

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ORCID : - - -

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :
ORCID : - - -

Trabzon

ÖNSÖZ

“Hacim Sınırlamalı Uygulamalar İçin Yeni Bir Rüzgar Sensörü Tasarımı ve Üretimi” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen ve bilim insanı olma yolundaki ilk adımlarımı atarken kıymetli bilgileriyle ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ayhan YAZGAN’na teşekkürü bir borç bilirim.

Yüksek Lisans sürecinde bana desteklerini esirgemeyen Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü’ndeki tüm değerli hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, yüksek lisans çalışmalarımın ilerlemesinde bana büyük katkı sağlayan, aynı zamanda iş hayatımda da rehberlik eden ve değerli yönlendirmeleriyle kariyerime katkı sunan Müdürüm Sayın İlhan Bora SERİN’e teşekkür ederim.

Verdikleri değerli desteklerden dolayı değerli hocalarıma Sayın Dr. Öğr. Üyesi İclal ARSLAN ve Sayın Öğr. Gör. Yalçın ATALIK’a teşekkür ederim. Bunun yanı sıra, her zaman yardımlarını eksik etmeyen ve her konuda yanımda olan değerli arkadaşım Elektrik-Elektronik Müh. Mücahit GÖKER’e de teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olup desteğini ve dostluğunu esirgemeyen kıymetli arkadaşlarım Meriem DGHOUGHİ ve Oujidane BENAMAR’a gönülden teşekkür ederim.

Son olarak, doğduğum günden beri elimi hiç bırakmayan, hayatım boyunca aldığım tüm kararlarda bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım ve her kararımda arkamda olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan annem Muna HAJ SALEH ve babam Ehsan SOUKAR’na, ablam Samar KATAW ve kardeşim Mohammad SOUKAR’na teşekkür eder, minnettarlığımı sunarım.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Noura SOUKAR

Trabzon 2025

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Hacim Sınırlamalı Uygulamalar İçin Yeni Bir Rüzgar Sensörü Tasarımı Ve Üretimi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Ayhan YAZGAN’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 06/03/2025

Noura SOUKAR

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XII
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Konu ile İlgili Daha Önce Yapılan Çalışmalar	1
2. GENEL BİLGİLER	13
2.1. Sistemin Çalışma Prensibi.....	13
2.2. Ultrasonik Dönüştürücülerinin Arayüzü	14
2.2.1. SRF02 Ultrasonik Alıcı-Verici	14
2.2.2. Çalışma Prensibi	15
2.2.3. I2C Protokolü.....	16
2.2.4. Donanım Bağlantıları	20
2.2.5. Yazılım Mimarisi	21
2.3. NTC Sıcaklık Sensörlerinin Arayüzü.....	25
2.3.1. NTC Sıcaklık Sensörleri	25
2.3.2. Çalışma Prensibi	25
2.3.3. Donanım Bağlantıları	26
2.3.4. Yazılım Mimarisi	27
2.4. UART Haberleşme Arayüzü	28
3. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	31
3.1. Elektronik Kart Tasarımı.....	31
3.1.1. Şematik Tasarımı	31
3.1.2. PCB Tasarımı	35
3.2. Yazılım Çalışmaları.....	37
3.3. Mekanik Yapı Çalışmaları.....	37

3.4. Deneysel Çalışmalar.....	38
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	42
4.1. Deneysel Çalışma.....	42
4.1. Simülasyon Çalışması	45
4.1.1. Sıcaklık Etkisi	45
4.1.2. Nem Etkisi.....	56
5. SONUÇLAR.....	69
6. ÖNERİLER.....	71
7. KAYNAKLAR	72



Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

HACİM SINIRLAMALI UYGULAMALAR İÇİN YENİ BİR RÜZGAR SENSÖRÜ TASARIMI VE ÜRETİMİ

Noura SOUKAR

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ayhan YAZGAN
2025, 75 Sayfa

Bu çalışmada, hacim sınırlamalı uygulamalar için yeni bir rüzgar sensörü tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen sensör, rüzgarın hızını ve yönünü ölçmek için iki ultrasonik alıcı-verici başlığı ve dört NTC termistörü kullanmaktadır. Ultrasonik dönüştürücüler, rüzgar hızını daha hassas ve hızlı ölçerken, 4 NTC termistörlerinin sıcaklık farklarını ölçerek rüzgarın yönü doğru bir şekilde tespit etmektedir. 1 m/s ile 5 m/s arasındaki hızlarda yapılan testlerde, sensörün rüzgar hızı ile gerçek hız arasındaki ortalama hata oranı %2,5 civarında kalmış, bu da sensörün iyi bir doğruluğa sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, sensörün ölçtüğü minimum rüzgar hızı 0,6 m/s olarak belirlenmiştir. Rüzgar yönü ölçümleri de doğrulukla yapılmış, gerçek yön ile hesaplanan yön arasında tutarlı sonuçlar elde edilmiştir. Çevresel faktörlerin sensör doğruluğu üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Nem oranındaki artış, sensörlerin doğruluğunda belirgin bir azalmaya neden olmuştur. Sıcaklık değişimi de benzer şekilde sensörün doğruluğuna etkilemiştir. Bu sensör tasarımı, düşük maliyet, bakımsızlık ve uzun ömür sunarak hacim sınırlamalı alanlarda ideal bir çözüm sağlamaktadır. Enerji verimliliği de uzun süreli kullanımlar için avantajlıdır. Bu çalışma, mevcut rüzgar ölçüm sistemlerine alternatif bir yaklaşım getirerek gelecekteki araştırmalara temel oluşturmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Rüzgar hızı, Rüzgar yönü, Ultrasonik, Sıcaklık, Termistör, Uçuş süresi.

Master Thesis

SUMMARY

DESIGN AND FABRICATION OF A NOVEL WIND SENSOR FOR VOLUME CONSTRAINED APPLICATIONS

Noura SOUKAR

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Electrical and Electronics Engineering Graduate Program
Supervisor: Dr. Öğr. Üyesi Ayhan YAZGAN
2025, 75 Pages

In this study, a new wind sensor design and production for volume-constrained applications have been carried out. The developed sensor uses two ultrasonic transceivers and four NTC thermistors to measure wind speed and direction. Ultrasonic transducers measure wind speed more accurately and quickly, while four NTC thermistors temperature differences were used to determine wind direction accurately. In tests conducted within the range of 1 m/s to 5 m/s, the average error rate between the sensor's measured wind speed and the actual speed remained around 2.5%, indicating that the sensor has good accuracy. Additionally, the minimum wind speed measured by the sensor was determined to be 0.6 m/s. Wind direction measurements were also made accurately, with consistent results between the actual direction and the calculated direction. Environmental factors have a significant impact on the sensor's accuracy. An increase in humidity caused a noticeable decrease in accuracy. Temperature changes similarly affected the sensor's accuracy. This sensor design provides an ideal solution for volume-constrained areas by offering low cost, maintenance-free operation, and long lifespan. Energy efficiency is also advantageous for long-term use. This study presents an alternative approach to existing wind measurement systems and lays the foundation for future research.

Key Words: Wind speed, Wind direction, Ultrasonic, Temperature, Thermistor, Time of flight.

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Sistemin blok diyagramı.....	13
Şekil 2. SRF02 Ultrasonik alıcı-verici.....	15
Şekil 3. Ultrasonik başlığının gönderdiği (A) ve aldığı (B) sinyaller	15
Şekil 4. Rüzgar hızının ses yayılımıyla aynı ve zıt yönlerde ToF üzerindeki etkisi	16
Şekil 5. Tipik I2C Uygulaması	17
Şekil 6. I2C Başlat (Start) ve Durdur (Stop) sinyalleri.....	18
Şekil 7. I2C veri çerçeveleri	18
Şekil 8. NACK sinyal örneği.....	19
Şekil 9. Ultrasonik vericinin arayüzü devresi.....	21
Şekil 10. Ultrasonik alıcının arayüzü yazılım algoritmasının diyagramı	22
Şekil 11. NTC termistörlerin arayüzünün blok diyagramı	25
Şekil 12. NTC Direnci - Sıcaklık değişimi.....	26
Şekil 13. NTC sıcaklık sensörü bağlantısı.....	27
Şekil 14. NTC sıcaklık sensörlerinin arayüzü yazılım algoritmasının diyagramı.....	28
Şekil 15. UART alıcı-verici bağlantısı	28
Şekil 16. UART haberleşme protokolü örneği	29
Şekil 17. UART Entegresi	30
Şekil 18. Şematiğin blok diyagramı	31
Şekil 19. Güç arayüzü.....	33
Şekil 20. Mikroişlemci arayüzü.....	34
Şekil 21. PCB Tasarımı (a) Ön taraf (b) Arka taraf.....	35
Şekil 22. Mekanik yapı.....	37
Şekil 23. Mekanik yapıda NTC termistörlerin yerleşimi	38
Şekil 24. Elektronik kart ve bağlantıları	39
Şekil 25. Rüzgar Yön ölçüm test düzeneği	39
Şekil 26. Rüzgar Hız ölçüm test düzeneği.....	40
Şekil 27. Sensörün mekanik yapısı.....	40
Şekil 28. UART üzerinde okunan veriler	41
Şekil 29. Rüzgar hız test sonuçları	43
Şekil 30. Farklı sıcaklıklar ve rüzgar hızları için simülasyona göre beklenen sıcaklık yanıtı	45

Şekil 31. (50°C) Derecede farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri.....	46
Şekil 32. (30°C) Derecede farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri.....	47
Şekil 33. (15°C) Derecede farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri.....	48
Şekil 34. (10°C) Derecede farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri.....	49
Şekil 35. (5°C) Derecede farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri.....	50
Şekil 36. (-3°C) Derecede farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri	51
Şekil 37. (-12°C) Derecede farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri	52
Şekil 38. (-20°C) Derecede farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri	53
Şekil 39. (-35°C) Derecede farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri	54
Şekil 40. Sıcaklık değişimine göre mutlak farkların değişimi.....	55
Şekil 41. Sıcaklık değişimine göre farkların değişimi.....	55
Şekil 42. (25°C) Derecede ve (20%) nem oranında farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri.....	57
Şekil 43. (35°C) Derecede ve (20%) nem oranında farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri.....	58
Şekil 44. (25°C) Derecede ve (40%) nem oranında farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri.....	59
Şekil 45. (35°C) Derecede ve (40%) nem oranında farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri.....	60
Şekil 46. (25°C) Derecede ve (60%) nem oranında farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri.....	61
Şekil 47. (35°C) Derecede ve (60%) nem oranında farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri.....	62
Şekil 48. (25°C) Derecede ve (80%) nem oranında farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri.....	63
Şekil 49. (35°C) Derecede ve (80%) nem oranında farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri.....	64
Şekil 50. (25°C) Derecede ve (100%) nem oranında farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri.....	65
Şekil 51. (35°C) Derecede ve (100%) nem oranında farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri.....	66
Şekil 52. (25°C) Derecede farklı nem oranında farklı seviyelerde rüzgar hız farkları	67
Şekil 53. (35°C) Derecede farklı nem oranında farklı seviyelerde rüzgar hız farkları	68

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. SRF02 Kayıt Adresleri	20
Tablo 2. NTC Sıcaklık sensörleri arayüzünün ana bileşenleri.	27
Tablo 3. Farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri.....	42
Tablo 4. Farklı yönlerde rüzgar yön ölçüm sonuçları	44
Tablo 5. (50°C) Derecede farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri.....	46
Tablo 6. (30°C) Derecede farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri.....	47
Tablo 7. (15°C) Derecede farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri.....	48
Tablo 8. (10°C) Derecede farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri.....	49
Tablo 9. (5°C) Derecede farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri.....	50
Tablo 10. (-3°C) Derecede farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri	51
Tablo 11. (-12°C) Derecede farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri	52
Tablo 12. (-20°C) Derecede farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri	53
Tablo 13. (-35°C) Derecede farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri	54
Tablo 14. (25°C) Derecede ve (20%) nem oranında farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri	57
Tablo 15. (35°C) Derecede ve (20%) nem oranında farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri	58
Tablo 16. (25°C) Derecede ve (40%) nem oranında farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri	59
Tablo 17. (35°C) Derecede ve (40%) nem oranında farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri	60
Tablo 18. (25°C) Derecede ve (60%) nem oranında farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri	61
Tablo 19. (35°C) Derecede ve (60%) nem oranında farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri	62
Tablo 20. (25°C) Derecede ve (80%) nem oranında farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri	63
Tablo 21. (35°C) Derecede ve (80%) nem oranında farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri	64
Tablo 22. (25°C) Derecede ve (100%) nem oranında farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri	65
Tablo 23. (35°C) Derecede ve (100%) nem oranında farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri	66

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

NTC	: Negatif Sıcaklık Katsayısı (Negative Temperature Coefficient)
ToF	: Uçuş Süresi (Time of Flight)
CP	: Sabit Güç (Constant Power)
CTD	: Sabit Sıcaklık Farkı (Constant Temperature Difference)
ADC	: Analog Dijital Çevirici (Analog Digital Converter)
v	: Rüzgar Hızı
A, B, C	: Sabitler
R	: <i>Direnç</i>
d	: Mesafe
T	: Sıcaklık
SDA	: Serial Data
SCL	: Serial Clock
TX	: Verici (Transmitter)
RX	: Alıcı (Receiver)
I2C	: Entegre Devreler Arası İletişim (Inter-Integrated Circuit)
MCU	: Mikrodenetleyici Birimi
Vcc	: Güç Besleme Gerilimi
GND	: Toprak (Ground)
UX	: Entegre (X : Entegre Numarası)
UART	: Evrensel Asenkron Alıcı/Verici (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter)

1. GİRİŞ

Rüzgarın hızı ve yönü, meteoroloji, havacılık, denizcilik ve tarım gibi birçok alanda kritik bir öneme sahiptir. Bu çalışmanın temel amacı, hacim sınırlamalı uygulamalar için yenilikçi bir rüzgar sensörü geliştirmektir ve aynı zamanda mevcut rüzgar ölçüm sistemlerine alternatif bir yaklaşım sunmaktır.

Geleneksel rüzgar ölçüm cihazları genellikle mekanik sensörlere dayanır. Bu sensörler bakım gerektirir ve zamanla aşınarak performans kaybı yaşayabilir. Bu çalışmanın tasarımı, mekanik parçaların karmaşıklığını ve bakım gereksinimlerini ortadan kaldırarak, daha düşük bakım ihtiyacı ve uzun bir ömür sağlamaktadır. Ayrıca, hacim sınırlı uygulamalarda rüzgar verilerinin ölçülmesine yönelik yenilikçi bir yöntem sunmaktadır.

İlk bölümde, konu ile ilgili daha önce yapılan araştırmalar ve çalışmalar incelenmiştir. İkinci bölümde, kullanılan sensör teknolojilerinin genel özellikleri ve bu teknolojilerin avantajları ele alınarak, sistemin işlevselliğine katkı sağlayan unsurlar tartışılmıştır. Üçüncü bölümde, elektronik kart tasarımı, şematik tasarım, PCB tasarımı ve yazılım geliştirme süreçlerine dair ayrıntılı bilgiler sunulmuştur. Dördüncü bölümde, gerçekleştirilen deneylerin sonuçları ve sensörün doğruluğu ile performansı üzerine yapılan tartışmalar yer almıştır. Beşinci bölümde, çalışmanın sonuçları sunulmuştur. Altıncı bölümde, elde edilen bulgulardan yararlanarak gelecekteki araştırmalar için önerilerde bulunulmuş ve sensörün daha da geliştirilmesi için yapılabilecek iyileştirmeler tartışılmıştır.

1.1. Konu ile İlgili Daha Önce Yapılan Çalışmalar

Lukas Fassler tarafından geliştirilen Arduino Uno tabanlı ultrasonik anemometre, Rüzgarın yönünü ve hızını ölçmek için tasarlanmıştır. Projede aşağıdaki adımlar takip edilmiştir;

- Projenin ilk testleri ve düzenlemeleri için Arduino Uno ve ayrı kartlar kullanılarak basit bir kurulu yapılmıştır.
- Ultrasonik dönüştürücülerden alınan sinyalleri işlemek için gerekli dijital ve analog devreler geliştirilmiştir.
- Bileşenleri koruyacak ve ölçümün doğru yapılmasını sağlayacak şekilde bir mekanik yapı tasarlanmıştır.

- d. Ölçüm sürecini yönetmek için başlangıçta basit bir yazılım oluşturulmuş, ardından okumaların doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmak için daha gelişmiş bir yazılım geliştirilmiştir.
- e. Tasarımı doğrulamak için kapsamlı testler yapılmıştır, farklı kurulumlar ve ortamlarda anemometrenin güvenilir bir şekilde test edilmiştir.

Geliştirme boyunca, projenin performansını artırmak ve sorunları minimize etmek için donanım ve yazılım tasarımını iyileştirmeye odaklanmıştır (Fassler, 2017).

Hardy Lau tarafından yapılan çalışmada 10 yıllık bir süre zarfında yüksek hassasiyetli ultrasonik bir rüzgar sensörünün geliştirilmesini anlatmaktadır. Çalışmada geliştirilen iki prototip, ticari cihazlarla eşit performans gösterecek şekilde tasarlanmıştır. İki boyutludur, rüzgarın hızı ve yönü için yatay bileşenlerini ölçmektedir. ayrıca, rüzgar hızındaki ani değişimleri kaydetmek için uygundur ve soğuk hava koşullarında buzlanmayı önlemek için sensör ısıtılmaktadır (Lau , 2011).

Bucci vd. çalışmasında, açık havada rüzgar ölçümü için düşük maliyetli hem rüzgarın hızını hem de yönünü izleyebilen 2 eksenli bir anemometre geliştirilmiştir. Basit bir tasarıma sahiptir ve geliştirme maliyetini azaltmak amacıyla ticari olarak temin edilebilen bileşenler kullanılarak yapılmıştır. Ana avantajı, hareketli parçalara sahip olmaması nedeniyle düşük bakım gerektiren ve hızlı rüzgar değişimlerine hızlı yanıt gerektiren çeşitli uygulamalarda kullanılabilmesidir. Projenin mimarisi, ultrasonik sinyallerin işlenmesi için uygulanan algoritma ve ilk testler sırasında elde edilen sonuçlar sunulmakta ve tartışılmaktadır (Bucci vd., 2013).

Yadav vd. gerçek zamanlı SD kart ve Nesnelerin İnterneti (IoT) özellikli veri kaydı olan düşük maliyetli hem rüzgarın hızını hem de yönünü ölçebilen 2 eksenli bir ultrasonik anemometre tasarlamıştır. Arduino geliştirme kartı ile rüzgar hızı ölçümü Uçuş Süresi (ToF) yöntemi kullanılmıştır. Amplifikatörler ve bant geçiren filtre gibi alıcı devresinin alt bileşenlerini National Instrument tarafından geliştirilen Multisim programı ile tasarlanmıştır ve simüle edilmiştir. Rüzgar verilerini zaman bilgisiyle birlikte depolamak için SD kart modülü ve Gerçek Zamanlı Saat (RTC) modülü ile IoT modülü kullanılmıştır (Yadav vd., 2017).

Lopes vd. çalışmasında, rüzgar hızını üç boyutta ölçen bir ultrasonik anemometre geliştirilmiştir. Ekipmanın ölçümler üzerindeki etkisini en aza indirmek için mekanik yapısının önemli yönlerini tartışılmıştır. Ayrıca, cihazı oluşturan dönüştürücülerin

uyarılması ve sinyal koşullandırılmasında kullanılan elektronik devreler de sunulmaktadır. İki farklı mekanik yapının karşılaştırıldığı saha testlerinin sonuçlarına göre güncel anemometrenin mekanik tasarımı ortogonal olmayan bir düzenlemenin ölçüm doğruluğunu artırdığı gösterilmiştir. Sonuçlar, önerilen ekipmanın 160 km/s hıza kadar olan ölçümlerde iyi bir doğruluğa sahip olduğunu göstermiştir (Lopes vd., 2017).

Perez del Valle vd. düşük maliyetli ultrasonik dönüştürücüler kullanarak rüzgar hızı ve yönü ölçümleri için bir anemometre tasarlamıştır. Sistemin mantığı, Freescale'in HCS12 mikrodenetleyicisi temel alınarak tasarlanmıştır. Son verilerin görüntülenmesi ve kaydedilmesi için LabVIEW yazılımı kullanılmıştır (Perez del Valle vd., 2007).

Chandran ve Bhakthavatchalu çalışmasında, ultrasonik anemometre sistemlerinde ölçüm için Uçuş Süresi yönteminin (ToF) kullanımı anlatılmıştır. Uçuş Süresi, Ultrasonik ses dalgası bir vericiden alıcıya gitmesi için geçen süredir. Ultrasonik ses dalgasının yayılımı rüzgarın yönü ve şiddetinden etkilenir. Sesin yayılma yönü rüzgarın yönüyle aynı ise iletim ve alım arasındaki zaman aralığı azalır. Sesin yayılma yönü rüzgarın yönüne karşı ise zaman aralığı daha uzun olacaktır. Bu yöntem, rüzgarın üç boyutlu vektör bileşenlerini u, v ve w belirlemek için kullanılabilir. Bu bileşenlerden, sonuç rüzgar hızı ve yönü elde edilebilir (Chandran ve Bhakthavatchalu, 2016).

Fernandes vd. tipik yelkenli bir teknede otonom navigasyonu desteklemek amacıyla uçuş süresine dayanan iki eksenli bir ultrasonik anemometre tasarlamıştır. Her ortogonal yönde iki dönüştürücü, kısa bir darbe dizisinin vericisi ve alıcısı olarak kullanılır ve uçuş süresi her iki yönde de kaydedilmiştir. Sistem, düşük maliyetli bir Arduino-Nano kartına dayanmaktadır ve genel sistem bir rüzgar tüneline test edilmiştir. (Fernandes vd., 2017).

Mühendislik uygulamalarında ultrasonik anemometrelerin güç tüketimi her zaman çok yüksek olmuştur, bu da rüzgar hızı ölçümü için uzun süreli saha ölçümlerinde kullanımını sınırlayabilir. Fan vd. çalışmasında, bu sorunu çözmek için, rüzgarın hızını ölçmek için zaman farkı yöntemini kullanan düşük güçlü bir ultrasonik anemometre tasarlanmıştır. Ana işlemci olarak ultra düşük güç tüketimli STM32L476 mikroişlemcisi ve çevresel devrelerde yaygın olarak düşük güç tüketimli çipler kullanılmıştır. Veri hatalarını azaltmak için Kalman filtre algoritmaları kullanılmıştır. Yapılan tasarım testlerine göre daha düşük güç tüketimine ve daha yüksek hassasiyete sahip olduğu gösterilmiştir (Fan vd., 2018).

Ding vd. faz farkı yöntemiyle üç boyutlu ultrasonik rüzgar hızı ve yönü ölçümünü sunmuştur. Geleneksel zaman farkı yönteminin sensör titreşimine bağlı hatalarını aşmak için sürekli sürülen ultrasonik sensörler kullanılmıştır. Sensörler düzenli tetrahedral yapı ile

yerleştirilerek, faz farkı ile rüzgar hızını ve yönünü belirleyen bir matematiksel model geliştirilmiştir. Bu yöntem, düşük maliyetli, kompakt ve hızlı rüzgar ölçümü sağlayarak meteoroloji ve rüzgar enerjisi uygulamalarında geniş bir kullanım potansiyeline sahiptir (Ding vd., 2016).

Shan vd. üç ultrasonik sensör ve döngüsel korelasyon algoritması kullanarak rüzgar hızı ve yönünü ölçen yeni bir yöntem önermiştir. Sistem, çevresel etkileri ve parazitleri azaltarak daha doğru ve güvenilir ölçüm sağlar. Simülasyonlar ve gerçek ortam testleri, yöntemin rüzgar hızı için %3, yönü için 3° hata oranına sahip olduğunu göstermiştir. Bu yaklaşım, mühendislik ve meteorolojik uygulamalar için yüksek doğrulukta bir çözüm sunmaktadır (Shan vd., 2023).

Yu vd. çalışmasında, maden tünellerinde ortalama rüzgar hızını ölçmek için adaptif beş noktalı eşik yöntemi kullanan bir ultrasonik rüzgar hızı ölçüm sistemi sunulmuştur. Geleneksel tek noktalı ölçüm yöntemlerinin yetersizliklerini aşmak amacıyla, ultrasonik zaman uçuş süresini (TOF) kararlı şekilde ölçmek için adaptif bir eşik belirleme tekniği geliştirilmiştir. Önerilen sistem, bir rüzgar tüneli deney platformunda test edilmiş ve 0-12.5 m/s rüzgar hızlarında 0.09 m/s'den düşük bir hata oranı sağlamıştır. Bu yöntem, maden tünellerinde güvenli havalandırma için daha hassas ve güvenilir rüzgar hızı ölçümü sunmaktadır (Yu vd., 2022).

Santos vd. çalışmasında, ultrasonik dönüştürücülerle rüzgar hızı ölçümünde zaman uçuşu (ToF) duyarlılığını analiz edilmiştir. Çalışmada, sıcaklık değişimlerinin ses hızına ve dolayısıyla ToF tahminine etkileri incelenmiştir. Ultrasonik sensörlerin sıcaklığa duyarlılığı matematiksel olarak modellenmiş ve farklı rüzgar hızları ile sıcaklık değerleri için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, düşük sıcaklıklarda rüzgar hızı tahminindeki varyasyonların daha büyük olduğunu, yüksek sıcaklıklarda ise bu varyasyonların azaldığını göstermektedir. Çalışma, sıcaklık değişkenliğinin rüzgar hızı ölçüm sistemlerinin doğruluğu üzerindeki etkisini anlamaya katkı sağlamaktadır (Santos vd., 2019).

ToF ölçümünde en büyük zorluk, ultrasonik dalganın varış anını doğru bir şekilde belirlemektir çünkü bu, gürültü içinde kaybolur ve zarfı muhtemelen rüzgarın etkisiyle bozulacaktır. Fabiano Dos Santos vd. genişletilmiş bir Kalman Filtresi (EKF) ile sıfır geçişi dedektörü (ZCD) tekniği arasında bir kombinasyon algoritması sunmuştur. EKF yöntemi, gürültü giderme aşamasından ve gerçek ultrason zarfının tahmininden sorumludur, ZCD ise tahmin edilen sinyalin doğru ToF'unu tespit etmektedir. Her teknik için bulunan eksikliklerin çözümleri sunulmuştur (Fabiano Dos Santos vd., 2019).

Menicanin vd. rüzgarın hızını ve yönünü ölçmek için NTC kalın film segmentli termistör kullanılarak yeni tek eksenli bir anemometre oluşturmuştur. NTC segmentli termistör, bir rüzgar sensörü olarak kullanılmıştır. Bu tasarım, Hava akışı ve havanın hızı nedeniyle oluşan ısı kaybı prensibiyle çalışmaktadır. Hava sıcaklığı, NTC kalın film segmentli termistör ile ölçerek rüzgar hızı, -20 ile $+40^{\circ}\text{C}$ arasındaki farklı giriş hava sıcaklıkları için 1'den 15 m/s'ye kadar değişti. Rüzgar yönü ise NTC segmentli termistörün iç elektrotlarındaki voltaj farkları ölçülerek belirlenmiştir. Termistörden geçen DC ısıtma akımı, direnç değişiklikleri nedeniyle oluşan ısı kaybı ile değişmiştir (Menicanin vd., 2008).

Yi vd. sabit güç (CP) modunda çalışan paketlenmiş mikro elektromekanik sistemler teknolojisi (MEMS) ile üretilmiş rüzgar sensörünün modellenmesi açıklamıştır. Önerilen model, ısı iletimi ve zorlanmış konveksiyon (Transport phenomena) teorisine dayanmaktadır. Toplam çıkış doğru akım (DC) voltajının rüzgar hızının karekökü ile orantılı olduğunu ve V_x ile V_y 'nin rüzgar yönüne göre kosinüs fonksiyonuna dayalı olarak değiştiğini gösterilmiştir. Testler, rüzgar tüneline gerçekleştirilmiş olup, ölçülen sonuçların sunulan model ile uyumlu olduğunu göstermiştir. Rüzgar hızı için voltajın göreceli hatası, 30 m/s'ye kadar %14'ten azdır, rüzgar yönü için ise 0° ile 360° arasında %10.7'den fazla olmadığını belirlenmiştir (Yi vd., 2019).

Makinwa ve Huijsing rüzgar tarafından asimetrik olarak soğutulan ısıtılmış bir silikon çipinden oluşan bir sensör tasarımı yapmıştır. Arayüz, çipin tamamını hava akışının üzerinde sabit bir sıcaklıkta tutmak için, ısıtıcı olarak kullanılan çip üzerindeki dört direncin dağıttığı gücü dinamik olarak düzenlenmiştir. Bu dirençleri sürmek için gereken voltaj, termal Sigma Delta ($\Sigma\Delta$) modülasyon teknikleri kullanılarak oluşturulan bit akışlarıdır. Bu bit akışları doğrudan harici bir mikroişlemciye bağlanmıştır ve her bir ısıtıcıda dağıtılan gücü temsil eden dijital kelimeleri elde etmek için ayrıştırılmıştır. Isıtıcılarda dağıtılan gücün ölçülmesinden rüzgar hızının ve yönünün doğru bir şekilde belirlenebileceği gösterilmiştir (Makinwa ve Huijsing, 2001).

Gao vd. sıcaklık etkisi kullanarak bir mikromakineli 2-D anemometre tasarlamıştır. Sekiz termistör, iki dikey yönde simetrik olarak düzenlenmiştir ve her yönde dört termistör bir Wheatstone köprüsü oluşturulmuştur. Sekiz termistör aynı anda hem ısıtma hem de algılama elemanı olarak işlev görmektedir. Köprü üzerindeki terminal voltajı ve sabit akım kaynağı altında köprü çıkış voltajı sırasıyla rüzgar hızı ve yönünü ölçmek için kullanılmıştır (Gao vd., 2019).

Aleksic vd. çalışmasında, NTC kalın film segmentli termistörler, anemometre olarak kullanılmak üzere geliştirilmiş ve serigrafi yöntemiyle basılmıştır. Tek eksenli anemometre, termal yalıtımlı malzeme üzerine monte edilerek, DC voltaj ve sıcaklık optimizasyonu ile rüzgarı algılar. Üç eksenli anemometre ise, rüzgar hızı, hava sıcaklığı ve nem ölçümü için beş sensörle donatılmıştır. Her iki cihazın performansı, diğer anemometrelerle karşılaştırmalı olarak test edilmiştir. Rüzgarın hız ölçümü %3 hassasiyetle yapabilen üç eksenli anemometre, basit ve maliyet-etkin bir yapıda sunulmuştur (Aleksic vd., 2019).

Menicanin vd., NTC kalın film segmentli termistörler kullanarak rüzgar hızı ve yönünü ölçebilen yeni bir tek eksenli anemometre tasarlamıştır. Anemometre, hava akışı ve hava hızından kaynaklanan ısı kaybı ilkesine dayanmaktadır. NTC termistör, DC sabit voltajla kendini ısıtarak çalışmakta ve direnç değişiklikleri ile ısı kaybı ölçülmektedir. Farklı hava sıcaklıklarında ve rüzgar hızlarında test edilen anemometre, 1-15 m/s arası rüzgar hızları için doğrulukla çalışmıştır. Rüzgar yönü, termistörün iç elektrotlarındaki voltaj farklarıyla belirlenmiştir. Hava sıcaklığı, soğuk NTC segmentli termistörle ölçülmüştür ve termistörler özel bir iklim odasında kalibre edilmiştir (Menicanin vd., 2008).

Que vd. çalışmasında, termal anemometreler için yeni bir sıcaklık telafisi yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemde, akış sensöründen bağımsız bir sıcaklık sensörü kullanılarak sıcaklık dalgalanmaları, tek bir Wheatstone köprüsü içinde telafi edilmiştir. Tasarım, sensörlerin sıcaklık katsayılarının (TCR) eşit olmasını gerektirmediğinden daha esnek bir kullanım sunmaktadır. Ayrıca, farklı malzemeler kullanılarak sıcaklık sensörü ve akış sensörü arasındaki TCR farkları optimize edilebilmektedir. Önerilen yöntem, akış hızı dalgalanmalarını etkilemeden sıcaklık değişimlerini başarıyla dengelemekte ve 30–60°C arasındaki ortam sıcaklıklarında anemometre hatasını %30'dan %2'ye düşürebilmektedir. Bu telafi yöntemi, özellikle düşük sıcaklık değişimlerinde etkili olup, sensör bant genişliğinin altındaki sıcaklık dalgalanmalarına uygundur (Que vd., 2011).

Ye vd. çalışmasında, yüksek hassasiyetli uygulamalar için sekiz ısıtıcı ve sekiz termistörden oluşan yeni bir 2D MEMS termal rüzgar sensörü tasarlanmıştır. Sensör, çapraz (cross-type) ve X şeklinde (saltire-type) iki ayrı algılama grubuyla rüzgar hızını ve yönünü bağımsız olarak ölçmekte, ardından bu verileri birleştirerek kesin sonuç elde etmektedir. Yapılan testler, sensörün 33 m/s'ye kadar rüzgar hızını %1'den düşük hata oranıyla ve 360° rüzgar yönünü $\pm 1,5^\circ$ hata ile ölçebildiğini göstermektedir. Simülasyon ve deneysel veriler, bu tasarımın yüksek doğruluk, düşük güç tüketimi ve uzun süreli kullanım için uygun olduğunu kanıtlamaktadır (Ye vd., 2018).

Yao vd. çalışmasında, düşük akış hızlarında yüksek doğruluk sağlayan MEMS tabanlı bir termal zaman-gidiş (ToF) gaz akış ölçer geliştirilmiştir. ToF teknolojisi, ısı dalgasının ısıtıcıdan algılayıcıya geçiş süresini ölçerek akış hızını belirlemektedir. Geleneksel ToF sensörlerinin nem ve partiküllere karşı hassasiyeti, bu çalışmada MEMS tabanlı yalıtım tabakası ile giderilmiştir. Sensör, akış yönüne paralel yerleştirilen bir ısıtıcı ve algılama elemanı içerirken, elektriksel sinyal tek frekansta sağlanarak faz kayması yöntemiyle hassas ölçüm yapılmaktadır. Testler, sensörün 0.15 ila 30 m/s arasında geniş bir dinamik aralıkta güvenilir ölçümler sunduğunu ve yüksek doğrulukla yeniden üretilebilirlik sağladığını göstermektedir. Sensör, şehir gazı ölçümü ve medikal infüzyon pompaları gibi farklı uygulamalar için uygunluk göstermektedir (Yao vd., 2010).

Wang vd. çalışmasında, sıcaklık dengeli (TB) modda çalışan seramik MEMS termal rüzgar sensörünün sıcaklık etkilerini incelenmiştir. Sensör, ısıtılmış bir plakanın asimetrik soğuması prensibiyle rüzgar hızını ve yönünü ölçmektedir. TB modunda, ısı dağılımı dengelenerek çevresel sıcaklık değişimlerinin etkisi minimize edilmiştir. Ancak, hava akışı ve sensör malzemelerinin sıcaklık bağımlılığı nedeniyle sıcaklık kaymaları meydana gelebilir. Çalışmada, sensörün dört dış ısıtıcı ve dört iç termistör kullanarak sıcaklık farklarını iptal ettiği gösterilmiştir. Rüzgar tüneli testleri, rüzgar hızının ortam sıcaklığından doğrusal olarak etkilendiğini, ancak rüzgar yönünün sıcaklık değişimlerinden bağımsız olduğunu göstermiştir. Sıcaklık düzeltilmesi sonrasında, sensör rüzgar hızını ± 1 m/s ve rüzgar yönünü $\pm 2^\circ$ hata ile ölçerek güvenilir performans sergilemiştir. Bu sensör, çevresel sıcaklık değişimlerinin önemli olduğu uygulamalar için etkili bir çözüm sunmaktadır (Wang vd., 2018).

Sosna vd. çalışmasında, sabit sıcaklık farkı (CTD) modunda çalışan termal akış sensörleri için yeni bir sıcaklık telafisi devresi geliştirilmiştir. Wheatstone köprüsü devresi kullanılarak, ortam sıcaklığı değiştikçe ısıtıcı sıcaklığı sabit tutulmaktadır. Ortam sıcaklık değişimlerini dengelemek için ek bir sıcaklık sensörü kullanılmış ve tasarım, sensörün malzeme ve sıcaklık katsayısı (TCR) değerinden bağımsız çalışmasını sağlamıştır. Potansiyometre kullanılarak sıcaklık sensörü ve ısıtıcı arasındaki direnç ve TCR ayarlanabilir, böylece platin, alüminyum veya tungsten-titanium alaşımları gibi farklı malzemeler kullanılabilir. Testler, 20°C ile 65°C arasındaki ortam sıcaklıklarında çıkış hatalarının %1'e düşürüldüğünü ve akış hızı ölçümünde daha doğru sonuçlar elde edildiğini göstermektedir. Bu devre, sabit ısıtıcı sıcaklığını koruyarak sıcaklık değişimlerinin etkisini minimize etmektedir (Sosna vd., 2010).

Nam vd. çalışmasında, termal akış sensörlerinin sıcaklık telafisi için iki yöntem önerilmektedir. İlk yöntem, Wheatstone köprüsündeki ısıtıcı sensör (Rh) ile akış sensörü (Rf) arasındaki eğimi değiştirerek sıcaklık telafisi sağlar. İkinci yöntem ise, direnç oranını ayarlayarak Rf ve Rh arasındaki eğimi eşitlemeyi amaçlar. Deneyler, ikinci yöntemin daha başarılı olduğunu ve ölçüm hatalarını %1'in altına düşürdüğünü göstermektedir. Ayrıca, bu yöntem gerçek zamanlı voltaj ve akım ölçümlerine ihtiyaç duymadığı için daha pratik ve hassas bir çözüm sunmaktadır. İlk yöntemde maksimum hata oranı %3,5 olarak belirlenmiştir. Sonuçlar, ikinci yöntemin daha basit ve etkili bir sıcaklık telafisi sağladığını ortaya koymaktadır (Nam vd., 2004).

Schlaberg vd. çalışmasında, dar bant genişliğine sahip ultrasonik sensörler kullanarak rüzgar hızı ve yönünü ölçmek için yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Ses dalgalarının iletim süresi (ToF) ölçülerek rüzgar hızı belirlenirken, rüzgar yönü ikinci bir sensör çifti ile hesaplanmaktadır. Dar bant genişlikli sensörlerin düşük genlikli sinyaller üretmesi nedeniyle doğrudan tespit zorluğu, farklı frekansta iki sinyal patlaması kullanılarak çözülmüştür. Faz farkı yöntemiyle ToF hesaplanarak rüzgar hızı elde edilirken, x ve y yönlerinde yapılan ölçümlerle rüzgar yönü belirlenmiştir. Bu yöntem, düşük genlikli sinyalleri doğru şekilde tespit etmeyi, rüzgar hızı ve yönünü yüksek hassasiyetle ölçmeyi sağlamaktadır. Ayrıca, faz karşılaştırma yöntemi ile ortam gürültüsünün etkilerini azaltarak ölçüm doğruluğunu artırmaktadır (Schlaberg vd., 2013).

Kim vd. çalışmasında, MEMS teknolojisiyle tasarlanmış bir mikromekanik akış sensörünü tanıtılmıştır. Bu sensör, tek bir ısıtıcı kullanarak rüzgar yönü ve hızını aynı anda ölçmektedir. Isıtıcı ile dedektörler arasındaki boşluk optimizasyonu, termal iletimi azaltarak sensörün hassasiyetini artırmıştır. Yapılan testler, boşluklu sensörün, boşluk olmayan sensöre göre iki kat daha hassas olduğunu göstermektedir. Sensör, 80 mW güç tüketimi ve birkaç saniyelik yanıt süresiyle çalışmakta, rüzgar yönü dört dedektörden alınan verilerle, hız ise ısıtıcı gücü değişimiyle hesaplanmaktadır. Bu sensör, 5°'lik maksimum açı farkı ve 0.5 m/s'den daha düşük hız hatasıyla doğru ölçüm yapmaktadır. Düşük güç tüketimi ve küçük boyutuyla taşınabilir akış ölçerlerde kullanılabilir (Kim vd., 2003).

Huang çalışmasında, mikromekanik termal zaman-gidiş (ToF) akış sensörleri ve uygulamalarını inceleyen bir çalışma sunulmuştur. Termal zaman-gidiş teknolojisi, akış hızını ve sıvıların ısı özelliklerini bağımsız olarak ölçerek geleneksel kalorimetrik sensörlerin bazı sınırlamalarını aşmaktadır. Bu teknoloji, çok parametrelili ölçümler yapabilme, kendi kendini kalibre edebilme ve gaz ile sıvı karışımlarında hassas ölçüm

yapabilme avantajları sunmaktadır. Sensörler, ısıtıcı ve algılama elemanları arasındaki zaman farklarını kullanarak akış hızını belirler ve sıvıların ısıl iletkenliği ile difüzivitesini ölçebilir. Mikromekanik üretim süreçleri sayesinde düşük maliyetli ve geniş dinamik ölçüm aralığına sahip olan bu sensörler, özellikle mikroakışkan uygulamalarında önemli bir potansiyel taşımaktadır (Huang, 2022).

Gao vd. çalışmasında, 2D rüzgar sensörleri için kendiliğinden ısıtılan çift Wheatstone köprüsü yapılandırmasını geliştirilmiştir. Bu tasarımda, merkezi bir ısıtıcı yerine sekiz termistör kullanılmış ve her biri hem ısıtıcı hem de sıcaklık algılama elemanı olarak işlev görmüştür. İki dikey yönde simetrik olarak yerleştirilen termistörler, rüzgar hızını ve yönünü ölçmek için çift Wheatstone köprüsü oluşturmuştur. Sabit akım kaynağı ile beslenen sensör, uç gerilimden rüzgar hızını ve köprü çıkış geriliminden rüzgar yönünü belirlemiştir. Simülasyon ve deney sonuçları, sensörün 0-40 m/s hız aralığında ± 2 m/s hata ile ve 0° - 360° yön aralığında $\pm 3^\circ$ hata ile ölçüm yapabildiğini göstermektedir. Sensör, 40 m/s rüzgar hızında 235 mW güç tüketimiyle çalışırken, hız arttıkça hassasiyetin azaldığı gözlemlenmiştir. Çift Wheatstone köprüsü yapılandırması, düşük güç tüketimi ve yüksek doğruluk sunarken ölçüm ve kontrol devrelerini de sadeleştirmiştir (Gao vd., 2019).

Chen vd., yüzey mikromakineleme ve üç boyutlu montaj tekniklerini kullanarak yeni bir sıcak tel (hot-wire) anemometresi geliştirmiştir. Sensör, Pt/Ni/Pt malzemeden oluşan bir termal eleman içerir ve destek kirişleriyle yükseltilmiş yapıdadır. Anemometre, sabit akım (CC) ve sabit sıcaklık (CT) modlarında çalıştırılmış ve 20 m/s'ye kadar hava akış hızlarında test edilmiştir. Cihazın maksimum kesme frekansının yaklaşık 10 kHz olduğu belirlenmiştir. Yeni tasarım, silikon kullanılmadan üretildiği için daha düşük maliyetli olup, esnek yüzeyler üzerine büyük ölçekli diziler halinde entegre edilebilir. Yapılan deneyler, ısıtıcı elemanda dağıtılan gücün ölçülmesiyle hava hızının ve yönünün hassas şekilde belirlenebileceğini göstermiştir (Chen vd., 2003).

Chen vd., mikromakine edilmiş bir silikon termal rüzgar sensörünün ortam neminden nasıl etkilendiğini araştırmıştır. Sensör, merkezi bir ısıtıcı ve dört sıcaklık sensöründen oluşarak, ısıtılmış yüzey üzerindeki akış kaynaklı sıcaklık farklarını ölçmektedir. Ortam havasının yoğunluk, viskozite, ısı iletkenliği ve özgül ısı kapasitesi gibi özellikleri teorik olarak incelenmiş ve farklı bağıl nem seviyelerindeki sensör performansına etkileri değerlendirilmiştir. Yapılan deneylerde, yüksek sıcaklık ve nem seviyelerinde ölçülebilir bir etkinin olduğu gözlemlenmiştir. Sonuçlar, sensörün pratik uygulamadaki doğruluğunu artırmak için önemli bir referans oluşturmaktadır (Chen vd., 2014).

Gutarra vd., 3D eklemeli üretim yöntemiyle düşük maliyetli bir kaplı anemometre geliştirmiştir. ABS malzemeden üretilen altıgen yapıya sahip anemometre, bir kodlayıcı ve fototransistör sensörü kullanarak rüzgar hızını PWM darbeleriyle ölçmektedir. Arduino Uno mikrodenetleyicisi, ölçüm verilerini işleyerek rüzgar hızına dönüştürmüştür. Düşük türbülanslı bir rüzgar tüneline kalibre edilen cihaz, ticari anemometrelerle karşılaştırıldığında %96,8 doğruluk göstermiştir. Yaklaşık 100 USD üretim maliyetine sahip olan anemometrenin, geniş çaplı üretimde daha düşük maliyetle üretilbileceği ve rüzgar enerjisi projelerinin maliyetlerini azaltabileceği öngörülmektedir (Gutarra vd., 2020).

Le Duff vd., lazer Doppler anemometre (LDA) tekniğini kullanarak gerçek zamanlı parçacık algılama ve hız ölçümü gerçekleştiren bir sistem geliştirmiştir. Bu sistem, bir parçacığın ölçüm hacminde olup olmadığını belirlemek ve hızını tahmin etmek için iki Kalman filtresi kullanmaktadır. İlk Kalman filtresi, Doppler sinyal genliğini tahmin ederek bir eşik değeriyle karşılaştırmış, ikinci filtre ise Genişletilmiş Kalman Filtresi (EKF) ile parçacık hızını tahmin etmiştir. Deneysel doğrulamalar, bir boru içerisindeki hava akışının hızını ölçerek gerçekleştirilmiş ve laminar akış koşulları altında doğrulanan hız profilleri elde edilmiştir. Bu yöntem, gerçek zamanlı ölçümler için veri depolama ihtiyacını ortadan kaldırarak düşük maliyetli entegre lazer Doppler sensörleri tasarlamak için uygun bir çözüm sunmaktadır (Le Duff vd., 2005).

Dong vd., seramik alt tabaka üzerinde üretilmiş bir rüzgar sensörünün termal asimetri telafisini incelemiştir. Sensör, merkezi bir ısıtıcı ve dört sıcaklık sensörü ile hava akışı kaynaklı sıcaklık dağılımını ölçmektedir. Ambalajlama hataları ve çevresel sıcaklık değişikliklerinden kaynaklanan ısıl asimetri, dört yardımcı ısıtıcı ile düzeltilmiştir. Bir mikro kontrol birimi (MCU), sıfır rüzgar hızında termal asimetriyi algılayarak geri besleme sinyalleri oluşturmuş ve ısı dağılımını ayarlamıştır. Bu yöntemle çıkış sinyali dalgalanması 10 mV seviyesine düşürülmüş ve rüzgar yönü testlerinde mutlak hata 2°'nin altına indirilmiştir (Dong vd., 2010).

Dong vd., Au–Au wafer bonding teknolojisi ile iki boyutlu bir rüzgar sensörü geliştirmiştir. Sensör, sıcak yüzeydeki ısı dağılımını tespit ederek çalışmakta olup, silikon algılama çipi ve seramik paketleme alt katmanından oluşmaktadır. 46 µm kalınlığındaki silikon diyafram, ısı kapasitesini azaltarak enerji tüketimini ve yanıt süresini iyileştirmiştir. Sensör, 0.5-40 m/s rüzgar hızlarını 2.73 mW/ms^{-1} hassasiyetle ölçebilmekte, 2 mW başlangıç gücü gerektirirken 1.4 saniyeden kısa yanıt süresi sunmaktadır. Rüzgar yönü, sıcaklık farklarıyla belirlenmiş ve $\pm 2^\circ$ hata ile 360° doğruluk sağlanmıştır (Dong vd., 2012).

Aleksi vd., rüzgar hızı ve yönü ölçümünde kullanılan NTC kalın film termistörlerin elektrot etkilerini incelemiştir. NTC 3K3 95/2 pastası kullanılarak farklı geometrilere üretilen termistörlerin hacim dirençliliği, elektrot etkisi ve geometrik parametreleri analiz edilmiştir. Deneysel veriler, sıcaklıkla değişen direnç özelliklerini değerlendirerek hacim dirençliliği ile geometri arasındaki ilişkiyi açıklayan bir model geliştirmiştir. Sonuçlar, metal difüzyonunun hacim dirençliliği üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermiş ve bu bilgi, gelişmiş sensör tasarımlarında kullanılabilecek yeni bir yöntem sunmuştur (Aleksi vd., 2006).

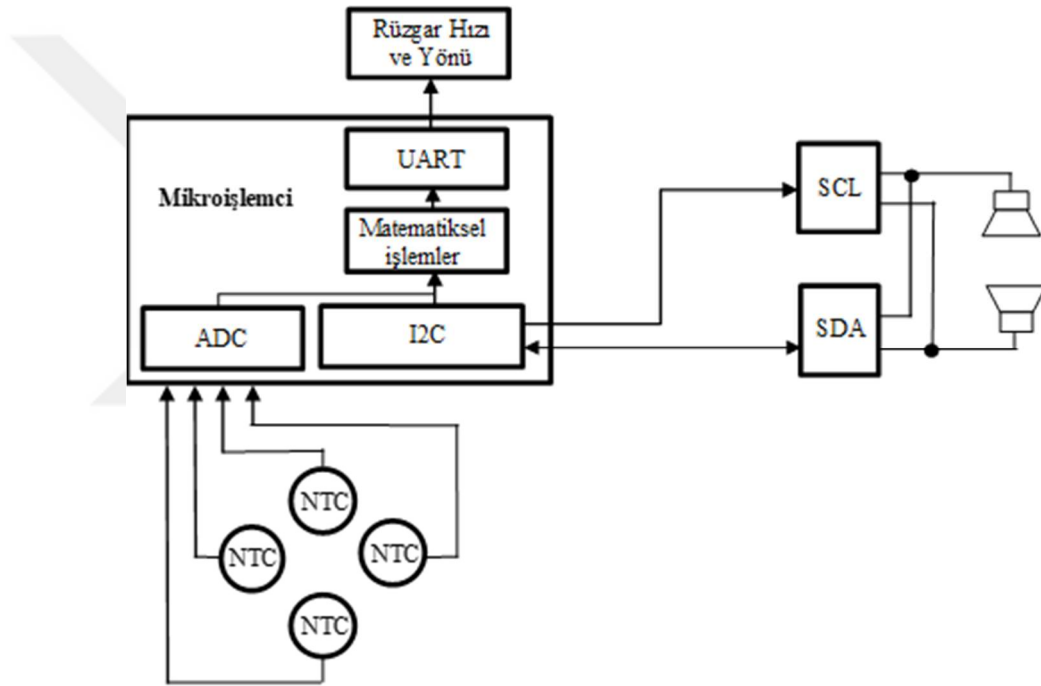
Soukar ve Yazgan çalışmasında, NTC sensörleri ve Auto-Zero fonksiyonunu kullanarak bir rüzgar sensörü tasarımını sunulmaktadır. Sistem, NTC sensörlerinden elde edilen sıcaklık farklarını kullanarak rüzgar yönü ve hızını daha doğru bir şekilde ölçmektedir. Auto-Zero fonksiyonu, çevresel koşullardan kaynaklanan ofset hatalarını düzelterek ölçüm doğruluğunu artırmaktadır. MATLAB simülasyonu, Auto-Zero kalibrasyonu sonrası hata oranlarının %1-3 aralığına düştüğünü göstermektedir. Düşük maliyetli ve yüksek hassasiyetli bu tasarım, meteoroloji, yenilenebilir enerji ve hava güvenliği gibi alanlarda kullanılabilir (Soukar ve Yazgan, 2024).

Birinci bölümde, rüzgar sensörü sisteminin amacı ve gerekliliği ile ilgili genel bilgiler sunulmuş, ayrıca önceki çalışmalarda yapılan benzer araştırmaların detayları ele alınmıştır. Bu bağlamda, rüzgarın hızını ve yönünü ölçmek için kullanılan çeşitli sensör teknolojileri ve uygulama alanları tartışılmıştır. Şimdi ise, bu çalışmanın temel bileşenleri olan elektronik kart tasarımı, şematik tasarımı, PCB tasarımı ve yazılım çalışmaları gibi teknik detaylara odaklanacaktır. İkinci bölümde, rüzgar sensörü sisteminin işlevselliğini sağlayan tasarım süreçleri ve kullanılan teknolojiler anlatılacak ve bu tasarımların nasıl entegre edildiği üzerinde durulacaktır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Sistemin Çalışma Prensipleri

Bu çalışmada, hacim sınırlamalı uygulamalar için Şekil 1’de gösterildiği gibi iki ultrasonik alıcı-verici kullanarak rüzgar hızını ve dört NTC termistör ile rüzgar yönünü tespit eden bir sensör tasarlanmıştır. Tasarım, hareketli parçaların bulunmaması, taşınabilirlik ve uzun ömürlü kullanım sağlaması nedeniyle bu tür uygulamalar için ideal bir çözüm olarak öne çıkmaktadır.



Şekil 1. Sistemin blok diyagramı

Ultrasonik sensörleri, herhangi bir hareketli parça içermemesi, hızlı tepki vermesi, az bakım ve buzlanma koşullarında sürekli çalışma özelliğine sahip olması gibi avantajlarından dolayı rüzgar ölçümlerinde tercih edilmektedir (Yadav vd., 2017) .

Rüzgar yönü sıcaklık ölçümü ile belirlenmesi, hassas ve kararlı bir ölçüm sağlamaktadır. NTC termistörleri, dış etkenlere karşı dayanıklı olmaları ve düşük enerji tüketimine sahip olmaları nedeniyle uzun süreli, düşük güç tüketimi gerektiren uygulamalar için avantaj sağlamaktadır (Makinwa & Huijsing, 2001).

Literatürdeki tasarımlar incelendiğinde, bu çalışmada kullanılan sensör kombinasyonunun seçme nedenleri şu şekilde özetlenebilir; NTC termistörleri rüzgar hızı hava akışı nedeniyle oluşan sıcaklık farklarını algılayarak ölçülebilir; ancak bu yöntem, rüzgar hızındaki ani değişikliklere karşı yavaş tepki verebilir ve yüksek doğruluk sağlamayabilir. Buna karşın, ultrasonik sensörleri ile daha hızlı ve hassas rüzgar hız ölçümü yapılabilir. Ayrıca NTC termistörleri, hava akışına bağlı sıcaklık değişimlerine duyarlı olduğu için rüzgar hızını tam olarak yansıtmayabilir ve çevresel sıcaklık değişikliklerine karşı daha fazla hassasiyet gösterebilir. Bu da sensörlerinin kalibrasyon gereksinimlerini artırır. Ultrasonik sensörler ise bu tür çevresel etkilerden bağımsız olarak daha doğru ölçüm sağlayabilir. Ultrasonik sensörlerle 2 veya 3 eksenli rüzgar ölçümü yapmak, her sensör için ayrı sürücü ve alıcı devre gerektirdiği için maliyeti ve devre karmaşıklığını artırır. Çalışmada tasarlanan sensör hacim sınırlamalarına sahip olduğundan, ikiden fazla ultrasonik alıcı-verici kullanımı cihazın boyutlarını büyütür, bu da çalışmanın amacına uygun değildir. Bu nedenlerle, iki ultrasonik sensör ve dört NTC termistöründen oluşan kombinasyon, rüzgarın hızını ve yönünü ölçmek için sade tasarım ile minimum yer kaplayan ve maliyet açısından verimli bir çözüm sunar.

NTC termistörleri, düşük enerji tüketimi sağlayan pasif bileşenlerdir, bu da uzun süreli kullanım için avantaj sağlamaktadır. Ultrasonik sensörler ise rüzgar hızını hassas ve doğru bir şekilde ölçerken düşük enerji tüketimi ile çalışmaktadır.

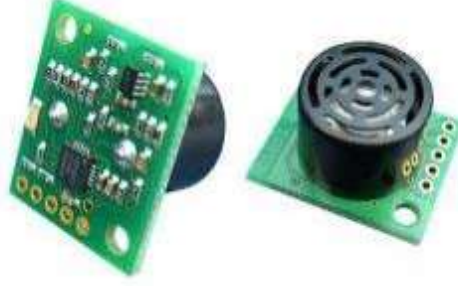
Dört NTC termistör ile dört yön (Kuzey, Güney, Doğu ve Batı) için rüzgar yön ölçümü yaparken, iki ultrasonik alıcı-verici başlığı rüzgar hız ölçümü için yeterlidir. Bu kombinasyon, maliyet ve performans dengesi açısından ideal bir çözüm olarak değerlendirilmektedir.

2.2. Ultrasonik Dönüştürücülerinin Arayüzü

2.2.1. SRF02 Ultrasonik Alıcı-Verici

Şekil 2'de, SRF02 ultrasonik sensörü gösterilmektedir. İki adet SRF02 ultrasonik dönüştürücü kullanarak ultrasonik dalgaların iletimi ve alımı sağlanabilir. Bu dönüştürücüler yüksek güvenilirlik, hafiflik ve yüksek hassasiyet özelliklerine sahiptir. 40 kHz çalışma frekansına sahip olan bu dönüştürücüler 15cm kadar mesafe aralığında çalışabilir ve 40°'lik bir görüş açısına sahiptir , bu da geniş bir algılama alanı sunar.

I2C ve UART iletişim protokollerini destekleyerek, farklı mikrodenetleyici sistemleriyle kolay entegrasyon sağlar (URL-1, 2024).

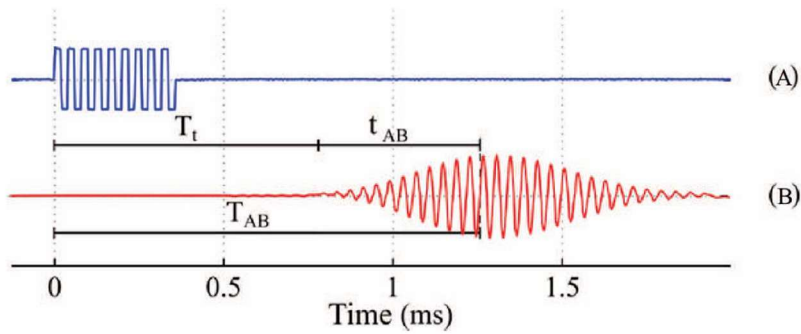


Şekil 2. SRF02 Ultrasonik alıcı-verici

2.2.2. Çalışma Prensibi

Uçuş süresi (ToF) Yöntemi, ultrasonik ses dalgalarının bir dönüştürücüden diğerine ulaşma süresini ölçer (T_t). Bu süre, rüzgarın yönü ve rüzgarın şiddeti tarafından doğrudan etkilenir. Rüzgar, ses dalgalarının hızını, yönlendirildikleri eksene göre hızlandırır veya yavaşlatır. Bu etkileşim, rüzgar hızını hesaplamak için kullanılır.

Genellikle alınan sinyalin algılanmasında bir gecikme t_{AB} olur. Şekil 3'de gösterildiği gibi genellikle ölçülen zaman T_{AB} 'dir. T_{AB} ve T_t arasındaki zaman farkı t_{AB} elektronik gecikme zamanı olarak bilinir ve kalibrasyon yoluyla elde edilebilir. Bu şekilde, rüzgar hız hesaplamasını kolaylaştırmak için sabit bir değer haline gelir (Lopes vd., 2017) .



Şekil 3. Ultrasonik başlığının gönderdiği (A) ve aldığı (B) sinyaller

İleri yönde (rüzgarla aynı yönde) ultrasonik dalganın geçiş süresi T_{ileri} ve geri yönde (rüzgarın tersi yönde) geçiş süresi T_{geri} olmak üzere iki farklı süre ölçülür;

- İleri Yön:

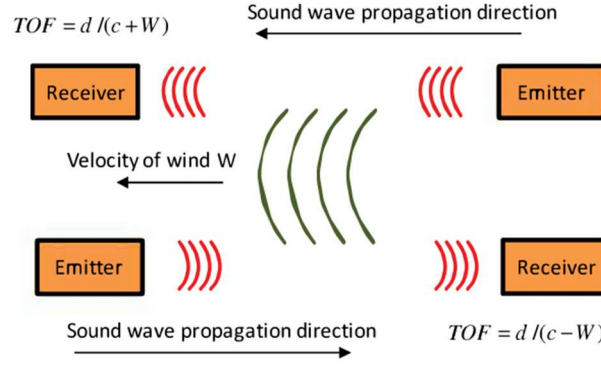
$$T_{ileri} = \frac{d}{c + v} \quad (1)$$

- Geri Yön:

$$T_{geri} = \frac{d}{c - v} \quad (2)$$

Burada d dönüştürücüler arası mesafe, c ses hızı ve v rüzgarın hızını temsil eder (Yadav vd., 2017) (Schlaberg vd., 2013). İleri ve geri yöndeki geçiş sürelerinin farkı kullanılarak, rüzgar hızı Denklem 3'teki formül ile hesaplanır (Lopes vd., 2017) :

$$v = \frac{d(T_{geri} - T_{ileri})}{T_{geri} \cdot T_{ileri}} \quad (3)$$



Şekil 4. Rüzgar hızının ses yayılımıyla aynı ve zıt yönlerde ToF üzerindeki etkisi

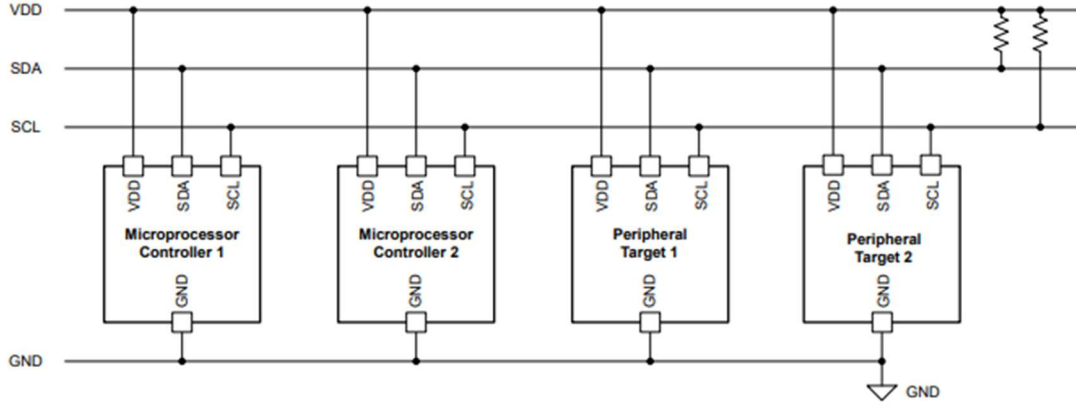
Şekil 4'te ise, rüzgar hızının ses yayılımı yönüyle aynı ve zıt yönlerdeki ToF üzerindeki etkisi gösterilmektedir (Schlaberg vd., 2013).

2.2.3. I2C Protokolü

SRF02 ultrasonik dönüştürücüleri veri iletimi için 2 farklı haberleşme protokolü (I2C, UART) kullanmaktadır. Bu çalışmada, SRF02 ultrasonik dönüştürücüleri STM32F030C8 mikroişlemcisiyle veri alışverişi sağlamak için I2C protokolü kullanılmıştır.

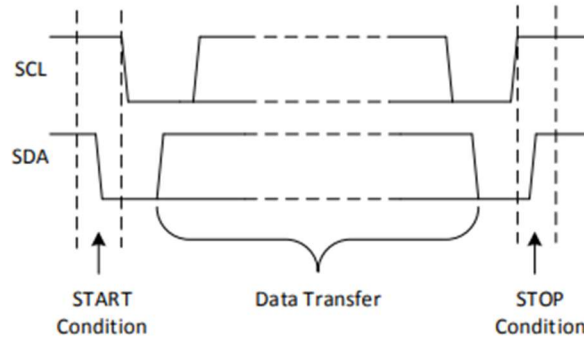
I2C haberleşme protokolü, tüm cihazlar için iki ortak iletişim hattı (seri veri hattı (SDA) ve seri saat hattı (SCL)) kullanarak çift yönlü ve yarı-dupleks bir iletişim sağlar. Bu protokol, birden fazla denetleyici ve hedef cihazı destekler. Ayrıca, donanımsal olarak hatta pull-up dirençleri gereklidir.

SCL hattı, denetleyici tarafından kontrol edilen seri saat hattıdır ve verilerin senkronize bir şekilde hedef cihazdan veya hedef cihaza iletilmesini sağlar. SDA hattı ise veri iletimi ve alımı için kullanılır. I2C yarı-dupleks bir protokoldür, yani aynı anda yalnızca bir cihaz veri gönderir. İletişim, hedef cihazların benzersiz adresleri üzerinden sağlanır. Şekil 5'te tipik bir I2C uygulaması gösterilmektedir.



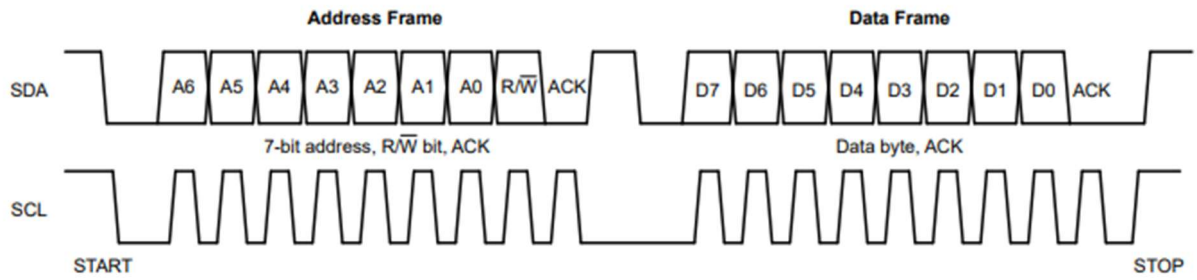
Şekil 5. Tipik I2C Uygulaması

I2C iletişimi, bir I2C BAŞLAT koşulu ile başlatılır. Cihaz, veri yolunu talep etmek için önce SDA hattını düşük, ardından SCL hattını düşük duruma çekerek I2C veri yolunun iletişimi başlatır. Bu işlem, veri yolundaki diğer cihazların iletişimlerini durdurmalarını sağlar. İletişim tamamlandığında, önce SCL'yi, ardından SDA'yı yüksek duruma getirilir, bu da I2C DURDUR koşulunu işaret eder. DURDUR koşulu, diğer cihazların veri yolunu kullanmasına veya aynı cihazın başka bir cihazla iletişim kurmasına izin verir. Şekil 6'da, I2C Başlat (Start) ve Durdur (Stop) sinyalleri gösterilmektedir (Valdez & Becker, 2015).



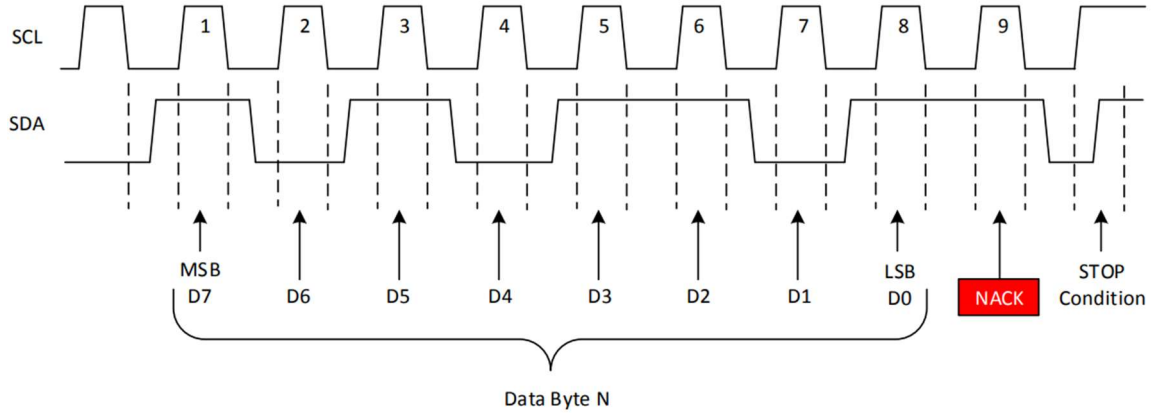
Şekil 6. I2C Başlat (Start) ve Durdur (Stop) sinyalleri

I2C haberleşmesinde her cihazın benzersiz bir 7 bitlik I2C adresi vardır ve bu adresler kullanılarak veriler gönderilir veya alınır. 8'inci bit, okuma (1) veya yazma (0) yapılacağını belirten R/W bitidir. İletişimin başarılı olduğunu doğrulamak için bir ACK biti kullanılır; iletişim başarısız olmuşsa (NACK) biti kullanılır (Wu, 2022).



Şekil 7. I2C veri çerçeveleri

Her veri baytından (adres baytı da dahil) sonra alıcı, veriyi başarıyla aldığını ve başka bir baytın gönderilebileceğini bildiren bir ACK biti gönderir. Alıcı, ACK bitini göndermek için saat periyodunun düşük fazında SDA hattını aşağı çeker, böylece yüksek faz sırasında SDA hattı sabit düşük kalır. Eğer SDA hattı saat periyodu boyunca yüksek kalırsa, bu bir NACK olarak yorumlanır. NACK, alıcının veri veya komutları anlamadığı, daha fazla veri alamadığı ve okuma işlemi başarılı bir şekilde tamamlanmadığını belirtmek için oluşabilir. Şekil 7'de, I2C veri çerçeveleri gösterilmektedir ve Şekil 8'de, NACK sinyal örneği verilmiştir. (Valdez & Becker, 2015).



Şekil 8. NACK sinyal örneği

SRF02'nin I2C modunda çalışması için aşağıdaki adımları takip edilir;

I2C veri yolundaki cihazlar arasında adresleme yapılabilmesi amacıyla SRF02'nin varsayılan adresi 0xE0 olarak belirlenmiştir, ancak bu adres kullanıcı tarafından 16 farklı adresten birine değiştirilebilir (0xE0, 0xE2, 0xE4....0xFE). Bu özellik, tek bir I2C hattı üzerinde birden fazla SRF02'nin kullanılmasına olanak tanır. Bu çalışmada (0xE0 ve 0xE2) adresleri kullanılmıştır.

SRF02'nin I2C haberleşmesi, belirli komutlar aracılığıyla gerçekleşir. Ölçüm işlemi başlatmak için kullanılacak üç ana komut bulunmaktadır:

- a) 0x50 - Mesafe ölçümü (inç cinsinden)
- b) 0x51 - Mesafe ölçümü (santimetre cinsinden)
- c) 0x52 - Uçuş süresi ölçümü (mikro saniye cinsinden)

Bu çalışmada, uçuş süresi ölçmek için (0x52) komutu kullanılmıştır. SRF02'nin içindeki veriler, 6 adet register (kayıt) aracılığıyla erişilebilir durumdadır. Bu kayıtlardan yalnızca kayıt 0 yazılabilir ve diğer kayıtlar okuma için kullanılır. Kayıt 0, sensöre gönderilen komutların tutulduğu komut kayıdır ve burada bir mesafe ölçümü başlatmak için komutlar yer alır. Ölçüm tamamlandıktan sonra, süre/mesafe bilgisi kayıt 2 ve kayıt 3'ten okunabilir.

Tablo 1. SRF02 Kayıt Adresleri

Kayıt Adresi	Okuma	Yazma
0	Yazılım versiyonu	Mesafe ölçüm komutları
1	Kullanılmıyor (Her zaman 0x80 okunur)	-
2	Ölçüm sonucu (Yüksek byte)	-
3	Ölçüm sonucu (Düşük byte)	-
4	En düşük otomatik ayar (Yüksek byte)	-
5	En düşük otomatik ayar (Düşük byte)	-

Bu çalışmada kullanılan SRF02 I2C uçuş süresi okuma haberleşme örneği;

1) Sensörü tetikleme

START - 0xE0 (W) - ACK

0x00 - ACK

0x52 - ACK

STOP

2) Uçuş süresi okuma

START - 0xE0 (W) - ACK

0x02 - ACK

START - 0xE1 (R) - ACK

Data (High Byte) - ACK

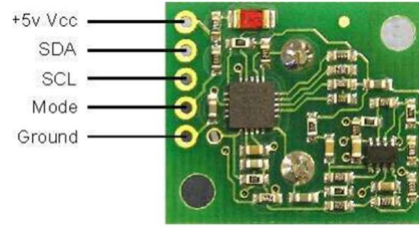
0x03 - ACK

Data (Low Byte) - ACK

STOP

2.2.4. Donanım Bağlantıları

Şekil 9'da, SRF02 ultrasonik dönüştürücüsü gösterilmiştir. SRF02'nin "Mode" pini boşta bırakılır. SCL ve SDA hatlarına, I2C veri yolun üzerinde +5V'a bağlı bir çekme direncine bağlanır. Her modül için bir çift direnç değil, sadece veri yolu üzerindeki ana cihazla bir çift direnç yeterlidir.



Şekil 9. Ultrasonik vericinin arayüzü devresi

2.2.5. Yazılım Mimarisi

Ses Hızı Hesaplanması (Vakumda): İki sensör arasındaki mesafe ve vakum ortamındaki ses hızı kullanılarak, sesin ideal koşullarda sensörler arasında ilerlemesi gereken süre hesaplanır. Vakum ortamında ses hızı sıfırdır, ancak biz bu hesaplamada hava ortamı için ses hızı değeri kullanacağız (343 m/s).

$$t_{ideal} = \frac{d}{c} \quad (4)$$

Burada:

- t_{ideal} : İki sensör arasındaki ideal koşullarda geçen süre (saniye),
- d : İki sensör arasındaki mesafe,
- c : Havadaki ses hızı (343 m/s).

Gerçek Zaman Farkının Ölçülmesi: Her sensör, diğer sensörün yankı süresini kaydeder. İki sensörden gelen zaman farkı ölçülerek bu süre hesaplanır (3) numaralı denklemden yola çıkarak:

$$t_{gerçek} = \left| \frac{t_{12} \cdot t_{21}}{t_{21} - t_{12}} \right| \quad (5)$$

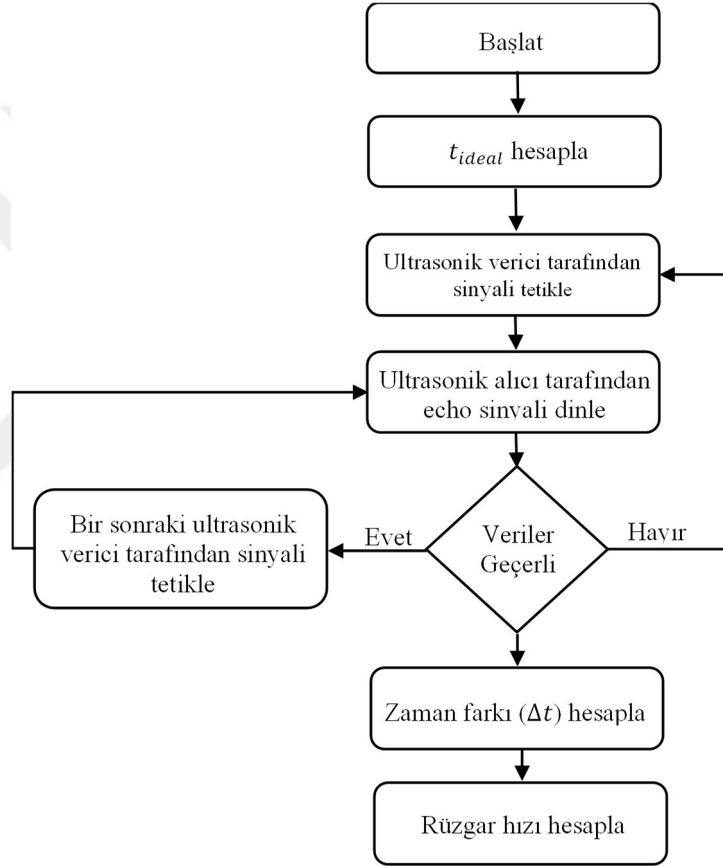
Burada:

- t_{12} : İlk sensörün yankı alma süresi,
- t_{21} : İkinci sensörün yankı alma süresi.

Rüzgar Hızının Hesaplanması: İki dönüştürücü arasındaki mesafeyi, gerçek zaman ile ideal zaman arasındaki farka bölerek, Denklem 6’da gösterildiği gibi rüzgar hızı hesaplanır:

$$v_{wind} = \frac{d (t_{ideal} - t_{gerçek})}{t_{gerçek} \cdot t_{ideal}} \quad (6)$$

Bu formül, rüzgarın sensörler arasındaki sürede yaptığı etkiyi dikkate alarak rüzgar hızını hesaplar. Şekil 10’da yazılım algoritmasını diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 10. Ultrasonik alıcının arayüzü yazılım algoritmasının diyagramı

Ultrasonik sensörlerin çalışma performansı, çevresel koşullar ve hava durumu tarafından birkaç şekilde etkilenebilir;

a. Sıcaklık değişimi

Ultrasonik sensörler, ses dalgalarının havadaki yayılma hızına dayanır. Hava sıcaklığı arttıkça, sesin yayılma hızı artar bu da ölçümlerde hata olmasına neden olabilir. Sıcaklık değişiklikleri, sensörün doğru ölçümler yapmasını engelleyebilir ve belirli bir seviyede değiştikçe, sesin yayılma süresi farklılık gösterebilir dolayısıyla rüzgar hız ölçümlerini etkileyebilir.

Havadaki ses dalgasının hızı c ve ortam sıcaklığı T ile doğrudan ilişkilidir. Genellikle kullanılan formül şu şekildedir:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma \cdot R \cdot T}{M}} \quad (7)$$

Burada; c sesin yayılma hızı (m/s), γ havanın adyabatik indeksidir (genellikle 1.4 olarak kabul edilir), R gaz sabiti, 8.314 J/mol, T hava sıcaklığı (Kelvin cinsinden), M havanın molar kütlesi (yaklaşık 28.97 g/mol). Alternatif olarak, ses hızı ile ortam sıcaklığı ilişkilendiren Denklem 8'deki formül daha yaygın olarak kullanılır;

$$c(T) = 331,3 + (0,6 \cdot T) \quad (8)$$

Burada T sıcaklık °C cinsindendir. Bu formül, sıcaklığın artmasıyla ses hızının arttığını gösterir. Örneğin, 0°C'de sesin hızı 331.3 m/s, her 1°C artışla ses hızı 0.6 m/s artar.

b. Nem değişimi

Hava nemi ultrasonik dönüştürücülerin performansına etkileyebilir. Nem arttıkça ses dalgalarının yayılma hızı değişir bu da ölçümlerin doğruluğu bozulmasına yol açabilir. Yüksek nem seviyeleri, ultrasonik dönüştürücülerin daha yavaş tepki vermesine veya doğru olmayan okumalar yapmasına neden olabilir.

Havanın nem içeriği ϕ (nem oranı) ile ses hızındaki değişim genellikle bu şekilde ifade edilir:

$$c_{humid} = c_{dry} \cdot \sqrt{\frac{1 + \alpha\phi}{1 + \beta\phi}} \quad (9)$$

Burada; c_{humid} nemli havadaki ses hızı, c_{dry} kuru havadaki ses hızı, α ve β nemli havada ses hızının artışını etkileyen sabitler (genellikle deneysel olarak belirlenir), ϕ nem oranı, genellikle %0-100 arasında bir değer alır.

Ses hızı hem sıcaklık hem de nem ile birlikte modellemek için daha kapsamlı bir formül kullanılabilir. Bu formül genellikle bu şekilde yazılabilir:

$$c(T, \phi) = c_{ref} \cdot \sqrt{\frac{T}{T_{ref}}} \cdot (1 + k \cdot \phi) \quad (10)$$

Burada; c_{ref} belirli bir referans sıcaklık ve nemdeki ses hızı, T_{ref} referans sıcaklık (örneğin 20°C), k nem oranına bağlı değişim katsayısı, ϕ nem oranı. Bu formülde, sıcaklık T ve nem ϕ ses hızını etkilemektedir. Sıcaklık arttıkça sesin hızı artar ve nem oranı arttıkça da sesin hızı artar.

Birleşik bir model olarak, çevresel koşullara bağlı ses hızı şu şekilde ifade edilebilir:

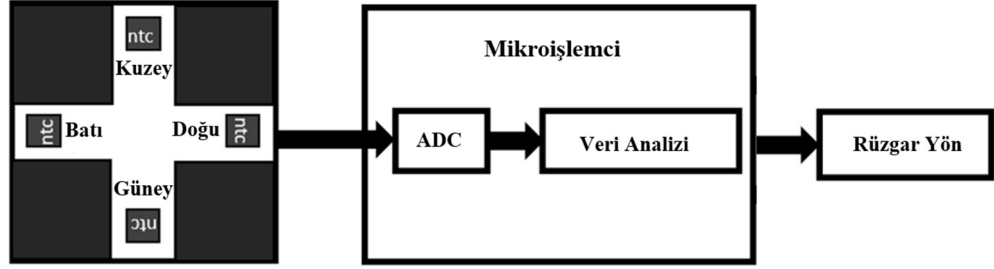
$$c_{env} = \sqrt{\frac{\gamma \cdot R \cdot (T + 273)}{m}} \cdot (1 + \alpha \cdot \phi) \quad (11)$$

Burada: T sıcaklık (°C cinsinden, Kelvin için 273 eklenir), ϕ nem oranı, γ , R , M ve α sabitler ve deneysel katsayılarıdır (Panda vd., 2016) (Kinsler vd., 2000) (Bucci vd., 2013).

2.3. NTC Sıcaklık Sensörlerinin Arayüzü

Termal Rüzgar Sensörleri; İki temel modu bulunmaktadır, Sabit Güç (CP) ve Sabit Sıcaklık Farkı (CTD). CP modunda ısıtma gücü sabitken, CTD modunda ısıtıcının sıcaklığı belirli bir derece sabit tutulur (Fernandes vd., 2017) (Sosna vd., 2010).

Bu çalışmada, sensörlere sabit güç vererek sıcaklık değişimine göre rüzgar yön belirlenmiştir. Şekil 11’de gösterildiği gibi dört farklı NTC termistörü yer alır ve rüzgarın dört yönüne (Kuzey, Doğu, Güney, Batı) göre yerleştirilmiştir. Bu termistörler, rüzgarın her yöndeki sıcaklık değişimini algılar. Termistörler, bir analog-dijital çevirici (ADC) aracılığıyla mikroişlemciye bağlanır. Mikroişlemci, ADC'den aldığı verileri işleyerek rüzgarın yönünü belirler ve çıktıyı rüzgar yönü olarak verir.



Şekil 11. NTC termistörlerin arayüzünün blok diyagramı

2.3.1. NTC Sıcaklık Sensörleri

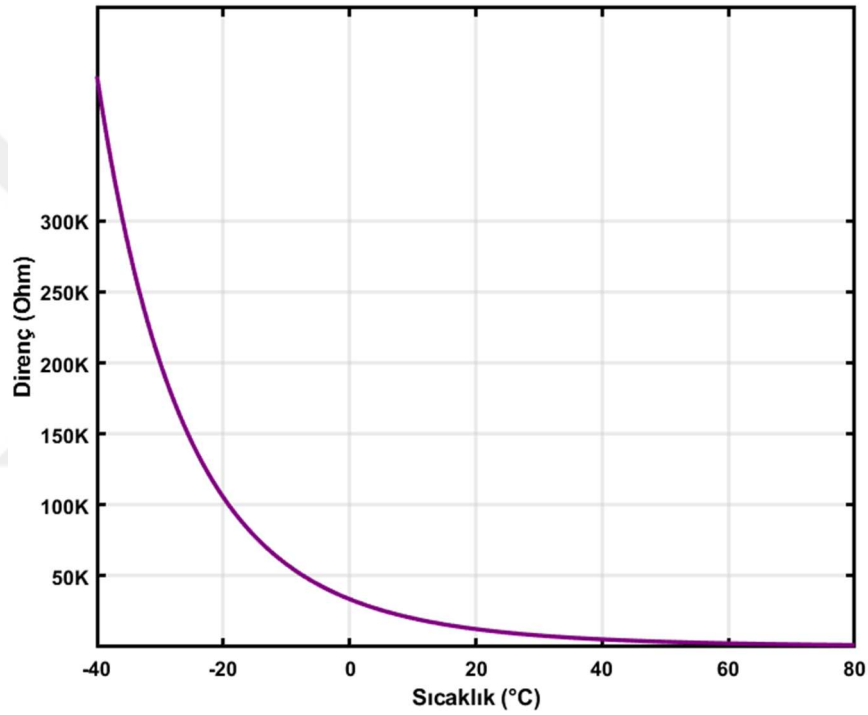
NTC sıcaklık sensörleri, sıcaklık ölçümleri için yaygın olarak kullanılan sıcaklık arttıkça dirençleri düşen pasif bileşenlerdir. NTC termistörleri, yüksek hassasiyeti, kararlılığı, termal şoklara dayanıklılığı gibi özelliklerinden dolayı çeşitli uygulamalarda sıcaklık algılama ve ölçme işlemlerinde tercih edilmektedir (Wang, 2023).

2.3.2. Çalışma Prensibi

Devre, bir voltaj bölücü olarak çalışır. NTC'nin direnci sıcaklık düştükçe, çıkış voltajı (V_o) artar. Sıcaklık azaldıkça, NTC'nin direnci artar ve çıkış voltajı düşer. Çıkış voltajı, mikrodenetleyicinin ADC modülüne gönderilir ve dijital bir değere dönüştürülür. Bu değer, Stein-Hart denklemi kullanarak sıcaklıkla ilişkilendirilir (URL-2, 2019);

$$\frac{1}{T} = A + B(\ln R) + C(\ln R)^3 \quad (12)$$

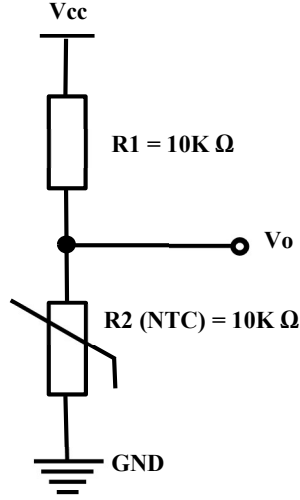
Bu denklemde R değişkeni T (kelvin) derecede ölçülen NTC'nin direnç değeridir. A,B ve C katsayıları sıcaklık-direnç tablosuna göre hesaplanır (Topuz, 2024). Şekil 11'de 10k ohm değerinde bir NTC termistörünün Matlab ile oluşturulan sıcaklık-direnç ilişkisi gösterilmiştir.



Şekil 12. NTC Direnci - Sıcaklık değişimi

2.3.3. Donanım Bağlantıları

Şekil 13'te gösterildiği gibi, NTC termistörünün devresi oldukça basit bir yapıya sahiptir. Bu devrenin besleme voltajı (Vcc) genellikle 3.3V veya 5V değerindedir. Devrenin ana bileşenleri, Tablo 2'de ayrıntılı olarak verilmiştir (URL-2, 2019);



Şekil 13. NTC sıcaklık sensörü bağlantısı

Tablo 2. NTC Sıcaklık sensörleri arayüzünün ana bileşenleri.

Komponent	Açıklama
NTC Termistör	Sıcaklığı algılayan ana bileşendir. Direnci, sıcaklıkla ters orantılı olarak değişir.
Referans Direnç (R1)	Referans direnci, NTC termistör ile seri olarak bağlanır ve bir voltaj bölücü devresi oluşturur. Bu direnç, NTC'nin sıcaklık değişikliklerine tepkisini dengelemeye yardımcı olur.

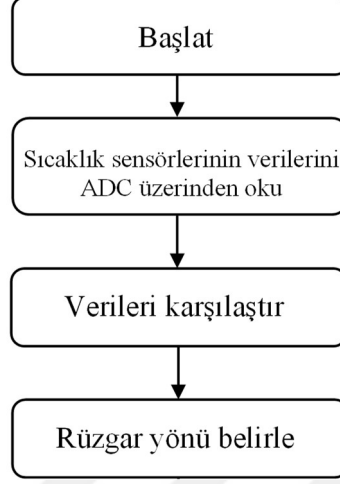
4 Tane NTC sıcaklık sensörü kuzey, güney, doğu ve batı olmak üzere dört farklı yönde konumlandırılır. Rüzgar, geçtiği yerdeki nesneleri soğutma eğiliminde olduğundan rüzgar estiği yöne en yakın olan sensör, diğerlerine göre daha düşük bir sıcaklık değeri gösterir. Sensörlerden alınan sıcaklık verileri karşılaştırılır. En düşük sıcaklık değerine sahip sensörün yönü, rüzgarın geldiği yön olarak belirlenebilir. Örneğin, kuzeydeki sensör en düşük sıcaklık değerini veriyorsa, bu rüzgarın kuzeyden estiğini gösterir (Makinwa & Huijsing, 2001).

2.3.4. Yazılım Mimarisi

Şekil 14'te rüzgar yön ölçüm algoritması sunulmuştur. Bu algoritma ile sıcaklık sensörlerinden alınan verileri işleyerek rüzgar yönünü tespit etmeyi amaçlanmaktadır.

İlk adımda, sıcaklık sensörlerinden gelen analog veriler ADC ile dijital verilere dönüştürülür, Böylece işlenmesi için uygun hale getirilir. Ardından, bu veriler

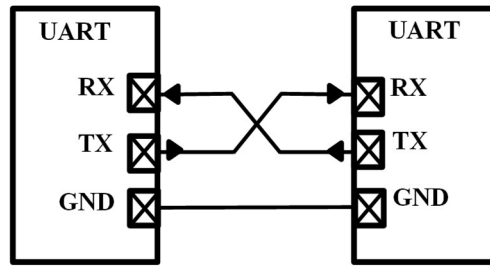
karşılaştırılarak ortamın farklı bölgelerindeki sıcaklık farkları analiz edilir. Bu analiz sonucunda, sıcaklık değişimlerinden faydalanılarak rüzgar yönü belirlenir.



Şekil 14. NTC sıcaklık sensörlerinin arayüzü yazılım algoritmasının diyagramı

2.4. UART Haberleşme Arayüzü

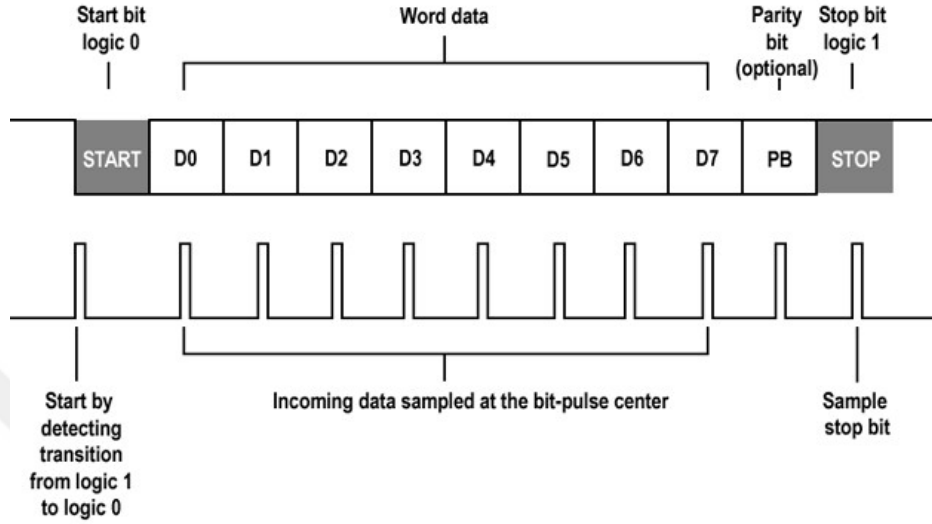
UART haberleşme protokolü, seri veri iletimi ve alımı için kullanılır. Veri iletimi sırasında saat sinyali kullanılmaz; bunun yerine veri paketine başlangıç ve durdurma bitleri eklenir. Bu bitler, alıcı UART'ın veriyi doğru zamanda okumaya başlamasını ve haberleşmenin bitişini algılamasını sağlar. Şekil 15'te gösterildiği gibi RX (Receiver) ve TX (Transmitter) hatları ile veri iletimi sağlanmaktadır.



Şekil 15. UART alıcı-verici bağlantısı

Verici UART, veri iletimine başlamadan önce iletişim hattını düşük seviyeye çeker ve bu durum alıcı UART tarafından veri aktarımının başlangıcı olarak algılanır. Alıcı UART, bu geçişi algılayarak veri çerçevesini belirlenen haberleşme hızına göre okumaya başlar.

Tipik bir UART veri paketi, 1 başlangıç biti, 5 ile 8 arasında veri biti, isteğe bağlı bir parite biti (1 veya 2 durdurma bitinden oluşur). Bu yapı, verinin güvenli ve hatasız bir şekilde iletilmesini sağlar.



Şekil 16. UART haberleşme protokolü örneği

UART iletiminde veri aktarım hızı, "baud" olarak ifade edilen bir ölçü birimi ile belirlenir ve saniyedeki bit sayısı (bps) cinsinden ifade edilir. Haberleşme esnasında, verici ve alıcı UART'ların baud hızlarının uyumlu olması gerekmektedir. Baud hızlarındaki %10'dan fazla sapmalar, bit zamanlamasının bozulmasına ve veri kaybına yol açabilir. Şekil 16'te, UART haberleşme protokolü örneği yer almaktadır (URL-3, 2024).

Parite biti, veri iletimindeki hataları tespit etmek için kullanılan bir hata kontrol yöntemidir. Bu bit, veri çerçevesinde kaç adet '1' değeri olduğunu kontrol ederek verinin hata içerip içermediğini belirler. Parite biti ile, veri çerçevesinde iletilen verilerin toplamda çift ya da tek olmasına göre hata tespiti yapılabilir.

Veri paketinin sonunu belirlemek için, verici UART veri hattını en az iki bitlik süre boyunca düşüktür yüksek voltaja çeker. Bu, veri aktarımının sonlandığını belirtir ve alıcı UART tarafından veri çerçevesinin tamamlandığı anlaşılır.

UART, donanım akış kontrolü için RTS ve CTS sinyallerini kullanabilir. Bu sinyaller, gönderici ve alıcı UART'lar arasında veri iletiminin uyumlu bir şekilde gerçekleşmesini sağlar.

UART'ın avantajları arasında yalnızca iki iletim hattı kullanması, saat sinyaline ihtiyaç duymaması ve hata kontrolü için parite bitinin kullanılabilmesi yer almaktadır.

Ayrıca, veri paketi yapısının esnek bir şekilde düzenlenebilmesi, UART'ın geniş bir uygulama alanlarında kullanması sağlamaktadır (KeyStone Architecture, 2010) (Gupta vd., 2024).



Şekil 17. UART Entegresi

Şekil 17'de UART entegresi gösterilmiştir. Bu entegre, UART iletişimini sağlamak için kullanılan donanım birimidir ve veri iletimini sağlamak için gerekli olan sinyalleri yönetir. Bu tür entegreler, UART protokolünün uygulanmasını kolaylaştıran önemli bir bileşendir (URL-2, 2024).

Gelecek bölümde, sistemin elektronik tasarımına dair yapılan çalışmalar detaylı bir şekilde açıklanmıştır. İlk olarak, elektronik kartın tasarımı ve şematik yapısı ele alınarak, güç arayüzü, MCU arayüzü ve sensörlerin entegrasyonu gibi temel bileşenlerin nasıl bir araya getirildiği anlatılmıştır. Ardından, bu tasarıma dayalı olarak PCB tasarımı ve güç yönetimi ile mikrodenetleyici arayüzlerinin yerleştirilmesiyle ilgili teknik detaylara değinilmiştir. Ayrıca, yazılım çalışmaları ve sistemin test edilmesine yönelik yapılan çalışmalar ele alınmıştır. Sensör verilerinin işlenmesi ve bilgisayara iletilmesi süreci detaylı olarak açıklayarak sistemin performansını test etmek amacıyla kurulan düzenekler sunulmuştur.

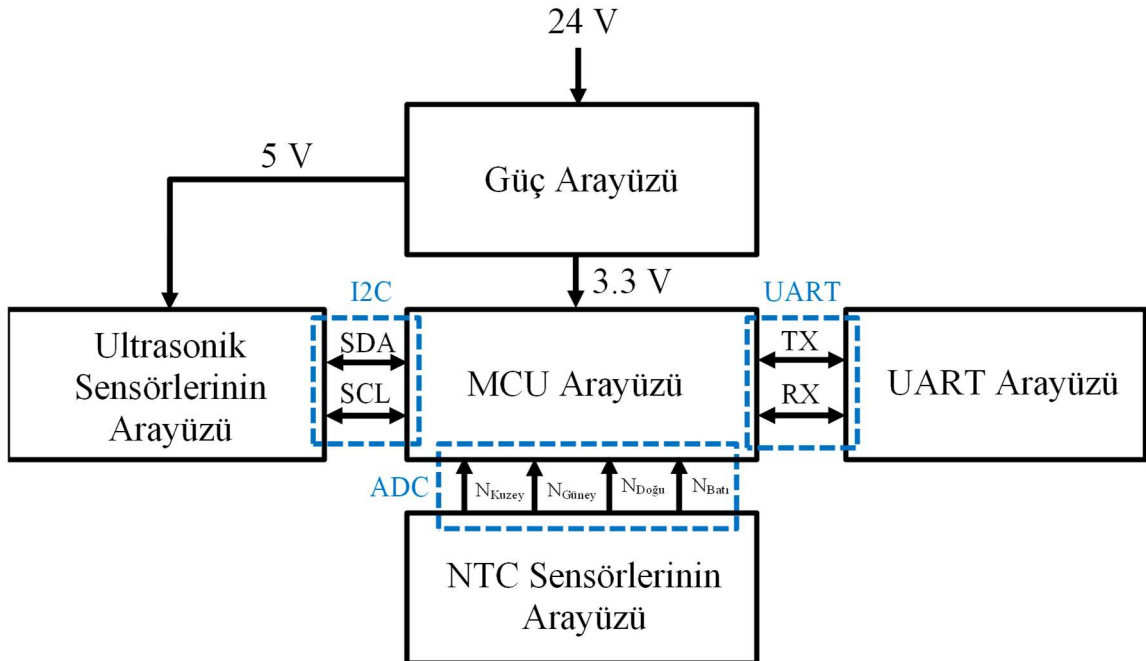
3. YAPILAN ÇALIŞMALAR

3.1. Elektronik Kart Tasarımı

Bu çalışmada, elektronik kart tasarımı, tasarlanan sistemin işlevselliğini sağlayan temel bir süreçtir. Tasarımında, güç arayüzü 24V giriş gerilimini 5V ve 3.3V seviyelerine dönüştürür. MCU arayüzü ise, ultrasonik ve NTC termistörlerinden gelen verileri işleyerek UART protokolüyle bilgisayara aktarılır. Tasarlanan PCB, şematik tasarıma dayanarak tüm bileşenleri bir araya getirmektedir.

3.1.1. Şematik Tasarımı

Sistemin temel arayüzleri; MCU (Mikrodenetleyici Ünitesi) arayüzü, ultrasonik dönüştürücülerin arayüzü, NTC termistörlerin arayüzü, güç arayüzü ve UART haberleşme arayüzüdür. Bu sistemde Şekil 18’de gösterildiği gibi farklı bileşenler, çeşitli haberleşme protokolleri aracılığıyla MCU ile iletişim kurmaktadır.



Şekil 18. Şematiğin blok diyagramı

Güç Arayüzü; sistemin enerji beslemesi 24V olarak sağlanmıştır ve güç arayüzü aracılığıyla farklı bileşenlere uygun gerilim seviyeleri ile dağıtılmaktadır. Güç arayüzü, 24V giriş gerilimini 5V ve 3.3V gibi çalışma gerilimlerine çevirir. 5V ultrasonik dönüştürücülerin arayüzüne sağlanırken, 3.3V MCU arayüzüne verilir.

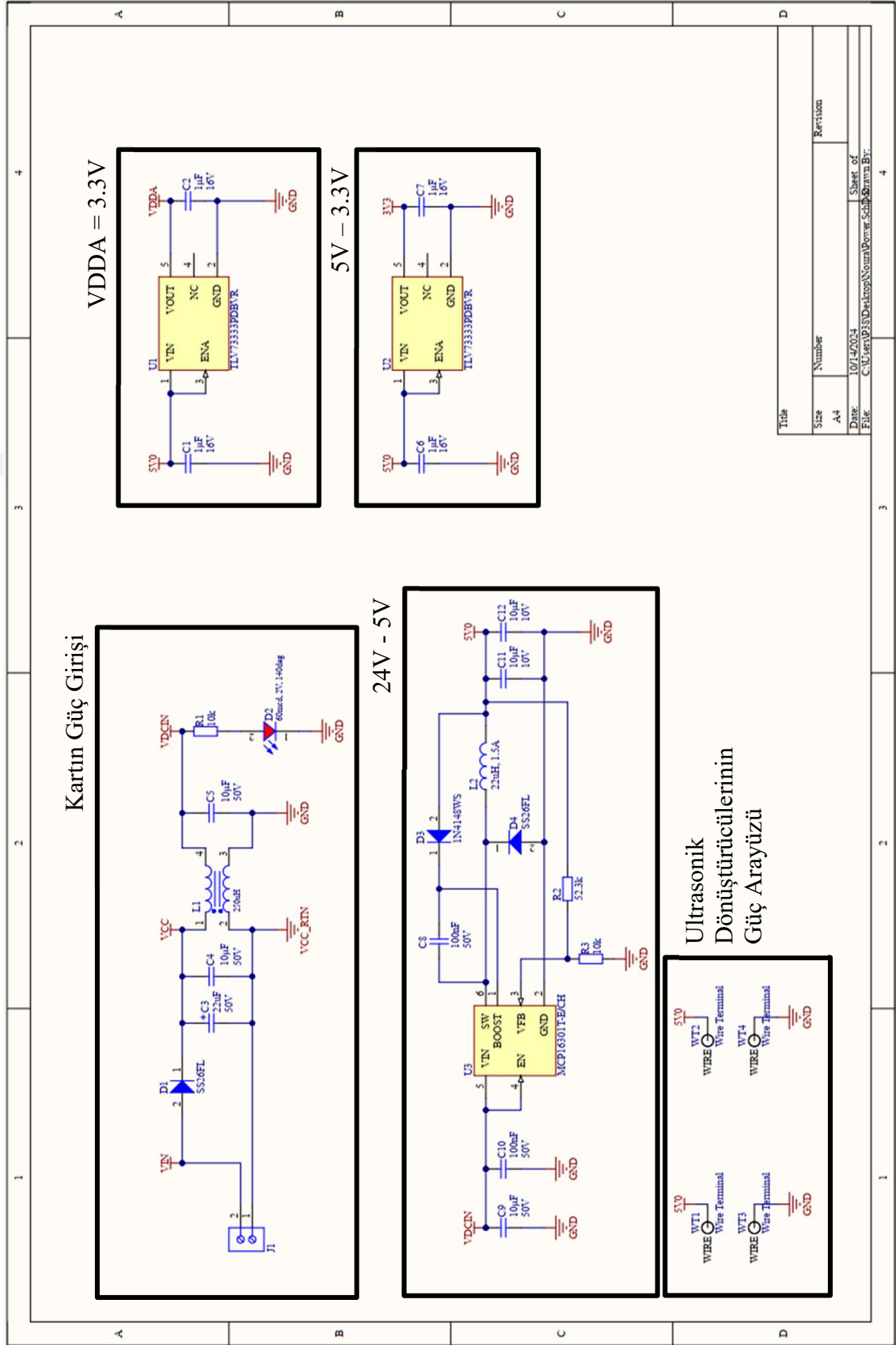
Ultrasonik Dönüştürücülerin Arayüzü; ultrasonik dönüştürücüler, I2C protokolü üzerinden MCU ile haberleşmektedir. I2C hattında SDA (veri hattı) ve SCL (saat hattı) bulunmaktadır. Bu arayüz, rüzgar hızı ölçümü için ultrasonik dönüştürücülerden veri alır ve MCU'ya iletir.

NTC Termistörlerin Arayüzü; NTC termistörleri, sıcaklık değişikliklerine göre direnç değerleri değişen sensörlerdir ve rüzgar yönü ölçümünde kullanılmaktadır. Bu arayüzde N_{Kuzey} , $N_{Güney}$, $N_{Doğu}$ ve $N_{Batı}$ yönlerini temsil eden 4 farklı NTC termistörü bulunmaktadır. NTC termistörlerinden gelen analog sinyaller, MCU'daki ADC aracılığıyla dijital sinyallere dönüştürülerek MCU tarafından işlenir.

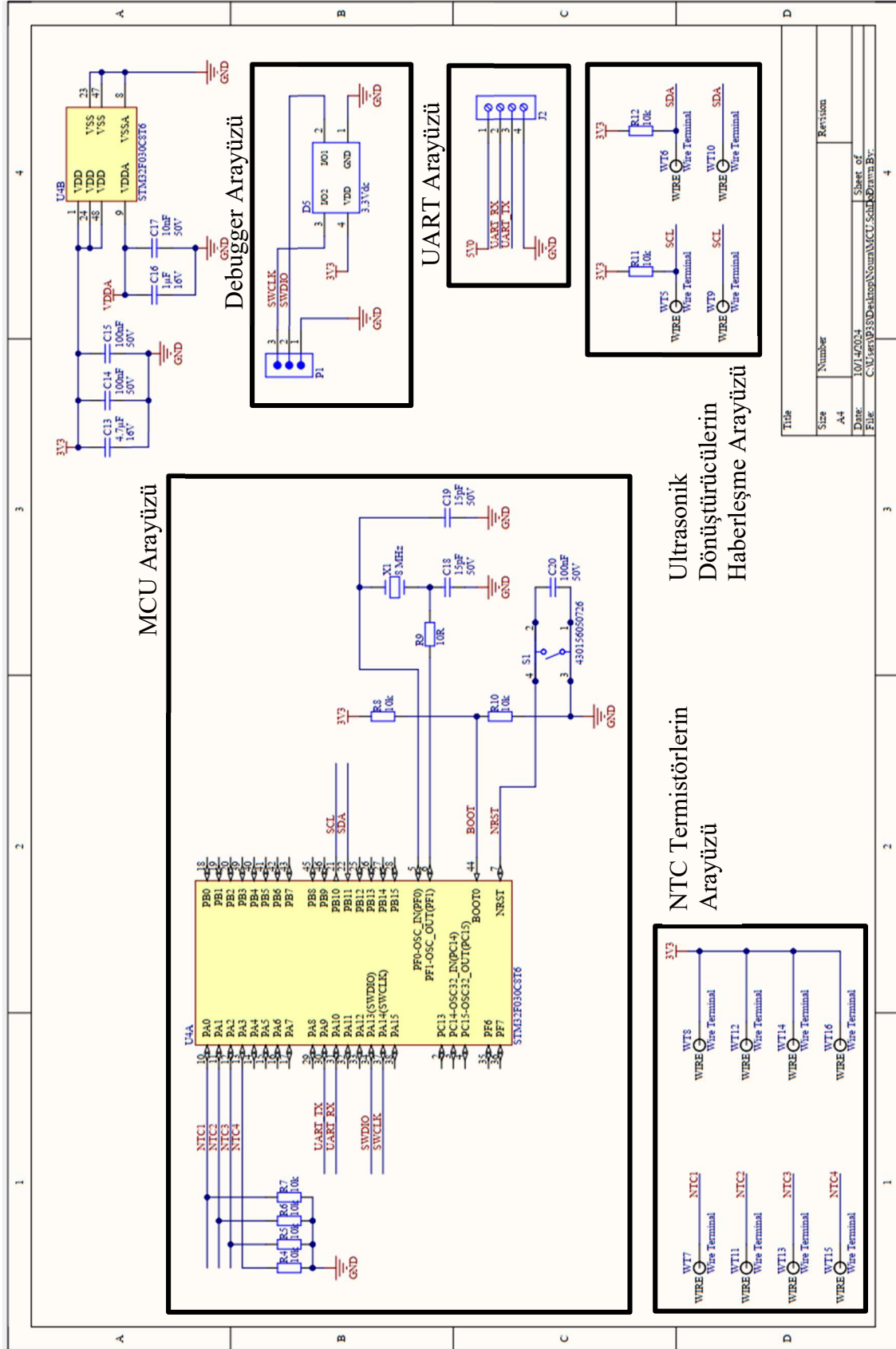
MCU Arayüzü; MCU, ultrasonik ve NTC termistörlerinden gelen verileri toplayıp verileri işleyerek rüzgar hızı ve yönü belirler. Ardından, UART haberleşme protokolü üzerinden bilgisayara verileri aktarır.

UART Arayüzü; MCU ile bilgisayar arasındaki veri iletişimi UART arayüzü aracılığıyla gerçekleştirilir. UART hattında TX ve RX pinleri bulunur ve çift yönlü veri iletişimi sağlanabilir.

Şekil 19'da güç arayüzü şematığı, Şekil 20'de ise mikroişlemci arayüzü şematığı detaylı bir şekilde sunulmaktadır.



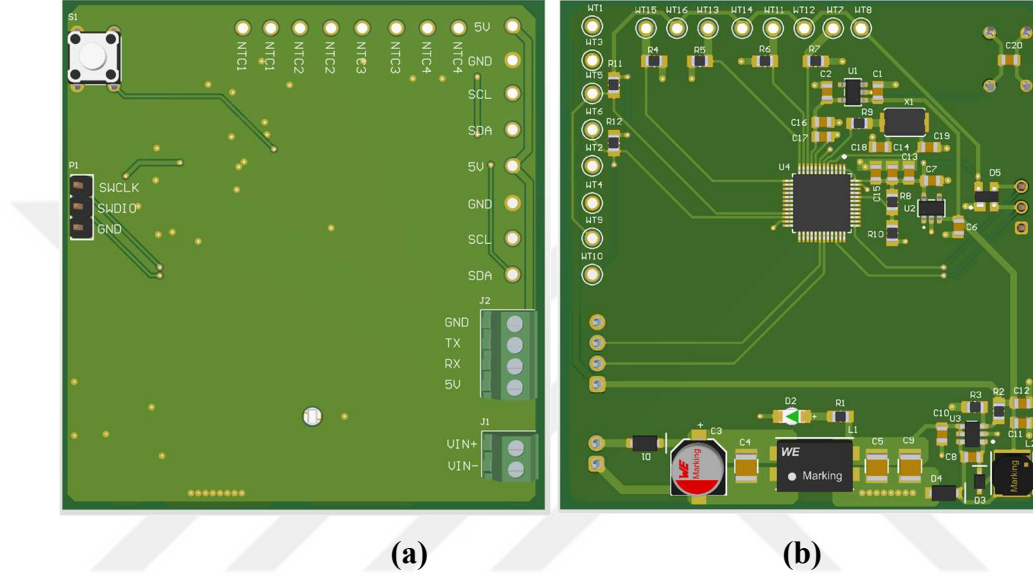
Şekil 19. Güç arayüzü



Şekil 20. Mikroişlemci arayüzü

3.1.2. PCB Tasarımı

PCB tasarımı, Şekil 21’de gösterildiği gibi şematiğe dayalı olarak rüzgar sensörü sistemi için tasarlanmış ve tüm bileşenler yerlerine uygun şekilde yerleştirilmiştir. PCB hacim sınırlamalı uygulamalarda kullanılmak üzere mümkün olan en küçük boyutlarda tasarlanmıştır (6 cm x 6 cm).



Şekil 21. PCB Tasarımı (a) Ön taraf (b) Arka taraf

a. Güç Yönetimi ve Regülatörler

Şematikteki TLV73333PDBVR (U1, U2) ve MCP16301 (U3) entegre devreleri, güç regülasyonu ve dağıtımını sağlamak amacıyla kullanılmıştır. U1 ve U3, 5V ve 3.3V gibi farklı voltaj seviyelerine dönüştürme işlemini gerçekleştirir. Güç (V_{IN+} , V_{IN-}) pinlerinden güç regülatörlerine aktarılır.

b. Mikrodenetleyici (MCU) ve Çevre Birimleri

STM32F030C8T6 mikrodenetleyici (U4) PCB'nin merkezinde yer almaktadır ve şematik diyagramda gösterilen tüm sinyalleri ve veri hatlarını yönetmektedir.

NTC termistörleri, ultrasonik dönüştürücüleri (I2C) ve UART bağlantıları MCU'ya doğrudan bağlanmıştır. MCU'nun yanında yer alan kristal osilatör (X1) ve pasif bileşenler

(R9, C18, C19) sistem saat sinyalinin sağlar. Bu saat sinyali, MCU'nun zamanlama ve işlem hızını belirler.

c. NTC Sıcaklık Sensörlerin Arayüzü

PCB üzerinde NTC1, NTC2, NTC3, NTC4 olarak adlandırılan pinlere NTC sıcaklık sensörlerine bağlanır. Şematikte gösterildiği gibi, her bir NTC, ADC pinlerine bağlanarak mikrodenetleyici tarafından sıcaklık verilerinin okunur. Bu sensörlerden gelen veriler, mikrodenetleyici yazılımında işlenir ve rüzgar yönü belirlenir. Dirençler (R4, R5, R6 ve R7) NTC termistörlerin çalışma doğruluğunu sağlamak için kullanılır.

d. Ultrasonik Dönüştürücülerin Arayüzü

SCL, SDA, 5V, GND olarak adlandırılan pinler, ultrasonik sensörleri için ayrılmıştır. Karta bağlanan iki ultrasonik başlığı arasındaki mesafe 4 cm'dir. Bu sensörlerden gelen veriler, mikrodenetleyiciye I2C haberleşme protokolü ile iletilir ve yazılımında verileri işleyerek rüzgar hızı belirlenir.

e. UART Bağlantıları

UART TX ve RX pinleri, bilgisayara veri iletimi için ayrılmıştır. Bu pinler, mikrodenetleyiciden gelen sinyalleri bilgisayara iletir. Şematik diyagramında gösterilen bu pinler (J2), PCB üzerinde dış bağlantı yapılabilmesi için eklenmiştir.

f. Giriş/Çıkış Terminalleri

PCB üzerinde (V_{IN}^{+} , V_{IN}^{-}) güç girişleri, harici güç kaynağının bağlanması için uygun bağlantı noktalarıdır. Şematikte gösterildiği gibi; güç, giriş terminalinden gelir ve güç devresi üzerinden mikrodenetleyiciye ve diğer bileşenlere dağıtılır.

3.2. Yazılım Çalışmaları

Bu çalışmanın yazılımı, sensörlerden alınan verileri işleyerek rüzgar hızını ve yönünü belirlemek için C diliyle yazılmıştır. Ultrasonik sensörler ile rüzgar hızı, uçuş süresi (ToF) yöntemiyle hesaplanırken, NTC sıcaklık sensörleri arasındaki sıcaklık farkı ise rüzgar yönünü belirlemek için kullanılır. STM32Cube IDE üzerinde geliştirilen yazılım, I2C ve UART gibi haberleşme protokollerini kullanarak sensörlerden alınan verileri mikrodenetleyiciye iletir ve işlenmiş verileri dışarıya aktarır. Yazılımın temel işlevleri, sensörlerin doğru bir şekilde okumasını sağlamak, verileri analiz etmek ve sonucu bilgisayar ortamına iletmektir. Ayrıca veri analizi, grafiklerin oluşturulması ve simülasyon çalışmaları için MATLAB yazılımı kullanılmaktadır.

3.3. Mekanik Yapı Çalışmaları

Sensörünün mekanik yapısı, çalışma prensiplerini destekleyecek şekilde hazırlanmıştır. Şekil 22’de, sensörün mekanik yapısı gösterilmiştir. Hazırlanan sensörün mekanik yapısı $13 \times 7 \times 7$ cm boyutlarına sahiptir.



Şekil 22. Mekanik yapı

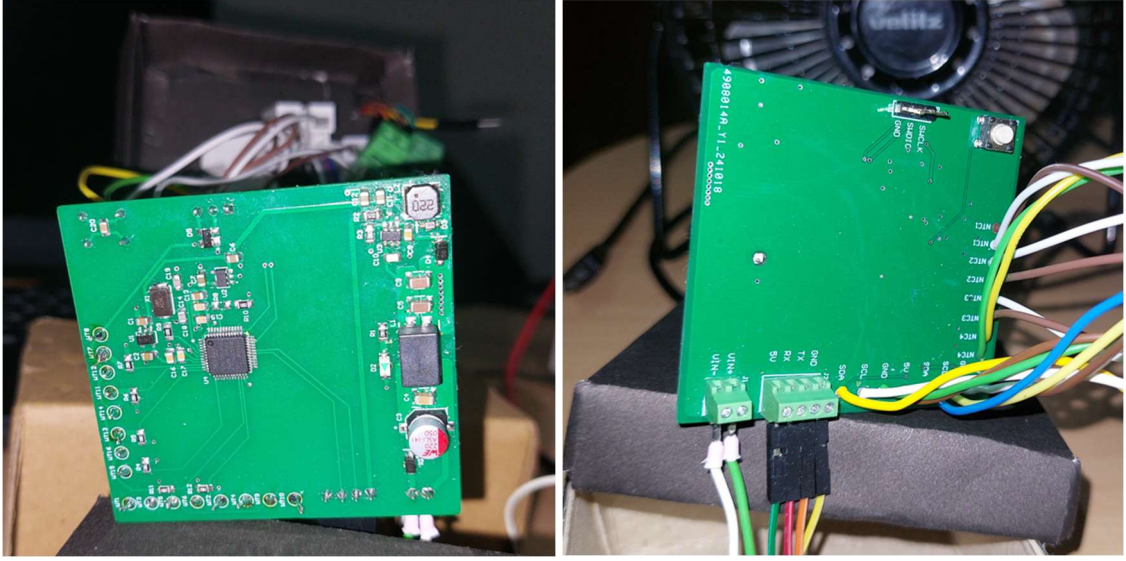
Şekil 23'te, Kuzey yönü için NTC termistörün düzenekte yerleştirildiği yeri gösterilmiştir. Her yön (Kuzey, Güney, Doğu, Batı) aynı şekilde yerleştirilmiştir.



Şekil 23. Mekanik yapıda NTC termistörlerin yerleşimi

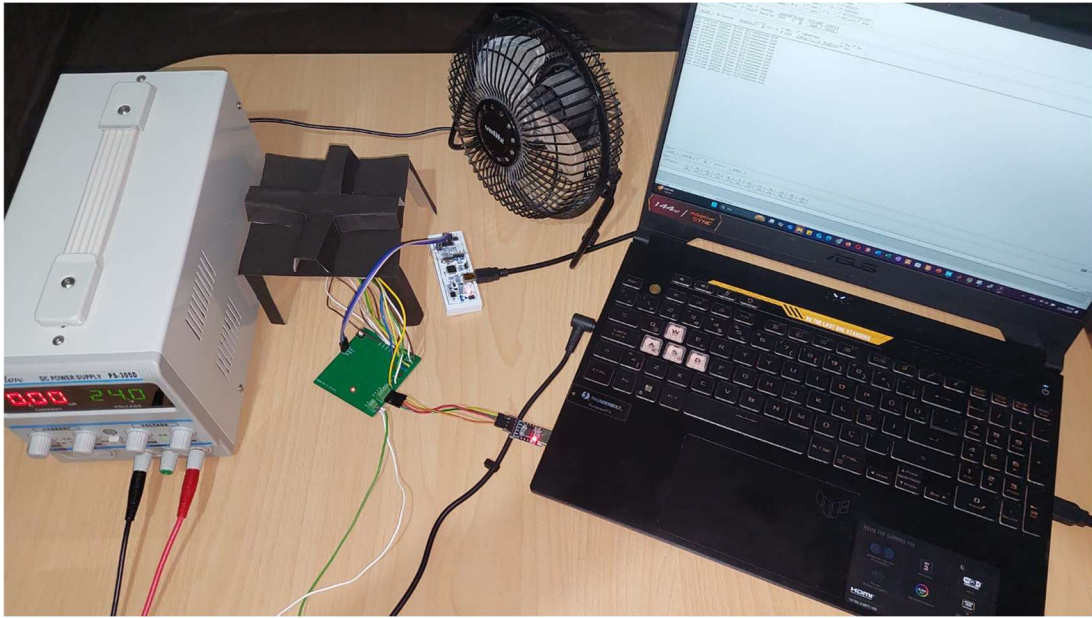
3.4. Deneysel Çalışmalar

Tasarlanan sistemi test etmek için kurulmuş düzenek aşağıdaki görüntüler gösterilmiştir. Düzenekte, karta bağlanan sensörler fan tarafından üretilen hava akımını ölçer. Sensörlerden gelen veriler, bağlı olduğu mikrodenetleyiciye iletilir ve bu veriler işlenerek rüzgarın hızı ve yönü belirlenir sonra bilgisayara UART üzerinden aktarılır. Bu düzenek, tasarımın performansını ve uygulanabilirliği değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır. Şekil 24'te, elektronik kart ve bağlantıları detaylı bir şekilde gösterilmiştir.

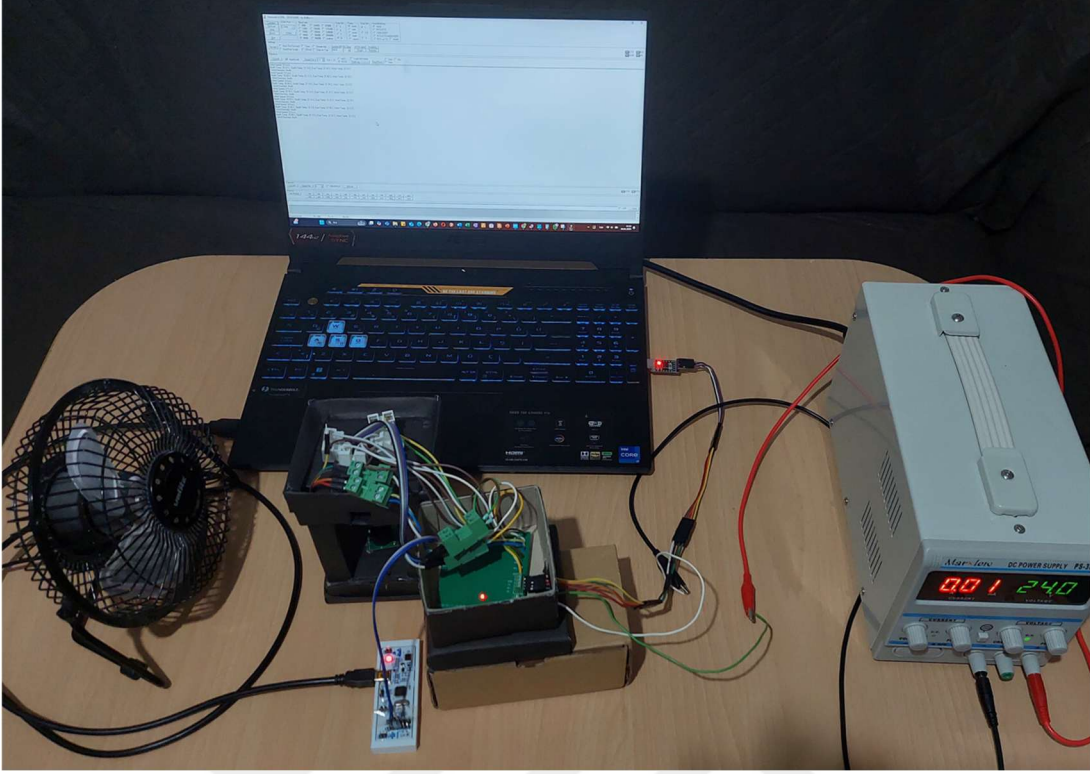


Şekil 24. Elektronik kart ve bağlantıları

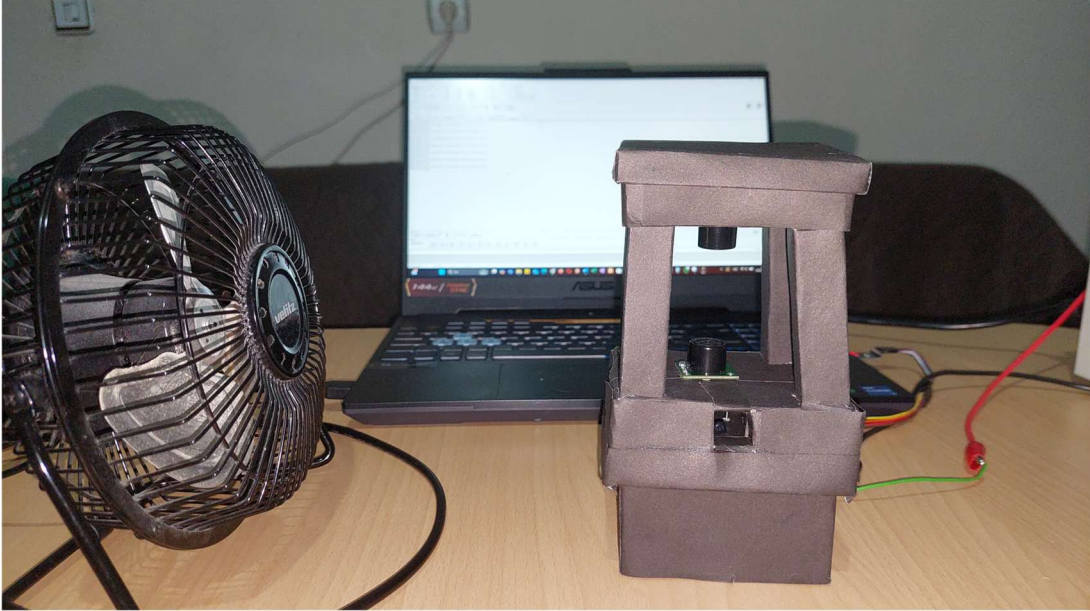
Şekil 25’te, rüzgar yönü ölçümüne yönelik gerçekleştirilen ön test düzeneğini gösterilmiştir. Rüzgar hızı testlerine ilişkin düzenek ise Şekil 26’te yer almaktadır. Şekil 27’de sensör kutusunun kapalı haliyle rüzgar hız ve yön testlerinin nasıl yapıldığını gösterilmiştir.



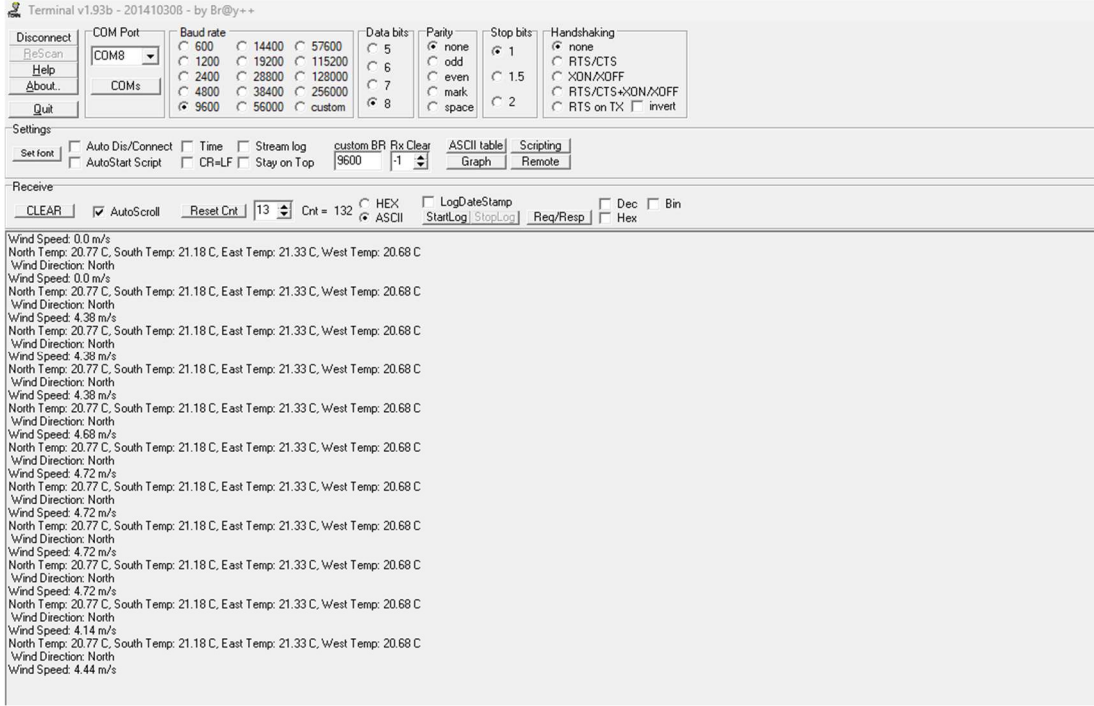
Şekil 25. Rüzgar Yön ölçüm test düzeneği



Şekil 26. Rüzgar Hız ölçüm test düzeneği



Şekil 27. Sensörün mekanik yapısı



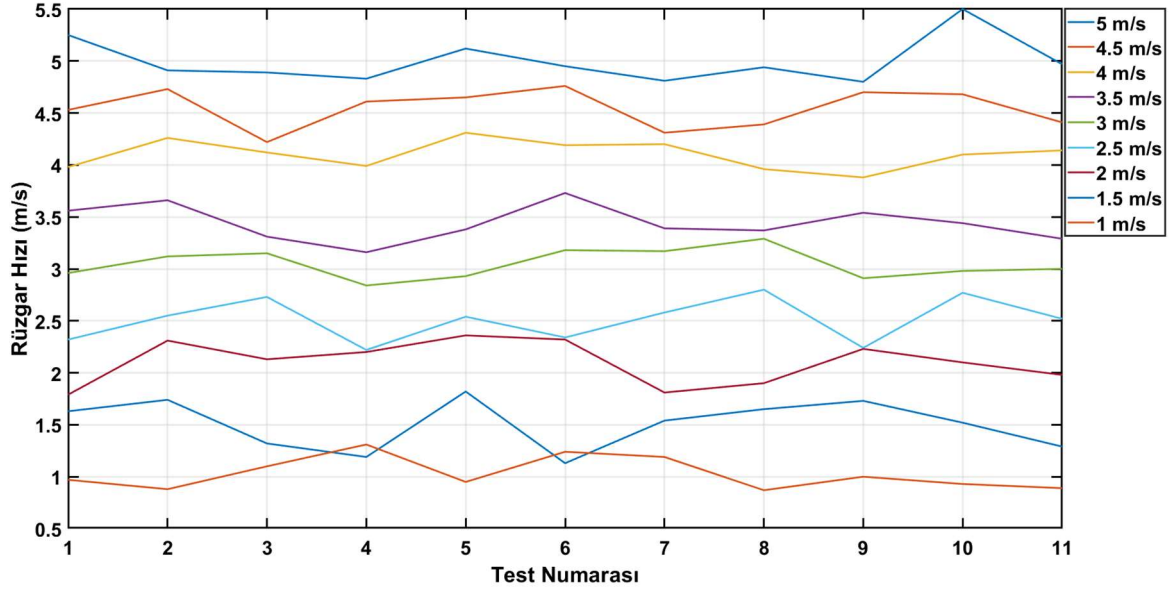
Şekil 28. UART üzerinde okunan veriler

Şekil 28'de, bilgisayarın terminal arayüzü kullanılarak sensör kartı üzerinden okunan ve işlenen veriler gösterilmiştir. Bu veriler sırasıyla kuzey, güney, doğu ve batı yönlerinden alınan sıcaklık, ölçülen rüzgar hızı ve rüzgar yönü bilgileri içermektedir. Sensörün doğruluğu değerlendirmesi açısından bu veriler önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle rüzgarın hızındaki ve rüzgarın yönündeki değişiklikler, sensörün farklı koşullara verdiği tepkiyi değerlendirmesi açısından önemlidir.

Dördüncü bölümde, elde edilen test sonuçları, sensörün zaman içindeki performans değişikliklerini ve ölçümlerin doğruluğunu incelemek için kullanılmıştır. Bu veriler, sensörün farklı koşullardaki davranışını daha iyi anlayabilmek ve güvenilirliğini test etmek adına önemlidir. Farklı hava koşullarını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen Matlab simülasyonlarının sonuçları detaylı bir şekilde tartışılmıştır.

Rüzgar Hızı (m/s)	5	4,5	4	3,5	3	2,5	2	1,5	1
Ölçülen Rüzgar Hızı (m/s)	5,25	4,53	3,98	3,56	2,96	2,32	1,79	1,63	0,97
	4,91	4,73	4,26	3,66	3,12	2,55	2,31	1,74	0,88
	4,89	4,22	4,12	3,31	3,15	2,73	2,13	1,32	1,10
	4,83	4,61	3,99	3,16	2,84	2,22	2,20	1,19	1,31
	5,12	4,65	4,31	3,38	2,93	2,54	2,36	1,82	0,95
	4,95	4,76	4,19	3,73	3,18	2,34	2,32	1,13	1,24
	4,81	4,31	4,20	3,39	3,17	2,58	1,81	1,54	1,19
	4,94	4,39	3,96	3,37	3,29	2,80	1,90	1,65	0,87
	4,80	4,70	3,88	3,54	2,91	2,24	2,23	1,73	1,00
	5,5	4,68	4,10	3,44	2,98	2,77	2,10	1,52	0,93
	4,97	4,41	4,14	3,29	3,00	2,52	1,98	1,29	0,89
Ortalama (m/s)	4,9	4,54	4,10	3,44	3,14	2,51	1,92	1,5	1,03
Hata Oranı (%)	2	4	2,5	1,7	4,7	0,4	4	0	3
Ortalama Hata Oranı (%)	2,5								

Tablo 3’te genel olarak, sensörlerin ölçtüğü değerlerin gerçek değerlere yakın olmakla birlikte, hata oranları oldukça düşük seviyelerde olduğunu görülmektedir. Hata oranlarının genellikle %2-4 arasında değiştiğini ve sensörün çoğu zaman doğru sonuçlar verdiğini göstermektedir. Test sonuçlarına göre rüzgar hız ölçümünün ortalama hata oranı yaklaşık olarak 2,5%.



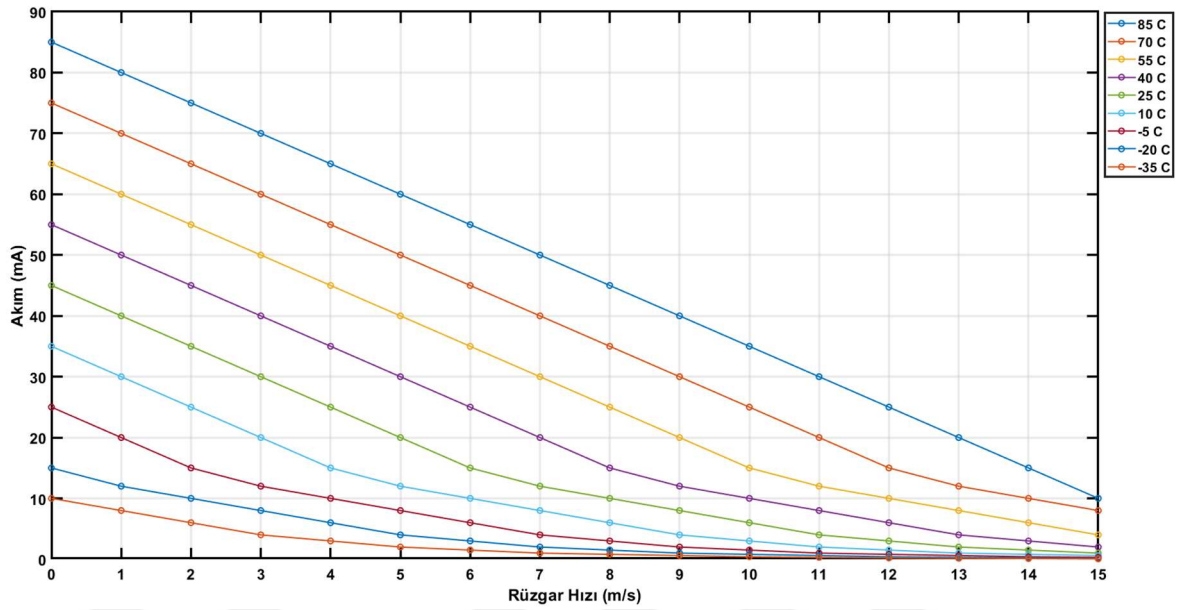
Şekil 29. Rüzgar hız test sonuçları

Tablo 4’te ise farklı rüzgar yönlerinden (Kuzey, Doğu, Güney, Batı) 3 m/s’de ölçülen sıcaklık verilerini gösterilmiştir. Gerçek rüzgar yönü ile ölçülen yön arasında uyum bulunmakta, bu da sensörün doğru yön hesaplaması sağladığını gösteriyor. Her bir yön için sıcaklık değerlerinde küçük farklılıklar gözlemleniyor. Bu veriler, sensörün doğru şekilde çalıştığını ve yönlere göre sıcaklık ölçümlerinin anlamlı farklılıklar gösterdiğini gösteriyor.

MATLAB simülasyonu ile oluşturulan Şekil 30’da farklı sıcaklıklar ve rüzgar hızlarına göre beklenen sıcaklık yanıtı gösterilmiştir. X ekseninde rüzgar hızı (m/s), Y ekseninde ise akım (mA) değerleri yer almaktadır. Her renkli çizgi farklı bir sıcaklık değerine karşılık gelmektedir. Genel eğilim, rüzgar hızı arttıkça akımın düştüğünü ve bu ilişkinin ters orantılı olduğunu göstermiştir. Ayrıca, en düşük akım değerleri, yüksek sıcaklık ve yüksek rüzgar hızlarında görülmektedir. Bu grafik, sıcaklık ve rüzgar hızı arasındaki etkileşimi ve belirli ortam koşullarında beklenen sıcaklık yanıtını göstermektedir.

Tablo 4. Farklı yönlerde rüzgar yön ölçüm sonuçları

Gerçek Rüzgar Yönü (°)	Ölçülen Rüzgar Yönü (°)	Sıcaklık (Kuzey) (°C)	Sıcaklık (Güney) (°C)	Sıcaklık (Doğu) (°C)	Sıcaklık (Batı) (°C)
0	Kuzey (0)	20,45	20,70	21,08	21,59
		20,14	20,39	21,19	22,09
		20,11	20,44	21,11	21,43
		20,06	20,44	21,13	21,51
		19,89	20,40	21,07	21,57
90	Doğu (90)	21,10	20,07	20,01	21,16
		21,04	20,30	19,72	21,6
		21,06	20,28	19,39	21,11
		21,06	20,25	19,29	21,03
		21,01	20,30	19,05	21,01
180	Güney (180)	21,47	20,64	21,23	24,35
		21,16	20,61	21,10	24,13
		21,03	20,56	21,15	23,69
		21,01	20,54	21,12	23,48
		20,76	20,50	21,13	22,56
270	Batı (270)	21,26	21,47	24,10	20,43
		21,36	21,11	24,21	20,38
		21,07	21,05	23,19	20,28
		21,18	21,05	22,72	20,15
		21,10	20,69	22,09	20,11



Şekil 30. Farklı sıcaklıklar ve rüzgar hızları için simülasyona göre beklenen sıcaklık yanıtı

4.1. Simülasyon Çalışması

Bu çalışmada, farklı hava koşullarının (sıcaklık ve nem gibi) ultrasonik sensörler kullanılarak yapılan rüzgar hızı ölçümleri üzerindeki etkilerini analiz etmek ve sensörün farklı çevresel koşullarda nasıl performans gösterdiğini incelemek amacıyla bir MATLAB simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık ve nem parametreleri için, -35°C ile 50°C arasında bir sıcaklık aralığı belirlenmiş olup, bu değerlerden de 25°C ve 35°C 'de %20 ile %100 arasında değişen nem oranlarıyla birlikte değerlendirilmiştir. Ayrıca, rüzgar hız parametresi için de 1 m/s ile 16 m/s arasında farklı hız seviyeleri kullanılmıştır. Bu verileri kullanarak rüzgar hızı üzerindeki etkisi matematiksel formüller kullanarak hesaplanmıştır.

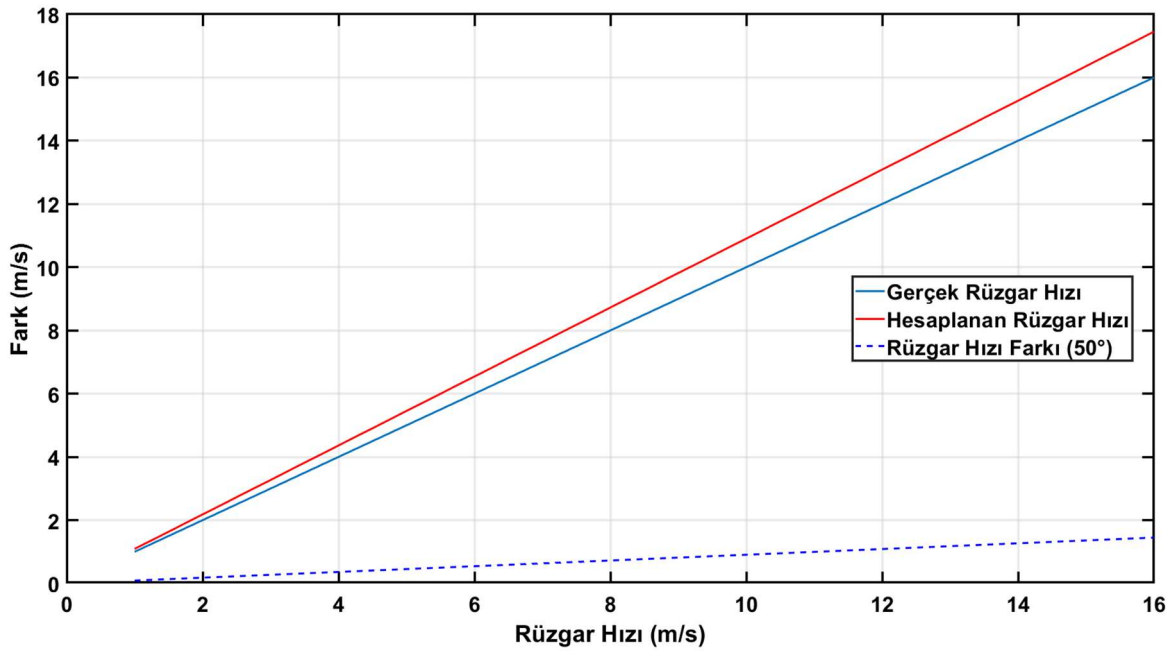
4.1.1. Sıcaklık Etkisi

Rüzgar ölçümüne sıcaklık etkisi incelemek için yapılan MATLAB simülasyon sonuçları ile ilgili tablolar ve şekiller sunulmuştur. Her tablo, belirli bir sıcaklık derecesindeki (50°C , 30°C , 15°C , 10°C , 5°C , -3°C , -12°C , -20°C , -35°C) yapılan farklı rüzgar hız hesaplamaları için gerçek ve hesaplanan değerler arasındaki farkların birkaç örneği gösterilmiştir. Her tablonun sonunda, ortalama farklar hesaplanmış ve bu farklar, rüzgar hız ölçümleri ile hesaplanan arasındaki genel ortalama fark gösterilmiştir.

Şekillerde, sıcaklık değişiminin gerçek ile hesaplanan rüzgar hız değerleri arasındaki farklar üzerindeki etkisi görsel olarak sunulmuştur. Oluşturulmuş grafikler, sıcaklık değişimi bu farklara nasıl etkilediğini ve rüzgar hız hesaplamalarındaki hataların değişimini anlamaya yardımcı olmuştur.

Tablo 5. (50°C) Derecede farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri

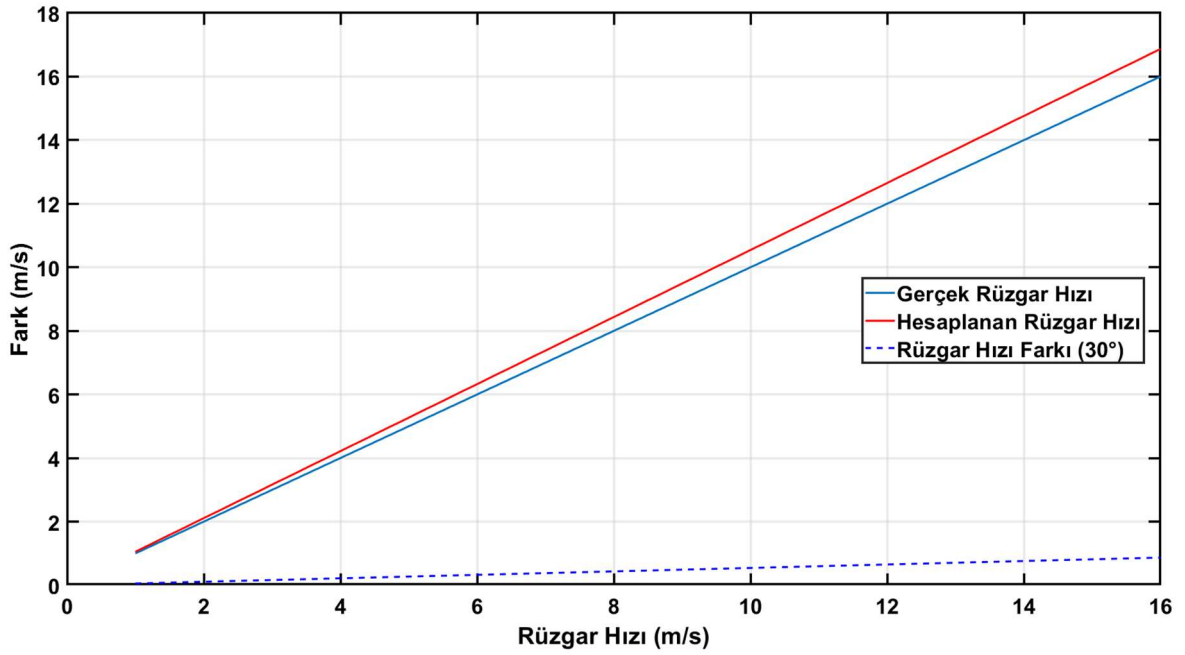
Rüzgar Hızı (m/s)	Hesaplanan Rüzgar Hızı (m/s)	Fark (m/s)
1	1,090	0,090
2	2,181	0,181
4	4,362	0,362
6	6,543	0,543
8	8,724	0,724
10	10,906	0,906
12	13,087	0,087
14	15,268	0,268
16	17,449	1,449
Ortalama Fark (m/s)		0,512



Şekil 31. (50°C) Derecede farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri

Tablo 6. (30°C) Derecede farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri

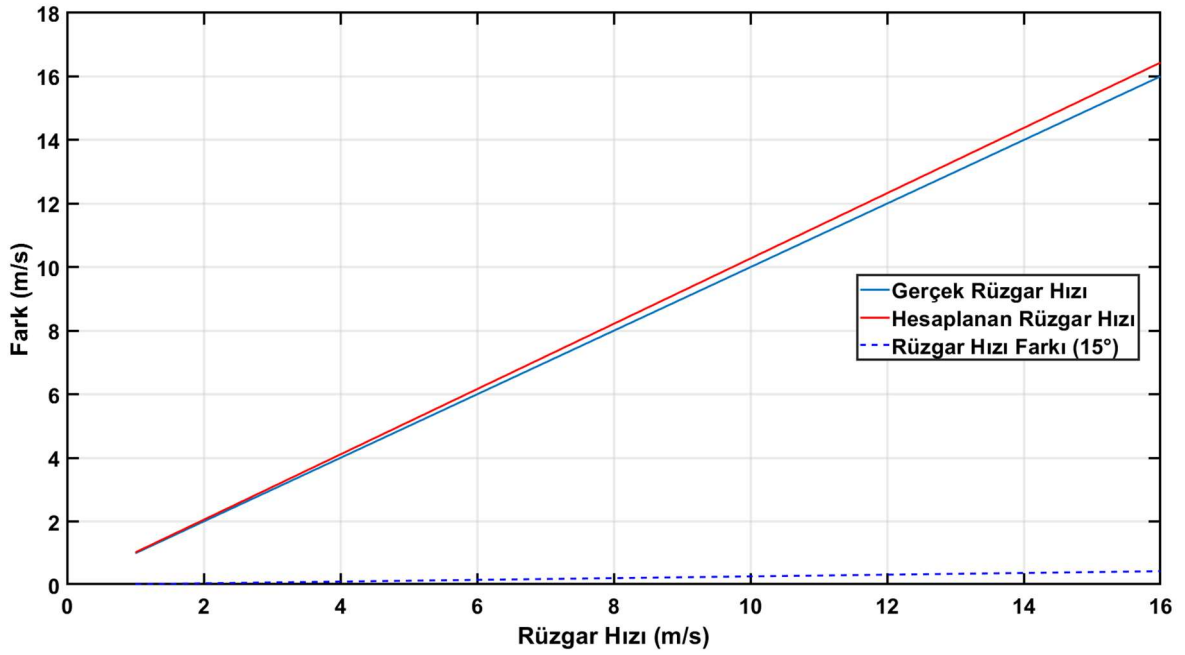
Rüzgar Hızı (m/s)	Hesaplanan Rüzgar Hızı (m/s)	Fark (m/s)
1	1,054	0,054
2	2,108	0,108
4	4,217	0,217
6	6,326	0,326
8	8,434	0,434
10	10,543	0,543
12	12,652	0,652
14	14,761	0,761
16	16,868	0,868
Ortalama Fark (m/s)		0,380



Şekil 32. (30°C) Derecede farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri

Tablo 7. (15°C) Derecede farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri

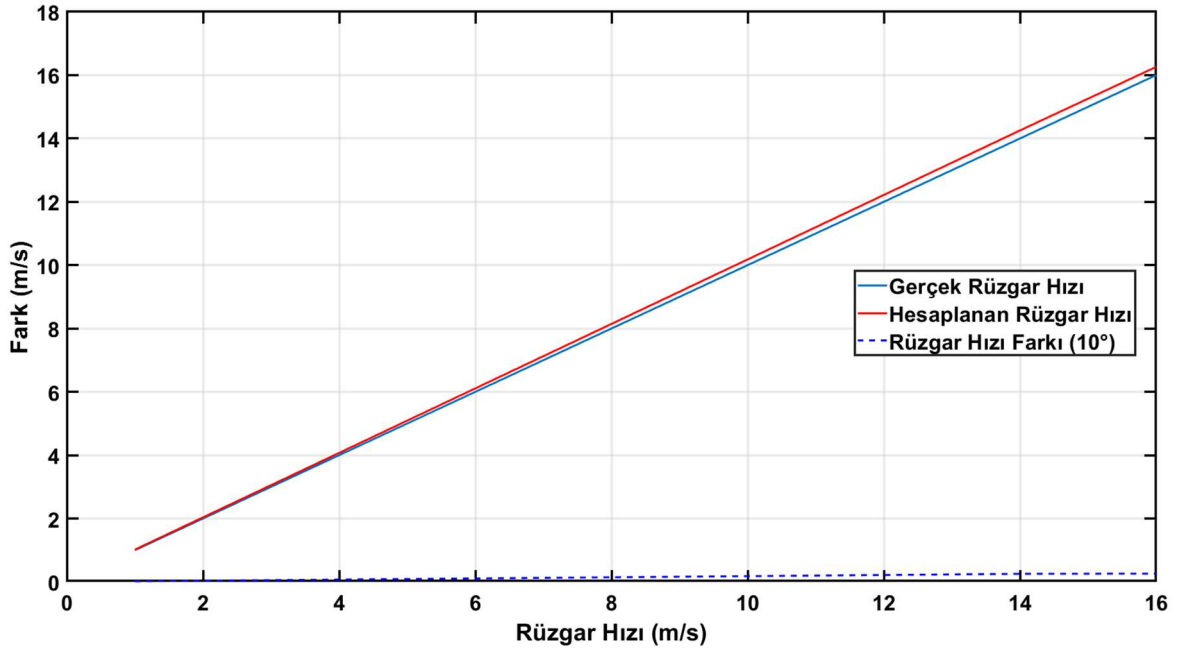
Rüzgar Hızı (m/s)	Hesaplanan Rüzgar Hızı (m/s)	Fark (m/s)
1	1,027	0,272
2	2.054	0,054
4	4.108	0,108
6	6.163	0,163
8	8.217	0,217
10	10.272	0,272
12	12.326	0,326
14	14.380	0,380
16	16.435	0,435
Ortalama Fark (m/s)		0,247



Şekil 33. (15°C) Derecede farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri

Tablo 8. (10°C) Derecede farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri

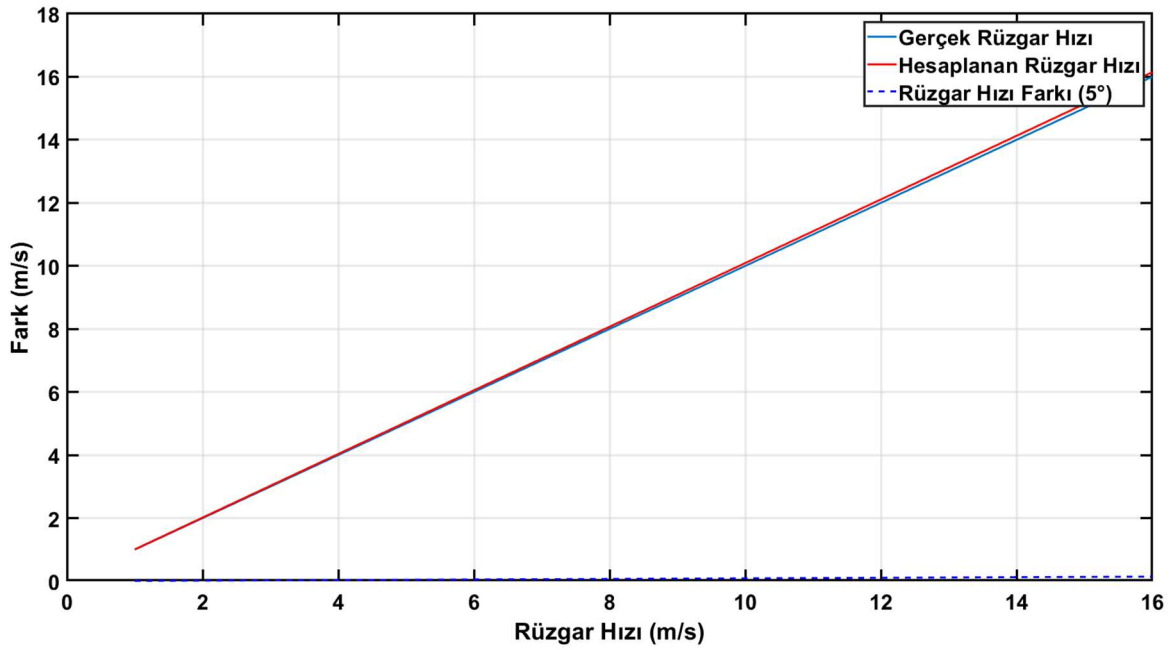
Rüzgar Hızı (m/s)	Hesaplanan Rüzgar Hızı (m/s)	Fark (m/s)
1	1,018	0,018
2	2,036	0,036
4	4,072	0,072
6	6,108	0,108
8	8,144	0,144
10	10,181	0,181
12	12,217	0,217
14	14,254	0,254
16	16,26	0,29
Ortalama Fark (m/s)		0,183



Şekil 34. (10°C) Derecede farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri

Tablo 9. (5°C) Derecede farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri

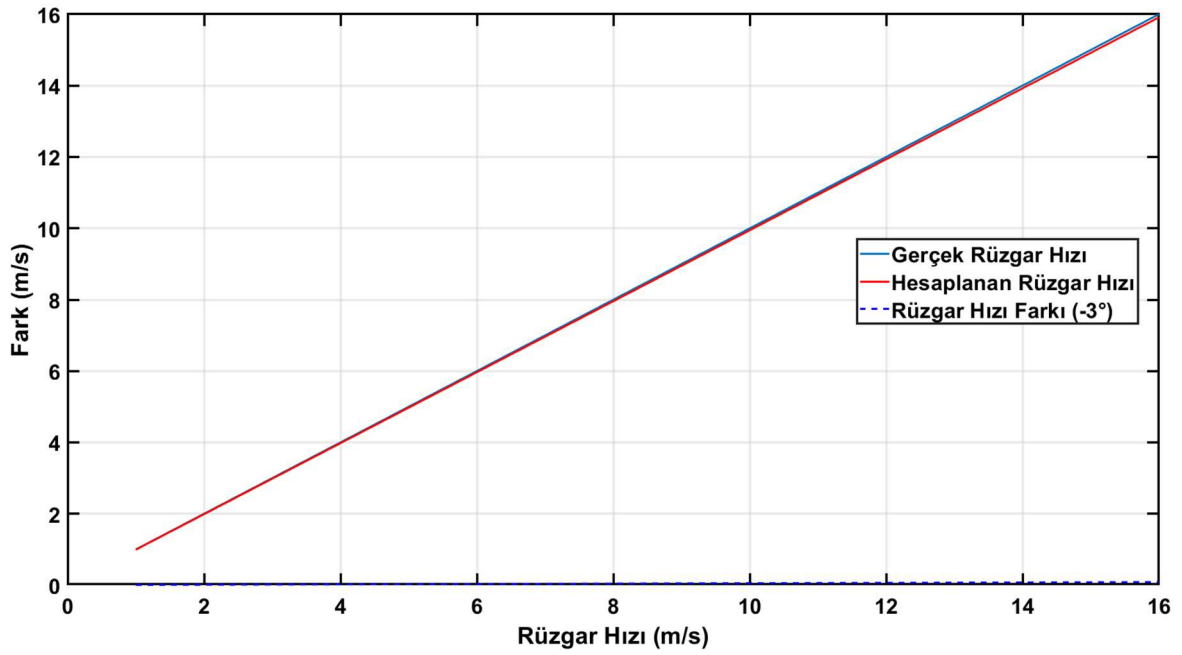
Rüzgar Hızı (m/s)	Hesaplanan Rüzgar Hızı (m/s)	Fark (m/s)
1	1,009	0,009
2	2,018	0,018
4	4,036	0,036
6	6,054	0,054
8	8,072	0,072
10	10,091	0,091
12	12,109	0,109
14	14,127	0,127
16	16,145	0,145
Ortalama Fark (m/s)		0,073



Şekil 35. (5°C) Derecede farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri

Tablo 10. (-3°C) Derecede farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri

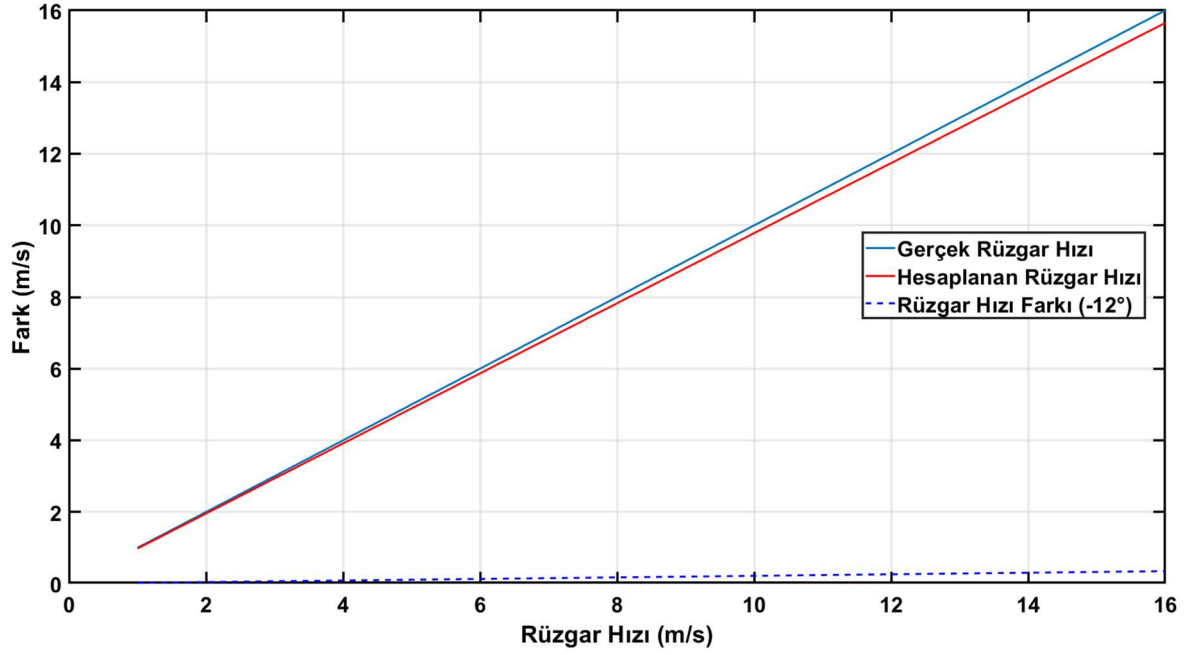
Rüzgar Hızı (m/s)	Hesaplanan Rüzgar Hızı (m/s)	Fark (m/s)
1	0,994	0,006
2	1,989	0,010
4	3,978	0,021
6	5,967	0,032
8	7,956	0,043
10	9,945	0,054
12	11,935	0,065
14	13,924	0,076
16	15,913	0,087
Ortalama Fark (m/s)		0,044



Şekil 36. (-3°C) Derecede farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri

Tablo 11. (-12°C) Derecede farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri

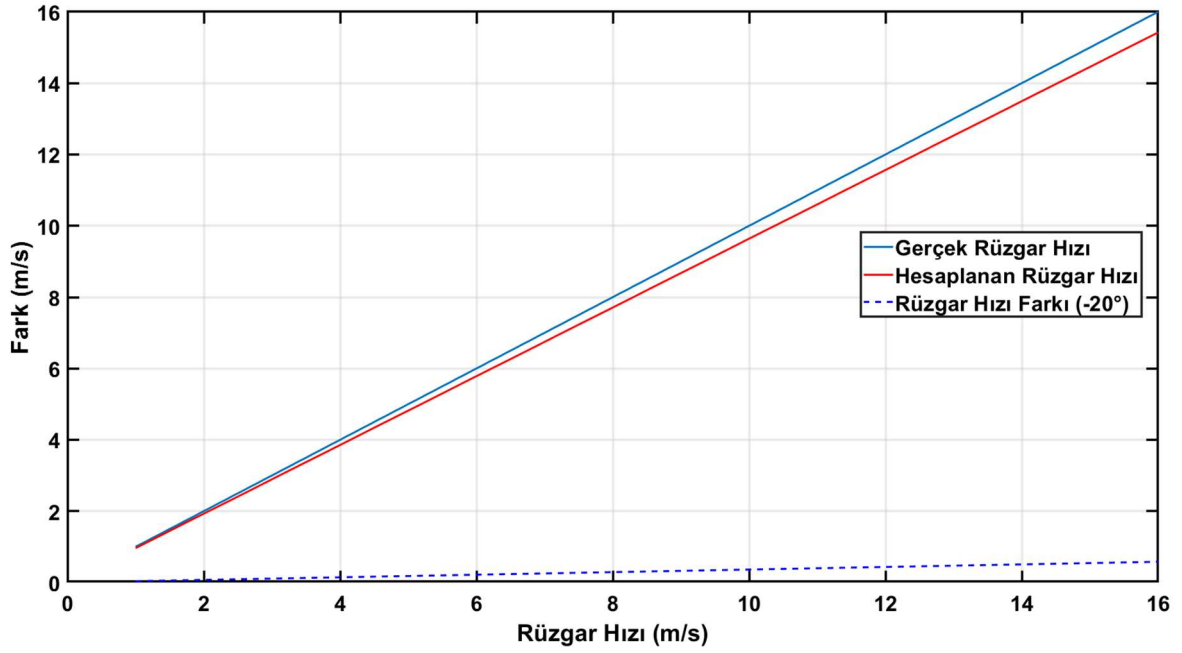
Rüzgar Hızı (m/s)	Hesaplanan Rüzgar Hızı (m/s)	Fark (m/s)
1	0,978	0,021
2	1,956	0,043
4	3,913	0,086
6	5,869	0,130
8	7,826	0,173
10	9,782	0,2173
12	11,739	0,261
14	13,696	0,304
16	15,652	0,348
Ortalama Fark (m/s)		0,176



Şekil 37. (-12°C) Derecede farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri

Tablo 12. (-20°C) Derecede farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri

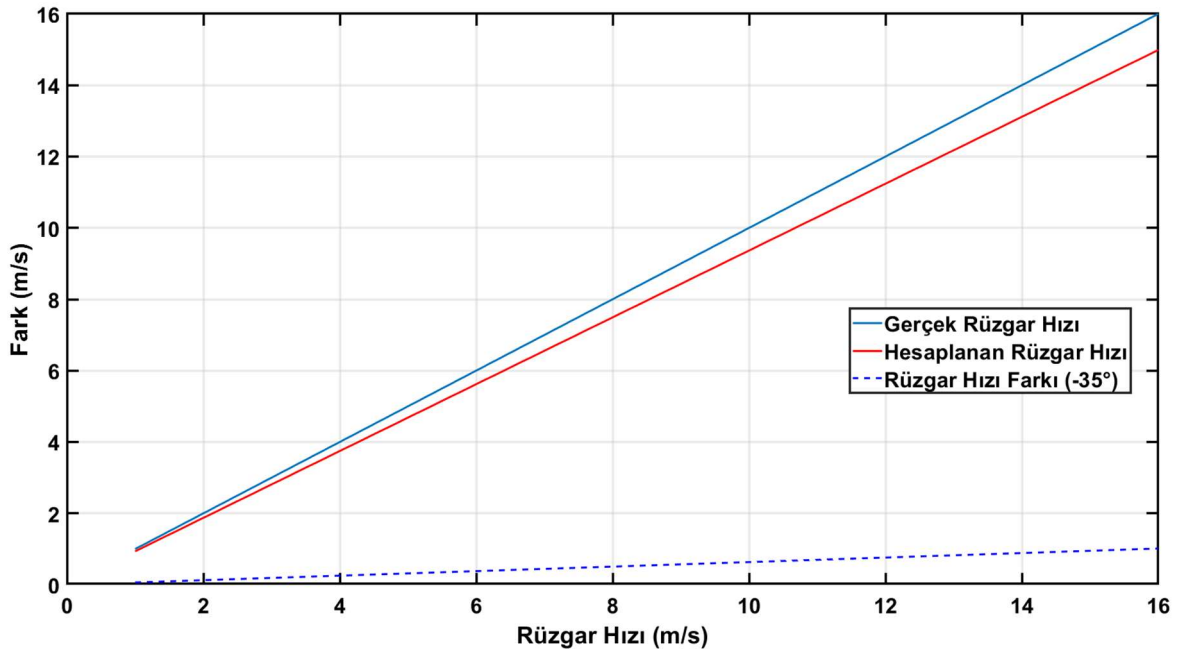
Rüzgar Hızı (m/s)	Hesaplanan Rüzgar Hızı (m/s)	Fark (m/s)
1	0,963	0,036
2	1,927	0,072
4	3,855	0,144
6	5,782	0,217
8	7,710	0,289
10	9,637	0,3622
12	11,565	0,435
14	13,493	0,507
16	15,42	0,58
Ortalama Fark (m/s)		0,294



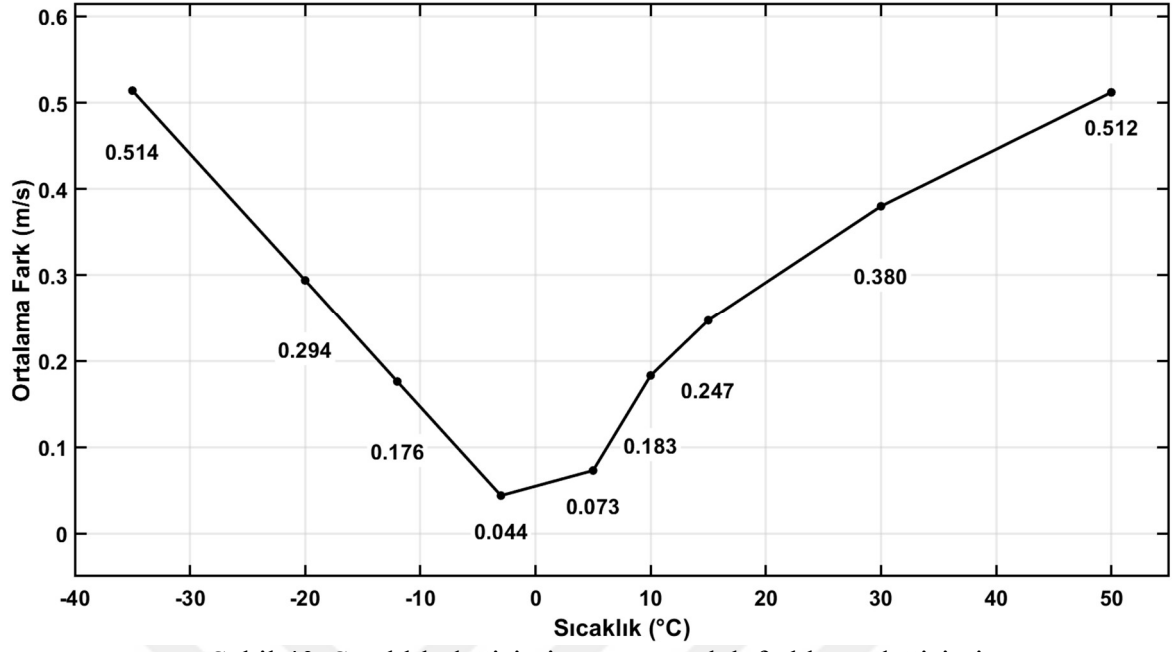
Şekil 38. (-20°C) Derecede farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri

Tablo 13. (-35°C) Derecede farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri

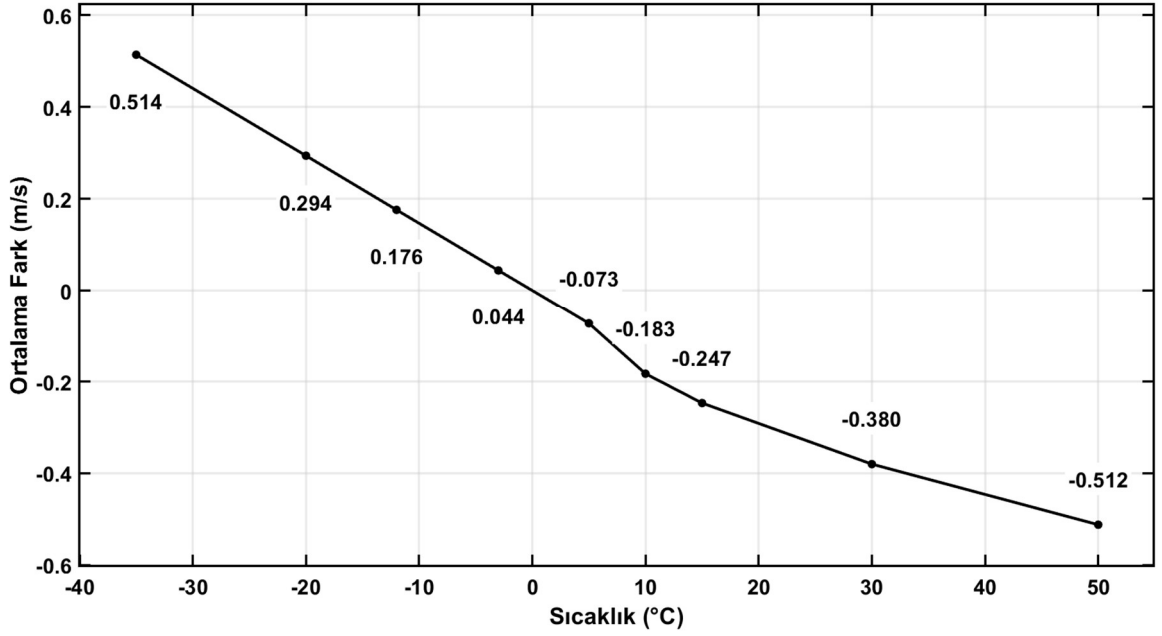
Rüzgar Hızı (m/s)	Hesaplanan Rüzgar Hızı (m/s)	Fark (m/s)
1	0,936	0,063
2	1,873	0,126
4	3,746	0,253
6	5,619	0,380
8	7,492	0,507
10	9,366	0,633
12	11,239	0,761
14	13,113	0,887
16	14,986	1,014
Ortalama Fark (m/s)		0,514



Şekil 39. (-35°C) Derecede farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri



Şekil 40. Sıcaklık değişimine göre mutlak farkların değişimi



Şekil 41. Sıcaklık değişimine göre farkların değişimi

Şekil 40'ta, elde edilen sonuçlara göre sıcaklık değişiminin mutlak ortalama farkı üzerindeki etkisi gösterilmiştir. X ekseninde sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$), Y ekseninde ise ortalama fark (m/s) değerleri yer almaktadır. Veriler, sıcaklık değeri azaldıkça ortalama farkın düştüğünü, ancak belirli bir minimum noktadan (yaklaşık 0°C civarı) sonra tekrar artmaya başladığını görülmüştür. -30°C 'de 0.514 m/s olan fark, 0°C 'de 0.044 m/s'ye kadar azalırken, sıcaklık arttıkça tekrar yükselerek 50°C 'de 0.512 m/s'ye ulaşmaktadır.

Şekil 41'de, sıcaklık değişiminin ortalama farkın (m/s) üzerindeki etkisini gösterilmiştir. X ekseni sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$), Y ekseni ise ortalama fark (m/s) değerleri yer almaktadır. Grafikte belirgin bir negatif eğilim görülmektedir; sıcaklık arttıkça ortalama fark düzenli bir şekilde azalmaktadır. -30°C 'de 0.514 m/s olan fark, sıcaklığın artmasıyla sıfır noktasına yaklaşarak negatif değerlere geçmekte ve -0.512 m/s seviyesine 50°C 'de ulaşmaktadır. Bu durum, sıcaklığın ortalama farkı doğrusal bir şekilde azalttığını göstermektedir.

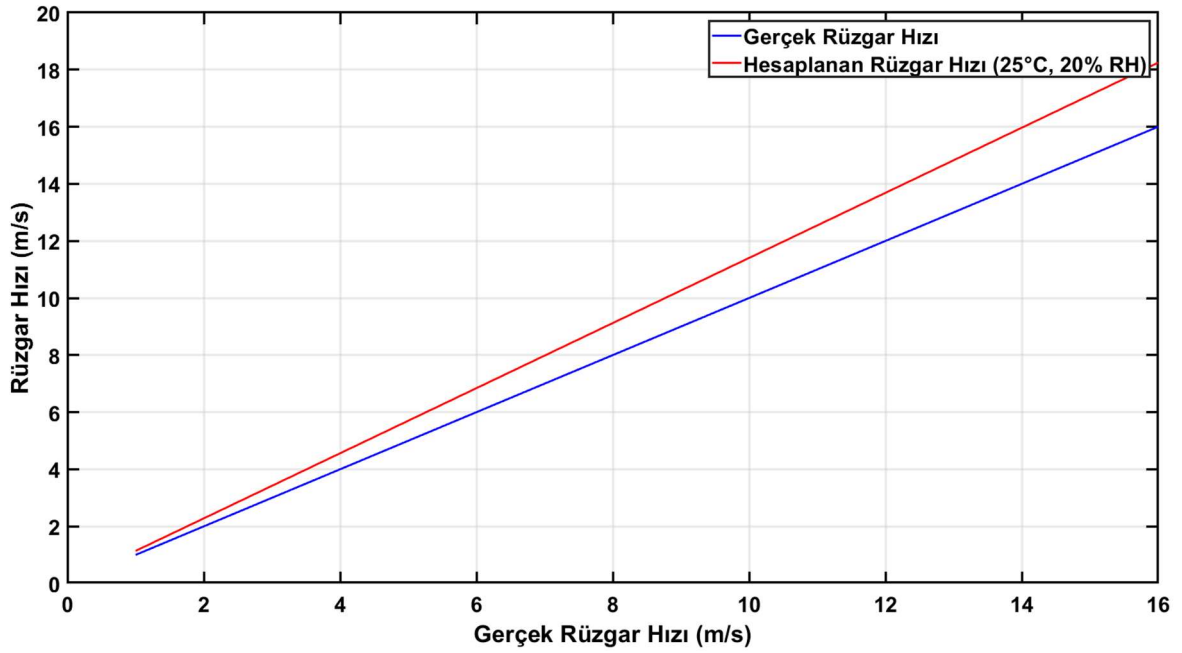
Denklem 11'de gösterildiği gibi sıcaklıkla birlikte ses hızı değiştiği için, ölçüm sisteminin hassasiyeti de değişiyor. Sesin hızı, hava sıcaklığına bağlı olarak doğrusal bir şekilde değişir çünkü ses, havadaki moleküllerin titreşim hızına bağlı olarak yayılır. Sıcaklık arttıkça, hava moleküllerinin hareket hızı artar bu da sesin daha hızlı yayılmasına neden olur. Bu durum, sıcaklık değişimi rüzgar hız ölçüm sistemine nasıl etkilediğine dair önemli bir bulgu sunuyor. Farklı sıcaklık seviyelerindeki sensör davranışları, ölçüm cihazlarının kalibrasyonunu iyileştirmek ve doğruluğu artırmak için kritik bir öneme sahiptir.

4.1.2. Nem Etkisi

Ultrasonik sensörlerin çevresel faktörlerden, nem oranlarından nasıl etkilendiğini ve bu etkilerin rüzgar hızı ölçümleri üzerindeki doğruluğu nasıl değiştirdiğini incelenmiştir. Çalışma kapsamında, iki farklı sıcaklık derecelerinde (25°C ve 35°C) farklı nem oranlarında (%20, %40, %60, %80, %100) gerçekleştirilen rüzgar hızı ölçümleri değerlendirilmiştir. Her nem oranı için gerçek ve hesaplanan rüzgar hızı arasındaki farklar hesaplanarak, sensör performansı üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Nemin ultrasonik sensörlerin ölçümlerine etkisini anlamak için aşağıda yer alan tablolar ve grafikler incelenmiştir.

Tablo 14. (25°C) Derecede ve (20%) nem oranında farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri

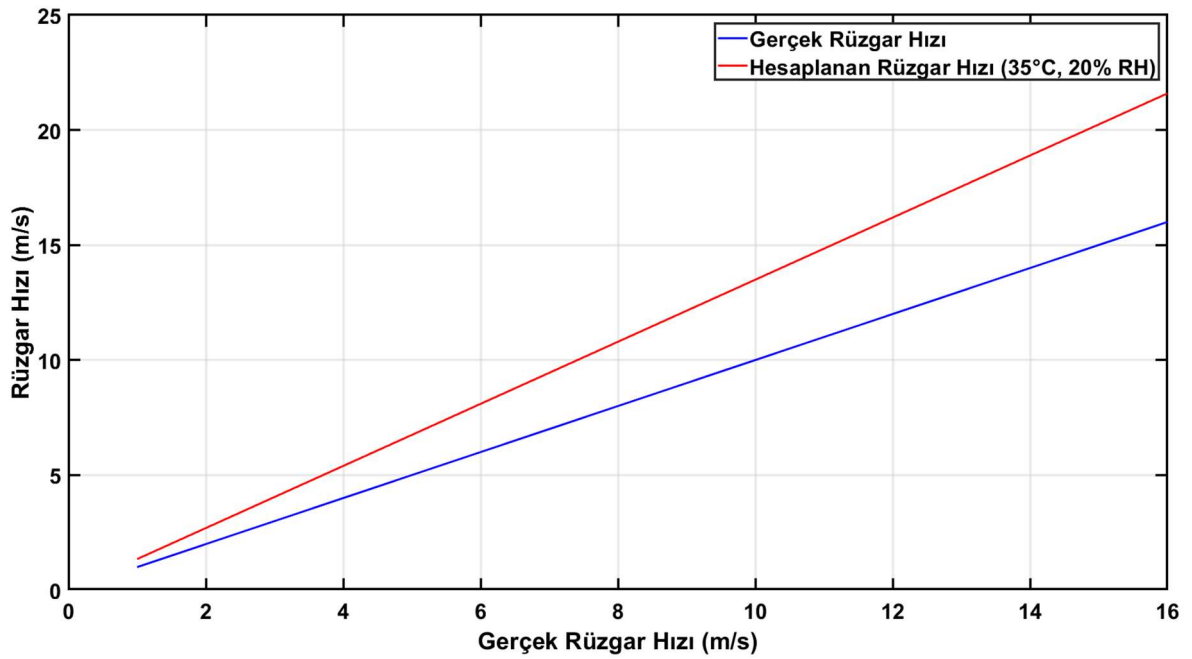
Rüzgar Hızı (m/s)	Hesaplanan Rüzgar Hızı (m/s)	Fark (m/s)
1	1,140	0,140
2	2,280	0,280
4	4,561	0,561
6	6,842	0,842
8	9,123	1,123
10	11,404	1,404
12	13,685	1,685
14	15,966	1,966
16	18,246	2,246
Ortalama Fark (m/s)		1,138



Şekil 42. (25°C) Derecede ve (20%) nem oranında farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri

Tablo 15. (35°C) Derecede ve (20%) nem oranında farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri

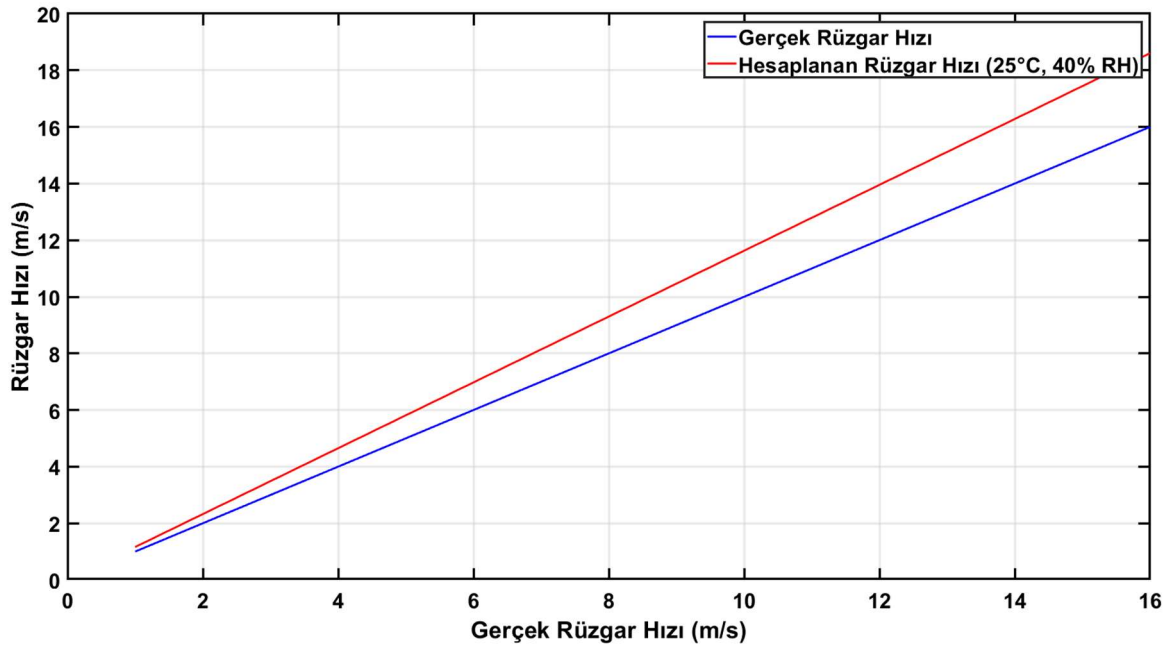
Rüzgar Hızı (m/s)	Hesaplanan Rüzgar Hızı (m/s)	Fark (m/s)
1	1,349	0,349
2	2,698	0,698
4	5,397	1,397
6	8,096	2,096
8	10,795	2,795
10	13,493	3,493
12	16,192	4,192
14	18,891	4,891
16	21,589	5,589
Ortalama Fark (m/s)		2,833



Şekil 43. (35°C) Derecede ve (20%) nem oranında farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri

Tablo 16. (25°C) Derecede ve (40%) nem oranında farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri

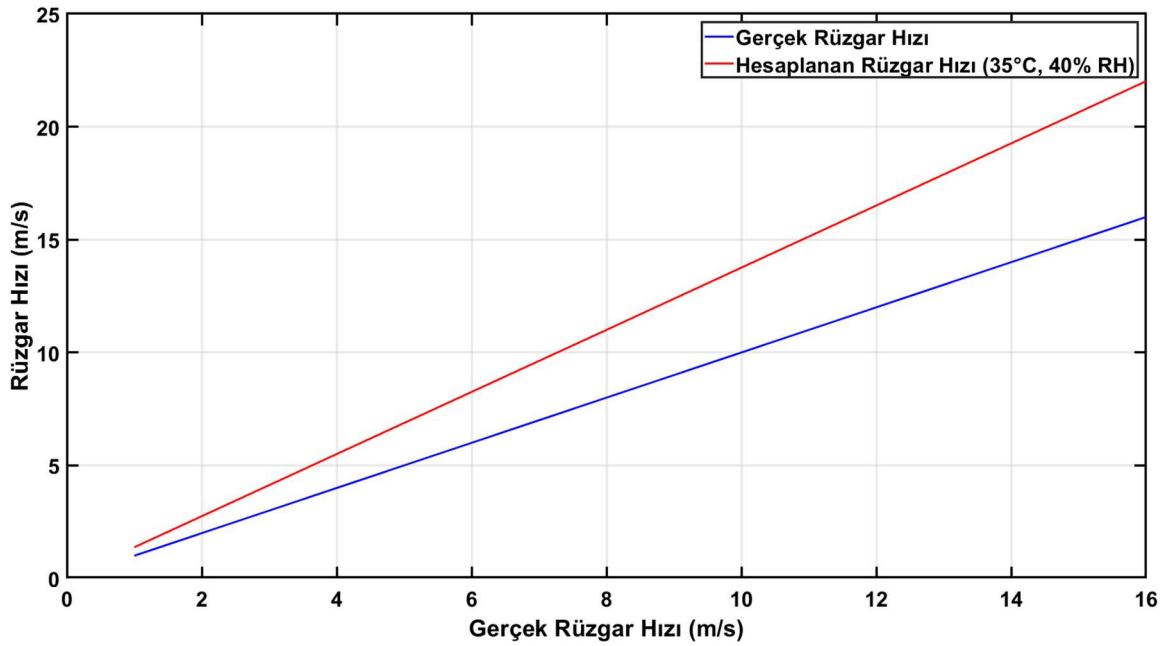
Rüzgar Hızı (m/s)	Hesaplanan Rüzgar Hızı (m/s)	Fark (m/s)
1	1,162	0,162
2	2,325	0,325
4	4,651	0,651
6	6,976	0,976
8	9,302	1,302
10	11,628	1,628
12	13,953	1,953
14	16,279	2,279
16	18,604	2,604
Ortalama Fark (m/s)		1,320



Şekil 44. (25°C) Derecede ve (40%) nem oranında farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri

Tablo 17. (35°C) Derecede ve (40%) nem oranında farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri

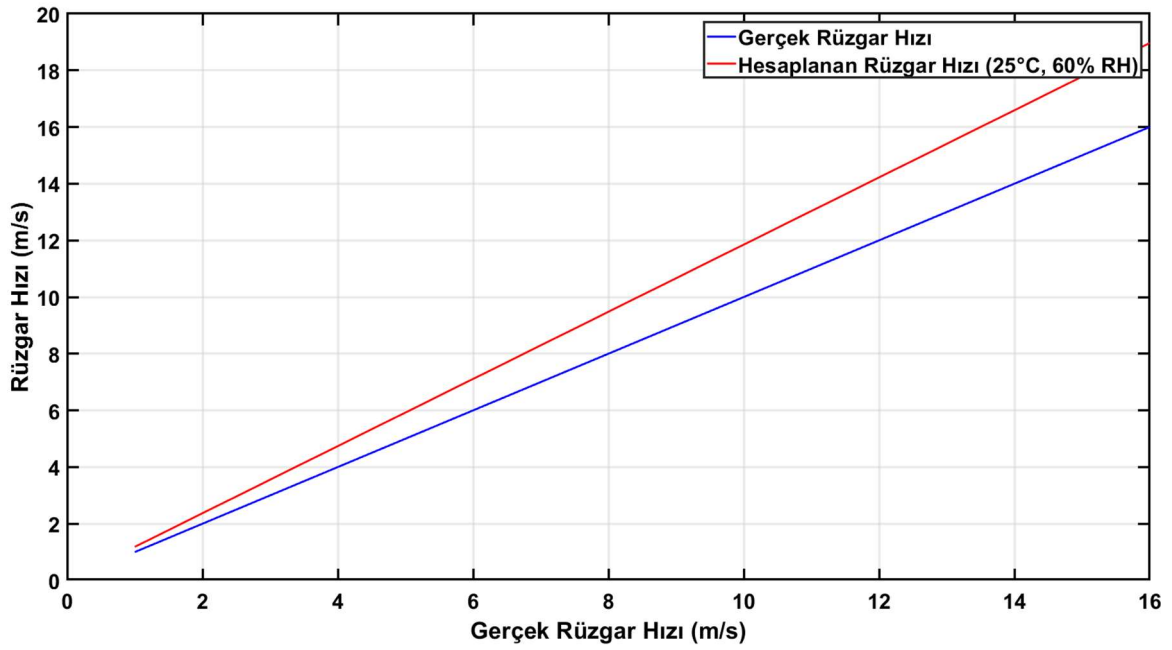
Rüzgar Hızı (m/s)	Hesaplanan Rüzgar Hızı (m/s)	Fark (m/s)
1	1,375	0,375
2	2,751	0,751
4	5,503	1,503
6	8,254	2,254
8	11,00	3,006
10	13,758	3,758
12	16,509	4,509
14	19,261	5,261
16	22,013	6,013
Ortalama Fark (m/s)		3,047



Şekil 45. (35°C) Derecede ve (40%) nem oranında farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri

Tablo 18. (25°C) Derecede ve (60%) nem oranında farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri

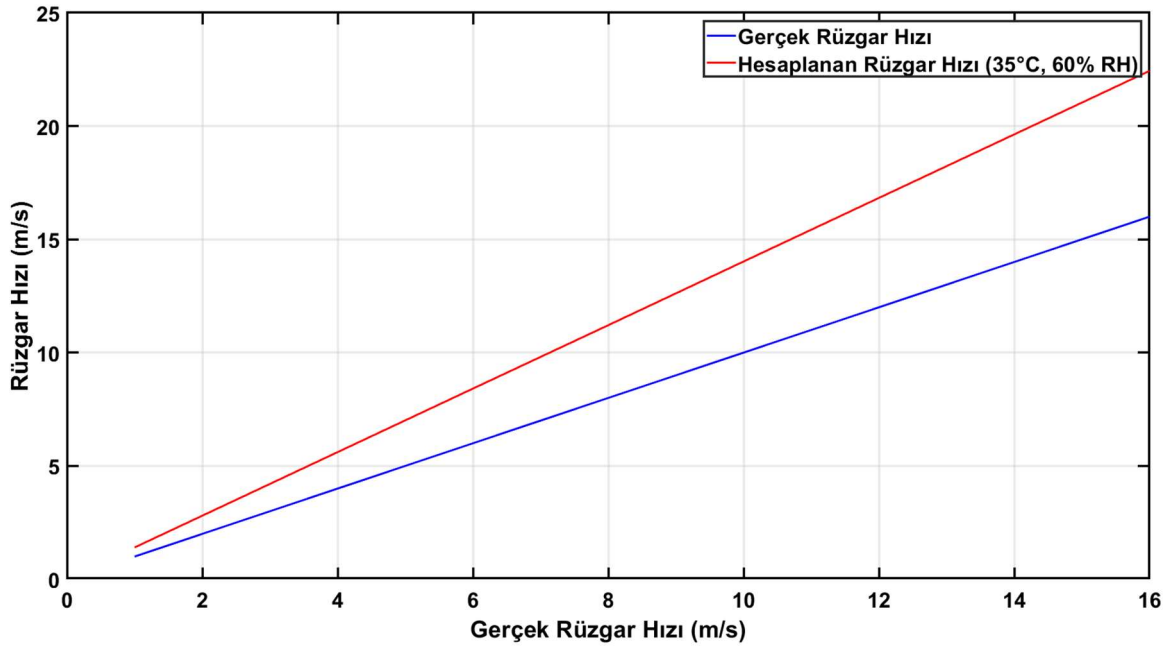
Rüzgar Hızı (m/s)	Hesaplanan Rüzgar Hızı (m/s)	Fark (m/s)
1	1,185	0,185
2	2,370	0,370
4	4,740	0,740
6	7,110	1,110
8	9,480	1,480
10	11,851	1,851
12	14,221	2,221
14	16,592	2,592
16	18,962	2,962
Ortalama Fark (m/s)		1,501



Şekil 46. (25°C) Derecede ve (60%) nem oranında farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri

Tablo 19. (35°C) Derecede ve (60%) nem oranında farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri

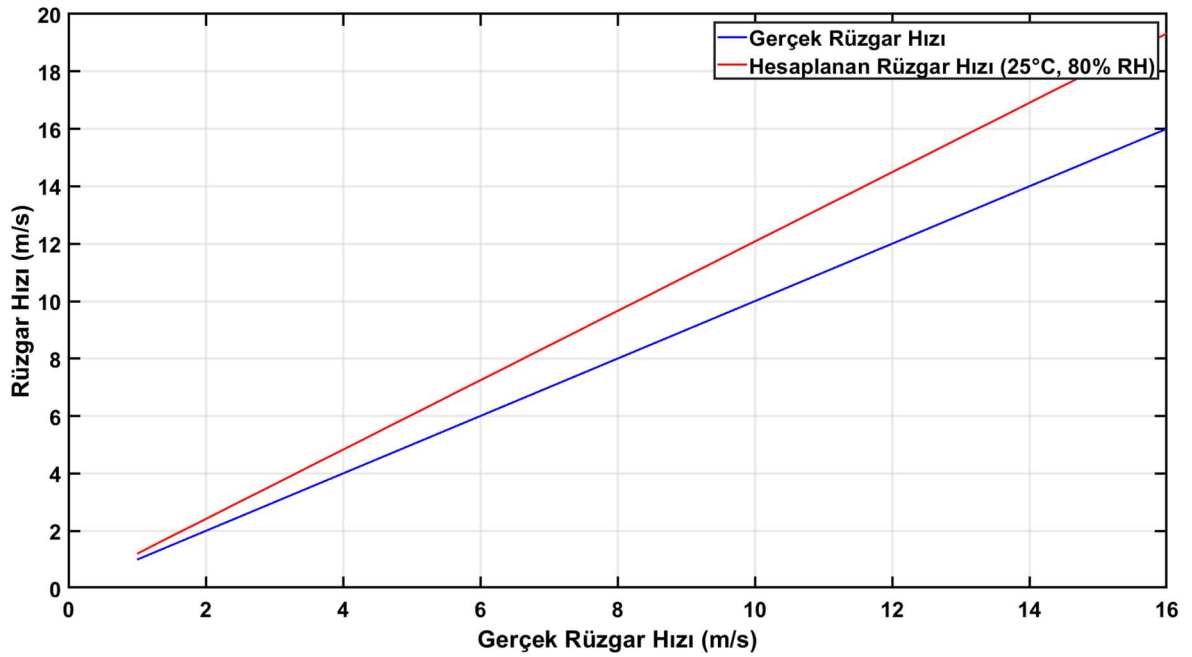
Rüzgar Hızı (m/s)	Hesaplanan Rüzgar Hızı (m/s)	Fark (m/s)
1	1,402	0,402
2	2,804	0,804
4	5,609	1,609
6	8,413	2,413
8	11,21	3,218
10	14,022	4,022
12	16,827	4,827
14	19,631	5,631
16	22,436	6,436
Ortalama Fark (m/s)		3,262



Şekil 47. (35°C) Derecede ve (60%) nem oranında farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri

Tablo 20. (25°C) Derecede ve (80%) nem oranında farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri

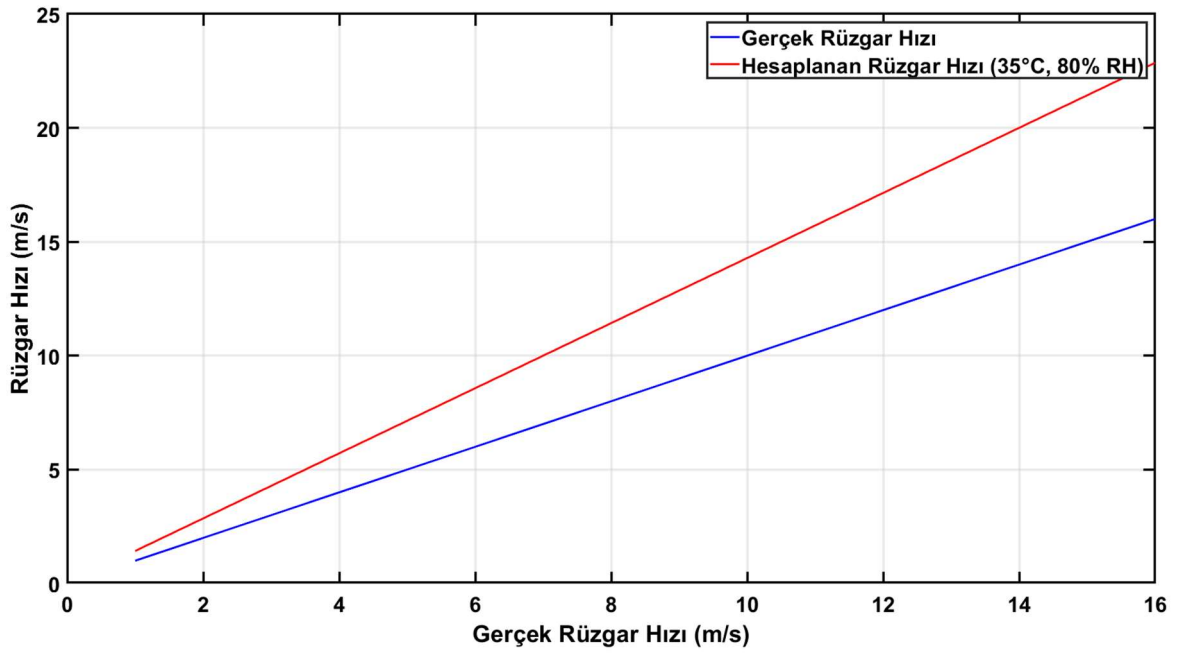
Rüzgar Hızı (m/s)	Hesaplanan Rüzgar Hızı (m/s)	Fark (m/s)
1	1,207	0,207
2	2,415	0,415
4	4,829	0,829
6	7,244	1,244
8	9,659	1,659
10	12,075	2,075
12	14,490	2,490
14	16,905	2,905
16	19,320	3,320
Ortalama Fark (m/s)		1,683



Şekil 48. (25°C) Derecede ve (80%) nem oranında farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri

Tablo 21. (35°C) Derecede ve (80%) nem oranında farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri

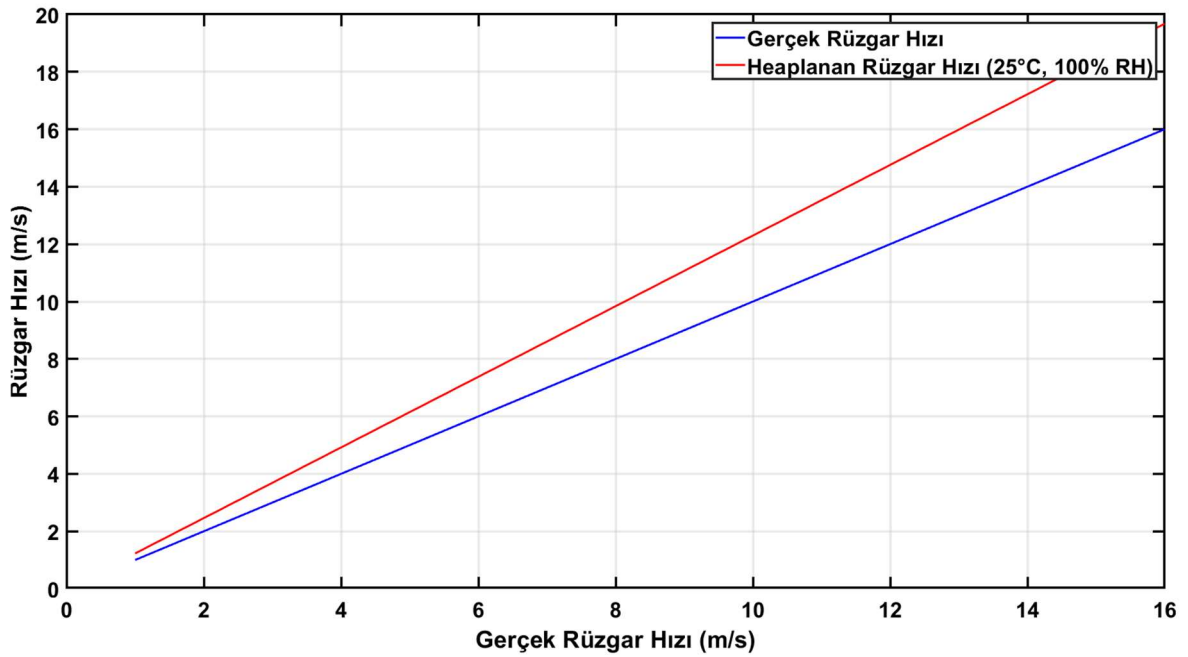
Rüzgar Hızı (m/s)	Hesaplanan Rüzgar Hızı (m/s)	Fark (m/s)
1	1,428	0,4287
2	2,857	0,857
4	5,714	1,714
6	8,572	2,572
8	11,430	3,430
10	14,287	4,287
12	17,144	5,144
14	20,002	6,002
16	22,859	6,859
Ortalama Fark (m/s)		3,467



Şekil 49. (35°C) Derecede ve (80%) nem oranında farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri

Tablo 22. (25°C) Derecede ve (100%) nem oranında farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri

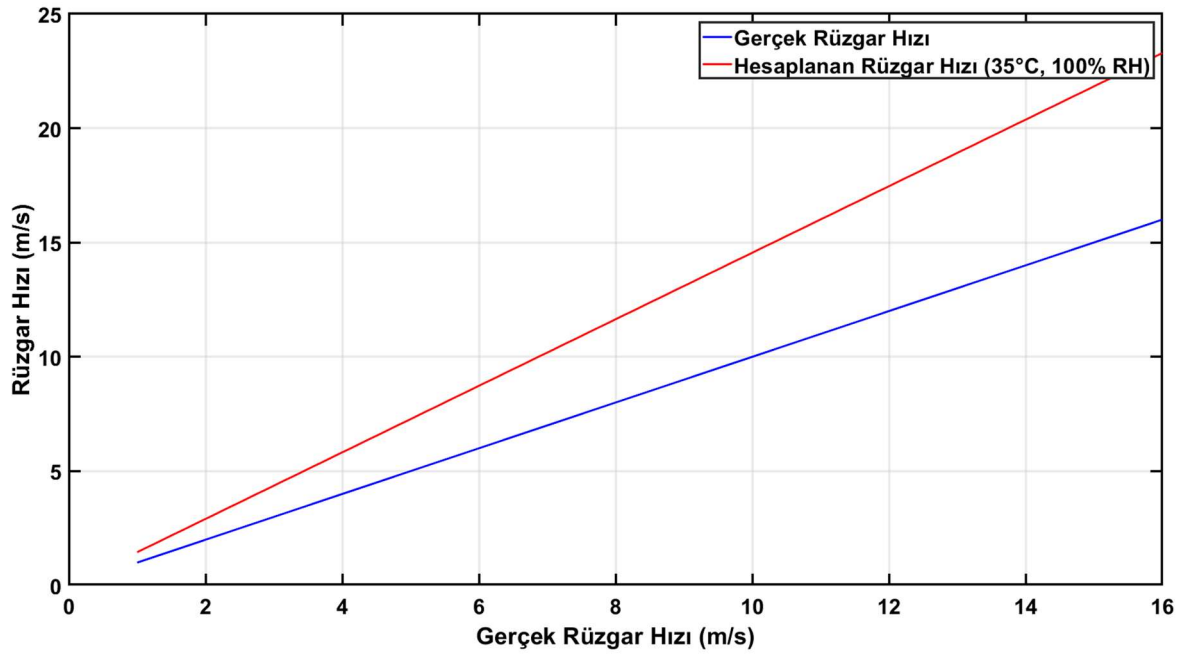
Rüzgar Hızı (m/s)	Hesaplanan Rüzgar Hızı (m/s)	Fark (m/s)
1	1,229	0,229
2	2,459	0,459
4	4,919	0,919
6	7,379	1,379
8	9,838	1,838
10	12,298	2,298
12	14,758	2,758
14	17,218	3,218
16	19,677	3,677
Ortalama Fark (m/s)		1,872



Şekil 50. (25°C) Derecede ve (100%) nem oranında farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri

Tablo 23. (35°C) Derecede ve (100%) nem oranında farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri

Rüzgar Hızı (m/s)	Hesaplanan Rüzgar Hızı (m/s)	Fark (m/s)
1	1,455	0,455
2	2,910	1,910
4	5,820	1,820
6	8,731	2,731
8	11,641	3,641
10	14,552	4,552
12	17,462	5,462
14	20,372	6,372
16	23,283	7,283
Ortalama Fark (m/s)		3,803



Şekil 51. (35°C) Derecede ve (100%) nem oranında farklı seviyelerde rüzgar hız ölçümleri

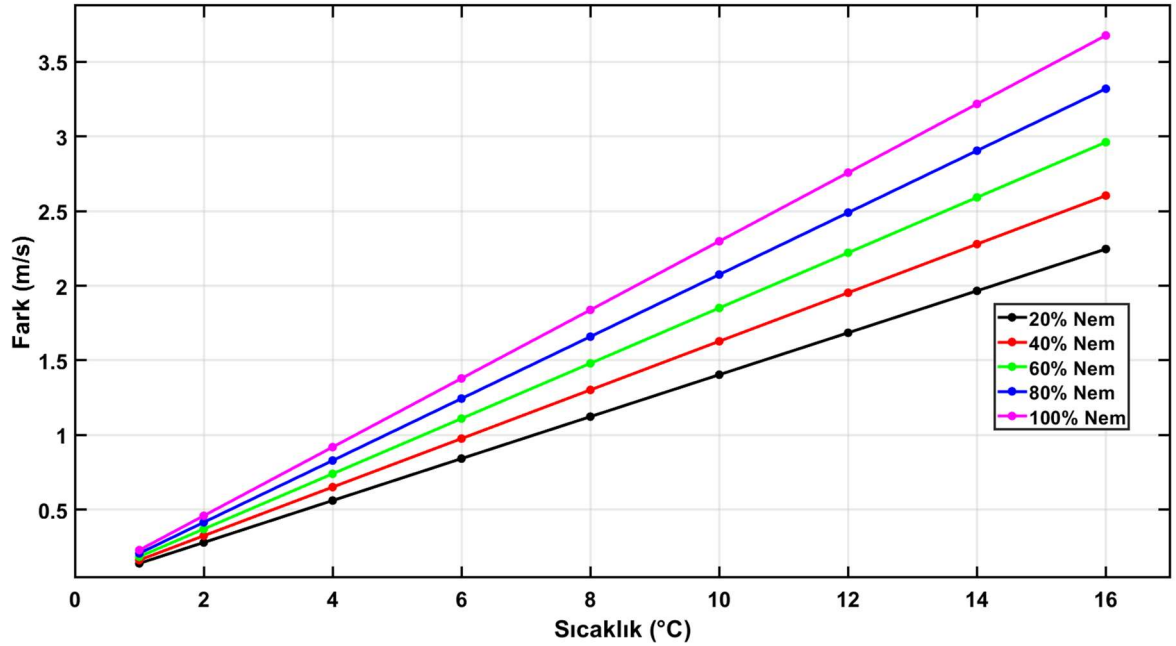
Ölçüm sonuçlarına göre, nem oranı arttıkça rüzgar hızı hesaplamalarındaki farkların arttığı ve sensörlerin doğruluğunun azaldığı gözlemlenmiştir. Bu farklar, hem 25°C hem de 35°C sıcaklıklarında yüksek nem oranları sensörlerin performansına olumsuz yönde etkilediğini sonucuna varılmıştır.

25°C ve 35°C'de farklı nem oranlarında gerçekleştirilen simülasyon sonuçları, nem oranı arttıkça hesaplanan ve gerçek rüzgar hızı arasındaki farkların arttığını gözlemlenmiştir. 25°C'deki ortalama farklar ; %20 Nem oranında 1.138 m/s, %40 oranında 1.320 m/s, %60 oranında 1.501 m/s, %80 oranında 1.683 m/s ve %100 oranında 1.872 m/s

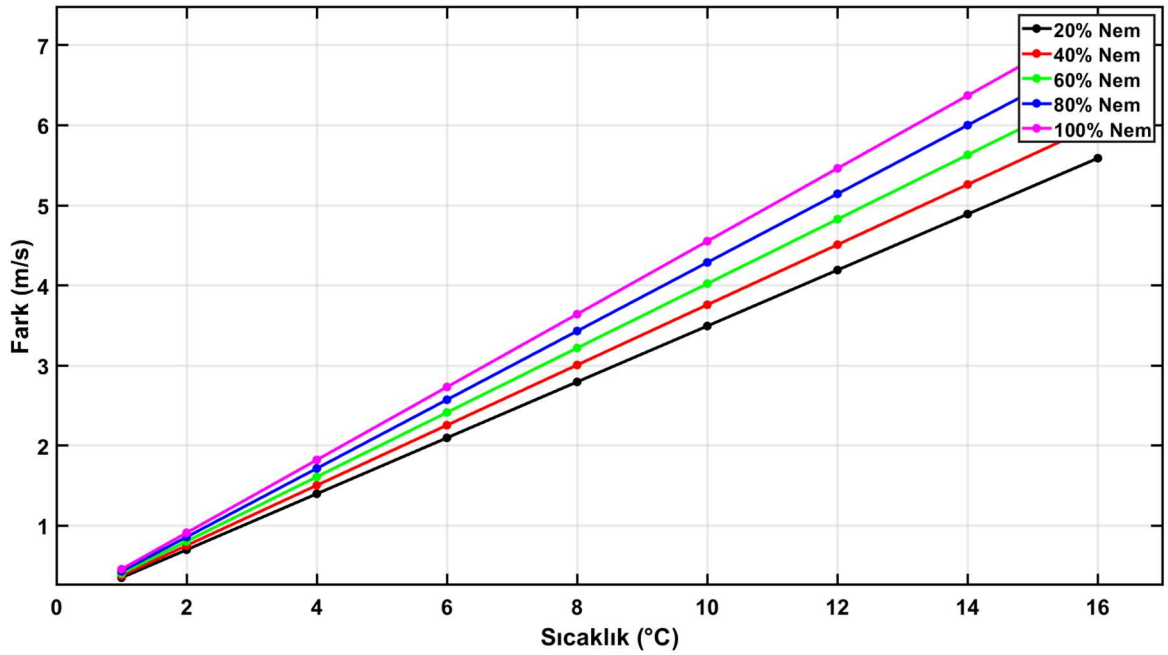
%100 nem durumunda farklar en yüksek seviyededir. Bu durum, nem oranının yükseldikçe sensörlerin doğruluğunun düştüğünü ve ölçüm hatalarının arttığını ortaya koymaktadır.

35°C'de ortalama farklar; %20 Nem oranında 2.833 m/s, %40 oranında 3.047 m/s, %60 oranında 3.262 m/s, %80 oranında 3.467 m/s, %100 oranında 3.803 m/s.

35°C'deki ölçümler de benzer bir şekilde nem arttıkça farkların büyüdüğünü göstermektedir. %100 nem ile %20 nem arasındaki fark oldukça belirgindir. Ortalama farklardaki artış, çevresel değişkenlerin (sıcaklık ve nem) ultrasonik sensörlerin üzerindeki etkisi, özellikle sıcaklık yükseldikçe daha belirgin hale geldiğini göstermektedir.



Şekil 52. (25°C) Derecede farklı nem oranında farklı seviyelerde rüzgar hız farkları



Şekil 53. (35°C) Derecede farklı nem oranında farklı seviyelerde rüzgar hız farkları

Şekil 52'de, sıcaklık sabit tutularak (25°C) farklı nem seviyelerinin rüzgar hız üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu analizde, nem oranının arttıkça rüzgar hızındaki farkların da belirgin bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Özellikle yüksek nem oranlarında (100%), rüzgar hızı ile sıcaklık arasındaki ilişki daha belirgin hale gelmektedir.

Şekil 53'te ise, sıcaklık 35°C olarak sabitlenmiş ve yine farklı nem seviyelerinin rüzgar hızı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Bu grafikte de benzer bir eğilim gözlemlenmiştir; nem oranı arttıkça rüzgar hızı artmakta ve 35°C'lık sıcaklık ile 25°C'lık sıcaklık arasındaki farklar daha belirginleşmektedir.

Bu durum, nemin rüzgar hızı üzerindeki etkisinin daha yüksek sıcaklıklarda daha güçlü bir şekilde ortaya çıktığını ortaya koymaktadır. Her iki grafikte de nemin hesaplanan rüzgar hız değerlerindeki hataları artırma eğiliminde olduğunu görülmektedir. Sıcaklık artışına bağlı olarak, özellikle yüksek nem seviyelerinde rüzgar hızındaki farklar daha belirgin hale gelmekte ve nemin etkisi daha belirgin bir şekilde gözlemlenmektedir.

Bu sonuçlar, farklı ortam koşulların rüzgar hız üzerindeki etkilerini daha iyi anlamamıza olanak sağlamıştır.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada tasarlanan sensör, rüzgarın hızını ve yönünü ölçmek için SRF02 ultrasonik sensörleri ve NTC termistörlerinin birleşimini kullanmaktadır. Sensör, ultrasonik sensörleri kullanarak uçuş süresi (ToF) yöntemi ile rüzgarın hızını ölçmekte, NTC termistörleri ile ise ölçülen farklı sıcaklık değerleri arasındaki farkları karşılaştırarak rüzgarın yönünü belirlemektedir. Geliştirilen sistem, farklı rüzgar hızları ve yönlerinde yapılan testlerde başarılı sonuçlar elde etmiştir.

Yapılan testlerde, sensörün ölçtüğü ile gerçek rüzgar hız değerleri arasındaki farklar oldukça düşük olmuştur, ortalama hata oranı %2,5 civarında kalmıştır. Elde edilen sonuçlardan, sensörün yüksek bir doğruluğa sahip olduğunu ve düşük rüzgar hızlarında doğru bir şekilde ölçüm yapabildiğini göstermektedir. Sistemin doğruluğu, 5 m/s ile 1 m/s arasındaki hızlarda yapılan testlere göre analiz edilmiştir ve ölçülen minimum rüzgar hızı 0,60 m/s olarak belirlendi.

Rüzgar yön ölçümü ise yaklaşık 20°C'de 2-3 dakikalık gecikmeyle çalıştı. Sensör, rüzgarın geçtiği farklı yöndeki (Kuzey, Doğu, Güney, Batı) sıcaklığı algılar ve ölçülen değerlerin arasındaki farklar kullanılarak rüzgarın yönünü belirler. Gerçek ile ölçülen rüzgar yön arasında yapılan karşılaştırmalar, sensörün doğru ve güvenilir sonuçlar verdiğini ortaya koymaktadır.

Çevresel faktörlerin sensör üzerindeki etkisi de önemli bir bulgu olarak karşımıza çıkmaktadır. Bunula ilgili bir MATLAB simülasyonu gerçekleştirilmiştir. 25°C ve 35°C'deki farklı nem oranlarında gerçekleştirilen simülasyonlar, nem oranı arttıkça gerçek ve hesaplanan rüzgar hızı arasındaki farkların arttığını ve sensörün doğruluğunda belirgin bir azalma olduğunu gözlemlenmiştir.

25°C'deki testlerde %20 nem oranında ortalama fark 1.138 m/s iken, %100 nemde bu fark 1.872 m/s'ye kadar çıkmaktadır. 35°C'deki testlerde ise %20 nem oranında 2.833 m/s olan ortalama fark, %100 nemde 3.803 m/s'ye yükselmektedir. Bu bulgular, yüksek nem oranlarının sensörün performansını olumsuz yönde etkileyerek, doğruluklarının azaldığını ve ölçüm hatalarının arttığını göstermektedir.

Nem ile birlikte sıcaklık artışı da sensörün doğruluğuna etkilemiştir. Özellikle sıcaklık arttıkça, çevresel değişkenlerin sensörler üzerindeki etkisi daha belirgin hale gelmiştir. 25°C ve 35°C arasındaki farklar, nem oranı arttıkça daha büyük ölçüde artmıştır. Bu durum,

çevresel faktörlerin, özellikle nem ve sıcaklık değişimlerinin, ultrasonik sensörlerin doğruluğu üzerinde büyük etkiler yarattığını ortaya koymaktadır.

Sıcaklık değişiminin etkisi incelendiğinde, sıcaklık değiştikçe ortalama farkların genellikle değiştiğini gözlemlenmiştir. Mutlak farklara bakıldığında düşük sıcaklıklarda ölçülen farklar daha yüksekken, sıcaklık arttıkça bu farklar düşmektedir. Ancak, belirli bir sıcaklık noktasından sonra (yaklaşık 0°C civarı), sıcaklık arttıkça farklar tekrar yükselmektedir. Örneğin, -30°C 'de 0.514 m/s olan fark, 0°C 'de 0.044 m/s 'ye kadar düşerken, sıcaklık arttıkça tekrar yükselerek 50°C 'de 0.512 m/s 'ye ulaşmaktadır. Bu durum, ses hızının sıcaklıkla birlikte değişmesi nedeniyle ölçüm sisteminin hassasiyetinde de bir değişim meydana geldiğini göstermektedir.

Mutlak olmayan sıcaklık farkları incelendiğinde ise, -30°C 'de 0.514 m/s olan farkın, sıcaklığın artmasıyla birlikte sıfır noktasına yaklaşarak negatif değerlere geçtiği ve 50°C 'de -0.512 m/s seviyesine indiği gözlemlenmiştir. Bu durum, sıcaklık artışının ortalama farkı doğrusal bir şekilde azalttığını ve sıcaklık yükseldikçe farkların negatif yönde düzenli bir azalma gösterdiğini ortaya koymaktadır. Sıcaklık arttıkça, hava moleküllerinin hareket hızı artar bu da sesin daha hızlı yayılmasına neden olur dolayısıyla sıcaklık değişimini bağlı bu şekilde farklar gözlemlenebilir. Bu bulgu, sıcaklık değişimlerinin sensörlerin performansı üzerinde doğrudan bir etkisi olduğunu ve sıcaklık seviyelerinin sensör kalibrasyonunun doğruluğu üzerinde kritik bir rol oynadığını göstermektedir.

Testlerde elde edilen sonuçlar, sensörün doğruluğunu ve güvenilirliğini kanıtlamıştır. Rüzgar hız ve yön ölçümü yöntemi potansiyel uygulamaları için bir temel oluşturmuştur. Sensörün çevresel faktörler tarafından etkilenebileceğini gözlemlenmiştir, ancak kalibrasyon yapılması ile çevresel koşullara uyum sağlayarak doğruluğunun artırılabilir.

Geliştirilmiş rüzgar sensörü, küçük boyut, taşınabilirlik, uzun ömür ve düşük maliyet gibi özellikler, hacim sınırlamalı uygulamalara uygun bir çözüm sunmaktadır. Ayrıca, enerji verimliliği, uzun süreli kullanımlarda önemli bir avantaj sağlamaktadır. Çevresel faktörlerin sensör doğruluğu üzerindeki etkilerini dikkate alarak, gelecekteki rüzgar hızı ve yönü ölçüm sistemleri için bir temel oluşturmaktadır.

6. ÖNERİLER

Bu çalışmada tasarlanan sensörün performansını artırmak için, daha geniş bir sıcaklık aralığında kalibrasyon yapılması ve çevresel faktörlere karşı doğruluğun artırılması önerilmektedir. Ayrıca, rüzgar hızındaki ani değişimlere karşı daha doğru tepki verebilmesi için farklı hava koşullarında saha testlerinin gerçekleştirilmesi, nem, basınç, ışık gibi ek sensörlerle çoklu entegrasyon sağlanarak daha kapsamlı çevresel verilerin toplanması, sensörün dayanıklılığını artıracak tasarım iyileştirmelerine olanak tanıyacaktır.

Kablosuz iletişim protokollerinin (Bluetooth, Wi-Fi, LoRa) kullanımı, verilerin uzak alanlardan erişilebilirliğini sağlayarak sensörün daha geniş alanlarda kullanımını kolaylaştıracaktır. Şuanda sensör, rüzgarın sadece belirli yönlerini ölçmektedir (Kuzey, Güney, Doğu, Batı). Ancak, rüzgar yönü ölçümünün 360 derece olarak geliştirilmesi, sensörün daha farklı alanlarda daha etkin bir şekilde kullanılmasına katkı sağlayacaktır.

Çevresel faktörlerin etkilerini minimize etmek için sensörlerin daha sıkı kalibrasyona tabi tutulması ve gelişmiş algoritmalar ile filtreleme yöntemlerinin kullanılması önerilmektedir. Ayrıca, sensörlerin doğruluğunu artırmak için mekanik yapısında çevresel koşullara uygun önlemler alınması gerektiği vurgulanmaktadır.

Sonuç olarak, bu sensörün performansı ve kullanım alanları, yukarıda belirtilen iyileştirmelerle daha da geliştirilebilir. Yapılacak bu iyileştirmeler, sensörün daha verimli, güvenilir ve çeşitli endüstriyel ve araştırma uygulamalarında kullanılabilirliğini artıracaktır. Ancak, bu çalışma nihai bir sonuç olarak değerlendirilmemelidir. Bu alandaki araştırmalar ve gelişmeler devam etmektedir ve başkaları tarafından yapılacak daha ileri düzey çalışmalar ve yeni teknolojiler, daha iyi yöntemlere ve sonuçlara ulaşılmasına olanak sağlayabilir.

7. KAYNAKLAR

- Aleksic, O., Radojcic, B., & Ramovic, R. (2006). Electrode effect on NTC planar thermistor volume resistivity. *Proceedings of the 25th International Conference on Microelectronics (MIEL 2006)*. Belgrade, Serbia.
- Aleksic, S. O., Mitrovic, N. S., Nikolic, Z., Lukovic, M. D., Obradovic, N. N., & Lukovic, S. G. (2019). Three-axis heat loss anemometer comprising thick-film segmented thermistors. *IEEE Sensors Journal*, 19(22), 10228-10235.
- Bucci, G., Ciancetta, F., Fiorucci, E., Gallo, D., Landi, C., & Luiso, M. (2013). A low-cost ultrasonic wind speed and direction measurement system. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 62(12), 3303-3311.
- Chandran, P., Bhakthavatchalu, R., & Kumar, P. P. (2016). Time of flight measurement system for an ultrasonic anemometer. *2016 International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies*, s. 734-737. Kumaracoil, India.
- Chen, J., & Liu, C. (2003). Development and characterization of surface micromachined, out-of-plane hot-wire anemometer. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 12(6), 979-988.
- Chen, B., Zhu, Y., Qin, M., & Huang, Q. (2014). Effects of ambient humidity on a micromachined silicon thermal wind sensor. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 23(2), 253-255.
- Ding, X., Zou, Y., Li, C., & Wang, J. (2016). Study of the ultrasonic three-dimensional wind speed measurement methods based on the phase difference. *Proceedings of the Sixth International Conference on Instrumentation & Measurement, Computer, Communication and Control*, s. 785-789. Harbin, China
- Dong, Z., Huang, Q., & Qin, M. (2010). Thermal asymmetry compensation of a wind sensor fabricated on ceramic substrate. *IEEE Sensors 2010 Conference*, s. 595-599. Waikoloa, HI, USA.
- Dong, Z., Chen, J., Qin, Y., Qin, M., & Huang, Q. (2012). Fabrication of a micromachined two-dimensional wind sensor by Au–Au wafer bonding technology. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 21(2), 467-475.
- Dos Santos, J. C. F., Pinheiro, P. P., & Franca, J. A. D. (2019). Recovering of corrupted ultrasonic waves for determination of ToF using the zero-crossing detection technique. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 68(11), 4234-4241.
- Fan, H. B., Liu, J. L., & Sun, G. Z. (2018). Design of low-power ultrasonic anemometer based on STM32L476. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 408(1).

- Fassler, L. (2024, Şubat 20). *Arduino ultrasonic anemometer*. Soldernerd: <https://soldernerd.com/arduino-ultrasonic-anemometer/> adresinden alınmıştır.
- Fernandes, D., Gomes, L., & Costa, A. (2017). Wind speed and direction measurement based on time of flight ultrasonic anemometer. *2017 IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, s. 1417-1421. Edinburgh, UK.
- Gao, S., Yi, Z., Ye, Y., Qin, M., & Huang, Q. A. (2019). Configuration of a self-heated double Wheatstone bridge for 2-D wind sensors. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 28(1), 125-130.
- Gao, S., Yi, Z., Ye, Y., Qin, M., & Huang, Q. A. (2019). Temperature effect and its compensation of a micromachined 2-D anemometer. *IEEE Sensors Journal*, 19(14), 5454-5459.
- Gupta, A., & Charan, C. (2024). Analysis of universal asynchronous receiver-transmitter (UART). *2024 2nd International Conference on Device Intelligence, Computing and Communication Technologies*. Dehradun, India.
- Gutarra, J. S., Gastelo-Roque, J. A., & Sulluchuco, J. (2020). A cup anemometer using 3D additive manufacturing. *Proceedings of 2020 IEEE XXVI International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON)*. Lima, Peru.
- Huang, L. (2022). Micromachined thermal time-of-flight flow sensors and their applications. *Micromachines (Basel)*, 13(10).
- Kim, S., Nam, T., ve Park, S. (2004). Measurement of flow direction and velocity using a micromachined flow sensor. *Measurement Science and Technology*, 114(2-3), 312-318.
- Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., & Sanders, J. V. (2000). *Fundamentals of Acoustics 4. Baskı*. New York, USA: John Wiley & Sons.
- Le Duff, A., Plantier, G., & Gazengel, B. (2005). Real-time particle detection and velocity measurement by means of laser Doppler velocimetry. *2005 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, s. 2222-2225. Ottawa, ON, Canada.
- Lau, H. (2024, Ocak 15). *Ultrasonic anemometer (Wind speed and direction)*. Hardy Lau, DL1GLH: <https://www.dl1glh.de/ultrasonic-anemometer.html> adresinden alınmıştır.
- Lopes, G. M. G., Da Silva Junior, D. P., De Franca, J. A., De Moraes Franca, M. B., De Souza Ribeiro, L., Moreira, M., & Elias, P. (2017). Development of 3-D ultrasonic anemometer with nonorthogonal geometry for the determination of high-intensity winds. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 66(11), 2836-2844.
- Makinwa, K. A. A., & Huijsing, J. H. (2001). A wind-sensor interface using thermal sigma delta modulation techniques. *Sensors and Actuators A: Physical*, 92(1-3), 280-285.

- Makinwa, K. A. A., & Huijsing, J. H. (2001). A wind sensor with an integrated low-offset instrumentation amplifier. *ICECS 2001. 8th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (Cat. No.01EX483)*, s. 1505-1508. Malta, Malta. b
- Matova, S. P., Makinwa, K. A. A., & Huijsing, J. H. (2002). Compensation of packaging asymmetry in a 2-D wind sensor. *IEEE Sensors 2002*, s. 1256-1259. Orlando, FL, USA.
- Menicanin, A. B., Aleksic, O. S., Nikolic, M. V., Savic, S. M., & Radojcic, B. M. (2008). Novel uniaxial anemometer containing NTC thick film segmented thermistors. *2008 26th International Conference on Microelectronics*. Nis, Serbia and Montenegro.
- Miguel, J., & Caetano, M. (2017). *Development of an odor compass: 2D thermal anemometer with olfactory information*. Coimbra Üniversitesi, Yüksek lisans tezi, Coimbra, Portekiz.
- Nam, T., Kim, S., & Park, S. (2004). The temperature compensation of a thermal flow sensor by changing the slope and the ratio of resistances. *Sensors and Actuators A: Physical*, 114(2-3), 212-218.
- Panda, K. G., Agrawal, D., Nshimiyimana, A., & Hossain, A. (2016). Effects of environment on accuracy of ultrasonic sensor operates in millimeter range. *Perspectives in Science*, 8, 574-576.
- Perez del Valle, M., Urbano Castelan, J. A., Matsumoto, Y., & Cortes Mateos, R. (2007). Low-cost ultrasonic anemometer. *2007 4th International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, s. 213-216. Mexico City, Mexico.
- Que, R. Y., Zhu, R., Que, Q. Z., & Cao, Z. (2011). Temperature compensation for thermal anemometers using temperature sensors independent of flow sensors. *Measurement Science and Technology*, 22(8), 1-5.
- Santos, F. A. O., Villanueva, J. M. M., & Villarim, M. R. (2019). Sensitivity analysis in wind speed measurement using ultrasonic transducers. *Proceedings of the IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE)*. Sao Paulo, Brazil.
- Schlaberg, H. I., Liu, Y., Li, Z., & Liu, S. (2013). Wind speed and direction measurement with narrowband ultrasonic sensors using dual frequencies. *2nd IET Renewable Power Generation Conference (RPG 2013)*. Beijing, China.
- Shan, Z., Xie, X., & Liu, X. (2023). Wind speed and direction measurement based on three mutually transmitting ultrasonic sensors. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 20, 8000205.
- Sosna, C., Buchner, R., & Lang, W. (2010). A temperature compensation circuit for thermal flow sensors operated in constant-temperature-difference mode. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 59(6), 1715-1721.

- Soukar, N. & Yazgan, A. (2024). Design of a ntc-based wind sensor enhanced with auto-zero function. *19th International istanbul scientific research congress on life, engineering, architecture, and mathematical sciences*, s. 1035-1036.
- Topuz, M. (2024, Şubat 19). *STM32 ve NTC sensörü ile sıcaklık ölçme*. Mehmettopuz.net Elektronik, Gömülü Sistemler ve Yazılım: <https://mehmettopuz.net/stm32-ve-ntc-sensoru-ile-sicaklik-olcme/> adresinden alınmıştır.
- URL-1. (2024, Ocak 20). *SRF02 Ultrasonic Range Finder Technical Specification*. Robot Electronics: <https://www.robot-electronics.co.uk/htm/srf02tech.htm> adresinden alınmıştır.
- URL-2. (2024, Ocak 20). *Steinhart Hart Equation: Exploring Temperature and Resistance in NTC Thermistors*. DXM: <https://www.dxmht.com/article/steinhart-hart-and-ntc-thermistor-equation.html> adresinden alınmıştır.
- URL-3. (2024, Ocak 18). *UART in LPC2148 ARM7*. Binary Updates: <https://binaryupdates.com/uart-in-lpc2148-arm7/> adresinden alınmıştır.
- KeyStone Architecture. (2010). *Universal asynchronous receiver/transmitter (UART)*. Texas Instruments: <https://www.ti.com/lit/ug/sprugp1/sprugp1.pdf> adresinden alınmıştır.
- Valdez, J., & Becker, J. (2015). *Understanding the I2C bus*. Texas Instruments: <https://www.ti.com/lit/an/slva704/slva704.pdf> adresinden alınmıştır.
- Wang, S., Yi, Z., Qin, M., & Huang, Q. A. (2019). Temperature effects of a ceramic MEMS thermal wind sensor based on a temperature-balanced mode. *IEEE Sensors Journal*, 19(17), 7254-7260.
- Wu, J. (2022). *A basic guide to I2C*. Texas Instruments: <https://www.ti.com/lit/an/sbaa565/sbaa565.pdf> adresinden alınmıştır.
- Yadav, V. P., Sinha, A., & Khosla, A. (2017). Design and implementation of ultrasonic anemometer. *2017 4th International Conference on Power, Control & Embedded Systems*. Allahabad, India.
- Yao, Y., Chen, C., Wu, X., & Huang, L. (2010). MEMS thermal time-of-flight flow meter. *15th Flow Measurement Conference*. Taipei, Taiwan.
- Ye, Y., Yi, Z., Gao, S., Qin, M., & Huang, Q. (2018). Octagon-shaped 2-D micromachined thermal wind sensor for high-accurate applications. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 27(4), 739-747.
- Yi, Z., Ye, Y., Qin, M., & Huang, Q. A. (2019). Modeling of packaged MEMS thermal wind sensor operating on CP mode. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 66(5), 2375-2381.
- Yu, Z., Wang, J., & Li, Z. (2022). Mine ultrasonic wind speed measurement system based on threshold method. *Proceedings of the China Automation Congress (CAC)*. Xiamen, China.

ÖZGEÇMİŞ

Noura SOUKAR, 2015-2016 öğretim yılında Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 2020 yılında bu bölümden mezun oldu. 2022 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim dalında tezli yüksek lisans programına başladı. 2021 yılından itibaren ArGesim Teknoloji A.S.'de Elektrik-Elektronik Mühendisi olarak görev yapmaktadır. İyi derece İngilizce ve Arapça bilmektedir.

Soukar, N. & Yazgan, A. (2024). Design of a ntc-based wind sensor enhanced with auto-zero function. *19th International Istanbul Scientific Research Congress on Life, Engineering, Architecture, and Mathematical Sciences Proceedings Book*, s. 1035-1036. İstanbul, Türkiye.

Soukar, N. & Yazgan, A. (2025). A novel two-dimensional wind speed and direction measurement method based on ntc. *Turkish Journal of Science and Technology*, 20(1), 225-234.