

T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ERZİNCAN İLİ İÇİN DRONE İLE HAVA KİRLİLİĞİNİN TESPİTİ VE
HARİTALANMASI

Naci ARSLANOĞLU

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Çağrı ALTINTAŞI

TEZ JÜRİ ÜYELERİ

Doç. Dr. Süleyman Sungur TEZCAN
Dr. Öğr. Üyesi Aykut Görkem GELEN
Dr. Öğr. Üyesi Çağrı ALTINTAŞI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ERZİNCAN, 2025

© 2025 [Naci ARSLANOĞLU]. Tüm hakları saklıdır.

ÖZET

ERZİNCAN İLİ İÇİN DRONE İLE HAVA KİRLİLİĞİNİN TESPİTİ VE HARİTALANMASI

Naci ARSLANOĞLU

Yüksek Lisans Tezi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Çağrı ALTINTAŞI

2025, 68 sayfa

Bu tez çalışması, düşük maliyetli sensörler ile donatılmış insansız hava araçları (İHA) kullanılarak Erzincan ilinin hava kalitesinin izlenmesini ve haritalanmasını amaçlamaktadır. Günümüzde hızla artan kentleşme, sanayileşme ve ulaşım faaliyetleri, hava kirliliği seviyelerinde önemli artışlara yol açmakta ve bu durum toplum sağlığı açısından ciddi tehditler oluşturmaktadır. Bu bağlamda, hava kalitesinin doğru ve detaylı biçimde izlenmesi, çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük önem taşımaktadır. Çalışmada, DHT11 (sıcaklık ve nem), MQ-7 (karbon monoksit), MQ-135 (hava kalitesi - CO₂, VOC vb.), MQ-131 (ozon) ve Sharp GP2Y1010AU0F (partikül madde - PM_{2.5}) sensörlerinden oluşan entegre bir ölçüm sistemi geliştirilmiştir. Bu sistem, İHA platformuna entegre edilerek belirlenen güzergâhlarda uçurulmakta ve farklı noktalardan veriler toplanmaktadır. Toplanan veriler, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) yazılımları kullanılarak görselleştirilmekte, hava kirleticilerin mekânsal dağılımı analiz edilmekte ve potansiyel kirlilik kaynakları tespit edilmektedir. Bunun yanı sıra, elde edilen hava kalitesi verileri toplum sağlığına etkileri bakımından da değerlendirilecektir. Özellikle karbon monoksit, ozon ve partikül maddelerin kısa ve uzun vadeli sağlık riskleri literatür verileri ışığında yorumlanacaktır. Bu çalışma, düşük maliyetli teknolojilerle etkin çevresel izleme yapılabileceğini ortaya koyarak yerel yönetimlerin ve karar vericilerin politika geliştirme süreçlerine katkı sunmayı hedeflemektedir. Aynı zamanda halk sağlığının korunmasına yönelik erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesine de bilimsel temel sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Drone, Quadcopter, Ölçüm, Hava kalitesi, Veri aktarımı, Haritalama

ABSTRACT

MEASUREMENT AND MAPPING OF AIR POLLUTION BY DRONE FOR ERZİNCAN PROVINCE

Naci ARSLANOĞLU

Erzincan Binali Yıldırım University Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electricals and Electronics Engineering

Advisor: Asst. Prof. Dr. Çağrı ALTINTAŞI

2025, 68 pages

This thesis aims to monitor and map the air quality of Erzincan province using unmanned aerial vehicles (UAVs) equipped with low-cost sensors. Rapid urbanization, industrialization, and transportation activities in recent years have significantly increased air pollution levels, posing serious threats to public health. In this context, accurate and detailed monitoring of air quality is crucial for ensuring environmental sustainability. In this study, an integrated measurement system was developed using the DHT11 (temperature and humidity), MQ-7 (carbon monoxide), MQ-135 (air quality – CO₂, VOCs, etc.), MQ-131 (ozone), and Sharp GP2Y1010AU0F (particulate matter – PM_{2.5}) sensors. This system is mounted on a UAV platform and flown along predetermined routes to collect data from various locations. The collected data are visualized using Geographic Information Systems (GIS) software, enabling spatial analysis of air pollutants and the identification of potential pollution sources. Moreover, the obtained air quality data are evaluated in terms of their potential impacts on public health. In particular, the short- and long-term health risks of carbon monoxide, ozone, and particulate matter are interpreted based on findings from the literature. This study demonstrates that effective environmental monitoring can be achieved through low-cost technologies and aims to contribute to the policy-making processes of local governments and decision-makers. It also provides a scientific foundation for the development of early warning systems to protect public health.

Keywords: Drone, Quadcopter, Measurement, Air quality, Data transmission, Mapping

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının hazırlanması sürecinde bilgi, tecrübe ve rehberliğiyle bana yol gösteren, akademik gelişimime önemli katkılarda bulunan danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Çağrı ALTINTAŞI'na samimi teşekkürlerimi sunarım.

Tez süreci boyunca göstermiş olduğu anlayış, sabır ve manevi desteğiyle yanımda olan kıymetli nişanlım Esmâ HAKAN'a içten minnettarlığımı ifade etmek isterim. Kendisi, bu sürecin her aşamasında en büyük motivasyon kaynağım olmuştur.

Ayrıca, eğitim hayatım boyunca yanımda olan, sevgileri ve fedakârlıklarıyla bana güç veren değerli aileme teşekkür ederim. Onların desteği, bu çalışmanın başarıyla tamamlanmasında önemli bir etken olmuştur.

Naci ARSLANOĞLU

Temmuz, 2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
TEŞEKKÜR	ii
İÇİNDEKİLER	iv
TABLolar DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Problem Durumu	1
1.2. Araştırmanın Amacı	2
1.3. Araştırmanın Kapsamı	3
1.4. Araştırmanın Önemi	3
1.5. Varsayımlar	3
1.6. Araştırmanın Sınırlılıkları	4
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR	5
2.1. İnsansız Hava Araçlarının Sınıflandırılması	6
2.2. İnsansız Hava Araçlarının (İHA) Görevleri ve Uygulama Alanları	8
2.3. İHA Sistemlerinin Avantajları	10
2.3.1. Ekonomik ve işlevsel faydaları	10
2.3.2. Güvenli erişim ve risk yönetimi	11
2.3.3. Çevresel uyum ve sürdürülebilir izleme	11
2.3.4. Uyarlanabilir yapılar ve çok amaçlı kullanım	11
2.3.5. Anlık veri işleme ve karar destek	11
2.4. İHA Sistemlerinin Dezavantajları	12
2.4.1. Sınırlı uçuş süresi ve taşıma kapasitesi	12
2.4.2. Hava koşullarına duyarlılık	12
2.4.3. Yasal düzenlemeler ve uçuş kısıtlamaları	12
2.4.4. Veri güvenliği ve gizlilik sorunları	13
2.4.5. Operasyonel riskler ve kazalar	13
2.5. İHA'ların Hava Kalitesi İzlemede Kullanımı	13
2.5.1. Teknolojik altyapı ve sensör entegrasyonu	13
2.5.2. Gerçek zamanlı izleme ve veri analizi	14
2.5.3. Uygulama alanları	14

2.5.4. Türkiye’deki uygulamalar	15
2.6. Hava Kalitesi Ve Ölçüm Yöntemleri	15
2.6.1. Hava kalitesi göstergeleri ve standartlar	15
2.6.2. Hava kalitesi indeksi (HKİ)	15
2.6.3. Sabit İstasyonlar	16
2.6.4. Mobil ölçüm sistemleri	16
2.6.5. Uydu tabanlı gözlem sistemleri	16
2.6.6. Düşük maliyetli sensör sistemleri	17
2.6.7. İHA (Drone) destekli ölçüm sistemleri	17
2.6.8. Ölçüm verilerinin değerlendirilmesi	17
2.7. Sensör Teknolojileri ve Kullanım Alanları	18
2.8. Literatürdeki Boşluklar ve Araştırma Gereksinimi	19
3. YÖNTEM	21
3.1. İHA Platformunun Tanıtımı ve Özellikleri	21
3.1.1. F450 drone gövdesi	21
3.1.2. Ekranlı KK2 kontrol kartı	22
3.1.3. Radio link R9DS alıcı	23
3.1.4. Emax XA2212 980KV fırçasız motor	24
3.1.5. Skywalker 30A ESC (Electronic speed controller)	24
3.1.6. 3700mAh 3S 11.1V 30C LiPo pil	25
3.1.7. 1045 drone pervanesi	25
3.1.8. RadioLink AT9S Pro kumanda sistemi	26
3.1.9. FPV (First-Person View) gözlük ve kamera seti	27
3.2. Donanım Yapısı ve Sensör Modülü	28
3.2.1. Arduino uno	28
3.2.2. Arduino nano	30
3.2.3. NRF24L01 + PA + LNA SMA anten 2.4 GHz kablosuz haberleşme modülü	30
3.2.4. DHT11 sıcaklık ve nem sensörü	31
3.2.5. MQ-135 hava kalite sensörü	32
3.2.6. MQ-7 sensörü	33
3.2.7. MQ-131 ozon gaz sensörü	34
3.2.8. GP2Y1010AU0F sharp optik toz sensörü	34
3.2.9. Sensör koruma kubbesi	35
3.2.10. 100 Mikrofarad (μ F) kondansatör	36

3.2.11. Delikli bakır plaketa.....	37
3.2.12. Verici devresi	37
3.2.13. Alıcı devresi	40
3.3. Yazılım ve Entegrasyon Süreci.....	43
3.4. Veri Toplama Süreci	43
3.5. Tablo, Grafik ve Haritalama Süreci	44
3.6. Veri Analizi	45
4. BULGULAR.....	46
4.1. Sıcaklık Değişimleri.....	55
4.2. Nem Oranları	56
4.3. Karbonmonoksit (CO) Yoğunluğu.....	56
4.4. Hava Kalitesi.....	56
4.5. Ozon (O ₃) Yoğunluğu.....	56
4.6. Toz Yoğunluğu (Partikül Madde)	57
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	58
5.1. Araştırma Bulgularına Göre İHA Sistemlerinin Değerlendirilmesi	58
5.1.1. Avantajlar	58
5.1.2. Dezavantajlar	59
5.1.3. Öneriler	60
KAYNAKÇA	62

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Verici devresi malzeme listesi	38
Tablo 2. Alıcı devresi malzeme listesi	41
Tablo 3. 1.gün sabah (08:00–09:30) ölçüm sonuçları tablosu.....	46
Tablo 4. 1.gün öğle (12.00–13:30) ölçüm sonuçları tablosu.....	47
Tablo 5. 1.gün akşam (17.00–18:30) ölçüm sonuçları tablosu.....	48
Tablo 6. 2.gün sabah (08:00–09:30) ölçüm sonuçları tablosu.....	49
Tablo 7. 2. gün öğle (12.00–13:30) ölçüm sonuçları tablosu.....	50
Tablo 8. 2. gün akşam (17.00–18:30) ölçüm sonuçları tablosu.....	51
Tablo 9. 3. gün sabah (08:00–09:30) ölçüm sonuçları tablosu.....	52
Tablo 10. 3. gün öğle (12.00–13:30) ölçüm sonuçları tablosu.....	53
Tablo 11. 3. gün akşam (17.00–18:30) ölçüm sonuçları tablosu.....	54
Tablo 12. Hava Kalitesi Sensör Verileri ve Ulusal Referans Değer Aralıkları.....	55

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. F450 drone gövdesi	22
Şekil 2. Ekranlı KK2 Kontrol Kartı	22
Şekil 3. R9DS 10 kanallı alıcı	23
Şekil 4. Emax XA2212 980KV fırçasız motor.....	24
Şekil 5. Skywalker 30A ESC.....	25
Şekil 6. 3700mAh 3S 11.1V 30C LiPo pil	25
Şekil 7. 1045 drone pervanesi	26
Şekil 8. RadioLink AT9S Pro kumanda sistemi.....	27
Şekil 9. FPV gözlük ve kamera seti.....	28
Şekil 10. Arduino uno	29
Şekil 11. a) Arduino Nano V3 ön yüz b) Arduino Nano V3 arka yüz.....	30
Şekil 12. NRF24L01 2,4GHz RF alıcı-verici modül (harici antenli)	31
Şekil 13. DHT11 sıcaklık ve nem sensörü	32
Şekil 14. MQ-135 sensörü.....	33
Şekil 15. MQ-7 sensörü.....	33
Şekil 16. MQ-131 ozon gaz sensörü.....	34
Şekil 17. GP2Y1010AU0F sharp optik toz sensörü	35
Şekil 18. Sensör koruma kubbesi.....	36
Şekil 19. 100 mikroyfarad (μ F) kondansatör	36
Şekil 20. Delikli bakır plaketa.....	37
Şekil 21. Verici devresi ön yüzü.....	36
Şekil 22. Verici devresi arka yüzü	37
Şekil 23. Verici devresi şeması.....	40
Şekil 24. Alıcı devresi ön yüzü.....	40
Şekil 25. Alıcı devresi arka yüzü	39
Şekil 26. Alıcı devresi şeması	43
Şekil 27. Drone montajı	44
Şekil 28. 1.gün sabah (08:00–09:30) ölçüm sonuçları grafiğı.....	46
Şekil 29. 1.gün sabah (08:00–09:30) ölçüm sonuçları haritası	46
Şekil 30. 1.gün öğle (12.00–13:30) ölçüm sonuçları grafiğı.....	47
Şekil 31. 1. öğle (12.00–13:30) ölçüm sonuçları haritası	47
Şekil 32. 1.gün akşam (17.00–18:30) ölçüm sonuçları grafiğı.....	48

Şekil 33. 1.gün akşam (17.00–18:30) ölçüm sonuçları haritası	48
Şekil 34. 2.gün sabah (08:00–09:30) ölçüm sonuçları grafiği.....	49
Şekil 35. 2.gün sabah (08:00–09:30) ölçüm sonuçları haritası	49
Şekil 36. 2.gün öğle (12.00–13:30) ölçüm sonuçları grafiği.....	50
Şekil 37. 2. Gün öğle (12.00–13:30) ölçüm sonuçları haritası.....	50
Şekil 39. 2. gün akşam (17.00–18:30) ölçüm sonuçları grafiği.....	51
Şekil 40. 2. gün akşam (17.00–18:30) ölçüm sonuçları haritası.....	51
Şekil 42. 3. gün sabah (08:00–09:30) ölçüm sonuçları grafiği.....	52
Şekil 43. 3.gün sabah (08:00–09:30) ölçüm sonuçları haritası	52
Şekil 44. 3. gün öğle (12.00–13:30) ölçüm sonuçları grafiği.....	53
Şekil 45. 3. Gün öğle (12.00–13:30) ölçüm sonuçları haritası.....	53
Şekil 46. 3. gün akşam (17.00–18:30) ölçüm sonuçları grafiği.....	54
Şekil 47. 3. gün akşam (17.00–18:30) ölçüm sonuçları haritası.....	54

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AQI	: Air Quality Index
CBS	: Coğrafi Bilgi Sistemleri
HKİ	: Hava Kalitesi İndeksi
İHA	: İnsansız hava aracı
MOS	: Metal oksit yarı iletken
PM	: Partikül madde
UHKİA	: Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı
VOC	: Uçucu organik bileşikler
WHO	: World Health Organization



1. GİRİŞ

1.1.Problem Durumu

Hava kirliliği, günümüzde hızla artan kentleşme, sanayileşme ve enerji tüketiminin doğrudan bir sonucu olarak küresel ölçekte önemli bir çevre sorunu hâline gelmiştir. Bu durum, yalnızca çevresel sistemleri değil, aynı zamanda insan sağlığını da ciddi biçimde tehdit etmektedir. Yapılan bilimsel araştırmalar, kirli hava koşullarının solunum yolu enfeksiyonları, astım, bronşit ve kardiyovasküler hastalıklar gibi sağlık problemlerine neden olduğunu ortaya koymaktadır (Brunekreef ve Holgate, 2002; Pope ve Dockery, 2006). Bununla birlikte, ekosistemler de asit yağmurları, ormansızlaşma ve iklim değişikliği gibi etkilerle bu kirleticilerden doğrudan zarar görmekte; özellikle ozon ve partikül madde gibi kirleticilerin atmosferdeki yoğunluğu, küresel iklim dengeleri üzerinde yıkıcı sonuçlara neden olmaktadır (IPCC, 2014; Likens ve Bormann, 1974).

Türkiye özelinde değerlendirildiğinde, başta büyükşehirler ve sanayi yoğunluğu yüksek bölgeler olmak üzere birçok yerleşim alanında hava kirliliği, ciddi bir çevresel ve halk sağlığı sorunu olarak öne çıkmaktadır. Bu doğrultuda Türkiye genelinde kurulan Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı (UHKİA), çeşitli bölgelerde sabit istasyonlar aracılığıyla hava kalitesi verilerini toplamakta ve kamuoyuyla paylaşmaktadır (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2024). Ancak sabit istasyonlar, yalnızca belirli noktalarda veri toplayabildikleri için kirletici konsantrasyonlarının mekânsal ve zamansal değişkenliğini yeterince yansıtamamaktadır (Kumar vd., 2015). Bu durum, özellikle Erzincan ili gibi kendine özgü topografik yapısı, sınırlı endüstriyel faaliyetleri ve değişken meteorolojik koşulları olan bölgelerde daha belirgin hâle gelmektedir. Erzincan'ın dar vadilerle çevrili topoğrafik yapısı, kirleticilerin atmosfere dağılmasını sınırlamakta ve bu da yerel ölçekte ciddi kirlilik birikimlerine yol açabilmektedir.

Tüm bu sınırlılıklar, hava kalitesine dair daha detaylı ölçüm sistemlerine olan ihtiyacı artırmaktadır. Son yıllarda bu ihtiyaca cevap verebilecek yenilikçi teknolojiler arasında insansız hava araçları (İHA'lar) ön plana çıkmaktadır. Düşük maliyetli çevresel sensörlerle donatılmış dronelar, farklı yüksekliklerden ve konumlardan eş zamanlı veri toplayabilme kabiliyetine sahiptir. Bu yönüyle, kirleticilerin üç boyutlu dağılımının tespiti, yayılım desenlerinin analizi ve mikro ölçekte hava kalitesi haritalarının oluşturulması açısından büyük avantajlar

sağlamaktadır (Villa vd., 2016; Jarimānā, vd., 2020). Bu teknolojilerin, sabit istasyonlara kıyasla daha esnek, düşük maliyetli ve erişilebilir çözümler sunması, çevresel izleme sistemlerinde paradigma değişimini beraberinde getirmektedir.

1.2. Araştırmanın Amacı

Bu tez çalışmasının temel amacı, düşük maliyetli çevresel sensörlerin insansız hava aracı (İHA) sistemine entegre edilmesi yoluyla, Erzincan ilinde atmosferik hava kalitesinin ölçülmesi ve elde edilen verilerin Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) kullanılarak mekânsal-zamansal bağlamda haritalanmasıdır. Geliştirilecek hava kalitesi izleme sistemi, sabit istasyonların sınırlılıklarını aşarak, farklı yükseklik ve konumlardan dinamik ölçüm yapma kapasitesiyle hava kirliliğinin dağılımına ilişkin daha ayrıntılı bir perspektif sunmayı hedeflemektedir.

Çalışma kapsamında sıcaklık, nem, karbon monoksit (CO), ozon (O₃), karbondioksit (CO₂) ve partikül madde (PM_{2.5}) gibi temel hava kalitesi parametrelerine ilişkin veriler sensörler aracılığıyla toplanacaktır. Bu amaç doğrultusunda, DHT11, MQ-7, MQ-135, MQ-131 ve GP2Y1010AU0F gibi düşük maliyetli sensörleri içeren bir modül tasarlanacak ve geliştirilecektir. Geliştirilen modül, uygun bir drone platformuna entegre edilerek farklı noktalardan ve çeşitli irtifalardan veri toplanmasına olanak tanıyacaktır.

Elde edilen veriler, hem zamansal hem de mekânsal açıdan analiz edilecek; sonuçlar tablo, grafik ve harita formatlarında görselleştirilerek yüksek çözünürlüklü hava kalitesi haritaları oluşturulacaktır. Bu haritalar aracılığıyla Erzincan ilinde potansiyel kirletici kaynaklar ve bunların yayılım desenleri belirlenecek, ayrıca hava kirliliğinin halk sağlığı üzerindeki etkileri değerlendirilecektir. Böylece, bölgesel kirlilik risklerinin daha etkin bir biçimde izlenmesi, analiz edilmesi ve yönetilmesi sağlanacaktır.

Sonuç olarak, bu çalışma ile drone tabanlı hava kalitesi izleme yaklaşımının Erzincan gibi orta ölçekli kentlerdeki uygulanabilirliği ve etkinliği değerlendirilecek; geleneksel izleme yöntemlerine kıyasla sunduğu avantajlar ortaya konularak, çevresel izleme teknolojilerine katkı sunması amaçlanmaktadır.

1.3. Araştırmanın Kapsamı

Bu tez çalışması, hava kalitesi izleme faaliyetlerine yenilikçi ve uygulanabilir bir çözüm sunmayı hedeflemektedir. Çalışmada yalnızca atmosferik kirleticiler (gazlar ve partikül maddeler) ele alınmakta; toprak, su ve gürültü gibi diğer çevresel unsurlar kapsam dışı bırakılmaktadır. Veriler, belirli zaman dilimlerinde ve farklı irtifalarda, Erzincan il merkezinde toplanacaktır. Veri toplama aşaması, insansız hava aracı (İHA) operasyonlarının mevcut meteorolojik koşullar dikkate alınarak planlanması ve ölçümlerin senkronize bir şekilde kaydedilmesi prensibine dayanmaktadır. Elde edilen ham veriler, bir alıcı ünite vasıtasıyla dijital ortama aktarılmaktadır. Analiz çıktıları, tablo ve grafiklerin oluşturulması ile haritalama süreçleri için Microsoft Excel programına aktararak görselleştirilmektedir.

1.4. Araştırmanın Önemi

Bu çalışma, yüksek maliyetli sabit izleme sistemlerine alternatif olarak düşük bütçeli, taşınabilir ve geniş alanlara uygulanabilir bir çözüm sunmaktadır. Özellikle çevresel izleme kapasitesinin sınırlı olduğu bölgelerde, bu tür sistemlerin kullanımı önemli avantajlar sağlayabilir. İHA destekli ölçüm sistemleri, geniş alanları kısa sürede tarayabilme, farklı yüksekliklerden veri elde edebilme ve veri tekrarlanabilirliği gibi üstünlüklere sahiptir (Hassan vd., 2023).

Bu bağlamda, çalışmanın çıktılarının yalnızca akademik literatüre katkı sağlamakla kalmayıp; aynı zamanda belediyeler, çevre yönetim birimleri, halk sağlığı uzmanları ve politika yapıcılar için de önemli karar destek verileri sunması beklenmektedir. Ayrıca geliştirilen bu model, afet sonrası hava kalitesi izleme, sanayi bölgelerindeki kirlilik kontrolü veya kent içi sıcaklık analizi gibi farklı alanlarda da uyarlanabilir potansiyele sahiptir.

1.5. Varsayımlar

Çalışma sürecinde aşağıdaki temel varsayımlar kabul edilmiştir:

- Kullanılan sensörlerin doğru şekilde kalibre edildiği ve çalışma koşullarında güvenilir veri sağladığı,
- İHA sisteminin uçuş stabilitesi, veri iletimi ve enerji kullanımı açısından ölçüm sürecini kesintiye uğratmayacak şekilde çalıştığı,

- Meteorolojik koşulların ölçüm verileri üzerinde sınırlı ama tolere edilebilir düzeyde etkili olduğu,
- Veri analizinde kullanılan yazılım ve yöntemlerin bilimsel geçerliliğe sahip olduğu.

1.6. Araştırmanın Sınırlılıkları

Bu çalışma, metodolojik tercihler ve operasyonel kısıtlamalar çerçevesinde belirli sınırlılıklar arz etmektedir:

- **Sensör Doğruluk Düzeyleri:** Kullanılan düşük maliyetli sensörlerin (DHT11, MQ serisi, Sharp GP2Y1010AU0F) doğruluk ve hassasiyet seviyeleri, laboratuvar ortamında kalibre edilmiş referans sınıfı cihazlara kıyasla sınırlılıklar taşımaktadır. Bu durum, elde edilen ölçüm sonuçlarında belirli sistematik veya rastgele sapmaların ortaya çıkma potansiyelini beraberinde getirebilir.
- **Meteorolojik Koşulların İHA Operasyonlarına Etkisi:** İnsansız hava aracı (İHA) uçuşları, başta rüzgâr hızı ve yönü ile yağış olmak üzere çeşitli meteorolojik faktörlerden olumsuz yönde etkilenebilmektedir. Bu durum, planlanan veri toplama süreçlerinde kesintilere, gecikmelere veya operasyonel süreklilik sorunlarına yol açabileceği gibi, elde edilen verinin kalitesini de etkileyebilir.
- **Coğrafi Kapsam Sınırlılığı:** Bu araştırma, coğrafi olarak Erzincan il merkezi ile sınırlı bir alanı kapsamaktadır. Dolayısıyla, elde edilen bulguların Erzincan ilinin diğer bölgelerine veya farklı coğrafi ve sosyo-ekonomik özelliklere sahip alanlara genellenebilirliği, dikkatli bir şekilde değerlendirilmesi gereken bir husustur.
- **Kirletici Parametre Sınırlaması:** Çalışmada kullanılan sensörler, belirli bir spektrumdaki gaz ve partikül madde kirleticilerinin ölçümüyle sınırlıdır. Bu kapsamda, atmosferde bulunabilecek diğer potansiyel kirleticiler bu araştırmanın analiz çerçevesine dahil edilmemiştir.
- **CBS Analizi ve Mekânsal Çözünürlük İlişkisi:** Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) tabanlı analizlerin mekânsal doğruluğu ve çözünürlüğü, doğrudan veri toplama noktalarının sayısı ve coğrafi dağılımıyla ilişkilidir.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Günümüzde insansız hava araçları (İHA'lar), yalnızca askeri ve gözetleme faaliyetlerinde değil, teknolojik ilerlemelerle birlikte farklı sektörlerde de yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Başlangıçta yalnızca savunma amaçlı geliştirilen bu sistemler, maliyetlerin düşmesi ve teknolojinin erişilebilirliğinin artmasıyla birlikte sivil alanlarda da önemli bir yer edinmiştir. Haritalama, tarım, madencilik, inşaat, doğal afet gözlemi, meteoroloji ve arkeoloji gibi pek çok alanda etkin şekilde görev yapabilmektedirler (Kahveci ve Nazlı, 2017).

İHA'lar genellikle askeri ve sivil kullanım olmak üzere iki ana gruba ayrılmakta olup, askeri kullanım alt başlığında silahlı ve silahsız sistemler yer almaktadır. Silahsız İHA'lar; istihbarat, gözetleme faktörüne bağımlıdır. Kurulum, bakım, uçuş öncesi hazırlık, seyrüsefer ve iniş gibi aşamalarda insan müdahalesi gereklidir. Bu sistemler temel olarak uçuş platformu (İHA) ve yer kontrol istasyonu olmak üzere iki ana bileşenden oluşmaktadır (Çetinkaya ve Koç, 2023).

İnsansız hava araçlarının tarihi gelişimine bakıldığında, ilk örneğin 1916 yılında tasarlanan Ruston Proctor Aerial Target olduğu görülmektedir. Otomatik uçuşu sağlayan ilk sistem ise "Hewitt-Sperry" adlı jiroskop kontrollü uçaktır. 1918 yılında resmi olarak ABD ordusuna ait hale gelen bu uçak, savaşta aktif olarak kullanılamamıştır (Wikipedia, 2016).

İkinci Dünya Savaşı döneminde Almanya tarafından kullanılan V.1 ve V.2 füzeleri, bu teknolojinin erken örnekleri arasında sayılmaktadır. Bu sistemler dönemin en ileri savaş araçları arasında yer almakla birlikte, "robot", "kanatlı bomba" ve "uçan bomba" gibi isimlerle de anılmışlardır (Sadullah, 1945).

İHA'ların gelişim süreci, insanlı savaş uçaklarının tarihsel evrimini büyük ölçüde yansıtmaktadır. İlk dönem insanlı uçaklar, temel olarak keşif ve gözlem amacıyla kullanılmaktaydı. Zaman içinde küçük bombaların taşınmasına elverişli hale gelmişlerdir. Benzer şekilde İHA'lar da başlangıçta gözetleme görevleriyle öne çıkmış, ardından silahlandırılarak aktif saldırı görevlerinde kullanılmaya başlanmıştır (Jurily, 2021).

Uçuş özellikleri bakımından İHA'lar, ilk dönem savaş uçaklarıyla ortak yönler taşımaktadır. Düşük hızda uçmaları, pervaneli motorlara sahip olmaları, sınırlı manevra ve taşıma kapasiteleri bu benzerliklerden bazılarıdır. Bununla birlikte, asimetrik savaş ortamlarında

İHA'ların etkinliği büyük oranda kanıtlanmıştır. Konvansiyonel savaş koşullarında halen insanlı savaş uçakları ön planda olsa da, İHA'ların teknolojik evrim sürecinin henüz 40 yıl civarında olması, gelecekte bu dengeyi değiştirme potansiyelini ortaya koymaktadır. Özellikle jet motorlu, ses hızını aşabilen ve yüksek faydalı yük taşıma kapasitesine sahip İHA'ların geliştirilmesine yönelik çalışmalar bu dönüşümün habercisidir (Çetinkaya ve Koç, 2023).

2.1. İnsansız Hava Araçlarının Sınıflandırılması

Literatürdeki sınıflandırma çalışmalarına bakıldığında, farklı parametrelere dayalı birçok yaklaşımın geliştirildiği görülmektedir (Kurtuluş ve Tekinalp, 2010). Bu sınıflandırmalar genellikle çalışmanın özel amacı ve ihtiyaçları doğrultusunda şekillendirilmektedir. Korchenko ve Illyash (2013) tarafından yapılan kapsamlı bir analizde, İHA'ların 16 farklı kritere göre sınıflandırılabilirdiği belirtilmektedir. (Yiğit, Yazar ve Karakoç, 2018)

- **Kullanım alanına göre:** İHA'lar sivil, askeri ve diğer (örneğin anti-terör uygulamaları) kullanım alanlarına göre sınıflandırılabilir. Askeri kullanım, kara, hava ve deniz operasyonlarına göre alt gruplara ayrılabilir.
- **Kontrol sisteminin çeşidine göre:** Kontrol sistemleri, İHA'ların öne çıkan özelliklerindendir. Bu sistemler doğrudan kontrol (operatörün yönettiği), gözlenen kontrol (yarı otonom), uyumsuz-otonom kontrol (önceden programlanmış ancak dış etkilerle etkileşim sınırlı), ve uyumlu-otonom kontrol (tam otonom, dış koşullara adapte olabilen) olmak üzere dört grupta incelenir.
- **Uçuş kurallarına göre:** Görerek uçuş (görsel gözlemlerle yapılan), aletli uçuş (oto-pilot ve sensörlerle yapılan) ve bu ikisinin birleşimi şeklinde sınıflandırılır.
- **Havada kullanılan alanın durumuna göre:** Ayrılmış (yasaklı veya özel alanlar) ve ayrılmamış (sivil hava sahası, hava trafik kontrolüne dahil alanlar) alanlar dikkate alınarak sınıflandırma yapılır.
- **Hava aracının tipine göre:** Uçak, helikopter, döner kanat, sabit kanat, güdümlü ve hibrit yapılar gibi çeşitli tiplere ayrılır.

- **Kanat tipine göre:** Sabit ve döner kanat ayrımının yanı sıra değişken kanat yapıları da incelenmektedir. Değişken kanatlar büyüklük, pozisyon ve form açısından alt başlıklara ayrılabilir.
- **Kalkış ve inişteki kaldırma kuvvetinin yönüne göre:** Bu sınıflandırma, kaldırma kuvvetinin yatay mı dikey mi olduğu esasına dayanır. İniş yöntemleri arasında paraşüt, doğrudan iniş, sürekli uçuş gibi seçenekler bulunur.
- **Kalkış – iniş tipine göre:** Kalkış ve iniş şekline göre standart havaalanı, gemi güvertesi, su yüzeyi, el ile başlatma ve özel start sistemleri gibi yöntemler mevcuttur.
- **Motor tipine göre:** En yaygın motor türleri gaz türbinli (örneğin turbojet, turboprop), pistonlu ve elektrik motorlarıdır. Bu motor türleri kendi içinde daha ayrıntılı şekilde sınıflandırılabilir.
- **Yakıt sistemine göre:** Tek kullanımlık ve ikmal yapılabilen sistemler şeklinde ayrılır.
- **Yakıt tankı tipine göre:** Sadece temel tank bulunan sistemler ile ilave yakıt tankına sahip sistemler olarak sınıflandırma yapılır.
- **Yakıt sisteminden istifade sayısına göre:** Yakıt sisteminin görevde kaç kez kullanılabileceği esas alınarak yapılan sınıflandırmadır.
- **Genel teknik parametrelere göre:** Maksimum kalkış ağırlığı, menzil, havada kalış süresi ve maksimum irtifa gibi teknik özellikler temel alınır. Bu özellikler doğrultusunda İHA'lar Mikro/Mini, Taktiksel, Stratejik ve Özel Görev İHA'ları şeklinde gruplanır.
- **Gerçekleştirilebilecek mesafe yarıçapına göre:** Bu kriter esas alınarak çok kısa, kısa, orta ve uzun menzilli İHA'lar olarak sınıflandırma yapılır.
- **Uçuş irtifasına göre:** İHA'lar, düşük, orta ve yüksek irtifa kategorilerinde değerlendirilir.

- **Fonksiyon ve uygulama alanına göre:** Askeri ya da sivil ayırım yapılmaksızın, İHA'nın gerçekleştirdiği görevler (örneğin gözetleme, keşif, lojistik) dikkate alınarak sınıflandırma yapılır.

Bu kriterlerin her biri, İHA'ların operasyonel özelliklerine göre seçilmekte ve ihtiyaçlara göre özelleştirilmektedir. Farklı sınıflandırmalar, İHA teknolojisinin çok yönlülüğünü ve çeşitli alanlarda kullanım potansiyelini yansıtmaktadır.

2.2. İnsansız Hava Araçlarının (İHA) Görevleri ve Uygulama Alanları

Görsel Medya ve Sinematografik Uygulamalar: İHA teknolojileri, sinema ve medya endüstrisinde dinamik sahnelerin düşük maliyetle ve yüksek çözünürlükte kaydedilmesine olanak tanımaktadır (Eisenbeiss, 2009).

Yersel Modelleme ve Coğrafi Haritalama: İHA'lar, fotogrametri ve uzaktan algılama teknikleriyle entegre çalışarak dijital arazi modelleri ve haritalar oluşturulmasında kullanılmaktadır (Colomina ve Molina, 2014).

Yangın İzleme ve Erken Müdahale: Orman yangınlarının tespiti ve izlenmesinde, termal görüntüleme özellikli İHA'lar, yangının yayılım yönünü ve yoğunluğunu analiz etmede etkilidir (Merino vd., 2012).

Meteorolojik Gözlem ve Hava Kalitesi Takibi: İHA sistemleri, atmosferik parametrelerin izlenmesinde taşınabilir ve düşük maliyetli bir alternatif olarak kullanılmaktadır (Villa vd., 2016).

Akıllı Tarım ve Hassas Zirai Faaliyetler: Tarımsal üretkenliği artırmak amacıyla İHA'lar, tarla bazlı analizlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu bağlamda, özellikle NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) görüntüleme yöntemiyle bitki sağlığı ve gelişimi hakkında bilgi edinmek mümkündür. NDVI, bitkilerin yansıtma özelliklerini kullanarak yeşil alanların yoğunluğu ve sağlığını ölçmekte kullanılan sayısal bir göstergedir. Bu yöntem sayesinde, sulama ihtiyacı, gübreleme gereksinimi ve hastalık belirtisi olan alanlar belirlenerek tarımsal müdahaleler daha hassas şekilde planlanabilir (Zhang ve Kovacs, 2012).

Kargo ve Lojistik Uygulamaları: Kentsel ve kırsal alanlarda acil teslimatlar için kullanılan İHA'lar, özellikle insansız teslimat sistemlerinde lojistik sektöründe yer bulmaktadır (Otto vd., 2018).

Çevresel İzleme ve Sürdürülebilirlik Gözlemi: İHA'lar, çevre denetimi, su kalitesi analizi ve atık kontrolü gibi sürdürülebilirlik çalışmaları için gözlem platformu olarak görev alır (Thompson vd., 2015).

Ormancılık Faaliyetleri ve Doğa Tabanlı Gözlem: Ağaç türlerinin sınıflandırılması, hastalık tespiti ve orman sınırlarının belirlenmesinde İHA'lar etkin veri toplama araçlarıdır (Getzin vd., 2012).

Hava Olaylarının Modellenmesi ve Tahmin Sistemleri: İHA'lar, özellikle düşük irtifada atmosferik ölçümler yaparak meteorolojik tahmin modellerine veri sağlamaktadır (Houston vd., 2012).

Afet Yönetimi ve Kriz Müdahale Operasyonları:

İHA teknolojisi, doğal afet bölgelerinde arama kurtarma ekiplerine mekânsal bilgi ve görsel destek sunmaktadır (Erdelj vd., 2017).

Mobil Haberleşme ve Acil İletişim Sistemleri: Felaket sonrası iletişim kesintilerinde, İHA'lar geçici baz istasyonu görevi görerek haberleşme altyapısını desteklemektedir (Al-Hourani vd., 2014).

Uyuşturucu ile Mücadele ve Sınır Güvenliği: İHA sistemleri, kaçakçılık faaliyetlerinin tespiti ve sınır güvenliğinin sağlanmasında aktif olarak görev yapmaktadır (Saygın, 2025).

Ulaşım ve Trafik Denetimi: Trafik izleme, yoğunluk tespiti ve kaza analizi için İHA'ların sunduğu gerçek zamanlı görüntülerden faydalanılmaktadır (Zhou ve Li, 2018).

Maden ve Jeolojik Kaynak Keşfi: Jeolojik yapıların modellenmesi ve maden yataklarının tespitinde İHA tabanlı haritalama sistemleri tercih edilmektedir (Eisenbeiss ve Sauerbier, 2011).

Disiplinlerarası Bilimsel Araştırmalar: Ekolojik izleme, biyolojik çeşitlilik çalışmaları ve yer bilimleri araştırmalarında İHA'lar mobil veri toplama platformlarıdır (Anderson ve Gaston, 2013).

Enerji İletim Hatları ve Altyapı Denetimi: İHA'lar, enerji hatlarının bakım öncesi kontrolü ve arıza tespiti için termal kamera ile donatılarak kullanılmaktadır (Qu vd., 2015).

Acil Durumlarda Mobil Hücresel Kapsama Alanı Oluşturma: Mobil haberleşme sistemlerinin geçici olarak devreye alınmasında İHA teknolojileri etkili bir çözüm sunmaktadır (Mozaffari vd., 2019).

Radyasyon Seviyesi Tespiti: Nükleer sızıntı bölgelerinde, İHA'lara entegre edilen radyasyon sensörleriyle insan hayatını riske atmadan ölçüm yapılabilmektedir (Martin vd., 2016).

2.3.İHA Sistemlerinin Avantajları

İnsansız hava araçları (İHA'lar), son yıllarda teknolojik ilerlemelerin etkisiyle birçok sektörde stratejik bir konuma ulaşmıştır. Geliştirme maliyetlerinin azalması ve sistemlerin daha ulaşılabilir hâle gelmesiyle birlikte, geleneksel yöntemlerle gerçekleştirilen bazı işlemlerin yerini alarak hem ekonomik hem de iş gücü açısından avantaj sağlamaktadırlar. Bu sistemler, insanlı araçlarla karşılaştırıldığında, görev performansı, güvenlik, çevresel sürdürülebilirlik ve esneklik açısından önemli kazanımlar sunmaktadır.

2.3.1. Ekonomik ve işlevsel faydaları

İHA'ların öne çıkan özelliklerinden biri, görevleri düşük maliyetle gerçekleştirme yetenekleridir. İnsanlı hava araçlarında zorunlu olan pilot desteği, kapsamlı yakıt harcamaları ve bakım gereksinimleri, İHA sistemlerinde minimum düzeydedir. Bu sayede, kamu kurumlarından özel sektör girişimlerine kadar birçok kullanıcı için erişilebilir bir teknolojik çözüm olarak değerlendirilmektedir (Manyoky vd., 2016). Ayrıca belirli aralıklarla tekrarlanması gereken ölçüm, haritalama ve denetim gibi işlemler, İHA'lar ile daha hızlı ve sistematik biçimde yürütülebilir.

2.3.2. Güvenli erişim ve risk yönetimi

Zor koşullar altında görev yapabilme kapasitesi, İHA'ları tehlikeli ve insan erişimine kapalı alanlarda öncelikli tercih hâline getirmektedir. Özellikle doğal afet sonrası hasar tespiti, sanayi tesislerinde toksik gaz sızıntısı kontrolü ya da savaş alanlarında yapılan gözlem görevlerinde, bu sistemler insan hayatını tehlikeye atmadan veri toplamaya olanak sunmaktadır (Floreano ve Wood, 2015). Fiziksel olarak ulaşılması güç ya da tehlikeli olan bölgelerde sağladıkları operasyonel üstünlük, onları stratejik araçlar arasında öne çıkarmaktadır.

2.3.3. Çevresel uyum ve sürdürülebilir izleme

İHA'lar, çevre dostu teknolojiler arasında değerlendirilen sistemlerdir. Geleneksel hava araçlarına kıyasla daha az enerji tüketirler ve doğaya olan etkileri sınırlıdır. Bu özellikleri, onları çevresel değişimlerin gözlemlenmesi, orman alanlarının korunması, su kaynaklarının takibi ve hava kalitesinin izlenmesi gibi görevlerde öncelikli araçlar hâline getirir (Zhang ve Kovacs, 2012). Söz konusu sistemler, çevre politikalarının uygulanmasında hem görsel hem de analitik veri sağlayarak karar alma süreçlerini desteklemektedir.

2.3.4. Uyarlanabilir yapılar ve çok amaçlı kullanım

Modüler donanım özellikleri sayesinde, İHA'lar çok çeşitli görev senaryolarına uyarlanabilir. Yüksek çözünürlüklü kameralar, termal sensörler, lidar sistemleri ya da gaz algılayıcılarla entegre edilebilen bu platformlar; tarımdan madencilığe, kentsel planlamadan arkeolojik araştırmalara kadar geniş bir uygulama yelpazesi sunmaktadır. Örneğin, tarımsal gözlemde kullanılan NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) görüntüleme tekniği, bitki sağlığını analiz ederek tarımsal verimliliğin artırılmasına katkı sağlar (Sankey vd., 2018).

2.3.5. Anlık veri işleme ve karar destek

İleri düzey İHA sistemleri, elde ettikleri verileri yer kontrol üniteleriyle eş zamanlı olarak paylaşabilir ve hızlı analiz yapılmasına imkân tanır. Bu özellik, özellikle afet yönetimi, sınır güvenliği, tarımsal karar verme ve altyapı denetimi gibi alanlarda kritik öneme sahiptir. Gerçek zamanlı veri akışı, olaylara hızlı tepki verilmesini sağlayarak operasyonel başarı oranını artırır (Nex ve Remondino, 2014).

2.4. İHA Sistemlerinin Dezavantajları

İnsansız hava araçları, sundukları çok yönlü avantajlara rağmen çeşitli sınırlamalar ve risklerle de birlikte değerlendirilmektedir. Bu sistemlerin yaygınlaşması, teknik, yasal, etik ve çevresel birçok sorun alanını da gündeme taşımıştır. Özellikle hızlı teknolojik adaptasyonun, gerekli altyapısal ve yasal düzenlemelerle eş zamanlı yürütülememesi, uygulama alanlarında çeşitli problemlere yol açmaktadır. Aşağıda İHA'ların öne çıkan temel dezavantajları sistematik olarak ele alınmıştır.

2.4.1. Sınırlı uçuş süresi ve taşıma kapasitesi

Çoğu küçük ve orta ölçekli İHA sistemi, sınırlı batarya ömrü nedeniyle uzun süreli uçuş gerçekleştirememektedir. Özellikle elektrikli İHA'larda uçuş süresi genellikle 20-40 dakika arasında sınırlıdır. Bu durum, geniş alanların taranması veya uzun süreli gözlem yapılması gereken görevlerde operasyonel verimliliği düşürmektedir (Kumar ve Michael, 2012). Ayrıca taşıma kapasitesinin kısıtlı oluşu, aynı anda çoklu sensör kullanımını veya ağır ekipman taşımayı zorlaştırmaktadır.

2.4.2. Hava koşullarına duyarlılık

İHA sistemleri, meteorolojik koşullara oldukça duyarlıdır. Rüzgâr, yağmur, sis gibi çevresel faktörler, uçuş güvenliğini ve veri kalitesini doğrudan etkileyebilir. Özellikle mikro ve mini sınıf İHA'lar, düşük dayanıklılıkları nedeniyle bu tür koşullarda operasyon yapma kabiliyetinden yoksundur. Bu da görevlerin mevsimsel veya anlık hava durumu ile sınırlanmasına neden olmaktadır (Watts vd., 2012).

2.4.3. Yasal düzenlemeler ve uçuş kısıtlamaları

Birçok ülkede İHA kullanımı, sivil havacılık otoriteleri tarafından sıkı düzenlemelere tabidir. İzin süreçlerinin karmaşıklığı, özel alanlarda uçuş kısıtlamaları ve veri güvenliği politikaları, sistemlerin esnekliğini azaltmaktadır (Clothier vd., 2015). Özellikle yerleşim alanlarında veya hassas bölgelerde uçuş yapılması, ciddi hukuki yaptırımları beraberinde getirebilmektedir.

2.4.4. Veri güvenliği ve gizlilik sorunları

İHA'ların yüksek çözünürlüklü kameralar ve sensörler ile donatılmış olması, veri gizliliği konusunda önemli etik soruları gündeme getirmektedir. Kişisel verilerin izinsiz toplanması, özel mülkiyetlerin görüntülenmesi veya hassas bilgilerin depolanması, bireysel mahremiyet haklarını tehdit etmektedir (Finn ve Wright, 2012). Bu durum, hem bireyler hem de kamu kurumları için güven kaybı yaratabilmektedir.

2.4.5. Operasyonel riskler ve kazalar

İHA'ların düşük irtifada uçmaları ve otomatik sistemlerle yönetilmeleri, çarpışma ve düşme riskini artırmaktadır. GPS kesintileri, sensör hataları veya yazılım arızaları sonucu kontrol kaybı yaşanması, hem çevreye hem de insanlara zarar verebilecek kazalara yol açabilmektedir (Puri, 2005). Bu nedenle operasyonel süreçlerin iyi planlanması ve risk analizlerinin dikkatle yapılması gerekmektedir.

2.5. İHA'ların Hava Kalitesi İzlemede Kullanımı

Hava kirliliği, günümüzde küresel ölçekte halk sağlığını tehdit eden başlıca çevresel sorunlardan biri olarak kabul edilmektedir. Özellikle kentleşme, endüstrileşme ve ulaşım yoğunluğu gibi insan kaynaklı faaliyetler, atmosferdeki zararlı partikül madde (PM), gaz ve diğer kirleticilerin yoğunlaşmasına neden olmaktadır (World Health Organization [WHO], 2021). Bu bağlamda, hava kalitesinin doğru, sürekli ve mekânsal olarak ayrıntılı biçimde izlenmesi; hem politika geliştirme süreçleri hem de erken uyarı sistemlerinin oluşturulması açısından büyük önem arz etmektedir. Son yıllarda bu amaca yönelik olarak geleneksel sabit izleme istasyonlarına ek olarak İnsansız Hava Araçları (İHA'lar) önemli bir alternatif teknoloji olarak öne çıkmaktadır.

2.5.1. Teknolojik altyapı ve sensör entegrasyonu

İHA'lar, düşük maliyetli, taşınabilir ve esnek yapıları sayesinde çevresel izleme faaliyetlerinde giderek daha fazla kullanılmaktadır. Modern İHA platformları, özellikle elektro-kimyasal, optik ve lazer tabanlı gaz sensörleri ile entegre edilerek çeşitli hava kirleticilerin (PM1.0, PM2.5, PM10, CO, CO₂, NO₂, O₃, SO₂) ölçümünü gerçekleştirebilmektedir (Villa vd., 2016).

Bu sensörler sayesinde elde edilen veriler, geleneksel ölçüm sistemlerine göre daha yüksek mekânsal çözünürlükte hava kalitesi analizleri yapılmasını mümkün kılmaktadır (Liu vd., 2020).

Örneğin, DJI Matrice 300 gibi ticari İHA modellerine entegre edilebilen taşınabilir hava kalitesi modülleri, 400 metreye kadar yüksekliklerde çeşitli gaz konsantrasyonlarını saniyeler içerisinde ölçerek yer istasyonlarına veri aktarabilmektedir (Flybi, 2024). Bu da, özellikle yüksek bina çevreleri, dağlık alanlar veya sanayi tesisleri gibi sabit sensörlerin erişemediği bölgelerde veri toplanmasına imkân tanımaktadır.

2.5.2. Gerçek zamanlı izleme ve veri analizi

İHA'ların sunduğu en önemli avantajlardan biri de gerçek zamanlı izleme kapasitesidir. Gömülü sistemlerle donatılmış bu araçlar, uçuş sırasında topladıkları verileri anlık olarak yer istasyonlarına gönderebilmekte ve yapay zekâ destekli yazılımlar aracılığıyla hızlı analiz gerçekleştirebilmektedir (Tong vd., 2021). Böylelikle, kirletici yoğunluğunun dağılımı, kaynağı ve zamansal değişimi hakkında kapsamlı bilgiler elde edilebilmektedir.

Özellikle afet durumlarında (örneğin yangınlar, kimyasal sızıntılar veya nükleer sızıntılar) İHA'lar hava kalitesi üzerindeki ani değişimleri hızlıca tespit edebilmekte ve kriz yönetimi süreçlerine bilimsel veri desteği sunmaktadır (Karsem, 2023).

2.5.3. Uygulama alanları

İHA tabanlı hava kalitesi izleme sistemleri, kent merkezlerinden tarım alanlarına, endüstriyel tesislerden doğal alanlara kadar geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Özellikle büyükşehirlerde, trafik kaynaklı emisyonların izlenmesi; sanayi bölgelerinde ise baca gazı denetimi amacıyla yaygın biçimde kullanılmaktadır (Dronessales, 2024).

Bunun yanı sıra tarım alanlarında da anız yakımı sonrası hava kalitesi üzerindeki etkiler İHA'lar aracılığıyla detaylı şekilde izlenebilmekte ve böylece yerel yönetimlere çevresel karar alma süreçlerinde bilimsel destek sunulmaktadır (Science44, 2024). Ayrıca, farklı irtifalarda ölçüm yapılabilmesi, atmosferik dikey profil analizlerinin gerçekleştirilmesine olanak sağlayarak, kirleticilerin yükseklikle değişimini ortaya koymaktadır (Villa vd., 2016).

2.5.4. Türkiye’deki uygulamalar

Türkiye’de İHA’ların çevresel izleme bağlamında kullanımı her geçen yıl artış göstermektedir. Özellikle bazı belediyeler ve Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından yürütülen pilot projelerde, İHA’lar kullanılarak sanayi bölgelerinde ve çöp depolama alanlarında hava kalitesi ölçümleri gerçekleştirilmiştir (Anadolu Ajansı, 2023). Ayrıca, TÜBİTAK destekli bazı projelerde İHA’lar ile sensör tabanlı gaz izleme sistemlerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar devam etmektedir.

2.6. Hava Kalitesi Ve Ölçüm Yöntemleri

Hava kalitesi, atmosferdeki kirleticiler ve partikül maddelerin konsantrasyon düzeylerini ifade eder ve hem insan sağlığı hem de ekosistemler üzerinde doğrudan etkiler barındırır. Dünya Sağlık Örgütü’ne (WHO) göre, özellikle ince partikül madde (PM_{2.5}), ozon (O₃), azot dioksit (NO₂), sülfür dioksit (SO₂) ve karbonmonoksit (CO) gibi kirleticiler, solunum yolu hastalıkları, kardiyovasküler problemler ve erken ölümlerin başlıca nedenleri arasında yer almaktadır (WHO, 2021). Bu nedenle, hava kalitesinin doğru ve güvenilir biçimde ölçülmesi, hem çevresel yönetim hem de halk sağlığının korunması açısından stratejik bir öneme sahiptir.

2.6.1. Hava kalitesi göstergeleri ve standartlar

Hava kalitesi değerlendirmelerinde genellikle "Hava Kalitesi İndeksi (HKİ)" veya "Air Quality Index (AQI)" kullanılmaktadır. Bu indeks, farklı kirleticilerin ölçüm değerlerini tek bir sayısal ölçüte indirger ve halkın kolayca anlayabileceği şekilde renklendirilmiş risk düzeyleri ile ifade eder (US EPA, 2022). Türkiye’de ise hava kalitesi izleme faaliyetleri, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından belirlenen sınır değerler çerçevesinde yürütülmektedir. Bu standartlar Avrupa Birliği normlarıyla büyük ölçüde uyumludur.

2.6.2. Hava kalitesi indeksi (HKİ)

Hava Kalitesi İndeksi (HKİ), belirli kirleticiler gazların (örneğin partikül madde, ozon, karbonmonoksit, azotdioksit vb.) insan sağlığına etkileri temel alınarak oluşturulan, ölçüm verilerini kolay anlaşılır bir sınıflandırma sistemine dönüştüren göstergelerdir. Bu indeks, genellikle her bir kirleticiler için ayrı ayrı hesaplanır ve bunlardan en yüksek değeri taşıyan

kirletici genel hava kalitesi seviyesini belirler. HKİ hesaplamalarında standart bir formül kullanılarak ölçülen konsantrasyon değerleri belirli aralıklarla eşleştirilir ve sonuçlar renklendirilmiş kategoriler aracılığıyla yorumlanır (EPA, 2014). Ancak bu çalışmada, odak noktası sensör tabanlı veri toplama ve insansız hava aracı (İHA) destekli sistemlerin ölçüm kapasitesinin değerlendirilmesi olduğundan, HKİ hesaplaması gerçekleştirilmemiştir. Bunun yerine, gaz konsantrasyonlarının zamansal ve mekânsal dağılımı analiz edilerek, sistemin izleme potansiyeli ortaya konmuştur. İlerleyen çalışmalarda HKİ hesaplamaları ve hava kalitesi sınıflandırmaları, toplanan veriler üzerinden ayrı bir değerlendirme konusu olarak ele alınabilir.

2.6.3. Sabit İstasyonlar

Hava kalitesinin ölçümünde en yaygın kullanılan yöntemlerden biri, sabit izleme istasyonlarıdır. Bu istasyonlar, genellikle şehir merkezleri, sanayi bölgeleri veya trafik yoğunluğu yüksek alanlarda kurulur ve gaz analizörleri, partikül ölçerler, meteorolojik sensörler gibi ileri teknoloji cihazlarla donatılmıştır. Sabit istasyonlar, yüksek hassasiyetli ölçümler sağlamalarına rağmen, kurulumu ve işletilmesi maliyetli olup sınırlı sayıda lokasyondan veri toplayabilirler (Castell vd., 2017).

2.6.4. Mobil ölçüm sistemleri

Mobil hava kalitesi ölçüm sistemleri, araç üzerine monte edilen sensör modülleriyle farklı alanlardan anlık veri toplama kapasitesine sahiptir. Özellikle kısa süreli saha araştırmaları, çevresel etki değerlendirme çalışmaları ve sanayi kaynaklı kirliliğin tespiti gibi durumlarda tercih edilmektedir (Apte vd., 2017). Bu sistemler sabit istasyonlara kıyasla daha geniş alanlardan veri elde edilmesini sağlar ancak ölçüm doğruluğu kullanılan sensörlerin kalitesine göre değişebilir.

2.6.5. Uydu tabanlı gözlem sistemleri

Son yıllarda atmosferin geniş ölçekli izlenmesinde uydu teknolojileri de kullanılmaktadır. NASA'nın Aura ve ESA'nın Sentinel uyduları gibi platformlar, troposferdeki gaz konsantrasyonlarını ölçebilen spektrometreler ile donatılmıştır (Kharol vd., 2015). Bu yöntemler özellikle kırsal ve erişimi zor bölgelerde hava kalitesi değerlendirmelerinde faydalı

olmakla birlikte, uzamsal çözünürlük sınırlılığı ve yer düzeyindeki hassasiyet eksikliği gibi dezavantajlara sahiptir.

2.6.6. Düşük maliyetli sensör sistemleri

Gelişen sensör teknolojileri sayesinde, taşınabilir ve düşük maliyetli gaz ve partikül sensörleri yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu sensörler elektro-kimyasal, optik ya da lazer tabanlı olabilir ve sabit ya da hareketli platformlara entegre edilebilirler. Düşük maliyetli sensör sistemleri, özellikle katılımcı bilim projelerinde, eğitim amaçlı uygulamalarda ve İHA'larla entegre edilen hava kalitesi izleme sistemlerinde etkin biçimde kullanılmaktadır (Morawska vd., 2018).

2.6.7. İHA (Drone) destekli ölçüm sistemleri

İnsansız hava araçları (İHA'lar), sensörlerle donatıldıklarında hava kalitesini üç boyutlu olarak izleyebilen mobil platformlar haline gelmektedir. Bu sistemler, farklı irtifalarda ve erişilmesi zor bölgelerde kirletici yoğunluğunu ölçerek, geleneksel yöntemlerle ulaşılamayan verilere ulaşılmasını sağlar (Villa vd., 2016). İHA'lar, sabit istasyonlarla desteklendiğinde oldukça yüksek çözünürlükte hava kalitesi haritalarının oluşturulmasına olanak tanır.

2.6.8. Ölçüm verilerinin değerlendirilmesi

Toplanan hava kalitesi verileri analiz edilerek kirletici dağılım haritaları, zamansal değişim grafikleri ve istatistiksel özetler hâline getirilir. Bu analizler, hava kalitesinin değerlendirilmesinde temel araçlardır. Ayrıca yapay zekâ tabanlı modellemeler, makine öğrenmesi algoritmaları ve regresyon analizleri gibi yöntemler de hava kirliliği tahmini ve erken uyarı sistemlerinin oluşturulmasında yaygın olarak kullanılmaktadır (Bai vd., 2022).

Hava kalitesinin izlenmesi, toplum sağlığının korunması, çevresel sürdürülebilirlik ve şehir planlaması açısından kritik bir öneme sahiptir. Gelişen teknoloji sayesinde sabit istasyonlardan uydu sistemlerine, mobil ölçüm araçlarından İHA tabanlı platformlara kadar çok çeşitli yöntemler kullanılarak, daha ayrıntılı, zamansal ve mekânsal çözünürlüğü yüksek veri elde edilmesi mümkün hâle gelmiştir. Bu yöntemlerin birbirini tamamlayacak şekilde kullanılması, hava kalitesi yönetimi açısından bütüncül bir yaklaşımın temelini oluşturmaktadır.

2.7. Sensör Teknolojileri ve Kullanım Alanları

Gelişen mikroelektronik, nanoteknoloji ve gömülü sistemler alanlarındaki ilerlemeler sayesinde sensör teknolojileri, çevresel izleme ve veri toplama uygulamalarında kritik bir rol üstlenmiştir. Sensörler; fiziksel, kimyasal veya biyolojik parametreleri algılayarak bu bilgileri ölçülebilir elektriksel sinyallere dönüştüren cihazlardır (Gardner, Varadan ve Awadelkarim, 2001). Hava kalitesi ölçümünde kullanılan sensörler, genellikle belirli gazların varlığını ve yoğunluğunu algılayan yarı iletken tabanlı yapılar üzerine inşa edilmiştir. Bu sensörler, düşük maliyetli olmaları, taşınabilir sistemlere entegre edilebilmeleri ve gerçek zamanlı izleme imkânı sunmaları nedeniyle özellikle mobil hava kalitesi izleme sistemlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir (Spinelle, Gerboles, Kok, Persijn ve Sauerwald, 2017).

Gaz algılama uygulamalarında en çok kullanılan sensör türlerinden biri metal oksit yarı iletken (MOS) sensörlerdir. Örneğin, MQ serisi sensörler (MQ7, MQ135, MQ131) karbonmonoksit (CO), azot oksitler (NO_x), ozon (O₃) ve uçucu organik bileşikler (VOC) gibi kirleticilerin algılanmasında etkin biçimde kullanılmaktadır. Bu sensörler, gazlarla temas ettiğinde dirençlerinde meydana gelen değişimi ölçerek ilgili gazın konsantrasyonu hakkında bilgi verir (Korotcenkov, 2007). Ayrıca DHT11 gibi sıcaklık ve nem sensörleri, çevresel koşulların değerlendirilmesinde temel parametreleri sağlarken, optik temelli toz sensörleri (örneğin GP2Y1010AU0F), havadaki partikül yoğunluğunu µg/m³ cinsinden tespit edebilmektedir.

Sensör teknolojileri yalnızca çevre izleme ile sınırlı olmayıp, sağlık hizmetlerinden endüstriyel otomasyona, tarımsal üretimden akıllı şehir uygulamalarına kadar çok sayıda alanda kullanılmaktadır. Sağlık alanında, biyosensörler vücut sıvılarındaki glikoz seviyelerinin ölçümünde yaygın olarak kullanılırken; tarımda toprak nemi, sıcaklık ve pH düzeylerini izleyen sensör sistemleri, verimliliği artırmak amacıyla hassas tarım uygulamalarında yer bulmaktadır (Patel, 2016). Ayrıca, akıllı şehir projelerinde kullanılan sensör ağları; trafik yoğunluğu, hava kirliliği, enerji tüketimi ve altyapı yönetimi gibi alanlarda veri toplayarak, karar destek sistemlerine katkı sağlamaktadır (Zanella, Bui, Castellani, Vangelista ve Zorzi, 2014).

Mobil platformlara (örneğin İHA'lar, robotlar ve taşıtlar) entegre edilen sensör sistemleri ise hem zamansal hem de mekânsal olarak yüksek çözünürlüklü veri toplayabilme kapasitesine sahiptir. Bu yönüyle sabit istasyonlara kıyasla daha geniş alanları daha kısa sürede tarayarak, dinamik çevresel değerlendirmelere olanak tanımaktadır. Bu çalışma kapsamında kullanılan

sensörler, hava kalitesine etki eden başlıca gazların ve partikül maddelerin ölçümüne imkân sağlayarak, mobil sistem tabanlı çevresel izleme yaklaşımlarının teknik temelini oluşturmuştur.

2.8. Literatürdeki Boşluklar ve Araştırma Gereksinimi

Son yıllarda, İnsansız Hava Araçları (İHA'lar) ile hava kalitesi ölçümüne dair birçok çalışma gerçekleştirilmiş olsa da, bu alanda hala önemli literatür boşlukları bulunmaktadır. Çevresel izleme sistemlerinin geliştirilmesi amacıyla kullanılan İHA destekli sensör teknolojileri, özellikle mobil ve dinamik ölçüm imkanları sağlaması bakımından umut verici olsa da, bu teknolojilerin etkinliğini ve güvenilirliğini artırmaya yönelik bazı eksiklikler mevcuttur. Mevcut araştırmalar, genellikle sabit ölçüm istasyonlarının veri toplama kapasitesine odaklanırken, İHA'ların çevresel verileri toplama verimliliği üzerinde sınırlı sayıda çalışmaya yer verilmiştir (Santi vd., 2014).

Birçok mevcut çalışma, sensörlerin doğruluğu ve ölçüm hassasiyeti üzerine derinlemesine araştırmalar yapmamış, yalnızca teorik modelleme ve prototip düzeyinde uygulamalarla sınırlı kalmıştır. Örneğin, İHA'lar üzerindeki gaz sensörlerinin dinamik hava akışları, sıcaklık değişimleri ve atmosfer koşulları gibi faktörlerden nasıl etkilendiğine dair kapsamlı veriler eksiktir. Bu, özellikle mobil ölçüm platformlarının sabit sistemlere kıyasla daha yüksek doğrulukla veri toplama kapasitesini sorgulayan bir boşluktur. Ayrıca, sensörlerin performansı; çevresel koşulların yanı sıra sensörlerin kullanım ömrü, kalibrasyon süreçleri ve kalibrasyon sonrası doğruluk gibi etkenlerle de değişkenlik göstermektedir (Pereira vd., 2018). Bu bağlamda, İHA'lar üzerindeki sensörlerin kalibrasyon stratejileri üzerine daha fazla araştırma yapılması gerektiği görülmektedir.

Ayrıca, mevcut çalışmaların büyük bir kısmı, sadece tek bir sensör türüne odaklanmakta ve birden fazla sensörün bir arada kullanılarak hava kalitesinin daha kapsamlı bir şekilde izlenmesini araştırmamaktadır. Çeşitli sensörlerin birleştirilmesiyle elde edilen verilerin entegrasyonu, hava kalitesinin daha doğru bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanıyabilir. İHA destekli hava kalitesi izleme sistemleri, sıcaklık, nem, ozon, karbonmonoksit, azot oksitler gibi farklı kirletici parametrelerin eş zamanlı olarak izlenmesini sağlayacak potansiyele sahiptir, ancak bu tür sistemlerin verimliliği ve güvenilirliği hakkında daha fazla deneysel çalışma gerekmektedir.

Bundan başka, sensörlerden alınan verilerin uzaktan izlenmesi ve analiz edilmesi ile ilgili bir diğer önemli eksiklik, bu verilerin kullanıcılara anlamlı bir şekilde sunulmasıdır. Çoğu çalışmada, sensör verilerinin analiz ve görselleştirilmesi konusunda yeterli araştırma yapılmamış, özellikle hava kalitesinin görsel olarak haritalanması ve raporlanması üzerine daha kapsamlı çözümler geliştirilmemiştir. Bu nedenle, hava kalitesi verilerinin kullanıcı dostu bir şekilde sunulması, özellikle çevresel karar destek sistemleri açısından kritik bir gereksinimdir. Bu konuda, veri işleme ve görselleştirme algoritmalarına dair yeni araştırmalar ve yazılım çözümleri geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Sonuç olarak, İHA destekli hava kalitesi izleme sistemlerinde karşılaşılan bu boşlukların, sensör teknolojilerinin doğruluğu, veri işleme kapasiteleri ve sistem entegrasyonu gibi yönlerden ele alınması gerektiği açıktır. Gelecekte yapılacak araştırmalar, bu teknolojilerin daha verimli hale getirilmesi ve çevresel izleme süreçlerinin optimizasyonu konusunda önemli katkılar sağlayacaktır.

3. YÖNTEM

Bu araştırma, keşifsel ve uygulamalı bir yaklaşımla yapılandırılmıştır. Çalışmada, İHA destekli hava kalitesi izleme sistemlerinin çevresel veri toplama üzerindeki etkinliği değerlendirilmektedir. Uygulama temelli nicel bir modelleme benimsenmiş; sıcaklık, nem, karbonmonoksit (CO), ozon (O₃) ve hava kalitesi (CO₂, VOC vb.) gibi çevresel parametreler yerinde ölçülerek analiz edilmiştir. Araştırma modeli, sistem mühendisliği ilkeleri doğrultusunda sensör teknolojilerinin mobil platformlarla entegrasyonu esas alınarak yapılandırılmıştır (Delaney vd., 2021; Karagulian vd., 2019).

3.1. İHA Platformunun Tanıtımı ve Özellikleri

Bu bölümde kullanılan İHA sistemi, çok rotorlu (quadrotor) yapıdaki bir insansız hava aracı üzerine inşa edilmiş olup, çevresel sensör modüllerinin taşınması ve ölçüm yapılması amacıyla özelleştirilmiştir. Seçilen İHA modeli, düşük irtifa uçuşlarına uygun olarak geliştirilmiş ve veri aktarımı için RF (nRF24L01) iletişim modülüyle desteklenmiştir. Bu sayede, gerçek zamanlı ölçümler güvenilir biçimde yer istasyonuna aktarılabilir (Park vd., 2020).

3.1.1. F450 drone gövdesi

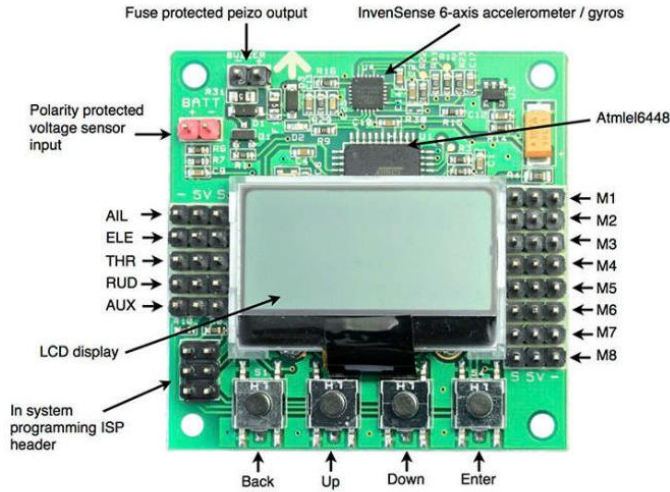
F450 drone gövdesi, özellikle hobi amaçlı drone yapımında yaygın olarak tercih edilen, 450 mm dingil mesafesine sahip bir quadcopter çerçevesidir. Bu çerçeve, hem yeni başlayanlar hem de deneyimli kullanıcılar için uygun olup, uçuş kontrol kartı montajı, kalibrasyon ve uçuş testi gibi işlemler için idealdir. Gövde, yüksek kaliteli cam elyaf ve poliamid naylon malzemelerden üretilmiştir; bu sayede hafif ve darbelere karşı dayanıklıdır. Ayrıca, entegre bir PCB yapısı sayesinde ESC bağlantıları daha düzenli ve güvenilir hale gelir. Gövde, 2208/2212/2213 motorlarla uyumlu olup, 15–30A ESC'lerle çalışabilir. Pervane olarak 1045 veya 8045 boyutları önerilmektedir. Gövde, 1.8 kg'a kadar kalkış ağırlığını taşıyabilir ve Raspberry Pi, kamera gibi ek donanımlar için yeterli alan sunar. (Hawks Work. 2025). Şekil 1.'de, F450 drone gövdesinin örneği gösterilmektedir.



Şekil 1. F450 drone gövdesi

3.1.2. Ekranlı KK2 kontrol kartı

KK Multi Rotor kontrol devresiyle uyumlu bu ekran kartı, çok rotorlu hava araçlarının kontrolünde kullanılan, işlevsel ve ihtiyaca yönelik bir üründür. Kart üzerinde Atmega 644 PA entegresi yer almakta olup, ayrıca 6050MPU Gyro/Accelerometer sensörü de bulunmaktadır. Bu kombinasyon sayesinde, KK kontrol devresiyle entegre çalıştığında, hangi motorun ne zaman aktif hale geldiğini ve bu motorun nasıl bir dönüş hareketi sağladığını gözlemlemek mümkündür. Kartın ebatları 51 mm x 51 mm x 12 mm olup, toplam ağırlığı 21 gramdır. Giriş voltajı 4.8 ile 6V arasında değişmektedir. Üzerinde standart 6 pinli AVR arayüzü yer almakta ve 1520 mikro saniyelik alıcı sinyallerini (5 kanal üzerinden) algılayarak yine aynı sürede kontrol kartına aktarmaktadır. Bu özellikleri sayesinde, çok rotorlu sistemlerde hassas ve güvenilir bir kontrol sunmaktadır. Robotistan. (2025). Şekil 2.'de Ekranlı KK2 kontrol kartının pinleri verilmiştir.



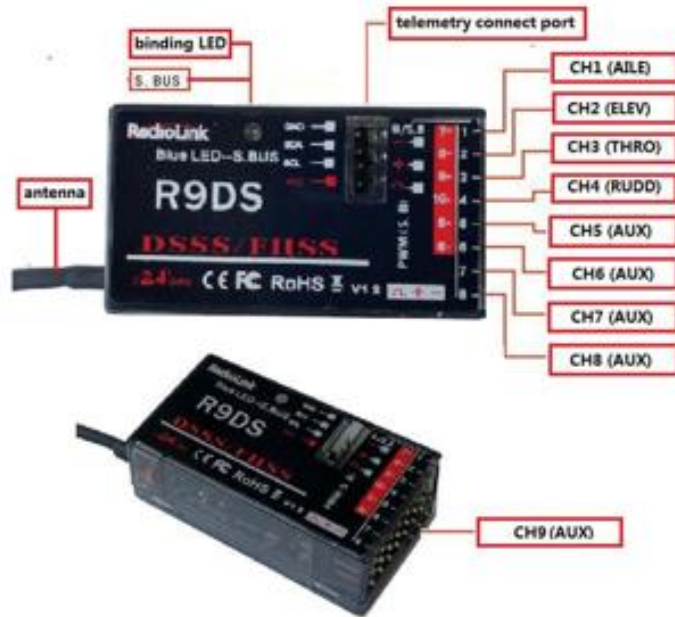
Şekil 2. Ekranlı KK2 Kontrol Kartı

3.1.3. Radio link R9DS alıcı

R9DS 10 kanallı alıcı, AT9, AT9S, AT10 ve benzeri verici modellerle uyumlu çalışır. Kırmızı gösterge ışığı 9 PWM sinyali, mavi gösterge ise SBUS modu kullanıldığını gösterir. SBUS ile 10 kanala kadar çıkış desteklenir ve PWM sinyalleriyle eşzamanlı çalışabilir. Çalışma voltajı 4.8–10V, akımı ise 5V’da 38–45 mA’dır. Alıcının boyutları 43x24x15 mm’dir.

Alıcı, sinyal gücü, voltaj geri bildirimi ve RSSI değerini iletebilir. Harici PRM-01 ve PRM-03 modülleri ile batarya voltajı, konum, uydu sayısı ve hız gibi OSD verilerini aktarabilir. 4096 seviyelik çözünürlüğüyle yüksek hassasiyet sağlar. Kompakt yapısı ve S-BUS desteği sayesinde kurulumu kolaydır.

Vericiyle eşleşme işlemi sırasında, "ID SET" düğmesine basıldığında LED ışık yanıp söner ve kodlama tamamlandığında sabitlenir. Bu işlem, alıcının vericiyle düzgün çalışmasını sağlar. THK Model Uçak. (2023). Şekil 3.’te Radio link R9DS alıcı kartının pinleri verilmiştir.



Şekil 3. R9DS 10 kanallı alıcı

3.1.4. Emax XA2212 980KV fırçasız motor

Emax XA2212 980KV fırçasız motor, özellikle drone ve multikopter uygulamalarında tercih edilen, yüksek verimlilik ve güvenilirlik sağlayan bir motordur. 2S–3S LiPo pillerle uyumlu çalışan bu motor, 980 devir/volt (KV) değerine sahiptir. Üretiminde kullanılan yüksek kaliteli rulmanlar, silikon çelik sargılar ve güçlü mıknatıslar sayesinde, titreşimsiz ve uzun ömürlü bir performans sunar. Teknik özellikleri arasında 3 mm mil çapı, 49 gram ağırlık ve 205 W maksimum güç yer alır. Ayrıca, önerilen pervane boyutları 9x6 ve 10x4.7 inçtir; 20A veya üzeri ESC'lerle uyumlu çalışabilmektedir. Sabit kanatlı uçaklar ve helikopterlerde de kullanılan bu motor, hassas dengelenmiş yapısı ve kaliteli bileşenleriyle enerji kaybını minimize ederek uçuş verimliliğini artırır (Robotus, 2025). Şekil 4.'te çalışmada kullanılan Emax XA2212 980KV fırçasız motorun genel görünümünü yansıtan bir görsel sunulmaktadır



Şekil 4. Emax XA2212 980KV fırçasız motor

3.1.5. Skywalker 30A ESC (Electronic speed controller)

Skywalker 30A ESC (Electronic Speed Controller), özellikle insansız hava araçlarında (İHA), multikopterlerde ve sabit kanatlı uçak sistemlerinde motor hız kontrolü sağlamak amacıyla kullanılan bir elektronik devre elemanıdır. 2S–3S LiPo pillerle uyumlu olarak çalışan bu ESC, 30 amper sürekli akım kapasitesine sahiptir ve kısa süreli olarak daha yüksek akımları da taşıyabilmektedir. Yüksek verimlilik sağlayan düşük iç dirençli MOSFET yapısı sayesinde, motor performansını artırırken ısınmayı da minimize eder. Skywalker 30A ESC, hızlı tepki süresi, düşük voltaj koruması, aşırı ısınma koruması ve motor zamanlama ayarları gibi gelişmiş özelliklerle donatılmıştır. Bu sayede uçuş esnasında güvenilirlik ve kararlılık sağlar. Ayrıca,

çoğu fırçasız motorla uyumlu olarak çalışabilir ve yapılandırılabilir firmware (yazılım) desteği ile farklı uçuş gereksinimlerine adapte edilebilir. Bu özellikleriyle, özellikle orta ölçekli hava aracı projelerinde sıkça tercih edilmektedir (Robotzade Web2., 2025). Şekil 5.'te Skywalker 30A ESC'nin dış görünümü yer almaktadır.



Şekil 5. Skywalker 30A ESC

3.1.6. 3700mAh 3S 11.1V 30C LiPo pil

3700mAh 3S 11.1V 30C LiPo pil, insansız hava araçları, multikopter sistemleri ve yüksek enerji ihtiyacı olan RC (radyo kontrollü) sistemlerde yaygın şekilde kullanılan güçlü bir enerji kaynağıdır. Üç hücreli (3S) yapısı sayesinde 11.1V nominal gerilim üretir ve 3700mAh kapasitesiyle uzun süreli çalışma sağlar. 30C deşarj oranı, motorlara yüksek akım aktarımı gerektiren uygulamalarda güvenli ve kararlı bir performans sunar. Hafif yapısı ve kompakt boyutları sayesinde havacılık projelerinde sıklıkla tercih edilir. (Arrow Models. 2025). Şekil 6.'da 3700mAh 3S 11.1V 30C LiPo pile ait bir örnek görülmektedir.



Şekil 6. 3700mAh 3S 11.1V 30C LiPo pil

3.1.7. 1045 drone pervanesi

1045 drone pervanesi, özellikle quadcopter ve multikopter sistemlerinde yaygın olarak kullanılan, 10 inç çapında ve 4.5 inç adım uzunluğuna sahip bir pervane modelidir. Bu pervaneler, saat yönünde (CW) ve saat yönünün tersine (CCW) dönüş yönlerine uygun olarak

Çiftler halinde sunulmaktadır. Genellikle ABS plastik malzemeden üretilen bu pervaneler, hafiflikleri ve yüksek mukavemetleri sayesinde uçuş sırasında stabilite ve verimlilik sağlar. Pervane uçlarında bulunan 15°'lik açı, uçuş sırasında oluşabilecek girdapları azaltarak daha kararlı bir performans sunar. Merkez delik çapı 6 mm olan bu pervaneler, 800KV–1100KV arası motorlarla uyumlu olup, 550 mm–700 mm dingil mesafesine sahip drone platformlarında kullanılabilir. Paket içeriğinde, CW ve CCW yönlerinde birer adet pervane ile birlikte adaptör halkaları bulunmaktadır (Motorbit, 2025a). Şekil 7.'de, 1045 drone pervanesi görülmektedir.



Şekil 7. 1045 drone pervanesi

3.1.8. RadioLink AT9S Pro kumanda sistemi

RadioLink AT9S Pro, 2.4 GHz ISM bandında çalışan, 12 kanallı bir kumanda sistemidir. Bu sistem, multikopterler, uçaklar ve diğer uzaktan kumandalı araçlar için tasarlanmıştır. Kumanda, QPSK modülasyonu ve DSSS/FHSS yayılma spektrumu teknolojilerini kullanarak, güvenilir bir iletişim sağlar. Ayrıca, SBUS, PWM, PPM ve CRSF sinyal çıkışlarını aynı anda destekler, bu da farklı alıcılarla uyumlu olmasını sağlar. Kumanda, 7.4V ile 18.0V arasında çalışabilir ve yaklaşık 90mA akım eker. Hava koşullarına bağlı olarak 1.5 km'ye kadar kontrol mesafesi sunar. Kumanda, R9DS alıcı ile birlikte gelir ve bu alıcı, PWM sinyal modunda 9 kanal, SBUS sinyal modunda ise 10 kanal desteği sunar. Kumanda, 2.8 inçlik bir LCD ekrana sahiptir ve çoklu dil desteği sunar. Ayrıca, Crossfire modülü gibi harici modüllerle de uyumludur. Kumanda, STM32F103VET6 mikrodenetleyici ve TI CC2533 ipi kullanır. Kumanda, AT9S ve AT10II gibi diğer RadioLink kumandalarıyla karşılaştırıldığında, daha fazla kanal desteği ve gelişmiş özellikler sunar. RadioLink. (2025). Şekil 8.'de, RadioLink AT9S Pro kumanda sistemine ait örnek bir model sunulmaktadır.



Şekil 8. RadioLink AT9S Pro kumanda sistemi

3.1.9. FPV (First-Person View) gözlük ve kamera seti

FPV (First-Person View) gözlükleri ve kamera sistemleri, drone kullanıcılarına uçuş sırasında gerçek zamanlı görüntü aktarımı sağlayarak daha etkili bir uçuş deneyimi sunmaktadır. Özellikle drone yarışları ve hobi amaçlı uçuşlar için bu sistemler yaygın olarak tercih edilmektedir. FPV sistemleri, dronelere birinci şahıs bakış açısıyla uçuş yapma imkânı verirken, kullanıcıya daha kontrollü ve keyifli bir uçuş deneyimi sunar. Bu tür sistemler, yüksek kaliteli video iletimini sağlayabilen gözlükler ve kameralar ile birlikte çalışır.

Bu tür sistemler genellikle 5.8 GHz frekans bandını kullanarak, video iletimi yapabilen kameralar ve gözlükler içerir. FPV gözlüklerin ekranı genellikle 960x240 piksel çözünürlüğe sahip olup, çift anten alıcı sistemi ile sinyal alımı sağlanmaktadır. Kameralar ise genellikle 800 TVL çözünürlük sunarak geniş bir görüş açısı sağlar.

Bu sistemler, drone uçuş deneyimini geliştiren ve daha hassas kontrol imkânı tanıyan ekipmanlar olarak, kullanıcıların uçuş sırasında görsel geri bildirim almalarını sağlar. Örneğin, FPV gözlükler ve kameralar, sadece eğlence amaçlı değil, aynı zamanda ticari ve profesyonel kullanımda da yaygın olarak kullanılmaktadır. Kullanıcıların bu tür sistemleri seçerken,

ürünlerin teknik özelliklerini ve kullanıcı yorumlarını dikkate alması önemlidir. Robotzade Web1, (2025). Şekil 9.'da FPV gözlük ve kamera setinin bir örneği gösterilmektedir.



Şekil 9. FPV gözlük ve kamera seti

3.2. Donanım Yapısı ve Sensör Modülü

Donanım bileşenleri, çevresel veri toplama sürecinde kararlılığı ve hassasiyeti sağlamak amacıyla seçilmiştir. Platformun kalbini oluşturan Arduino mikrodenetleyicisi, düşük enerji tüketimi ve modüler yapısıyla sistemin entegrasyonunu kolaylaştırmaktadır. Sensör modülü; sıcaklık ve nem ölçümü için DHT11, karbonmonoksit için MQ-7, hava kalitesi için MQ-135, ozon gazı için MQ-131 ve partikül madde ölçümü için GP2Y1010AU0F gibi sensörleri içermektedir. Sensörlerden alınan veriler NRF24L01 kablosuz haberleşme modülü aracılığıyla alıcı birime iletilmektedir.

3.2.1. Arduino uno

Arduino Uno, açık kaynaklı ve kullanımı kolay bir mikrodenetleyici platformu sunan Arduino ailesinin en yaygın kullanılan modellerinden biridir. Bu kart, Atmel firmasına ait ATmega328 mikrodenetleyicisini temel olarak geliştirilmiş olup, gömülü sistem uygulamalarında oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir. Arduino Uno'nun ilk modelinden sonra sırasıyla Uno R2, Uno SMD ve en güncel sürüm olan Uno R3 versiyonları piyasaya sürülmüştür. Genuino markası altında sunulan Genuino Uno modeli de teknik ve donanımsal açıdan Uno R3 ile tamamen aynı özellikleri taşımaktadır (Robotik Sistem, 2019).

Kart üzerinde 14 dijital giriş/çıkış pini yer almakta olup, bu pinlerin 6 tanesi PWM (Pulse Width Modulation) çıkışı olarak programlanabilmektedir. Ayrıca, analog veri okumaya olanak sağlayan 6 analog giriş pini, bir adet 16 MHz kristal osilatör, ICSP başlığı, USB bağlantısı, reset butonu ve 2.1 mm güç jakı gibi temel bileşenler de devreye entegre edilmiştir. Arduino Uno, bu donanımsal özellikleriyle mikrodenetleyici tabanlı sistemlerin geliştirilmesinde temel bir yapı taşı olarak hizmet vermektedir. Kartın çalışması, USB kablosu aracılığıyla bilgisayardan sağlanabildiği gibi, harici bir adaptör ya da pil ile de mümkündür. Şekil 10.'da Arduino Uno 'nun görseli gösterilmektedir.



Şekil 10. Arduino uno

Arduino Uno'nun temel teknik özellikleri aşağıda özetlenmiştir:

- Mikrodenetleyici: ATmega328
- Çalışma Gerilimi: 5V DC
- Tavsiye Edilen Besleme Gerilimi: 7–12V DC
- Maksimum Besleme Gerilim Aralığı: 6–20V
- Dijital Giriş/Çıkış Pin Sayısı: 14 (6 tanesi PWM çıkış desteğine sahiptir)
- Analog Giriş Pin Sayısı: 6
- Giriş/Çıkış Pini Başına Düşen Maksimum DC Akım: 40 mA
- 3.3V Çıkış Pininden Sağlanan Maksimum Akım: 50 mA
- Flash Hafıza: 32 KB (0.5 KB'lık kısmı bootloader için ayrılmıştır)
- SRAM: 2 KB
- EEPROM: 1 KB
- Saat Frekansı: 16 MHz

Bu teknik yapı, Arduino Uno'nun çeşitli sensörlerle entegrasyonunu kolaylaştırmakta ve sistemin çevresel verileri gerçek zamanlı olarak işleyebilmesine olanak tanımaktadır. Dolayısıyla, hava kalitesi ölçümü gibi çevresel izleme uygulamalarında da Arduino Uno güvenilir bir kontrol ve veri işleme birimi olarak kullanılmaktadır.

3.2.2. Arduino nano

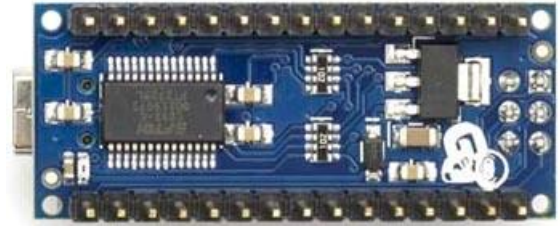
Arduino Nano, küçük boyutları ve tam işlevselliği ile gömülü sistemlerde sıklıkla tercih edilen bir mikrodenetleyici kartıdır. Üzerinde ATmega328 (veya eski versiyonlarda ATmega168) işlemci bulunan bu model, Arduino Duemilanove ile benzer işlevsellik sunsa da daha kompakt yapısıyla özellikle prototipleme çalışmalarında avantaj sağlar (Robotik Sistem, 2019).

Nano modeli, 14 dijital giriş/çıkış pini (6'sı PWM destekli) ve 8 analog giriş pinine sahiptir. 16 MHz kristal osilatörü, zamanlama işlemlerinde yüksek doğruluk sunar. 5V ile çalışan sistem, 7–12V arası harici besleme ile desteklenebilir. Flash belleği 32 KB (ATmega328 için), SRAM 2 KB ve EEPROM 1 KB kapasitesindedir. Boyutları 18×45 mm olup yaklaşık 5 gram ağırlığındadır.

Arduino Nano'nun küçük yapısı, onu taşınabilir hava kalitesi ölçüm sistemleri ve mobil uygulamalarda oldukça kullanışlı hâle getirmektedir. Şekil .11.a ve b'de Arduino nano 'nun ön ve arka yüzü gösterilmektedir.



Şekil 11. a) Arduino Nano V3 ön yüz



b) Arduino Nano V3 arka yüz

3.2.3. NRF24L01 + PA + LNA SMA anten 2.4 GHz kablosuz haberleşme modülü

Nordic Semiconductor tarafından geliştirilen NRF24L01 + PA + LNA, düşük güç tüketimli ve yüksek performanslı bir 2.4 GHz kablosuz haberleşme modülüdür. Hobi elektroniğinden endüstriyel otomasyon sistemlerine kadar geniş bir uygulama alanına sahiptir. Modül, SPI

(Serial Peripheral Interface) protokolü ile mikrodenetleyicilerle kolayca entegre edilebilmektedir (Robocombo, 2025).

Modülün 250 Kbps, 1 Mbps ve 2 Mbps gibi farklı veri iletim hızlarında çalışabilme özelliği, çeşitli uygulamalarda esneklik sağlar. Gelişmiş ShockBurst™ protokolü, veri iletiminde zamanlama ve enerji verimliliği sunar. 1.9–3.6V arasında değişen çalışma voltajına sahip olan bu modül, açık alanda 250 metreye kadar haberleşme sağlayabilir. PA (Power Amplifier) ve LNA (Low Noise Amplifier) destekleriyle donatılmış olan versiyonu, +7 dBm verici çıkış gücü ve ≤ -90 dBm alıcı hassasiyeti ile güçlü ve kararlı bir iletişim performansı sergiler. Boyutlarının yalnızca 15×29 mm olması sayesinde, gömülü sistem projelerine kolaylıkla entegre edilebilir. Bu özellikleriyle NRF24L01, özellikle drone tabanlı çevresel izleme sistemlerinde sensör verilerinin kablosuz aktarımında önemli bir bileşen olarak değerlendirilmektedir. Şekil 12.'de kablosuz haberleşme modülü'nün görseli gösterilmektedir.

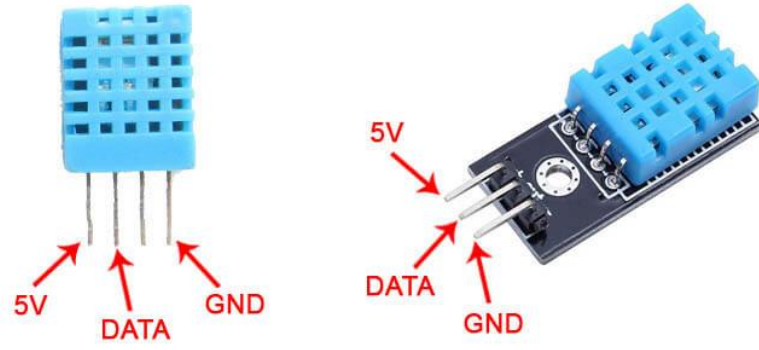


Şekil 12. NRF24L01 2,4GHz RF alıcı-verici modül (harici antenli)

3.2.4. DHT11 sıcaklık ve nem sensörü

DHT11 Sıcaklık ve Nem Sensörü, kalibre edilmiş dijital sinyal çıkışına sahip hibrit bir sıcaklık ve nem sensörüdür. Özel olarak geliştirilmiş olan dijital sinyal toplama tekniğini ve sıcaklık, nem algılama teknolojisini kullanarak, yüksek güvenilirlik ve uzun vadeli mükemmel stabilite sağlar. Bu sensör, dirençli tipte bir nem ölçüm bileşeni ve bir NTC sıcaklık ölçüm bileşeni içerir ve yüksek performanslı 8 bitlik bir mikro denetleyiciye bağlanarak mükemmel kalite, hızlı yanıt, parazit önleme yeteneği ve maliyet etkinliği sunar. Her DHT11 elemanı, nem kalibrasyonunda son derece doğru olan laboratuvarında sıkı bir şekilde kalibre edilir. Kalibrasyon katsayıları, sensörün dahili sinyal algılama işlemi tarafından kullanılan OTP belleğinde depolanır. Sensör 0-50 °C aralığında $\pm 2^{\circ}\text{C}$ hassasiyetle sıcaklık ölçümü ve 20-90%RH

aralığında $\pm 5\%RH$ hassasiyetle nem ölçümü gerçekleştirebilmektedir. Tek hattan oluşan seri haberleşme bağlantısı sistemlere kolay ve hızlı entegrasyon sağlar. Küçük boyutu, düşük güç tüketimi ve 20 metreye kadar sinyal iletimi, onu en zorlu uygulamalar da dahil olmak üzere çeşitli uygulamalarda kullanılabilir hale getiriyor. Sensör bağlantısı 4 pinli tek sıralı 2.54mm'lik pin paketidir Çelik, K., ve Duran, A. (2022). Şekil 13.'te DHT11'in bacak bilgileri verilmiştir.



Şekil 13. DHT11 sıcaklık ve nem sensörü

3.2.5. MQ-135 hava kalite sensörü

MQ-135 sensör; NH₃, NO_x, Alkol Buharı, Benzen, Duman ve CO₂ gazlarının miktarına göre hava kalitesini ölçer. Ölçüm değeri 10 ile 1000ppm arasındadır. Sensör üzerinde +5V, GND, DO (Dijital çıkış) ve AO (Analog çıkış) olmak üzere 4 pin bulunur. Havadaki NH₃, NO_x, Alkol Buharı, Benzen, Duman ve CO₂ gazlarının oranı yükseldikçe analog çıkıştan okunan voltaj yükselir, yani okunan AO voltajı ne kadar yüksekse hava kalitesi o kadar düşüktür. Sensör modülü üzerindeki potansiyometre ile bir eşik değeri ayarlanır. Ölçülen ppm değeri, potansiyometre ile ayarlanan eşik değerinden düşük ise DO çıkışından HIGH (1) okunur. Eşik değeri aşıldığında DO çıkışından LOW (0) sinyali okunur. (Macit, 2020, 18 Ocak). Şekil 14.'te MQ -135 sensörüne ait bacak bilgileri verilmiştir.



Şekil 14. MQ-135 sensörü

3.2.6. MQ-7 sensörü

MQ-7 gaz sensörü ortamdaki karbonmonoksiti algılayabilen bir gaz sensörüdür. Ortamdaki gaz yoğunluğuna göre bir analog çıkış verir. Duman algılama aralığı 300 – 10000 ppm'dir.

Sensör kullanımı kolaylaştırmak adına bir kart üzerine monte edilip modül haline getirilmiştir. 5V ile beslenir. Sensörden hem dijital hem de analog çıkış alınabilir. Böylece hem gaz var-yok şeklinde ya da gazın yoğunluğu tespitleri yapılabilir. Modül arkasında bulunan pot ile hassasiyet ayarı yapılabilir. Arduino, Raspberry Pi ya da diğer mikrokontrolcülerle rahatlıkla kullanılabilir. Motorbit. (2025). Şekil 15.'te MQ-7 sensörüne ait bacak bilgileri verilmiştir.



Şekil 15. MQ-7 sensörü

3.2.7. MQ-131 ozon gaz sensörü

MQ-131 ozon gaz sensörü, LM393 yongası ve MQ-131 gaz sensör probu kullanılarak tasarlanmıştır. Çalışma voltajı DC 5V olan bu sensör, 10-1000 ppm arasında gaz algılama aralığına sahiptir ve boyutları 32mm x 22mm x 24mm (L x W x H)'dir.

Sensör, çift sinyal çıkışı sağlar: bir analog çıkış ve TTL seviyesinde dijital çıkış. TTL çıkışındaki geçerli sinyal, düşük (Low) sinyal olarak ışık verir ve mikrodenetleyici IO portlarına bağlanabilir. Analog çıkış voltajı, ozon gazının konsantrasyonu arttıkça yükselir; yani, konsantrasyon ne kadar yüksekse, voltaj da o kadar yüksek olur.

Bu sensör, ozon gazını yüksek hassasiyetle tespit edebilen bir yapıya sahiptir ve 10 ppm ile 1000 ppm arasındaki aralıkta algılama yapabilir. Uzun ömürlü ve güvenilir özelliklere sahip olan bu sensör, hızlı tepki ve iyileşme yetenekleri sunar. Ayrıca, cihazın montajı kolaylaştıran montaj delikleri bulunur. Arduitrionics. (2025). Şekil 16.'te MQ-131 sensörüne ait bacak bilgileri verilmiştir.



Şekil 16. MQ-131 ozon gaz sensörü

3.2.8. GP2Y1010AU0F sharp optik toz sensörü

GP2Y1010AU0F Sharp Optik Toz Sensörü, sigara dumanı gibi çok ince partiküllü tozların algılanmasında ve hava kirliliği ölçümünde kullanılan hassas bir algılayıcıdır. Sensörün içerisinde yer alan kızılötesi (IR) verici ve fototransistör, ortama yayılan IR ışının toz partiküllerinden yansıyan kısmını ölçerek toz miktarını belirler. Bu yapısı sayesinde sadece toz varlığını değil, aynı zamanda duman ve ev tozu gibi farklı partikül türleri arasındaki farkı da algılayabilir.

Cihaz, 150 ohm'lık bir direnç ve 220 μ F'lık bir kondansatörle birlikte kullanılabilir ve Arduino başta olmak üzere pek çok mikrodenetleyici ile uyumlu şekilde çalıştırılabilir. Kompakt yapısı sayesinde (46.0 x 30.0 x 17.6 mm boyutlarında), yer sınırlaması olan projelerde kolaylıkla entegre edilebilir. Maksimum 20 mA'lık düşük akım tüketimi ile enerji verimliliği de sağlar. Tozun varlığı, fotometrik ölçüm yoluyla tek bir pals ile tespit edilebilmektedir.

Sensör, kurşunsuz üretim ve çevre dostu yaklaşımı benimseyen RoHS yönergelerine uyumludur. Minimum algılanabilir partikül boyutu 0.8 mikrometre, ağırlığı 15 gramdır. Temiz hava ortamında verdiği referans gerilim 0.9V seviyesindedir ve 5V DC besleme gerilimiyle çalışmaktadır. Direnc.net. (2024). Şekil 17.'de GP2Y1010AU0F Sharp optik toz sensörüne ait görsel verilmiştir.



Şekil 17. GP2Y1010AU0F sharp optik toz sensörü

3.2.9. Sensör koruma kubbesi

Çevresel etmenlerin (UV ışınımı, yağış, rüzgâr, toz partikülleri vb.) sensör ölçümleri üzerindeki olası etkilerini en aza indirmek amacıyla, İHA platformu üzerine entegre edilen sensör modülünü fiziksel olarak koruyacak bir yapı tasarlanmıştır. Bu kapsamda, sensör performansını etkilemeyecek biçimde hava geçirgenliğini sağlayan açıklıklara sahip, aerodinamik özellikte bir kubbe modeli oluşturulmuştur.

Koruma yapısı, bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımı ile modellenmiş ve üç boyutlu yazıcı (3D printer) kullanılarak polilaktik asit (PLA) malzemeden üretilmiştir. Kubbenin hafifliği, uçuş performansına olumsuz bir etkide bulunmadan sensörlerin dış ortam koşullarından izole

edilmesini mümkün kılmış; veri güvenilirliği ve sistem bütünlüğü artırılmıştır. Şekil 18.'de sensör koruma kubbesine ait görsel verilmiştir.



Şekil 18. Sensör koruma kubbesi

3.2.10. 100 Mikrofarad (μF) kondansatör

100 mikrofarad (μF) kondansatörler, genellikle düşük frekanslı filtreleme, enerji depolama ve gerilim düzenleme gibi uygulamalarda kullanılan elektrolitik tip pasif bileşenlerdir. Bu kondansatörler, özellikle güç kaynakları, ses amplifikatörleri ve motor kontrol devrelerinde yaygın olarak tercih edilir. Kapasite değeri 100 μF olan bu kondansatörler, genellikle $\pm 20\%$ toleransla üretilir ve 16V ile 500V arasında değişen gerilim değerlerine sahip olabilirler. Elektrolitik kondansatörler, kutupludur ve doğru polariteyle bağlanmaları önemlidir. AnyPCBA. (2025). Şekil 19.'da 100 mikrofarad (μF) kondansatör örneği gösterilmektedir.

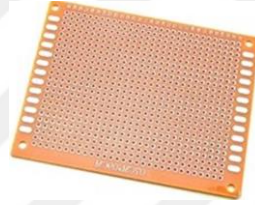


Şekil 19. 100 mikrofarad (μF) kondansatör

3.2.11. Delikli bakır plaketa

Delikli bakır plaketa, genellikle elektronik devrelerin montajında kullanılan, üzerinde küçük delikler bulunan bakır levha malzemedir. Bu plakalar, devre elemanlarının yerleştirilip lehimlendiği ve bağlantıların yapıldığı yüzey olarak kullanılır. Elektronik devrelerin prototip aşamasında yaygın olarak tercih edilir, çünkü devre elemanları kolayca yerleştirilebilir ve bağlantılar hızlıca yapılabilir.

Delikli bakır plakaların kullanımı özellikle hobilerde ve prototipleme süreçlerinde yaygındır. Bu plakalar, aynı zamanda eğitim amaçlı elektronik çalışmalarında da tercih edilmektedir. Bakır, iletkenliği yüksek bir malzeme olduğu için elektriksel bağlantıların sağlıklı ve verimli olmasını sağlar. (Yazar, 2025). şekil 20.'de delikli bakır plaketa örneği gösterilmektedir.



şekil 20. Delikli bakır plaketa

3.2.12. Verici devresi

Bu çalışmada kullanılan verici devresi, hava kalitesi izleme sisteminin temel bileşeni olarak çevresel sensörlerden alınan verilerin kablosuz olarak alıcı birime iletilmesini sağlar. Verici birimi, Arduino Uno mikrodeneleyici kartı üzerine inşa edilmiş olup, sistemin temel kontrol ve veri toplama görevlerini yürütmektedir. Arduino Uno'nun ATmega328 mikrodeneleyicisi, hem sensör verilerini okumaya hem de bu verileri işleyerek kablosuz iletişim modülüne aktarmaya olanak tanıyan yeterli işlem gücüne ve giriş/çıkış portlarına sahiptir (Arduino, 2024). Verici devresinde yer alan sensörler, atmosferik koşulların ve hava kirleticilerinin ölçümünü gerçekleştirmek üzere seçilmiştir. Bu sensörler arasında DHT11 (sıcaklık ve nem), MQ-7 (karbonmonoksit), MQ-135 (genel hava kalitesi ve NO₂), MQ-131 (ozon) ve GP2Y1010AU0F gibi bir toz sensörü yer almaktadır. Sensörlerden alınan analog ve dijital sinyaller, Arduino Uno tarafından işlenmekte ve belirli aralıklarla iletme hazır hâle getirilmektedir.

Kablosuz haberleşme, düşük enerji tüketimi ve yüksek veri aktarım hızı sağlayan NRF24L01 + PA + LNA modülü aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Bu modül, 2.4 GHz frekans bandında çalışmakta olup, açık alanda 250 metreye kadar veri iletimi gerçekleştirebilmekte ve SPI protokolüyle Arduino Uno'ya bağlanmaktadır (Robocombo, 2025). Modülün sahip olduğu PA (Power Amplifier) ve LNA (Low Noise Amplifier) özellikleri, sinyalin uzak mesafelerde bile kararlı şekilde iletilmesine olanak tanımaktadır.

Devre, 7.4V Li-Po batarya ile beslenmekte olup, Arduino Uno'nun üzerinde bulunan voltaj regülatörü aracılığıyla gerekli 5V gerilim elde edilmektedir. NRF24L01 modülü ise 3.3V ile çalıştığından, enerji dönüşümü sırasında dikkatli regülasyon sağlanmış ve voltaj düşürücü elemanlar kullanılmıştır. Ayrıca devrede, parazitleri azaltmak ve sensörlerin kararlı çalışmasını sağlamak amacıyla kondansatörler kullanılmıştır.

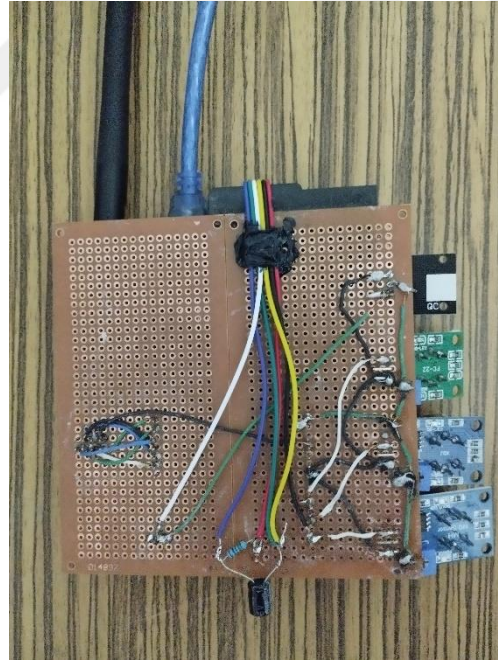
Sistemin düşük enerji tüketimi hedeflenmiş ve ölçümler belirli periyotlarla yapılacak şekilde yazılım tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu sayede, sistem hem uçuş esnasında hem de sabit ölçümlerde enerji tasarrufu sağlayarak uzun süreli saha kullanımlarına uygun hâle getirilmiştir. Verici devresinden iletilen veriler, yer istasyonundaki alıcı modül tarafından alınarak Microsoft Excel programında tablo, grafik ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ortamında haritalama için kullanıma hazır hâle getirilmektedir.

Tablo 1. Verici devresi malzeme listesi

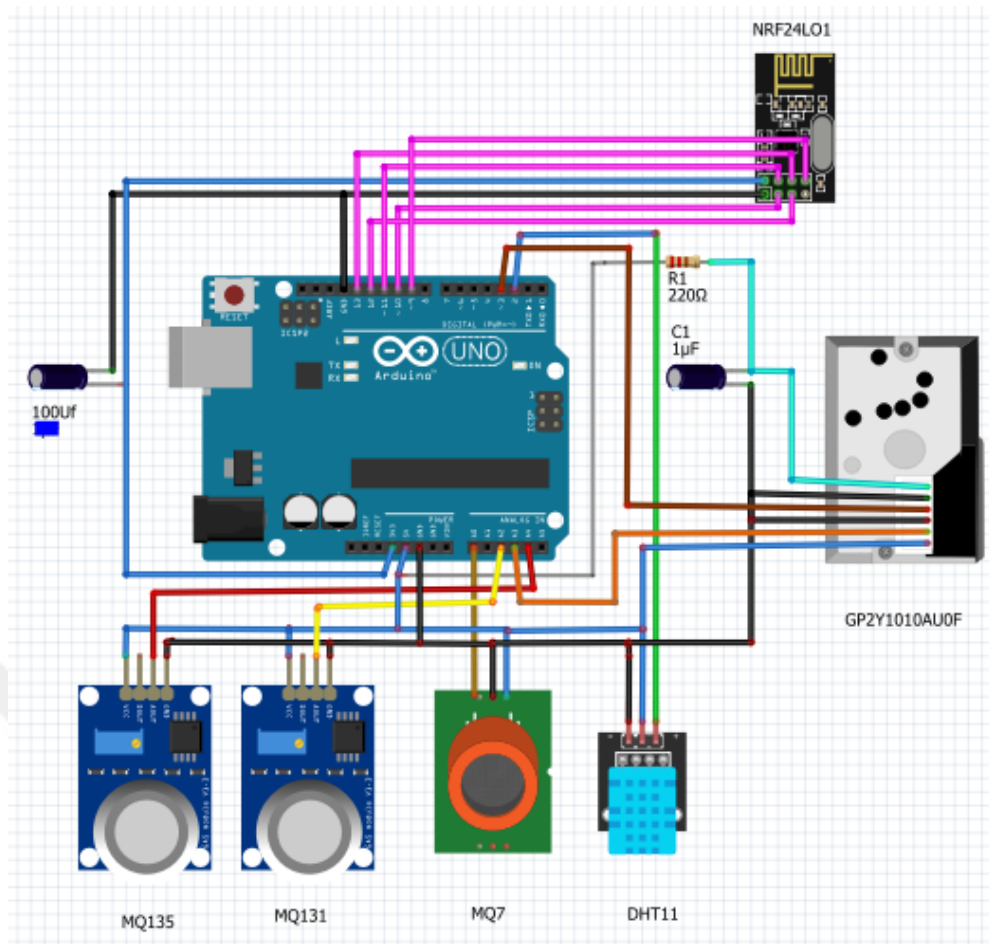
Sıra No	Malzeme Adı	Adet
1	Arduino Uno	1
2	NRF24L01 + PA + LNA Modülü	1
3	DHT11 Sıcaklık ve Nem Sensörü	1
4	MQ-7 Karbonmonoksit Sensörü	1
5	MQ-135 Hava Kalitesi Sensörü	1
6	MQ-131 Ozon Sensörü	1
7	GP2Y1010AU0F Toz Sensörü	1
8	100 µF Kondansatör	1
9	Delikli Bakır Plaket	1
10	220 ohm Direnç	1
11	Bağlantı Kabloları	20



Şekil 21. Verici devresi ön yüzü



Şekil 22. Verici devresi arka yüzü



Şekil 23. Verici devresi şeması

3.2.13. Alıcı devresi

Bu çalışmada geliştirilen hava kalitesi izleme sisteminin ikinci temel bileşeni olan alıcı devresi, verici birimden gelen çevresel verilerin kablosuz olarak alınmasını, değerlendirilmesini ve ileri analiz veya görselleştirme sistemlerine aktarılmasını sağlamaktadır. Alıcı devresi, hafif ve modüler yapısıyla taşınabilir sistemlere entegre edilmek üzere tasarlanmıştır.

Alıcı devrenin merkezinde Arduino Nano mikrodenetleyici kartı yer almaktadır. Bu kart, ATmega328 mikrodenetleyicisine sahip olup, küçük boyutları sayesinde prototip devrelerin lehimlenmesinde sıklıkla tercih edilmektedir (Robotik Sistem, 2019). Arduino Nano, SPI haberleşme protokolüyle çalışan NRF24L01 + PA + LNA modülü üzerinden kablosuz veri alımını gerçekleştirmektedir. Bu modül, 2.4 GHz frekansında çalışmakta olup, verici birim ile eşleştirildiğinde düşük güç tüketimiyle uzun mesafeli veri aktarımı sunmaktadır (Robocombo, 2025).

Devre tasarımı bakır plaket (PCB) üzerine gerçekleştirilmiştir. Bu sayede hem devre elemanlarının sabitlenmesi hem de bağlantıların düzenli biçimde yapılması sağlanmıştır. Bakır plaketin yüzeyine lehimleme işlemleriyle tüm bileşenler sağlam ve kararlı biçimde yerleştirilmiştir. Böylelikle, devrenin hem elektromanyetik gürültüye karşı dayanıklılığı artırılmış hem de uzun süreli kullanımda bağlantı kopmaları gibi riskler azaltılmıştır.

NRF24L01 modülünün kararlı çalışması için 10 μ F değerinde bir bypass kondansatör kullanılmıştır. Bu kondansatör, özellikle ani akım değişimlerinin ve voltaj dalgalanmalarının önlenmesinde kritik rol oynamaktadır. Modülün 3.3V ile çalışması nedeniyle, Arduino Nano'nun 3.3V çıkışından doğrudan beslenmiş, ancak gerilim dengesizliği riskine karşı ilave stabilizasyon sağlanmıştır (Rizwan vd., 2021).

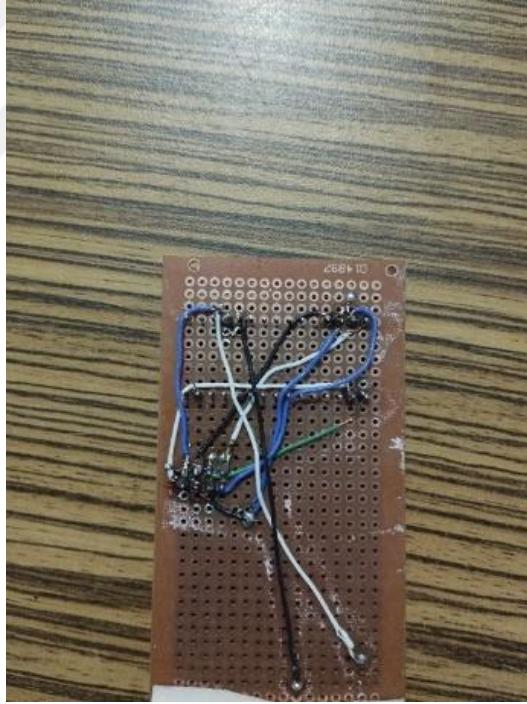
Devreye, kullanıcı tarafından manuel veri alımı amacıyla kullanılmak üzere bir buton eklenmiştir. Bu buton, Arduino Nano'nun dijital pinlerinden birine bağlanarak yazılım aracılığıyla kontrol edilebilir hâle getirilmiştir. Alıcı devreden elde edilen veriler, seri port üzerinden bir bilgisayar sistemine aktarılmakta, böylece anlık hava kalitesi verilerinin izlenmesi ve daha sonra tablo, grafik ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ortamında haritalama için Microsoft Excel programına aktarılması mümkün hâle gelmektedir. Geliştirilen bu yapı, taşınabilirlik, düşük maliyet ve işlevsellik açısından hava kalitesi izleme uygulamaları için oldukça uygundur.

Tablo 2. Alıcı devresi malzeme listesi

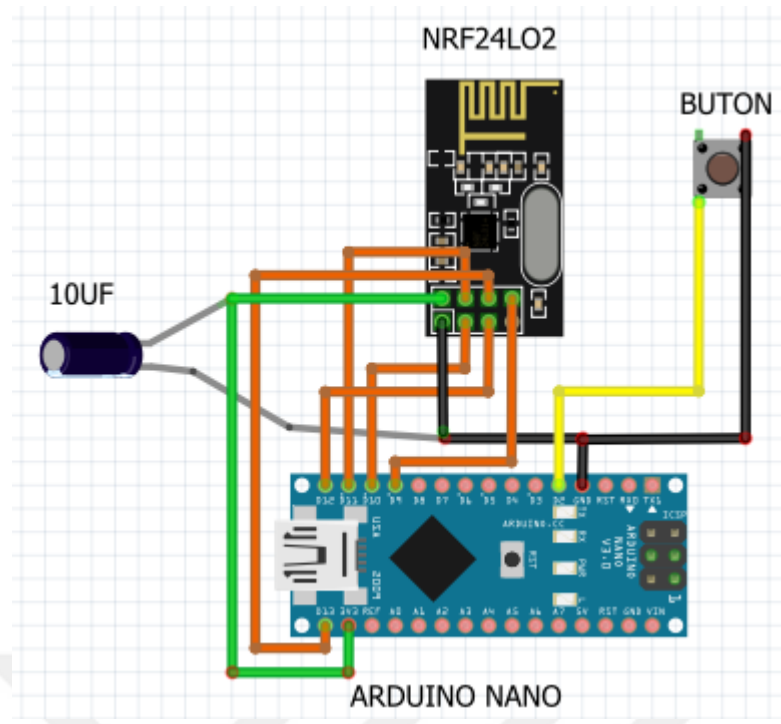
No	Malzeme Adı	Adet
1	Arduino Nano	1
2	NRF24L01 + PA + LNA SMA Antenli Modül	1
3	100 μ F Kondansatör	1
4	Bağlantı Kablosu	10
5	Delikli Bakır Plaket	1



Şekil 24. Alıcı devresi ön yüzü



Şekil 25. Alıcı devresi arka yüzü



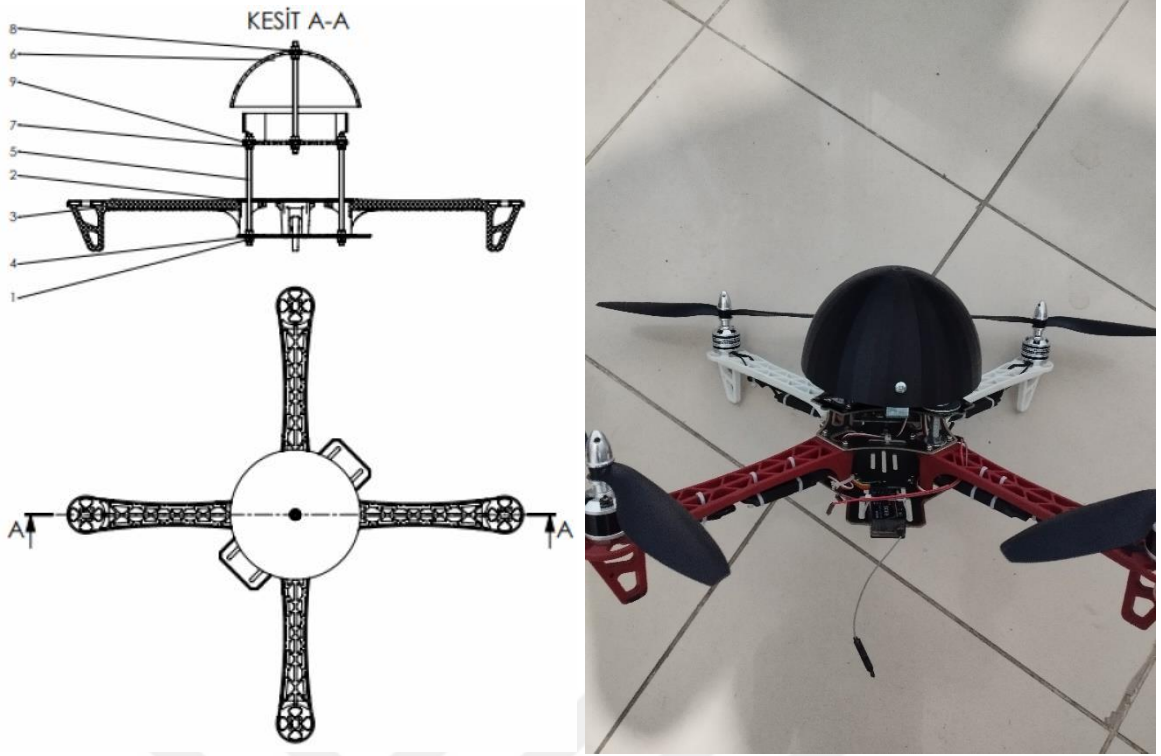
Şekil 26. Alıcı devresi şeması

3.3. Yazılım ve Entegrasyon Süreci

İHA sisteminin yazılım altyapısı, Arduino IDE üzerinde geliştirilen C/C++ tabanlı kodlarla yapılandırılmıştır. Verici devresinde sensör verilerinin okunması, dönüştürülmesi ve kablosuz iletişim protokolü ile gönderilmesi işlemleri gerçekleştirilmiştir. Alıcı devresinde ise gelen veriler gerçek zamanlı olarak Microsoft Excel programı üzerinden kullanıcıya sunulmaktadır. Sensörlerin kalibrasyon verileri ve dönüştürme katsayıları yazılım içerisinde tanımlanmış, böylece ölçümlerin güvenilirliği sağlanmıştır.

3.4. Veri Toplama Süreci

Veri toplama süreci, belirlenen coğrafi alanlarda yapılan planlı uçuşlar sırasında gerçekleştirilmiştir. Her uçuşta İHA, önceden belirlenmiş rotalar doğrultusunda hareket ederek çevresel sensörlerle eş zamanlı veri kaydı yapmıştır. Elde edilen ölçümler sıcaklık, nem, karbonmonoksit, hava kalitesi, ozon ve partikül madde düzeylerine ilişkin zamansal ve mekânsal bilgiler içermektedir. Toplanan veriler anlık olarak alıcı birim aracılığıyla bilgisayara aktarılmıştır.



Şekil 27. Drone montajı

3.5. Tablo, Grafik ve Haritalama Süreci

Bu çalışmada, çevresel verilerin görselleştirilmesi ve analitik süreçleri için Microsoft Excel yazılımı platformu tercih edilmiştir. Saha gözlemlerine ilişkin coğrafi referans bilgileri, sisteme manüel olarak entegre edilmiştir. Ölçüm noktaları, arazi çalışmaları esnasında tespit edilen lokasyonlara göre ilgili mahalle adları ile tanımlanmış ve her bir noktaya ait zamansal sensör verileri tablosal bir formatta sistematik olarak düzenlenmiştir.

Veri seti, Excel üzerinde yapılandırılan tablolar aracılığıyla sınıflandırılmış; sıcaklık, nem, karbonmonoksit, hava kalitesi, ozon ve partikül madde gibi parametreler ölçüm noktalarına göre ayrıntılı şekilde kaydedilmiştir. Ardından, bu verilere dayalı olarak istatistiksel dağılımları yansıtan grafikler oluşturulmuştur. Haritalama süreci, Microsoft Excel yazılımının Bing Haritalar eklentisi entegrasyonu vasıtasıyla gerçekleştirilerek yaklaşık bir mekânsal dağılım düzeni oluşturulmuştur. Her bir ölçüm noktası, tablolarda kayıtlı olan coğrafi konum verileri esas alınarak görsel harita şeması üzerine konumlandırılmış ve ilgili sensör parametre değerleri bu şema üzerinde etiketlenerek sunulmuştur. Bu yöntem sayesinde, özel bir Coğrafi Bilgi

Sistemleri (CBS) yazılımına ihtiyaç duyulmaksızın, mekânsal farklılıkların ve kirlilik yoğunluklarının görsel olarak analiz edilmesi mümkün kılınmıştır.

3.6. Veri Analizi

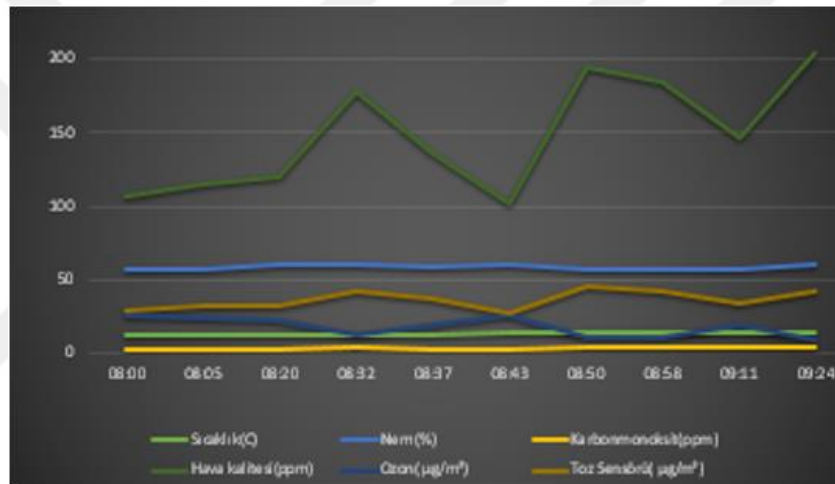
Bu çalışmada elde edilen hava kalitesi verilerinin analizinde, öncelikle her bir ölçüm noktası için farklı zaman dilimlerinde (sabah, öğle, akşam) ve üç gün boyunca kaydedilen değerler ayrı ayrı incelenmiştir. Hava kalitesi parametrelerinin (sıcaklık, nem, CO, hava kalitesi indeksi, O₃, PM_{2.5}) en yüksek ve en düşük değerleri belirlenerek, incelenen zaman aralıklarında hava kalitesinin hangi konumlarda daha iyi veya daha kötü olduğu tespit edilmeye çalışılmıştır.

Mekânsal değerlendirme aşamasında ise, Microsoft Excel'in Bing Haritalar eklentisi kullanılarak her bir ölçüm noktasının coğrafi konumu işaretlenmiş ve bu noktalara ait en yüksek ve en düşük hava kalitesi parametre değerleri görsel olarak harita üzerinde belirtilmiştir. Bu sayede, incelenen üç gün boyunca ve farklı zaman dilimlerinde hava kalitesinin mekânsal dağılımı ve en kritik (en kötü) ile en iyi hava kalitesine sahip bölgeler basit bir görsel analizle ortaya konulmaya çalışılmıştır. Bu temel analiz, İHA destekli veri toplama sisteminin, hava kalitesindeki mekânsal ve zamansal değişimlerin ilk düzeyde anlaşılması ve sunulmasındaki potansiyelini göstermeyi amaçlamaktadır.

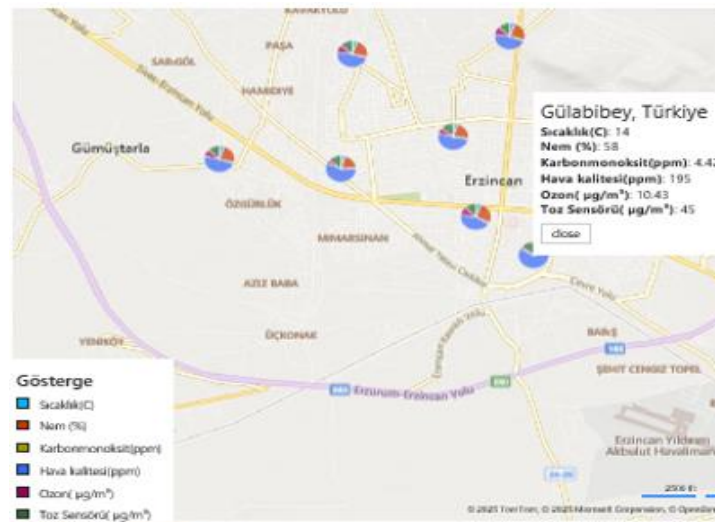
4. BULGULAR

Tablo 3. 1.gün sabah (08:00–09:30) ölçüm sonuçları tablosu

Zaman	Konum	Sıcaklık (C)	Nem (%)	Karbonmonoksit (ppm)	Hava kalitesi (ppm)	Ozon (µg/m³)	Toz Sensörü (µg/m³)
08:00	Erzincan Kurutelek mah.	13	57	3,14	107	25,17	30
08:05	Erzincan Demirkent mah.	13	57	3,25	115	23,79	33
08:20	Erzincan Ulalar mah.	13	60	3,32	120	22,96	32
08:32	Erzincan Ergenekon mah.	13	60	4,05	178	13,18	43
08:37	Erzincan Arslanlı mah.	13	59	3,65	137	20,12	37
08:43	Erzincan Kızılay mah.	14	61	3,05	102	25,95	28
08:50	Erzincan Gülabbey mah.	14	58	4,42	195	10,43	45
08:58	Erzincan Barbaros mah.	14	57	4,15	185	11,11	42
09:11	Erzincan Fatih mah.	14	58	3,78	146	18,56	35
09:24	Erzincan 6.sokak sanayi mah.	14	60	4,35	205	10,02	42



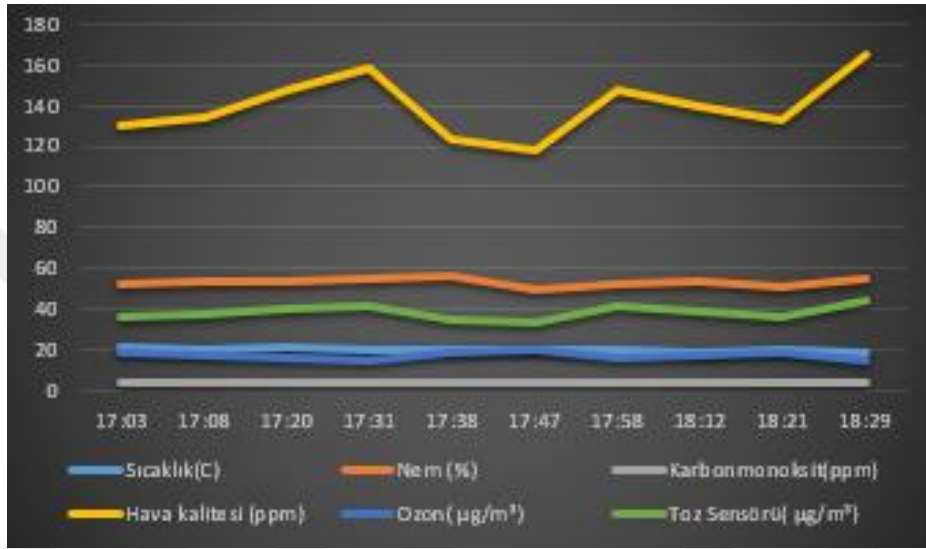
Şekil 28. 1.gün sabah (08:00–09:30) ölçüm sonuçları grafiği



Şekil 29. 1.gün sabah (08:00–09:30) ölçüm sonuçları haritası

Tablo 4. 1.gün öğle (12.00–13.30) ölçüm sonuçları tablosu

Zaman	Konum	Sıcaklık (C)	Nem (%)	Karbonmonoksit (ppm)	Hava kalitesi (ppm)	Ozon (µg/m³)	Toz Sensörü (g/m³)
12:01	Erzincan Kurutelek mah.	21	48	3,95	132	17,82	38
12:06	Erzincan Demirkent mah.	22	47	4,11	140	16,7	39
12:22	Erzincan Ulalar mah.	22	50	4,28	153	15,92	41
12:35	Erzincan Ergenekon mah.	21	52	4,52	170	14	43
12:42	Erzincan Arslanlı mah.	22	49	3,88	126	18,1	36
12:47	Erzincan Kızılay mah.	23	46	3,7	120	19,22	34
12:52	Erzincan Gülabibey mah.	22	50	4,39	162	14,88	44
13:01	Erzincan Barbaros mah.	22	49	4,1	149	15,91	42
13:10	Erzincan Fatih mah.	23	47	3,82	138	17,35	37
13:27	Erzincan 6.sokak sanayi mah.	23	51	4,4	175	13,7	45



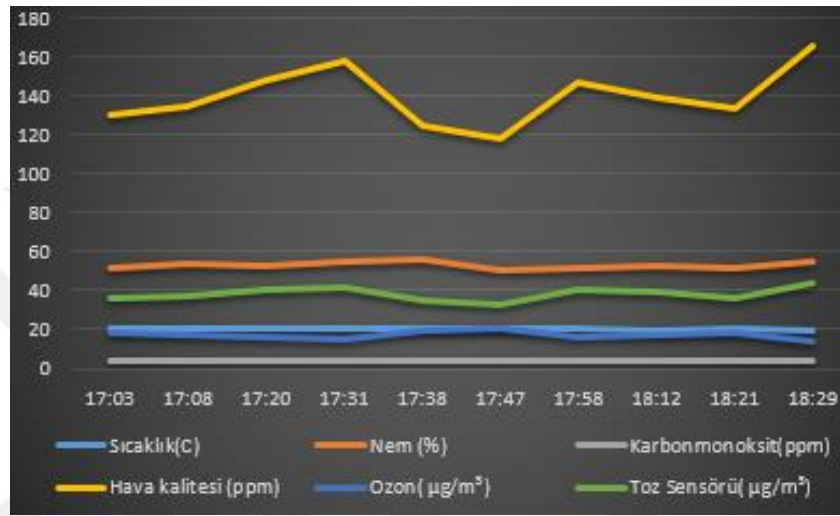
Şekil 30. 1.gün öğle (12.00–13.30) ölçüm sonuçları grafiği



Şekil 31. 1. öğle (12.00–13.30) ölçüm sonuçları haritası

Tablo 5. 1.gün akşam (17.00–18:30) ölçüm sonuçları tablosu

Zaman	Konum	Sıcaklık(C)	Nem (%)	Karbonmonoksit (ppm)	Hava kalitesi (ppm)	Ozon ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Toz Sensörü ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
17:03	Erzincan Kurutelek mah.	21	52	3,85	130	18,24	36
17:08	Erzincan Demirkent mah.	20	54	3,91	134	17,6	37
17:20	Erzincan Ulalar mah.	21	53	4,15	148	16,12	40
17:31	Erzincan Ergenekon mah.	20	55	4,25	158	15,22	42
17:38	Erzincan Arslanlı mah.	20	56	3,77	124	18,99	35
17:47	Erzincan Kızılay mah.	20	50	3,69	118	20,01	33
17:58	Erzincan Gülabibey mah.	20	52	4,1	147	16,5	41
18:12	Erzincan Barbaros mah.	19	53	3,95	139	17,41	39
18:21	Erzincan Fatih mah.	20	51	3,82	133	18,01	36
18:29	Erzincan 6.sokak sanayi mah.	19	55	4,3	165	14,15	44



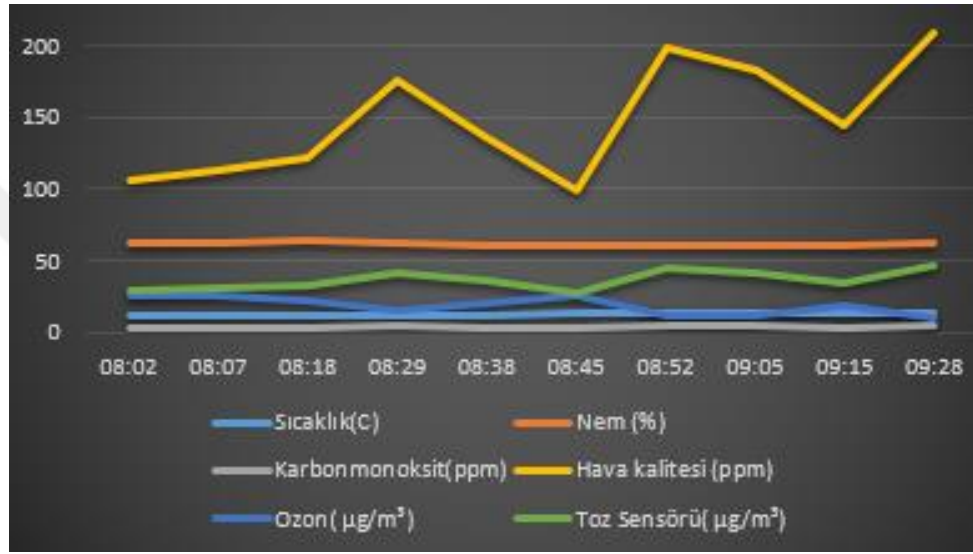
Şekil 32.1.gün akşam (17.00–18:30) ölçüm sonuçları grafiği



Şekil 33. 1.gün akşam (17.00–18:30) ölçüm sonuçları haritası

Tablo 6. 2.gün sabah (08:00–09:30) ölçüm sonuçları tablosu

Zaman	Konum	Sıcaklık (C)	Nem (%)	Karbonmonoksit (ppm)	Hava kalitesi (ppm)	Ozon ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Toz Sensörü ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
08:02	Erzincan Kurutelek mah.	12	62	3,12	106	25,9	29
08:07	Erzincan Demirkent mah.	12	63	3,22	112	24,76	31
08:18	Erzincan Ulalar mah.	12	64	3,4	122	22,95	33
08:29	Erzincan Ergenekon mah.	12	63	4	175	14,32	42
08:38	Erzincan Arslanlı mah.	12	61	3,62	135	20,89	36
08:45	Erzincan Kızılay mah.	13	60	3,01	99	26,43	27
08:52	Erzincan Gülabibey mah.	13	60	4,3	198	10,8	44
09:05	Erzincan Barbaros mah.	13	61	4,1	182	12,13	41
09:15	Erzincan Fatih mah.	13	60	3,77	144	18,92	34
09:28	Erzincan 6.sokak sanayi mah.	13	62	4,42	208	9,9	46



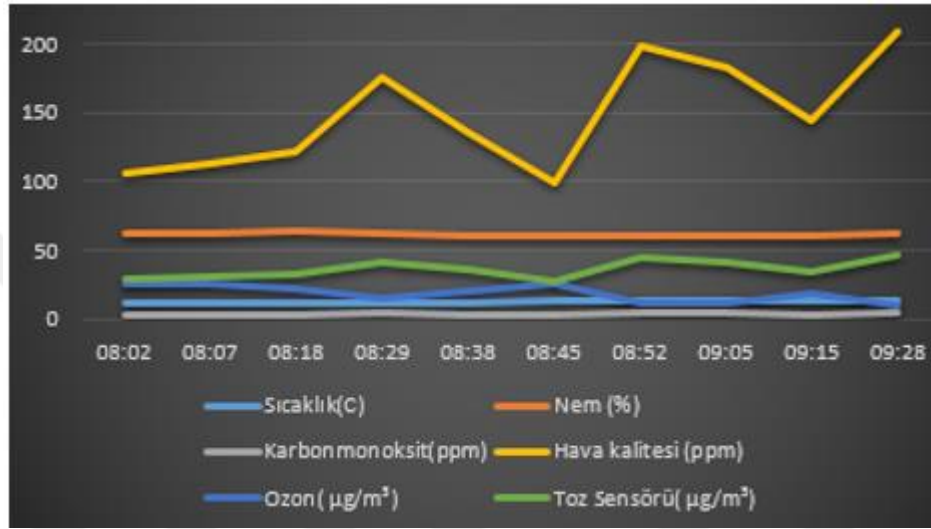
Şekil 34. 2.gün sabah (08:00–09:30) ölçüm sonuçları grafiği



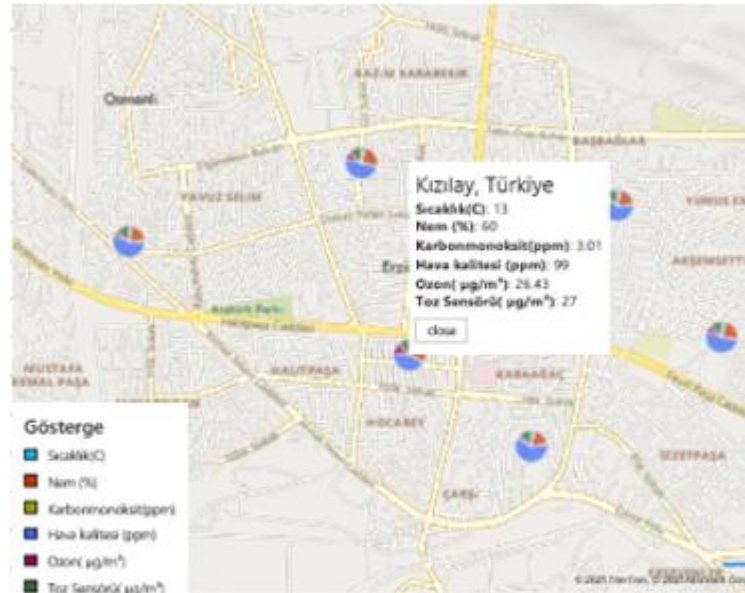
Şekil 35. 2.gün sabah (08:00–09:30) ölçüm sonuçları haritası

Tablo 7. 2. gün ögle (12.00–13.30) ölçüm sonuçları tablosu

Zaman	Konum	Sıcaklık (C)	Nem (%)	Karbonmonoksit (ppm)	Hava kalitesi (ppm)	Ozon (µg/m³)	Toz Sensörü(µg/m³)
12:00	Erzincan Kurutelek mah.	24	46	4	135	17,1	38
12:06	Erzincan Demirkent mah.	24	45	4,12	142	16,05	39
12:19	Erzincan Ulalar mah.	24	47	4,25	155	14,8	41
12:27	Erzincan Ergenekon mah.	24	49	4,5	172	12,92	43
12:34	Erzincan Arslanlı mah.	25	48	3,9	130	17,88	36
12:44	Erzincan Kızılay mah.	25	44	3,65	118	19,96	34
12:53	Erzincan Gülabibey mah.	24	47	4,4	166	14,1	45
13:08	Erzincan Barbaros mah.	24	46	4,2	152	15,3	42
13:21	Erzincan Fatih mah.	25	45	3,85	137	17,22	37
13:29	Erzincan 6.sokak sanayi mah.	25	48	4,38	178	11,85	46



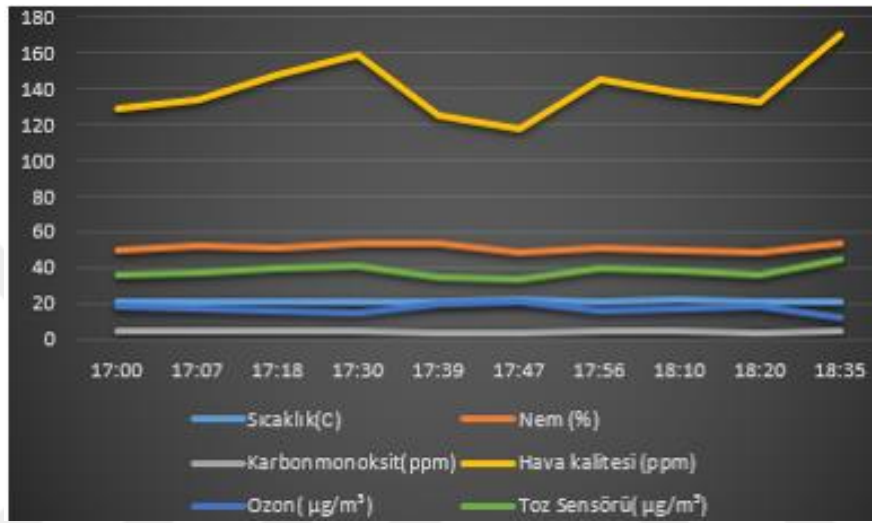
Şekil 36. 2.gün ögle (12.00–13.30) ölçüm sonuçları grafiği



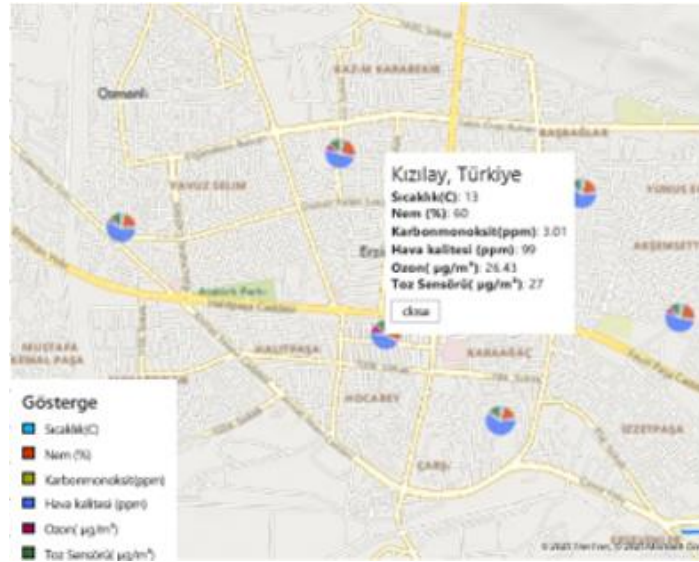
Şekil 37. 2. Gün ögle (12.00–13.30) ölçüm sonuçları haritası

Tablo 8. 2. gün akşam (17.00–18:30) ölçüm sonuçları tablosu

Zaman	Konum	Sıcaklık (C)	Nem (%)	Karbonmonoksit (ppm)	Hava kalitesi (ppm)	Ozon (µg/m³)	Toz Sensörü (µg/m³)
17:00	Erzincan Kurutelek mah.	21	50	3,88	128	18,14	36
17:07	Erzincan Demirkent mah.	21	52	4	134	17,01	37
17:18	Erzincan Ulalar mah.	21	51	4,18	148	15,61	39
17:30	Erzincan Ergenekon mah.	21	53	4,3	159	14,1	41
17:39	Erzincan Arslanlı mah.	21	54	3,72	125	19,4	35
17:47	Erzincan Kızılay mah.	22	49	3,66	117	20,6	33
17:56	Erzincan Gülabibey mah.	21	51	4,12	145	16,33	40
18:10	Erzincan Barbaros mah.	22	50	4,05	138	17,21	38
18:20	Erzincan Fatih mah.	21	49	3,79	132	18	36
18:35	Erzincan 6.sokak sanayi mah.	21	53	4,36	170	12,3	45



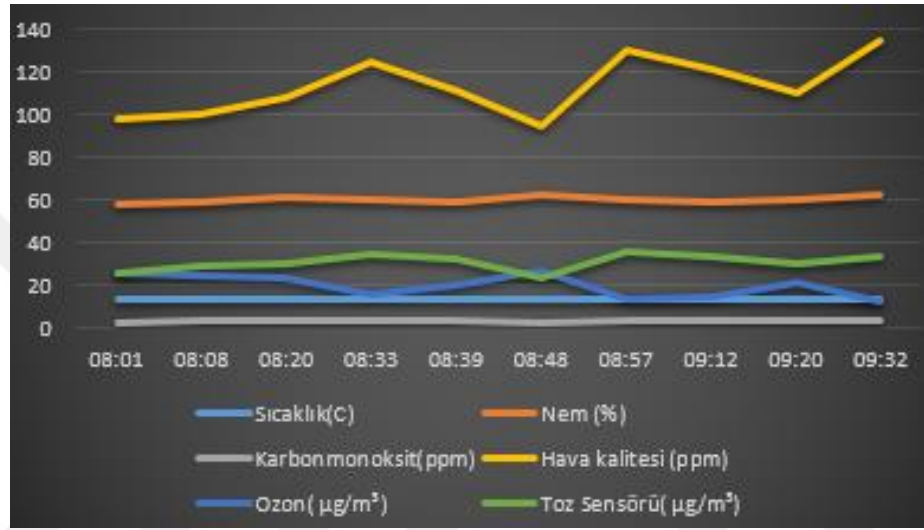
Şekil 39. 2. gün akşam (17.00–18:30) ölçüm sonuçları grafiği



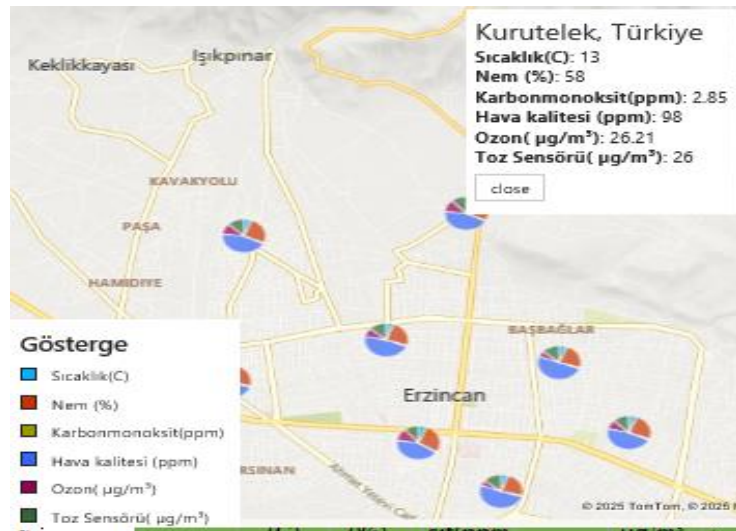
Şekil 40. 2. gün akşam (17.00–18:30) ölçüm sonuçları haritası

Tablo 9. 3. gün sabah (08:00–09:30) ölçüm sonuçları tablosu

Zaman	Konum	Sıcaklık (C)	Nem (%)	Karbonmonoksit (ppm)	Hava kalitesi (ppm)	Ozon (µg/m³)	Toz Sensörü (µg/m³)
08:01	Erzincan Kurutelek mah.	13	58	2,85	98	26,21	26
08:08	Erzincan Demirkent mah.	13	59	2,9	100	24,78	29
08:20	Erzincan Ulalar mah.	13	61	3,02	108	23,32	30
08:33	Erzincan Ergenekon mah.	13	60	3,45	125	15,78	35
08:39	Erzincan Arslanlı mah.	13	59	3,2	112	20,45	32
08:48	Erzincan Kızılay mah.	14	62	2,75	95	27,14	24
08:57	Erzincan Gülabibey mah.	14	60	3,6	130	13,67	36
09:12	Erzincan Barbaros mah.	14	59	3,48	122	14,12	33
09:20	Erzincan Fatih mah.	14	60	3,15	110	21,27	30
09:32	Erzincan 6.sokak sanayi mah.	14	62	3,7	135	12,85	34



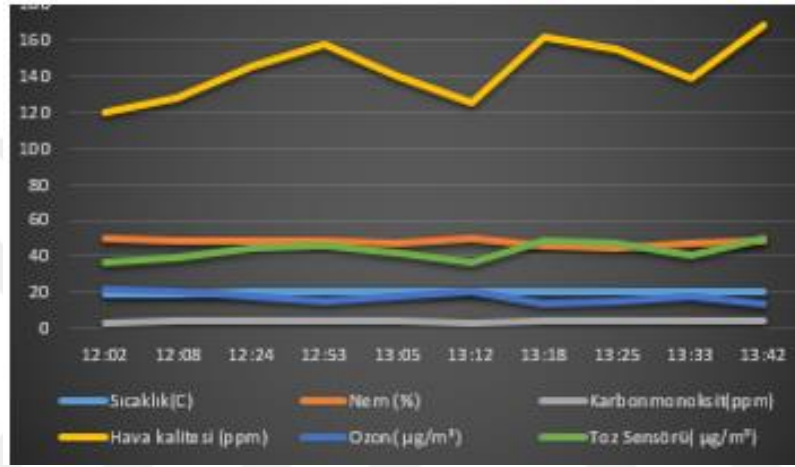
Şekil 42. 3. gün sabah (08:00–09:30) ölçüm sonuçları grafiği



Şekil 43. 3.gün sabah (08:00–09:30) ölçüm sonuçları haritası

Tablo 10. 3. gün öğle (12.00–13:30) ölçüm sonuçları tablosu

Zaman	Konum	Sıcaklık (C)	Nem (%)	Karbonmonoksit (ppm)	Hava kalitesi (ppm)	Ozon ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Toz Sensörü ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
12:02	Erzincan Kurutelek mah.	19	50	3,6	120	22,34	37
12:08	Erzincan Demirkent mah.	19	48	3,78	128	21,05	39
12:24	Erzincan Ulalar mah.	20	49	4,12	145	18,02	44
12:53	Erzincan Ergenekon mah.	20	48	4,38	158	14,87	46
13:05	Erzincan Arslanlı mah.	20	47	4,01	140	17,1	42
13:12	Erzincan Kızılay mah.	20	50	3,55	125	20,48	36
13:18	Erzincan Gülabibey mah.	21	46	4,45	162	13,92	49
13:25	Erzincan Barbaros mah.	21	45	4,32	155	15,28	47
13:33	Erzincan Fatih mah.	21	47	3,9	138	17,86	40
13:42	Erzincan 6.sokak sanayi mah.	21	48	4,5	168	13,1	50



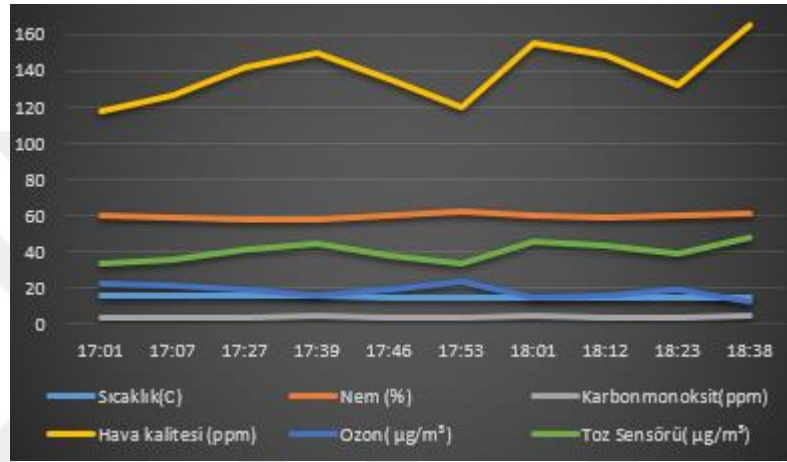
Şekil 44. 3. gün öğle (12.00–13:30) ölçüm sonuçları grafiği



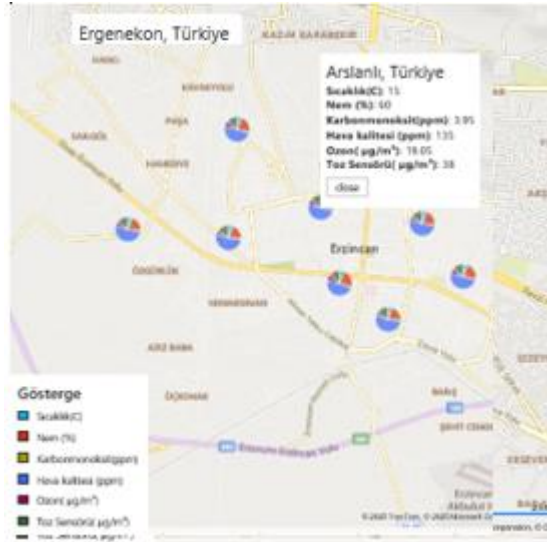
Şekil 45. 3. Gün öğle (12.00–13:30) ölçüm sonuçları haritası

Tablo 11. 3. gün akşam (17.00–18:30) ölçüm sonuçları tablosu

Zaman	Konum	Sıcaklık (C)	Nem (%)	Karbonmonoksit (ppm)	Hava kalitesi (ppm)	Ozon ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Toz Sensörü ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
17:01	Erzincan Kurutelek mah.	16	60	3,5	118	22,95	34
17:07	Erzincan Demirkent mah.	16	59	3,68	126	21,1	36
17:27	Erzincan Ulalar mah.	16	58	4,02	142	18,6	41
17:39	Erzincan Ergenekon mah.	16	58	4,25	150	15,9	44
17:46	Erzincan Arslanlı mah.	15	60	3,95	135	19,05	38
17:53	Erzincan Kızılay mah.	15	62	3,4	120	23,32	33
18:01	Erzincan Gülabibey mah.	15	60	4,38	155	14,42	46
18:12	Erzincan Barbaros mah.	15	59	4,12	148	16	43
18:23	Erzincan Fatih mah.	15	60	3,85	132	18,78	39
18:38	Erzincan 6.sokak sanayi mah.	15	61	4,5	165	12,9	48



Şekil 46. 3. gün akşam (17.00–18:30) ölçüm sonuçları grafiği



Şekil 47. 3. gün akşam (17.00–18:30) ölçüm sonuçları haritası

Tablo 12. Hava Kalitesi Sensör Verileri ve Ulusal Referans Değer Aralıkları

Parametre	Birim	Düşük Düze (İyi)	Orta Düze (Orta)	Yüksek Düze (Kötü)	Çok Yüksek (Sağlıksız ve Üzeri)	Kaynak / Açıklama
Sıcaklık	°C	—	—	—	—	Sıcaklık referans değerle değil bağıl değerlendirilir.
Nem (Bağıl)	%	30–60	60–70	70–80	>80	Konfor koşulları için optimal değerler.
Karbonmonoksit (CO)	ppm	0–5	5–9	9–15	>15	WHO 8 saatlik ortalama sınır: 10 mg/m ³ ≈ 8.7 ppm
Hava Kalitesi (Genel)	ppm	0–100	101–150	151–200	>200	Türkiye Ulusal AQI ve ABD EPA standardına göre yorumlanabilir.
Ozon (O ₃)	µg/m ³	0–120	121–180	181–240	>240	8 saatlik ort. ulusal sınır: 120 µg/m ³
Toz Sensörü (PM)	µg/m ³	0–35	36–75	76–150	>150	PM10 için günlük sınır: 50 µg/m ³ (EU/WHO)

Çalışmada Erzincan ilinin 10 farklı mahallesinde üç gün boyunca sabah (08:00–09:30), öğle (12:00–13:30) ve akşam (17:00–18:30) saat dilimlerinde sıcaklık, nem, karbonmonoksit (ppm), hava kalitesi (ppm), ozon (µg/m³) ve toz yoğunluğu (µg/m³) parametrelerine ilişkin ölçümler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular, zaman aralıkları ve günler bazında karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

4.1. Sıcaklık Değişimleri

Sabah saatlerinde genel olarak 12–14 °C aralığında seyreden sıcaklık değerleri, öğle saatlerinde 21–25 °C'ye kadar yükselmiştir. En yüksek sıcaklık değerleri ikinci ve üçüncü gün öğle

saatlerinde Kızılay ve 6. Sokak Sanayi mahallelerinde 25 °C olarak ölçülmüştür. Akşam saatlerinde ise sıcaklıklar tekrar düşüşe geçerek ortalama 20–22 °C seviyelerine gerilemiştir.

4.2. Nem Oranları

Günün erken saatlerinde nispeten yüksek olan nem oranları (%57–64), öğle saatlerinde %44–51 seviyelerine düşmüş, akşam saatlerinde ise yeniden yükselerek %49–55 aralığında ölçülmüştür. Özellikle üçüncü gün sabah saatlerinde nem oranının diğer günlere göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, hafta sonuna denk gelen günün sabah saatlerindeki hava durumu koşulları ile ilişkilendirilebilir.

4.3. Karbonmonoksit (CO) Yoğunluğu

Karbonmonoksit değerleri günün tüm zaman dilimlerinde 3,01–4,52 ppm arasında değişmiştir. En yüksek CO yoğunluğu, ikinci gün öğle saatlerinde Ergenekon Mahallesi'nde 4,52 ppm olarak kaydedilmiştir. Sabah saatlerinde ölçülen CO değerlerinin, hafta içi günlerde daha yüksek olduğu, üçüncü gün sabahında ise hafif bir azalma gösterdiği gözlenmiştir.

4.4. Hava Kalitesi

Hava kalitesi verileri, sabah saatlerinde ortalama 102–205 ppm arasında değişmiş, öğle ve akşam saatlerinde bu değerler artış göstermiştir. En yüksek hava kirliliği değeri 6. Sokak Sanayi Mahallesi'nde sabah saatlerinde 208 ppm olarak ölçülmüştür. Genel olarak sanayi bölgesi ve yoğun yerleşim alanlarına sahip mahallelerde (Gülabibey, Barbaros, 6. Sokak Sanayi) daha yüksek değerler tespit edilmiştir.

4.5. Ozon (O₃) Yoğunluğu

Ozon değerleri 9,9–26,43 µg/m³ aralığında ölçülmüş olup, sabah saatlerinde diğer zaman dilimlerine göre genellikle daha yüksek seviyelerde bulunmuştur. Kızılay Mahallesi'nde üçüncü gün sabahı 26,43 µg/m³ ile en yüksek ozon değeri ölçülmüştür. Gün ilerledikçe ozon yoğunluğu düşme eğilimi göstermiştir. Bu durum, ozonun fotokimyasal reaksiyonlar ve güneş ışığına duyarlılığı ile ilişkilendirilebilir.

4.6. Toz Yoğunluğu (Partikül Madde)

Toz sensörü verilerine göre partikül madde yoğunluğu sabah saatlerinde 27–46 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, öğle saatlerinde 34–46 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, akşam saatlerinde ise 33–46 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ aralığında değişmiştir. 6. Sokak Sanayi Mahallesi ve Gülabibey Mahallesi en yüksek toz değerlerine sahip bölgeler olarak öne çıkmıştır. Toz yoğunluğu açısından gün içi dalgalanmalar gözlenmiş olsa da özellikle sanayi bölgelerinde gün boyunca yüksek seviyelerin korunduğu görülmüştür.



5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışmasında, Erzincan ilinin farklı mahallelerinde insansız hava aracı (İHA) destekli sensör sistemleri aracılığıyla üç gün boyunca sabah (08.00–09.30), öğle (12.00–13.30) ve akşam (17.00–18.30) saat dilimlerinde sıcaklık, nem, karbonmonoksit (CO), hava kalitesi, ozon (O₃) ve partikül madde (toz) ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler, hem hafta içi hem de hafta sonunu kapsayacak biçimde planlanmış; elde edilen veriler çizgi grafikleri ve mahalle bazlı haritalama yöntemleriyle analiz edilmiştir.

Araştırma kapsamında elde edilen bulgular, ölçüm yapılan zaman dilimlerinin hava kalitesi üzerindeki etkisini açık biçimde ortaya koymuştur. Genellikle sabah saatlerinde daha düşük kirletici seviyeleri gözlemlenirken, öğle ve özellikle akşam saatlerinde, başta CO ve toz olmak üzere birçok parametrede artış kaydedilmiştir. Bu durum, insan aktivitelerinin yoğunlaştığı saatlerde trafik kaynaklı emisyonların artması, meteorolojik değişimler ve ısı birikiminin etkisiyle ilişkilidir.

Ayrıca ölçüm yapılan mahalleler arasında belirgin farklılıklar gözlenmiştir. Şehir merkezine daha yakın ve trafik yoğunluğu yüksek mahallelerde kirletici değerler daha yüksek ölçülmüş, buna karşılık yeşil alanlara veya açık kırsal bölgelere yakın mahallelerde genel hava kalitesi daha iyi seviyede kalmıştır.

Çalışmada kullanılan İHA tabanlı mobil izleme sistemi, sabit istasyonlara kıyasla çok daha geniş bir alanda, kısa sürede çok sayıda veri toplanmasına olanak sağlamıştır. Bu sistemin sağladığı hareket kabiliyeti, farklı saat ve lokasyonlarda ölçüm yapılmasına imkân tanıyarak, mekânsal-zamansal analizlerin doğruluğunu artırmıştır. Ayrıca, elde edilen verilerin çizgi grafikleri ile zaman ekseninde, haritalama ile mekân ekseninde görselleştirilmesi, karar vericiler için kolay yorumlanabilir nitelikte bilgiler sunmuştur.

5.1. Araştırma Bulgularına Göre İHA Sistemlerinin Değerlendirilmesi

5.1.1. Avantajlar

Uygulama süreci boyunca İHA destekli hava kalitesi izleme sisteminin sunduğu bazı temel avantajlar öne çıkmıştır. Öncelikle, sistemin hareket kabiliyeti sayesinde sabit istasyonlarla

erişilemeyecek alanlarda veri toplanabilmiş ve bu durum, özellikle kırsal geçiş bölgeleri ile şehir içi dar alanlarda veri çeşitliliğini artırmıştır.

İkinci olarak, aynı uçuşta birden fazla sensörle farklı parametrelerin ölçülebilmesi, veriler arasında zamansal tutarlılık sağlamış ve çevresel etkileşimlerin daha bütüncül bir şekilde analiz edilmesine olanak tanımıştır. Bu durum, geleneksel yöntemlerle elde edilmesi güç olan çok boyutlu veri kümelerinin oluşturulmasını mümkün kılmıştır.

Ayrıca sistemin düşük maliyetli sensörlerle çalışabilmesi, yaygınlaştırılabilirliği açısından önemli bir avantaj sunmuştur. Sabit istasyonlara kıyasla daha düşük kurulum maliyetiyle geniş alanda ölçüm yapılabilmesi, belediyeler veya yerel yönetimler gibi karar verici kurumlar için sürdürülebilir bir çözüm modeli ortaya koymaktadır.

5.1.2. Dezavantajlar

Bununla birlikte, İHA sisteminin bazı teknik ve çevresel sınırlılıkları olduğu da gözlemlenmiştir. Özellikle kullanılan bataryaların kapasitesi, uçuş süresini sınırlamış; her uçuş yaklaşık 15–20 dakikayla sınırlı kalmıştır. Bu durum, daha geniş alanlarda veri toplamak isteyen uygulayıcılar için operasyonel planlama gerektirmiştir.

Ayrıca rüzgârlı ve yağışlı hava koşullarında İHA'nın uçuş stabilitesi azalmış; bu da ölçüm doğruluğunu etkileyen önemli bir faktör olmuştur. Özellikle sabah erken saatlerde karşılaşılan yoğun nem ve düşük sıcaklık, bazı sensörlerin kalibrasyonunu zorlaştırmıştır.

Veri iletimi açısından da zaman zaman zorluklar yaşanmıştır. NRF24L01 haberleşme modülünün belirli bir menzille sınırlı çalışması, veri aktarımında kısa süreli kesintilere neden olmuş; bu durum, bazı ölçümlerin tekrarlanmasını gerektirmiştir.

Ayrıca, sistemin kurulumu ve uçuş öncesi kontroller, belirli bir teknik bilgi düzeyi gerektirmiştir. Bu da özellikle saha uygulamaları için eğitimli personele duyulan ihtiyacı artırmıştır.

Literatürle karşılaştırıldığında, bu çalışmanın bulguları birçok açıdan benzerlik taşımaktadır. Hava kirliliğinin günün ilerleyen saatlerinde arttığı ve şehir merkezlerine yakın bölgelerde

yoğunlaştığı yönündeki sonuçlar, önceki araştırmalarla tutarlıdır. Bununla birlikte, bazı farklılıklar da gözlemlenmiştir. Örneğin, bazı mahallelerde beklenenden yüksek ozon düzeyleri kaydedilmiştir. Bu durum, yerel meteorolojik koşullar, güneş ışığı yoğunluğu ve bitki örtüsünün etkisiyle oluşan fotokimyasal reaksiyonlara bağlanabilir. Aynı zamanda İHA'nın uçuş yüksekliği, sensör duyarlılığı ve çevresel yansımalar gibi teknik faktörler de bu farklılığı etkileyen unsurlar arasında olabilir.

Sonuç olarak, bu araştırma; İHA sistemleriyle yapılan hava kalitesi ölçümlerinin, zaman ve mekân temelli analizlerle nasıl zenginleştirilebileceğini ortaya koymuş; mobil izleme ve görselleştirme tekniklerinin çevresel analizlerde etkin bir yöntem olduğunu göstermiştir.

5.1.3. Öneriler

- **Uzun Süreli İzleme:** Ölçümler belirli bir zaman aralığında gerçekleştirilmiştir. Bu uygulama yıl boyunca tekrar edilerek mevsimsel değişkenlik analiz edilebilir, böylece uzun dönemli kirlilik eğilimleri ortaya çıkarılabilir.
- **Sensör Çeşitliliğinin Artırılması:** Mevcut sistem, sıcaklık, nem, CO, O₃ ve partikül madde gibi temel parametreleri içermektedir. Gelecek çalışmalarda NO₂, SO₂ ve VOC gibi diğer önemli kirleticilerin de ölçülmesi önerilmektedir.
- **Gerçek Zamanlı İzleme Sistemi:** Toplanan verilerin eş zamanlı olarak işlenmesi ve haritalanmasıyla mobil uygulamalar üzerinden halka açık şekilde sunulması, halk sağlığı bilincini artırabilir.
- **Kentsel Planlamaya Entegrasyon:** Elde edilen mahalle bazlı hava kalitesi verilerinin belediyelere ve çevre yönetim birimlerine sunulması, yeşil alan planlaması, trafik yönetimi ve çevresel politikaların oluşturulmasında kullanılabilir.
- **Eğitim ve Farkındalık:** Bu tür teknolojik uygulamaların eğitim kurumlarında yaygınlaştırılması, genç bireylerin çevre bilinci kazanmasına katkı sağlar. Üniversitelerde benzer uygulamalarla saha temelli çevre dersleri zenginleştirilebilir.

- **Teknik Geliştirme:** İHA sistemlerinin uçuş süresi, sensör kalibrasyonu ve veri aktarım hızının artırılması, ölçüm kalitesini ve veri güvenilirliğini doğrudan artıracaktır.

Bu öneriler, çalışmanın sağladığı akademik ve pratik çıktıları daha ileri taşımaya yönelik olup, benzer çalışmaların daha geniş kapsamlı ve bütünsel bir yaklaşımla gerçekleştirilmesine olanak sağlayacaktır.



KAYNAKÇA

- Al-Hourani, A., Kandeepan, S., & Lardner, S. (2014). Optimal LAP altitude for maximum coverage. *IEEE Wireless Communications Letters*, 3(6), 569–572.
- Anadolu Ajansı. (2023). İHA'lara hava kirliliğiyle mücadele görevi. <https://www.aa.com.tr/tr/bilim-teknoloji/ihalara-hava-kirliligiyle-mucadele-gorevi/1375364>
- Anderson, K., & Gaston, K. J. (2013). Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11(3), 138–146.
- AnyPCBA. (2025). Understanding the 100uF 16V Capacitor: Uses, Specs, and Selection.
- Apte, J. S., Messier, K. P., Gani, S., Brauer, M., Kirchstetter, T. W., Lunden, M. M., ... & Marshall, J. D. (2017). High-resolution air pollution mapping with Google Street View cars: Exploiting big data. *Environmental Science & Technology*, 51(12), 6999–7008. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00891>
- Arduitrronics. (2025). MQ131 gas sensor module ozone MQ-131 black PCB 10–1000ppm. <https://www.arduitronics.com/product/4828/mq131-gas-sensor-module-ozone-mq-131-black-pcb-10-1000ppm>
- Arrow Models. (2025). Radiant 3S 3700mAh 11.1V 30C LiPo Battery w/ XT60 Connector Plug. <https://www.arrowmodels.com/radiant-3s-3700mah-11-1v-30c-lipo-battery-w-xt60-connector-plug>
- Bai, L., Wang, J., Ma, X., & Lu, H. (2022). Predicting air pollution using deep learning: A review. *Science of the Total Environment*, 810, 151–259. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151259>
- Brunekreef, B., & Holgate, S. T. (2002). Air pollution and health. *The Lancet*, 360(9341), 1233–1242.
- Castell, N., Dauge, F. R., Schneider, P., Vogt, M., Lerner, U., Fishbain, B., Broday, D., & Bartonova, A. (2017). Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates? *Environment International*, 99, 293–302. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.12.007>
- Clothier, R. A., Greer, D. A., Greer, D. G., & Mehta, A. M. (2015). Risk perception and the public acceptance of drones. *Risk Analysis*, 35(6), 1167–1183.
- Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79–97.

- Floreano, D., & Wood, R. J. (2015). Science, technology and the future of small autonomous drones. *Nature*, 521(7553), 460–466.
- Çelik, K., & Duran, A. (2022). Akıllı tarımda nem ve sıcaklık sensörleri kullanılarak tarımsal verilerin algılanması, işlenmesi ve transferi. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8384382>
- Çetinkaya, S. G., & Koç, M. (2023). Türkiye'nin İnsansız Hava Araçları Serüveni. *Anadolu Strateji Dergisi*, 5(1), 1-27.
- Delaney, D., vd. (2021). Air quality monitoring with drones: State-of-the-art and future perspectives. *Sensors*, 21(4), 1365. <https://doi.org/10.3390/s21041365>
- Direnc.net. (2024). *Sharp toz sensör seti (GP2Y1010AU0F)*.
<https://www.direnc.net/sharp-toz-sensor-seti-gp2y1010au0f>
- Dronessales. (2024). Environmental inspection with drones.
<https://www.dronessales.com/tr/environmental-inspection/>
- Eisenbeiss, H. (2009). UAV Photogrammetry. *ETH Zurich*.
- Eisenbeiss, H., & Sauerbier, M. (2011). UAV for 3D modeling of archaeological excavations. *ISPRS Archives*.
- Erdelj, M., Król, M., & Natalizio, E. (2017). Wireless sensor networks and multi-UAV systems for natural disaster management. *Computer Networks*, 124, 72–86.
- Feng, C., Li, W., Wang, J., Zhang, M., & Yao, Y. (2022). Design and implementation of a UAV-based real-time air quality monitoring system. *Journal of Cleaner Production*, 358, 132011. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132011>
- Finn, R. L., & Wright, D. (2012). Unmanned aircraft systems: Surveillance, ethics and privacy in civil applications. *Computer Law & Security Review*, 28(2), 184–194.
- Flybi. (2024). Drone technology for real-time air quality monitoring. <https://flybi.in/drone-technology-for-real-time-air-quality-monitoring/>
- Gardner, J. W., Varadan, V. K., & Awadelkarim, O. O. (2001). *Microsensors, MEMS, and smart devices*. Wiley.
- Getzin, S., Wiegand, K., & Schöning, I. (2012). Using airborne laser scanning to monitor tree diversity in a tropical rainforest. *PLoS ONE*, 7(7), e41141.
- Hassan, S. U., Khan, M. D., Jamil, M., & Raza, M. A. (2023). An integrated IoT and UAV-based framework for air quality monitoring in smart cities. *Sustainable Cities and Society*, 89, 104308. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104308>
- Hawks Work. (2025). *F450 drone frame, 450mm wheelbase quadcopter frame kit with landing skid gear*. <https://www.hawks-work.com/products/f450-drone-frame-450mm-wheelbase-quadcopter-frame-kit-with-landing-skid-gear>

- Houston, A. L., (2012). The Collaborative Lower Atmosphere Mobile Profiling System (CLAMPS). *Atmospheric Measurement Techniques*, 5(5), 1289–1300.
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC.
- Jarimana A., Rahman, M. M., & Hasan, K. (2020). Application of drone technology in air quality monitoring: A systematic review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(5), 1–15.
- Jurily, G. (2021). Geleneksel savaş uçaklarından insansız hava araçlarına geçiş süreci. *Askeri Havacılık ve Savunma Teknolojileri Dergisi*, 12(3), 517-530.
- Kahveci, M., & Nazlı, C. (2017). İnsansız hava araçları: tarihçesi, tanımı, dünyada ve Türkiye'deki yasal durumu. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(4), 511-535.
- Karagulian, F., vd. (2019). Review of sensors for air quality monitoring. *Atmospheric Environment*, 223, 117–131. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117292>
- Karsem. (2023). İnsansız hava araçları ile hava kalitesi izleme. <https://karsem.karatay.edu.tr/insansiz-hava-araclari-ile-hava-kalitesi-izleme>
- Kharol, S. K., Shephard, M. W., McLinden, C. A., O'Brien, J. M., & Zhang, L. (2015). Satellite observations of NO₂ trends and their relation to emission changes. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(18), 10325–10342. <https://doi.org/10.5194/acp-15-10325-2015>
- Korchenko, A. G., & Illyash, O. I. (2013). Classification of unmanned aerial vehicles. *Information Security of Ukraine*, 1(1), 32–39.
- Korotcenkov, G. (2007). Metal oxides for solid-state gas sensors: What determines our choice? *Materials Science and Engineering: B*, 139(1), 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2007.01.044>
- Kumar, P., Morawska, L., Martani, C., Biskos, G., Neophytou, M., Di Sabatino, S., Bell, M., Norford, L., & Britter, R. (2015). The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities. *Environment International*, 75, 199–205. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.11.019>
- Kumar, V., & Michael, N. (2012). Opportunities and challenges with autonomous micro aerial vehicles. *The International Journal of Robotics Research*, 31(11), 1279–1291.
- Kurtuluş, A., & Tekinalp, Ö. (2010). İnsansız hava araçlarının sınıflandırılması ve kullanım alanları. *Savunma Bilimleri Dergisi*, 9(1), 45–64.

- Likens, G. E., & Bormann, F. H. (1974). Acid rain: A serious regional environmental problem. *Science*, 184(4142), 1176–1179.
- Liu, X., Jayaratne, R., Thai, P., Kuhn, T., Zing, I., Christensen, B., & Morawska, L. (2020). Low-cost sensors for the measurement of atmospheric air pollution: A review. *Science of the Total Environment*, 695, 133–154.
- Macit, H. B. (2020, 18 Ocak). *Arduino ile MQ-135 hava kalite sensörü kullanımı*. <https://www.hbmacit.com/2020/01/18/arduino-ile-mq-135-hava-kalite-sensoru-kullanimi/>
- Manyoky, M., Theiler, P., Steudler, D., & Eisenbeiss, H. (2016). Unmanned aerial vehicle data for cadastral mapping. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 5(5), 68.
- Martin, P. G., vd. (2016). Radiological assessment on the Dounreay nuclear site using UAVs. *Journal of Environmental Radioactivity*, 151, 58–63.
- Merino, L., Caballero, F., Martínez-de-Dios, J. R., Ferruz, J., & Ollero, A. (2012). Unmanned aerial vehicles for forest fire fighting: A review. *Fire Safety Journal*, 61, 61–73.
- Morawska, L., Thai, P. K., Liu, X., Asumadu-Sakyi, A., Ayoko, G., Bartonova, A., ... & Williams, R. (2018). Applications of low-cost sensing technologies for air quality monitoring and exposure assessment. *Environmental International*, 116, 286–299. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.04.018>
- Motorobit. (2025a). 1045 drone pervanesi seti CW/CCW - Siyah. <https://www.motorobit.com/1045-drone-pervanesi-seti-cwccw-siyah>
- Motorobit. (2025.). *Karbonmonoksit Gaz Sensör Kartı – MQ-7*. <https://www.motorobit.com/karbonmonoksit-gaz-sensor-karti-mq-7>
- Mozaffari, M., Saad, W., Bennis, M., & Debbah, M. (2019). A tutorial on UAVs for wireless networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(3), 2334–2360.
- Nex, F., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: A review. *Applied Geomatics*, 6(1), 1–15.
- Ocak, İ., & Gürbüz, S. (2018). İHA teknolojileri ve savaş stratejilerine etkileri. *Güvenlik Bilimleri Dergisi*, 7(2), 145–160.
- Otto, A., Agatz, N., Campbell, J., Golden, B., & Pesch, E. (2018). Optimization approaches for civil applications of unmanned aerial vehicles (UAVs). *Networks*, 72(4), 411–458.
- Park, J., vd. (2020). Development of a drone-based air quality monitoring system. *Sensors*, 20(10), 2750.
- Patel, K. K. (2016). A review on sensor based monitoring system in agriculture. *International Journal of Computer Applications*, 135(7), 6–13.

- Pereira, R., Marques, P., Nunes, R., & Silva, A. (2018). Calibration strategies for low-cost sensors in environmental monitoring systems. *Sensors*, 18(5), 1579. <https://doi.org/10.3390/s18051579>
- Pope, C. A., & Dockery, D. W. (2006). Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56(6), 709–742.
- Puri, A. (2005). A survey of unmanned aerial vehicles (UAV) for traffic surveillance. *Department of Computer Science and Engineering, University of South Florida*.
- Qu, Y., Li, C., Song, K., & Li, X. (2015). Inspection robot for high-voltage transmission line based on UAV. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 12(5), 58.
- Saygın, A. (2025). İHA teknolojisinin sınır güvenliğinde kullanımı: Türkiye örneği. *Güvenlik Stratejileri Dergisi*, 15(32), 101–125.
- RadioLink. (2025). *AT9S Pro kullanıcı kılavuzu*. https://radiolink.com.cn/at9spro_manual
- Rizwan, M., Ahmad, T., & Iqbal, M. (2021). Low Power Wireless Sensor Node Design for Environmental Monitoring. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 10(1), 12–25. <https://doi.org/10.3390/jsan10010012>
- Robocombo. (2025). *NRF24L01 2,4GHz RF Alıcı-Verici Modül (Harici Antenli)*. <https://www.robocombo.com/NRF24L01-24GHz-RF-Alici-Verici-Modul-Harici-Antenli,PR-1059.html>
- Robotik Sistem. (2019). *Arduino Nano özellikleri*. Erişim adresi: https://www.robotiksistem.com/arduino_nano_ozellikleri.html
- Robotistan. (2025). *Ekranlı KK2 Multicopter, Tricopter, Quadcopter Kontrol Kartı*. <https://www.robotistan.com/kk-multicopter-kontrol-karti-icin-ekran-display-for-kk-control-module>
- Robotus. (2025). *Emax XA2212 980KV fırçasız motor ürün açıklaması*. <https://www.robotus.net/>
- Robotzade Web1. (2025). *FPV Drone Gözlük ve Kamera Seti 5.8GHz*. <https://www.robotzade.com/urun/fpv-drone-gozluk-ve-kamera-seti-5-8ghz>
- Robotzade Web2. (2025). *Skywalker 30A ESC - Elektronik hız kontrol kartı*. <https://www.robotzade.com/Skywalker-30A-ESC-Elektronik-Hiz-Kontrol-Karti,PR-290.html>
- Sadullah, A. (1945). Almanya'nın V1 ve V2 bombaları. *Tarih Araştırmaları Dergisi*, 1(1), 2-10.

- Sankey, T. T., Donald, J., McVay, J., & Greene, C. (2018). UAS-based plant phenotyping for precision agriculture. *Remote Sensing*, 10(6), 864.
- Santi, F., Rizzini, S., & Girard, L. (2014). A review of UAV-based sensing technologies for environmental monitoring. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186(7), 4731–4744. <https://doi.org/10.1007/s10661-014-3684-6>
- Science44. (2024). The use of drones for air quality monitoring. <https://tr.science44.com/the-use-of-drones-for-air-quality-monitoring/3483352>
- Spinelle, L., Gerboles, M., Kok, G., Persijn, S., & Sauerwald, T. (2017). Review of portable and low-cost sensors for the ambient air monitoring of benzene and other volatile organic compounds. *Sensors*, 17(7), 1520. <https://doi.org/10.3390/s17071520>
- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2024). *Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı*. <https://www.havaizleme.gov.tr>
- THK Model Uçak. (2023). *RadioLink R9DS Alıcı*. <https://www.thkmodelucak.com/urun/radio-link-r9ds-alici>
- Thompson, D. R., Wagstaff, K. L., & Castano, R. (2015). Spatiotemporal chemical sensing using mobile robots. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 12(1), 53–64.
- Tong, Z., Fang, Y., Liu, F., Zhang, L., & Cao, J. (2021). A UAV-based air quality monitoring system. *Sensors*, 21(1), 172. <https://doi.org/10.3390/s21010172>
- US Environmental Protection Agency. (2022). Air Quality Index (AQI) Basics. <https://www.airnow.gov/aqi/aqi-basics/>
- Villa, T. F., Salimi, F., Morton, K., Morawska, L., & Gonzalez, F. (2016). Development and validation of a UAV based system for air pollution measurements. *Sensors*, 16(12), 2202.
- Watts, A. C., Ambrosia, V. G., & Hinkley, E. A. (2012). Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: Classification and considerations of use. *Remote Sensing*, 4(6), 1671–1692.
- Wikipedia. (2016). Hewitt-Sperry automatic airplane. https://en.wikipedia.org/wiki/Hewitt-Sperry_Automatic_Airplane
- World Health Organization (WHO). (2021). *Air pollution*. [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- World Health Organization. (2021). *Air pollution*. <https://www.who.int/health-topics/air-pollution>

- Yazar, A. A. (2025). Delikli bakır plakelerin kullanımı ve elektronik devrelerdeki önemi. *Elektronik Prototipleme Dergisi*, 12(3), 45-58.
- Yiğit, E., Yazar, İ., & Karakoç, T. H. (2018). İnsansız Hava Araçları (İHA) 'nın Kapsamlı Sınıflandırması ve Gelecek Perspektifi. *Sürdürülebilir Havacılık Araştırmaları Dergisi*, 3(1), 10-19.
- Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L., & Zorzi, M. (2014). Internet of Things for smart cities. *IEEE Internet of Things Journal*, 1(1), 22–32.
- Zhang, C., & Kovacs, J. M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: A review. *Precision Agriculture*, 13(6), 693–712.
- Zhou, Y., & Li, S. (2018). UAV-based traffic monitoring system. *Transportation Research Part C*, 86, 177–193.

