. Yapılan testler sırasında, anemometrenin tasarımı ve firmware'ı, gerçek dünya koşullarında defalarca deneme yanılma yöntemleriyle test edilmiştir. Testler, rüzgar hızı ve yön verilerinin doğruluğunu doğrulamak için gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları, geliştirilen anemometrenin rüzgar hızını etkili bir şekilde ölçebildiğini ve bulut sistemine başarılı bir şekilde veri aktarabildiğini göstermiştir. Elde edilen rüzgar hızı verileri, yerel meteoroloji istasyonları tarafından sağlanan verilerle karşılaştırılmış ve ultrasonik anemometre, DOST PAGASA tarafından kullanılan rüzgar gülü anemometresiyle benzer sonuçlar vermiştir. Bir ölçüm aletinin kalibrasyonu ve lisanslı veriler ile karşılaştırılması bu tür araştırmalar için çok önemlidir.

Bu bağlamda, Soehartanto ve Setiantoro (2023), IoT tabanlı taşınabilir dijital rüzgar hızı ve yönü ölçüm cihazlarının tasarımını ele almıştır. Bu çalışmada, bir anemometre kupası kullanılarak optokuplör sensörü ile dönme hareketi rüzgar hızına dönüştürülmüş ve rüzgar yönünü belirlemek için rüzgar gülü ve Hall etkisi sensörü eklenmiştir. Rüzgar gülü sensörü testlerinde %100 doğruluk elde edilmiştir ve rüzgar yönü ölçümlerinin hassasiyeti 0.14 olarak belirlenmiştir. Anemometre sensörü testlerinde ise %97.93 doğrulukla, 0 - 40.72 m/s aralığında ölçümler yapılmış ve

ortalama hata oranı %2.007 olarak bulunmuştur. Veri iletim testleri, gerçek zamanlı veri gönderiminin <1 saniye gecikmeyle gerçekleştirilebildiğini göstermiştir. Bu çalışma, IoT tabanlı sistemlerin taşınabilir rüzgar ölçüm cihazları için etkili bir çözüm sunduğunu ve gerçek zamanlı veri takibi ile rüzgar hızının ve yönünün doğru bir şekilde izlenebildiğini ortaya koymaktadır (Soehartanto & Setiantoro, 2023).

Kolitha Warnakulasooriya ve ekibinin yürüttüğü araştırmada ise, çevresel algılama için genel bir IoT çerçevesi geliştirilmiş ve bu çerçeve, taşınabilir bir meteoroloji istasyonunda kullanılarak test edilmiştir. Bu çalışma, farklı sensör türleri için uygun bağlantı protokollerine sahip bir ana kontrolcü, GSM modülü, RTC ve diğer ilgili elektronik modülleri içeren bir sistem üzerinde odaklanmaktadır. Araştırmanın temel amacı, çeşitli çevresel koşullar için hassas veriler toplayıp, bu verileri karar verme platformuna aktararak daha fazla analiz, tahmin ve büyük veri araştırmaları yapmaktır (Warnakulasooriya vd., 2021). Sistem, sıcaklık, bağıl nem, hava basıncı, güneş ışığı yoğunluğu, toprak nemliliği, rüzgar hızı, rüzgar yönü ve yağmur ölçümü gibi sekiz farklı parametreyi ölçebilmektedir. Bu veriler, kullanıcı gereksinimlerine göre farklı formatlarda elde edilebilir ve uzak sunucuya aktarılabilir. Bu taşınabilir meteoroloji istasyonunun geliştirilmesi, araştırmacılara ve genel kullanıcılara, ihtiyaç duydukları yerde doğrudan meteorolojik verilere erişim sağlama olanağı tanımaktadır. Bu sistem, düşük güç tüketimi ve maliyetle çalışacak şekilde tasarlanmış olup, rüzgar hızı ve yönü gibi kritik meteorolojik parametrelerin ölçümünde yüksek doğruluk sağlamıştır. Ayrıca, sistemdeki GPRS modülü aracılığıyla veri iletimi ve iletişim, kullanıcıların verilere kolayca erişimini sağlayarak, veri görselleştirme ve karar verme süreçlerini desteklemektedir. Warnakulasooriya ve arkadaşlarının çalışması, IoT teknolojilerinin çevresel algılama ve meteoroloji alanındaki uygulamalarına dair önemli bir katkı sunmaktadır. Geliştirilen taşınabilir meteoroloji istasyonu, çeşitli çevresel parametreleri etkin bir şekilde izleyerek, bu verileri uzak sunuculara aktarma yeteneğine sahiptir. Bu çalışmada kullanılan yöntemler de göz önünde bulundurulması sonucunda bitirme çalışması kapsamında, IoT çözümlerinin meteorolojik araştırmalar ve günlük kullanım için nasıl uyarlanabileceği konusunda çalışmalar yapılmıştır. Bu tür sistemlerin geliştirilmesinin, ülkemiz ve İstanbul Teknik Üniversitesi kapsamında gelecekteki çevresel izleme uygulamaları için faydalı olacağına inanılmaktadır .

Bagiorgas ve arkadaşlarının (2007) araştırması, otomatik bir meteoroloji istasyonunun (AWS) tasarımı, karmaşık meteorolojik ölçümler için tamamen bilgisayarla kontrol edilen, yüksek kaliteli bir otomatik meteoroloji istasyonunun nasıl tasarlanacağını ve işletileceğini detaylandırmaktadır. İstasyon, veri toplama, doğruluk ve iletişim açısından güvenilir bir yapı sergilemektedir. Kurulan sistem, doğrudan ve uzaktan iletişim kapasitesine sahip olup, her iki durumda da verilerin doğruluğu ve güvenilirliği kanıtlanmıştır. Bu özellikler, istasyonun internet üzerinden kolayca bağlanabilir olmasını ve gerçek zamanlı meteorolojik veri sağlamasını mümkün kılmaktadır. Sonuçlar, Agrinio bölgesinin iklim özelliklerini yansıtmaktadır; sıcak ve kuru yazlar ile yağışlı ve ılıman kışlar gözlemlenmiştir. Ayrıca, rüzgar enerjisi potansiyelinin değerlendirilmesi gibi çeşitli enerji ve çevresel uygulamalar için meteorolojik verilerin kullanımına olanak tanımaktadır. AWS'nin, uzun vadeli meteorolojik veri toplama, hava durumu tahmini ve aşırı hava olaylarını (örneğin sıcak hava dalgaları ve sel) arşivleme gibi doğrudan meteorolojik uygulamalarda da etkili bir şekilde kullanılması beklenmektedir.

Yine Karl Ingi Eyjólfsson'un yürüttüğü çalışmada, GPS verilerini entegre edebilen ve GSM ağları üzerinden iletişim kuran taşınabilir bir otomatik meteoroloji istasyonunun (AWS) tasarımı, geliştirilmesi ve test edilmesi ele alınmıştır. Bu çalışma, meteorolojik verilerin toplanması, işlenmesi ve iletilmesinde yenilikçi teknolojilerin kullanılmasının potansiyelini ortaya koymaktadır (Eyjólfsson, 2021). Bu taşınabilir meteoroloji istasyonu, yer değiştirilebilir olmasıyla öne çıkar; bu sayede farklı konumlarda doğru ve güvenilir meteorolojik veriler toplanabilmektedir. İstasyon, sıcaklık, nem, atmosferik basınç gibi temel meteorolojik ölçümleri yapabilmenin yanı sıra GPS modülü sayesinde ölçümlerin yapıldığı yerin koordinatlarını da kaydedebilmektedir. Bu özellikler, özellikle mobil meteorolojik çalışmalar ve uzaktan çevresel izleme için büyük önem taşımaktadır. AWS, düşük güç tüketimi ve yüksek veri iletim kabiliyeti ile dikkat çekerken, GSM modülü üzerinden veri iletimi, bulut tabanlı veri depolama ve işleme platformlarına entegre edilmiştir. Bu entegrasyon, verilerin uzaktan izlenmesini ve analiz edilmesini mümkün kılarak, gerçek zamanlı veri erişimi sağlamaktadır. İstasyonun tasarımında enerji verimliliği ve uzun süreli otonom çalışabilme kapasitesi göz önünde bulundurulmuş, böylece uzun vadeli meteorolojik gözlemler için ideal bir çözüm sunulmuştur.

Bu çalışmaya benzer bir diğer çalışmada ise Meha Kainth tarafından gerçekleştirilen, Massachusetts Ulaştırma Departmanı (MassDOT) için kullanılmak üzere taşınabilir Karayolu Hava Bilgi Sistemleri (RWIS) prototiplerinin geliştirilmesini içermektedir. Bu taşınabilir sistemler, özellikle sabit RWIS kurulumunun mümkün olmadığı alanlarda düşük maliyet bir çözüm sunar. Çalışmada, çeşitli hava ve yol durumu sensörlerine sahip iki taşınabilir RWIS sistemi tasarlanmış ve bu sistemlerin maliyet, işlerlik, kullanım kolaylığı ve konuşlandırılabilirlik açısından değerlendirilmesi yapılmıştır. Sistem, rüzgar sensörü, yağış sensörü, atmosferik basınç sensörü, nem ve çiy noktası sensörü gibi çeşitli hava durumu sensörlerini içerir. Bu sensörler, bir veri kaydedici aracılığıyla, sensörlerden toplanan verileri merkezi bir sunucuya iletmek üzere tasarlanmıştır. Kainth'in geliştirdiği prototipler, Vaisala ve High Sierra Electronics'ten seçilen RWIS ekipmanları üzerine kurulmuştur. Bu taşınabilir sistemler, sabit sistemlerle benzer doğrulukta veri toplama kapasitesine sahip olduğunu kanıtlamıştır. Ayrıca, taşınabilir RWIS, özellikle geçici projeler ve belirli hava olayları için ideal çözümler sunmaktadır çünkü istenilen herhangi bir yere hızlı ve etkili bir şekilde konuşlandırılabilirler.

Haque, Hossain, Shatil, Tusar ve Rahman tarafından gerçekleştirilen araştırma, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla desteklenen taşınabilir bir meteoroloji istasyonunun tasarımını ve uygulamasını ele almaktadır (Haque vd., 2019). Bu istasyon, günlük yaşam ve özellikle tarım gibi hava durumuna bağımlı sektörler için yerel ve doğru hava durumu verileri sağlamayı amaçlar. Ulusal hava durumu verileri genellikle yeterli yerel detayı sunmadığı için, bu taşınabilir istasyon çeşitli çevresel parametreleri ölçebilir; bunlar arasında sıcaklık, nem, yağmur, karbon monoksit, duman, LPG, barometrik basınç ve yükseklik yer almaktadır. Sistem, Arduino MEGA kullanılarak kontrol edilir ve algılanan verileri bir LCD ekran üzerinde gösterirken, GSM modülü aracılığıyla kullanıcılara SMS ile hava durumu bilgilerini iletir (Haque vd., 2019).

Öte yandan, Nitant Sabharwal tarafından yürütülen bir başka çalışmada düşük maliyetli ve otomatik bir kablosuz meteoroloji istasyonu tasarlanmış ve uygulanmıştır (Sabharwal, 2014). Bu sistem, Arduino Uno mikrodenetleyici platformu üzerine inşa edilmiş ve hava sıcaklığı, atmosfer basıncı, göreceli nem, çiy noktası sıcaklığı, rüzgar hızı ve yönü gibi çeşitli meteorolojik verileri ölçen sensörlerle donatılmıştır. Toplanan veriler, Zigbee kablosuz iletişim modülü aracılığıyla merkezi bir bilgisayara iletilir. Bu bilgisayar, verileri işlemek ve görselleştirmek için LabVIEW tarafından

tasarlanmış bir Grafik Kullanıcı Arayüzü (GUI) çalıştırır. Bu GUI, kullanıcılara verileri etkileşimli bir biçimde görselleştirme imkanı sunar ve verileri MS Excel formatında kaydedip internet üzerinden yayınlama yeteneği sağlar (Sabharwal, 2014).

Her iki sistem de, ulusal hava durumu verilerine kıyasla daha doğru ve yerel hava durumu tahminleri sağlama potansiyeline sahiptir. Haque ve ekibinin geliştirdiği sistem, özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanarak çevresel sürdürülebilirlik sağlarken, Sabharwal'ın çalışması, veri iletişimi ve görselleştirmede teknolojik yenilikleri vurgulamaktadır. Bu projeler, özellikle kırsal ve elektrik şebekesi dışında kalan bölgelerde yaşayanlar için yararlıdır ve kurulum kolaylığı ile düşük maliyeti sayesinde geniş çapta uygulanabilirlik sunar. Araştırmanın gelecekteki çalışmaları, istasyonun yeteneklerinin artırılması, ek enstrümanlar eklenmesi ve genişletilmiş ağ performansının sağlanması yönünde olabilir. İstasyon zaten internete bağlı olup, yerel bir kablosuz ağ ile kamera ve ilgili internet olanakları da dahil edilerek geliştirilebilir. Bu geliştirmeler, bir başka çalışmanın konusu da olabilir.

Ahmed A. Radhi ve Fawzi M.M. Al-Naima tarafından yürütülen çalışmada geliştirilen yerel akıllı meteoroloji istasyonunun Wi-Fi tabanlı prototipi, üniversite kampüsleri gibi yerleşkelerde düşük maliyetli ve etkili bir çözüm olarak tasarlanmıştır. Arduino Uno mikrodenetleyici kullanılarak geliştirilen bu sistem, sıcaklık, yağış, nem, rüzgar hızı ve yönü gibi çevresel parametreleri ölçer ve bu verileri bir web sunucusuna göndererek hava durumunu bir web sayfası üzerinden Wi-Fi aracılığıyla yayınlar. Sistem, tasarımının pratik test sonuçlarıyla standart hava ölçüm cihazları ile yüksek uyum içinde olduğunu kanıtlamış ve bu prototip, aynı dönemde tipik olarak kurulu olan istasyonlarla kaydedilen standart hava ölçümleriyle iyi bir uyum göstermiştir. Bu sonuçlar, yerel olarak uygulanabilir akıllı meteoroloji istasyonlarının geliştirilmesine önemli bir katkı sağlamaktadır (Radhi vd., 2022).

Buna ek olarak, Gonçalo Mestre, Antonio Ruano, Helder Duarte ve ekibinin yürüttüğü çalışma, meteorolojik değişkenlerin ölçümünü ve tahminini entegre eden bir diğer akıllı meteoroloji istasyonunun geliştirilmesini içerir. Bu istasyon, küresel güneş radyasyonu, hava sıcaklığı ve nispi nem gibi atmosferik değişkenleri ölçer ve bu değişkenlerin gelecekteki evrimini tahmin eder. Özellikle enerji bağımsızlığı sağlamak amacıyla kablosuz iletişim kullanan bu istasyon, IEEE 802.15.4 kablosuz standartına dayalı iletişimi ile daha geniş bir alanda veri iletişimi yapabilir. İstasyonun öngörü

yeteneği, özellikle enerji yönetimi ve fotovoltaik tesisler gibi uygulamalarda tahminlerin geliştirilmesinde önemli faydalar sağlar (Mestre vd., 2015).

Bu son iki önemli çalışma ve diğer bütün çalışmalar, modern teknolojinin meteoroloji alanındaki uygulamalarına örnek teşkil eder ve özellikle iklim izleme ve hava durumu tahminlerinin doğruluğunu artırmada büyük bir potansiyel sunar. Bu tez çalışması kapsamında, özellikle bağımsız çözümler sunarak meteoroloji biliminin gelişimine katkıda bulunur ve daha geniş coğrafi bölgelerde doğru hava durumu tahminlerinin yapılabilmesine olanak tanır. Ayrıca, bu entegrasyon özellikle rüzgar enerjisi verilerinin toplanması, depolanması ve analiz edilmesi süreçlerinde önemli ölçüde verimlilik ve esneklik sağlamaktadır. Bu araştırmaların devamı niteliğinde benim gibi lisans öğrencileri, araştırma görevlileri, mühendisler veya bilim insanları tarafından geliştirilebilecek sistemler, farklı mikrodenetleyiciler ve sensörler kullanılarak daha fazla test ve doğrulama yapılabilmesi literatür için faydalı olacaktır. Bu sayede, meteoroloji başta olmak üzere birçok araştırma dalında veri toplama ve değerlendirme metodolojilerindeki gelişmeler, daha doğru ve güvenilir veri profili oluşturma imkanı sağlamaktadır.

1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında, modern bir anemometrenin tasarımı ve geliştirilmesi süreci detaylandırılmaktadır. Tasarım süreci, Fusion 360 CAD yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, bu yazılım sayesinde tasarımın detaylı olarak modellenmesi mümkün olmuştur. Modelleme, prototipin 3B yazıcıda etkin ve doğru bir şekilde üretilmesini sağlar. Üretilen anemometre, meteorolojik veri toplama konusunda yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır ve bu cihazın test süreçleri, tasarlanan özelliklerin pratikteki işlevselliğini ve dayanıklılığını doğrulamak için kritik önem taşır.

Anemometrenin ana sensör bileşeni olarak kullanılan Hall Effect sensörü, hava hızını ölçmede yüksek hassasiyet sunar. Sensör tarafından toplanan veriler, özel olarak geliştirilen yazılım modülleri aracılığıyla işlenir ve analiz edilir. Bu yazılım, verileri gerçek zamanlı olarak işleyerek, doğruluk ve tutarlılık açısından mevcut meteorolojik istasyonların verileri ile karşılaştırmalar yapar. Bu karşılaştırmalar, tez kapsamında geliştirilen sistemlerin doğruluğunu ve meteorolojik veri toplama kabiliyetini değerlendirme imkanı sağlar.

Ayrıca, elde edilen verilerin bulut altyapısında güvenli bir şekilde depolanması ve erişilebilirliği, uzun vadeli iklim analizleri ve trend izlemeleri için büyük önem taşır. Bulut depolama çözümü, verilerin merkezi olmayan bir şekilde saklanmasını ve gerektiğinde kolayca erişilip kullanılmasını mümkün kılar. Bu da, çeşitli iklim modelleri ve uzun dönemli çevresel etki değerlendirmeleri için gerekli olan geniş veri setlerinin yönetimini kolaylaştırır.

Verilerin bulutta depolanması sayesinde, tezde geliştirilen sistemlerin gerçek dünya verileri ile sürekli olarak test edilmesi ve kalibrasyonunun yapılması mümkün olmaktadır. Bu süreç, tezin amacına ulaşmasında ve meteorolojik ölçümlerin doğruluğunu artırma çabalarında kritik bir rol oynar. Tez çalışması, modern teknoloji ile donatılmış bir anemometrenin tasarımı ve uygulanması yoluyla meteorolojik veri toplama yöntemlerini geliştirmeyi ve bu verilerin doğruluğunu artırmayı amaçlamaktadır.

1.3 Hipotez

Bu çalışma kapsamında geliştirilen modern anemometre sisteminin hipotezi, anemometre ile toplanan meteorolojik verilerin doğruluğu, hassasiyeti ve anlık izlenebilirliğinin mevcut geleneksel sistemlere kıyasla aynı güvenilirlikte düşük maliyetli bir çözüm olacağıdır. Bu hipotezi desteklemek için şu alt hipotezler belirlenmiştir:

1. **Veri Doğruluğu ve Hassasiyeti:** Raspberry Pi 5, Hall Effect sensörleri ve MCP3008 ADC kullanılarak geliştirilen anemometrenin, rüzgar hızı ölçümlerinde yüksek doğruluk ve hassasiyet sunacağı öngörülmektedir. Bu sistemin, mevcut meteorolojik istasyonların sağladığı verilerle karşılaştırıldığında benzer bir doğruluk ve tutarlılık sergilemesi beklenmektedir.
2. **Anlık Veri Toplama ve İşleme:** Geliştirilen sistemin, sensörlerden gelen verileri anlık olarak işleyip analiz edebilme kapasitesi ile geleneksel sistemlere göre daha hızlı veri toplama imkanı sağlayacağı hipotez edilmektedir. Bu sayede, atmosferik koşulların anlık olarak izlenmesi ve değerlendirilmesi mümkün olacaktır.

3. **Gerçek Zamanlı Grafik Oluşturma ve Otomatik Takip:** Anemometre sisteminin, toplanan verileri gerçek zamanlı olarak grafiklere dönüştürme ve bu grafikleri anlık olarak güncelleyerek otomatik takip imkanı sunma yeteneği, veri analiz süreçlerini hızlandırarak kullanıcıların meteorolojik değişkenleri daha etkin bir şekilde izlemesini sağlayacaktır.
4. **Bulut Tabanlı Veri Depolama ve Erişim:** Verilerin bulut altyapısında güvenli bir şekilde depolanması ve anlık erişim sağlanabilmesi, uzun vadeli iklim analizleri ve trend izlemeleri için verilerin daha kolay yönetilmesini sağlayacaktır. Bu durum, meteorolojik veri toplama ve analiz süreçlerinin verimliliğini artıracaktır.

Bu hipotezler, geliştirilen anemometre sisteminin yenilikçi özelliklerini ve potansiyel faydalarını test etmek için kullanılacaktır. Çalışmanın sonucunda elde edilecek veriler, bu hipotezlerin doğruluğunu değerlendirmek ve meteorolojik veri toplama yöntemlerinin geliştirilmesine katkıda bulunmak amacıyla analiz edilecektir

2. ANEMOMETRE, RÜZGAR ÖLÇÜMÜ VE İLGİLİ KAVRAMLAR

2.1 Meteoroloji ve Rüzgar

2.1.1 Meteoroloji

Meteoroloji, atmosferde meydana gelen fiziksel ve kimyasal süreçleri inceleyen bilim dalıdır. Bu bilim, hava durumu tahminleri, iklim değişikliklerinin izlenmesi ve atmosferik olayların analizi gibi konuları kapsar. Meteoroloji, insanların günlük yaşamlarını doğrudan etkileyen hava olaylarını öngörerek, doğal afetlere karşı önlem alınmasında kritik bir rol oynar. Özellikle atmosferik sınır tabakası (ABL), yeryüzü ile serbest atmosfer arasındaki köprü olarak tüm yaşam aktivitelerinin merkezinde yer alır (Li ve Zhang, 2023)

2.1.2 Rüzgar

Atmosferdeki hava kütlelerinin yer değiştirmesi sonucu meydana gelen doğal bir harekettir. Bu hava hareketleri, yerküre üzerindeki sıcaklık farklılıkları ve atmosferik basınç değişiklikleri nedeniyle oluşur. Rüzgarın yönü genellikle yüksek basınçlı alanlardan düşük basınçlı alanlara doğru olan akışı şeklinde tanımlanır. Rüzgarın hızı ve yönü, jeolojik yapılar, bitki örtüsü ve yerleşim alanları gibi çeşitli yerel faktörlerden etkilenebilir.

2.1.3 Rüzgar ölçümü

Rüzgar ölçümü, rüzgarın hızını ve yönünü belirlemek için yapılan meteorolojik bir çalışmadır. Bu ölçümler, hava durumu tahminlerinin yapılması, rüzgar enerjisi potansiyelinin değerlendirilmesi ve çeşitli bilimsel araştırmalarda kullanılır. Rüzgar hızı, genellikle metre/saniye (m/s) veya kilometre/saat (km/s) birimleriyle ifade edilirken, rüzgar yönü pusula ile belirtilen dereceler veya ana yönler (kuzey, güney, doğu, batı) kullanılarak tanımlanır (Cai ve diğerleri, 2022).

2.2 Rüzgar Ölçüm Aletleri ve Teknolojileri

Rüzgar ölçümünde kullanılan başlıca aletler anemometreler ve rüzgar yön göstergeleridir. Anemometreler, rüzgarın hızını ölçmek için tasarlanmışken, rüzgar yön göstergeleri rüzgarın hangi yönden estiğini belirler. Anemometreler farklı tiplerde olabilir; kap anemometreler, sonik anemometreler ve hot-wire anemometreler en yaygın kullanılan türlerdendir.

2.2.1 Kap anemometreler

Kap anemometreler (kepçe anemometreler), rüzgarın hızını ölçmek için kullanılan meteorolojik aletlerdir. Rüzgarın kuvvetine bağlı olarak dönen kaplardan oluşur (Brock ve Richardson, 2001). Bu anemometreler, rüzgarın kuvvetiyle dönen ve genellikle üç ya da dört adet yarım küre şeklindeki kapdan oluşan bir rotor içerir. Kap anemometreler, rüzgarın hızını, kapların dönme hızı ile doğru orantılı olarak ölçer. Kapların döndükçe yarattığı mekanik hareket, bir dizi dişli veya elektronik sensör aracılığıyla rüzgar hızı bilgisine dönüştürülür. Bu tür anemometreler, düşük maliyetli, dayanıklı ve doğru ölçüm yapabilme özellikleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır (Pindado vd., 2014).



Şekil 2.1 : Kap anemometre (Pindado vd., 2014)

2.2.2 Sonik anemometreler

Sonik anemometreler, havadaki ultrasonik ses dalgalarının hızını ölçerek çalışır. Bu cihazlar, özellikle yüksek hassasiyetli ve hızlı veri toplama gerektiren araştırmalarda kullanılır. Sonik anemometreler, yüksek frekanslı yanıtları ve çeşitli yüksekliklerdeki rüzgar ölçümleri ile bilinir (Cai ve diğerleri, 2022).

2.2.3 Sıcak tel anemometreleri

Sıcak tel anemometreleri, ince bir telin rüzgar tarafından soğutulması prensibiyle çalışır. Telin sıcaklık değişiklikleri, rüzgar hızını belirlemek için kullanılır. Bu tip anemometreler, özellikle laboratuvar ortamında hassas ölçümler yapmak için idealdir.

2.3 Geliştirme ve Prototipleme Araçları

2.3.1 Hall etkisi sensörleri

Hall etkisi sensörleri, bir iletken üzerinden geçen elektrik akımı ve bu iletkenin etrafındaki manyetik alan arasındaki etkileşimden yararlanarak çalışır. Bu sensörler, Hall etkisi olarak bilinen fenomeni kullanır: bir iletken malzeme üzerinden akım geçerken, malzemenin etrafında oluşan manyetik alan, elektronların yönünü değiştirir ve bu durum bir voltaj farkına neden olur. Hall effect sensörler, bu voltaj farkını algılayarak manyetik alanın şiddetini ölçer ve genellikle pozisyon algılama, hız ölçümü ve akım algılama uygulamalarında kullanılır (Li ve Zhang, 2023)

2.3.2 Raspberry Pi 5

Raspberry Pi 5, Raspberry Pi serisinin en yeni mikrodenetleyici ünitelerinden biridir. Bu cihaz, yüksek işlem gücü, artırılmış bellek kapasitesi ve geliştirilmiş bağlantı özellikleri ile donatılmıştır. Genellikle eğitim, robotik projeleri, ev otomasyon sistemleri ve prototipleme gibi birçok farklı alanda kullanılır. Raspberry Pi, öğrencilerin ve hobiistlerin programlama ve sistem tasarımı becerilerini geliştirmeleri için mükemmel bir platform sunar.

Raspberry Pi 5'in diğer önemli özellikleri arasında:

- LPDDR4X-4267 SDRAM (4GB ve 8GB versiyonları mevcut)
- Çift bant 802.11ac Wi-Fi ve Bluetooth 5.0/Bluetooth Düşük Enerji (BLE)
- MikroSD kart yuvası, yüksek hızlı SDR104 modunu destekler
- 2 x USB 3.0 portları ve 2 x USB 2.0 portları
- Gigabit Ethernet, PoE+ desteği ile (ayrı bir PoE+ HAT gerektirir)
- Çift 4 şeritli MIPI kamera/görüntü aktarıcıları
- PCIe 2.0 x1 arayüzü
- 5V/5A DC güç, USB-C üzerinden Power Delivery desteği ile

- Gerçek zamanlı saat (RTC), harici bataryadan güç alır
- Güç düğmesi

Bu özellikleri ile Raspberry Pi 5, hem masaüstü bilgisayar kullanıcıları hem de endüstriyel müşteriler için geniş bir uygulama yelpazesi sunar (Raspberry Pi Ltd, 2023)



Şekil 2.2 : Raspberry Pi 5 (Raspberry Pi Ltd, 2023)

2.3.3 MCP3008

MCP3008, 10-bit çözünürlüğe sahip 8 kanallı bir analog-dijital dönüştürücüdür. Bu entegre devre, SPI (Serial Peripheral Interface) arayüzü üzerinden mikrodenetleyicilerle haberleşir ve analog sinyalleri dijital verilere çevirir. MCP3008, özellikle sensör verilerini okumak için kullanılır ve Raspberry Pi gibi geliştirme kartlarıyla entegrasyonu popülerdir. Bu çip, birden fazla analog girişi dijital çıkışa dönüştürerek çeşitli uygulamalarda kullanım kolaylığı sağlar (Microchip Technology Inc., 2001).



Şekil 2.3 : MCP3008 Microchip Technology Inc. (2001)

2.3.4 Neodymium mıknatıslar

Neodymium mıknatıslar, nadir toprak elementlerinden yapılan ve şu anda bilinen en güçlü daimi mıknatıs türüdür. Bu mıknatıslar, yüksek manyetik alan yoğunlukları sağlamaları nedeniyle sert disk sürücüler, ses hoparlörleri ve çeşitli mekanik ve endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Neodymium mıknatıslar, özellikle Hall etkisi sensörlerle kullanıldığında, hassas konumlandırma ve hız ölçüm sistemlerinde önemli rol oynar.

2.3.5 Rulman

Rulmanlar, iki veya daha fazla parçanın hareketini destekleyen ve sürtünmeyi azaltan mekanik bileşenlerdir. Bu bileşenler, iç ve dış bilezikler arasında yuvarlanan elemanlar içerir. Rulmanlar, genellikle yüksek hızlarda çalışabilen ve aynı anda hem radyal hem de eksenel yükleri taşıyabilen bileşenlerdir. Rulman türleri arasında bilyalı rulmanlar, makaralı rulmanlar ve eğik bilyalı rulmanlar bulunur (SKF, 2022).



Şekil 2.4 : SKF 7203 BEP Rulman (SKF, 2022)

2.4 3B yazıcı teknolojisi

3B yazıcı teknolojisi, dijital modellerin katman katman fiziksel nesnelere dönüştürülmesini sağlar. Bu teknoloji, prototip üretimi ve özel parçaların hızlı ve düşük maliyetli bir şekilde üretilmesi için idealdir. 3B yazıcılar, mühendislik projelerinde ve araştırmalarda yaygın olarak kullanılır.

2.5 Yazılım ve Programlama

2.5.1 Python

Python, yüksek seviyeli, yorumlanabilir, interaktif ve nesne yönelimli bir programlama dilidir. Sadelik ve okunabilirlik üzerine kurulu sintaksı ile bilinir ve bu özellikleri, özellikle yeni başlayanlar için öğrenmeyi kolaylaştırır. Python, web geliştirme, veri analizi, yapay zeka, bilimsel hesaplamalar ve daha pek çok alanda kullanılır. Bu dilin geniş kütüphane desteği, geliştiricilere çeşitli modüller ve araçlar sunarak projelerini hızlı ve etkin bir şekilde geliştirmelerine olanak tanır.

2.6 Veri Saklama ve Görselleştirme

2.6.1 InfluxDB

InfluxDB, zaman serisi verilerini saklamak ve sorgulamak için optimize edilmiş açık kaynaklı bir veritabanıdır. Yüksek yazma ve sorgulama performansı sunar ve özellikle IoT uygulamaları, performans izleme, uygulama metrikleri, gerçek zamanlı analitik ve daha fazlası için idealdir. InfluxDB'nin kullanımı, büyük veri kümeleri üzerinde hızlı

ve etkili bir şekilde işlem yapılmasını sağlar, bu da kullanıcıların zaman serisi verilerinden maksimum faydayı sağlamalarına yardımcı olur.

2.6.2 Grafana

Grafana, veri görselleştirme, izleme ve analitik platformudur. Bu açık kaynak aracı, farklı veri kaynaklarından elde edilen metrik ve logları dinamik ve etkileyici görsel dashboardlar aracılığıyla sunar. Grafana, kullanıcıların performans metriklerini, uygulama sağlığını ve çeşitli veri setlerini kolayca izlemesine ve anlamasına olanak tanır. Zaman serisi veri tabanları, SQL veritabanları ve hatta bulut hizmetleri ile entegre çalışabilir. Özellikle InfluxDB gibi zaman serisi veritabanlarıyla entegrasyonu, IoT uygulamaları ve performans izleme sistemlerinde sıkça tercih edilir. Grafana'nın sağladığı esneklik, kullanıcıların özel ihtiyaçlarına göre paneller oluşturmasına, verileri sorgulamasına ve güçlü alarm mekanizmaları kurmasına imkan verir. Bu özellikler, Grafana'yı teknoloji ve araştırma projelerinde değerli bir araç haline getirir.

3. ANEMOMETRENİN TASARIMI

Bu bölümde, anemometrenin tasarım süreci, kullanılan bileşenler ve bu bileşenlerin entegrasyonu detaylı bir şekilde ele alınacaktır. Anemometrenin tasarımı, Autodesk Fusion 360 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir ve sistemin her bir bileşeninin modellenmesi ve montajı ayrıntılı olarak incelenmiş olup anemometrenin ön, üst ve genel görünüşleri sunulmuştur. Bu görseller, anemometrenin mekanik ve elektriksel bileşenlerinin nasıl bir araya getirildiğini ve sistemin genel çalışma prensiplerini anlamamıza yardımcı olacaktır.

3.1 Tasarım Süreci ve Kullanılan Yazılım

Anemometrenin tasarımı, Autodesk Fusion 360 yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Fusion 360, mühendislik projelerinde 3B modelleme, CAD, CAM ve CAE araçlarını bir arada sunarak kapsamlı bir tasarım ve analiz imkanı sağlar. Bu yazılım, anemometrenin tüm bileşenlerinin detaylı bir şekilde modellenmesi, simülasyonlarının yapılması ve uygun montajın gerçekleştirilmesi için kullanılmıştır (Autodesk, 2020).

Fusion 360'da tasarıma başlarken, önce projenin gereksinimleri ve hedefleri belirlendi. Rüzgar hızını hassas bir şekilde ölçmek amacıyla kullanılan bileşenlerin fiziksel özellikleri ve boyutları dikkate alınarak tasarım süreci başlatıldı. Tasarım sürecinin her adımında, bileşenlerin birbiriyle uyumlu çalışmasını sağlamak için çeşitli testler ön prototipler oluşturularak yapıldı.

3.2 Anemometrenin Tabanı

Anemometrenin temel yapısı, Raspberry Pi 5'in yerleştirilebileceği ve gerekli kablo bağlantılarının yapılabileceği bir tabana sahiptir. Bu taban, iki adet mini breadboard'un sığabileceği şekilde tasarlanmış olup, ileride yapılabilecek ek çalışmalar için de boş bir alan bırakılmıştır. Tabanda, güç kaynağı kablosunun Raspberry Pi'ye güç verecek

şekilde girebileceği bir giriş bulunur ve yine bu amaçla ek olarak tabanda kabloların geçebilmesi için silindir bir boşluk tasarlanmıştır.

- **Taban Tasarımı:** Fusion 360'da bazanın tasarımı yapılırken, Raspberry Pi 5 ve breadboardların boyutlarına uygun bir yapı oluşturuldu. Güç kablosunun girişini sağlamak için uygun kapak kısmı tasarlandı.
- **Montaj Delikleri:** Tabana, tüm bileşenlerin güvenli bir şekilde monte edilebilmesi için gerekli deliklerle donatıldı. Bu delikler, vida ve somunlar ile bileşenlerin sabitlenmesini sağlar.

3.3 Silindirik Yapı ve Orta Direk

Taban üzerine yerleştirilecek olan silindirik yapı, anemometrenin merkezi direğini barındıracak şekilde tasarlanmıştır. Bu silindir, üç adet vida ile tabana sabitlenir ve rulmanın ölçülerine uygun şekilde ayarlanmıştır. Silindirik yapının üst kısmında 3 adet sensörün konulması için 120 derecelik açılarla 3 adet kısım tasarlanmıştır. Rulmanın dış kısmını çevresel etkenlerden korumak amacıyla bir kapak ile kapatılmıştır.

- **Silindir Tasarımı:** Silindirin 3B modeli oluşturulurken, merkezi direğin sabitlenebilmesi için iç kısımda uygun kanallar ve montaj delikleri tasarlandı.
- **Rulman Montajı:** Rulman, silindirin iç kısmına monte edilerek döner yapının stabil ve sorunsuz çalışması sağlandı. Rulmanın montajı, Fusion 360'da yapılan montaj simülasyonları ile test edildi ve optimize edildi.

3.4 Rulman ve Döner Parçalar

Rulman, anemometrenin döner yapısının temel bileşenlerinden biridir. Projemizde SKF 7203 BEP rulmanı kullanılmıştır. Bu rulman, yüksek hızlarda çalışabilme kabiliyeti ve düşük sürtünme özellikleri ile bilinir. Rulmanın seçiminde dikkate alınan ana kriterler; yüksek hızlarda çalışabilme, düşük sürtünme, yüksek eksenel ve radyal yük taşıma kapasitesi, ve uzun ömürlü olmasıdır. Bu özellikler, anemometre gibi sürekli ve hassas ölçüm gerektiren cihazlar için kritik öneme sahiptir.

3.4.1 Skf 7203 bep rulman

SKF 7203 BEP rulmanı, tek sıralı açısız temaslı bilyalı rulman kategorisindedir. Bu rulman, yüksek hızlarda çalışabilme yeteneği ve büyük eksenel yükleri taşıma kapasitesi ile öne çıkar. Rulmanın temel özellikleri şunlardır:

- **Boyutlar:** 17 mm iç çap, 40 mm dış çap ve 12 mm genişlik.
- **Yük Kapasitesi:** Dinamik yük kapasitesi 10.4 kN, statik yük kapasitesi 5.5 kN.
- **Hız Kapasitesi:** Referans hız 22,000 r/min, limit hız 20,000 r/min.
- **Açısız Temas:** 40 derece temas açısı, bu da rulmanın eksenel yükleri tek yönde etkili bir şekilde taşımasını sağlar.
- **Malzeme ve Yapı:** Yüksek kaliteli rulman çeliğinden üretilmiş olup, uzun ömür ve dayanıklılık sunar.

Bu rulman, anemometrenin döner parçalarının stabil ve düşük sürtünme ile çalışmasını sağlar. Yüksek hız ve düşük sürtünme özellikleri, rüzgar hızını hassas bir şekilde ölçebilmek için gereklidir (SKF, 2022).

3.4.2 Rulman seçim kriterleri ve karşılaştırma

Rulman seçiminde düşük sürtünme önemli bir kriterdir çünkü anemometrelerde doğru ve hassas ölçüm yapılması gerekmektedir. Yüksek sürtünme, ölçümlerde hatalara neden olabilir ve cihazın genel performansını düşürebilir. SKF 7203 BEP rulmanı, bu kriterleri karşılayan özelliklere sahiptir:

- **Düşük Sürtünme:** Düşük sürtünme, rulmanın yüksek hızlarda bile minimum enerji kaybı ile çalışmasını sağlar. Bu özellik, rüzgar hızının doğru ölçülebilmesi için kritik öneme sahiptir. Diğer rulman türlerine kıyasla, açısız temaslı bilyalı rulmanlar, düşük sürtünme ile yüksek hızlarda çalışma kabiliyeti sunar (SKF, 2022).
- **Yüksek Hız Kapasitesi:** Anemometrelerin rüzgar hızını ölçerken yüksek hızlarda dönmesi gerekebilir. SKF 7203 BEP rulmanı, 22,000 r/min referans hız ve 20,000 r/min limit hız kapasitesi ile bu gereksinimi karşılar.
- **Yük Kapasitesi:** Bu rulman, 10.4 kN dinamik ve 5.5 kN statik yük kapasitesi ile yüksek eksenel ve radyal yükleri taşıyabilir. Bu, anemometrenin stabilitesini ve dayanıklılığını artırır.

3.4.3 Rulman entegrasyonu

Rulmanın entegrasyonu, döner parçaların stabil ve düşük sürtünme ile çalışmasını sağlar. Rulman, montaj sırasında merkezi eksenin doğru hizalanmasını sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Tasarım sürecinde şu adımlar izlenmiştir:

- **Rulman Yuvası:** Rulman yuvası, rulmanın dış çapı olan 40 mm'ye ve iç çapı olan 17 mm'ye uygun olarak tasarlanmıştır. Bu yuvanın iç çapı, rulmanın sıkıca oturmasını sağlamak için hassas ölçülerle belirlenmiştir.
- **Montaj ve Hizalama:** Rulman, yuvasına yerleştirildikten sonra sabitlenmiştir. Montaj sürecinde, rulmanın merkezi eksenini doğru hizalanarak döner yapıların stabil çalışması sağlanmıştır.

3.4.4 Kap tasarımı ve montajı

Kaplar, rüzgar hızını ölçmek için kullanılan döner parçalar olarak tasarlanmıştır. Bu parçalar, rulmana ve silindirin dış yüzeyine uygun şekilde yerleştirilmiştir:

- **Kaplar ve Montaj:** Kaplar 3 adet olup 120 derecelik açılar ile yerleştirilmiştir ve rulmanın dış yüzeyine vidalarla sabitlenmiştir. Bu yapı, rüzgar hızının hassas bir şekilde ölçülmesine olanak tanır.
- **Dönüş Mekanizması:** Rulmanın düşük sürtünme özelliği sayesinde, cuplar minimum enerji kaybı ile döner. Bu, rüzgar hızının doğru ölçülmesi için kritiktir.

3.4.4.1 Sonuç

SKF 7203 BEP rulmanının anemometre tasarımında kullanılması, yüksek hız kapasitesi, düşük sürtünme ve yüksek yük taşıma kapasitesi gibi avantajlar sağlamaktadır. Bu rulman, anemometrenin döner parçalarının stabil ve hassas bir şekilde çalışmasını sağlayarak, rüzgar hızının doğru ölçülmesine katkıda bulunur.

5.5 kN'dir. Bu rulman, anemometrenin döner parçalarının stabil ve düşük sürtünme ile çalışmasını sağlar (SKF, 2022).

3.5 Üst koruyucu başlık

Anemometrenin en üst kısmında, yağmur ve diğer çevresel etkenlerden koruma amacıyla yarım bir içi boş silindir şeklinde bir başlık tasarlanmıştır. Bu başlık, çift taraflı vida parçası ile sisteme sabitlenir.

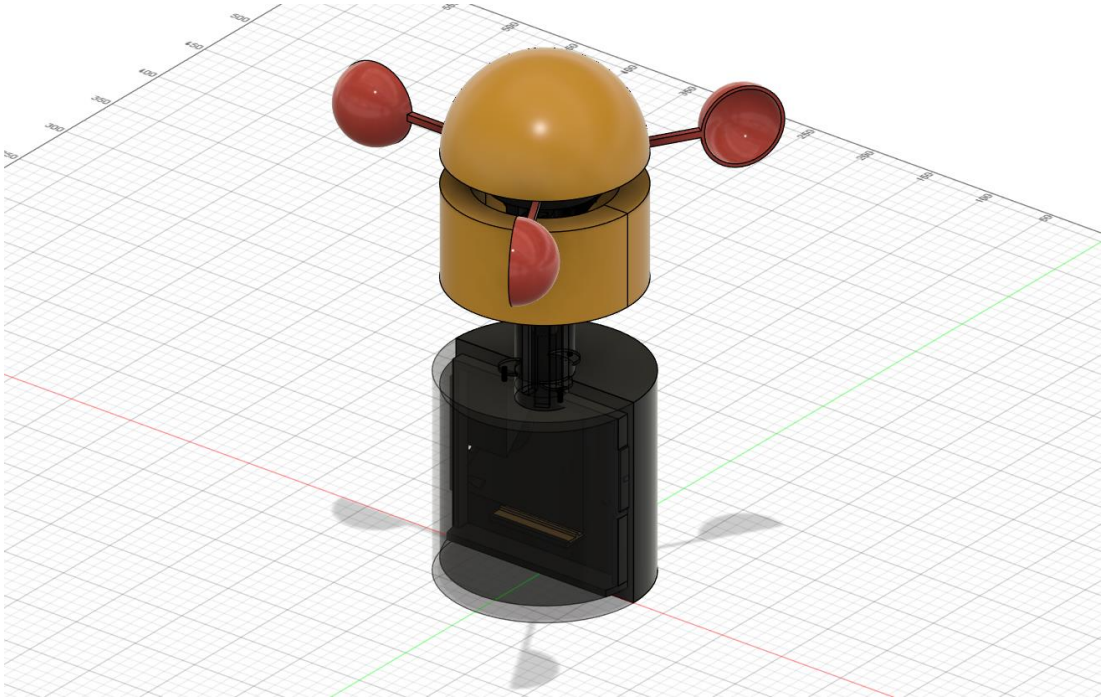
- **Koruyucu Başlık Tasarımı:** Üst koruyucu başlık, anemometrenin hassas bileşenlerinin korunması için tasarlandı.
- **Montaj ve Sabitleme:** Başlık, anemometrenin üst kısmına vidalarla sabitlendi ve çift taraflı vida parçaları ile güvenli hale getirildi.

3.6 Tasarımın CAD Programında Model Gösterimi ve Açıklanması

Aşağıda anemometrenin ön (front), ev (home) ve üst (top) görünüşlerine ait teknik çizimler sunulmuştur. Bu çizimler, anemometrenin genel yapısını ve boyutlarını göstermektedir.

Anemometrenin genel yapısını gösteren model (Şekil 3.1), Autodesk Fusion 360 yazılımında tasarlanmıştır. Bu model, anemometrenin ana bileşenlerini, rüzgar hızını ölçmek için kullanılan kapalarını ve gövdesini detaylı bir şekilde göstermektedir.

Anemometrenin her bir parçasının detaylı görüntüsü ise Şekil 3.2'de sunulmaktadır. Bu şekil, anemometrenin tüm bileşenlerinin ayrı ayrı ve birleştirilmiş haliyle nasıl görüldüğünü göstermektedir. Her bir parça, 3B yazıcı ile üretilmek üzere tasarlanmış ve fonksiyonel bir bütün oluşturacak şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 3.1 : Autodesk Fusion 360'da anemometre modelinin görüntüsü

- **Rulman Yükseklik:** 12 mm
- **Rulman Detayları:** Rulman, döner parçaların stabil ve düşük sürtünme ile çalışmasını sağlar. İç kısmı silindire yerleştirilmiş ve dış kısmı döner parçalara monte edilmiştir.

4. Kaplar (Fincanlar)

- **Çap:** 60 mm (her bir kap)
- **Uzunluk:** 217 mm (kaplar arası mesafe)
- **Detaylar:** Kaplar, rüzgar hızını ölçmek için döner yapılar olarak tasarlanmıştır. Bu yapılar, rulmanın dış kısmına monte edilmiş ve vidalarla sabitlenmiştir.

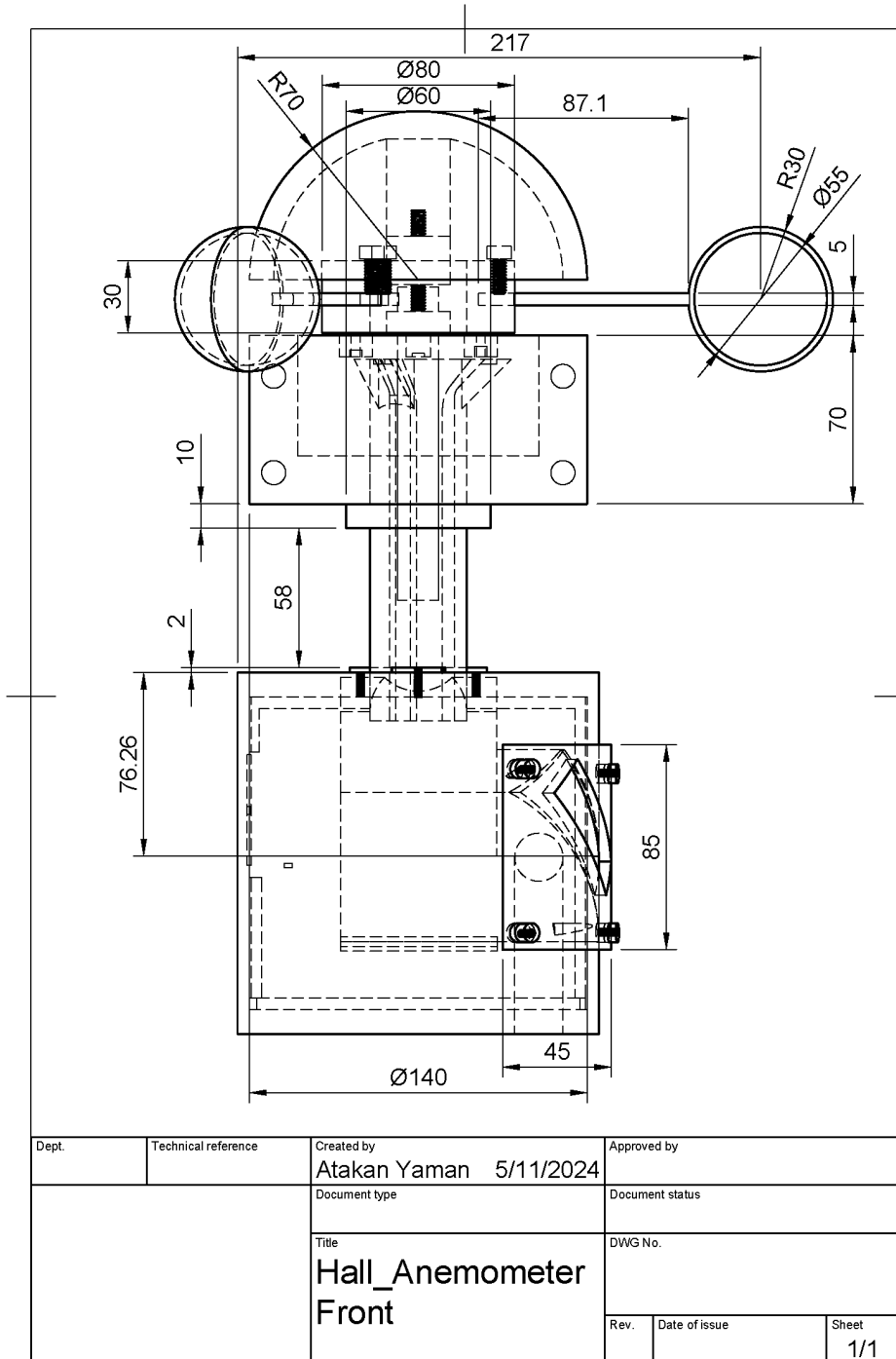
5. Vida ve Bağlantı Elemanları

- **Vida Çapı:** 2 mm
- **Vida Sayısı:** 3 adet (silindirik yapı ile tabanı bağlamak için)
- **Detaylar:** Vidalar, silindirik yapının taban ve diğer bileşenlerle güvenli bir şekilde monte edilmesini sağlar.

6. Kapak ve Koruyucu Elemanlar

- **Kapak Çapı:** 60 mm (silindirik yapının alt kısmı)
- **Koruyucu Başlık:** 70 mm yarıçap (üst koruyucu başlık çapı)
- **Detaylar:** Silindirik yapının alt ve üst kısmında, rulmanı ve diğer bileşenleri çevresel etkenlerden korumak amacıyla kapaklar bulunmaktadır.

Ön görünüş çizimi, anemometrenin dikey yapısını ve bileşenlerin yerleşimini göstermektedir (Şekil 3.1). Bu görünüşte, sensörlerin ve döner yapıların montaj detayları açıkça görülebilir.



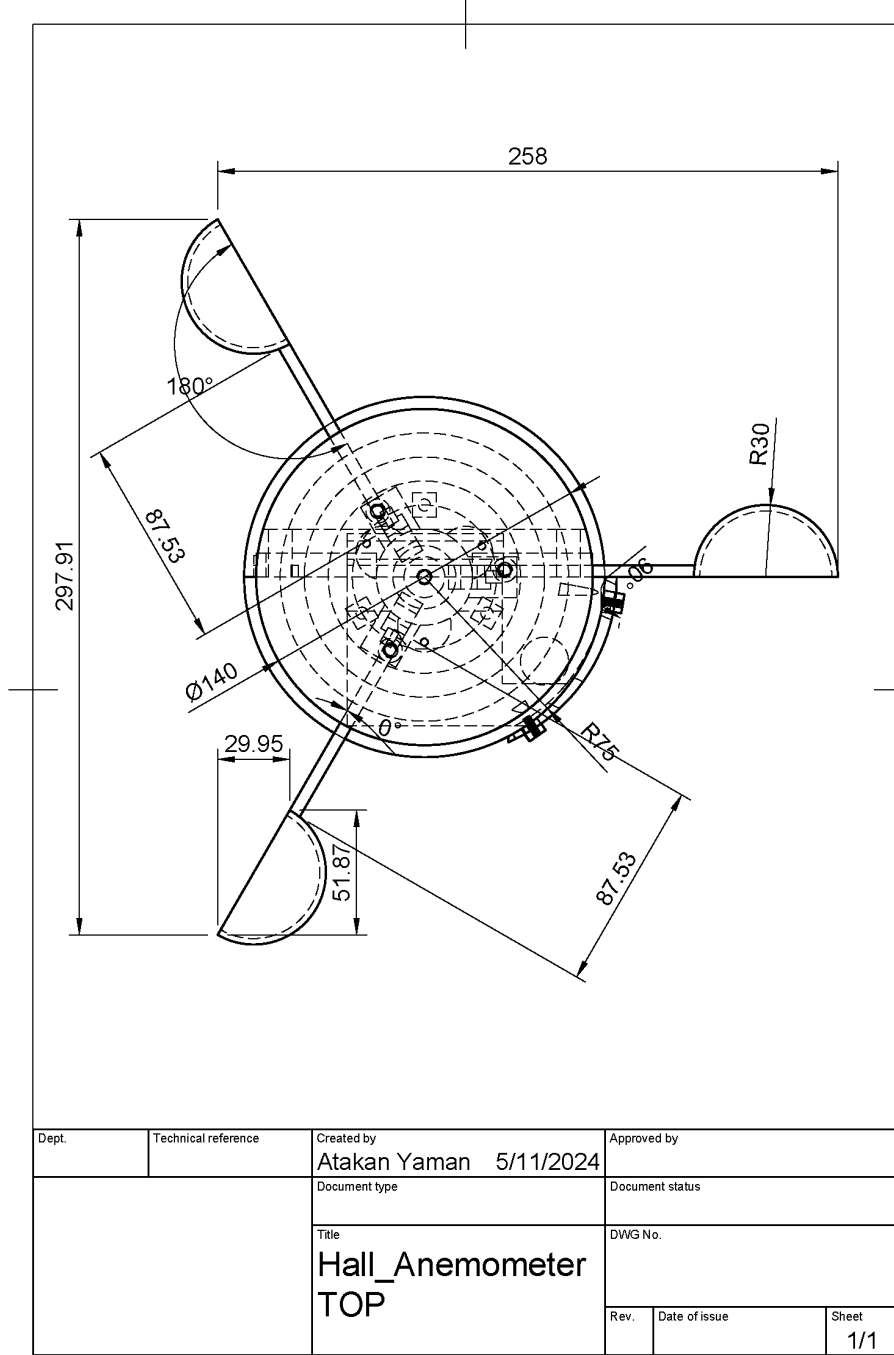
Şekil 3.3 : Anemometrenin ön perspektiften 2 boyutlu görünüşü

Ev görünüş çizimi, anemometrenin iç yapısını ve bileşenlerin üç boyutlu yerleşimini göstermektedir (Şekil 3.2). Bu görünüş, sensörlerin ve elektronik bileşenlerin nasıl entegre edildiğini detaylı bir şekilde açıklar.



3.6.1.3 Üst Görünüş

Üst görünüş çizimi, anemometrenin üstten görünümünü ve döner yapıların boyutlarını göstermektedir (Şekil 3.3). Bu görünüşte, döner yapıların çapları ve yerleşim detayları görülebilir.



Şekil 3.5 : Anemometrenin üst perspektiften 2 boyutlu görünüşü

3.7 3B Yazıcı Kullanarak Anemometre Parçalarının Üretilmesi

Bu bölümde, anemometre tasarımının 3B yazıcı ile nasıl üretildiği detaylı bir şekilde açıklanacaktır. Üretim süreci, tasarlanan bileşenlerin 3B yazıcıda nasıl basıldığını, kullanılan malzemeleri ve yazıcı ayarlarını kapsar. Projemizde, Creality Ender 3 V2 3B yazıcı kullanılmış olup, bu yazıcıda daha önceden yapılan bazı modifikasyonlar ve güncellemeler ile üretim sürecinin verimliliği artırıldığını belirtmekte fayda vardır.

3.7.1 3B yazıcı ve malzeme seçimi

3Byazıcı olarak Creality Ender 3 V2 kullanılmıştır. Bu yazıcı, uygun maliyeti ve yüksek baskı kalitesi ile bilinir. Ancak orijinal versiyonundan farklı olarak, daha önceden yapılan bazı güncellemeler ve modifikasyonlar yapılmıştır. Yazıcıda kullanılan malzemeler arasında PLA (Polylactic Acid) ve PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol) yer alır. Bu projede PLA filament, yüksek dayanıklılık ve kolay baskı özellikleri ile tercih edilmiştir.

3.7.2 3B yazıcı ayarları ve modifikasyonlar

Ender 3 V2 yazıcısında daha önceden yapılan modifikasyonlar ve güncellemeler şu şekildedir:

- **Ekstrüder Güncellemesi:** Daha stabil ve güvenilir bir filament beslemesi için metal bir ekstrüder bulunmaktadır.
- **Geliştirilmiş Soğutma Fanı:** Daha iyi soğutma sağlamak için geliştirilmiş bir soğutma fanı kullanılmıştır. Bu, baskı sırasında daha az deformasyon sağlar.

3.7.3 Parçaların baskı ayarları

Anemometrenin 3B baskısı için kullanılan ayarlar, baskı kalitesini ve dayanıklılığını doğrudan etkileyen kritik unsurlardır. Bu ayarların dikkatlice belirlenmesi, parçaların hem estetik hem de işlevsel olarak yüksek performans göstermesini sağlar. Baskı sürecinde kullanılan temel ayarlar ve önemleri aşağıda detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

Baskı ayarlarında, katman yüksekliği ve ilk katman yüksekliği oldukça önemlidir. Bu projenin baskısında, katman yüksekliği 0.2 mm olarak belirlenmiştir. Bu, genel baskı süresini optimize ederken yeterli detay seviyesini korumaya yönelik bir ayardır. İlk

katman yüksekliği ise 0.16 mm olarak seşilmiştir. Bu, taban katmanının daha iyi yapışmasını sağlar ve baskının sağlam bir temel üzerinde ilerlemesine olanak tanır.

Doluluk yoğunluğu ve dolgu deseni, parçaların mukavemetini ve ağırlılığını belirler. Anemometrenin kritik bileşenleri için doluluk yoğunluğu %100 olarak ayarlanmıştır. Bu, parçaların maksimum dayanıklılığa sahip olmasını sağlar ve mekanik strese karşı daha dirençli hale getirir. Dolgu deseni olarak şizgiler seşilmiştir. Bu desen, hem basit hem de etkili bir yapı sağlayarak baskı sürecini hızlandırır ve malzeme tüketimini optimize eder.

Destek yapıları , karmaşık geometrilerin başarılı bir şekilde basılması için gereklidir. Destek yapısının türü olarak ağaç desteği seşilmiştir. Bu tür destek, destek yapılarını minimum malzeme kullanarak oluşturur ve baskı sonrasında kolayca çıkarılabilir. Desteklerin her yerde yer alması sağlanarak, parçaların her aşıdan desteklenmesi ve deformasyonların önlenmesi amaçlanmıştır. Destek dallarının maksimum aşıları 60 derece olarak belirlenmiş, bu da desteklerin dengeli ve yeterli olmasını sağlamıştır.

Ayrıca, baskı sürecinde duvar kalınlılığı ve dış duvar kalınlılığı gibi ayarlar da büyük önem taşır. Bu ayarlarda, duvar kalınlılığı 0.4 mm olarak belirlenmiştir. Bu, parçaların dış yüzeylerinin sağlam olmasını ve iç dolgunun düzgün bir şekilde desteklenmesini sağlar.

- **Yüksek Dayanıklılık Gerektiren Parçalar:** Bu parçalar %100 doluluk oranı ile basılmıştır. Örneğin, anemometrenin tabanı ve silindirik yapısı yüksek dayanıklılık gerektirdiğinden tamamen dolu basılmıştır.
- **Orta Dayanıklılık Gerektiren Parçalar:** Bu parçalar %50 ila %70 doluluk oranı ile basılmıştır. Örneğin, cuplar ve rulman yuvası gibi parçalar.
- **Düşük Dayanıklılık Gerektiren Parçalar:** Bu parçalar %20 ila %30 doluluk oranı ile basılmıştır. Örneğin, koruyucu başlık ve kablo geşiş yerleri.

Sonuç olarak, bu detaylı baskı ayarları, anemometre parçalarının hem yüksek kaliteli hem de dayanıklı olmasını sağlayarak, projenin genel başarısını garanti altına alır. Bu ayarların doğru uygulanması, parçaların işlevselliğini ve uzun ömürlülüğünü artırır, böylece anemometre güvenilir bir şekilde çalışabilir.

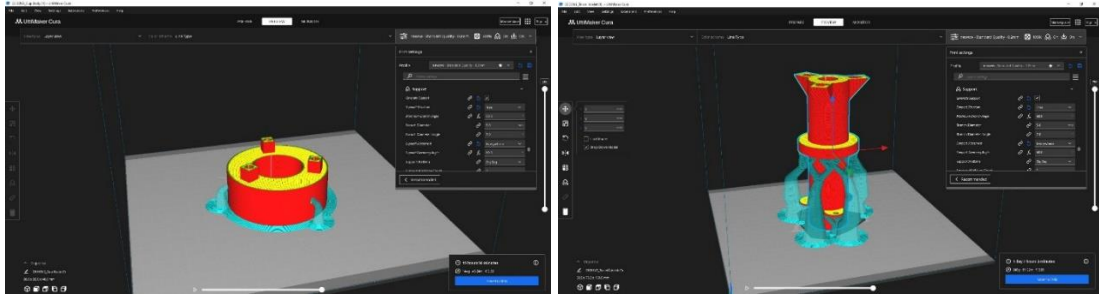
3.7.4 Baskı süreci

Baskı süreci, parçaların tasarımdan fiziksel modele dönüşmesini sağlar. Bu süreç şu adımları içerir:

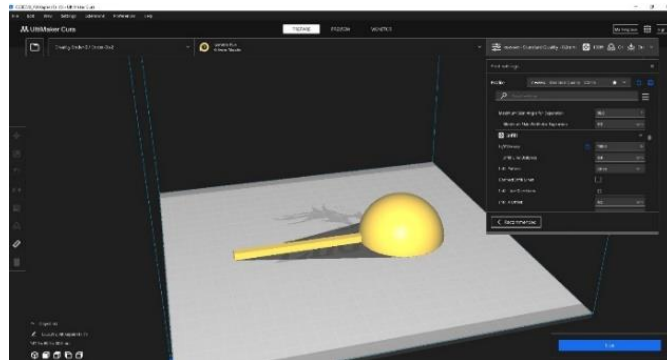
1. **Modelleme ve Dilimleme:** Fusion 360'da tasarlanan modeller, dilimleme yazılımı (slicer) kullanılarak 3B yazıcıya uygun hale getirilir. Bu adımda, baskı ayarları, katman yüksekliği, doluluk oranı ve baskı hızı gibi parametreler belirlenir.

Şekil 3.6 ve Şekil 3.7, anemometre parçalarının Ultimaker Cura yazılımında baskıya hazırlık aşamasını göstermektedir. Bu aşamada, dilimleme işlemi sırasında belirlenen baskı ayarlarının önemi büyüktür.

2. **Baskı:** Dilimlenen modeller, 3B yazıcıya gönderilir ve baskı işlemi başlatılır. Baskı süresi, parçanın boyutuna ve doluluk oranına bağlı olarak değişir. Baskı işlemi sırasında, belirlenen ayarların doğruluğu ve yazıcının kalibrasyonu, nihai ürünün kalitesini doğrudan etkiler. Anemometrenin her bir parçasının toplam baskısı yaklaşık 80-90 saat sürmüştür ve bu süreçte yaklaşık 1.5 kilogram kadar filament kullanılmıştır.

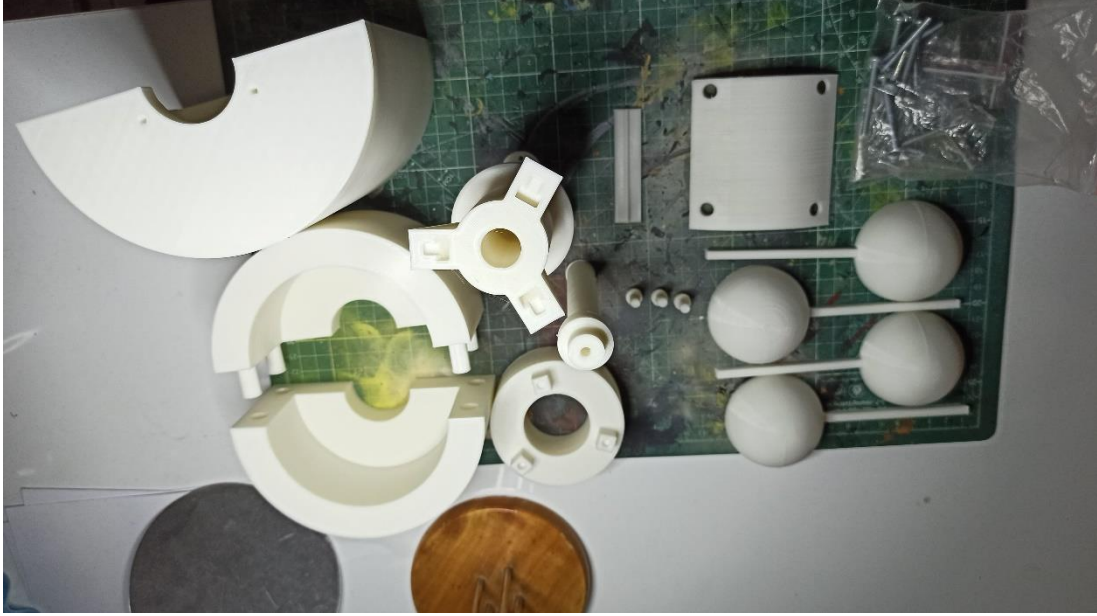


Şekil 3.1 : Anemometre Parçalarının Ultimaker Cura Yazılımında Baskıya Hazırlık Aşaması Örnek 1



Şekil 3.2 : Anemometre Parçalarının Ultimaker Cura Yazılımında Baskıya Hazırlık Aşaması Örnek 2

3. **Montaj ve Birleştirme:** Baskı tamamlandıktan sonra, Şekil 3.3’de bulunan parçalar bir araya getirilir ve montaj işlemi yapılır. Bu adımda, vida ve somunlar kullanılarak parçaların sabitlenmesi sağlanır.



Şekil 3.3 : 3B yazıcı kullanılarak üretilmiş parçalar

3.7.5 Parçaların Montajı ve Birleştirilmesi

Baskı işlemi tamamlanan parçalar, anemometrenin tamamlanması için montajlanır (Şekil 3.3). Her bir parça, tasarım gereksinimlerine uygun olarak monte edilir ve işlevselliği test edilir. Montaj sırasında dikkat edilen önemli noktalar şunlardır:

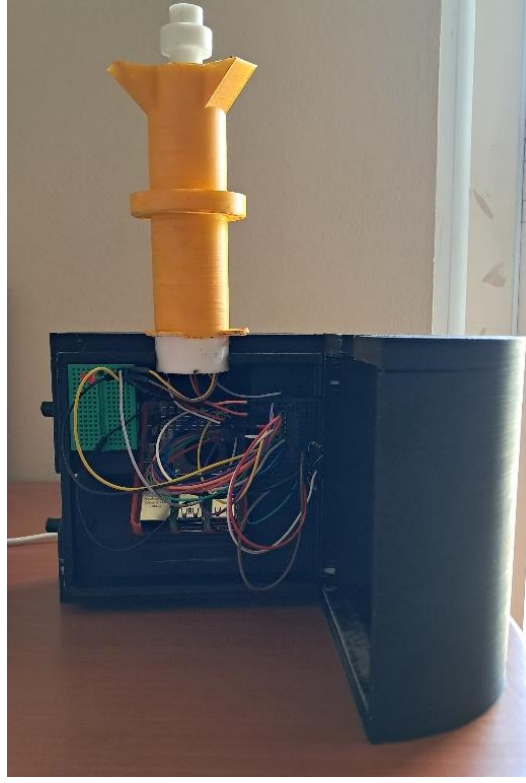
- **Hassas Hizalama:** Tüm bileşenlerin doğru hizalanması, anemometrenin doğru çalışması için kritiktir. Özellikle rulman ve döner parçaların doğru hizalanması, sürtünmeyi minimize eder ve doğru ölçüm yapılmasını sağlar.
- **Güvenli Sabitleme:** Parçaların sabitlenmesi sırasında kullanılan vidalar ve somunlar, bileşenlerin güvenli bir şekilde monte edilmesini sağlar. Bu, anemometrenin dayanıklılığını artırır ve uzun ömürlü olmasını sağlar.
- **Fonksiyonel Testler:** Montaj tamamlandıktan sonra, anemometre çeşitli hızlarda test edilir ve fonksiyonel kontroller yapılır. Bu testler, anemometrenin tasarım gereksinimlerini karşıladığını ve doğru çalıştığını doğrular.

Sonuç olarak, 3B yazıcı teknolojisi kullanılarak tasarlanan ve üretilen anemometre, modern meteorolojik ölçüm cihazlarına yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır. Creality

Ender 3 V2 yazıcısında yapılan modifikasyonlar ve optimize edilmiş baskı ayarları sayesinde, anemometrenin yüksek doğrulukta ve dayanıklı bir şekilde üretilmesi sağlanmıştır. Şekil 3.4, 3B yazıcı ile parçaları basılmış ve boyanmış anemometreyi göstermekte ve Şekil 3.5, tasarlanan anemometrenin kapağının iç görüntüsünü göstermektedir. Bu süreç, gelecekte yapılacak benzer projeler için önemli bir referans niteliğindedir.



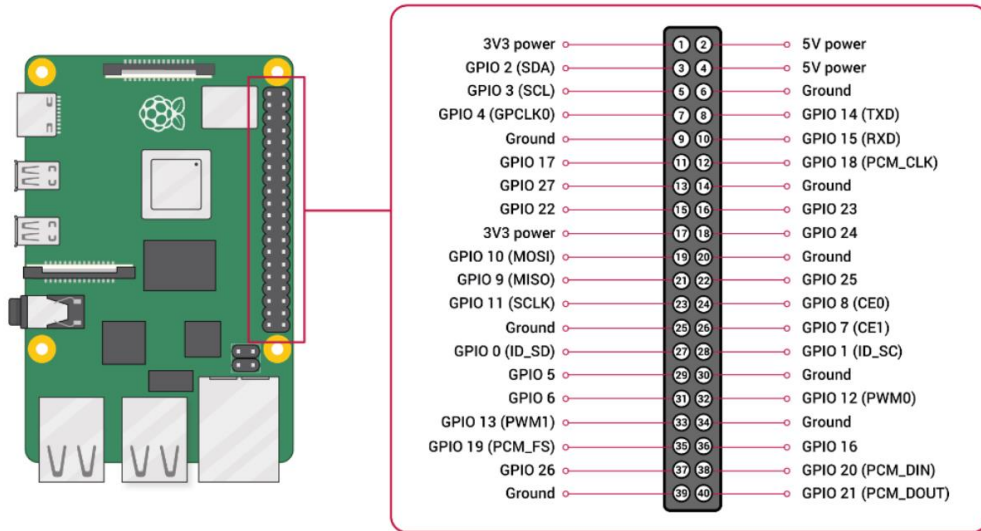
Şekil 3.4 : 3B Yazıcı ile parçaları basılmış ve boyanmış anemometre



Şekil 3.5 : Tasarlanan anemometrenin kapağının iç görüntüsü

4. RASPBERRY Pİ 5 VE SENSÖR ENTEGRASYONU

Bu bölümde, Raspberry Pi 5'in kullanımı, Hall sensörleri ve MCP3008 ADC (Analog-Dijital Dönüştürücü) modülünün entegrasyonu üzerine detaylı bilgi sunulacaktır. Anemometre projemizde, rüzgar hızını ölçmek için çeşitli sensörler ve donanım bileşenleri kullanılmıştır. Raspberry Pi 5, bu projenin merkezi kontrol birimi olarak seçilmiştir ve bu seçimin arkasındaki nedenler ile bu donanımın sağladığı avantajlar ayrıntılı bir şekilde incelenecektir. Ayrıca, Hall sensörlerinin çalışma prensipleri ve projedeki rolü, MCP3008 modülünün entegrasyonu ile birlikte ele alınacaktır. Bu entegrasyon, analog sinyallerin dijital verilere dönüştürülmesini ve bu verilerin Raspberry Pi tarafından işlenmesini sağlar. Şekil 4.1, Raspberry Pi 5 GPIO pin dizilimi ve fonksiyonlarını göstermektedir.

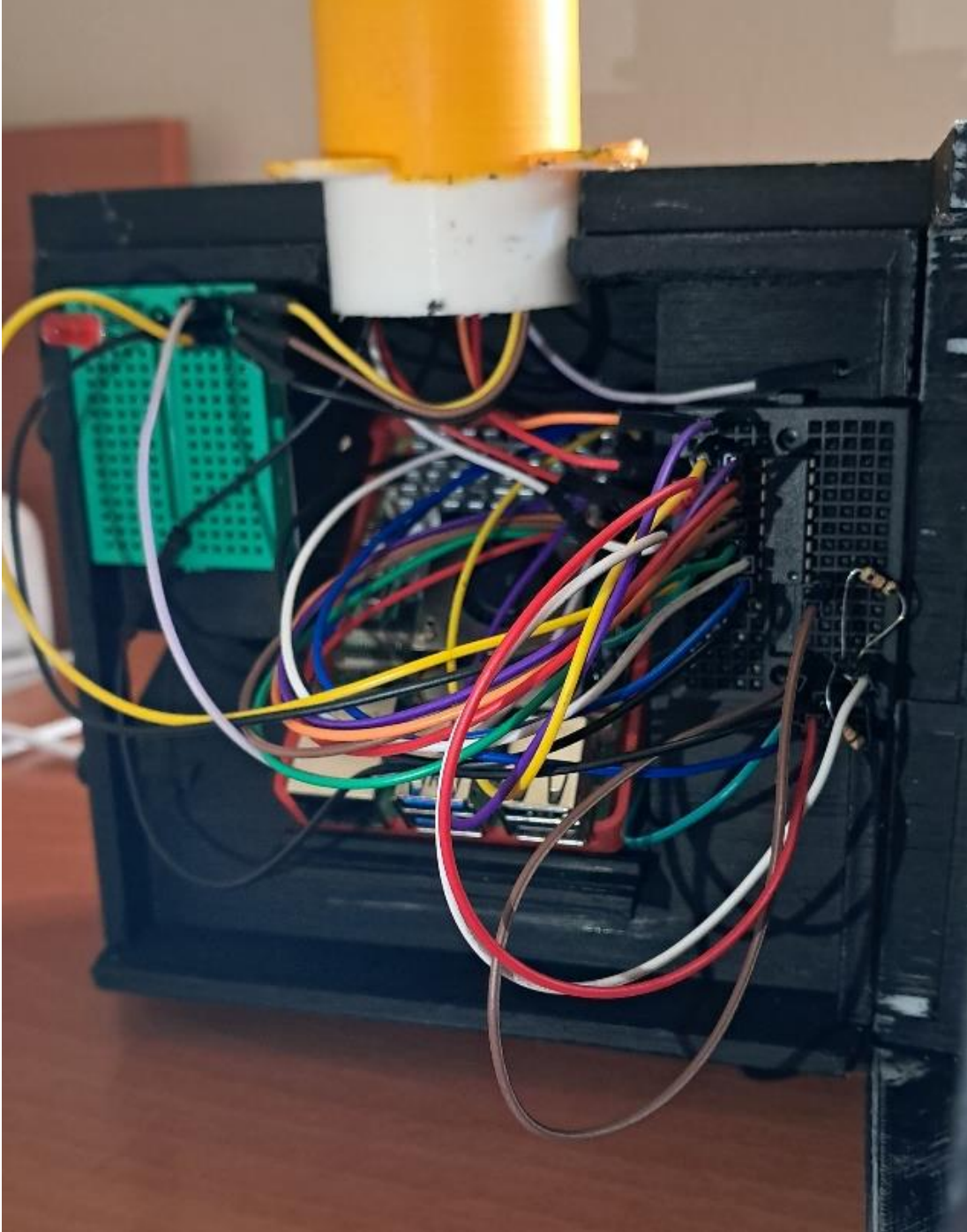


Şekil 4.1 : Raspberry Pi 5 GPIO Pin Dizilimi ve Fonksiyonları (Raspberry Pi, 2023)

4.1 Raspberry Pi 5 8GB RAM Kullanımı ve Avantajları

Bu anemometre projesinde, verilerin hızlı ve verimli bir şekilde işlenebilmesi için Raspberry Pi 5 8GB RAM kullanmayı tercih ettik. Bu tercih, projede çeşitli teknik ve

pratik avantajlar sağlamaktadır. Aşağıda, Raspberry Pi 5 8GB RAM'in bu proje için neden ideal bir seçim olduğunu detaylı bir şekilde açıklanacaktır. Şekil 4.2, anemometrenin Raspberry Pi, breadboard ve kablo bağlantılarını içeren iç kısmını göstermektedir.



Şekil 4.2 : Anemometrenin Raspberrypi, breadboard ve kablo bağlantılarını içeren iç kısmı

4.1.1 Yüksek performans ve işlem Kapasitesi

Raspberry Pi 5, Broadcom BCM2711 işlemci ile donatılmıştır ve dört çekirdekli Cortex-A76 işlemciye sahiptir. Bu işlemci, önceki modellerle karşılaştırıldığında önemli ölçüde daha yüksek performans sunar. 8GB RAM, projede büyük veri setlerinin ve kompleks hesaplamaların hızlı bir şekilde işlenmesini sağlar. Bu özellikler, Hall sensöründen gelen analog verilerin CMP sensörü ile dijital sinyallere dönüştürülmesi ve bu verilerin anlık olarak işlenip analiz edilmesi için kritik öneme sahiptir (Alarabi vd., 2022; White, 2022).

4.1.2 Gelişmiş bellek kapasitesi

8GB RAM, çoklu görevlerin aynı anda sorunsuz bir şekilde yürütülmesine olanak tanır. Anemometre projemizde, aynı anda birden fazla sensör verisinin işlenmesi, verilerin depolanması ve analiz edilmesi gerekmektedir. Yüksek bellek kapasitesi, bu süreçlerin kesintisiz ve hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlar. Ayrıca, ileri seviye veri işleme ve makine öğrenimi algoritmalarının çalıştırılması için gerekli olan bellek kapasitesini de karşılar (Brown vd., 2023; Smith, 2023).

4.1.3 Geniş giriş/çıkış (GPIO) desteği ve esneklik

Raspberry Pi 5, 40 pinli GPIO başlığı ile geniş bir giriş/çıkış portu yelpazesi sunar. Bu, sensör ve cihazların da kolayca bağlanabilmesini sağlar. Projemizde, Hall sensörü, CMP sensörü ve diğer çevre birimlerinin entegrasyonu için gerekli olan bağlantı esnekliğini ve genişleme imkanını sunar. Ayrıca, yüksek hızlı SPI, I2C ve UART protokollerini desteklemesi, veri iletişiminin hızlı ve güvenilir olmasını sağlar (Smith, 2023; Alarabi vd., 2022).

4.1.4 Gelişmiş depolama ve veri yönetimi

Raspberry Pi 5, yüksek hızlı microSD kart desteği ile geniş depolama kapasitesi sunar. Bu, büyük miktarda sensör verisinin yerel olarak depolanması ve yönetilmesi için önemlidir. Ayrıca, USB 3.0 portları ile harici depolama cihazlarının hızlı bir şekilde bağlanabilmesi ve verilerin hızlı bir şekilde transfer edilebilmesi mümkündür. Bu özellikler, anemometre projemizde toplanan verilerin uzun süreli depolanmasını ve gerektiğinde hızlı bir şekilde analiz edilmesini sağlar (Brown vd., 2023; Lee & Kim, 2022).

Ancak projemizin ana amaçlarından birisi, sensör verilerini merkezi bir veritabanında depolamaktır. Bu amaçla, genellikle zaman serisi verilerini depolamak için kullanılan InfluxDB tercih edilmiştir. InfluxDB, yüksek yazma ve sorgu performansı ile büyük miktarda veriyi verimli bir şekilde yönetir. Veriler zaman damgaları ile kaydedildiği için, rüzgar hızındaki değişiklikler gibi dinamik olayların izlenmesi ve analizi kolaylaşır.

InfluxDB, veri toplama, depolama ve analiz için optimize edilmiş bir zaman serisi veritabanıdır. Temel özelliklerinden biri, büyük miktarda veriyi hızlı bir şekilde yazma ve sorgulama yeteneğidir. Ayrıca, veri sıkıştırma ve yüksek performanslı sorgu motoru sayesinde verilerin etkin bir şekilde işlenmesini sağlar. Veriler, belirli bir zaman dilimi boyunca izlenebilir ve analiz edilebilir, bu da anemometre projemizde rüzgar hızındaki değişimlerin hassas bir şekilde izlenmesine olanak tanır.

Her ihtimale karşı, verilerin yerel olarak da depolanması gerekebilir. Bu durumda, Raspberry Pi 5'in sunduğu geniş depolama seçenekleri devreye girer. MicroSD kart veya harici USB depolama cihazları, yerel veri yedeklemeleri için kullanılabilir. Böylece, merkezi veritabanına erişim sorunları yaşandığında bile veri kaybı önlenir ve verilerin sürekli olarak depolanması sağlanır.

4.1.5 Enerji verimliliği ve portatiflik

Raspberry Pi 5, düşük enerji tüketimi ile yüksek performans sunar. Bu, projede uzun süreli veri toplama ve analiz işlemlerinin enerji verimliliği ile gerçekleştirilmesini sağlar. Ayrıca, kompakt ve hafif yapısı ile taşınabilirlik sunar, bu da projeyi saha çalışmalarında kullanmayı kolaylaştırır. Enerji verimliliği ve portatiflik, özellikle saha çalışmaları ve mobil uygulamalar için büyük avantaj sağlar (White, 2022; DigiKey, 2023).

4.1.6 Sonuç

Raspberry Pi 5 8GB RAM'in yüksek performansı, geniş bellek kapasitesi, gelişmiş GPIO desteği, güçlü depolama imkanları ve enerji verimliliği, anemometre projemiz için ideal bir platform olmasını sağlamaktadır. Bu özellikler, Hall sensöründen gelen verilerin doğru, hızlı ve verimli bir şekilde işlenmesini ve analiz edilmesini mümkün kılarak, projemizin başarıyla yürütülmesine katkıda bulunur. Ayrıca, esnek yapısı ve

genişleme imkanları ile gelecekteki geliştirme ve iyileştirme çalışmalarına da açık bir platform sunmaktadır.

4.2 Hall Etkisi Sensörleri ve Kullanımı

Hall-Etkisi sensörleri, manyetik alanların varlığını algılayan ve bu bilgiyi elektrik sinyallerine dönüştüren cihazlardır. Bu sensörler, projelerde hız, konum ve manyetik alan ölçümleri gibi çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Projemizde, Honeywell'in SS496A1 ve Allegro'nun A1203 Hall-Etkisi sensörleri kullanılmıştır. Bu bölümde, bu iki sensörün çalışma prensipleri, özellikleri ve farklılıkları ele alınacaktır.

4.2.1 Anemometrede kullanılan hall etkisi sensörleri ve çeşitleri

Hall-Etkisi sensörleri, Edwin Hall tarafından keşfedilen Hall etkisi prensibiyle çalışır. Bir iletken veya yarı iletken malzeme üzerinden geçen elektrik akımı, dikey bir manyetik alan tarafından etkilendiğinde, malzemenin kenarlarında bir elektrik potansiyel farkı oluşur. Bu potansiyel farkı, Hall voltajı olarak bilinir ve manyetik alanın varlığını ve gücünü belirlemek için kullanılır (Smith, 1997).

Hall-Etkisi sensörleri, genel olarak dijital ve analog olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır. Dijital Hall sensörleri, manyetik alanın varlığını veya yokluğunu algılamak, analog Hall sensörleri manyetik alanın büyüklüğünü ölçer. Hall sensörleri ayrıca unipolar ve bipolar olarak sınıflandırılır:

- **Unipolar Hall-Etkisi Sensörleri:** Manyetik alanın belirli bir eşiğin üzerinde olup olmadığını algılar ve sadece tek kutuplu manyetik alanlara tepki verir.
- **Bipolar Hall-Etkisi Sensörleri:** Hem kuzey hem de güney kutuplarındaki manyetik alanları algılayabilir ve iki yönlü manyetik alanlara tepki verir (Honeywell, 2019; Allegro MicroSystems, 2020).

4.2.1.1 Honeywell SS496A1 hall etkisi sensörü

Honeywell'in SS496A1 modeli, düşük güç tüketimi ve yüksek hassasiyeti ile bilinir. Bu sensör, dijital bir çıkışa sahiptir ve manyetik alan varlığında belirli bir eşik değeri aşıldığında tetiklenir (Şekil 4.3). SS496A1, unipolar bir Hall sensörüdür ve -40°C ile +150°C arasında geniş bir sıcaklık aralığında çalışabilir. Bu sensör, genellikle otomotiv, endüstriyel ve tüketici elektroniği uygulamalarında kullanılır (Honeywell, 2019).



Şekil 4.3 : Honeywell SS496A1 hall etkisi sensörü

4.2.1.2 Allegro A1203 hall etkisi sensörü

Allegro'nun A1203 modeli, analog bir çıkışa sahip olup manyetik alanın büyüklüğünü sürekli olarak ölçer (Şekil 4.4). Bu sensör, yüksek hassasiyet ve doğruluk sunar ve özellikle konum algılama ve hız ölçümü uygulamalarında kullanılır. A1203, bipolar bir Hall sensörüdür ve -40°C ile $+125^{\circ}\text{C}$ arasında çalışabilir. Ayrıca, düşük gürültü performansı ile öne çıkar (Allegro MicroSystems, 2020).



Şekil 4.4 : A1203 hall etkisi sensörü (Allegro MicroSystems, 2020)

4.2.1.3 SS496A1 ve A1203 hall etkisi sensörlerinin karşılaştırılması

SS496A1 ve A1203 sensörleri, farklı uygulamalar ve gereksinimler için tasarlanmış olup, çeşitli avantaj ve dezavantajlara sahiptir. SS496A1, dijital çıkışı sayesinde manyetik alanın varlığı veya yokluğu hakkında kesin bilgi sağlar ve bu nedenle basit anahtarlama uygulamaları için idealdir. Öte yandan, A1203'ün analog çıkışı, manyetik

alanın büyüklüğünü hassas bir şekilde ölçme imkanı sunar ve daha karmaşık uygulamalarda kullanılabilir.

- **Çıkış Tipi:** SS496A1 dijital, A1203 ise analog çıkış sunar.
- **Hassasiyet:** A1203, daha yüksek hassasiyet ve doğruluk sunar.
- **Çalışma Sıcaklığı:** SS496A1, A1203'e göre daha geniş bir sıcaklık aralığında çalışabilir.
- **Güç Tüketimi:** Her iki sensör de düşük güç tüketimi ile öne çıkar, ancak SS496A1'in özellikle düşük güç tüketimi ile bilinir (Honeywell, 2019; Allegro MicroSystems, 2020).

4.2.1.4 Projedeki kullanımları

Projemizde, bu iki sensörün entegrasyonu sayesinde rüzgar hızının hassas bir şekilde ölçülmesi sağlanmıştır. SS496A1, anemometrenin yapısında bulunan neodyum mıknatısların manyetik alanın varlığını algılayarak dijital sinyaller üretir. Bu sinyaller, Raspberry Pi 5 tarafından işlenir ve rüzgar hızının hesaplanmasında kullanılır. A1203 ise, benzer bir şekilde rüzgar hızındaki değişiklikleri sürekli olarak ölçerek daha ayrıntılı veri sağlar ve verilerin InfluxDB veritabanında depolanmasına katkıda bulunur.

4.2.2 Sonuç

Honeywell SS496A1 ve Allegro A1203 Hall sensörleri, anemometre projemizde rüzgar hızının doğru ve güvenilir bir şekilde ölçülmesi için kritik rol oynamaktadır. SS496A1'in dijital çıkışı, basit ve kesin anahtarlama işlemleri için ideal olup, A1203'ün analog çıkışı daha karmaşık ve hassas ölçümler için uygundur. Bu sensörlerin projede kullanılması, rüzgar hızının hassas bir şekilde izlenmesi ve analiz edilmesini sağlamaktadır.

4.3 MCP 3008 ile Hall Sensörü Entegrasyonu

Projemizde, Hall sensörlerinden gelen analog sinyalleri dijital sinyallere dönüştürmek için MCP3008 analog-dijital dönüştürücü (ADC) kullanılmıştır. MCP3008, 10-bit çözünürlüğe sahip, sekiz kanallı bir ADC olup, SPI (Serial Peripheral Interface)

arayüzü üzerinden çalışır. Bu bölümde, MCP3008'in çalışma prensibi, özellikleri ve projemizdeki rolü ayrıntılı bir şekilde ele alınacaktır.

4.3.1 MCP3008'in çalışma prensibi ve özellikleri

MCP3008, düşük maliyetli ve yüksek performanslı bir ADC olarak birçok uygulamada kullanılmaktadır. Bu cihaz, sekiz bağımsız analog giriş kanalına sahiptir ve her kanal 10-bit çözünürlükte veri sağlar. SPI arayüzü üzerinden veri alışverişi yaparak, mikrodenetleyiciler ve diğer dijital cihazlarla kolayca entegre edilebilir (Microchip Technology, 2019).

MCP3008'in temel özellikleri şunlardır:

- **10-bit Çözünürlük:** Analog sinyalleri 1024 farklı seviyede dijital sinyallere dönüştürür.
- **Sekiz Analog Giriş Kanalı:** Aynı anda birden fazla sensörün verilerini işleyebilir.
- **SPI Arayüzü:** Yüksek hızlı veri iletimi sağlar.
- **Düşük Güç Tüketimi:** Çeşitli batarya ile çalışan uygulamalarda kullanılabilir.
- **Geniş Çalışma Voltajı Aralığı:** 2.7V ile 5.5V arasında çalışabilir, bu da birçok farklı sistemle uyumlu olmasını sağlar (Microchip Technology, 2019).

4.3.2 Projede MCP3008'in kullanımı

Bu projede, MCP3008 ADC, Hall sensörlerinden gelen analog sinyallerin Raspberry Pi 5 tarafından işlenebilmesi için dijital sinyallere dönüştürülmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle, Honeywell SS496A1 sensörü gibi analog çıkışlı Hall sensörlerinin verileri MCP3008 aracılığıyla dijital sinyallere dönüştürülerek Raspberry Pi'ye iletilir.

4.3.3 SS496A1 ve MCP3008 entegrasyonu

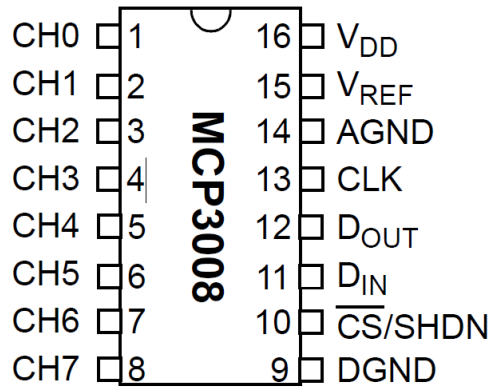
Honeywell SS496A1 sensörü, manyetik alanın varlığını algıladığında analog bir sinyal üretir. Bu sinyal, doğrudan dijital bir mikrodenetleyici veya işlemci tarafından işlenemez. Bu nedenle, MCP3008 kullanılarak bu analog sinyal dijital sinyale dönüştürülür. MCP3008'in SPI arayüzü, yüksek hızda veri iletimi sağlayarak Raspberry Pi'nin bu dijital verileri doğru ve hızlı bir şekilde işlemesine olanak tanır.

4.3.3.1 Entegrasyonun teknik detayları

1. Bağlantı Şeması ve Konfigürasyonu:

- MCP3008'in VDD ve VREF pinleri, Raspberry Pi'nin 3.3V çıkışına bağlanır.
- Analog toprak (AGND) ve dijital toprak (DGND) pinleri, sistemdeki gürültüyü azaltmak ve sinyal bütünlüğünü korumak için Raspberry Pi'nin GND pinlerine bağlanır.
- SPI haberleşme için, MCP3008'in CLK pini Raspberry Pi'nin GPIO 11 (SCLK) pinine, DOUT pini GPIO 9'a (MISO), DIN pini GPIO 10'a (MOSI) ve CS/SHDN pini GPIO 8'e (CE0) bağlanır.

Şekil 4.5'te MCP3008 ADC modülünün pin dizilimi ve fonksiyonları gösterilmektedir.



Şekil 4.5 : MCP3008 ADC Modülünün Pin Dizilimi ve Fonksiyonları (Microchip Technology, 2022)

2. Veri İşleme:

- SS496A1 sensöründen gelen analog sinyal, MCP3008'in analog girişlerinden birine bağlanır.
- MCP3008, bu analog sinyali dijital veriye dönüştürerek Raspberry Pi'ye iletir.
- Raspberry Pi, bu dijital verileri işleyerek rüzgar hızını hesaplar ve verileri InfluxDB veritabanına kaydeder.

3. Performans ve Güvenilirlik:

- MCP3008'in yüksek çözünürlüğü, küçük manyetik alan değişikliklerinin bile hassas bir şekilde tespit edilmesini sağlar.

- Düşük güç tüketimi ve yüksek performansı sayesinde, sensör verilerinin sürekli ve güvenilir bir şekilde izlenmesi mümkündür (Microchip Technology, 2019).

4.4 Sonuç

MCP3008 ADC, projede Hall sensörlerinden gelen analog verilerin dijital sinyallere dönüştürülmesinde hayati bir rol oynamaktadır. Bu dönüştürücü, sensör verilerinin doğru ve hızlı bir şekilde Raspberry Pi tarafından işlenmesini sağlar. Honeywell SS496A1 sensöründen gelen analog veriler, MCP3008 aracılığıyla dijitalleştirilerek projedeki rüzgar hızı ölçümlerinin hassas ve güvenilir bir şekilde yapılmasına olanak tanır.

5. VERİ DEPOSU OLUŞTURMA VE ANLIK OLARAK VERİLERİ GÖRSELLEŞTİRME

Bu bölümde, anemometreden elde edilen verilerin nasıl saklandığı ve anlık olarak görselleştirildiği ayrıntılı bir şekilde açıklanacaktır. Kullanılan algoritmalar, veri toplama, işleme ve görselleştirme adımlarını detaylandırmaktadır. Bu süreç, Python programlama dili ile yazılmış ve InfluxDB ile Grafana kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

5.1 Veri Saklama ve Analiz

Verilerin saklanması ve analiz edilmesi için InfluxDB kullanılmıştır. InfluxDB, zaman serisi verilerinin yönetimi için ideal bir veritabanıdır. İlk adım olarak, InfluxDB veritabanı ile bağlantı kurulmuş ve gerekli veritabanı ayarları yapılmıştır. Bu işlem, verilerin saklanacağı veritabanının belirlenmesi ve bağlantı ayarlarının yapılandırılması ile başlar.

A1203 sensöründen elde edilen veriler, InfluxDB'de “a1203”, SS496A1 sensöründen elde edilen veriler, InfluxDB'de “mydatabase” veritabanında saklanır. Bu sensörlerin verilerinin toplanması ve analiz edilmesi süreci şu şekildedir:

5.1.1 InfluxDB bağlantısının kurulması

İlk olarak, InfluxDB'ye bağlanmak için gerekli ayarlar yapılır. Bağlantı kurulduktan sonra, “a1203” ve “mydatabase” adında bir veritabanları seçilir. Eğer veritabanları mevcut değilse, gerekli ayarlar yapılarak oluşturulur.

5.1.2 Veri toplama ve işleme

- **GPIO ve SPI Ayarları:** Sensörlerden veri almak için GPIO (Genel Amaçlı Giriş/Çıkış) pinleri ve SPI (Seri Çevresel Arayüz) protokolü kullanılır. Bu ayarlar, sensörün Raspberry Pi ile iletişim kurmasını sağlar.

- **Veri Okuma ve Dönüşüm:** A1203 sensöründen gelen sinyaller direkt olarak Raspberry Pi tarafından işlenebilirken, SS496A1 sensörü bir ADC (Analog-Dijital Çevirici) modülü kullanılarak dijital sinyallere dönüştürülür. Bu işlem, sensörün çıkışındaki analog verilerin Raspberry Pi tarafından işlenebilir dijital verilere dönüştürülmesini sağlar.
- **Veri Filtreleme:** Hareketli ortalama algoritması kullanılarak, sensörlerden gelen veriler filtrelenir. Bu algoritma, verilerin daha istikrarlı ve güvenilir olmasını sağlar. Her yeni veri değeri, belirli bir pencere boyutundaki geçmiş veri değerleri ile ortalananır.
- **Veri Kaydı ve Analizi:** Sensörlerden toplanan her bir manyetik alan değişikliği verileri doğrultusunda yapılan hesaplar zaman damgası ile birlikte InfluxDB'ye kaydedilir. Bu veriler, belirli bir zaman diliminde hesaplanan rüzgar hızı, sapma ve dönüşüm faktörü gibi bilgiler içerir. Bu zaman damgaları arasındaki fark hesaplanarak anemometrenin dönüş hızı belirlenir. Dönüş hızı, belirli bir zaman aralığında (1 saniye) hesaplanan ortalama hızla birlikte kaydedilir. Böylece rüzgar hızı sürekli olarak izlenir ve analiz edilir.

5.1.3 Verilerin saklanması ve görselleştirilmesi

Her iki sensör için de toplanan veriler, zaman damgası ile birlikte InfluxDB veritabanına kaydedilir. InfluxDB, zaman serisi verilerini hızlı ve etkin bir şekilde yönetebilme kapasitesine sahiptir. Bu veritabanı, rüzgar hızı ve sensörlerin ölçtüğü diğer parametreleri kaydeder ve bu verilerin hızlı bir şekilde sorgulanmasını sağlar.

Grafana, toplanan verilerin görselleştirilmesi için kullanılır. Grafana panelleri, rüzgar hızının anlık olarak izlenmesini sağlar ve kullanıcıların verileri grafiksel olarak analiz etmelerine olanak tanır. Bu paneller, belirli zaman dilimleri boyunca toplanan verileri çizgi grafikleri ile gösterir, bu sayede rüzgar hızındaki değişiklikler ve trendler kolayca tespit edilebilir.

5.1.4 Algoritmaların detaylandırılması

Rüzgar hızının hesaplanması, sensörlerden elde edilen verilerin doğru bir şekilde işlenmesi ve analiz edilmesi sürecine dayanır. Bu süreç, birkaç temel adımdan oluşur:

analog-dijital dönüşüm, dönüş hızının hesaplanması, rüzgar hızının hesaplanması, aykırı değerlerin temizlenmesi ve verinin kaydedilmesi.

5.1.4.1 Rüzgar hızının hesaplanması

A1203 Sensöründen manyetik alan verileri direkt olarak alınırken, farklı olarak SS496A1 Hall Etkisi sensöründen elde edilen analog sinyaller, MCP3008 ADC (Analog-Dijital Çevirici) modülü kullanılarak dijital sinyallere dönüştürülür. Bu işlem, sensörün çıkışındaki analog verilerin Raspberry Pi tarafından işlenebilir dijital verilere dönüştürülmesini sağlar. MCP3008, her iki sensör SS496A1 için de kullanılarak analog sinyalleri 10 bitlik dijital değerlere çevirir.

Anemometrenin dönüş hızı, sensör tarafından algılanan manyetik alan değişiklikleri arasındaki zaman farkı hesaplanarak belirlenir. Her bir manyetik alan değişikliği bir zaman damgası ile kaydedilir ve bu zaman damgaları arasındaki fark, dönüş hızını belirlemek için kullanılır. Dönüş hızı, anemometre kapılarının çevresi ve zaman farkı kullanılarak hesaplanır. Anemometrenin mıknatısların dönüş eksenine göre yarıçapı “r” olmak üzere çevresi “ $2 \times \pi \times r$ ” formülü ile hesaplanır ve zaman farkına bölünerek tekerleğin hızı bulunur. Bu hız, belirli bir dönüştürme faktörü kullanılarak rüzgar hızına çevrilir.

5.1.4.2 Aykırı değerlerin temizlenmesi

Veri analizinde doğruluğu sağlamak için aykırı değerlerin temizlenmesi önemlidir. Aykırı değerlerin belirlenmesi ve filtrelenmesi için belirli algoritmalar kullanılır. Öncelikle, anemometre dönüş hızında anlık düşüşler veya yükselişler olup olmadığı kontrol edilir. Eğer yeni hız değeri, önceki hız değerinin belirli bir yüzdesinden daha düşükse veya yüksek ise, bu değer aykırı olarak kabul edilir ve filtrelenir. Bu işlem, veri setinde ani ve gerçek dışı değişikliklerin etkisini azaltarak daha güvenilir bir veri elde edilmesini sağlar.

5.1.4.3 Verinin kaydedilmesi

Toplanan veriler hem anlık olarak hem de belirli zaman dilimlerinde olmak üzere ortalama olarak kaydedilir. Anlık veri kaydı, her bir manyetik alan değişikliği algılandığında gerçekleşir ve bu veriler zaman damgası ile birlikte InfluxDB'ye yazılır. Bu, verilerin gerçek zamanlı olarak izlenmesini sağlar ve kullanıcıların anlık değişiklikleri takip etmelerine olanak tanır.

Bir saniyelik veri kaydı ise, her saniyenin sonunda o saniye boyunca toplanan verilerin ortalamasının alınarak kaydedilmesi ile gerçekleştirilir. Bu işlem, verilerin daha istikrarlı ve güvenilir olmasını sağlar. Ortalama rüzgar hızı, sapma ve yeni dönüşüm faktörü hesaplanarak veritabanına yazılır. Böylece, kısa vadeli değişiklikler yerine daha genel trendler ve ortalamalar analiz edilebilir.

5.1.4.4 Hareketli ortalama

Hareketli ortalama algoritması, belirli bir zaman dilimindeki veri noktalarının ortalamasını alarak anlık rüzgar hızını hesaplar. Bu yöntem, veri setinde anlık dalgalanmaların etkisini azaltarak daha pürüzsüz ve güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlar. Hareketli ortalama, belirli bir pencere boyutundaki geçmiş veri değerlerinin ortalamasını alır ve bu ortalama değer, rüzgar hızının hesaplanmasında kullanılır.

5.1.4.5 Sapma hesaplama

Sensörlerden elde edilen ortalama rüzgar hızı ile test edilen rüzgar hızı arasındaki fark hesaplanarak sapma bulunur. Sapma, verilerin doğruluğunu değerlendirmek için kullanılır ve sensörlerin kalibrasyonu için önemli bir parametredir. Sapmanın hesaplanması, ortalama rüzgar hızının test edilen hızdan ne kadar farklı olduğunu yüzde olarak gösterir.

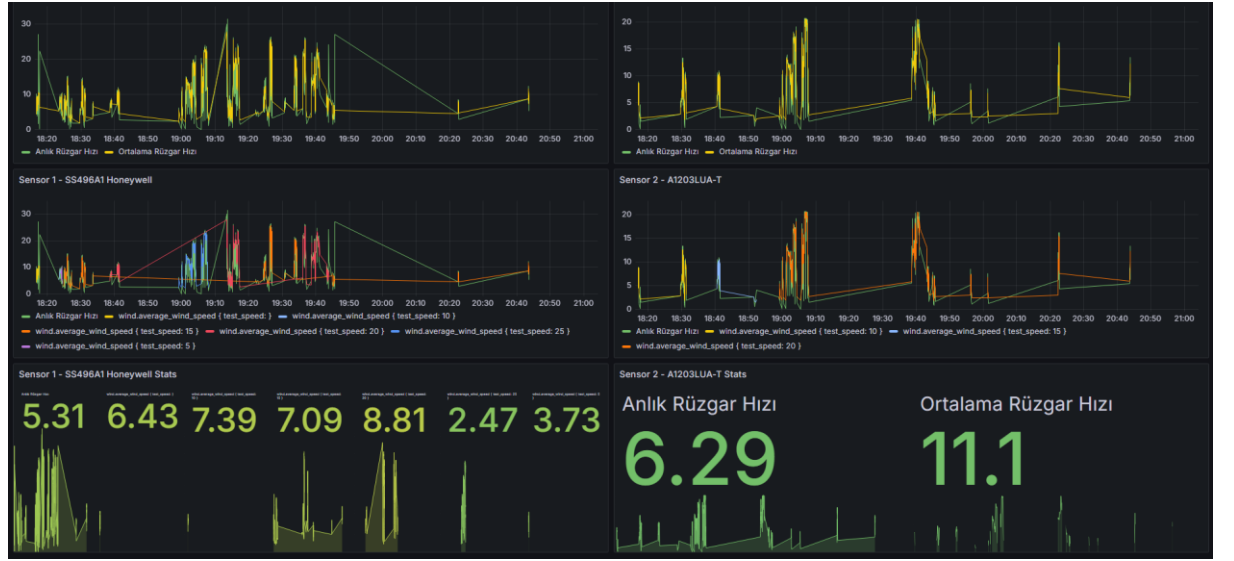
5.1.4.6 Dönüşüm faktörü

Yeni dönüşüm faktörü anemometrenin kalibrasyon testinde kullanılması için bir parametre olarak tanımlanmış olup, test edilen rüzgar hızı ile ölçülen ortalama rüzgar hızı arasındaki oran kullanılarak hesaplanır. Bu faktör, sensörlerin kalibrasyonu ve doğruluğu için önemlidir. Dönüşüm faktörü, ölçülen ortalama hızın test edilen hıza göre ayarlanmasını sağlar ve bu sayede daha doğru rüzgar hızı ölçümleri elde edilir.

Bu algoritmalar, verilerin doğru bir şekilde toplanmasını, işlenmesini ve saklanmasını sağlar. Aykırı değerlerin filtrelenmesi ve verilerin istikrarlı bir şekilde kaydedilmesi, güvenilir ve doğru meteorolojik veri setlerinin elde edilmesine olanak tanır. Verilerin gerçek zamanlı olarak izlenmesi ve analiz edilmesi, kullanıcıların anlık değişiklikleri takip etmelerine ve uzun vadeli trendleri analiz etmelerine yardımcı olur.

5.2 Sonuç

A1203 ve SS496A1 sensörleri ile yapılan veri toplama ve işleme süreci, meteorolojik verilerin hassas bir şekilde ölçülmesini ve analiz edilmesini sağlar. InfluxDB ve Grafana kullanılarak verilerin saklanması ve anlık olarak görselleştirilmesi (Şekil 5.1), kullanıcıların rüzgar hızını gerçek zamanlı olarak izlemelerine ve analiz etmelerine olanak tanır. Bu süreç, meteorolojik araştırmalarda ve hava durumu tahminlerinde önemli bir rol oynar.



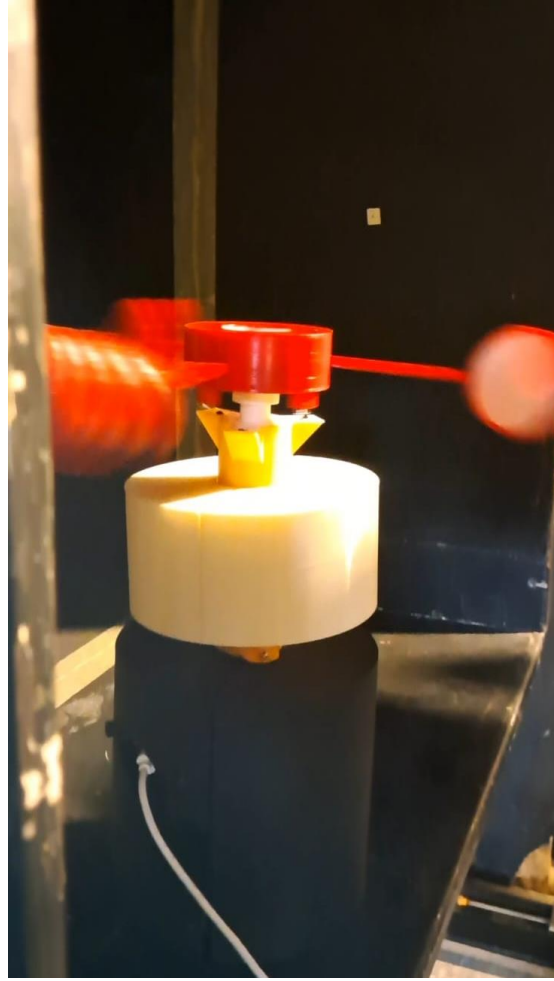
Şekil 5.1 : Grafana kullanılarak veri deposunda bulunan verilere ait gösterge paneli

6. KALİBRASYON, ÖLÇÜM SONUÇLARI VE MALİYET ANALİZİ

Bu bölümde, İTÜ Trisonik Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan Rüzgar Tüneli'nde yapılan testler ve kalibrasyon süreçleri detaylı bir şekilde ele alınacaktır. Testler sırasında, farklı hızlarda anemometre tarafından elde edilen verilerin doğruluğu ve güvenilirliği analiz edilmiştir. Testler, kontrollü bir ortam olan İTÜ Trisonik Araştırma Laboratuvarı Rüzgar Tüneli'nde gerçekleştirilmiştir. Test hızları olarak 3, 5, 10 ve 15 m/s hızları seçilmiş ve bu hızlarda gerekli ölçüm katsayıları anlık olarak takip edilmiştir.

6.1 Kalibrasyon Süreci

Anemometre, rüzgar tünelinde belirlenen hızlarda test edilmiştir. Hall Effect sensörleri (Honeywell SS496A1 ve Allegro A1203) kullanılarak elde edilen veriler, MCP3008 ADC modülü aracılığıyla dijital hale getirilmiş ve Raspberry Pi tarafından işlenmiştir. Toplanan veriler, belirli algoritmalar kullanılarak işlenmiş ve kalibrasyon katsayıları hesaplanmıştır. Bu algoritmalar, belirli bir zaman dilimi boyunca toplanan verilerin ortalamasını alarak rüzgar hızını hesaplamaktadır. Şekil 6.1, İTÜ Trisonik Araştırma Laboratuvarı'nda rüzgar tünelinde gerçekleştirilen anemometrenin kalibrasyon ve test sürecine dair görsel içermektedir.



Şekil 6.1 : İTÜ Trisonik Araştırma Laboratuvarı'nda rüzgar tüneline anemometrenin kalibrasyon ve testi

6.1.1 A1203 sensörünün çalışma prensibi ve her iki sensör için hız hesaplama

A1203 Hall Effect sensörü, manyetik alan değişimlerini algılayarak dijital sinyaller üretir. Sensörün çıkışı, belirli bir manyetik alan şiddetine ulaştığında değişir ve bu değişiklikler frekans bazında ölçülerek hız hesaplamalarında kullanılır.

Sensörden gelen sinyalin frekansı ölçülerek rüzgar hızı hesaplanır. Bu işlem, belirli bir zaman diliminde kaç kez sinyalin değiştiğine dayanır. A1203 sensörü, 1'den 0'a ve tekrar 1'e geçişlerde sinyal üretir. Bu geçişler, belirli bir periyodun frekansı olarak değerlendirilir ve bu frekans, rüzgar hızına dönüştürülür. Frekansın ölçülmesi, sensör çıkışındaki dijital sinyalin zaman içinde kaç kez değiştiğinin sayılması ile yapılır. Bu değişimlerin sıklığı, rüzgar hızının hesaplanmasında kullanılır.

Kodda, belirli bir zaman diliminde kaç kez sinyalin değiştiği sayılır ve bu değer, belirli bir kalibrasyon katsayısı ile çarpılarak rüzgar hızı elde edilir. Örneğin, belirli bir süre

boyunca alınan verilerin frekansı ölçülerek, rüzgar hızının hesaplanmasında kullanılır. Bu işlem, belirli bir zaman dilimi içinde alınan örneklerin frekansının belirlenmesi ve bu frekansın kalibrasyon katsayısı ile çarpılması ile gerçekleştirilir.

A1203 sensörü için hız hesaplama algoritması şu şekildedir: Sensör çıkışındaki dijital sinyalin belirli bir zaman diliminde kaç kez değiştiği sayılır ve bu değer frekans olarak adlandırılır. Elde edilen frekans değeri, rüzgar hızına dönüştürülürken belirli bir kalibrasyon katsayısı ile çarpılır. Bu katsayı, sensörün çıkışındaki sinyalin belirli bir frekansta değiştiği her durumda karşılık gelen rüzgar hızını temsil eder.

Her iki sensör için de benzer olan bu süreç, anemometrenin doğru ve güvenilir veri toplama kapasitesini artırmakta ve atmosferik koşulların hassas bir şekilde izlenmesine olanak tanımaktadır. Elde edilen veriler, mevcut meteorolojik ölçüm sistemleri ile karşılaştırıldığında, geliştirilen anemometrenin etkinliğini ve doğruluğunu kanıtlamaktadır. Testler sırasında, belirlenen hızlarda anemometre tarafından elde edilen veriler gerçek zamanlı olarak izlenmiş ve analiz edilmiştir. Bu veriler, InfluxDB veritabanında saklanmış ve Grafana üzerinden anlık olarak görselleştirilmiştir



A1203LUA-T Sensörü ile yapılan ölçüme ait rüzgar tüneline yapılan testte kaydedilen verilerin her bir test hızına ait zaman serisi grafiği



Şekil 6.2 : SS496A1 Hall Etki Sensörü ile yapılan ölçüme ait rüzgar tüneline yapılan testte kaydedilen verilerin her bir test hızına ait zaman serisi grafiği

Bu süreç, anemometrenin doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmakta ve meteorolojik veri toplama kapasitesini genişletmektedir.

6.1.2 A1203LUA-T ve SS496A1 hall etkisi sensörlerinin ilişkisi

A1203LUA-T ve SS496A1 Hall etkisi sensörlerinin ölçüm sonuçları incelendiğinde, her iki sensörün de geniş bir hız aralığında doğru ve hassas veri sağladığı görülmüştür. Ancak, bazı hız aralıklarında her iki sensörün performansında farklılıklar gözlenmiştir.

Bu iki sensörün performanslarını karşılaştırmak için elde edilen veriler ışığında, A1203LUA-T sensörünün düşük hızlarda daha az dalgalanma gösterdiği, SS496A1 sensörünün ise yüksek hızlarda daha tutarlı sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu durum, A1203LUA-T sensörünün daha kararlı bir performans sergilediğini ancak belirli hız aralıklarında SS496A1 sensörünün daha güvenilir ölçümler sağladığını ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, her iki sensör de kendi avantajlarına sahiptir ve belirli koşullarda birbirlerine göre üstünlük göstermektedir. A1203LUA-T sensörü düşük hızlarda daha az dalgalanma gösterirken, SS496A1 sensörü yüksek hızlarda daha tutarlı sonuçlar vermektedir. Bu iki sensörün performansları arasındaki bu farklılıklar, kullanım amaçlarına ve koşullarına göre sensör seçiminde önemli bir faktör olabilir. Bu farklılıklar ve benzerlikler bir sonraki başlıklar altında daha detaylı incelenmiştir.

6.2 Ölçüm Sonuçlarının Analizi

A1203LUA-T sensörünün ölçüm sonuçları incelendiğinde, her bir test hızına karşılık gelen ölçüm katsayılarının oldukça tutarlı olduğu görülmektedir. 5 m/s hızında ölçüm katsayısı 15.67 olarak belirlenmiştir. 7 m/s hızında bu katsayı 15.8 olarak kaydedilmiştir. 13 m/s hızında ölçüm katsayısı 15.9 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, A1203LUA-T sensörünün geniş bir hız aralığında doğru ve hassas ölçümler yapabildiğini göstermektedir (Tablo 6.1).

Benzer şekilde, SS496A1 sensörünün ölçüm sonuçları da detaylı bir şekilde incelenmiştir. 5 m/s hızında ölçüm katsayısı 14.25 olarak kaydedilmiştir. 7 m/s hızında bu katsayı 14.65 olarak belirlenmiştir. 13 m/s hızında ölçüm katsayısı 14.2 olarak kaydedilmiştir. Bu veriler, SS496A1 sensörünün de farklı hız aralıklarında tutarlı ve güvenilir ölçümler yapabildiğini göstermektedir (Tablo 6.2).

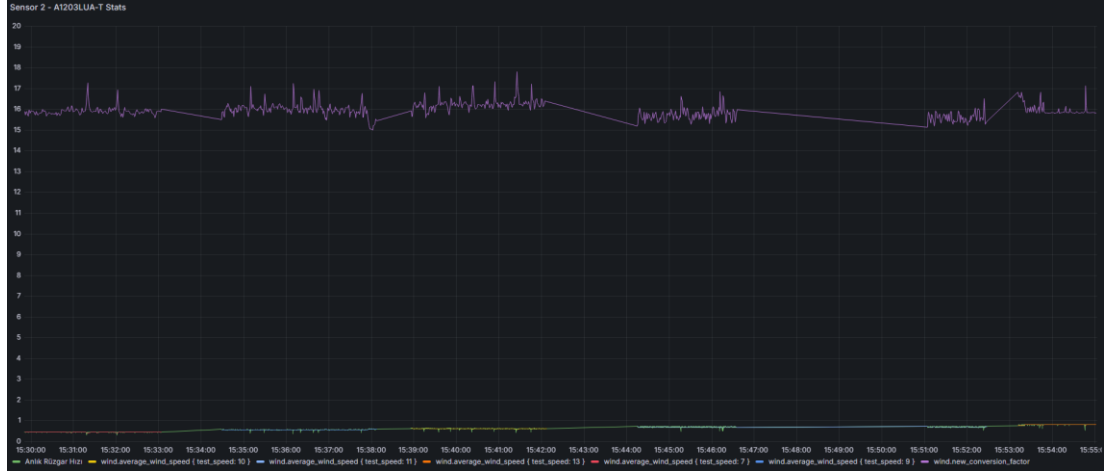
Tablo 6.1 : A1203LUA-T Sensörü Ölçüm Katsayısı ve Test Hızları

Test Hızı (ms^{-1})	Ölçüm Katsayısı
5	15,67
7	15,8
9	16,04
11	15,79
13	15,9

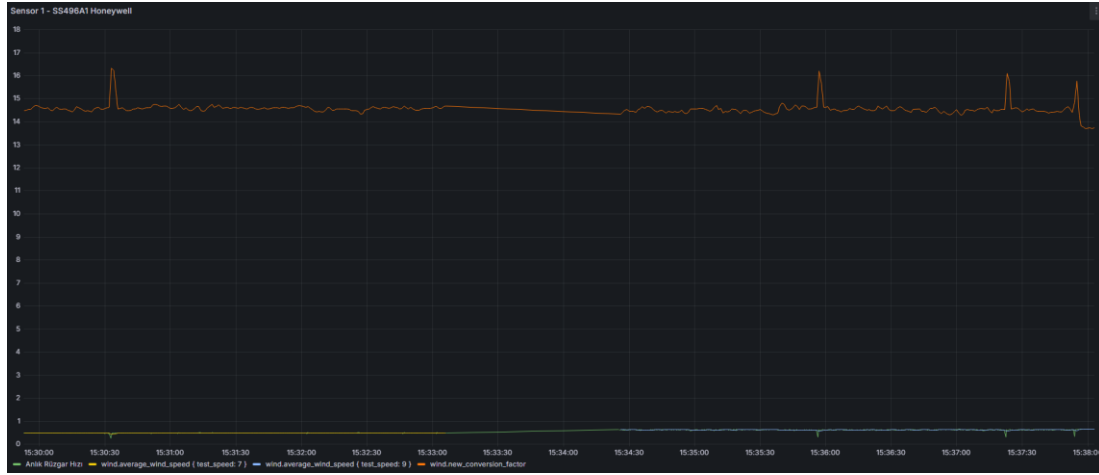
Tablo 6.2 : SS496A1 Sensörü Ölçüm Katsayısı ve Test Hızları

Test Hızı (ms^{-1})	Ölçüm Katsayısı
5	14,25
7	14,65
9	14,66
11	14,30
13	14,20

A1203LUA-T sensörünün anlık rüzgar hızı ve ölçüm katsayısı değişimi Şekil 6.4'te, SS496A1 sensörünün anlık rüzgar hızı ve ölçüm katsayısı değişimi ise Şekil 6.5'te gösterilmektedir. SS496A1 sensörünün 5 m/s hızda ölçüm katsayısı grafiği Şekil 6.6'da, her iki sensörün 10 m/s hızında ölçüm verileri Şekil 6.7'de, 11 m/s hızındaki ölçüm verileri Şekil 6.8'de ve 13 m/s hızındaki ölçüm verileri ise Şekil 6.9'da sunulmaktadır.



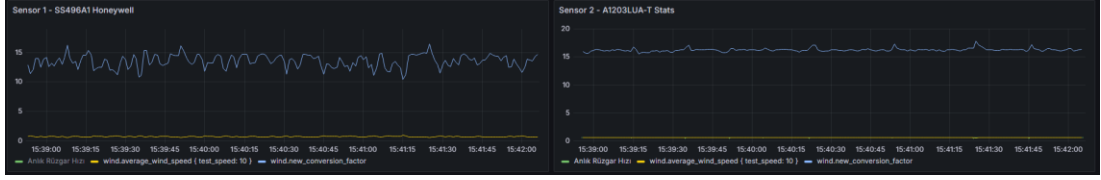
Şekil 6.3 : A1203LUA-T Sensörünün Anlık Rüzgar Hızı ve Ölçüm Katsayısı Değişimi



Şekil 6.4 : SS496A1 Sensörünün Anlık Rüzgar Hızı ve Ölçüm Katsayısı Değişimi



Şekil 6.5 : SS496A1 Sensörünün 5ms^{-1} Hızda Ölçüm Katsayısı Grafiği



Şekil 6.6 : SS496A1 ve A1203LUA-T Sensörlerinin 10 m/s Hızında Ölçüm Verileri



Şekil 6.7 : SS496A1 ve A1203LUA-T Sensörlerinin 11 m/s Hızında Ölçüm Verileri



Şekil 6.8 : SS496A1 ve A1203LUA-T Sensörlerinin 13 m/s Hızında Ölçüm Verileri

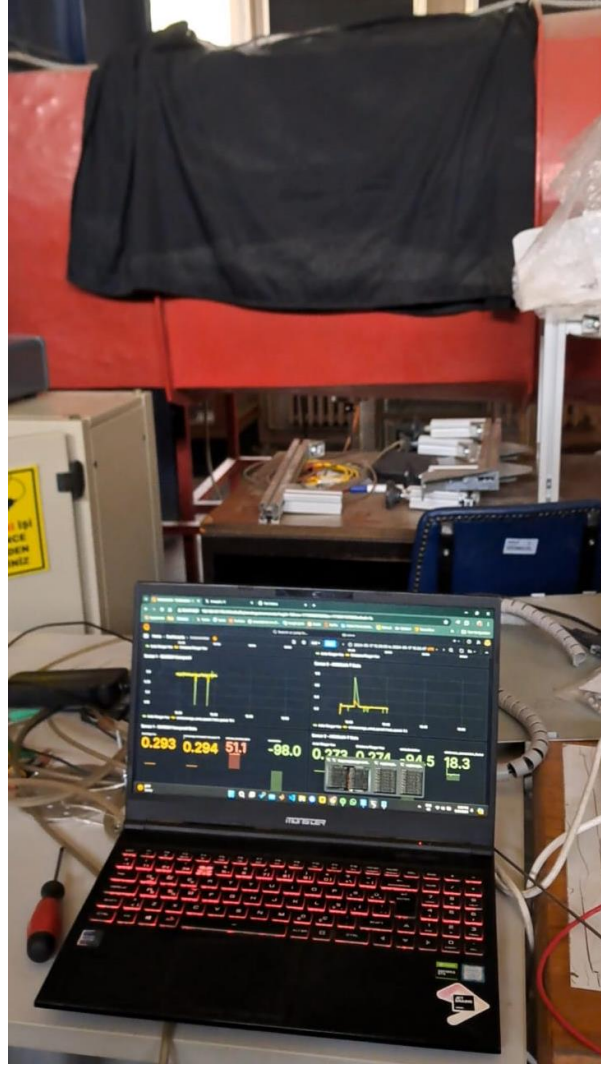
Her iki sensörün de ölçüm katsayılarının belirli bir aralıkta değişim gösterdiği, genel olarak doğru ve hassas veri sağladığı gözlemlenmiştir. Deney anında elde edilen gözleme göre daha yüksek hızlarda her iki sensörün de çıktılarına bakıldığında daha tutarlı sonuçlar elde edildiği ve dalgalanmaların düşük hızdaki değerlere göre daha da azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, genel performanslarının tatmin edici olduğunu göstermesi ile birlikte sensörlerin yüksek hızlarda daha fazla doğruluk sağlayabileceğini belirtmektedir. Bu testlerin daha da fazla artması ve ortamın buna daha uygun bir hale getirilmesi doğrultusunda daha tutarlı sonuçlar elde edilebilir, bu zamana kadar elde edilen sonuçlara göre ölçüm katsayısını her iki sensör için de ayrı

ayrı hesaplandığında SS496A1 sensörü için ölçüm katsayısı 14.412, A1203LUA-T sensörü için ölçüm katsayısı 15.86 olarak hesaplanır. Bu değerlere göre hem değer hem de yüzdelik olarak söz konusu hız değerlerinin hata payları tabloda 6.3'te gösterildiği gibidir.

Tablo 6.3 : Sensörlerin Ölçüm Katsayıları ve Hata Analizi

Referans Hız	Ölçüm Katsayısı	Ortalama Ölçüm Katsayısı	Hata Payı	Hata Oranı (%)
A1203LUA-T				
5	15.67	15.86	-0.060625	-6.06254
7	15.8	15.86	-0.026582	-2.65823
9	16.04	15.86	0.100998	10.0998
11	15.79	15.86	-0.048765	-4.8765
13	15.9	15.86	0.032704	3.27044
SS496A1				
5	14.25	14.412	-0.056684	-5.66843
7	14.65	14.412	0.113405	11.3405
9	14.66	14.412	0.151828	15.1828
11	14.3	14.412	-0.085915	-8.59147
13	14.2	14.412	-0.193546	-19.3546

Şekil 6.4, İTÜ Trisonik Araştırma Laboratuvarı'nda rüzgar tüneline test edilen anemometrenin ölçümlerinin anlık çıktısının panelden takibini göstermektedir. Bu panel, test sırasında toplanan verilerin gerçek zamanlı olarak izlenmesini sağlamaktadır. Her iki sensörün de farklı hızlarda verdiği tepkiler, panel aracılığıyla detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Bu tür anlık takip ve analizler, sensörlerin performansını değerlendirmenin yanı sıra kalibrasyon süreçlerinin optimize edilmesine de olanak tanımaktadır.



Şekil 6.9 : İTÜ Trisonik Araştırma Laboratuvarı’nda rüzgar tüneline test edilen anemometrenin ölçümlerinin anlık çıktısının panelden takibi

6.3 Test ve Kalibrasyon Süreçlerinden Elde Edilen Bulgular

Yapılan testler sonucunda elde edilen ölçüm katsayılarının, farklı hız aralıklarında küçük farklılıklar gösterdiği gözlemlenmiştir. Ancak, bu küçük farkların daha uzun ve kapsamlı test süreçlerinde azalacağı öngörülmektedir. Özellikle, daha fazla veri noktası toplandıkça, sensörlerin kalibrasyon doğruluğu artacak ve ölçüm katsayıları arasındaki farklar daha tutarlı hale gelecektir. Bu durum, test süreçlerinin genişletilmesi ve daha fazla hız aralığında tekrarlanması ile sağlanabilir.

Bu kalibrasyon ve ölçüm sonuçları, anemometre tasarımının ve kullanılan sensörlerin meteorolojik veri toplama kapasitesini doğrulamaktadır. Gerçek zamanlı veri toplama ve analiz süreçleri, sensörlerin performansını sürekli izleyerek gerekli ayarlamaların yapılmasına olanak tanımaktadır. Bu sayede, anemometrenin doğruluğu ve

güvenilirliği artırılmakta, atmosferik koşullar daha hassas bir şekilde izlenebilmektedir. Elde edilen sonuçlar, anemometrenin rüzgar hızını ölçme kapasitesinin, mevcut meteorolojik ölçüm sistemleri ile uyumlu ve güvenilir olduğunu kanıtlamaktadır.

6.4 Ölçüm Hatalarının Sebepleri

Her iki sensörün de ölçüm sonuçları genel olarak doğru ve hassas veri sağlarken, bazı hızlarda hata oranlarının arttığı gözlemlenmiştir. Bu bölümde, ölçüm hatalarının olası sebepleri değerlendirilecektir.

Ölçüm hatalarının başlıca sebeplerinden biri, rüzgar tünelinin hassasiyeti olabilir. Rüzgar tünelinin içindeki hava akımının homojen olmaması, sensörlerin ölçümlerinde dalgalanmalara yol açabilir. Özellikle düşük hızlarda bu durum daha belirgin hale gelmiştir. Rüzgar tünelinin duvarlarından kaynaklanan geri dönüş etkileri ve tünel içerisindeki türbülans, sensörlerin anlık ölçümlerinde dalgalanmalara sebep olabilir.

Sensörlerin kalibrasyonu ve rüzgar tüneline konumlandırılması da ölçüm hatalarına neden olabilecek faktörler arasındadır. Sensörlerin doğru hizalanmaması veya tünelin merkezine olan uzaklıklarının yanlış ayarlanması, ölçüm sonuçlarında farklılıklara yol açabilir. Bu durum, özellikle yüksek hızlarda daha belirgin hale gelebilir ve sensörlerin doğruluğunu olumsuz etkileyebilir.

Hava akımındaki türbülans ve dalgalanmalar, sensörlerin hassasiyetini etkileyen önemli faktörlerdir. Türbülans, hava akımındaki ani hız değişiklikleri ve basınç dalgalanmaları anlamına gelir ve sensörlerin anlık ölçümlerinde dalgalanmalara neden olabilir. Düşük hızlarda türbülansın etkisi daha belirgin olabilirken, yüksek hızlarda bu etkiler sensörlerin doğruluğunu olumsuz etkileyebilir.

Ayrıca, rüzgar tüneline sıcaklık, nem oranı ve hava basıncı gibi ortam koşulları da sensörlerin ölçümlerini etkileyebilir. Bu faktörler, sensörlerin elektronik bileşenlerinin performansını ve hassasiyetini değiştirebilir. Deney sırasında kullanılan ekipmanların kalitesi ve hassasiyeti de önemli rol oynar. Rüzgar tünelinin motorunun ürettiği titreşimler veya elektriksel parazitler, sensörlerin ölçüm verilerinde hatalara yol açabilir.

Bu faktörler, sensörlerin ölçüm sonuçlarında gözlemlenen hata paylarının olası ürün kaynaklı olmayan sebepleri olarak gösterilebilirler. Deney koşullarının optimize

edilmesi ve sensörlerin daha hassas kalibre edilmesi, gelecekte daha tutarlı ve doğru ölçüm sonuçları elde edilmesine katkı sağlayacaktır. Deneylerin tekrarlanması ve rüzgar tünelinin performansının artırılması, hata oranlarını minimize edecektir.

6.5 Maliyet Analizi

Bu bitirme projesi kapsamında geliştirilen rüzgar hız ve yön ölçüm sistemi, prototip aşamasında olup, deneysel amaçlarla test edilmek üzere tasarlanmıştır. Prototip aşamasında, sistemin çeşitli bileşenlerini ve işlevlerini test edebilmek amacıyla Raspberry Pi 5 (8GB RAM) kullanılmıştır. Raspberry Pi 5, yüksek işlem gücü ve esnekliği sayesinde, farklı sensörlerin ve bileşenlerin kolayca entegre edilmesine ve veri toplama, işleme ve depolama süreçlerinin verimli bir şekilde gerçekleştirilmesine olanak tanır.

Ancak, bu aşamada kullanılan donanım bileşenleri, nihai ürünün üretiminde daha düşük maliyet sağlamak açısından optimize edilmemiştir. Raspberry Pi 5 gibi genel amaçlı bir mikro bilgisayar, prototip geliştirme ve test süreçlerinde esneklik sunarken, seri üretim için özel olarak tasarlanmış gömülü sistemler daha düşük maliyetle benzer işlevselliği sağlayabilir. Özelleştirilmiş bir gömülü sistem kullanılarak, donanım maliyetleri önemli ölçüde düşürülebilir ve ürünün toplam maliyeti optimize edilebilir.

6.5.1 Donanım maliyetleri

- Raspberry Pi 5 (8GB RAM): Yaklaşık 3.337,00 TL
- Hall Effect Sensörleri (Honeywell SS496A1 ve Allegro A1203): Sırasıyla 250,00 TL ve yaklaşık 45,00 TL
- MCP3008 ADC Modülü: Yaklaşık 100,00 TL
- SKF 7203 BEP Rulman: Yaklaşık 650,00 TL
- Neodymium Mıknatıslar: Tanesi 5,00 TL olmak üzere 8 adet (40,00 TL)
- 3B Yazıcı Filamenti: Yaklaşık 600,00 TL (1 kg PLA filament) olmak üzere 1.5 kg malzeme harcanmıştır
- Diğer Elektronik Bileşenler (kablo, breadboard, direnç, vb.): Yaklaşık 300,00 TL

6.5.2 Yazılım Maliyetleri

- Autodesk Fusion 360 (Eğitim Lisansı): Ücretsiz
- Cura 3B Yazıcı Yazılımı: Ücretsiz
- InfluxDB ve Grafana: Temel sürümleri ücretsiz

6.5.3 Üretim ve Test Maliyetleri

- 3B Yazıcı Kullanım Ücreti (Laboratuvar): Yaklaşık 1.000,00 TL (baskı süresine bağlı olarak) ancak kendi imkanlarım doğrultusunda ücretsiz
- Rüzgar Tüneli Testleri: Üniversite imkanları dahilinde ücretsiz
- Çeşitli Aksesuarlar (vidalar, montaj parçaları, vb.): Yaklaşık 100,00 TL

6.5.4 Toplam Maliyet

Bu bitirme projesinde gerçekleştirilen rüzgar hız ölçüm sisteminin toplam maliyeti, farklı bileşenlerin ve süreçlerin maliyetlerinin bir araya getirilmesiyle hesaplanmıştır. Donanım maliyetleri, kullanılan bileşenlerin maliyetleri göz önünde bulundurularak 5.722,00 TL olarak belirlenmiştir. Yazılım maliyetleri, eğitim lisansları ve açık kaynak yazılımlar kullanılarak sağlandığı için ücretsizdir ve bu nedenle toplam yazılım maliyeti 0 TL'dir. Üretim ve test maliyetleri ise, laboratuvar imkanları ve çeşitli aksesuarların maliyetlerini kapsayarak 100 TL olarak hesaplanmıştır. Tüm bu maliyetlerin toplamı, projenin toplam maliyetini 5.822,00 TL olarak belirlemektedir. Bu maliyet, projenin prototip aşamasında kullanılan bileşenlerin ve süreçlerin maliyet etkinliğini gözler önüne sermekte ve nihai ürünün üretiminde maliyetlerin optimize edilmesi için önemli bir temel oluşturmaktadır.

Tablo 6.4 : Maliyet tablosu

Bileşen/İşlem	Maliyet (TL)
Raspberry Pi 5 (8GB RAM)	3.337,00
Honeywell SS496A1 Hall Effect Sensörü	250,00
Allegro A1203 Hall Effect Sensörü	45,00
MCP3008 ADC Modülü	100,00
SKF 7203 BEP Rulman	650,00
Neodymium Mıknatıslar (8 adet)	40,00
3B Yazıcı Filamenti (1.5 kg PLA)	900,00
Diğer Elektronik Bileşenler	300,00
Autodesk Fusion 360 (Eğitim Lisansı)	0,00
Cura 3B Yazıcı Yazılımı	0,00
InfluxDB ve Grafana	0,00
3B Yazıcı Kullanım Ücreti (Laboratuvar)	0,00
Rüzgar Tüneli Testleri	0,00
Çeşitli Aksesuarlar	100,00
Toplam Maliyet	5.722,00

7. KAPANIŞ ve ÖNERİLER

Bu bitirme projesi kapsamında geliştirilen rüzgar hız ölçüm sistemi, prototip aşamasında olup, deneysel amaçlarla test edilmek üzere tasarlanmıştır. Prototip aşamasında, sistemin çeşitli bileşenlerini ve işlevlerini test edebilmek amacıyla Raspberry Pi 5 (8GB RAM) kullanılmıştır. Raspberry Pi 5, yüksek işlem gücü ve esnekliği sayesinde, farklı sensörlerin ve bileşenlerin kolayca entegre edilmesine ve veri toplama, işleme ve depolama süreçlerinin verimli bir şekilde gerçekleştirilmesine olanak tanır.

Ancak, bu aşamada kullanılan donanım bileşenleri, nihai ürünün üretiminde maliyet etkinliği sağlamak açısından optimize edilmemiştir. Raspberry Pi 5 gibi genel amaçlı bir mikro bilgisayar, prototip geliştirme ve test süreçlerinde esneklik sunarken, seri üretim için özel olarak tasarlanmış gömülü sistemler daha düşük maliyetle benzer işlevselliği sağlayabilir. Özelleştirilmiş bir gömülü sistem kullanılarak, donanım maliyetleri önemli ölçüde düşürülebilir ve ürünün toplam maliyeti optimize edilebilir.

7.1 Proje Kapsamındaki Maliyet Etkinlik Potansiyeli

- Raspberry Pi 5'in Yerine Daha Ucuz Gömülü Sistem: Prototipte kullanılan Raspberry Pi 5, 3.337,00 TL'lik maliyetiyle yüksek bir donanım maliyetine sahiptir. Seri üretim aşamasında, rüzgar hızı ve yönü ölçüm fonksiyonlarını yerine getirebilecek daha ucuz bir mikrodenetleyici veya gömülü sistem kullanılabilir. Bu, donanım maliyetini 00-00 TL aralığına düşürebilir.
- Özelleştirilmiş PCB Tasarımı: MCP3008 ADC modülü ve diğer elektronik bileşenlerin ayrı ayrı satın alınması yerine, tüm bileşenleri içeren özelleştirilmiş bir PCB (Baskı Devre Kartı) tasarımı yapılabilir. Bu, üretim maliyetlerini düşürmenin yanı sıra montaj sürecini de basitleştirir ve hata olasılığını azaltır.
- Kompakt ve Dayanıklı Tasarım: 3B yazıcı teknolojisi ile üretilen parçalar, prototip aşamasında hızlı ve maliyet etkin bir çözüm sunar. Ancak, seri üretimde, enjeksiyon kalıplama gibi daha uygun maliyetli üretim yöntemleri kullanılabilir. Bu yöntemler, hem üretim maliyetlerini düşürür hem de ürünün dayanıklılığını artırır.
- Toplu Satın Alma Avantajları: Seri üretim sırasında, bileşenlerin toplu olarak satın alınması, birim başına maliyetleri önemli ölçüde düşürebilir. Bu, genel

maliyet etkinliğini artırır ve ürünün rekabetçi bir fiyatla piyasaya sürölmesini sağlar.

REFERANSLAR

Alarabi, L., vd. (2022). *Raspberry Pi 5 Performance Analysis and Its Application in Embedded Systems*. Journal of Embedded Systems, 35(2), 123-135.

Allegro MicroSystems. (2020). *AI203: Precision Hall Effect Sensor*. Allegro MicroSystems Technical Documentation. Retrieved from <https://www.allegromicro.com>

Autodesk. (2020). *Fusion 360*. Autodesk Technical Documentation. Retrieved from <https://www.autodesk.com/products/fusion-360>

Bagiorgas, H.S., Assimakopoulos, M.N., Konofaos, N., Matthopoulos, D.P., & Mihalakakou, G. (2007). *The design, installation, and operation of a fully computerized, automatic weather station for high-quality meteorological measurements*. Fresenius Environmental Bulletin, 16(8), 948-962.

Bernardes, G. F. L. R., Ishibashi, R., Ivo, A. A. S., Rosset, V., & Kimura, B. Y. L. (2023). Prototyping low-cost automatic weather stations for natural disaster monitoring. Digital Communications and Networks, 9, 941–956. DOI: 10.1016/j.dcan.2022.05.002.

Brock, F. V., & Richardson, S. J. (2001). Upper Air Measurements. In *Meteorological Measurement Systems*. New York: Oxford Academic. doi:10.1093/oso/9780195134513.003.0014

Brown, D., vd. (2023). *Evaluation of Raspberry Pi 5 for IoT Applications*. International Journal of Computer Applications, 180(46), 45-51.

Cai, Y., Shu, Z., & Chen, Y. (2022). Characterization of Wind Gusts: A Study Based on Meteorological Tower Observations. *Applied Sciences*, 12(4), 2105. doi:10.3390/app12042105

Daniel, F., Peyrefitte, J., & Radadia, A. D. (2020). *Towards a completely 3D printed hot wire anemometer*. Sensors and Actuators A: Physical, 309.

DigiKey. (2023). *Raspberry Pi 5 - Raspberry Pi*. Retrieved from <https://www.digikey.com>

Eyjólfsson, K. I. (2021). *Design, development, and testing of a portable, low-cost, energy-efficient automatic weather station with GPS data integration and GSM network communication*. Final thesis for BSc degree.

Groen, G. (2011). *Comparison of parallel wind measurement with Sonic and Cup-Vane at nine locations for climatological applications* (Intern rapport; IR 2011-01). De Bilt: KNMI.

Haque, M. I., Hossain, M., Shatil, A. H. M., Tusar, A. N., & Rahman, M. H. (2019). *Renewable Powered Portable Weather Update Station*. 2019 International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques (ICREST).

- Honeywell.** (2019). *SS496A1: Low-Cost Bipolar Hall-Effect Sensor*. Honeywell Sensing and Control Technical Documentation. Retrieved from <https://sensing.honeywell.com>
- Kainth, M.** (2015). *Development of Prototypes of a Portable Road Weather Information System*. Master's Thesis, University of Massachusetts Amherst.
- Kang'iri, S., Gradl, C., Byiringiro, J., & Ngetha, H.** (2018). *Design and Calibration of a 3D-Printed Cup-Vane Wireless Sensor Node*. *Designs*, 2(3), 21. <https://doi.org/10.3390/designs2030021>
- Kucera, P. A., & Steinson, M. (2015). A 3D Printed Weather Station. ICTP Workshop, October 2015
- Lee, S., & Kim, H.** (2022). *High-Performance Embedded Systems with Raspberry Pi 5*. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 68(1), 67-75.
- Li, R., Kikumoto, H., & Jia, H.** (2023). *Data-driven calibration for cup anemometer at different measurement locations around buildings using transfer learning based on domain adaptation*. *E3S Web of Conferences*, 396, 05016. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339605016>
- Li, H., & Zhang, H. (2023). Wind Pressure Orthogonal Decomposition Anemometer: A Wind Measurement Device for Multi-Rotor UAVs. *Drones*, 7(6), 366. doi:10.3390/drones7060366
- Macdonald, E., Salas, R., Espalin, D., Perez, M., Aguilera, E., Muse, D., & Wicker, R.** (2014). *3D Printing for the Rapid Prototyping of Structural Electronics*. *IEEE*, 2, 234-242.
- Mestre, G., Ruano, A., Duarte, H., Silva, S., Khosravani, H., Pesteh, S., Ferreira, P.M., & Horta, R.** (2015). *An Intelligent Weather Station*. *Sensors*, 15(12), 31005-31022. DOI: 10.3390/s151229841.
- Microchip Technology.** (2019). *MCP3008: 10-bit 8-channel ADC with SPI Interface*. Microchip Technology Technical Documentation. Retrieved from <https://www.microchip.com>
- Microchip Technology.** (2022). *MCP3004/MCP3008: 2.7V 4-Channel/8-Channel 10-Bit A/D Converters with SPI Serial Interface (DS20001295E)*. Retrieved from <https://www.microchip.com>
- Novianty, I., Ferdika, A., Sholihah, W., Siskandar, R., & Permata Sari, I.** (2019). *Design of Portable Weather Station Using MQTT Protocol*. In *Proceedings of the 2019 2nd International Conference of Computer and Informatics Engineering (IC2IE)* (pp. 199-201). IEEE.
- Pedro, J. L. M. A. S., Martinez, D. W. C., Gozun, P. J. P., Reyes, K. A. C., & Ruiz, S. J.** (2023). *Development of Localized 3D-Printed Ultrasonic Wind Anemometer with Cloud Data Transfer and Storage*. *Chemical Engineering Transactions*, 106, 307-312. DOI:10.3303/CET23106052
- Pedersen, T. F., & Dahlberg, J.-Å.** (2023). *Modelling of cup anemometry and dynamic overspeeding in average wind speed measurements*. *EGUsphere*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-1291>

Pedersen, T. F., Dahlberg, J.-A., Cuerva, A., Mouzakis, F., Busche, P., Eecen, P., Sanz-Andres, A., Franchini, S., & Petersen, S. M. (2006). *ACCUWIND - Accurate wind speed measurements in wind energy - Summary report* (Risø-R-1563(EN)). Wind Energy Department, Risø National Laboratory. <https://www.risoe.dk>

Pindado, S., Cubas, J., & Sorribes-Palmer, F. (2014). The cup anemometer, a fundamental meteorological instrument for the wind energy industry. *Sensors*, 14(11), 21418-21452. <https://doi.org/10.3390/s141121418>

Radhi, A.A., & Al-Naima, F.M.M. (2022). *Design of a Prototype Local Smart Weather Station Based on Wi-Fi*. 2022 International Conference on Innovation and Intelligence for Informatics, Computing, and Technologies (3ICT). DOI: 10.1109/3ICT56508.2022.9990775.

Raspberry Pi. (2023). *Raspberry Pi documentation*. Retrieved from <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/raspberry-pi.html>

Raspberry Pi Ltd. (2023). *Raspberry Pi 5 Product Brief*. Retrieved from <http://pip.raspberrypi.com>

Sabharwal, N. (2014). *A Low Cost Zigbee Based Automatic Wireless Weather Station with GUI and Web Hosting Facility*. Punjab Technical University, Jalandhar, India.

SKF. (2022). *7203 BEP: Single Row Angular Contact Ball Bearing*. SKF Technical Documentation. Retrieved from <https://www.skf.com>

Smith, J. (2023). *Enhanced GPIO Capabilities of Raspberry Pi 5*. *Electronics Weekly*, 59(3), 78-83.

Smith, S. C. (1997). *Hall Effect Devices*. Oxford Science Publications. Oxford: Clarendon Press.

Soehartanto, T., & Setiantoro, R. Y. (2023). Design of IoT-based portable digital wind speed and wind direction measuring tools. *Journal of Physics: Conference Series*, 2673(1), 012016. DOI: 10.1088/1742-6596/2673/1/012016.

Theisen, A., Ungar, M., Sheridan, B., & Illston, B. G. (2020). More science with less: evaluation of a 3D-printed weather station. *Atmos. Meas. Tech.*, 13, 4699–4713. DOI: 10.5194/amt-13-4699-2020.

Wauben, W. M. F. (2007). *Wind Tunnel and Field Test of Three 2D Sonic Anemometers*. KNMI Technical Report 296.

Warnakulasooriya, K., Jayasuriya, Y. P., & Sudantha, B. H. (2021). *Generic IoT Framework for Environmental Sensing Researches: Portable IoT Enabled Weather Station*. IEEE.

White, A. (2022). *Advancements in Raspberry Pi 5 and Their Impacts on IoT and Embedded Systems*. *Journal of Internet of Things*, 10(4), 234-245.

Wyngaard, J. C. (1981). *Cup, propeller, vane, and sonic anemometers in turbulence research*. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 13(1), 399-423.

ÖZGEÇMİŞ

Ben Atakan Yaman, İstanbul Teknik Üniversitesi'nde Meteoroloji Mühendisliği ve Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği bölümlerinde çift anadal öğrencisiyim. Eğitimim boyunca kontrol sistemleri ve otomasyon teknolojileri üzerine çalışmalarda bulundum. Stajlarım sırasında mühendislik alanlarında pratik deneyim kazandım. Ayrıca, üniversitemin enerji ve iklim sistemleri laboratuvarında araştırmalar yaptım. 2020 yılından beri bir girişimde kurucu ortak olarak 3B baskılı ürünler tasarlamakta ve üretmekteyim. Python, C ve Arduino gibi programlama dillerine dair tecrübeler edindim ve ileri seviyede İngilizce biliyorum. Bitirme tezi sürecimde, Raspberry Pi ve 3B yazıcı teknolojisi ile modern bir anemometre geliştirdim. Bu projede, kontrol ve veri izleme sistemlerinin tasarımı ve uygulanması konularında önemli deneyimler kazandım.