



**AKILLI KENTLERDE ALANSAL HAVA
KİRLİLİĞİNİN BELİRLENMESİ VE KİRLİLİK
MODELLEMESİ: ERZURUM İLİ ÖRNEĞİ**

Şahin KORKMAZ

Danışman: Prof. Dr. Zeynep CEYLAN

Doktora Tezi

Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2023

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**AKILLI KENTLERDE ALANSAL HAVA KİRLİLİĞİNİN BELİRLENMESİ VE
KİRLİLİK MODELLEMESİ: ERZURUM İLİ ÖRNEĞİ**

(Determination of Area Air Pollution and Pollution Modeling in Smart Cities: a Case Study of
Erzurum Province)

DOKTORA TEZİ

Şahin KORKMAZ

Danışman: Prof. Dr. Zeynep CEYLAN

Erzurum
Aralık, 2023

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Şahin KORKMAZ tarafından hazırlanan “AKILLI KENTLERDE ALANSAL HAVA KİRLİLİĞİNİN BELİRLENMESİ VE KİRLİLİK MODELLEMESİ: ERZURUM İLİ ÖRNEĞİ” başlıklı çalışması 25/ 12 / 2023 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Çevre Bilimleri Bilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Handan UCUN ÖZEL <i>Bartın Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Danışman:	Prof. Dr. Zeynep CEYLAN <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Hüseyin SELÇUK <i>İstanbul Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Ergün YILDIZ <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Dr. Öğr. Üyesi Cemal SEVİNDİ <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN
Enstitü Müdürü

Aslı ıslak imzalıdır

Bu çalışma BAP projeleri kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: FDK-2023-12295

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Doktora Tezi olarak Prof. Dr. Zeynep CEYLAN danışmanlığında sunulan “Akıllı Kentlerde Alansal Hava Kirliliğinin Belirlenmesi Ve Kirlilik Modellemesi: Erzurum İli Örneği” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	10	30
Kuramsal Temeller	16	30
Materyal ve Yöntem	15	35
Bulgular	4	20
Tartışma	9	20
Tezin Geneli	12	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5’den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Şahin Korkmaz	Prof. Dr. Zeynep Ceylan
28.12.2023	28.12.2023
İmza: Aslı ıslak imzalıdır	İmza: Aslı ıslak imzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☒ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Sayın Prof. Dr. Zeynep CEYLAN danışmanlığında hazırlanarak, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'ne Doktora Tezi olarak sunulmuştur.

Öncelikle danışmanlığımı üstlenen, konu seçiminden itibaren başlayarak araştırma çalışmalarımın her aşamasında, her zaman desteklerini gördüğüm, yeni bir dünya vizyonu kazanmama neden olan, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım Danışman Hocam Sayın Prof. Dr. Zeynep CEYLAN'a sonsuz teşekkürlerimi ve şükranlarımı sunarım.

Tez izleme komitesinde yer alarak değerli görüşleri ile çalışmanın şekillenmesini sağlayan Sayın Prof. Dr. Handan UCUN ÖZEL'e, Sayın Prof. Dr. Hüseyin SELÇUK'a, Sayın Prof. Dr. Ergün YILDIZ'a ve Sayın Dr. Öğretim Üyesi Cemal SEVİNDİ hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Tüm yardımlarından dolayı, Sayın Prof. Dr. İbrahim Yücel ÖZBEK'e, Sayın Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL'a, Sayın Doç. Dr. Abdullah BAŞÇI'ya, Sayın Doç. Dr. Aycan Mutlu YAĞANOĞLU'a, Sayın Dr. Öğr. Üyesi Bilal USLANMAZ'a ve Doktor Öğr. Üyesi Ahmet ATALAY'a teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmam sırasında yardımlarını benden esirgemeyen, Sayın Dr. Aliye DOLAR'a, Sayın Çevre Yüksek Mühendisi Damla MUSTAFAOĞLU'a ve Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü öğretim elemanları ve çalışanlarına teşekkürü bir borç bilirim.

Doktora tezim boyunca bana yardımcı olan değerli dostlarım, arkadaşlarım ve meslektaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Beni bu günlere getiren ve her zaman ve her yerde desteklerini, sevgilerini benden esirgemeyen maddi manevi her türlü destekten kaçınmayan sevgili aileme saygı ve sevgilerimi sunarım.

Şahin KORKMAZ

ÖZET

DOKTORA TEZİ

AKILLI KENTLERDE ALANSAL HAVA KİRLİLİĞİNİN BELİRLENMESİ VE KİRLİLİK MODELLEMESİ: ERZURUM İLİ ÖRNEĞİ

Şahin KORKMAZ

Danışman: Prof. Dr. Zeynep CEYLAN

Amaç: Erzurum kent merkezinde gerek hüküm süren karasal iklim koşulları gerekse coğrafi konum itibarıyla önemli çevresel problemlerden biri hava kirliliğidir. Uzun yıllardır süregelen bu hava kirliliği probleminin çözümü adına; hava kirleticilerinin mekânsal ve zamansal kantitatif ölçümlerinin belirli periyotlarda yapılarak, kısa/orta/uzun vadede alınabilecek önlemlerin belirlenmesi için, üç boyutlu alansal hava kalitesi kirlilik haritaları oluşturulması kent içerisinde kirleticilerin yatay ve dikey hareketlerinin modellenmesi ile insan ve çevre sağlığı üzerine olan etkileri detaylı olarak araştırılmalıdır. Akıllı kentlere entegre edilebilecek hava kalitesi izleme ağı yardımıyla, Erzurum kent merkezinde atmosferik kirleticilerin zamansal, mekânsal ve uzun menzil taşınımının modellenmesi; alansal kirlilik haritalarının belirlenmesi ve gelecekteki kirlilik seviyelerinin makine öğrenmesi ile tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca Bakanlığımızın 59 ilde kullanıma sunduğu üç boyutlu NEFES yazılım programı ile uyumlu çalışabilecek, inovatif olarak geliştirilmeye müsait hava kirleticilerinin zamansal ve mekânsal değişimlerinin akıcı bir şekilde doğru ölçümlenmesine katkı sağlayacak “Akıllı Kentlere Uyumlu Sensör Tabanlı Düşük Maliyetli Drona Entegre Dış Atmosfer Hava Kalitesi Ölçüm Ünitesi” tasarlanmıştır.

Yöntem: Çalışma kapsamında, Erzurum kent merkezinde 2016-2023 tarihleri arasında atmosferik kirletici konsantrasyonlarının yanı sıra meteorolojik parametreler ve diğer kent verileri (Trafik-kent planı-kent dokusu) kullanılarak kent atmosferi hava kirliliği modellemesi yapılarak elde edilen bulgular detaylı irdelenmiştir. Partikül maddelerin (Pm’ler) ve kirletici gazların zamansal ve mekânsal değişimi istatistiksel olarak incelenmiş, kirlilik değerleri ile meteorolojik parametreler ve trafik verileriyle arasındaki ilişki belirlenmiştir. Kent merkezinde yüksek hava kirliliği seviyelerinin tespit edildiği ve Pm konsantrasyonlarının çok yüksek olduğu uzun menzil toz taşınımı ve yağışının olduğu günlerde, bu kirliliğin uzun menzil kaynakları ve taşınım yörüngeleri HYSPLIT modellemesi ile incelenmiştir. Makine öğrenmesi modellemesi yardımıyla da 19 adet tahmin modeli kullanarak kent içerisinde hava kalitesini etkileyen parametrelerin Ocak 2016-Temmuz 2023 tarihleri arasında alınan verileriyle bağımsız değişkenler için 322 deneme gerçekleştirilmiş ve 2023 yılı ilk altı ay Pm_{2,5} tahmini değerleri, optimum modellerin performansları ve optimum bağımsız değişkenler belirlenmiştir.

Bulgular: Sabit (yerel) istasyonlardan elde edilen veriler aracılığıyla; algoritmik olarak kentin hava kirliliği modellenmeye çalışılmış ve model sonuçları ile Erzurum hava kalitesi yönetiminde alınabilecek kısa-orta-uzun vadeli çözüm önlemleri sunulmuştur. 2016-2023 yılları boyunca ölçümlenen yedi yıllık verilerin (Partikül maddeler ve kirletici gazlar) zamansal ve mekânsal değişimi incelenmiş, kirlilik değerleri ile meteorolojik parametreler arasındaki korelasyon belirlenmiştir. Ölçüm sonuçlarında hareketle, partikül madde konsantrasyonlarının çok yüksek olduğu günlerde, bu kirliliğin uzun menzil kaynakları ve taşınım (geri) yörüngeleri incelenmiştir. HYSPLIT back-trajectory modeli yardımıyla ve 72 saatlik geri yörüngeler incelenerek; bu partiküllerin kaynaklarının ülkemizin güneyinde yer alan ülkelerin (Irak Ürdün Lübnan Suriye, Kuzey Afrika) çöl bölgelerinden Doğu Anadolu’ya gelen hava kütleleri olduğu belirlenmiştir. Bu hava kütlelerinin, ildeki Pm₁₀ ve Pm_{2,5} konsantrasyonlarını arttırdığı belirlenmiştir ve bu olay uydu fotoğraflarıyla da desteklenmiştir. Eğitilen makine öğrenmesi modellerinin başarılı bir şekilde Pm_{2,5} değerlerini tahmin ettiği gözlemlenmiştir. Linear

Regression, Stepwise Linear Regression, Quadratic SVM, Cubic SVM, Ensemble Boosted Trees, Gaussian Process Regression Matern 5/2 GPR, Gaussian Process Regression Exponential GPR, Gaussian Process Regression Squared Exponential GPR ve Gaussian Process Regression Rational Quadratic GPR modelleri değişkenler arasındaki ilişkileri öğrenme yeteneği sayesinde, $Pm_{2,5}$ tahmininde etkili modeller olarak kullanılabilecek güçlü araçlar olarak ortaya çıkmıştır. Yapılan denemelerde tahmin edilen $Pm_{2,5}$ değerleri ile 2023 yılı ilk altı ay gerçek $Pm_{2,5}$ değerler arasında en yüksek kolerasyona $R^2 = 0,8196$ 'lık değeri ile 298. Denemede (Bağımsız değişkenler: trafik zaman (yıl-ay), konum, yükseklik, NO , Pm_{10}) daha sonra $R^2 = 0,8138$ değeri ile 306. Denemede (Bağımsız değişkenler: trafik, zaman(yıl-ay), konum, yükseklik, NO_x) ve $R^2 = 0,7904$ değeri ile 302. Denemede (Bağımsız değişkenler: trafik, zaman(yıl-ay), konum, yükseklik, NO_2 , Pm_{10}) ulaşılmıştır. Buda bizlere en etkili $Pm_{2,5}$ tahminlerinin Pm_{10} verisinin yanı sıra NO , NO_x , konum, yükseklik, ve zaman (yıl-ay) bağımsız değişkenleri ile yapılabileceğini göstermektedir.

Sonuç: Elde edilen araştırma ve modelleme sonuçları, pek çok faktörün aynı anda etkin olduğu alansal hava kirliliğinin karmaşıklığını anlama ve çözümleme amacını taşımaktadır. Erzurum'un coğrafi özellikleri, özellikle de topografik ve iklimsel faktörler, hava kalitesini etkileyen dinamikleri etkilemektedir. Hava kirlleticilerin zamansal ve mekansal değişiminin incelenmesi Erzurum kent hava kirliliğinin anlaşılmasını sağlayarak özellikle kış periyodunda alınacak önlemlerin artırılması gerektiğini ortaya koymuştur. Geri yörünge analizleri sonucu elde edilen veriler ise, kent merkezine bu kirleticilerin Nisan ve Mayıs döneminde geldiğini ve bu dönemde özellikle Türkiye'nin güneyinde yer alan çöller ve Kuzey Afrika çölleri kaynaklı çöl tozu taşınımı sırasında halk sağlığı açısından bu dönemlerde hasas gruplar için önlemler alınması gerektiği ortaya çıkmıştır. Çalışmada uygulanan tüm bu yeni nesil modelleme teknikleri Erzurum kenti karmaşık hava kirliliği probleminin çözümü adına önemli çıktılar sunmuş hava kirlerticilerinden önemli çevresel ve sağlık etkileri olan $Pm_{2,5}$ 'ün önceden tahmin edilmesi hava kirliliğinin azaltım politikalarına yön vereceği düşünülmektedir. Araştırma bulguları; sürdürülebilir ve sağlıklı kent yaşamını destekleyerek gerek hava kirliliği problemi yaşayan diğer kentlerde gerekse Erzurum kent merkezinde geleceğe yönelik alınabilecek eylem planlarında yol gösterici olabileceği ayrıca şehir sakinlerinin yaşam kalitesini artırmaya yönelik stratejilerin belirlenmesinde ve çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine (SKA-3, SKA-11, SKA-13) ulaşmada yol gösterici olacağı aşikardır.

Anahtar Kelimeler: Hava Kirliliği Modellemesi, Hava Kalitesi, Akıllı Kentler, Akıllı Çevre Uygulamaları, Alansal Kirlilik Haritaları, Geri Yörünge Analizi, Makine Öğrenmesi

Aralık 2023, 238 sayfa

ABSTRACT

DOCTORAL DISSERTATION

DETERMINATION OF AREA AIR POLLUTION AND POLLUTION MODELING IN SMART CITIES: THE CASE OF ERZURUM

Şahin KORKMAZ

Supervisor: Prof. Dr. Zeynep CEYLAN

Purpose: Air pollution is one of the most important environmental problems in Erzurum city centre due to the prevailing continental climate conditions and geographical location. In order to solve this long-standing air pollution problem; spatial and temporal quantitative measurements of air pollutants should be carried out in certain periods and three-dimensional spatial air quality pollution maps should be created to determine the measures that can be taken in the short / medium / long term, and the effects on human and environmental health should be investigated in detail by modelling the horizontal and vertical movements of pollutants in the city. With the help of the air quality monitoring network that can be integrated into smart cities, it is aimed to model the temporal, spatial and long-range transport of atmospheric pollutants in Erzurum city centre; to determine areal pollution maps and to predict future pollution levels by machine learning. In addition, a "Smart City Compatible Sensor Based Low Cost Drone Integrated Outdoor Atmosphere Air Quality Measurement Unit" has been designed to work in harmony with the three-dimensional NEFES software programme, which is available for use in 59 provinces of our Ministry, and to contribute to the accurate measurement of the temporal and spatial changes of air pollutants that can be developed innovatively.

Method: Within the scope of the study, atmospheric pollutant concentrations as well as meteorological parameters and other urban data (traffic-urban plan-urban texture) were used to model urban air pollution in Erzurum city centre between 2016 and 2023 and the findings obtained were examined in detail. Temporal and spatial variation of particulate matter (Pms) and pollutant gases were statistically examined and the relationship between pollution values and meteorological parameters and traffic data was determined. On days when high air pollution levels were detected in the city centre and Pm concentrations were very high, long-range dust transport and precipitation, long-range sources and transport trajectories of this pollution were examined by HYSPLIT modelling. With the help of machine learning modelling, using 19 prediction models, 322 trials were performed for independent variables with the data of the parameters affecting the air quality in the city between January 2016 and July 2023, and the estimated values of Pm_{2,5} for the first six months of 2023, the performances of the optimum models and the optimum independent variables were determined.

Findings: Through the data obtained from fixed (local) stations; the air pollution of the city was tried to be modeled algorithmically and short-medium-long term solution measures that can be taken in Erzurum air quality management were presented with the model results. The temporal and spatial variation of the seven-year data (particulate matter and pollutant gases) measured during 2016-2023 was analyzed, and the correlation between pollution values and meteorological parameters was determined. Based on the measurement results, the long-range sources and transport (back) trajectories of this pollution on days with very high particulate matter concentrations were analyzed. With the help of the HYSPLIT back-trajectory model and by analyzing the 72-hour back trajectories; it was determined that the sources of these particles are the air masses coming to Eastern Anatolia from the desert regions of the countries located in the south of our country (Iraq Jordan Lebanon Syria, North Africa). These air masses were found to increase Pm₁₀ and Pm_{2,5} concentrations in the province and this was supported by satellite photographs. It was observed that the trained machine learning models successfully

predicted $\text{Pm}_{2.5}$ values. Linear Regression, Stepwise Linear Regression, Quadratic SVM, Cubic SVM, Ensemble Boosted Trees, Gaussian Process Regression Matern 5/2 GPR, Gaussian Process Regression Exponential GPR, Gaussian Process Regression Squared Exponential GPR and Gaussian Process Regression Rational Quadratic GPR models have emerged as powerful tools that can be used as effective models for $\text{Pm}_{2.5}$ prediction thanks to their ability to learn the relationships between variables. The highest collinearity between the predicted $\text{Pm}_{2.5}$ values and the actual $\text{Pm}_{2.5}$ values for the first six months of 2023 was observed in the 298th trial with $R^2 = 0.8196$. In the experiment (Independent variables: traffic time (year-month), location, elevation, NO , Pm_{10}), then 306 with $R^2 = 0.8138$. Experiment 306 (Independent variables: traffic, time (year-month), location, elevation, NO_x) and Experiment 302 (Independent variables: traffic, time (year-month), location, elevation, NO_2 , Pm_{10}) with $R^2 = 0.7904$. This shows that the most effective $\text{Pm}_{2.5}$ predictions can be made with the independent variables NO , NO_x , location, elevation, and time (year-month) as well as Pm_{10} data.

Results: The research and modeling results obtained aim to understand and analyze the complexity of areal air pollution where many factors are active at the same time. The geographical characteristics of Erzurum, especially topographic and climatic factors, influence the dynamics affecting air quality. Analyzing the temporal and spatial variation of air pollutants has provided an understanding of Erzurum urban air pollution and revealed the need to increase the measures to be taken especially during the winter period. The data obtained from back trajectory analyses revealed that these pollutants arrive in the city center in April and May and that measures should be taken for vulnerable groups in terms of public health during this period, especially during the desert dust transport from the deserts located in the south of Turkey and North African deserts. All these new generation modeling techniques applied in the study have provided important outputs for the solution of the complex air pollution problem of Erzurum city, and it is thought that the prediction of $\text{Pm}_{2.5}$, which has significant environmental and health effects from air pollutants, will guide air pollution mitigation policies. The findings of the research; It is obvious that by supporting sustainable and healthy urban life, it can guide the action plans that can be taken for the future both in other cities with air pollution problems and in Erzurum city center, and it will be a guide in determining strategies to improve the quality of life of city residents and to achieve environmental sustainability goals (SDG-3, SDG-11, SDG-13).

Keywords: Air Pollution Modelling, Air Quality, Smart Cities, Smart Environmental Applications, Spatial Pollution Maps, Back Trajectory Analysis, Machine Learning

December 2023, 238 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER	viii
TABLolar DİZİNİ.....	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	xix
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	9
Akıllı Kentler Kavramı	9
Akıllı kent tanımı	9
Akıllı kentlerin kullandığı teknolojiler	11
Akıllı kentlerin alt alanları ve genel özellikleri.....	13
Dünyadaki akıllı kent uygulamaları	14
Akıllı çevre alt alanı kavramı.....	17
Akıllı çevre alt alanın Türkiye’deki uygulamaları	18
Akıllı Kentlerde Hava Kirliliği ve Önleme Çalışmaları	21
Hava Kirliliği	24
Hava kirliliği kaynakları	27
Hava kirletici parametreler ve özellikleri.....	27
Hava kirliliğine sebep olan faktörler.....	33
Hava kirliliğinin çevresel ve kentsel etkileri.....	33
Hava kalitesi mevzuatı	40
Hava kalitesi izleme	42
Erzurum’da hava kalitesi yönetimi	44
Alansal Hava Kalitesi Modelleme Çalışmaları	45
Makine Öğrenmesi Yardımıyla Tahmin	47
Kullanılan modeller ve özellikleri.....	48
Akıllı Kentlerde Drona Entegre Hava Kalitesi Ölçüm Cihazı	61

MATERYAL ve METOD	68
Çalışma Yeri.....	68
Konum Özellikleri.....	68
Coğrafi çevre özellikleri.....	69
Veri Setlerinin Oluşturulması	76
Yerel Hava Kirliliği Ölçüm İstasyonları Verileri.....	77
Meteorolojik Ölçüm İstasyon Verileri	80
Yerel Trafik Ölçüm İstasyon Verileri	82
İstasyonlardan Alınan Verilerden Hareketle Yapılan İstatistiksel Analizler	83
Elde Edilen Verilerden Hareketle Coğrafi Bilgi Sistemleri Kullanılarak Alansal Hava Kirlilik Haritalarının Oluşturulması (ArcGIS).....	84
Yerel İstasyonlardan Elde Edilen Pm _{2,5} -Pm ₁₀ Verileri Kullanılarak HYSPLIT Geri Yörünge Modellemesi Yardımıyla Toz Haritalarının Oluşturulması	84
Pm _{2,5} Değerlerinin Makine Öğrenmesi Yardımıyla Tahmini.....	86
Drona Entegre Hava Kalitesi Ölçüm Cihazının Tasarımı.....	90
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	96
Verilerin İstatistik Analizi.....	96
Hava kalitesi verileri	96
Meteorolojik veriler	100
Kirlilik Konsantrasyonlarının Zamansal ve Mekânsal Değişimi	101
Partikül madde değişimi.....	102
Gaz kirleticilerin değişimi.....	103
Kirlilik Konsantrasyonlarının Arasındaki Korelasyon	105
Pm'ler arasındaki korelasyon.....	105
NO, NO ₂ ve NO _x zamansal değişimi.....	107
Pm'ler ile O ₃ arasındaki korelasyon.....	107
Meteorolojik Parametrelerin Zamansal Değişimi	109
Sıcaklığın zamansal değişimi.....	109
Rüzgar hızının zamansal değişimi	110
Aktüel basıncın zamansal değişimi.....	111
Güneşlenme süresinin zamansal değişimi.....	111
Nispi nemin zamansal değişimi	112
Günlük toplam yağışın zamansal değişimi	112
Karışım yüksekliğinin zamansal değişimi	113
Kent İçerisinde Trafik Verisinin İncelenmesi	114

Alansal Hava Kalitesi Kirlilik Haritaları	116
HYSPLIT Geri Yörünge Analizleri	120
Gelecekte Erzurum Kent Merkezi Büyüme Oranının ve Bölgelerin Tahmini.....	132
Gelecekteki $Pm_{2.5}$ Konsantrasyonlarının Makine Öğrenmesi Yardımıyla Tahmini	134
Pm_{10} değerleri kullanılarak $Pm_{2.5}$ değerlerinin tahmini.....	135
Pm_{10} verileri ve meteorolojik parametreler kullanılarak $Pm_{2.5}$ değerlerinin tahmini....	142
Pm_{10} , meteorolojik parametreler ve gaz kirletici verileri kullanılarak $Pm_{2.5}$ değerlerinin tahmini	149
Pm_{10} , meteorolojik parametreler, gaz kirletici verileri ve trafik verileri kullanılarak $Pm_{2.5}$ değerlerinin tahmini.....	156
SONUÇ VE ÖNERİLER	164
KAYNAKÇA	170
EKLER	181
EK 1. Veri Temini ve İzinler.....	181
EK 2. Bilimsel Araştırma Projesi (BAP Projesi) Kabul Tutanağı	183
EK 3. Optimum Tahmin Modelleri Performans Değerleri Ve Kullanılan Öğrenme Modelleri Tablosu	184
EK 4. Meteorolojik Parametreler İle Kirlilik Parametreleri Arasındaki Detaylı Kolerasyon Tabloları.....	206
ÖZGEÇMİŞ.....	217

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Birleşik devletler çevre koruma ajansına (US EPA) göre hava monitörlerinin maliyetlerine sınıflandırılması	22
Tablo 2. Kükürt Dioksitin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	29
Tablo 3. Parçacık Çaplarına Göre Pm'lerin Genel Özellikleri	30
Tablo 4. Karbonmonoksiti Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	31
Tablo 5. Azot Oksitlerin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	32
Tablo 6. Ozonun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	32
Tablo 7. Hava Kalitesi Sınır Değerleri	40
Tablo 8. Hava Kalitesi İndeksi Skalası ve Renkler	41
Tablo 9. Lineer Regresyon Modelleri ve Özellikleri	50
Tablo 10. Ağaç Modelleri ve Özellikleri	53
Tablo 11. SVM Modelleri Özellikleri	56
Tablo 12. Ensemble Trees modelleri ve karşılaştırması	57
Tablo 13. Gaussian Process Regression (GPR) Modelleri ve Özellikleri	60
Tablo 14. Kullanılacak Modeller ve Kullanım Amaçları	64
Tablo 15. Erzurum Meteoroloji İstasyonuna Ait Seçilmiş İklim Elemanlarının Aylık Dağılımı (1929 - 2022)	71
Tablo 16. Erzurum İli Nüfusunun Dağılımı (2022)	72
Tablo 17. Çalışmada Kullanılan Veriler	77
Tablo 18. Hava Kalitesi İzleme Ağı (UHKİA)'na Bağlı Beş Adet Hava Kalitesi İzleme İstasyonlarının Özellikleri	79
Tablo 19. Meteoroloji Genel Müdürlüğü'ne Bağlı Dört Adet Meteorolojik Ölçüm İstasyonu Özellikleri	81
Tablo 20. Pm _{2,5} Konsantrasyonu Tahmini İçin Bağımsız Değişkenler	88
Tablo 21. Ölçüm Ünitesinde Kullanılan Sensörler ve Özellikleri	92
Tablo 22. Tasarımımızın Yaklaşık Olarak Belirlenen Uçuş Performans Parametreleri	94
Tablo 23. Drone Parçaları ve Tahmini Ağırlık Tablosu	95
Tablo 24. Hava Kirleticilerinin İstatistiksel Özellikleri	96
Tablo 25. Meteorolojik Verilerin Yıllara Göre Değişimi	101
Tablo 26. Pm _{2,5} ve Pm ₁₀ Arasındaki Kolerasyon Tablosu	106
Tablo 27. Pm _{2,5} ile Pm ₁₀ Arasındaki Regrasyon Tablosu	106

Tablo 28. $Pm_{2,5}$ ve Pm_{10} ile O_3 Arasındaki Kolerasyon Tablosu (Pearson Katsayıları)	107
Tablo 29. Pm_{10} Verileri Kullanılarak Yapılan Tahminlerde En Etkili Öğrenme Modelleri ve Değişkenler	135
Tablo 30. Meteorolojik Parametreler Kullanılarak Yapılan Tahminlerde En Etkili Öğrenme Modelleri ve Değişkenler	142
Tablo 31. Gaz Kirletici Değerleri Kullanılarak Yapılan Tahminlerde En Etkili Öğrenme Modelleri ve Değişkenler	149
Tablo 32. Trafik Verileri Kullanılarak Yapılan Tahminlerde En Etkili Öğrenme Modelleri ve Değişkenler	156
Tablo 33. Altı farklı meteorolojik parametrenin $Pm_{2,5-10}$ ve gaz kirleticiler üzerine olan etkilerinin kolerasyon sonucu	164



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Erzurum kent merkezinde inversiyon tabakası	6
Şekil 2. Akıllı kent kavramının tarihsel süreç içerisindeki aşamaları	9
Şekil 3. Cohen'in akıllı şehir çemberi ve akıllı şehir alt alanları	10
Şekil 4. Akıllı kent varyasyonlarının son yirmi yıllık süreçteki gelişim aşamaları	11
Şekil 5. Akıllı kent alt alanlarında en yoğun kullanılan akıllı teknolojiler	12
Şekil 6. Akıllı kent alt alanları	13
Şekil 7. Akıllı çevre alt alanının bileşenleri	18
Şekil 8. Hava kirliliği ölçüm istasyonları ve çevre kontrol merkezi görseli	19
Şekil 9. Hava kirliliğinde süreçler	25
Şekil 10. Troposferde bulunan gazların genel sınıflandırması.....	26
Şekil 11. Troposfer-Outdoor kirleticiler gazların detaylı sınıflandırılması.....	28
Şekil 12. Kirleticiler gazların ve Pm'lerin Taşınım ve Dönüşüm süreçleri.....	36
Şekil 13. A) Konvansiyonel hava kalitesi izleme istasyonu B) Mobil hava kalitesi ölçüm aracı.....	43
Şekil 14. Erzurum ilinde hava kirliliği ölçüm ve araştırma faaliyetleri zaman çizelgesi.....	44
Şekil 15. Erzurum'un coğrafi konumu	68
Şekil 16. Erzurum kenti ve çevresinin topografya haritası	69
Şekil 17. A) Tez kapsamında önerilen Akıllı Kentlere entegre edilebilecek hava kalitesi izleme ağı genel akış diyagramı B)Tez kapsamında 2016-2023 yılları kapsamında (Hava Kirliliği-Meteorolojik-Trafik) verilerden hareketle makine öğrenmesi metodu ile çalışılan modellerin ve çıktıların akış diyagramı	74
Şekil 18. Erzurum kent merkezi hava kirliliği ölçüm istasyonlarının coğrafi konumu	78
Şekil 19. Hava kalitesi izleme istasyonları güncel fotoğrafları A)Palandöken İstasyonu (İstasyon 4), B) Merkez İstasyonu (İstasyon 3), C) Taşhan İstasyonu (İstasyon 2), D) Aziziye İstasyonu (İstasyon 1), E) Pasinler İstasyonu (İstasyon 5).....	80
Şekil 20. Erzurum kent merkezi meteorolojik ölçüm istasyonlarının coğrafi konumu.....	82
Şekil 21. Erzurum kent merkezi trafik verisi ölçüm istasyonlarının coğrafi konumu	83
Şekil 22. Sistemin genel diyagramı, ölçüm alanında planlanan 3-boyutlu ölçüm ve modelleme örneği	90

Şekil 23. Hava kalitesi ölçüm modülünün basitleştirilmiş genel diyagramı (A) ve Pm konsantrasyonunu algılamak için ışık saçılım yöntemi diyagramı (B) (Gao vd., 2016)	91
Şekil 24. Drona entegre hava kalitesi ölçüm ünitesinin (A) genel görüntüsü ve (B) Tam izleme ölçüm/seçici izleme ölçüm	94
Şekil 25. İstasyonlara göre Pm ₁₀ zamansal değişim (µg/m ³)	102
Şekil 26. Taşhan istasyonuna göre Pm _{2,5} zamansal değişim (µg/m ³)	103
Şekil 27. İstasyonlara göre SO ₂ zamansal değişim (µg/m ³)	103
Şekil 28. İstasyonlara göre NO zamansal değişim (µg/m ³)	103
Şekil 29. İstasyonlara göre NO ₂ zamansal değişim (µg/m ³)	104
Şekil 30. İstasyonlara göre NO _x zamansal değişim (µg/m ³)	104
Şekil 31. İstasyonlara göre CO zamansal değişim (µg/m ³)	104
Şekil 32. İstasyonlara göre O ₃ zamansal değişim (µg/m ³)	105
Şekil 33. Pm ₁₀ -Pm _{2,5} dağılımı (aylık ortalamalar-µg/m ³)	105
Şekil 34. NO NO ₂ NO _x zamansal değişimi	107
Şekil 35. Pm'ler ile O ₃ zamansal değişimi	108
Pm'lerin üstlendiği katalizör rolü eşliğinde; O ₃ 'un güneşten gelen ultraviyole (hv) ışınlarıyla alternatif fotokimyasal parçalanma reaksiyonları;	108
Şekil 36. Günlük ortalama sıcaklık değerlerinin değişimi	109
Şekil 37. Günlük Ortalama Rüzgar Hızı değerlerinin zamansal değişimi ve alansal değişimi	110
Şekil 38. Günlük Ortalama Aktüel Basınç değerlerinin değişimi	111
Şekil 39. Günlük Güneşlenme Süresi değerlerinin değişimi	112
Şekil 40. Günlük Ortalama Nispi Nem değerlerinin değişimi	112
Şekil 41. Günlük toplam yağış değerlerinin değişimi	113
Şekil 42. Yaz ve kış periyodu inversiyon/ karışım yüksekliği tabakası (metre)	113
Şekil 43. Karayolları 12. Bölge müdürlüğüne ait hacim haritası yıllık ortalama günlük trafik verileri (YOGT)	115
Şekil 44. Karayolları 12. Bölge Müdürlüğüne ait hacim haritası	115
Şekil 45. Erzurum kent merkezinde yer alan istasyonlardaki minimum Pm ₁₀ konsantrasyon değerlerinden hareketle alansal hava kalitesi kirlilik haritaları	116
Şekil 46. Erzurum kent merkezinde yer alan istasyonlardaki maksimum Pm ₁₀ konsantrasyon değerlerinden hareketle alansal hava kalitesi kirlilik haritaları	117
Şekil 47. Erzurum kent merkezinde yer alan istasyonlardaki ortalama Pm ₁₀ konsantrasyon değerlerinden hareketle alansal hava kalitesi kirlilik haritaları	118

Şekil 48. İstasyon 2’de Pm_{10} konsantrasyon değerlerinden hareketle alansal hava kalitesi kirlilik haritaları	119
Şekil 49. İstasyon 2’de $Pm_{2,5}$ konsantrasyon değerlerinden hareketle alansal hava kalitesi kirlilik haritaları	119
Şekil 50. 2016-2017-2018 yıllarına ait yerel ölçüm istasyonlarındaki haftalık maksimum değerler ve toz yağışının saatlik değişimi (Merkez-Aziziye-Taşhan-Palandöken-Pasinler İstasyonu)	122
Şekil 51. 2019-2020-2021 yıllarına ait yerel ölçüm istasyonlarındaki haftalık maksimum değerler ve toz yağışının saatlik değişimi (Merkez-Aziziye-Taşhan-Palandöken-Pasinler İstasyonu)	123
Şekil 52. 2022 yılına ait Yerel ölçüm istasyonlarındaki haftalık maksimum değerler ve toz yağışının saatlik değişimi (Merkez-Aziziye-Taşhan-Palandöken-Pasinler İstasyonu)	124
Şekil 53. 2016-2017-2018-2021 yıllarına ait maksimum Pm seviyelerinin görüldüğü günler için HYSPLIT geri yörünge analizleri	125
Şekil 54. 2019-2020-2022 yıllarına ait yıllarına ait maksimum Pm seviyelerinin görüldüğü günler için HYSPLIT geri yörünge analizleri	126
Şekil 55. Kent merkezindeki yoğun toz taşınımı ve yağışı örnek fotoğrafı (23 Mayıs 2022)	127
Şekil 56. Yerel ölçüm istasyonlarda toz taşınımı ve yağışının görüldüğü haftalık değerleri ve toz yağışının olduğu saatlik değerlerin değişimi (Merkez-Aziziye-Taşhan-Palandöken-Pasinler İstasyonu)	128
Şekil 57. 2019-2021-2022-2023 yıllarına ait toz taşınımlarının HYSPLIT geri yörünge analizleri	129
Şekil 58. Toz taşınımı ve yağışının gerçek zamanlı uydu görüntüleri 2019A)23 Mayıs B)24 Mayıs ve C) 25 Mayıs tarihleri (NASA 2023)	130
Şekil 59. Toz taşınımı ve yağışının gerçek zamanlı uydu görüntüleri 2022 A)22 Mayıs B)23 Mayıs ve C)24 Mayıs tarihleri (NASA 2023)	130
Şekil 60. Toz taşınımı ve yağışının gerçek zamanlı uydu görüntüleri 2023A)2 Mart B)3 Mart ve C) 4 Mart tarihleri (NASA 2023)	131
Şekil 61. Erzurum kenti’nin 1990-2018 devresindeki gelişimi	133
Şekil 62. Pm_{10} verileri kullanılarak yapılan tahminlerde en etkili öğrenme modelleri RMSE değerleri	136
Şekil 63. Pm_{10} verileri kullanılarak yapılan tahminlerde en etkili öğrenme modelleri tahmin değerleri (sarı) ve gerçek değerler (mavi) program çıktıları a)Deneme 1,	

b)Deneme 2, c)Deneme 21, d)Deneme 30, e)Deneme 31, f)Deneme 32, g)Deneme 46 h)Deneme 66 j)Deneme 74 ve k)Deneme 82	137
Şekil 64. Pm ₁₀ verileri kullanılarak yapılan tahminlerde en etkili öğrenme modelleri kolerasyon ilişkisi program çıktıları a)Deneme 1, b)Deneme 2, c)Deneme 21, d)Deneme 30, e)Deneme 31, f)Deneme 32, g)Deneme 46 h)Deneme 66 j)Deneme 74 ve k)Deneme 82	138
Şekil 65. Pm ₁₀ verileri kullanılarak yapılan tahminlerde en etkili öğrenme modelleri gerçek değerden sapma saçılım grafikleri program çıktıları a)Deneme 1, b)Deneme 2, c)Deneme 21, d)Deneme 30, e)Deneme 31, f)Deneme 32, g)Deneme 46 h)Deneme 66 j)Deneme 74 ve k)Deneme 82	139
Şekil 66. Pm ₁₀ verileri kullanılarak eğitilen öğrenme modelleri sonucu tahmin edilen değerler ile 2023 yılı ilk altı ay gerçek değerler kolerasyon ilişkisi	140
Şekil 67. Pm ₁₀ verileri kullanılarak eğitilen öğrenme modelleri sonucu tahmin edilen değerler ile 2023 yılı ilk altı ay gerçek değerler arasındaki zamansal ilişki	141
Şekil 68. Meteorolojik parametreler kullanılarak yapılan tahminlerde en etkili öğrenme modelleri RMSE değerleri	143
Şekil 69. Meteorolojik parametreler kullanılarak yapılan tahminlerde en etkili öğrenme modelleri tahmin değerleri (sarı) ve gerçek değerler (mavi) program çıktıları a)Deneme 8, b)Deneme 26, c)Deneme 27, d)Deneme 28, e)Deneme 36, f)Deneme 37, g)Deneme 38 ve h)Deneme 164.....	144
Şekil 70. Meteorolojik parametreler kullanılarak yapılan tahminlerde en etkili öğrenme modelleri kolerasyon ilişkisi program çıktıları a)Deneme 8, b)Deneme 26, c)Deneme 27, d)Deneme 28, e)Deneme 36, f)Deneme 37, g)Deneme 38 ve h)Deneme 164	145
Şekil 71. Meteorolojik parametreler kullanılarak yapılan tahminlerde en etkili öğrenme modelleri gerçek değerden sapma saçılım grafikleri program çıktıları a)Deneme 8, b)Deneme 26, c)Deneme 27, d)Deneme 28, e)Deneme 36, f)Deneme 37, g)Deneme 38 ve h)Deneme 164.....	146
Şekil 72. Meteorolojik parametreler kullanılarak eğitilen öğrenme modelleri sonucu tahmin edilen değerler ile 2023 yılı ilk altı ay gerçek değerler kolerasyon ilişkisi	147
Şekil 73. Meteorolojik parametreler kullanılarak eğitilen öğrenme modelleri sonucu tahmin edilen değerler ile 2023 yılı ilk altı ay gerçek değerler arasındaki zamansal ilişki.....	148

Şekil 74. Gaz kirletici verileri kullanılarak yapılan tahminlerde en etkili öğrenme modelleri RMSE değerleri	150
Şekil 75. Gaz kirletici değerleri kullanılarak yapılan tahminlerde en etkili öğrenme modelleri tahmin değerleri (sarı) ve gerçek değerler (mavi) program çıktıları a)Deneme 240, b)Deneme 242, c)Deneme 244, d)Deneme 246, e)Deneme 268, f)Deneme 281, g)Deneme 282 ve h)Deneme 283.....	151
Şekil 76. Gaz kirletici değerleri kullanılarak yapılan tahminlerde en etkili öğrenme modelleri kolerasyon ilişkisi program çıktıları a)Deneme 240, b)Deneme 242, c)Deneme 244, d)Deneme 246, e)Deneme 268, f)Deneme 281, g)Deneme 282 ve h)Deneme 283	152
Şekil 77. Gaz kirletici değerleri kullanılarak yapılan tahminlerde en etkili öğrenme modelleri gerçek değerden sapma saçılım grafikleri program çıktıları a)Deneme 240, b)Deneme 242, c)Deneme 244, d)Deneme 246, e)Deneme 268, f)Deneme 281, g)Deneme 282 ve h)Deneme 283.....	153
Şekil 78. Gaz kirletici değerleri kullanılarak eğitilen öğrenme modelleri sonucu tahmin edilen değerler ile 2023 yılı ilk altı ay gerçek değerler kolerasyon	154
Şekil 79. Gaz kirletici değerleri kullanılarak eğitilen öğrenme modelleri sonucu tahmin edilen değerler ile 2023 yılı ilk altı ay gerçek değerler arasındaki zamansal ilişki.....	155
Şekil 80. Pm ₁₀ , meteorolojik parametreler, gaz kirletici verileri ve trafik verileri kullanılarak yapılan tahminlerde en etkili öğrenme modelleri RMSE değerleri ..	157
Şekil 81. Trafik verileri kullanılarak yapılan tahminlerde en etkili öğrenme modelleri tahmin değerleri (sarı) ve gerçek değerler (mavi) program çıktıları a)Deneme 298, b)Deneme 302, c)Deneme 306, d)Deneme 310, e)Deneme 319, f)Deneme 320, g)Deneme 321 ve h)Deneme 322.....	158
Şekil 82. Trafik verileri kullanılarak yapılan tahminlerde en etkili öğrenme modelleri kolerasyon ilişkisi program çıktıları a)Deneme 298, b)Deneme 302, c)Deneme 306, d)Deneme 310, e)Deneme 319, f)Deneme 320, g)Deneme 321 ve h)Deneme 322	159
Şekil 83. Trafik verileri kullanılarak yapılan tahminlerde en etkili öğrenme modelleri gerçek değerden sapma saçılım grafikleri program çıktıları a)Deneme 298, b)Deneme 302, c)Deneme 306, d)Deneme 310, e)Deneme 319, f)Deneme 320, g)Deneme 321 ve h)Deneme 322.....	160
Şekil 84. Trafik verileri kullanılarak eğitilen öğrenme modelleri sonucu tahmin edilen değerler ile 2023 yılı ilk altı ay gerçek değerler kolerasyon.....	161

Şekil 85. Trafik verileri kullanılarak eğitilen öğrenme modelleri sonucu tahmin edilen değerler ile 2023 yılı ilk altı ay gerçek değerler arasındaki zamansal ilişki 162



KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

Ayr	: Ayrım
AzzCO	: Aziziye Ölçüm İstasyonu Karbonmonoksit Verileri
AzzNO	: Aziziye Ölçüm İstasyonu Azotmonoksit Verileri
AzzNO2	: Aziziye Ölçüm İstasyonu Azotdioksit Verileri
AzzNOX	: Aziziye Ölçüm İstasyonu Azotoksit Verileri
AzzPM10	: Azizizye Ölçüm İstasyonu Pm ₁₀ Verileri
AzzSO2	: Azizizye Ölçüm İstasyonu Kükürtdioksit Verileri
BAP	: Bilimsel Araştırma Projeleri
CBS	: Coğrafi Bilgi Sistemleri
ÇŞİDB	: Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı
E	: East (Batı)
HKİ	: Hava kalitesi indeksi
HYSPLIT	: Hybrid Single Particle Langrangian Integrated Trajectory (Hibrit Tek
İst	: İstasyon
MAE	: Ortalama Mutlak Hata
MATLAB	: Matrix Laboratory
MkzNO	: Merkez Ölçüm İstasyonu Azotmonoksit Verileri
MkzNO2	: Merkez Ölçüm İstasyonu Azotdioksit Verileri
MkzNOX	: Merkez Ölçüm İstasyonu Azotoksit Verileri
MkzO3	: Merkez Ölçüm İstasyonu Ozon Verileri
MkzPM10	: Merkez Ölçüm İstasyonu Pm ₁₀ Verileri
MkzSO2	: Merkez Ölçüm İstasyonu Kükürtdioksit Verileri
MSE	: Ortalama Kare Hatası
N	: North (Kuzey)
NOAA ARL	: Ulusal Okyanus ve Atmosfer Dairesi-Hava Kaynakları Laboratuvarı
OMGİ	: Otomatik Meteoroloji Gözlem İstasyonu Parçacık Langrangian Entegre Yörünge)
PdkCO	: Palandöken Ölçüm İstasyonu Karbonmonoksit Verileri
PdkNO	: Palandöken Ölçüm İstasyonu Azotmonoksit Verileri
PdkNO2	: Palandöken Ölçüm İstasyonu Azotdioksit Verileri
PdkNOX	: Palandöken Ölçüm İstasyonu Azotoksit Verileri

PdkO3	: Palandöken Ölçüm İstasyonu Ozon Verileri
PdkPm10	: Palandöken Ölçüm İstasyonu Pm ₁₀ Verileri
PdkSO2	: Aziziye Ölçüm İstasyonu Kükürtdioksit Verileri
Pm	: Partikül Madde
Post	: Son
Pre	: Ön
PsnPM10	: Pasinler Ölçüm İstasyonu Pm ₁₀ Verileri
RH	: Relative humidity (Bağıl Nem)
RMSE	: Kök Ortalama Kare Hatası
SVM	: Destek Vektör Makineleri
ThnCO	: Taşhan Ölçüm İstasyonu Karbonmonoksit Verileri
ThnNO	: Taşhan Ölçüm İstasyonu Azotmonoksit Verileri
ThnNO2	: Taşhan Ölçüm İstasyonu Azotdioksit Verileri
ThnNOX	: Taşhan Ölçüm İstasyonu Azotoksit Verileri
ThnPM10	: Taşhan Ölçüm İstasyonu Pm ₁₀ Verileri
ThnPM2.5	: Taşhan Ölçüm İstasyonu Pm _{2,5} Verileri
TrfIST	: Trafik Ölçüm İstasyonu Trafik Verileri
UHKİA	: Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı
US EPA	: Birleşik Devletler Çevre Koruma Ajansı
YSA	: Yapay Sinir Ağları
%	: Yüzde
°C	: Santigrat Derece
CO	: Karbon Monoksit
hPa	: Hectopascal (=1 Milibar)
kg	: Kilogram
kPa	: Kilo Paskal
m	: Metre
m ²	: Metre Kare
m ³	: Metre Küp
mbar	: Milibar
mm	: Mili metre
MW	: Mega watt
nm	: Nanometre
NO	: Azot Monoksit

NO ₂	: Azot Dioksit
NOX	: Azot Oksitler
O ₃	: Strosferik Ozon
Pm ₁₀	: Partikül Madde (10 mikrometreden küçük)
Pm _{2,5}	: Partikül Madde (10 mikrometreden küçük)
ppb	: Parts per billion (milyarda bir birim)
ppm	: Parts per million (milyonda bir birim)
R ²	: R Kare
sn	: Saniye
SO ²	: Kükürtdioksit
µm	: Mikro metre



GİRİŞ

Tarih boyunca insan; antik çağlarda günlük ihtiyaçlarını karşılamak için basit araç gereçler yaparken sanayi devriminde buharlı makineler üretmiş (Endüstri 1.0, 1800'li yıllar); 20. yy'de iş bölümüne dayalı elektrik enerjisi ile seri üretimler yapmış (Endüstri 2.0, 1900'li yıllar), 20. yy sonunda imalat otomasyonu, bilgi teknolojileri kullanmış (Endüstri 3.0, 1940-2000) ve teknolojinin gelişmesine öncü olmuştur. Günümüzde Siber-Fiziksel Sistemlere dayalı üretimin devreye girişiyle (Endüstri 4.0, 2000-...), yapay zekâ, 3D (üçboyutlu) yazıcılar, robotik, biyoteknoloji, nanoteknoloji gibi teknolojilere sahip olan insanoğlu, antik çağlarda ihtiyaçlarının bir bölümünü karşılayabilmek için başka insanlara ihtiyaç duymuş böylece topluluklar halinde yaşamaya başlamış ve şehirler kurmuşlardır.

1700'lerin sonlarında James Watt tarafından icat edilen buharlı makineler, 1800'lerde ulaşım ve üretim alanlarında kullanılarak Birinci Endüstri Devrimi'ni tetikledi. Bu dönemde seri üretim teknolojileri gelişti, üretim ve pazarlama hacmi arttı, ürün çeşitliliği ve kalitesi yükseldi. İkinci Sanayi Devrimi'nde ise temel üretim girdileri ve enerji kaynaklarında değişiklikler yaşandı; petrol, çelik, elektrik ve kimyasal maddeler gibi yeni unsurlar üretim sürecine dahil edildi. Bu değişikliklerle birlikte sanayi ve seri üretim daha da ilerledi. 20. yüzyılın başlarında kömür yerine petrolün kullanılması ve içten yanmalı motorların geliştirilmesiyle İkinci Sanayi Devrimi gerçekleşti. II. Dünya Savaşı'nın ardından elektronik, bilgi ve iletişim teknolojileri hızla gelişti; bilgisayarlar ve robotik kollar üretim süreçlerinde kullanılmaya başlandı. 1940'lardan 2000'li yıllara kadar süren bu döneme Üçüncü Sanayi Devrimi denildi. Programlanabilir bilgisayar Colossus'un icadı, ilk transistörlerin üretilmesi, Bilgisayar Kontrollü (CNC) makinelerin geliştirilmesi ve Programlanabilir Mantıksal Denetleyicilerin (PLC) ortaya çıkmasıyla birlikte otomasyon üretimde ileri bir seviyeye ulaştı. Bilgisayar, fiber optik, mikroelektronik, lazer gibi teknolojilerin yanı sıra nükleer enerji, telekomünikasyon, biyogenetik ve biyotarım gibi bilim alanlarındaki ilerlemeler de üretim süreçlerini etkiledi. Gelişmiş ülkeler 2008 ekonomik krizi sonrasında imalat sanayilerini tekrar harekete geçirmek için bilgi-iletişim teknolojilerini ve dijital imalat teknolojilerini uygulamaya odaklanarak yeniden endüstrileşme stratejileri geliştirmeye başlamışlardır. Böylece Endüstri 4.0 kavramı ilk defa 2011 yılında Almanya'nın Hannover kentinde düzenlenen fuarda kullanılmıştır. Dördüncü Sanayi Devrimi yani Endüstri 4.0; akıllı ve birbiriyle iletişim içindeki makinelerle, yapay zekâ uygulamaları eşliğinde gerçekleştirilen üretim süreçlerini ifade etmektedir (Erkekoğlu ve Uslu 2021).

Tüm bu endüstri devrimleri ile beraber, şehirler; tarihin akışı ile beraber gelişme göstererek dünya nüfusunun artışına paralel olarak hızla yükselen nüfus artışına maruz kalmıştır. Dünya nüfusu bazı tahminlere göre 2022 yılında 8 milyar olup bu nüfusun büyük bir bölümü şehirlerde yaşamakta ve şehirlerde yaşayan nüfus oranı da her geçen gün artmaktadır. Dünya Sağlık Örgütü'nün yanı sıra birçok kuruluşun raporuna göre, dünya üzerinde şehirlerde yaşayan nüfus oranının %50-55 bandına kadar ulaştığı ve bu oranın git gide artacağı öngörülmektedir.

Şehir nüfusundaki hızlı artış (orantısız göç) oranı pek çok problemi de doğal olarak beraberinde getirmiştir. Çağlar içerisindeki şehirleşme sürecinde; ilk çağlarda, su kaynakları, tarım, savunma ve avcılık gibi sorunlar daha çok ön planda iken sanayi ve teknolojinin hızla gelişmesine paralel olarak artan nüfus oranlarının da katkısıyla günümüz şehirlerinde; yaşam koşullarının zorlaşması, suç oranlarının artması, güvenli gıdaya ulaşma gibi temel problemlerin yanı sıra halk sağlığı ve pek çok çevresel sorunlar da göz ardı edilemeyecek seviyelere yükselmiştir. Bu sorunları; çevre kirliliği (su, toprak, hava kirliliği, gürültü, ışık vb.), içme suyu sıkıntısı, su kıtlığı (kullanım), kaynak kıtlığı, göç ve plansız kentleşme, ulaşım (trafik), yeşil alan eksikliği, yetersiz altyapı, büyük afetler, karbon salınımı, radyasyon, aşırı hava olayları ve enerji krizi gibi ana başlıklar altında sıralayabiliriz.

Kentlerde diğer büyük çevresel sorunların yanı sıra havaya dair sorunlar sera etkisi (ortalama sıcaklığın artması-iklim değişikliği) ve hava kirliliğidir. Yani troposferdeki gazların bir kısmı iklim değişikliğini tetiklerken bir kısmı da hava kirliliğini tetiklemektedir. Karbon dioksit, metan, diazot monoksit, su buharı, ozon gibi gazlar sera etkisini tetiklerken; hidrofloro/perfloro karbonlar, endüstriyel üretim sonucu oluşan nitrojen florür ve kükürt florürler ve CFCler sera etkisine olumsuz katkıda bulunurken, kükürt oksit azot oksit gibi inorganik gazlar, PSS, TSDD, PCBS, BTX gibi inorganik gazların yanı sıra partikül maddeler (Pm)'lerde hava kirliliğine son derece olumsuz katkıda bulunmaktadır. Hava kirliliği; çeşitli insan aktiviteleri sonucu yani antropojenik kaynaklardan atmosfere salınan ve havanın normal bileşenleri arasında yer almayan kirletici emisyonlarının; havanın bileşimini bozması sonucu çevre sağlığının olumsuz yönde etkilemesi olarak tanımlanabilir. Hava kirliliği probleminin çözümü adına, hava kirleticilerinin (gaz/Pm) mekânsal ve zamansal kantitatif ölçümlerinin belirli periyotlarda yapılarak, kent atmosferinde modellenmesi, çevre ve insan sağlığı üzerine etkilerinin araştırılması ve kısa/orta/uzun vadede alınabilecek önlemlerin belirlenmesi gerekmektedir.

Kent atmosferindeki hava kirleticilerin insan sağlığı üzerinde hem akut hem de kronik etkileri olduğu ve başta solunum yolları olmak üzere pek çok organı etkilediği bilinmektedir

(Bernstein *et al.* 2004; Kampa and Castanas 2008; Glencross *et al.* 2020). Yapılan araştırmalarda; hava kirleticilere kısa ve uzun vadeli maruziyetlerde erken ölüm ve pek çok hastalığın tetiklendiği, ruh sağlığı sorunlarının ortaya çıktığı belirtilmektedir. Bu kirleticiler; üst solunum yolu tahrişi, kronik solunum yolları rahatsızlıkları, solunum yolu enfeksiyonları, akciğer kanseri, kronik bronşit, kalp ve akciğer hastalıklarına zemin hazırlama ve astım atakları gibi pek çok sağlık sorununa neden olmaktadır (Pope *et al.* 1995; Dominici *et al.* 2003; Rückerl *et al.* 2011; Manisalidis *et al.* 2020). 31 Ekim-12 Kasım 2021 tarihleri arasında, İngiltere'nin Glasgow kentinde yapılan Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Konferansında da (COP26) vurgulandığı üzere, yılda 7.8 milyon kişinin hava kirliliğine bağlı sebeplerle farklı türden kanser vakalarına yakalandığı belirtilmiştir.

“Akıllı Kentler” olgusu ; pek çok sağlık problemine neden olan kentsel hava kirliliğine çözüm arayışının yanı sıra diğer kentsel sorunların çözümünde de, inovatif bir süreç olarak gelişmeye devam etmektedir.

Akıllı kentler kavramı, nesnelerin interneti, bulut bilişim, büyük veri, coğrafi bilgi sistemleri gibi yeni nesil bilgi iletişim teknolojileriyle etkin bir şehir yönetimini kurmayı, yaşam kalitesini teknoloji ile arttırmayı, paydaşların katılımıyla sürdürülebilir bir kentsel gelişme vizyonu oluşturmayı ve kentlerin en önemli problemlerine akıllı uygulamalar yardımıyla çözümler sunmayı hedeflemektedir (Sınmaz, 2013; Uçar vd., 2017; Akdamar, 2017; Akiner, 2016). Akıllı kent alt alanlarından biri olan Akıllı Çevre ise, ekosistem kirliliğinin (hava/su/toprak) yanı sıra her türden atık, karbon salınımları (karbon ayak izi), radyasyon gibi farklı kirlilik türlerinin ortaya çıktığı kentlerdeki çevresel problemlerin çözümünde akıllı kent alt alan verilerini kullanabilen akıllı teknolojilerin bütünüdür. “Akıllı Çevre Uygulamaları” yardımıyla kent atmosferinde önemli problemlere neden olan hava kirleticilerinin tüm olumsuz etkileri azaltılabilecek hatta ortadan kaldırılabilir (Korkmaz and Ceylan, 2021b).

Akıllı kentlerde hava kirliliği ile mücadele etmek için transdisipliner bir yaklaşımın benimsenmesi gerektiği düşünülmektedir. Bu yaklaşım, farklı disiplinlerden uzmanların bir araya gelerek bir sorunu ele almalarını ve ortak bir çözüm üretmelerini sağlar. Hava kirliliği değişken bir yapıya sahip olduğundan, çözüm için farklı disiplinlerin bir araya gelmesi kaçınılmazdır. Örneğin, meteoroloji uzmanları hava kalitesinin ölçümü için gerekli verileri sağlayabilirken, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) uzmanları alansal veri analizi yaparken, çevre mühendisleri hava kirliliğinin kaynaklarını belirleyerek çözüme yönelik öneriler sunabilirler. Ayrıca, sosyal bilimciler hava kirliliğinin insan sağlığı üzerindeki etkisini inceleyerek, toplumda farkındalık yaratılmasına katkı sağlayabilirler. Bu sebeple, yaşamımızı devam ettirdiğimiz Erzurum kent özelinde de, çevre mühendisleri, meteorologlar, coğrafyacılar, sosyal

bilimciler ve diğ er uzmanların bir araya gelerek hava kirliliği sorununa transdisipliner bir yaklaşımla c  z m bulmaları gerekmektedir.

Bir şehirde hava kalitesi uygulamaları genellikle c eşitli sensörler ve veri toplama sistemleri aracılığıyla hava kalitesini izlemek için kullanılır. Sensörlerden gelen verilere dayalı olarak güncel hava kalitesi bilgi akışı suretiyle modelleme c alışmaları yapılabilir. Belirli zaman periyotları için hava kalitesi trendleri ve istatistikleri hakkında bilgi alınabilir. Hava kirliliği zaman serisi analizleri; belirli bir zaman aralığı boyunca ölçülen hava kalitesi verileri aracılığıyla mevsimsel değişimlerin, tepe noktalarının ve dalgalanmaları ortaya koyar. Erzurum'da da bu tür analizler yapılabilir ve hava kirliliği seviyeleri, mevsimsel değişiklikler, belirli günlerdeki tepe noktaları ve diğ er trendler belirlenebilir. Bu veriler daha sonra modellere aktarılarak c  z m önerilerinin geliştirilmesine yardımcı olabilir.

Kent içerisinde pek c ok noktadan alınan farklı verilerin kümülatif toplamı; büyük veri (big data) ağ yapılarının oluşturulmasında ve kent içerisinde hava kalitesinin iyileştirilmesinde karar mekanizması olarak kullanılır. Büyük veri analizi, hava kirliliği c alışmalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Erzurum'da da büyük veri analiziyle hava kirliliği c alışmaları hava kalitesinin takibinde kullanılabilir. Bu c alışmalarda, farklı sensörlerden ve diğ er kaynaklardan elde edilen veriler, makine öğrenmesi ve yapay zeka teknikleri kullanılarak işlenerek analiz edilir. Bu analizler sonucunda, hava kalitesi modellemeleri oluşturulabilir ve hava kirliliği kaynakları tespit edilmek suretiyle önlemler alınabilir. Ayrıca, hava kirliliği seviyeleri hakkında gerçek zamanlı bilgi aktarımı sağlanarak, halkın bilinçlendirilmesi ve alınması gereken önlemlerin hızlandırılması mümkün olur.

Büyük veri kullanılarak oluşturulan modelleme yöntemleri; gerçek durumların ve problemlerin; matematiksel modeller yardımıyla anlaşılabilmesini mümkün kılar. Günümüzde; hava kirliliği araştırmalarında yaygın olarak kullanılan modelleme teknikleri, hava kirleticilerini tanımlamak ve bunların c evre sağlığı üzerindeki etkilerini daha iyi anlamak için kullanılır. Hava kirliliği modelleri; atmosferdeki hava kirleticilerinin konsantrasyonu, kirleticilerin yağış miktarı (c  kelme), meteorolojik parametreler ve diğ er faktörler arasındaki ilişkiyi açıklayan sayısal ölçüm araçlarıdır.

En c ok tercih edilen modelleme yöntemleri genel olarak    gruba ayrılmaktadır.

- **Reseptör Modeller:** Bu modelde; sektör analizleri, konsantrasyon ölçümleri ve konsantrasyon eğrileri gibi veriler kullanılmaktadır.
- **Fiziksel modeller:** Bu modelde;  l  klendirilmiş modeller yardımıyla laboratuvar ortamında gerçekleştirilen simülasyon ve deneyler kullanılmaktadır.

- **İstatistiksel Modeller:** Bu modelde; hava kalitesi, meteorolojik koşullar ve diğer faktörler (trafik, kent dokusu vb.) arasındaki ilişkilerin tespitinde algoritmalar kullanılmaktadır.

(Ayturan *et al.* 2018; Daly and Zannetti 2007; Srivastava and Rao, 2011).

Yapılan çalışmada; yukarıda özetlenen modeller arasından istatistiki modelleri kullanarak anlamlı ilişkiler ortaya konulmuştur.

Hava kalitesi modellerinin oluşturulmasında; kent içerisinde yer alan pek çok ölçüm istasyonundan alınan veriler kullanılmaktadır. Hava kalitesi verilerinin yanı sıra, kent içerisinde periyodik olarak ölçülen trafik verileri ve meteorolojik veriler, hava kalitesi izleme ağına aktarılacak suretiyle analiz edilmektedir. Akıllı kentlere entegre edilebilen hava kalitesi izleme ağı ölçüm verileri modellenenerek, kentlerin hava kalitesini anlamak, objektif bir şekilde değerlendirmek ve iyileştirmek için kullanılmaktadır. Hava kirleticilerinin zamansal azalış ya da artış trendleri analiz edilmek suretiyle kirlilik seviyeleri belirlenerek hava kalitesi haritaları oluşturulabilir. Bu haritalar yardımıyla, kirlilik seviyelerinin şehir içinde farklı bölgelerdeki değişimleri net bir şekilde ortaya konularak hava kalitesi seviyesi açısından öncelikli bölgeler belirlenebilir. Hava kalitesi izleme ağı verileri, kentlerde oluşan yeni yerleşim yerleri içinde kolayca uygulanabilir. Aynı zamanda sürekli olarak sağlanan veri akışı, hava kirliliği düzeylerini takip ederek hızlı müdahaleyi mümkün kılar ve halkı hava kalitesi konusunda bilgilendirmek ve önlem almak için uyarıcı olur. Bu hızlı bilgilendirme ağı, halk sağlığının korunması, çevre bilincinin oluşması ve çevreye duyarlı davranışlar geliştirmek adına da önem arz etmektedir.

Hava kalitesi izleme ağı verilerinin modelleme sonuçları, hava kalitesini iyileştirmeye yönelik projelerin planlanması ve uygulanmasında kritik bir rol oynar.

Ayrıca izleme verileri, bir taraftan ulusal veya uluslararası hava kalitesi standartlarına uyumu değerlendirmek ve bu standartları yerine getirmek adına politika ve stratejiler geliştirilmesine katkı sağlarken diğer taraftan büyük altyapı projeleri ve endüstriyel faaliyetlerin çevresel etki değerlendirmelerinde de kullanılabilir. Kentsel sürdürülebilirlik adına; bu verilerin sürekli olarak ölçülmesi, depolanması, analiz edilmesi ve kullanılması, kentsel planlama ve yönetimde daha bilinçli ve etkili kararlar almayı da mümkün kılar.

Erzurum kenti; deniz seviyesinden ortalama 2000 metre yükseklikte, karasal iklimin etkin olduğu, uzun kış mevsiminin yaşandığı, fosil kökenli yakıtların kullanılması sebebiyle (Taş kömürü-Linyit vb) gerek ısınmadan gerekse artan trafik yoğunluğundan kaynaklanan hava kirliliği problemini yıllar boyunca yaşayan bir şehir olarak Türkiye genelinde ön plana

çıkmiştir. Ayrıca; coğrafik özellikleri nedeniyle dağlarla çevrili bir çukur ova şehri olması uzun vadeli hava kirliliğinin yaşanmasında etkin diğer bir faktördür.



Şekil 1. Erzurum kent merkezinde inversiyon tabakası

Birbirini tetikleyen bu olumsuz koşulların çözümü adına; 2004 tarihinden itibaren yine fosil kökenli bir yakıt olan doğalgaza geçilmiştir. Ancak, genelde sosyoekonomik durumu iyi olmayan halkın, bulduğu her tür atığı (lastik, çerçöp, atık yağ vb.) ve kalitesiz kömürü yakması gibi sebeplerle beklenen olumlu sonuçlara ulaşamamıştır. Köyden kente ve kentler arası göçlerle ciddi boyutlara varan nüfus artışı nedeniyle; yeni kurulmuş ve kurulmakta olan pek çok semt ile beraber Erzurum kenti hava kalitesindeki düşüş hala hazırda devam etmektedir.

Tüm bu sebeplerden dolayı; Erzurum’da hava kirliliği sorununun kalıcı ve etkin çözümünde akıllı kent kavramının kullanılarak çözüm önerilerinin geliştirilmesi ve kent içerisinde hava kirliliği konusunda yeni bir vizyonun ortaya konulması gerektiği gün gibi aşikardır.

Bu çalışmamızda önerdiğimiz akıllı kent hava kalitesi izleme ağı yardımıyla; Erzurum kenti hava kirliliği problemine kalıcı ve etkin çözümler üretilebilecektir. Toplanan veriler yardımıyla; atmosferik kirleticilerin zamansal, mekânsal ve uzun menzil taşınımlarının modellenmesi; alansal kirlilik haritalarının oluşturularak gelecekteki konsantrasyonlarının tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında, Erzurum kent merkezinde 2016-2023 tarihleri arasında atmosferik kirletici konsantrasyonlarının yanı sıra meteorolojik parametreler ve diğer veriler (Trafik-kent planı-kent dokusu) kullanılarak kent atmosferi hava kirliliği modellenmesi yardımıyla elde edilen bulgular sonucunda istatistiki analizler yapılmıştır.

2016-2023 yılları boyunca ölçümlenen yedi yıllık verilerin (Partikül maddeler ve kirlletici gazlar) zamansal ve mekânsal değişimi incelenmiş, kirlilik değerleri ile meteorolojik parametreler arasındaki korelasyon belirlenmiştir. Ölçüm sonuçlarında hareketle, partikül madde konsantrasyonlarının çok yüksek olduğu günlerde, bu kirliliğin uzun menzil kaynakları ve taşınım (geri) yörüngeleri incelenmiştir. Bu taşınım yörüngeleri ve kentin hava kalitesi üzerinde etkili uzun menzil kirlletici kaynaklarının konumları birlikte değerlendirilerek, bölgedeki mevcut hava kalitesinin artırabilmesi adına yorumlar yapılmıştır.

Akıllı kent hava kalitesi izleme açısından alınan veriler Coğrafi Bilgi Sistemlerinde (CBS) kullanılarak alansal hava kalitesi kirlilik haritaları çizilmiş, gelecekteki $Pm_{2,5}$ konsantrasyonları makine öğrenmesi yardımıyla tahmin edilmiştir. Ayrıca; 2016-2023 yılları boyunca ölçümlenen yedi yıllık veriler (Partikül maddeler ve kirlletici gazlar), kullanılarak makine öğrenmesi yardımıyla kentin hava kirliliği; 19 adet farklı model üzerinde çalışılmış ve modellerden elde edilen sonuçlar Erzurum hava kalitesi tahmininde kullanılmıştır.

Belirli bir bölgedeki hava kalitesini direk/indirek etkileyen kirlletici konsantrasyonları; yerel emisyonlara, çizgisel kaynaklara (trafik) ve ortam koşullarına (meteorolojik parametreler) bağlıdır. Bu parametrelerin değişkenliğinden dolayı, hava kirliliğine sebep olan kirlleticilerin konsantrasyonları kent içerisindeki farklı bölgelerde farklı değerlere sahip olabilmektedir. Farklı bölgelerdeki farklı değerlerden yola çıkılarak yer seviyesinde sabit istasyonların belirli bir alanda belirli bir yükseklikte üç boyutlu hava kalitesi ölçümü ve yine bu ölçümlerden yola çıkarak üç boyutlu kirlilik dağılım profili modellemesi ihtiyacını karşılayamaması sorunu ortaya çıkmaktadır. Kentsel çevre kirliliğine ve buna bağlı olarak ortaya çıkan ciddi sağlık problemlerine neden olan hava kirlleticilerinin zamansal ve mekânsal değişimlerinin akıcı bir şekilde doğru ölçümlenmesinden kaynaklanan sorunlara çözüm önerisi sunmak amacıyla “Akıllı Kentlere Uyumlu Sensör Tabanlı Düşük Maliyetli Drona Entegre Dış Atmosfer Hava Kalitesi Ölçüm Ünitesi” tasarlanarak hava kirlilik parametrelerinin (Pm_{10} , $Pm_{2,5}$, SO_2 , NO_2 ve O_3) yanı sıra meteorolojik parametreler (sıcaklık, nem, atmosferik basınç vb.) anlık olarak lokal bir alanda hareketli dron yardımıyla üç boyutlu ölçümlenebilecektir. Ölçüm cihazımızın tasarımı ve üretimi için hazırladığımız projemiz; Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından **FDK-2023-12295 nolu Doktora Araştırma Projesi** olarak desteklenmiştir (EK 2. Bilimsel Araştırma Projesi “BAP Projesi” Kabul Tutanağı).

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (ÇŞİDB), 2023 yılı itibariyle üç boyutlu ortamda hava kalitesi değerlerini tespit etmek amacıyla; hava kalitesi yönetiminde kullanılan elektronik karar destek araçlarına bir yenisi olan yerli ve milli yazılımımız “Yeni Emisyon Tahmin ve Değerlendirme Sistemi (NEFES)”i eklemiştir. Çevre Yönetimi Genel

Müdürlüğünün son teknolojiyle geliştirdiği üç boyutlu ortamda hava kalitesi değerlerinin tespitini sağlayan Yeni Emisyon Tahmin ve Değerlendirme Sistemi (NEFES) ile sanayi, ulaşım, orman yangını, toz taşınımı gibi çok sayıda etmen ele alınarak, üç boyutlu ortamda şehirlerin dijital ikizleri üzerinden hava kalitesi değerleri ölçülmektedir. Tespit edilen değerler üzerinden hava kalitesi değişimi incelenerek hava kalitesinin iyileştirilmesi için gereken önlemler hayata geçirilmektedir. İlerleyen aşamalarda, prototipi tamamlanan “Akıllı Kentlere Uyumlu Sensör Tabanlı Düşük Maliyetli Drona Entegre Dış Atmosfer Hava Kalitesi Ölçüm Ünitesi” ile alınacak verilerin NEFES programı ile de entegre edilmesi planlanmaktadır.

Kent içerisinde hava kalitesinin iyileştirilmesi açısından kısa, orta ve uzun vadede alınabilecek önlemler sıralanarak eylem planlarında kullanılabilecek öneriler sunulmuştur.

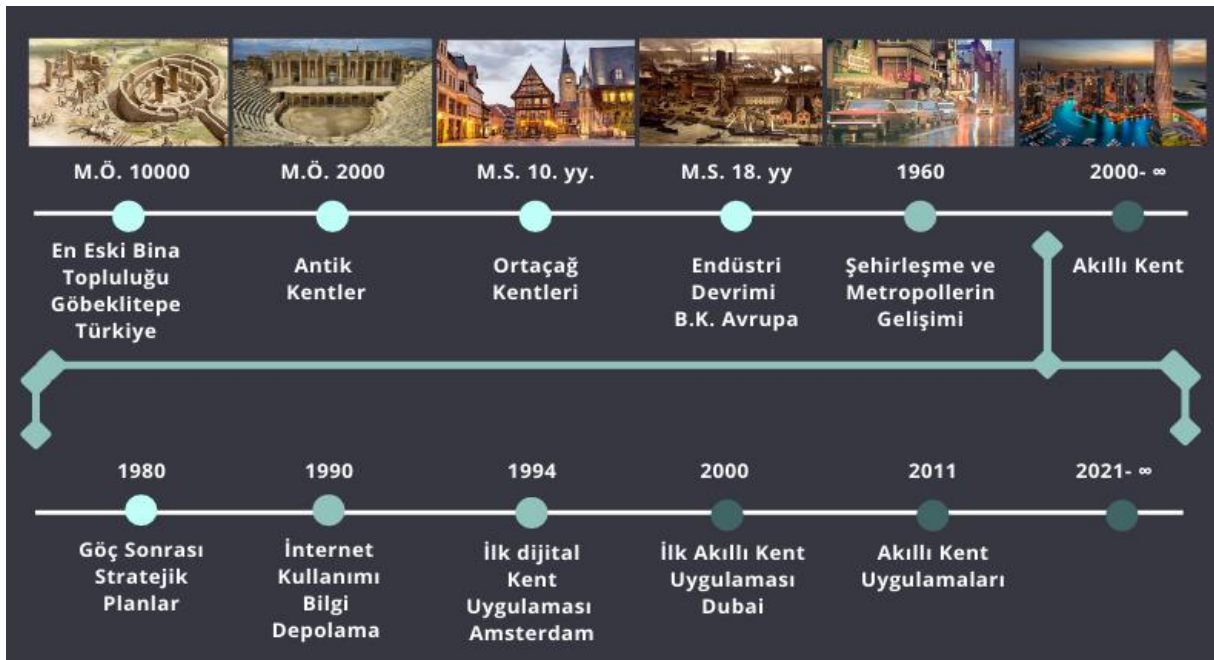
Çalışma sonucunda elde edilen bulguların, hava kirliliği konusunda önemli sorunlar yaşayan başka şehirler açısından da yol gösterici olabileceği ve gelecekteki çalışmalar açısından inovatif olarak öncülük edebileceği düşünülmektedir.

KURAMSAL TEMELLER

Akıllı Kentler Kavramı

Akıllı kent tanımı

Zamanla artış gösteren pek çok problemle karşı karşıya kalan günümüzün mega şehirleri, mevcut problemlerin çözümü adına teknolojik alt yapı olanaklarını (sensör teknolojileri, bilgi iletişim teknolojileri, bilgisayar programları ve modellemeleri vb.) tüm yönleriyle kullanarak bu sorunlara kolay ve hızlı çözümler bulabilme çabası içerisinde. Sayısız kamera ve sensör yardımıyla 7/24 alınan anlık veriler; büyük veri (Big Data) merkezinde toplanarak ana komuta masasında sürekli analiz edilmek suretiyle gerek anlık, gerekse geleceğe dair olası problemlerin çözümü için kararlar alınıp ilgili birimlere aktarılmaktadır. Kameralar yardımıyla trafik ve güvenlik gibi temel sorunlara çözümler sunulurken, akıllı şebekeler yardımıyla da enerji kullanımının verimliliği konusunda daha ekonomik şehirler tasarlanmaktadır. Nesnelerin interneti ve otonom teknolojiler yardımıyla insanlara, daha güvenli ve konforlu bir yaşam sunulmaya çalışılmaktadır. Böylece kendi kaynaklarını en verimli şekilde kullanan, en az atık oluşumu ile ekosisteme dost, karbon salınımları minimize edilmiş, yenilenebilir hammadde ve enerji kaynaklarını üretebilen ekolojik şehirler oluşturularak gelecek nesillere yaşanabilir bir dünya bırakma çabası hedeflenmiştir (Karadağ 2013).



Şekil 2. Akıllı kent kavramının tarihsel süreç içerisindeki aşamaları

Akıllı kentler kavramı son yıllarda hızla gelişme gösteren ve gelecekte de önemi gittikçe artan bir kavram haline gelecektir. Bu kavramın dünyada hızla gelişmesi ile birlikte “Akıllı Kentlerin” birçok tanımı da ortaya çıkmıştır.

ÇŞİDB’nın 2020-2023 Ulusal Akıllı Şehirler Stratejisi ve Eylem Planı kapsamında akıllı şehir kavramı; “paydaşlar arası işbirliği ile hayata geçirilen, yeni teknolojileri ve yenilikçi yaklaşımları kullanan, veri ve uzmanlığa dayalı olarak gerekçelendirilen ve gelecekteki problem ve ihtiyaçları öngörerek hayata değer katabilen çözümler üreten daha yaşanabilir ve sürdürülebilir şehir olarak” tanımlanmıştır. Ek olarak aynı belgede, Akıllı Kent kavramının ana amacının; şehirlerin sürdürülebilirliğini garanti altına almak, sosyal aktiviteleri artırarak hayat şartlarını kolaylaştırmak ve maksimum enerji verimliliğini sağlamak olduğu da belirtilmiştir (ÇŞİDB 2023, Akdamar 2017, Akiner 2016).



Şekil 3. Cohen'in akıllı şehir çemberi ve akıllı şehir alt alanları (Soe 2021)

Tüm dünyada kabul görmüş Stratejist Dr. Boyd Cohen tarafından Akıllı Kent kavramının gelişimi dönemlere ve ekollere bağlanarak izah edilmektedir (Şekil 3). Cohen'in bu modelinde; “**Akıllı Kent 1.0**” kavramı, çok uluslu şirketlerin liderliğinin baskın olduğu, teknoloji güdümlü şehir modelleri olarak tanımlanmaktadır. “**Akıllı Kent 2.0**” kavramı ise, teknoloji şirketlerinin değil, yerel yönetimlerin sahipliğinde yürütülen, daha çok yenilikçi belediye başkanları ve şehir yöneticileri ile birlikte, akıllı teknolojilerin ve inovasyonların etkin rol aldığı bir model olarak anlatılmaktadır. “**Akıllı Kent 3.0**” kavramında ise tüm bunların yanı

sıra problemlerin çözümünde, vatandaş katılımlı bir modelin ön plana çıktığı vurgulamaktadır (Yıldız 2018; Cohen 2014).

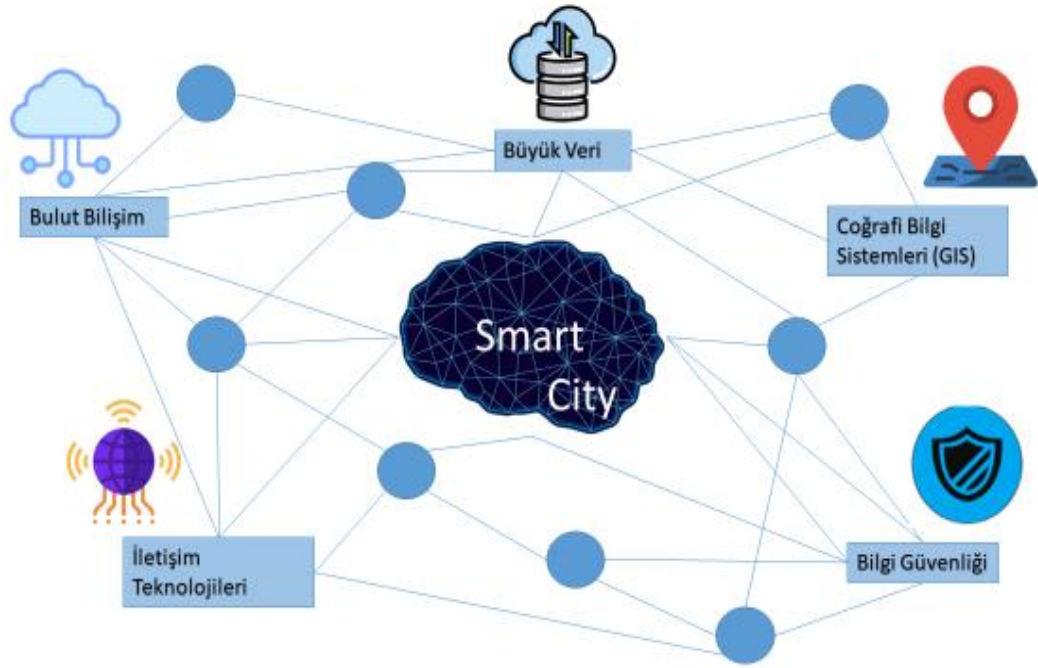


Şekil 4. Akıllı kent varyasyonlarının son yirmi yıllık süreçteki gelişim aşamaları

Son yıllarda Akıllı Kent 1.0/2.0/3.0'ın yanı sıra Akıllı Kent 4.0 (Smart City 4.0) kavramı da artık literatürlere girmiştir. Endüstri 4.0 (Industry 4.0) kavramı gibi Akıllı Kent 4.0 (Smart City 4.0) kavramı da yenilikçi ve yetenekleri hızlandıran, yeni endüstri modeline şehirlerin entegrasyonunu sağlayan yepyeni bir kavramdır. Bu kavram; üretimle direkt ya da dolaylı olarak ilişkili olan bütün birimlerin birbiri ile ortak çalışmasını sağlayan bir network planlayarak, dijital verilerin, yazılımın ve bilişim teknolojilerinin birbiri ile entegre olarak çalışmasını öngören Endüstri 4.0 yani dördüncü sanayi devrimi kavramına paralel olarak gelişme göstermiştir. Tüm Sürdürülebilir Akıllı Kent uygulamaları, nesnelerin interneti yardımıyla Endüstri 4.0 ile birlikte çalışarak bu kavramını bir üst aşamaya çıkarmıştır. Akıllı Kent 4.0'ın yanı sıra son yıllarda artık Akıllı Kent 5.0 da telaffuz edilmeye başlanmıştır. “Akıllı Kent 5.0” konsepti çok aracılı teknolojiye dayalı akıllı hizmetlerin bir ekosistemi olarak sunulmaktadır (Şekil 4). Yapay zeka sistemleri ve insanların işbirliği ile pek çok kararın verilebildiği bu konseptte, her akıllı hizmet bir otonom birim tarafından yönetilmektedir. Böylece veri akışının 5G yardımıyla son derecede hızlandığı, dijital uygulamaların ve otonom kontrollü teknolojilerin her alanda kullanıldığı, hatta karar verme süreçlerinin bile yapay zeka ve sinir ağları kontrolünde geliştiği bir sistem ortaya çıkmaktadır (Sviték 2019).

Akıllı kentlerin kullandığı teknolojiler

Akıllı Kentler; gerek var olan gerekse gelecekte yeni üretilecek olan en son teknolojiyi, kentin optimal yönetimine yardımcı olan alt alanlarında, inovatif olarak kullanmak zorundadır. Bu akıllı teknolojik uygulamalar ve alt yapılar, akıllı kent alt alanlarının teknolojik temelini oluşturmaktadır.



Şekil 5. Akıllı kent alt alanlarında en yoğun kullanılan akıllı teknolojiler

Akıllı kentlerin kullandığı bazı önemli teknolojik kavramlar şöyle açıklanabilir: **Büyük Veri (Big Data)**; lojistik, kamu hizmeti, telekomünikasyon, sağlık hizmetleri, devlet kuruluşları gibi birçok alanda kullanılan yüksek hacim, hız ve çeşitlilikte, sensörler yardımıyla pek çok noktadan anlık üretilen inovatif veri bütünüdür. Kent yönetiminde, büyük veri yardımıyla, sağlıklı ve sürdürülebilir kentlerin oluşturulması ve akıllı kentlerin altyapısının kurulması gibi amaçlar için mekânsal bilgi içeren verilerden yararlanılmaktadır. Bu nedenle mekânsal verilerin toplanması, işlenmesi, değerlendirilmesi ve en nihayetinde bilgiye dönüştürülmesi kent yöneticilerinin hızlı ve doğru kararlar verilebilmesi için önem arz etmektedir (Sagiroglu and Sinanc 2013). **İletişim Teknolojileri (IoT)**; nesnelerin interneti, bulut bilişim ve 5G bağlantı teknolojilerini kapsayan bilginin aktarılmasıyla ilgili tüm teknolojik altyapı ve donanımların bütünüdür (Madakam *et al.* 2015). **Bulut Bilişim (Cloud Computing)**; bu sistem; bilgisayarlar ve diğer akıllı cihazların iletişimi için gerektiğinde kullanılabilen internet tabanlı hizmetlerdir. Bilgisayarların, akıllı cihazların birbirleriyle ve kullanıcılarla karşılıklı bilgi paylaşımını gerçekleştirebilmek için bilginin muhafaza edildiği teknolojidir (Qian *et al.* 2009). **Coğrafi Bilgi Sistemleri (GIS)**; her türlü coğrafi verinin; üretilmesi, depolanması, işlenmesi, analiz edilmesi, paylaşılması için gerekli olan donanım, yazılım, insan kaynağı, standartlar ve yöntemler bütünüdür. Konum belirleme, grafikler, 3D haritalandırma ve dinamik haritalar CBS sisteminde kullanılan teknolojiler arasındadır (Chang 2016). **Bilgi Güvenliği (Information Security)**; bilginin gizliliği, bütünlüğü ve erişilebilirliği göz önüne alınarak artan risk ve siber saldırılara karşı akıllı platformlardaki verinin güvenli bir şekilde muhafaza edilmesidir. Sistem

altyapısının (ağ, yazılım, cihaz, veri seti vb.) ve teknolojinin bir bütün olarak korunabilmesi için siber saldırı ve risklere karşı her an hazırlıklı olunmasıdır (Usmonov 2021).

Akıllı kentlerin alt alanları ve genel özellikleri

Akıllı Kentler; var olan ve gelecekte de yeni üretilecek pek çok teknolojiyi ve yeniği kentin en optimum şekilde yönetilmesine yardımcı olan alt alanlarında kullanmaktadırlar. Bu akıllı teknolojiler ve alt yapılar, akıllı kent alt alanlarının teknolojik temelini oluşturmaktadırlar. Ayrıca bu alt alanlar; Akıllı Kent Koordinasyon merkezleri tarafından desteklenen bir uyum içerisinde birbirleriyle sürekli etkileşim halindedir. Böylece birbirlerinden bağımsızmış gibi görünen ama aslında ortak bir amaç için müthiş bir ahenk içerisinde çalışan sistemler yardımıyla, bütüncül bir akıllı kent networkü ortaya çıkmaktadır.



Şekil 6. Akıllı kent alt alanları

Bu network içerisinde en çok karşılaşılan akıllı kent alt alan kavramlarını kısaca şöyle özetleyebiliriz; **Akıllı İnsan**, farkındalığı, katılımcılığı ve yaratıcılığı gelişmiş, yaşam boyu öğrenmeyi düstur edinmiş, teknolojiyi hayatına dâhil etmiş bireydir (Gupta 2017) **Akıllı Güvenlik**, şehirde suça karşı vatandaşları korumak ve olağan üstü durumlarda en hızlı müdahaleyi sağlamak için tasarlanmış teknolojileri içeren güvenlik sistemlerinin bütünüdür (Moch and Wereda 2020). **Akıllı Yeşil Binalar**, konut kalitesi yüksek, enerji kaybı minimum, kendi enerjisini ve atığını sürdürülebilir bir şekilde yönetebilen, iklimlendirme ve enerji sistemleri açısından model olabilecek gelişmiş yapılardır (Razmjoo *et al.* 2021). **Akıllı Ekonomi**, akıllı endüstriyel sistemler yardımıyla mevcut kaynakları sürdürülebilir bir şekilde,

simbiyotik yaklaşımla en verimli haliyle kullanabilen ve artan tüketim için önlemler olarak yaşam kalitesini artırabilen ekonomi modelidir (Kumar and Dahiya 2017). **Akıllı Sağlık**, sağlık hizmetlerini çağın gereksinimlerine bağlı olarak, bir taraftan veri akışı yoluyla bireylerin farkındalıklarını artırarak sisteme entegre edebilen diğer taraftan da sağlık verilerini akıllı bir şekilde analiz ederek sürdürülebilir sağlık yönetimini başarabilen uygulama ve hizmetler bütünüdür (Pramanik *et al.* 2017) **Akıllı Yönetim**, analiz, planlama, uygulama, strateji ve politika geliştirme gibi kamu yönetimi süreçlerinde şeffaflık, katılımcılık ve hesap verebilirlik prensipleriyle daha hızlı karar vermeyi sağlayan sürdürülebilir yöntemler bütünüdür (Hajduk 2016). **Akıllı Ulaşım**, akıllı durakların, elektrikli araçların (düşük C salınımı), akıllı kavşakların, akıllı sinyalizasyon ve online ödeme sistemlerinin yanı sıra bir veya birden fazla ulaşım alternatiflerinin kontrol edilebilir bir network içerisinde yönetildiği sistemler bütünüdür (Bodhani 2012). **Akıllı Enerji**, yenilenebilir enerji kaynaklarını sürdürülebilir bir şekilde yüksek verimlilikle kullanabilen ve akıllı şebekeler ile desteklenen enerji yönetim sistemidir. Akıllı şebeke ise geleneksel ve dağıtık üretim elemanları, iletim hatları, operatörler ve tüketiciler gibi elektrik şebekesine bağlı bulunan çok sayıda birimden oluşan sistemler bütünüdür (O'Dwyer *et al.* 2019). **Akıllı Altyapı**, gerek tüm akıllı kent alt alanlarının entegrasyonu sonucu oluşan verileri gerekse hassas sensörler yardımıyla anlık alınan verileri aktaran, analizleyen, ölçen, izleyen ve kullanıcılara dağıtan sistemler bütünüdür (Berglund *et al.* 2020). **Akıllı Çevre**, ekosistem kirliliğinin (su/toprak/hava) yanı sıra gürültü, her türden atık, karbon salınımları (karbon ayak izi), radyasyon, ışık gibi farklı kirlilik türlerinin ortaya çıktığı kentlerdeki çevresel problemlerin çözümünde akıllı kent alt alan verilerini kullanabilen akıllı teknolojilerin bütünüdür (Kumar 2020; Ullo and Sinha 2020). **Akıllı Afet ve Acil Durum Yönetimi**, karşılaşılabilecek olağanüstü durumlarda olabilecek en kısa sürede müdahale ile can ve mal kaybını azaltan, afet ve acil durum karşısında en kısa sürede organizasyonu mümkün kılan, yine olağanüstü bir durumda acil afet ve eylem planlarını diğer akıllı alt alan verilerini de uygulamaya sokarak sürdürülebilir bir şekilde yönetebilen sistemler bütünüdür (Costa *et al.* 2022).

Dünyadaki akıllı kent uygulamaları

İçerdiği nüfus yoğunluğuna, sanayi ya da tarımdaki önemine bağlı olarak ülkeler mega kentlerini belirleyip akıllı kent stratejilerini özellikle bu kentler üzerine yoğunlaştırmışlardır. Kısa vadede tüm şehirlerin bütünüyle akıllı kent olması mümkün olmayıp kentler; bazı bölgelerde akıllı kent olma yolunda akıllı kent alt alanlarını uygulamaya başlamışlardır (Hall *et al.* 2000; Lai *et al.* 2020). Bu bölümde dünyadan ve ülkemizden markalaşmış ve akıllı kent uygulamalarını verimli bir şekilde kullanan mega kent örneklerinden en çarpıcı olanları detaylı

olarak incelenmiştir. Londra, Amsterdam, Barselona, Paris, New York, San Francisco, Singapur, Seul, Dubai, Berlin, Moskova, İstanbul ve Ankara akıllı kent uygulamalarını ve akıllı kent teknolojilerini dünyada en verimli şekilde kullanabilen ön plana çıkmış şehirlerdir (Elvan vd 2017). Bu şehirlerdeki önemli bazı uygulamalar aşağıda özetlenmiştir.

Londra’da; ulaşımında temassız ödeme ve sanal gerçeklik uygulamalarının yanı sıra vatandaşların yetkililere ulaşmasını kolaylaştıran “Fix My Street” uygulaması Londralıların karar verme süreçlerine katılımını desteklemektedir. Ayrıca; Talk London platformu, Croydon Teknoloji Merkezi, Londra altyapı haritalama uygulaması (IMA LDN), açık veri sistemi (London Datastore), düşük emisyon bölgesi (LEZ), ultra düşük emisyon bölgesi (ULEZ), sera gazı emisyonlarını ve trafik sıklığını azaltmak amacıyla “T-Charge” adı verilen emisyon ücreti uygulaması gibi önemli akıllı kent uygulamaları Londra’da aktif olarak kullanılmaktadır (Shamsuzzoha 2021).

Amsterdam’da Wi-Fi ve radyo frekanslarıyla yönlendirilebilen akıllı aydınlatma direkleri, akıllı trafik yönetim sistemi, IoT projeleri, Living Lab ve açık veri platformu (Amsterdam Datapunt Platformu) bulunmaktadır. Sensörler yardımıyla parlaklığı ayarlayabilen akıllı aydınlatma direkleri; trafik durumu, otopark alanları ve hava kirliliği ile ilgili veri toplayabilmekte ve bu verileri merkeze iletebilmektedir. Amsterdam ArenA İnovasyon Merkezinde akıllı kent uygulamaları ve teknolojileri üretilip geliştirilmektedir. Ayrıca Amsterdam’da doğrusal bir ekonomiden döngüsel bir ekonomiye geçişi sağlayan, atıkları geri dönüştürerek ve yeniden kullanarak azaltan Circular Amsterdam Platformu da inovasyonu yüksek bir uygulamadır.

Barselona’da; FabLab olarak adlandırılan dijital üretim teknolojilerini ve uygulamalarını üreten ve geliştiren bir eğitim merkezi kurulmuştur. MB92 Marina adında ekosisteme duyarlı çevreci bir yerleşim ve marina tesisi açılmıştır. Akıllı su yönetimi ve uzaktan sulama sistemleri ile şehirde bulunan parklarda sulamayı uzaktan kontrol etmek için bir SCADA (Supervisory control and data acquisition) (Danışmalı kontrol ve veri toplama sistemi) sistemi kurulmuştur. Ayrıca Sentilo olarak adlandırılan sistemle, sensörler tarafından elde edilen verilerin toplanması, depolanması ve kullanılmasını sağlayan açık kaynaklı bir platform oluşturulmuştur.

Paris’de, fikirlerin geliştirilip pazara sunulmasına yardımcı olan e-Sağlık kuluçka programı, vatandaşların çevrimiçi bir platform üzerinden toplumu fikir geliştirme platformu ve Paris kanalizasyon sisteminin yer altı bağlantılarını (ağın %60’ı buradan geçmektedir) kullanarak çalışan soğutma ağı (Bölgesel Soğutma) akıllı uygulamalardan birkaçıdır. Bir diğer

önemli proje olan IssyGrid projesi yardımıyla Paris'in Issy-les-Moulineaux bölgesinde akıllı şebeke konusunda araştırma ve geliştirme yapılmaktadır.

New York kentinde, ABD'nin en büyük bisiklet paylaşım programı Citibike uygulaması çevreci bir ulaşım şekli sağlamaktadır. Ayrıca Yeşil Altyapı (LinkNYC); yağmur suyunun toplandığı ve suyun doğal hareketiyle yönetilerek toprağa ve bitki örtüsü içeren bir ortama aktarıldığı bir sistem olarak kullanılmaktadır. New York'un Manhattan bölgesinde inşa edilen Hudson Yards bölgesi, büyük ölçekli bir yenileme çalışmasıdır. Hudson Yards; gelişmiş ticari binaların yanı sıra enerji, üretim tesisi ve akıllı şebeke gibi akıllı çözümleri barındıran bir yapıya sahiptir.

San Francisco'da Treasure adası Eko-Şehri, eski deniz üssü olan Treasure adasının yeniden inşa edilerek sürdürülebilir akıllı yaşam merkezi olarak yeniden yapılmasını amaçlanmaktadır. Bu alan; yeşil konutlar, su arıtma sistemi, rüzgar enerjisi kullanımı, rekreasyon alanları, alışveriş bölgesi ve yat limanı ile entegre yapay sulak alanları içeren bir yaşam merkezine dönüştürülmüştür. Ayrıca San Francisco'da kentsel eko haritaları gösteren bir sistem bulunmaktadır. Bu sistem çeşitli iklim eylemlerinin, maliyet ve etkilerini tahmin ederek etkilerin azaltılmasında katkı sağlamaktadır.

Singapur'da otonom araç girişimleri, sanal singapur, açık veri platformu (Singapore Open Data License), temassız ödeme sistemleri (e-ödeme sistemleri), ana faaliyet geliştirme ortamı (CODEX), akıllı ulus sensör platformu (Smart Nation Sensor Platform (SNSP), akıllı sayaç sistemi, yeşil binalar, çevrimiçi sağlık merkezi önemli uygulamalar arasındadır (Calder 2016).

Seul de 2012'de başlatılan "Cihaz bağış girişi projesi" ile; düşük gelirli ailelere ve ihtiyacı olan diğer kişilere ikinci el akıllı cihazlar dağıtarak akıllı teknolojilerin halk ile buluşması sağlamaktadır. Ayrıca şehirde çevrimiçi elektrikli araç teknolojisi (OLEV) ile hareket halindeyken yolun yüzeyinden kablosuz olarak elektrik aktarımını sağlayarak çalışan bir akıllı ulaşım teknolojisi de bulunmaktadır.

Dubai, kripto para (elektronik para) sistemi, blok zincir (blockchain), yapay zeka, otonom araçlar, drone taksiler vb. trend teknolojileri desteklemektedir. Dubai tasarım bölgesinin (Dubai Design District) kurulmasıyla sıfırdan bir akıllı kent bölgesi kurulumu tüm alt yapıları ile gerçekleştirilmiştir. Sürdürülebilir kentsel alanlar projesi kapsamında dört farklı bölgede sürdürülebilir akıllı kentsel alanlar tasarlanmış ve inşasına başlanmıştır. Bu alanlar Sustainable City, Desert Rose City, Dubai South District, ve Dubai Silicon Oasis'dir. Ayrıca kentte; Akıllı Şebeke sistemi, Dubai pulse açık veri platformu ve kent sakinlerine kentle ilgili bilgiler veren DubaiNow mobil uygulaması kullanılan diğer akıllı teknolojilerdir.

Berlin, sera gazı emisyon oranlarını azaltmayı, enerji modelini çeşitlendirmeyi ve yenilenebilir enerji kaynaklarını en verimli şekilde kullanmayı amaçlamıştır. Yeşil enerji kullanımını artırabilmek için birçok alanda uygulama geliştiren Berlin Enerji Ajansı (BEA) ortaklığında Berlin’de pek çok projeyi uygulamaya almış ve karbon salınımını önemli ölçüde azaltmıştır. Berlin açık veri portalı, Berlin E-otobüs projesi, Berlin mikro akıllı şebeke uygulaması, yenilenebilir enerji üretimi ve tüketiminin en verimli etkileşimini amaçlayan WindNODE projesi önemli uygulamalar arasındadır.

Moskova, uzun vadeli hedeflerinden biri olan “Akıllı Moskova 2030” stratejisini hazırlayarak akıllı teknolojilerin getireceği yenilikler ve gelişmeler için uygun bir ortam oluşturmuştur. Kent içerisinde akıllı kent uygulamalarına önemli yatırımlar yaparken öte yandan da bazı önemli projeleri hayata geçirmektedir. Açık veri portalı, anlık trafik kontrolü, akıllı toplu taşıma, akıllı araç teknolojileri, e-hizmetler, dijital servisler bunlardan bazılarıdır.

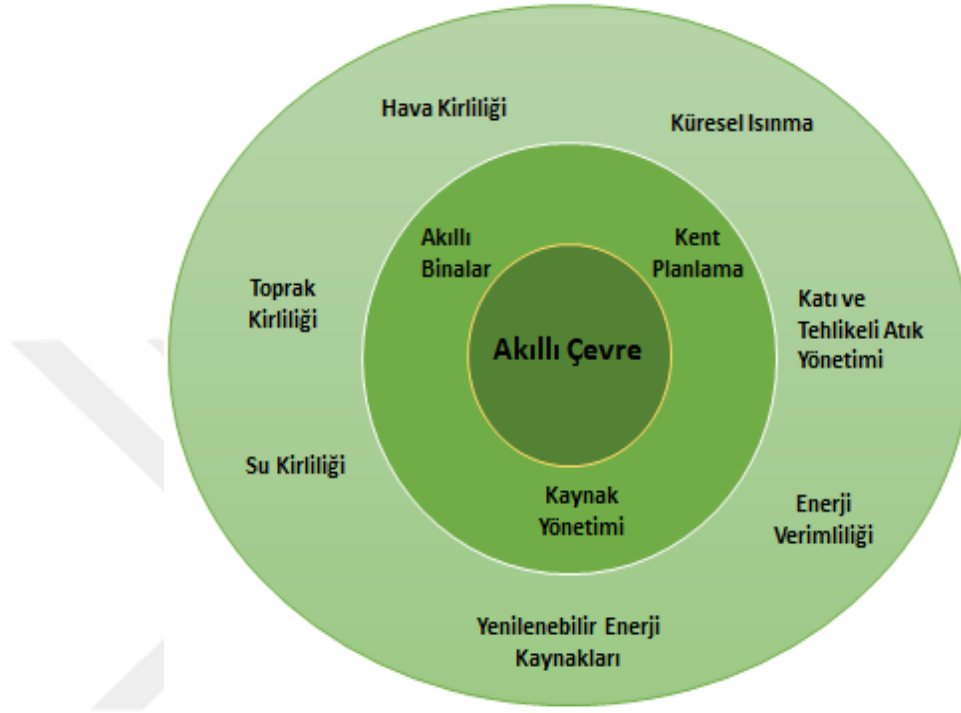
Medeniyetlerin beşiği İstanbul, geçmişten günümüze her dönemde teknolojiden faydalanan, Türkiye’nin akıllı kent alanında öncü şehri olmuştur. 2016 yılında kurulan İstanbul Büyükşehir Belediyesi Akıllı Kent Müdürlüğü, 2017 yılında hazırladığı “İstanbul Akıllı Kent Yol Haritası” ile tüm akıllı kent paydaşlarını tek bir vizyon doğrultusunda birleştirmiştir. Ayrıca, tüm İstanbullulara hitap eden bir Akıllı Kent Manifestosu’da hazırlanmıştır. Tüm ulaşım sisteminin kontrol edildiği ve yönetildiği Ulaşım Yönetim Merkezi, Çevre Kontrol Merkezi, Adaptif Trafik Sinyal Kontrol sistemi, akıllı durak sistemleri, elektronik ödeme sistemleri (e-ödeme), iTaksi, Akıllı Park Yönetimi, kent içerisindeki inovasyon merkezi olan Zemin İstanbul, İstanbul’da öne çıkan akıllı kent uygulamalarıdır (Korkmaz and Ceylan, 2021b).

Türkiye’nin yönetim merkezi Ankara’da da pek çok akıllı kent uygulaması ve projesi ön plana çıkmaktadır. Ankara akıllı ulaşım sistemi, Ankara Büyükşehir Belediyesi mobil uygulaması, mezarlık bilgi sistemi mobil uygulaması, Ankara elektrik enerji takip sistemi hayata geçirilen önemli projeler arasındadır. Kaynak kullanımı ve çevresel açıdan önemli bir diğer proje ise ASKİ bünyesinde kurulan SCADA (Supervisory control and data acquisition) (Danışmalı kontrol ve veri toplama sistemi) merkezidir. Bu merkezde, kente güvenli, sağlıklı ve yeterli su sağlamak amacıyla işletilen tesisler sürekli kontrol edilmektedir (Korkmaz and Ceylan, 2021b).

Akıllı çevre alt alanı kavramı

Çevre kirliliğinin (su/toprak/hava kirliliği) yanı sıra gürültü, atıklar, karbon salınımları (karbon ayak izi) radyasyon, ışık gibi kirleticilerin de ön plana çıktığı ve ekosistem üzerinde

çok önemli kirletici baskısı oluşturan şehirlerin; bu temel çevre problemlerinin çözümünde akıllı teknolojiler yardımıyla kullandığı en önemli bileşen “Akıllı Çevre” kavramıdır. Akıllı kent alt alanlarından olan “Akıllı Çevre”; hava/su/toprak kirliliği, her türden atık yönetimi, iklim değişikliği ile mücadele yönetimi ile sürdürülebilirliğin sağlanması ve çevre yönetiminde yeşil şehir planlamasının ortaya konulmasını sağlamaktadır (Hajjaji *et al.* 2021).



Şekil 7. Akıllı çevre alt alanının bileşenleri (Korkmaz and Ceylan, 2021b)

Akıllı kentlerin en önemli bileşenlerinden olan “Akıllı Çevre” konusundaki uygulamalar son yıllarda hızla gelişmektedir. Özellikle şehirler artan çevre kirliliğini en aza indirmek için akıllı çevre uygulamalarını ve akıllı teknolojileri kullanmaktadır. Atıkların geri kazanımı/geri dönüştürülmesi, gelişmiş katı atık toplama sistemleri, karbon salınımını azaltma çalışmaları, enerji verimliliği çalışmaları, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı, akıllı bisiklet (bisiklet ağı) ve elektrikli araç sistemleri, Ar-Ge laboratuvarları ve yeşil endüstriler gibi birçok uygulama “Akıllı Çevre Uygulamaları” olarak kullanılmaktadır (Korkmaz and Ceylan, 2021b).

Akıllı çevre uygulamaları ile hava kirliliği de izlenebilmekte ve yönetilebilmektedir. Akıllı çevre uygulamaları, hava kirliliği sorununa doğrudan etki eden etkenlere önemli çözümler üretebilmektedir.

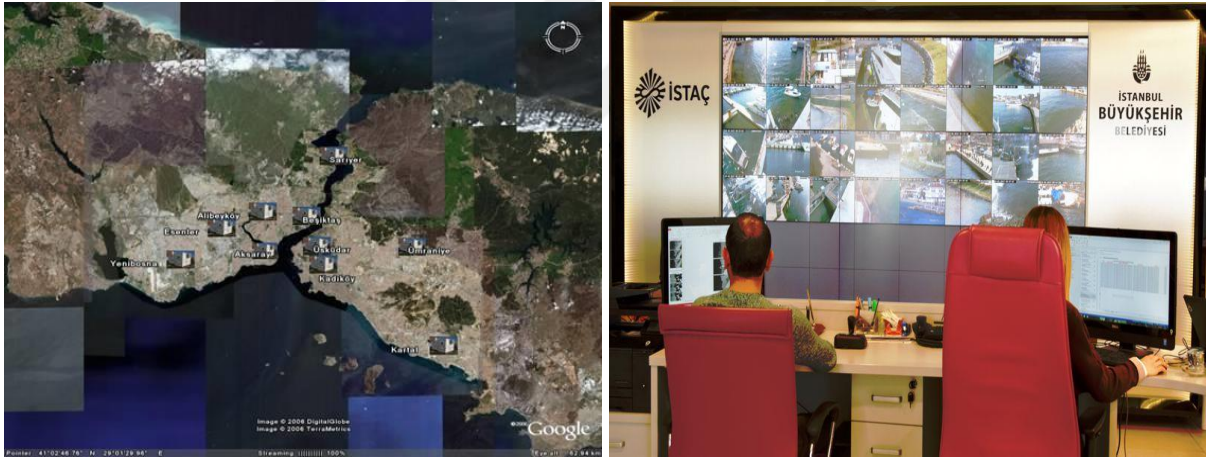
Akıllı çevre alt alanının Türkiye’deki uygulamaları

Türkiye’de “Akıllı Çevre” uygulamalarına bakıldığında, bu uygulamaların şehirlerin belirli bölgelerinde gerçekleştirilen uygulamalar olduğunu ve tam anlamıyla bütüncül bir akıllı

kent vizyonunun henüz oturmadığını görmektedir. Öte yandan ÇŞİDB'nin “ 2019-2022 Ulusal Akıllı Şehirler Stratejisi Ve Eylem Planı” adıyla hazırlamış olduğu strateji planıyla çevre ile ilgili birçok uygulama desteklenmiş ve hayata geçirilmiştir. Hazırlanan bu strateji ve eylem planından sonra özellikle İstanbul, Ankara, Çanakkale, Konya, Antalya ve Eskişehir gibi birçok büyük şehirde akıllı çevre teknolojileri ve akıllı çevre uygulamaları yaygınlaştırılmaya çalışılmaktadır (AŞBB, 2023; Akiner 2016; Elvan, vd 2017).

Türkiye'nin en büyük metropolü İstanbul'da; Çevre Kontrol Merkezi, akıllı geri dönüşüm konteynerleri, evsel atık yakma ve enerji üretim tesisi, çöp gazından enerji üretimi ve yüzer güneş enerji santrali gibi pek çok akıllı çevre uygulamaları hayata geçirilmiştir (İSTAÇ 2023; İBB 2023; Enerji İstanbul 2019).

Hava kirliliği ile ilgili olarak da, “İstanbul'un yaşam kalitesi yüksek ve saygın bir dünya kenti olmasını sağlamak” vizyonundan hareketle Hava Kalitesi İzleme Merkezi kurularak hava kalitesinin iyileştirilmesi adına çeşitli adımlar atılmıştır. İstanbul hava kalitesi; ÇŞİDB ve İBB tarafından yaklaşık 40 adet hava kalitesi izleme istasyonu yardımıyla izlenmektedir (Şekil 8) (Hava Kalitesi 2023; Çevre Koruma 2023).



Şekil 8. Hava kirliliği ölçüm istasyonları ve çevre kontrol merkezi görseli (İSTAÇ 2023)

2019-2022 Ulusal Akıllı Şehirler Stratejisi ve Eylem Planı dahilinde, Türkiye'nin ikinci büyük şehri olan Ankara'da; entegre katı atık yönetim sistemi kullanılarak, gazlaştırma-yakma ile enerji üretimi, atıktan türetilmiş yakıt üretimi, ambalaj ve diğer atıklarının geri kazanımı, tehlikeli ve tıbbi atıkların bertaraf edilmesi ve düzenli depolama sahalarının projelendirilmesi ve işletilmesi gibi birçok faaliyet yürütülmektedir (ITC 2023, Ankara Bel 2023). Ayrıca Ankara belediyesi sıfır atık programını gündemine alarak etkili bir şekilde uygulamaya çalışmaktadır. Ankara'da ASKİ bünyesinde uzaktan okumalı sayaç sistemi kullanılmakta ve kurulan SCADA merkezi ile pompa istasyonları, su depoları, arıtma tesisleri ve su dağıtım şebekesi sürekli olarak uzaktan gözlenmektedir (ASKİ 2023).

Antalya’da; güneş enerji santralleri, katı atık entegre tesisleri akıllı çevre uygulamaları arasında sayılabilir. Antalya Stadyumunun üzerinde 12 bin m² lik alana kurulmuş olan 1,24 MW gücüne sahip güneş enerjisi panelleri (yıllık ortalama 2 bin MW elektrik enerjisi üretebilen) yardımıyla 575 konutun elektrik enerjisi ihtiyacı karşılanmaktadır. Bu tesisin kurulumu ile yıllık 1200 ton CO₂ salınımı önlenmiştir (Antalyaspor 2023). Ayrıca Antalya entegre atık bertaraf tesisinde, günlük 3 bin tona yakın evsel katı atık bileşenlerine göre ayrıştırılmakta ve geri kalan bin 250 ton civarında organik atık metan gazına dönüştürülerek yakılıp 60 bin konutun elektrik ihtiyacı karşılanmaktadır (Antalya Bel 2023).

Gaziantep’de yenilenebilir enerji sistemleri, akıllı park-bahçe sulama ve akıllı şebeke sistemleri hayata geçirilmiştir. Akıllı şebeke sistemi yardımıyla, Gaziantep Organize Sanayi Bölgesinde (OSB) 900 adet elektrik sayacı gerçek zamanlı olarak okunabilmekte, anlık enerji tüketimi ve güç bilgileri uzaktan alınabilmektedir. Böylece anlık ihtiyaç kadar elektrik üretimi, iletimi ve enerjinin verimli kullanımı sağlanabilmektedir. Bu kapsamda % 4 olan kayıp-kaçak oranı, % 0,5’e kadar düşürülmüştür. Türkiye’nin en büyük solar otoparkı Gaziantep Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü bünyesinde kurulmuştur. Bu solar tesis 1460 m² alana, 56 araçlık kapasite ve 120 kW’s lik güce sahiptir. Gaziantep Büyükşehir Belediyesi, Türkiye’de ISO 50001 Enerji Yönetim Sistemi sertifikası alan ilk kurumlardan birisidir (Gaziantep Bel 2023).

Konya’da da birçok akıllı çevre uygulaması gerçekleştirilmiştir. Konya Büyükşehir Belediyesi, katı atıklarının depolandığı sahada oluşan metan gazlarının değerlendirilmesi amacıyla 2011 yılında buraya 5,6 MW kapasiteli elektrik enerjisi üretim tesisi kurmuştur. Üretilen enerji ile 26 bin konutun günlük elektrik ihtiyacını karşılayabilmektedir. Ayrıca tesiste açığa çıkan ısıdan faydalanmak amacıyla 1.200 m² büyüklüğünde bir sera kurulmuştur. Burada yıllık ortalama 30 ton domates üretilmektedir. Konya’da kurulan Çevre Yönetimi Bilgi Sistem Merkezi sayesinde; hava kalitesi izleme, yakıt kontrolü ile beraber atık-gürültü ve araç takip sistemlerinin anlık verilerinden hareketle farklı bölgelere ait kirlilik seviyelerinin anlık olarak izlenmesine, çevresel değerlerin görüntülenmesine imkân sağlanmıştır (Konya Bel 2019).

Eskişehir’de Horizon 2020 Remourban Projesi hayata geçirilmeye çalışılmaktadır. Bu projenin temel hedefi; enerji, ulaşım, bilgi ve iletişim teknolojileri uygulamalarını tek bir noktada birleştirerek problemlere yenilikçi çözümler ve tasarımlar sunmak, şehirlerde teknolojik kentsel dönüşüm modelini uygulamak, kent sakinlerinin yaşam kalitesini artırmak, sürdürülebilir bir kent oluşturmak, yenilikçi iş modellerini kullanmak olarak özetlenebilir (Remourban 2023). Yine Eskişehir’de örnek Akıllı Kent Tepebaşı projesi üzerinde çalışılmaktadır. Bu projede akıllı aydınlatma sistemleri, akıllı şebeke sistemleri, enerji tasarrufu

sağlayan akıllı binalar, akıllı şehir izleme portalı, akıllı bisiklet uygulamaları ve akıllı ulaşım sistemleri ön plana çıkmaktadır (Tepebaşı 2023). Eskişehir Eko Kent projesi, İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) yardımıyla Eskişehir Kocakır da başlatılan bir Ekokent projesidir. Eskişehir Kocakır'da sıfır enerji, sıfır atık ve kendi kendine yeten, kendi ihtiyacını kendi üreten bir “Ekolojik Şehir” tasarlanmak istenmektedir (İTÜ 2023).

Çanakkale’de akıllı kavşaklar, akıllı bisiklet kiralama sistemi (Çabis); Çanakkale kültür merkezi binası (Yeşil Yerel Yönetim ve Kültür Merkezi), ileri biyolojik atıksu arıtma tesisi (Arıtılmış atık suyun tarımsal sulamada kullanılması) gibi projeler akıllı çevre uygulamaları arasında yer almaktadır (Cabis 2023).

Erzurum şehrimizde ise Akıllı Kentlerin ana başlıklarından birisi olan akıllı ulaşım alakaı olarak; akıllı durak sistemi ve akıllı ulaşım mobil uygulama sistemi başlamıştır. Ancak akıllı çevre uygulamaları gerek üniversite gerekse yerel yönetimler bazında çalışılmaya başlanmış olup henüz uygulama aşamasına geçilememiştir.

Akıllı Kentlerde Hava Kirliliği ve Önleme Çalışmaları

Akıllı kentlerde hava kirliliği çalışmaları; çok noktadan alınan veri analizi, modelleme çalışmaları, haritalandırma, önleme yöntemleri uygulama, akıllı çevre uygulamaları ile nesnelerin interneti, bulut bilişim, büyük veri, coğrafi bilgi sistemleri gibi yeni nesil bilgi iletişim teknolojilerini kullanarak hava kalitesinin artırmaya yönelik çalışmaların bütünüdür. (Bibri and Krogstie 2020). Bu çalışmaların temel amacı, hava kirliliğini azaltmak ve halk sağlığını korumaktır (Shahid 2021; Bekkar *et al.* 201).

Hava kalitesi, şehir içerisinde değişik bölgeler arasında ve içinde nispeten küçük bir aralıkta değişiklik gösterir. Bu nedenle, belirli bir bölgedeki kirlilik konsantrasyonu, öncelikle yerel emisyonlara ve ortam koşullarına bağlıdır. Mevcut hava kalitesi izleme sistemleri, büyük sermaye maliyeti ve bu tür sistemlerden yüksek yoğunluklu bir ağ oluşturmak için gereken büyük kaynak maliyeti nedeniyle seyrek olarak yerleştirildikleri için bu sorunu çözemez. “Peki bu sorunu çözmek için ne yapılabilir?” sorusuna cevap aranırken düşük maliyetli hava kalitesi ölçüm sistemleri (Low-cost air quality monitors) bu noktada başvurabileceğimiz çözüm olabilmektedir (Medium 2023).

Tüm düşük maliyetli sensörler birkaç temel unsurdan oluşur:

1. İlgili parametreyi algılayan sensör
2. Elektrik sinyallerinden gelen yanıtı dönüştüren bir dönüştürücü
3. Veri saklama veya bir iletişim cihazına bağlantı
4. Güç kaynağı

Bu düşük maliyetli sürekli ortam hava kalitesi izleme sisteminin geleneksel sistemlere göre en büyük avantajı, kompakt, hafif ve uygun maliyetli olmasıdır. Birleşik Devletler Çevre Koruma Ajansı (US EPA), düşük maliyetli hava monitörlerini maliyetlerine göre farklı katmanlara ayırmıştır (Medium 2023).

Tablo 1. Birleşik devletler çevre koruma ajansına (US EPA) göre hava monitörlerinin maliyetlerine sınıflandırılması

Aşama	Maliyet Aralığı (Yalnızca Cihaz)	Özellikler
Aşama 5	10000-50000 dolar	Ortam veya kaynak analizi yapar
Aşama 4	5000-10000 dolar	Ortam veya kaynak analizi yapar
Aşama 3	2000-5000 dolar	Araştırma grupları ve kanun düzenleyiciler kullanır
Aşama 2	100-2000 dolar	Araştırma grupları kullanır
Aşama 1	100 dolardan az	Eğitim ve kişisel sağlık amaçlı kullanılır

Bu modüllerin içerisindeki düşük maliyetli sensörlerde, mikro üretim teknikleri kullanılır. Sensörler optik ve nano yapılı elemanlardan oluşan mikro-elektro-mekanik sistemler içerir, bu da onları daha hafif ve ucuz hale getirir. Kompaktlık, düşük güç tüketimi ve enerji tasarruflu sensör devreleri ile tamamlanmaktadır. Bu modüller sayesinde hantal geleneksel hava izleme sistemleri ile çözilemeyen neredeyse tüm sorunların üstesinden gelinebilir. Yeni sensör tabanlı hava kalitesi monitörlerinde kullanılan yapay zeka ile gelişmiş teknolojiler, gerçek zamanlı veri toplama ve analizini mümkün kılmıştır. Büyük kirleticilerin gerçek zamanlı izlenmesi ve verilerin sürekli olarak yayılması hem kamuoyu ve yöneticiler için önemlidir.

Akıllı kentlerde hava kirliliği izleme ve önleme çalışmaları son yıllarda çokça çalışılan konulardan bir tanesidir. Özellikle kent içerisinde hava kirliliğinin izlenmesi ve önlemesi çalışmaları kirleticilerin çok noktadan veri alınması ve bu verilerin çeşitli modeller ile yorumlanarak etkili sonuçların çıkarılmasına dayanmaktadır (Alvarado *et al.* 2015; Balram *et al.* 2019; Brzozowski *et al.* 2019; Castell *et al.* 2018; Clements *et al.* 2019; Cordero *et al.* 2018; Curto *et al.* 2018; Johnson *et al.* 2018; Mead *et al.* 2013; Miskell *et al.* 2017; Miskell *et al.* 2018; Popoola *et al.* 2018; Weissert *et al.* 2019).

Gelişen sensör teknolojisi ile birlikte dış atmosfer havasında hava kirleticilerini sensörler yardımıyla ölçümleyebilecek ve hava kalitesini ortaya koyabilecek pek çok çalışma bulunmaktadır (Balram *et al.* 2019; Castell *et al.* 2018; Mead *et al.* 2013; Thompson 2016). Bu noktada sensör teknolojisinin yeni gelişen bir teknoloji olduğu ve bazı parametrelerin ölçümünde yetersiz kalabilebileceği unutulmamalıdır (Miskell *et al.* 2018; Su 2018).

Dünyada akıllı kentlerde hava kirliliğini sensörler yardımıyla ölçen alınan verileri algoritmalar yardımıyla analizleyen ve modeller sonucunda yeni kent tasarımlarının ortaya konulmasına yardımcı olan akıllı kent hava kalitesi çalışmaları ön plana çıkmaktadır.

Miskell ve arkadaşlarının yapıları çalışmada düşük maliyetli bir hava kalitesi ünitesi tasarlanmış ve kent içerisinde belirli bölgelerden strosferik ozon ölçümleri alınmıştır. Birçok kaynağın yer aldığı noktalara yerleştirilen üniteler uygun kalibrasyon ve veri kalitesi kontrolleriyle uygun hava kalitesi ağırları oluşturularak zamansal ve mekânsal ölçüm gerçekleştirilmiştir (Miskell *et al.* 2017).

Düşük maliyetli sensör teknoloji ile kent içerisinde istenilen noktalara yerleştirilebilecek (mobil) üniteler tasarlanabilmektedir. Brzozowski ve arkadaşlarının (2019)'da yaptıkları çalışmada 8 Ekim 2017 - 3 Kasım 2017 tarihleri arasında Bielsko-Biała şehir merkezinde üç kavşak noktasına bu üniteler yerleştirilmiş ve Pm_{10} ile trafik hacmi arasındaki ilişkisi incelenmiştir (Brzozowski *et al.* 2019).

Marjovi ve arkadaşlarının (2015)'de yaptıkları çalışmada ise tasarlanan ünite hareketli bir araca monte edilerek İsviçre Lozan da mekansal ve zamansal hava kirliliği haritaları oluşturulmuştur (Marjovi *et al.* 2015). Alınan hava hacmi başına akciğer yüzeyinde biriken partikül madde miktarı olan LDSA hesaplanmıştır.

Mead ve arkadaşlarının (2013) yılında yaptığı çalışmada mobil taşınabilir CO, NO ve NO_2 ölçümlenebildiği bir ünite tasarlanmıştır (Mead *et al.* 2013). Ayrıca sabit bir sensör ünitesi tasarlanmış ve CO, NO, NO_2 , sıcaklık ve bağıl nem verileri kaydedilmiştir.

Bu konularla ilgili olarak Türkiye'de yapılan çalışmalara bakacak olursak; konunun ülkemizde daha yeni ele alındığını ve prototip modeller üzerinde çalışıldığını görmekteyiz. Türkiye genelinde bu konu ile ilgili çalışmalar gayet kısıtlı olup yapılmış olan birkaç çalışmayı da şöyle özetleyebiliriz.

Düzce Üniversitesi kampus alanında yapılan bir çalışmada; CO ölçebilen sensör tabanlı beş adet modül tasarlanarak ölçümler yapılmış ve bu değerler o bölgede bulunan ÇŞİDB hava kalitesi istasyonundan alınan veriler ile mukayese edilerek sonuç datalarında bir paralellik olduğu ortaya konulmuştur (Şentürk and Kara, 2017).

Yine konuyla ilgili olarak; Karaca (2018)'de yaptığı bir başka çalışmada Akıllı Kentler iç ortam (indoor) hava kalitesi takibi için, $Pm_{2.5}$ yoğunluğunu, nemi ve sıcaklığı ölçen düşük maliyetli bir ünite geliştirilmiştir. Geliştirilen bu ünite ölçtüğü verileri Wi-Fi üzerinden Thing Speak IoT platformuna iletirken, $Pm_{2.5}$ eşik değeri aşıldığında hem sesli hem de görsel uyarı verebilen bir sistem geliştirilmeye çalışılmaktadır (Karaci 2018).

Bu konularla ilgili olarak pek çok ülkede hava kalitesi ölçüm üniteleri tasarlanarak satışa sunulmaktadır. Bu üniteler, kent içerisinde istenilen noktaya yerleştirilerek, anlık veri akışı sayesinde veri ağı kurabilen sistemlere entegre edilebilmektedir. Her modelin farklı bir menşei bulunmakla birlikte modele bağlı olarak ölçülmesi istenilen kirleticilerin yanı sıra meteorolojik parametrelerin ölçümleri de yapılabilmektedir. Yıllar boyunca geliştirdikleri teknolojilerini tüm dünya ile paylaşan Oizom, Tesla, Airly, Aqicn, AQMesh gibi şirketler bu tür modüller üreterek ticari ürün geliştirme açısından ön plana çıkmış ve bu ürünleri dünya pazarına sunmuşlardır.

Tüm bunların haricinde özellikle son yıllarda (2020-2021) drona entegre ölçüm cihazları da ticari ürün olarak tasarlanıp satılmaktadır. Yine dronun yanı sıra farklı hareketli taşıtlara entegre edilebilecek modeller de geliştirilmektedir. Sniffer4D, Botlink, Scentroid gibi dünyaca ünlü markalar bu konuda tasarladıkları yüksek maliyetli ürünler ile tanınmaktadırlar. Konu ile ilgili piyasaya sürülen ürünler; sürekli olarak teknolojik inovasyonla yenilenerek, güncel ihtiyaçlara binaen satış fiyatları da teknolojilerine paralel olarak çok ciddi rakamlara ulaşmaktadır. Tüm bunların yanı sıra; özellikle dronların kullanıldığı belirli alanlardan ve yüksekliklerden hava kalitesi kirlilik parametrelerinin ölçümüne dair yapılan literatür araştırmalarında şu bilgilere ulaşılmıştır. Romanya Tamişvar kentinde yapılan bir çalışmada; drona entegre sensörler yardımıyla azot dioksit (NO_2) ve partikül madde ($\text{Pm}_{10}\text{-pm}_{2,5}$) ölçülerek bir telefon uygulaması yardımıyla veri akışı sağlanmıştır (Simo vd., 2021). Kanada'nın Ontorio kentinde yapılan bir başka çalışmada ise; kent içerisinde beş noktada otonom bir dron yardımıyla troposferik ozon (O_3), azot dioksit (NO_2), karbon dioksit (CO_2), karbon monoksit (CO), kükürt dioksit (SO_2) ve amonyak (NH_3) ölçümleri yapılarak elde edilen veriler anlık olarak paylaşılmıştır (Rohi vd., 2020).

Hava Kirliliği

Gelişen dünya ile birlikte özellikle sanayi devriminden sonra, fosil yakıt tüketimi sonucu enerji kullanımının artması ile birlikte, endüstriyel prosesler sonucunda oluşan endüstriyel çıktılar ve türevleri, tarımsal uygulamalar gibi birçok faaliyet hava kirliliği problemini oluşturmaktadır. Dünya çapında, prosesler sonucu oluşan emisyonlar hava kalitesini düşürmekte ve bu problemin oluşmasına neden olmaktadır.

Hava kirliliği; doğal aktiviteler veya insan aktiviteleri kaynaklı olabilir. Örneğin orman yangınları, volkan patlamaları ve şimşekler gibi doğal aktiviteler atmosferin azot oranının artmasına neden olur. Diğer taraftan, çeşitli amaçlarla yakılan ateşler, meydana gelen yangınlar, fabrika ve ev bacalarının dumanları ve araçlardan çıkan egzoz gazları havaya bol miktarda karbon monoksit, kükürtdioksit ve nitrik asit gibi zehirli gazların salınmasına neden olur.

Dolayısıyla ister doğal yollarla isterse insan kaynaklı oluşan gaz salınımları atmosferdeki gaz oranlarını değiştirerek kirlenmeye neden olabilir (Ceylan 2023).

Atmosfere salınarak hava kalitesini etkileyen kirletici maddeler; kimyasal/fotokimyasal reaksiyonlarla dönüşüme uğrayabilir ve rüzgar vektörü, bağıl nem, sıcaklık, sıcaklığın yükseklikle değişimi, basınç, yağış gibi meteorolojik faktörler yatay/düşeyde taşınım (adveksiyon/konveksiyon), dispersiyon ve birikim oluşturabilir. Emisyon gerçekleştikten sonra kirleticilerin çevredeki konsantrasyonlarını ve hareketlerini belirleyebilmek için hava kalitesi modelleri kullanılır. Bu atmosferik modeller, emisyon, meteoroloji ve topoğrafya bazlı bilgileri girdi verisi olarak kullanırlar. Sonrasında sayısal teknikleri işleterek atmosferdeki taşınım, dispersiyon gibi fiziksel süreçleri çalıştırabildiği gibi kimyasal tepkimeleri işleyen kimya algoritmaları ile birlikte kullanıldığında kirletici tür dönüşümlerini de gerçeğine uygun bir şekilde üretebilir. Şekil 9’da hava kirliliğinde süreçler gösterilmiştir.



Şekil 9. Hava kirliliğinde süreçler

Yeryüzünü tamamen saran gazlar karışımına atmosfer (hava) denir. Atmosferin yedi temel katman ya da tabakası sırasıyla; Troposfer, Stratosfer, Mezosfer, Termosfer, Ekzosfer, Magnetosfer, İyonosfer’ dir. En altta canlıların yaşadığı ve direk etkileşim halinde olduğu troposfer tabakası hava kirliliğinin yaşandığı tabakadır. Yerden itibaren yaklaşık 17 km ‘ye kadar kalınlığa sahip olan ve Stratosfer’in altındaki bu tabakada bulunan gazlar 3 grupta incelenir;

- 1. Grup:** Bu tabakada devamlı olarak bulunan ve miktarları sabit olan gazlardır (N_2 /azot, O_2 /Oksijen ve diğer asal gazlar).
- 2. Grup:** Atmosferde devamlı olarak bulunan ve miktarları artış ya da azalış yönünde değişebilen gazlardır (CO_2 /Karbondiyoksit, H_2O /subuharı, O_3 /ozon).

3. Grup: Atmosferde her zaman bulunmayan kirlетici gazlardır (Hava Kirliliğine sebep olan gazlar ve de Pm'ler).

Bunun haricinde yağışlar, hava akımları, bulutluluk, nem, basınç değışiklikleri gibi bütün meteorolojik olaylar bu katmanda gerçekleşmektedir.

Atmosfer kirlenmesi denince akla troposfer kirliliğı gelir. Bu tabaka antropojenik (insan faaliyetleriyle ilgili) ve doğal faaliyetlerin içinde gerçekleştiğı toprağı ve su kitlelerini saran tabakadır. Bu tabakada; doğal ya da antropojenik faaliyetler sonucu en başta insanlar olmak üzere yaşayan tüm canlıların yaşam standartlarında olumsuz yönde değışiklikler oluşturan, klasik ya da enstrümental yöntemlerle ölçülebilir düzeydeki kirlenmeye hava kirlenmesi denir. Diğer bir ifadeyle; atmosferde toz, duman, gaz, koku ve saf olmayan su buharı şeklinde bulunabilecek kirlетicilerin, insanlar ve canlıların sağlığını olumsuz yönde etkileyecek ve/veya maddi zararlar meydana getirecek miktarlara yükselmesi, “Hava Kirliliğı” olarak nitelendirilmektedir (Ceylan 2023).



Şekil 10. Troposferde bulunan gazların genel sınıflandırması

Ülkemiz genelinde birçok ilimizde hava kirliliğı problemi etkindir ve son yıllarda hava kirliliğı ile ilgili birçok araştırma yapılmakta ve yayınlanmaktadır (Elbir *et al.* 2000; Ilten and Selici 2008; Tasdemir *et al.* 2005; Gaga *et al.* 2012; Sahin *et al.* 2020; Ghasempour *et al.* 2021; Baltacı *et al.* 2023). Bu sorunun ülkemizde daha iyi anlaşılabilmesi için hava kirliliğı ile ilgili

yapılan araştırma sayısının artırılması gerekmektedir. Çalışma sayısının artırılması ile kirletici kaynakları daha iyi belirlenebilecek, emisyon kaynakları takip edilebilecek, çevre ve insan sağlığı üzerindeki etkiler daha iyi araştırılabilecektir.

Hava kirliliği kaynakları

Hava kirliliği kaynakları oldukça çeşitlidir ve çoğu antropojenik faaliyetler sonucu ortaya çıkmaktadır. Temel hava kirletici kaynakları arasında; sanayi tesisleri, kimya tesisleri, petrol rafinerileri, çimento, kağıt ve çelik üretimi gibi endüstriler, trafikte motorlu taşıtlar, evler ve binaların ısınması, pişirme ve aydınlatma, tarım faaliyetleri sırasında kullanılan gübreler ve pestisitler, çiftlik hayvanlarından kaynaklanan amonyak emisyonları ve toprak işleme işlemleri sonucu oluşan azot oksitler, amonyak ve diğer kirletici gazlar, orman yangınları, toprak erozyonu ve çölleşme gibi doğal süreçler atmosfere salınan kirletici gazlar ve Pmler sıralanabilir. Bu kaynaklar kentsel alanlarda noktasal kaynaklar (endüstriler ve sanayi tesisleri vb.) çizgisel kaynaklar (trafik) ve alansal kaynaklar (kentsel konutlar gibi) olmak üzere üç sınıfa ayrılmaktadır.

Hava kirliliğine neden olan bu kaynakların etkileri, özellikle şehirlerde yoğun nüfuslu alanlarda daha da belirgin hale gelmektedir. Erzurum özelinde ise; coğrafi ve iklim koşulları nedeniyle hava kirliliği sorununu derinden yaşamaktadır. Erzurum'da hava kirliliğine neden olan kaynaklar; ısınma amaçlı kömür ve odun yanması, yoğun trafik ve az da olsa kent merkezinde bulunan sanayi tesisleri, fabrikalar ve işletmelerdir.

Hava kirletici parametreler ve özellikleri

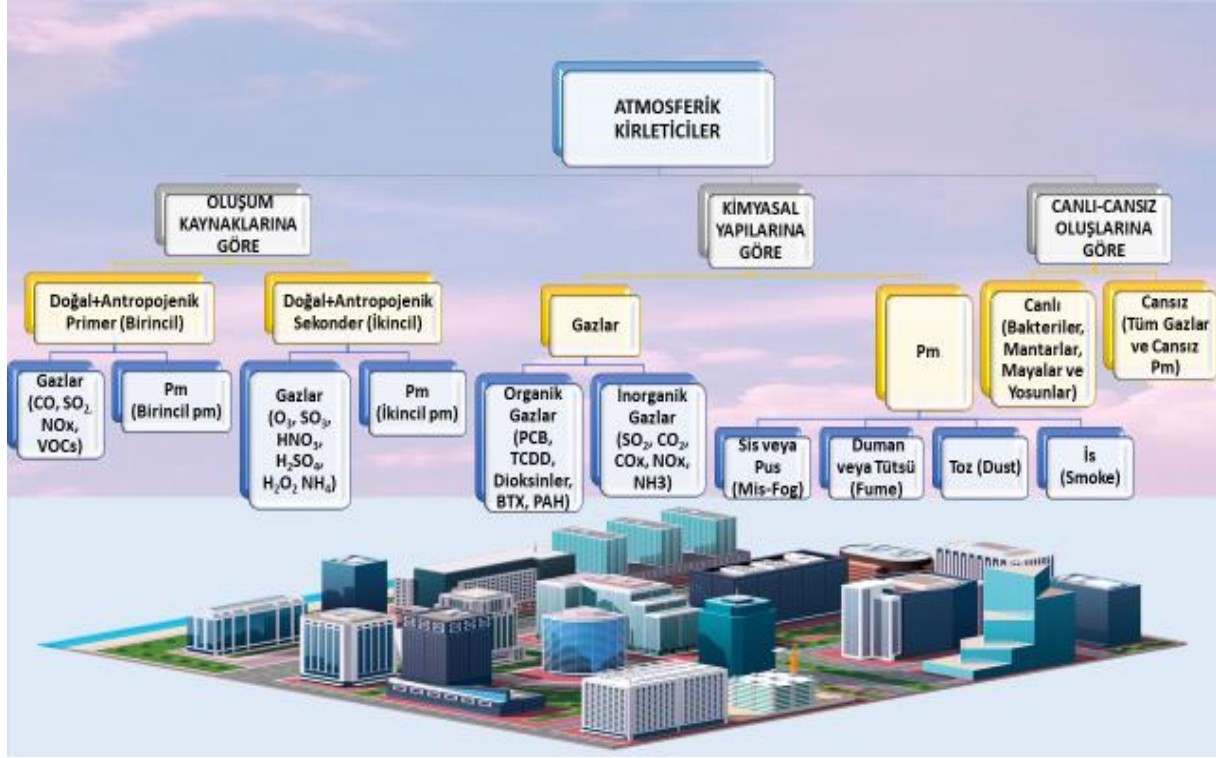
Kent atmosferindeki en önemli hava kirleticileri arasında inorganik menşeli olanları; karbon oksitler (CO/CO_2), sülfür oksitler (SO_2/SO_x), azot oksitler (NO_2/NO_x), ozon (O_3), ağır metaller ve partikül maddeler (özellikle $\text{Pm}_{2.5}$ ve Pm_{10}), organik menşeyli olanları ise, uçucu organik bileşikler (BTX/VOC'ler), poli aromatik hidrokarbonlar (PAH'lar), dioksin ve dibenzo-p-dioksin türevleri, hidrokarbon (HC), CFC'ler vb olarak sıralayabiliriz. Şekil 11'de kent atmosferindeki hava kirleticilerinin şematik gösterimi verilmiştir.

Atmosferik kirleticileri,

- 1- Oluşum kaynaklarına göre
- 2- Canlı yada cansız oluşlarına göre
- 3- Kimyasal yapılarına göre genel bir sınıflandırmaya tabi tutabiliriz.

Oluşum kaynağına göre atmosferik kirleticiler birincil kirleticiler ve ikincil kirleticiler olmak üzere iki ana sınıfa ayrılmaktadır. Doğrudan atmosphere yayılan birincil kirleticiler,

gazlar (SO_2 - SO_x , NO_x - NH_3 , CO_2 - CH_4 , VOC vb.) ve partikül maddeler (Pm) (birincil partikül maddeler) olarak iki alt sınıfa ayrılmaktadır. Birincil hava kirleticilerin gerek birbirleriyle gerekse hava oksijeni ile reaksiyona girmeleri neticesinde oluşan kirleticiler ise ikincil kirleticilerdir. İkincil kirleticilerin, gaz formunda olanları; O_3 , SO_3 , HNO_3 , H_2SO_4 , H_2O_2 , NH_4 gazları iken partikül formunda olanlar ise ikincil partikül maddelerdir. Ayrıca fotokimyasal smog ve asit yağışları gibi atmosferik problemler ikincil kirleticiler sınıfında bulunmaktadır.



Şekil 11. Troposfer-Outdoor kirletici gazların detaylı sınıflandırılması

Canlı yada cansız oluşlarına göre sınıflandırmada ise canlı partiküller; bakteriler, mantarlar, mayalar ve yosunlar olmak üzere dört ana gruba ayrılmaktadır. Bunların yanı sıra zaman zaman yoğun miktarda bitkisel kaynaklı partikül de atmosfere salınmaktadır. Özellikle bahar aylarında bitkilerin üreme faaliyetleri sonucu yoğun miktarda polen ve bitkisel salgılar atmosfere yayılmaktadır.

Atmosferik kirleticileri kimyasal yapılarına göre sınıflandırmada ise; bu kirleticileri yine gazlar ve Pm olmak üzere iki ana sınıfa ayırabiliriz. Gazları kendi içerisinde organik ve inorganik menşeyli gazlar olarak sınıflandırırken, Pm leri ise

- 1-sis veya pus (mis-fog),
- 2-duman veya tütsü (fume),
- 3-toz (dust)
- 4-is (smoke) olarak başlıca sınıflandırabiliriz.

Pm'in kimyasal yapılarına göre sınıflandırmada kullanılan türleri kısaca tanımlayacak olursak; sis veya pus (mis-fog), havadaki çok küçük su kürecikleri olarak tanımlanmaktadır. Duman veya tütsü (fume), inorganic ve organic buharların havada yoğunlaşması sonucu meydana gelen parçacıklardır. Toz (dust), büyük katı maddelerin parçalanmaları sonucu oluşan daha küçük parçacıklardır. İs (kurum/baca kurumu) ise, yanma sonucu meydana gelen siyah parçacıklar olarak tanımlanmaktadır.

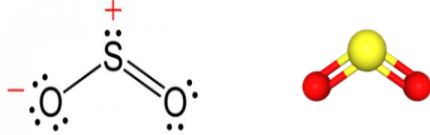
Tez çalışmamızda veri girdisi olarak kullanılan ve kent içerisinde ölçümlenen hava kirleticilerinin genel özellikleri aşağıda detaylı olarak sunulmuştur.

Kükürtdioksit (SO₂)

Kükürt dioksit (SO₂), boğucu renksiz, kirletici ve asidik bir gazdır. Antropojenik kaynaklar sonucu oluşan SO₂, fosil kaynaklı yakıtların doğal olarak yapısında bulunan kükürt bileşiklerinin yanması ile açığa çıkmaktadır SO₂'nin atmosferik konsantrasyonları, endüstriyel alanların çevresinde ve genellikle evsel ısıtma amacıyla kömür kullanımının yaygın olduğu şehirlerde yüksektir.

SO₂ dünya genelinde endüstriyel bölgelerin yakınında yer alan en önemli sorunlardan biri olan asit yağmurlarının temel kaynağıdır. Atmosferde oksijenle reaksiyona girerek SO₃'e dönüşür ve daha sonra su ile reaksiyona girerek sülfürik asidi oluşturur. Asit yağmurları göl ve nehirlerdeki canlı türlerini yok edebilirler, bitki ve ağaç türlerine zarar verebilir. Ayrıca heykel ve binalardaki metal ve taş malzemeye zarar verebilirler. Asit yağmurlarının etkileri yerel bir sorun değildir, kaynağından yüzlerce mil ötedeki bölgelere taşınarak buralarda bölgesel sorunlara yol açabilirler.

Tablo 2. Kükürt Dioksitin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Yapısı	
Moleküler Ağırlığı	64,07 gr/ mol
Molekül Formülü	SO ₂
Erime noktası:	75.51°C
Kaynama noktası:	10.06°C
Özel Yer çekimi :	0,00293
Buhar Yoğunluk :	2.26

Kaynak: (Pubchem 2023; Byjus 2023; Dcceew 2023)

Partikül madde (Pm)

Partikül maddeler (Pm'ler), doğal kaynaklardan ve antropojenik kaynaklı aktivitelerden ortaya çıkan ince partiküller ya da bir gaz içerisinde dağılmış ince katı olarak tanımlanabilir. Partikül maddeler, kent atmosferindeki en önemli hava kirleticileri arasındadır. Pm'ler partikül boyutlarına göre $Pm_{0,1-1}$ - $Pm_{2,5}$ - Pm_{10} (ultra ince, ince ve kaba partiküller) olarak sınıflandırılmaktadır. Dikey ya da yatay konumda taşınabilirlikleri ve yaşam süreleri açısından Pm'leri mukayese edecek olursak; ultra ince partiküller kaynağından metrelerce uzağa taşınabilir ve yaşam süreleri dakikalardan saatlere kadardır. Kaba partiküller ise 10-100 km mesafeye kadar taşınabilir ve yaşam süreleri saatlerden günlere kadardır. İnce partiküller ise binlerce km uzun menzil taşınabilir ve yaşam süreleri günlerden haftalara kadardır.

Tablo 3. Parçacık Çaplarına Göre Pm'lerin Genel Özellikleri

	Bileşenler	Kaynaklar	Ömür	Taşıma Mesafesi
Pm₁ (1 µm Ultra ince parçacıklar)	Birincil yanma - hidrokarbonlar, metaller, organik karbon	Gazlardan ikincil fotokimyasal oluşum, VOC/SVOC Taze otomobil ve yanma emisyonları	Dakikalardan saatlere	Kaynaktan 100'lerce metre uzağa ulaşabilir
Pm_{2,5} (2,5 µm İnce parçacıklar)	Organik/elementel karbon, organik bileşikler, hidrokarbonlar, ultra ince parçacık agregatları, biyolojik materyal, endotoksin	Tüm yanma kaynaklarından birincil Kömür, petrol, gaz, odun, sanayi, yangınlar İkincil gazdan partiküle dönüşüm	Günlerden haftalara	Kaynaktan 1000 veya daha fazla km uzağa ulaşabilir
Pm₁₀ (10 µm Kaba parçacıklar)	Toz, endotoksin, polen, mantar kalıntıları, öğütülmüş malzemeler, metaller (Si, Al, Ca, Fe)	Tarım, toprak, yol tozu, deniz serpintisi, taşlama ve erozyon nedeniyle havada asılı kalma	Saatlerden günlere	Kaynaktan 10-100 km uzağa ulaşabilir

Atmosferik kirleticilerden olan Pm'ler, pek çok çevresel sorunu da beraberinde getirmektedir. Pm'lerin binalar, eşyalar, toprak, bitkiler ve insanlar üzerinde çok önemli olumsuz etkilerinin olduğu bilinmektedir.

Havadaki Pm'lerin insan sağlığı üzerine olan olumsuz etkilerini detaylandıracak olursak; partikül boyutuyla doğrusal orantılı olarak bir bağlantı olduğunu söyleyebiliriz. $Pm \geq 10 \mu m$ olan partiküller burun ve üst solunum yollarında tutunabilirken, $Pm \leq 2.5 \mu m$ olan partiküller akciğer bronşlarına kadar inerek burada birikim yapabilmektedir. Ayrıca Pm'ler; civa, kurşun, kadmiyum gibi ağır metaller ve kanserojen kimyasalları bünyelerinde adsorbe ya da absorbe edebilmenin yanı sıra bu toksik-kanserojen kimyasallar, havanın ve üst solunum

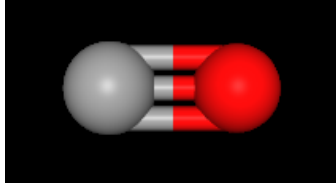
yollarının nemiyile birleşerek önemli sağlık problemlerini de ortaya çıkarabilmektedir (WHO, 2023).

Pm'lerin başlıca doğal kaynakları; volkanik aktiviteler, deniz aerosoller ve tuzları, rüzgârlarla savrulan toprak parçacıkları, yangınlar, çöl kumları, organik bileşikler ve mikroorganizmalar iken; antropojenik kaynakları ise; çimento fabrikaları, termik santraller, metal endüstrileri ve inşaat faaliyetleri, madencilik, taşıtlardan kaynaklanan tozlar, kömür ve petrol türevlerinin yanması sonucu oluşan uçucu küller, tarımsal aktivitelerle atmosfere karışan partiküllerdir. Bu kaynaklardan özellikle antropojenik kökenli olan partiküller, çoğunlukla küçük partikül boyutlarında olup insan sağlığına daha zararlıdır (EPA, 2023).

Karbonmonoksit (CO)

Karbon monoksit (CO), renksiz kokusuz; karbonun karbondioksite oksidasyonunun bir ara ürünüdür. Kentsel ortamlarda kaynağı trafik olan karbon monoksit; otoyol yakınlarında en yüksek düzeyde olup yoldan uzaklaştıkça hızla azalır. Orman yangınları doğal kaynaklarıdır. Kandaki oksijen taşıyan hemoglobin üzerinde kuvvetli etkisi vardır. Renksiz ve kokusuz olması nedeniyle anlaşılması zordur. Bu nedenle zehirlenme olayları sık rastlanan durumlardır. Ayrıca kapalı alanlarda sigara dumanında da bulunmaktadır.

Tablo 4. Karbonmonoksitti Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Yapı	
$:C \equiv O:$	
Moleküler Ağırlık	28.010 g/ mol
Moleküler formül	CO
Erime noktası: -	-205°C
Kaynama noktası: -	-191°C
Buhar Yoğunluk :	0,967 (25°C'de)

Kaynak: (Pubchem 2023; Byjus 2023; Dcceew 2023)

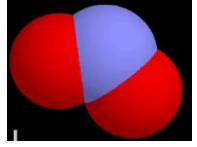
Nitrojen oksitler (NO_x)

Azot oksitler (NO_x), yüksek sıcaklıkta yakma işlemlerinde yanma havasındaki veya yakıtın içerisinde bulunan azotun oksidasyonu sonucu oluşur. NO ve bunun daha ileriki oksitlenme ürünü olan NO₂ bu süreç sonucu oluşmaktadırlar.

Azot oksitler, daha çok enerji santrallerinden ve motorlu araçlardan kaynaklanmaktadır. Bir azot oksit olan azot dioksit'in (NO₂) kentsel alanlardaki kaynakları arasında elektrik üretimi, fabrikalardaki ısı işlemler, endüstriyel prosesler yüksek sıcaklıkta fosil yakıtların

yanması sayılabilir. Bu bileşiğin solunması kalp, karaciğer ve akciğer rahatsızlıklarına ve solunum yolu hastalıklarına yol açabilir.

Tablo 5. Azot Oksitlerin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

	NO	NO ₂
Yapı	$\bullet\text{N}=\text{O}$ 	$\text{O}=\text{N}-\text{O}^\bullet$ 
Moleküler Ağırlık	30.006 g/ mol	46.006 g/ mol
Moleküler formül	NO	NO ₂
Erime noktası:	-163,6°C	-9,3 °C
Kaynama Noktası:	-151,7°C	21,15°C
Buhar Yoğunluk :	1.04	1.58

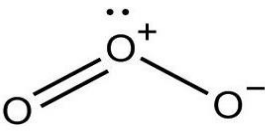
Kaynak: (Pubchem 2023; Byjus 2023; Dcceew 2023)

Yer seviyesi ozonu (O₃)

Atmosferin stratosfer tabakasında bulunan ozon, iyi huylu ozon olarak bilinir ve yeryüzüne güneşten gelen ultraviyole ışınlara karşı bir kalkan görevi görmektedir. Yeryüzüne yakın olan troposfer tabakasında bulunan ozon ise bir kirleticidir ve zararlı etkileri vardır.

Güneş ışığının varlığında, azot oksitleri ile uçucu organik bileşikler arasındaki atmosferik reaksiyonlar sonucu troposferde oluşan ikincil bir kirleticidir. Ozon, biyolojik materyallerle reaksiyona girer, bitki örtüsüne zarar verebilir ve göz, burun ve boğaz tahrişine sebep olabilir. Boyalar, elastomerler ve kauçuk üzerine etkileri vardır. Asit yağmurlarının oluşumuna neden olur ve atmosferde sera gazı olarak bulunur.

Tablo 6. Ozonun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Yapı	 
Moleküler Ağırlık	48 gr/ mol
Moleküler formül	O ₃
Erime noktası:	-192,2 °C
Kaynama noktası:	-112 °C
Yoğunluk :	2,14 kg/m ³

Kaynak: (Pubchem 2023; Byjus 2023; Dcceew 2023)

Hava kirliliğine sebep olan faktörler

Hava kirliliğine sebep olan faktörler; bir bölgenin coğrafi özellikleri, meteorolojik parametreleri ve kent yapısı ile doğrudan ilişkilidir. Hava kirliliği probleminin yaşandığı kentler kendi içerisinde parmak izi gibi bazı özellikler ile farklılık göstermektedir. Ülkemizde özellikle endüstri tesislerinin yoğun olduğu bölgelere yakın kentlerimizde sanayi kaynaklı emisyonlar önemli etki göstermektedir.

Erzurum kent merkezinde yoğun bir endüstriyel faaliyet ve sanayi olmamasına rağmen iklim özellikleri ve arazi yapısı hava kirliliği problemini ön plana çıkarmıştır. Sert karasal iklimin yaşandığı kentte ısınma kaynaklı alansal hava kirlleticileri ön plana çıkmaktadır. Ayrıca kent merkezi dağlar ile çevrili çukur bir ovada olması nedeniyle özellikle kış aylarında rüzgar hızının azalması buna bağlı olarak dikey dağılımın azalması inversiyon tabakasının sık sık görülmesine neden olmaktadır.

Hava kirliliğinin çevresel ve kentsel etkileri

Bu kirliticilerin kent içerisinde insan sağlığı üzerinde hem akut hem de kronik etkileri olduğu ve başta solunum yolları olmak üzere pek çok organı etkilediği bilinmektedir. Üst solunum yolu tahrişi, kronik solunum ve kalp hastalığı, akciğer kanseri, çocuklarda akut solunum yolu enfeksiyonları, yetişkinlerde kronik bronşit, önceden var olan kalp ve akciğer hastalıklarını olumsuz etkileme ve astım atakları gibi pek çok sağlık sorununa neden olmaktadır. Yapılan araştırmalarda; yukarıda verilen kirliticilerin kısa ve uzun vadeli maruziyetlerinde erken ölüm ve pek çok hastalığın tetiklenmesinin yanı sıra depresyona ve ruh sağlığı sorunlarına da neden olduğu belirtilmektedir. 31 Ekim-12 Kasım 2021 tarihleri arasında, İngiltere'nin Glasgow kentinde yapılan Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Konferansında da (COP26) vurgulandığı üzere, yılda 7.8 milyon kişinin hava kirliliğine bağlı sebeplerle farklı türden kanser vakalarına yakalandığı belirtilmiştir.

Hava kirliticilerinin (gaz/Pm) insan sağlığı üzerindeki direk etkilerini detaylandıracak olursak;

CO/CO₂: Karbon monoksitin oksijen taşıma (hemeoglobin) kapasitesini azaltması sonucunda kandaki oksijen yetersizliği nedeniyle kan damarlarının çeperleri, beyin kalp gibi hassas organ ve dokularda fonksiyon bozuklukları meydana gelir.CO₂'in ise küresel sera gazı olarak etkisi bilinmektedir.

SO₂/SO_x: Hava kirleticisi emisyonların en yaygın(indicator gaz) olanı kükürtdioksit (SO₂) dir. Her yıl tonlarca SO₂ çeşitli kaynaklardan atmosfere karışmaktadır Havadaki subuharının içerisinde çözünüp H₂SO₃/H₂SO₄ formunda asit yağışları oluşturduğu için SO₂ ve

atmosferdeki kükürtlü gazlar, iritan etki gösterirler. Solunan yüksek konsantrasyondaki kükürt dioksitin %95'i üst solunum yollarından absorbe olarak burada nem içerisinde çözünüp asit türevlerine çevrilir. Bunun sonucu olarak, bronşit, anfizem ve diğer akciğer hastalık semptomları meydana gelir.

$\text{NO}_2/\text{NO}_x/\text{N}_2\text{O}$: Azotoksitlerin atmosferdeki bulunuşu yaklaşık olarak yarı yarıya taşıt egzosu ve sabit yakma tesislerinden dolayıdır. Bu gazlar atmosferde doğal gaz çevrimine girerek, nitrik asit (HNO_3) oluşumuyla sonuçlanan zincirleme reaksiyonları tamamlarlar. Atmosferdeki $\text{HNO}_2/\text{HNO}_3$ oluşumu ise asit yağışlarına katkıda bulunarak zarar potansiyelini artırır. Yağmurun azot gazları içeriğindeki artış; toprakta, su havzalarında ve göllerde nitrifikasyon yapan bakteriler ve oksijen sayesinde nitrit asite dönüştüğünde yağmurun asiditesini ayrıca 4 kat artırmaktadır. Ayrıca asit aerosolleri ile partiküler maddelerin akciğerlerden alveollere kadar taşınması nedeniyle bu kirleticilerin birarada bulunduklarında yaptıkları olumsuz sağlık etkileri; her birinin ayrı ayrı yaptığı etkilerden daha fazla olur.

Pm ($\text{Pm}_{1-2.5-5-10}$) : Partikül maddelerin fiziksel yapısı ve kimyasal kompozisyonu sağlık açısından oldukça önemlidir. Kanserojen organik kimyasallar (PAH, dioksin, furan gibi) içeren partikül maddeler sağlık açısından çok tehlikelidir. Birçok farklı bileşenden oluşmuş olan partikül maddeler akciğerdeki nemle bileşerek aside dönüşmektedir. Pm_{10} , akciğere kadar ulaşır, kanın içindeki karbon dioksitin oksijene dönüşümünü yavaşlatmakta buna nefes darlığına neden olmaktadır. Bu durumda oksijen kaybının giderilebilmesi için kalbin daha fazla çalışması gerektiği için kalp üzerinde ciddi bir baskı oluşturmaktadır. Partikül maddelerin sağlık üzerine etkileri akutten daha çok kroniktir.

Hava kirletici gaz ve Pm'lerin direk primer(birincil) etkileri insan başta olmak üzere canlı sağlığı üzerine olmaktadır.

Hava kirletici gazların birincil etkilerinin yanısıra, sebep oldukları seconder(ikincil) etki içerisinde en önemlileri

1. Global Sera etkisi ve radikal iklim değişiklikleri ($\text{CO}_2\text{-CH}_4\text{-N}_2\text{O-O}_3\text{-CFC'ler}$)
2. Stratosferik Ozon tabakasının radikal zincir parçalanma reaksiyonlarına girerek incilmesi (PAN,CFC'ler,hv)
3. Fotokimyasal Smog ($\text{NO}_x\text{-HC'lar-O}_3\text{-hv}$) neticesinde zararlı Pm'lerin artışı ve görüş mesafesinin düşmesi sonucu trafikte çıkabilecek sorunlar
4. SO_x ve NO_x gibi gazların subuharı içerisinde tepkimeye girerek asit yağışlarını oluşturması sonucu korozyon etkisiyle gerek canlıların gerekse ağaç, bitki örtüsü,yüzeyel su,yapı ve tarihi eserlerin zarar görmesi

Bitkilerde özellikle yapraklarda klorofil eksikliğinden ileri gelen sararma ve dökülmeler le başlayıp, bitkilerin kuruması ve ölümü ile neticelenir. Hayvanlarda ise insanlara benzer tarzda akut ve kronik hastalıklar oluşur (Ceylan 2023).

Hava kirleticilerinin akıbeti

Hava kirleticilerinin atmosferdeki akıbeti, çeşitli faktörlere bağlı olarak değişebilir. Bu kirleticiler, atmosferde farklı kimyasal ve fiziksel süreçlere tabi tutularak etkisi azalabilir, taşınabilir veya dönüşebilir. Bazı yaygın hava kirleticilerinin atmosferdeki akıbetine dair genel bilgiler aşağıda sunulmuştur:

Kararlı Gazlar (CO₂, Methan): Bu gazlar, genellikle uzun ömürlüdür ve atmosferde yıllarca hatta yüzyıllarca kalabilirler. Özellikle karbon dioksit (CO₂), atmosferde çeşitli süreçlerle karbon döngüsüne katılır.

Azot Oksitler (NO_x): Azot oksitler, atmosferde ozon oluşturan reaksiyonlara katılabilir. Ayrıca, azot dioksit (NO₂) gibi bazı bileşenler, yağmurla birleşerek nitrik asit oluşturabilir ve asit yağmurlarına neden olabilir.

Partikül Madde (Pm): Partikül madde, havada asılı kalarak veya yerel olarak çökerek bir bölgeden diğerine taşınabilir. Yağmurla birlikte yerel olarak yıkandıkları gibi, atmosferdeki çeşitli süreçlere bağlı olarak kimyasal olarak dönüşebilirler.

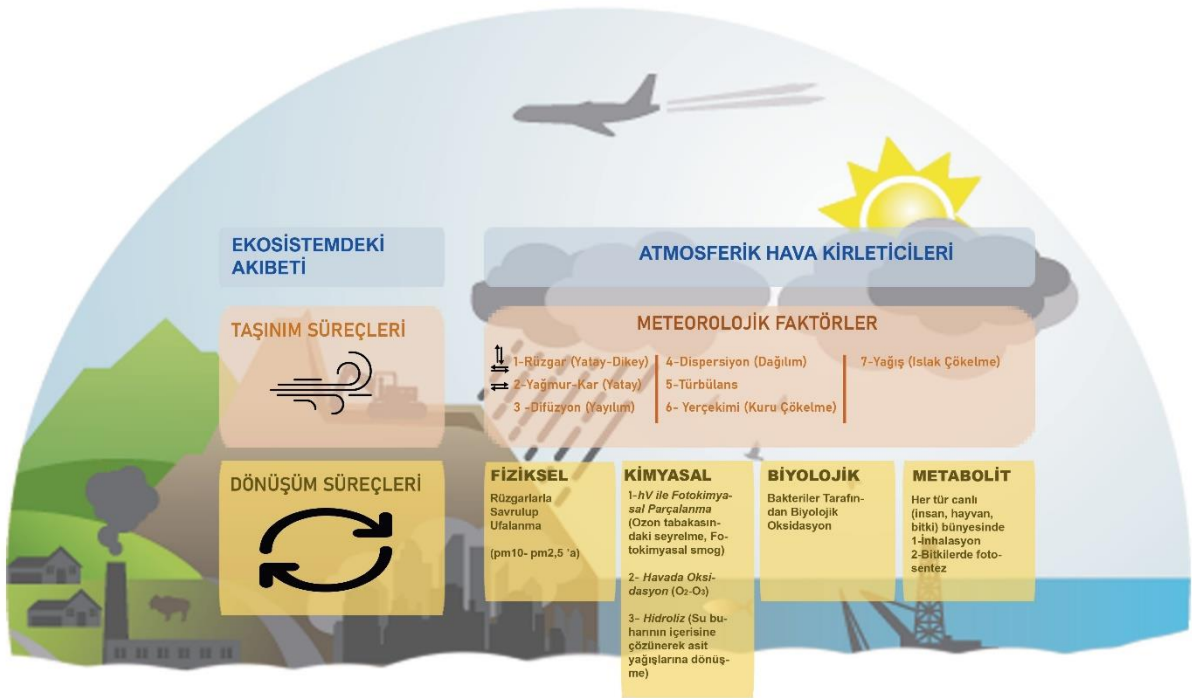
Kükürt Dioksit (SO₂): SO₂, atmosferde çeşitli kimyasal reaksiyonlara girerek sülfat aerosollerine dönüşebilir. Bu aerosoller, atmosferde kalabilir veya yağışlarla temizlenebilir.

Hava kirleticilerinin atmosferdeki fiziksel dönüşümü, kirleticilerin fiziksel olarak taşınmasını, dağılmasını ve bir araya gelmesini içeren süreçleri ifade eder. Bu dönüşüm süreçleri, kirleticilerin atmosfer içindeki hareketini ve etkileşimini şekillendirir. İşte hava kirleticilerinin atmosferdeki fiziksel dönüşümüne dair bazı önemli faktörler:

- **Rüzgarlar:** Rüzgarlar, hava kirleticilerini atmosferde taşır ve dağıtır. Kirleticiler, rüzgarların yönü ve hızına bağlı olarak farklı bölgelere yayılabilir.
- **Yerçekimi:** Partikül madde gibi ağır kirleticiler, yerçekimi etkisiyle atmosferden çökebilir ve yüzeylere yerleşebilir.
- **Dispersiyon:** Hava kirleticileri, atmosferde dağılarak geniş bir alana yayılır. Bu, kirleticilerin yoğunluğunun zamanla azalmasına ve daha geniş bir bölgeye yayılmasına yol açar.
- **Diffüzyon:** Gaz halindeki kirleticiler, atmosferde karışarak yayılır. Bu, moleküller arasındaki rastgele termal hareketin bir sonucudur.

- **Atmosferik Karışım:** Hava kirleticileri, atmosferdeki karışım süreçleriyle birbirine karışabilir. Bu, kirleticilerin homojen bir şekilde dağılmasına katkı sağlar.
- **Türbülans:** Atmosferdeki türbülanslar, kirleticilerin karışımını artırarak daha geniş bir alana yayılmasına katkıda bulunabilir.
- **Uzun Menzilli Taşınım:** Rüzgarlar, hava kirleticilerini uzak mesafelere taşıyabilir. Bu, belirli bir bölgede üretilen kirleticilerin başka bir bölgede etkili olmasına neden olabilir.
- **Güneş Radyasyonu:** Güneş ışığı, atmosferde foto-kimyasal reaksiyonlara yol açabilir. Bu reaksiyonlar, kirleticilerin fotokimyasal dönüşümünü tetikleyerek yeni bileşenlerin oluşumuna neden olabilir.

Bu fiziksel dönüşüm süreçleri, hava kirleticilerinin atmosferde nasıl yayıldığını, taşındığını ve birbirleriyle etkileşime girdiğini belirler.



Şekil 12. Kirletici gazların ve Pm'lerin Taşınım ve Dönüşüm süreçleri

Hava kirleticilerinin atmosferdeki kimyasal dönüşümü, kirleticilerin atmosferdeki kimyasal reaksiyonlar sonucunda farklı bileşenlere dönüşmesini ifade eder. Bu kimyasal dönüşüm süreçleri, atmosferdeki kirleticilerin kompozisyonunu değiştirerek, kirleticilerin kaynağından uzak bölgelere taşınmasını, çökmesini veya başka kirleticilere dönüşmesini etkileyebilir. Bazı hava kirleticilerinin atmosferdeki kimyasal dönüşüm örnekleri:

- Ozon Oluşumu: NO_x, atmosferde reaktif organik bileşenlerle (VOC'ler) bir araya gelerek ozon oluşturabilir. Bu, özellikle güneş ışığı altında foto-kimyasal reaksiyonlarla gerçekleşir.
- Sülfat Aerosol Oluşumu: SO₂, atmosferdeki nem ve diğer reaktanlarla birleşerek sülfat aerosollerine dönüşebilir. Bu aerosoller, havadan çökerek temizlenir veya yağışlarla temizlenir.
- Organik Partikül Madde Oluşumu: VOC'lerin atmosferde oksidasyonu ve diğer reaktanlarla birleşmesiyle organik partikül madde oluşabilir.
- Oksidasyon: CO, atmosferde oksijen (O₂) ile reaksiyona girerek karbon dioksit (CO₂) oluşturabilir.
- Metanın Oksidasyonu: Metan, atmosferde hidroksil radikalleri ile reaksiyona girerek su buharı (H₂O) ve karbon dioksit (CO₂) oluşturabilir.
- Oksidasyon ve Reaksiyonlar: Karbonik bileşenler, atmosferde oksijen ve diğer reaktanlarla reaksiyona girerek farklı ürünlere dönüşebilir.

Bu kimyasal dönüşüm süreçleri, hava kirleticilerinin atmosferdeki ömrünü, taşınmasını ve etkilerini belirler. Ayrıca, bu süreçler, hava kalitesi modellemesinde ve hava kirliliği kontrol stratejilerinin geliştirilmesinde önemli bir rol oynar.

Atmosferdeki hava kirleticilerinin biyolojik dönüşümü, özellikle atmosferde bulunan mikrobiyal topluluklar tarafından etkileşimlere tabi tutularak gerçekleşir. Bu süreçler, kirleticilerin biyolojik aktiviteye maruz kalarak kimyasal değişime uğramasını içerir. Özellikle, atmosferdeki biyoaerosoller, bakteriler, mantarlar ve diğer mikroorganizmalar, hava kirleticileri üzerinde biyolojik etkileşimlerde bulunabilir. Bu etkileşimler sonucunda ortaya çıkan biyolojik dönüşümler, kirleticilerin moleküler yapısında, özellikle oksidatif ve enzimatik reaksiyonlar aracılığıyla meydana gelen değişiklikleri içerir.

Örneğin, sülfür dioksit (SO₂) atmosferdeki mikroorganizmalar tarafından sülfat (SO₄²⁻) iyonlarına dönüştürülebilir. Bu dönüşüm, bakterilerin ve diğer mikroorganizmaların sülfür oksitleri üzerindeki enzimatik etkileşimleri ile gerçekleşir. Benzer şekilde, azot oksitler (NO_x) atmosferdeki bakteriyel aktivite ve diğer biyolojik süreçler sonucunda atmosferik nitrat (NO₃⁻) ve nitrit (NO₂⁻) iyonlarına dönüştürülebilir.

Bu biyolojik dönüşüm süreçleri, hava kalitesi ve atmosferik kimya açısından önemli olan çeşitli kirleticilerin biyolojik etkileşimlerini içerir.

Hava kirleticilerinin atmosferdeki uzun menzilli taşınımı, genellikle atmosferik dolaşım sistemlerinin etkisi altında meydana gelir. Bu taşınım, kirleticilerin kaynağından atmosferin üst

katmanlarına kadar uzanan yüksekliklerdeki rüzgarlar ve jet akıntıları tarafından desteklenir. Bu atmosferik akımlar, kirleticilerin büyük mesafeler boyunca taşınmasına ve geniş coğrafi alanlara dağılmasına olanak tanır. Özellikle batı rüzgarları ve yüksek seviyedeki jet akıntıları gibi büyük ölçekli atmosferik dolaşım sistemleri, hava kirleticilerinin doğu-batı veya kuzey-güney yönlü uzun mesafeler boyunca taşınmasını kolaylaştırır. Bu taşınım, kirleticilerin bir bölgeden diğerine, hatta kıtalararası uzaklıklara ulaşmasına olanak tanıyabilir.

Uzun menzilli taşınımın etkileri, özellikle atmosferdeki karışım oranlarını ve konsantrasyonları etkileyerek, hava kalitesini geniş coğrafi alanlarda etkileyebilir. Bu durum, bir bölgede üretilen kirleticilerin sadece yerel hava kalitesini değil, aynı zamanda uzak bölgelerdeki hava kalitesini de etkileyebileceği anlamına gelir.

Hava kirleticilerinin atmosferdeki yatay taşınımı, genellikle atmosferdeki yatay rüzgar akımları tarafından yönlendirilir. Bu rüzgarlar, atmosferin farklı katmanları arasında meydana gelen basınç farkları ve sıcaklık değişimleri nedeniyle oluşan dolaşım sistemleri tarafından tetiklenir. Yatay taşınım, rüzgarların etkisiyle kirleticilerin kaynağından uzak bölgelere doğru yayılmasını içerir. Dikey taşınım ise genellikle termal konveksiyon ve atmosferdeki diğer termik süreçlerle ilişkilidir. Güneş ışığının etkisiyle yüzeyde ısınan hava yükselirken, soğuyan hava ise alçalır. Bu dikey hareket, hava kirleticilerinin atmosferin farklı katmanları arasında taşınmasına neden olur. Özellikle şehirlerdeki ısınan beton ve asfalt gibi yüzeyler, termal konveksiyonun yoğun olduğu alanlardır.

Hava kirleticilerinin bu yatay ve dikey taşınım süreçleri, hava kalitesi modellerinin geliştirilmesi ve hava kirliliği kontrol stratejilerinin oluşturulması açısından önemlidir. Atmosferdeki dinamik etkileşimlerin anlaşılması, hava kalitesi üzerindeki etkileri değerlendirmek ve uygun önlemler almak için temel bir bilgi kaynağıdır.

Pmlerin uzun menzîl taşınımları

Dikey ya da yatay konumda taşınabilirlikleri ve yaşam süreleri açısından Pm'leri mukayese edecek olursak; ultra ince partiküller (Pm_1) kaynağından metrelerce uzağa taşınabilir ve yaşam süreleri dakikalardan saatlere kadardır. Kaba partiküller (Pm_{10}) 10-100 km mesafeye kadar taşınabilir ve yaşam süreleri saatlerden günlere kadardır. İnce partiküller ise ($Pm_{2.5}$) binlerce km uzun menzîl taşınabilir ve yaşam süreleri günlerden haftalara kadardır (EPA, 2023).

Kent atmosferine çöl tozu taşınımı önemli çevresel sorunlara neden olmaktadır (Topuz ve Karabulut 2015; Chun *et al.* 2001, Şengün ve Kıranşan, 2013; Öztaner vd., 2014; Tan 2016; Bağcı ve Şengün, 2012; Korkmaz and Ceylan 2023). Çöl tozu taşıdığı Pmler ile, fiziki açıdan atmosferi kaplayarak güneş radyasyonunda değişim meydana getirmekte (Öztaner vd., 2014),

yağış üzerine etki etmekte (Işık vd., 2015) ve insan ve çevre sağlığı için oldukça riskli durumlar oluşturabilmektedir (Şengün ve Kıranşan 2012; Oğuz vd., 2013). Görüş mesafesini düşürerek; kara, hava ve deniz trafiğinde zaman zaman sıkıntılara neden olabilmektedir. Ayrıca çöl tozu taşınımı, kent atmosferinde en önemli hava kirleticilerinden biri olan Pm ($Pm_{2.5}$ - Pm_{10}) miktarını artırmaktadır. (MGM 2023a)

Çöl tozları taşınımı için ana kaynak bölgeleri ve taşınım yolları üzerinde bulunmayan Türkiye, zaman zaman çöl tozlarının uzun menzil taşımından etkilenmektedir (Şengün ve Kıranşan, 2012). Özellikle Güneydoğu-Kuzeydoğu Anadolu ve Doğu Akdeniz bölgeleri, çöl tozlarından en çok etkilenen bölgelerdir (Oğuz vd., 2015). Türkiye'ye taşınan çöl tozlarının içeriği kaynak noktalarının fiziko-kimyasal özellikleri ve taşınım yolu üzerindeki atmosfer bileşiminden doğal olarak etkilenmektedir (Topuz ve Atbulut 2015; Şengün ve Kıranşan; 2012; Oğuz vd., 2013). Bulunduğu konum itibarıyla Türkiye'yi güneyinde yer alan Kuzey Afrika'da Büyük Sahra, Ortadoğu'da Suriye, İran ve Arabistan çölleri etkilemektedir (Şengün ve Kıranşan, 2012).

Türkiye'nin güneyinde yer alan çöl bölgelerden taşınan çöl tozları hakkında pek çok araştırma mevcuttur (Öztaner vd., 2013; Doğan vd. 2018; Baltacı vb. 2020; Tepe ve Doğan, 2021; Doğan vd. 2021; Baltacı ve Ezber, 2022; Korkmaz and Ceylan 2023). Yapılan bu çalışmalar, güney orjinli çöl tozunun uzun menzil taşınarak Türkiye'deki bazı kentleri nasıl etkilediği (Baltacı vb. 2020; Doğan vd. 2021) ve taşınım yollarının ve orijinlerinin neresi olduğu üzerinedir (Özdemir 2019; Doğan ve Yalçın, 2020). Taşınan çöl tozları ile birlikte kentlerde Pm konsantrasyonları artmakta ve çevre üzerine olumsuz etkiler görülmektedir. Bazı çalışmalarda ise taşınan Pmlerin kimyasal karakterizasyonu (Tepe ve Doğan, 2021; Işık vd. 2022) ile ilgili bilgi verilirken kaynak noktalarının fiziko-kimyasal özellikleri (Baltacı ve Ezber, 2022) ortaya koyulabilmektedir. Türkiye'ye uzun menzil taşınan Pmlerin büyük çoğunun kaynağının Kuzey Afrika ve Ortadoğu çöl tozları olduğu vurgulanmaktadır (Baltacı ve Ezber, 2022). Dünyanın en büyük toz kaynağı olan Sahra Çölü, her yıl Afrika kıtasından Türkiye'ye taşınan milyonlarca ton mineral tozu nedeniyle Türkiye'nin hava kalitesini önemli ölçüde etkilemektedir (Çapraz ve Deniz, 2021).

Türkiye, konumu itibarıyla kuzey Afrika ve Ortadoğu çöl bölgelerine yakın hassas bir bölgede yer almaktadır. Dolayısı ile oldukça sık meydana gelen ve canlılar üzerinde çok önemli etkilere sahip olan uzun menzil çöl tozu taşınımının incelenmesi bu noktada önemli bir konudur. Bu çalışmada, Erzurum kent merkezine taşınan uzun menzil kirleticilerin ve çöl tozlarının kaynağı ve yörüngesi HYSPLIT back-trajectory modeli yardımıyla incelenmiştir. HYSPLIT modeli yardımıyla yüksek hava kirliliği seviyelerinin görüldüğü günlerde

kirleticilerin o andaki meteorolojik koşullar altında ölçüm yerine ulaşmaya kadar izlediği yörüngeler belirlenmiştir. Bu yörüngeler ve kentin etrafındaki kirletici kaynakların konumları ve özellikleri dikkate alınarak bölgedeki mevcut hava kalitesi hakkında yorumlar yapılmıştır.

Hava kalitesi mevzuatı

Ülkemizde yukarıda belirtilen kirleticiler için ÇŞİDB tarafından Resmi Gazete'de 06.06.2008 tarih ve 26898 sayı ile yürürlüğe konulan Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliğinde ve halen hazırlıkları devam eden gelecekte yürürlüğe konulacak olan Dış Ortam Hava Kalitesinin Yönetimi Yönetmeliği'nde sınır değerler belirlenmiştir (Mevzuat 2023). Belirtilen sınır değerlerin aşıldığı durumlarda bakanlık ve ilgili yerel yönetimler (Valilikler ve belediyeler) tarafından kent içerisinde gerekli önlemlerin alınması söz konusu olacaktır.

Tablo 7. Hava Kalitesi Sınır Değerleri

Kirletici ve Ortalama Süre		Hedeflenen Sınır Değerler					AB Sınır Değerine Ulaşılabilecek Tarih
		2018	2019	2020	2021	2022	
SO₂ (µg/m ³)	Saatlik	380	350	350	350	350	1 Ocak 2019
	24 Saatlik	150	125	125	125	125	1 Ocak 2019
	Yıllık ve Kış Dönemi (Ekosistemin Korunması)	20	20	20	20	20	1 Ocak 2014
Pm₁₀ (µg/m ³)	24 Saatlik	60	50	50	50	50	1 Ocak 2019
	Yıllık	44	40	40	40	40	1 Ocak 2019
Pm_{2.5}	Yıllık	-	-	-	30	29	-
NO₂ (µg/m ³)	Saatlik	260	250	250	250	250	1 Ocak 2024
	24 Saatlik	44	40	40	40	40	1 Ocak 2024
NO_x (µg/m ³)	Yıllık (Vejetasyonun Korunması İçin)	30	30	30	30	30	1 Ocak 2019
O₃	Mayıs Ayından Temmuz Ayına Kadar 1 Saatlik Değerlerden Hesaplanacak AOT40	18000 (µg/m ³ .saat)					1 Ocak 2022
O₃	Bir yılda Maksimum Günlük 8 Saatlik Ortalama	120					1 Ocak 2022

Pm₁₀ SO₂ NO₂ NO_x O₃ değerleri hâlihazırda yürürlükte olan Hava Kalitesi Değerlendirme Ve Yönetimi Yönetmeliğinden Pm_{2.5} değerleri yürürlüğe girecek olan Dış Ortam Hava Kalitesinin Yönetimi Yönetmeliği'nden alınmıştır.

Hava kalitesi indeksi (HKİ), hava kalitesinin günlük olarak rapor edilmesi için kullanılan bir indekstir. Bu indeks; bir bölgenin hava kalitesi hakkında ve ne tür sağlık etkilerinin oluşabileceği konusunda bilgiler vermektedir. Hava kalitesi indeksi, farklı hava kalitesi seviyeleri ile birlikte bunların genel halk sağlığı üzerindeki etkisini ve sağlıklı seviyeye yükseldiğinde alınması gereken kademeleri de belirtmektedir.

Tablo 8. Hava Kalitesi İndeksi Skalası ve Renkler

Hava Kalitesi İndeksi (AQI) Değerler	Sağlık Endişe Seviyeleri	Renkler	Anlamı
<i>Hava Kalitesi İndeksi bu aralıkta olduğunda..</i>	<i>..hava kalitesi koşulları..</i>	<i>..bu renkler ile sembolize edilir..</i>	<i>..ve renkler bu anlama gelir.</i>
0 - 50	İyi	Yeşil	Hava kalitesi memnun edici ve hava kirliliği az riskli veya hiç risk teşkil etmiyor.
51 - 100	Orta	Sarı	Hava kalitesi uygun fakat alışılmadık şekilde hava kirliliğine hassas olan çok az sayıda insan için bazı kirlleticiler açısından orta düzeyde sağlık endişesi oluşabilir.
101 - 150	Hassas	Turuncu	Hassas gruplar için sağlık etkileri oluşabilir. Genel olarak kamunun etkilenmesi olası değildir.
151 - 200	Sağlıksız	Kırmızı	Herkes sağlık etkileri yaşamaya başlayabilir, hassas gruplar için ciddi sağlık etkileri söz konusu olabilir.
201 - 300	Kötü	Mor	Sağlık açısından acil durum oluşturabilir. Nüfusun tamamının etkilenme olasılığı yüksektir.
301 - 500	Tehlikeli	Kahverengi	Sağlık alarmı: Herkes daha ciddi sağlık etkileri ile karşılaşabilir.

Kaynak: (SİM CBS, 2023)

Ulusal Hava Kalitesi İndeksi, EPA Hava Kalitesi İndeksini ulusal mevzuatımız ve sınır değerlerimize uyarlayarak oluşturulmuştur. Beş temel kirleticisi için hava kalitesi indeksi hesaplanmaktadır. Bunlar; Pm₁₀, CO, SO₂, NO₂ ve O₃ dur. Hava kalitesi indeksi altı kategoriden oluşmaktadır. Matematiksel hesaplama yoktur, yalnızca sınıflandırmadır ve en yüksek kirleticisi için belirlenen değer indeks değeridir. Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği 2008 yılında yürürlüğe konulmuş, daha sonra Hava Kalitesi Yönetim Dairesi Başkanlığı tarafından 2010/14 Hava Kirliliğinin Kontrolü ve Önlenmesi Genelgesi, 2011/4 İthal Katı Yakıtlar Genelgesi, 2013/37 Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Genelgesi, 2015/02 İthal Katı Yakıtlar Genelgesi, 2021/19 İthal Katı Yakıtlar Genelgesi, 2022/20 Tekstil Sektöründe Temiz Üretim Uygulamaları ve 2022/17 Yakıt ve Yakma Sistemleri Değişikliği Talepleri Hakkında Genelge ile güncellenmiştir.

Hava kalitesi izleme

Türkiye'de hava kalitesi izlemesi, ÇŞİDB'nin sorumluluğu altında Türkiye genelinde 365 adet sabit hava kalitesi ölçüm istasyonu ile gerçekleştirilmektedir. Bu istasyonlar ve araçlar, çeşitli gaz ve partikül kirleticilerin seviyelerini ölçerek hava kalitesini takip etmektedirler. Ölçümler, saatlik, günlük, aylık ve yıllık olarak yapılmakta ve elde edilen veriler, halka açık olarak ÇŞİDB Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı portalında yayınlanmaktadır. Ayrıca, bazı belediyeler ve üniversiteler de kendi hava kalitesi ölçüm istasyonlarına sahip olup, bölgesel ölçümler gerçekleştirmektedirler.

Türkiye genelinde İstanbul, Samsun, Erzurum, İzmir, Adana, Konya, Ankara, Diyarbakır merkez olmak üzere sekiz Temiz Hava Merkezi Müdürlüğü kurulmuştur. Bu merkezlere bağlı kurulan hava kirliliği ölçüm istasyonlarının hepsinde Kükürtdioksit (SO_2) ve Partikül Madde (Pm_{10}) parametrelerine ek olarak Azotoksitler (NO , NO_2 , NO_x), Karbonmonoksit (CO) ve Ozon (O_3) da tam otomatik olarak ölçülmektedir. Ölçüm istasyonlarında toplanan ölçüm veriler GSM modemler aracılığıyla ÇŞİDB ait Çevre Referans Laboratuvarı Veri İşletim Merkezine aktarılarak eşzamanlı olarak izlenmektedir. Saatlik ortalamalar şeklinde istasyonlardan alınan veriler incelenerek doğrulama çalışmaları yapılmakta olup söz konusu verilerle aylık ve yıllık raporlar hazırlanarak yayınlanmaktadır.

Ülkemizde ve dünyada kentlerdeki hava kalitesinin ölçülmesi için değişik yöntemler kullanılmaktadır. İlgili pek çok kuruluş (yerel yönetimler) ve üniversiteler bulundukları kent merkezi atmosferindeki hava kirleticilerini ölçümlemektedirler. Bu ölçüm yöntemleri değişiklik göstermekle birlikte, bazı kuruluşlar kent içerisinde farklı özelliklere (kırsal, endüstriyel, kentsel, turizm. vb) sahip noktalara ölçümleme istasyonu kurmak suretiyle ölçümlerini yapmaktadırlar. Özellikle ülkemizde ÇŞİDB kendisine ait belirli noktalara sabit olarak konuşlandırılmış konvansiyonel hava kalitesi izleme istasyonları (Şekil 13A) kurmak suretiyle, kentlerde hava kalitesini takip edilerek alınan veriler hava kalitesi izleme ağı yardımıyla saatlik olarak paylaşılmaktadır.



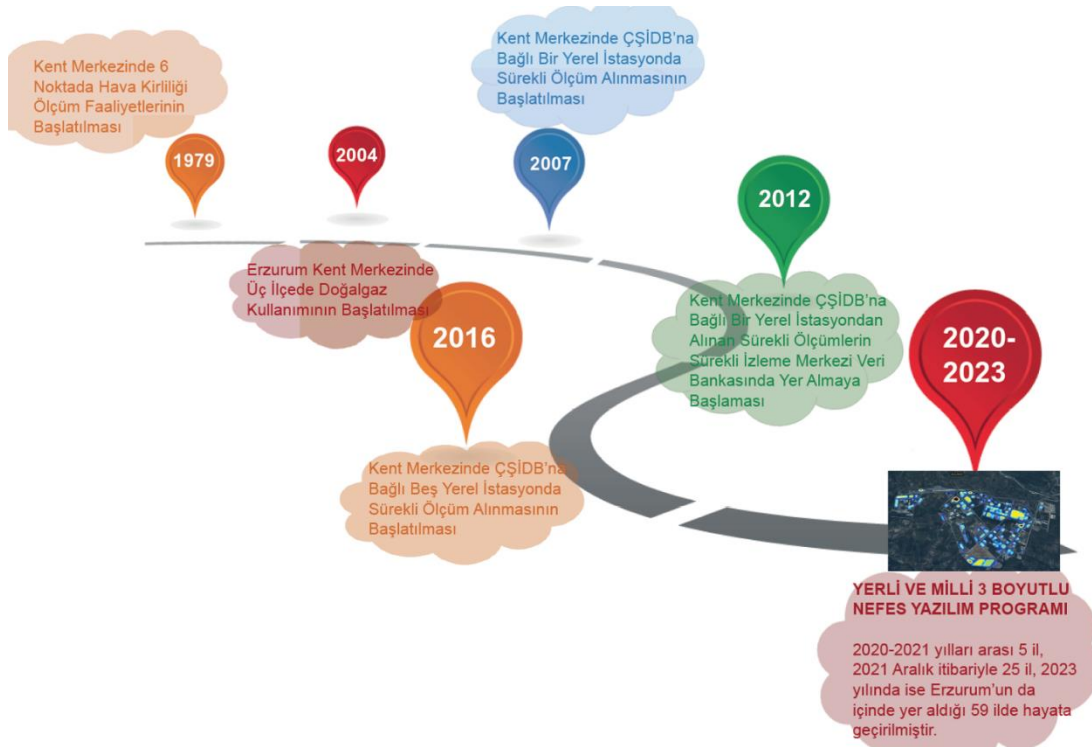
Şekil 13. A) Konvansiyonel hava kalitesi izleme istasyonu B) Mobil hava kalitesi ölçüm aracı

ÇŞİDB kentlerde kurduğu bu hava kalitesi izleme istasyonlarının yanı sıra, bazı noktalarda da ölçüm alabilmek için mobil hava kalitesi ölçüm araçları da kullanmaktadır. Mobil ölçüm araçları; ölçüm istasyonlarında yer alan ölçüm sistemlerinin bir kabin içerisinde taşıyıcı kamyon üzerine yerleştirilmesi ile oluşturulmuştur (Şekil 13B). Bu sayede gezici bir hava kalitesi izleme istasyonu oluşturulup, veri alınmak istenen noktaya taşınarak ölçüm yapılabilmektedir. Kent içerisinde bakanlığa ait bu hava kalitesi ölçüm istasyonlarının yanı sıra hava kalitesini ölçen başka kurum ve kuruluşlara ait merkezi istasyonlarda bulunabilmektedir.

ÇŞİDB'na ait bu ölçüm istasyonlarının belirli aralıklarla kalibrasyonları ve bakım onarımları (gecikmeli de olsa) yapılmaktadır. Ancak kullanılan bu sistemlerin bazı dezavantajları mevcuttur. Şöyle ki, bu ölçüm istasyonları büyük hacimli, maliyeti yüksek ve her noktaya kolayca kurulamayan üniteler olup mobiliteleri oldukça düşük, teknik bakım ve teknik personel ihtiyaçları ise yüksektir. Teknik bazı problemlerden dolayı bazen uzun süreler boyunca (1-12 ay gibi) veri alınamaması durumuyla da karşılaşılabilir. Örneğin Erzurum kent merkezindeki istasyonlardan birinde Mart 2019-Mart 2020 ve Pasinler istasyonunda ise Mart 2021-Ağustos 2021 tarihleri arasında PM_{10} verisi maalesef alınamamıştır. Bu tarz veri eksiklikleri hava kalitesinin yorumlanmasında ve hava kalitesi kirlilik haritalarının oluşturulmasında güvenilirlik açısından ciddi sıkıntılara neden olmaktadır. Kent içerisinde az sayıda istasyon kurulabilmesi; bu noktaların kentin genel hava kalitesini temsil etmesi konusunda da bazı kaygılar oluşturmaktadır. Bu istasyonlar; kentin farklı noktalarında farklı emisyon kaynakları (noktasal/çizgisel/alansal kaynaklar) nedeniyle hava kalitesinin değiştiği farklı topoğrafik ve kentsel noktalara taşınamadıklarından dolayı, gerçek hava kalitesi değerlerini veremeyeceği konusunda dezavantajlıdır.

Erzurum'da hava kalitesi yönetimi

Erzurum kent merkezi; hava kirliliği boyutuyla Türkiye genelinde medyada adından sıklıkla bahsedilen ve ön plana çıkan şehirler arasında yer almaktadır. Deniz seviyesinden 2000 m yükseklikte olan ve uzun kış mevsiminin yaşandığı Erzurum'da fosil kökenli yakıtlarla (Taş kömürü-Linyit) gerek ısınmadan kaynaklanan gerekse inanılmaz hızla artan trafik yoğunluğundan dolayı hava kirliliği problemi uzun yıllardan beri süregelen bir problemdir. Dağların ortasında kalan yayla şehri olarak yerleşmesi de hava kirliliği açısından ayrı bir talihsizlik olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu duruma bir çözüm olarak 2004 tarihinden itibaren yine fosil kökenli bir yakıt olan doğalgaza geçilmiş ve hâlihazırda tercihen geçiliyor olmasına rağmen sosyoekonomik durumlardan dolayı değişik ihtiyaçların karşılanması için doğalgaza geçmiş siteler ve evlerin dahi soba kurarak kömür yaktığı ne yazık ki bilinen bir gerçektir. Kent nüfusunun orantısız artışına istinaden yeni kurulmuş ve kurulmakta olan pek çok semt ile beraber Erzurum kenti hava kirliliği ölçümlerinin (gaz-Pm) gerçeği yansıtmadığı aşikârdır. Erzurum'da akıllı kent sistemlerine entegre edilebilecek mobil hava kalitesi ölçüm istasyonlarının kurulmasında öncülük edecek bu çalışmamızın ehemmiyetinin şehrimiz açısından ne derece önemli olduğu ortadadır. Kent içerisinde yer alan beş istasyonun sadece bir tanesinde (Taşhan) Pm_{2.5} ölçülürken diğer istasyonlarda Pm_{2.5} ölçümü yapılamamaktadır. Ayrıca yine kent içerisinde yer alan dört istasyondan sadece üç tanesinde CO (Aziziye-Taşhan-Palandöken) iki tanesinde O₃ (Merkez-Palandöken) ve üç tanesinde SO₂ (Aziziye-Merkez-Palandöken) ölçülememektedir.



Şekil 14. Erzurum ilinde hava kirliliği ölçüm ve araştırma faaliyetleri zaman çizelgesi

Erzurum'da hava kirliliği ölçüm ve araştırma faaliyetleri 1979 yılında 6 merkezde (Üniversite Yerleşkesi, Aziziye İlköğretim Okulu, 12 Mart İlköğretim Okulu, Devlet Demiryolları Binası, Yakutiye Belediye Binası ve Hıfzısıhha Binası) yapılan bir çalışma ile başlamıştır. 2007 yılında ÇŞİDB'na bağlı bir yerel ölçüm istasyonu kurulmuş ve sürekli ölçüm alınmaya başlanmıştır (Sağol vd. 2008). 2023 yılı itibariyle kent merkezinde ÇŞİDB'na bağlı 5 istasyonda ölçüm yapılmaktadır (UHKIA 2023).

Erzurum iline ait 1996–2008 yıllarını içeren bir çalışmada; SO₂ ve Pm ölçüm sonuçları kullanılmış son 13 yılda kirlетici konsantrasyonlarında meydana gelen değişimler yorumlanmıştır. 2004 yılından itibaren doğalgazın kent içerisinde kullanılmasıyla kirlетici konsantrasyonlarının gözle görünür bir şekilde düştüğü belirtilmiştir (Koşan vd 2008).

Kent merkezinde yapılan başka bir çalışmada; 2003 Mart – 2006 Aralık tarihleri arasında SO₂ ve Pm₁₀ parametreleri, Erzurum Bölge Hıfzısıhha Enstitüsü Müdürlüğü tarafından yapılmış ölçümler alınarak geriye dönük olarak incelenmiştir. Ortalama Pm₁₀ değerinin 79,5±71,9 µgr/m³ olduğu SO₂ ve Pm düzeylerinin 2003-2006 yılları kış dönemlerinde hem kış sezonu sınır değerlerini hem de kısa vadeli sınır değerleri aştığı belirlenmiştir (Beyhun vd., 2008). Yapılan bir diğer çalışmada; kent merkezinde hava kalitesinin zamansal ve mekânsal gelişimini belirlemek amacıyla 1990–2008 yılları arasındaki Pm konsantrasyonları; coğrafi faktörler ve ölçüm değerlerine bağlı olarak analiz edilerek değerlendirilmiştir. Yapılan çalışmada 1990-2008 yılları arasında kent merkezinde Pm miktarının ise 4 kat azaldığı tespit edilmiştir (Kopar ve Zengin, 2009). Yapılan başka bir başka çalışmada; 2012-2017 yılları arasında Erzurum kent merkezinde bir istasyondan alınan Pm₁₀ ve SO₂ değerlendirilmiş Pm₁₀ için Türkiye sınır değerini aşan gün sayısının 2012'de 22; 2013'te 37; 2014'te 23; 2015'te 40; 2016'da 74; 2017'de 27 olduğu vurgulanmıştır (Koşan vd 2018).

Alansal Hava Kalitesi Modelleme Çalışmaları

Alansal hava kalitesi modelleme çalışmaları, hava kirliliğinin bir bölgedeki dağılımını ve etkisini anlamak için kullanılan bir yöntemdir. Bu çalışmalar, çeşitli atmosferik değişkenlerin yanı sıra, kaynaklar ve emisyon faktörleri, meteorolojik koşullar ve bölgenin topografik özellikleri gibi parametreleri dikkate alır. Bu modeller, özellikle planlama ve karar verme süreçlerinde önemli bir araçtır ve hava kalitesi yönetimi için stratejilerin geliştirilmesine yardımcı olur. Ayrıca, modelleme çalışmaları, bölgesel hava kirliliği problemlerinin belirlenmesi, potansiyel risklerin değerlendirilmesi ve hava kalitesi yönetim planlarının geliştirilmesi için kullanılır. Bu çalışmalar, hava kirliliğinin sağlık etkilerinin belirlenmesine de yardımcı olabilir ve halk sağlığına yönelik politika geliştirmeye katkıda bulunabilir (Amegah *et al.* 2017).

Alansal hava kirliliği modellemeleri, hava kirliliği seviyelerinin bir bölgedeki belirli bir zamandaki dağılımını tahmin etmek için kullanılan matematiksel yöntemlerdir. Bu modeller, hava kirliliğinin kaynaklarını, atmosferdeki hareketlerini, kimyasal reaksiyonlarını ve diğer faktörleri dikkate alarak, bölgesel hava kalitesi öngörülerini sağlamak için tasarlanmıştır. Bu modeller, hava kalitesi yönetimi ve politika yapımında önemli bir araçtır ve hava kirliliğinin azaltılmasına yönelik müdahalelerin etkinliğinin ölçülmesinde de kullanılır.

Alansal hava kirlilik modellemeleri, meteorolojik veriler, hava kalitesi ölçümleri ve hava kirliliği kaynakları hakkında bilgilerin kullanımıyla oluşturulurlar. Bu modeller, genellikle bilgisayar simülasyonları kullanılarak oluşturulurlar ve geliştirilen modeller, hava kalitesi tahminlerini yüksek doğruluk ve hassasiyetle sağlayabilirler. Bu nedenle, alansal hava kirlilik modellemeleri, hava kirliliği yönetimi ve planlaması açısından önemli bir araçtır ve hava kirliliği seviyelerinin azaltılması için tasarlanan politika ve müdahalelerin değerlendirilmesinde de kullanılır.

Alansal kirlilik modellemeleri; matematiksel ve sayısal teknikler kullanılarak, fiziksel ve kimyasal proseslerin birleşiminin bir simülasyonudur. Bu modeller; karmaşık ve çok değişkenli olan doğal sistemleri basitleştirerek daha anlaşılabilir hale getirirler. Çevresel sistemlerin ve süreçlerin nasıl işlediğini anlamamıza yardımcı olurlar ve maddelerin/kirleticilerin çevredeki taşınım ve akıbetlerinin daha iyi anlaşılmasını sağlarlar.

Alansal kirlilik modellemesi ile ilgili son yıllarda yapılan (Türkiye ve Dünyada) örnek çalışmalardan bazıları aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Zeydan ve araştırma grubunca 2014 yılında yapılan bir çalışmada; hava kalitesi modellemesinde coğrafi bilgi sistemlerinin kullanımı tüm yönleriyle araştırılmıştır. MapInfo, coğrafi bilgi sistemi yazılımı kullanılarak motorlu taşıtların emisyonları çoklu çizgiler ile, farklı mahallelerdeki evsel ısınmadan kaynaklanan emisyonlar ise çoklu poligonlar ile gösterilmiştir. Modelleme çalışmasının sonucunda, hava kirleticilerinin maksimum konsantrasyonların olduğu noktalar belirlenerek, bu noktaların Zonguldak Hava Kalitesi İzleme İstasyonu'na olan mesafeleri ölçülmüş ve PM_{10} açısından en kirli bölgeler belirlenmiştir (Zeydan vd. 2014).

Akyürek ve arkadaşlarının 2013 de yaptığı çalışmada Kocaeli İlinde bulunan 9 adet Hava İzleme İstasyonundan elde edilen veriler yardımıyla kirletici parametrelerin konumsal analizi yapılmıştır. CBS tekniği ile mekânsal kirlilik dağılım haritaları oluşturulmuş ve istasyon bazındaki istatistikler dinamik haritalama ile değerlendirilmiştir. Hava kirleticilerin konumsal değişkenlikleri ve kirletici parametre konsantrasyonlarının zamana bağlı değişimleri araştırılmıştır (Akyürek vd. 2013).

Makine Öğrenmesi Yardımıyla Tahmin

Pm_{2.5} değerlerini belirlemek için geleneksel olarak kullanılan yöntemler, hava numunelerinin laboratuvarında analiz edilmesine dayanır. Bu yöntemler, zaman alıcı ve maliyetlidir. Bu bölümde, Pm_{2.5} değerlerini belirlemek için makine öğrenmesi yöntemlerinin kullanılabileceği araştırılmış; bu yöntemin sonuçlarının pratik ve etkili bir yaklaşım olup olmadığı belirlenmek istenmiştir.

Literatürdeki, hava kalitesi izleme sistemleri, Pm_{2.5} ölçüm yöntemleri ve makine öğrenmesi uygulamaları üzerine yapılan çalışmalar inceledikten sonra, Pm_{2.5} değerlerinin tahmininde makine öğrenmesi modellerinin başarılı bir şekilde kullanılabileceğini gösteren önemli bulgulara rastlanmıştır (Zamani Joharestani *et al.* 2019; Karimian *et al.* 2019; Xiao *et al.* 2020; Yeo *et al.* 2021; Peng *et al.* 2022). Bu çalışmalar, özellikle regresyon modelleri, karar ağaçları ve gaussian modelleri gibi algoritmaların Pm_{2.5} tahmininde kullanılabileceğini göstermektedir (Liu *et al.* 2019 Harishkumar *et al.* 2020; Jang *et al.* 2020).

Makine öğrenimi, Pm_{2.5} değerlerinin daha hızlı ve daha verimli bir şekilde belirlenmesine olanak tanımaktadır. Bu yaklaşım, havadaki diğer parametreleri (örneğin, sıcaklık, nem, rüzgar hızı) kullanarak Pm_{2.5} değerlerini tahmin etmek için istatistiksel modeller kullanır. Makine öğrenimi yardımıyla Pm_{2.5} değerlerinin belirlenmesi için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler, regresyon, karar verme ağaçları, destek vektör makineleri (SVM) ve yapay sinir ağları (YSA) gibi farklı makine öğrenimi tekniklerini kullanır (McKendry 2002; He *et al.* 2022; Wang *et al.* 2017; Zhou *et al.* 2019).

Makine öğrenmesi modellerinin başarılı olabilmesi için, uygun özelliklerin seçimi kritiktir. Bu aşamada, hava kalitesini etkileyen çeşitli faktörlerin analizi yapılarak, modelin eğitim verilerini daha iyi temsil etmesi için özellikler dikkatlice seçilmelidir. Makine öğrenimi yöntemlerinin performansı, kullanılan veri seti, yöntemin parametreleri ve test ortamı gibi faktörlere bağlı olarak değişebilir. Ayrıca makine öğrenimi yöntemlerinin performansı, kullanılan eğitim verilerinin kalitesine bağlıdır. Eğitim verileri, Pm_{2.5} değerlerini doğru bir şekilde temsil etmelidir. Eğitim verilerinin kalitesini iyileştirmek için, farklı kaynaklardan veriler kullanılabilir. Veriler, zamansal ve mekansal olarak temsil edilmelidir.

Regresyon yöntemleri, Pm_{2.5} değerlerini doğru bir şekilde tahmin etmek için genellikle daha iyi performans gösterir. Sınıflandırma yöntemleri, Pm_{2.5} değerlerini belirli kategorilere ayırmak için daha iyi performans gösterir. SVM ve YSA yöntemleri ise, Pm_{2.5} değerlerini tahmin etmek için daha hassas performans göstermektedir.

Kullanılan modeller ve özellikleri

Bu tez çalışmasında kullanılan modeller, $Pm_{2.5}$ değerlerini tahmin etmek için uygulanmıştır. Modelin eğitim sürecinde, eğitim verileri kullanılarak modelin parametreleri ayarlandı. Eğitim sonucunda elde edilen model, test verileri yardımıyla test edilerek performans göstergeleri incelenmiştir. Kök Ortalama Kare Hatası (Root Mean Squared Error-RMSE), Ortalama Kare Hatası (Mean Squared Error-MSE), R Kare (R^2) ve Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error-MAE) gibi regresyon ölçütleri kullanılarak yapılan değerlendirmeler yapılmış, modellerin $Pm_{2.5}$ değerlerini tahmin etmede etkili olup olmadığı araştırılmıştır.

Denemelerde kullanılan modeller ve özellikleri aşağıda özetlenmiştir.

Linear regression

Lineer Regresyon, veri seti içindeki ilişkileri modellemek ve tahmin yapmak için kullanılan bir istatistiksel yöntemdir. Bu yöntem, bağımsız değişkenlerin (giriş değişkenleri) bağımlı değişken üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla kullanılır. Lineer Regresyon, veri setindeki bu ilişkileri bir doğru çizgisel modelle ifade eder.

Lineer Regresyonun matematiksel formülü, genellikle şu şekildedir:

$$y = \beta_0 + \beta_1 * X_1 + \beta_2 * X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon$$

Burada:

- y , bağımlı değişkendir.
- β_0 , modelin y eksenini kestiği noktayı temsil eder (kesme terimi).
- $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$, modelin katsayılarıdır ve her biri ilgili bağımsız değişkenin etkisini gösterir.
- ε , modelin hatalarını ifade eder.

Lineer Regresyon, veri setindeki ilişkileri anlamak ve gelecekteki değerleri tahmin etmek için yaygın olarak kullanılan bir istatistiksel analiz yöntemidir. MATLAB'da (Matrix Laboratory), bu modeli oluşturmak ve eğitmek için `fitlm` fonksiyonu kullanılır. Bu fonksiyon, veri setini temel alarak Lineer Regresyon modelini oluşturur. Modelin katsayıları hesaplanır ve bu model kullanarak gelecekteki verilerin tahminleri yapılabilir.

Interactions linear

Etkileşimli Lineer Regresyon, geleneksel Lineer Regresyon modeline eklenen bir özelliktir ve bağımlı değişken ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi daha ayrıntılı bir şekilde incelemek için kullanılır. Temelde, bu yöntem, farklı bağımsız değişkenler arasındaki

etkileşimleri modellemek ve bu etkileşimlerin bağımlı değişken üzerindeki toplam etkisini değerlendirmek amacını taşır.

Etkileşimli Lineer Regresyon, özellikle bağımsız değişkenler arasındaki etkileşimlerin önemli olduğu durumlarda kullanılır. MATLAB'da bu tür bir model oluşturmak için fitlm fonksiyonu kullanılır. Bu, daha karmaşık ilişkileri modellememize ve veri setinizdeki etkileşimleri anlamamıza olanak tanır.

Robust linear

Robust Linear Regression, geleneksel Linear Regression modeline dayanır ancak aykırı (outlier) gözlemlerden etkilenme potansiyelini azaltmak için tasarlanmış bir regresyon yöntemidir. Aykırı değerler, veri setindeki diğer gözlemlerden büyük ölçüde farklı olan noktalardır ve bu noktaların varlığı, standart Linear Regression modellerini yanıltabilir.

Robust Linear Regression, aykırı gözlemlere karşı daha dirençli olacak şekilde tasarlanmış bir hata fonksiyonu kullanır. Bu genellikle Huber kaybı fonksiyonu veya Tukey Biweight kaybı fonksiyonu gibi, aykırı değerlere karşı daha toleranslı olan fonksiyonları içerir. Buda, modelin aykırı gözlemlerden daha az etkilenmesini sağlar. Robust Linear Regression, genelde regresyonun doğrusal ilişkiyi yakalamak üzere uygulandığı durumlarda etkilidir. Bu, regresyon analizinin gerçek dünya veri setlerinde karşılaşılan gürültülü veya aykırı gözlemlerle başa çıkma yeteneğini artırabilir. MATLAB veya diğer bir programlama dilinde, bu tür bir regresyon modelini uygulamak için genellikle özel bir fonksiyon veya kütüphane kullanılır. Çalışmamızda MATLAB içerisinde yer alan Regression Learner App. kullanılmıştır.

Stepwise linear regression

Adımlı Lineer Regresyon, modeldeki bağımsız değişkenlerin seçimini optimize etmeye yönelik bir yöntemdir. Bu yöntem, istatistiksel olarak anlamlı olmayan değişkenleri modelden çıkararak ve istatistiksel olarak anlamlı değişkenleri ekleyerek modeli adım adım geliştirir. Bu, modelin karmaşıklığını artırmadan ve gereksiz değişkenleri dahil etmeden, en iyi performansı elde etmeyi amaçlar.

Adımlı Lineer Regresyon, istatistiksel testler kullanarak her adımda değişken eklemeyi veya çıkarmayı seçmektedir. Bu şekilde, modelin performansını artıracak veya etkileyebilecek en önemli değişkenlere odaklanılmış olur. MATLAB'da, Adımlı Lineer Regresyon'u uygulamak için stepwiselm fonksiyonu kullanılır. Bu fonksiyon, istatistiksel kriterlere dayalı olarak değişkenleri seçer ve modeli adım adım geliştirmektedir. Bu, özellikle büyük veri setleri üzerinde çalışırken modeli optimize etmenin etkili bir yoludur.

Lineer regresyon modellerinin karşılaştırılması

Lineer Regresyon, Lineer Regresyon Etkileşimleri, Lineer Regresyon Sağlam ve Stepwise (Adımlı) Lineer Regresyon arasındaki farklar şöyle özetlenebilir:

Lineer regresyon en basit regresyon türüdür ve tek bir bağımlı değişkeni tek bir bağımsız değişkenden tahmin etmek için kullanılır. Bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkinin doğrusal olduğunu varsayar. Aykırı değerlere duyarlıdır, bu da tahminlerin doğruluğunu etkileyebilir. Interactions Linear Lineer Regresyon'un bağımsız değişkenler arasında etkileşimlere izin veren bir uzantısıdır. Bir etkileşim, diğer bağımsız değişkenlerin değerleri verildiğinde bağımlı değişken üzerindeki bir bağımsız değişkenin etkisini temsil eden regresyon denklemindeki bir terimdir. Bu model; bir bağımsız değişkenin bağımlı değişken üzerindeki etkisinin başka bir bağımsız değişkenin değerine bağlı olduğu durumları modellemek için kullanılır. Robust Linear Lineer Regresyon'dan aykırı değerlere daha dayanıklı olan bir tür lineer regresyondur. Aşırı değerlerden daha az etkilenen farklı bir tahmin yöntemi olarak kullanılır ve verilerde çok fazla aykırı değer olduğu durumları modellemek için yararlanır. Stepwise Linear Regression ise; modele dahil edilecek en önemli bağımsız değişkenleri otomatik olarak seçen bir tür lineer regresyondur. Modelde daha fazla değişken eklenerek model daha fazla iyileştirilemeyecek olana kadar birer birer değişken eklenir. Çok fazla bağımsız değişken olduğu ve hangisinin en önemli olduğunu bilmediğiniz durumlar için bu modelden yararlanır.

Linear Regression, Interactions Linear, Robust Linear ve Stepwise Linear Regression arasındaki temel farklar aşağıdaki tabloda sunulmuştur:

Tablo 9. Lineer Regresyon Modelleri ve Özellikleri

Yöntem	Varsayımlar	Aykırı değerlere duyarlılık	Özellik seçimi
Lineer Regresyon	Bağımlı ve bağımsız değişkenler arasında doğrusal ilişki	Hassas	Manuel
Interactions Linear	Bağımsız değişkenler arasında etkileşimler	Hassas	Manuel
Robust Linear	Bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişki hakkında varsayım yoktur	Daha az hassas	Manuel
Stepwise Linear Regression	Bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişki hakkında varsayım yoktur	Daha az hassas	Otomatik

Fine tree

Ağaç modelleri, veri kümesinde bir bağımlı değişken ve birden fazla bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi tanımlamak için kullanılan bir istatistiksel tekniktir. Ağaç modelleri, bir ağaç yapısı kullanarak bağımlı değişkenin bağımsız değişkenlerden nasıl etkilendiğini temsil eder.

MATLAB'da ağaç modelleri, treefit fonksiyonu kullanılarak oluşturulabilir. Bu fonksiyon, veri kümesi üzerinde bir ağaç modeli oluşturur ve bu modeli kullanarak bağımlı değişkenin tahminlerini üretir.

Ağaç modelleri, aşağıdakiler de dahil olmak üzere çeşitli amaçlar için kullanılabilir:

1-Tahmin: Ağaç modelleri, bilinmeyen bağımlı değişken değerlerini tahmin etmek için kullanılabilir. 2-Olumlu veya olumsuz korelasyonların belirlenmesi: Ağaç modelleri, iki değişken arasındaki ilişkiyi belirlemek için kullanılabilir. 3-Modelleme: Ağaç modelleri, gerçek dünyayı daha iyi anlamamıza yardımcı olmak için kullanılabilir.

MATLAB'da ağaç modelleri, aşağıdaki gibi bir matematiksel denklem olarak ifade edilebilir:

$$y = f(X)$$

Bu denklemde,

- y: Bağımlı değişken
- f(X): Bağımlı değişkenin bağımsız değişkenlerden nasıl etkilendiğini gösteren bir fonksiyon
- X: Bağımsız değişkenler

Ağaç modellerinde, f(x) fonksiyonu, bir ağaç yapısı kullanılarak temsil edilir. Ağaç yapısı, bir kök, dallar ve yapraklardan oluşur. Kök, veri kümesini iki alt kümeye böler. Dallar, alt kümeleri daha da bölmektedir. Yapraklar, bağımlı değişkenin tahminlerini içerir.

Fine Tree modelleri, ağaç modellerinin bir alt kümesidir. Fine Tree modelleri, daha küçük ve daha basit ağaçlar kullanılmaktadır. Bu, Fine Tree modellerinin daha doğru ve güvenilir tahminler üretmesine yardımcı olur.

MATLAB'da Fine Tree modelleri, treefitc fonksiyonu kullanılarak oluşturulabilir. Bu fonksiyon, treefit fonksiyonuna benzer şekilde çalışır, ancak daha küçük ve daha basit ağaçlar kullanır. Fine Tree modelleri, veri kümesinde çok sayıda bağımsız değişken olduğunda veya değişkenler arasında yüksek korelasyon olduğunda etkili bir yöntemdir. Fine Tree modelleri, daha doğru ve güvenilir tahminler üreterek, veri bilimcilerinin ve makine öğrenimi uzmanlarının veri kümelerini daha iyi anlamasına yardımcı olur.

Medium tree

Medium Tree modelleri, ağaç modellerinin bir alt kümesidir. Medium Tree modelleri, Fine Tree modellerinden daha büyük ve daha karmaşık ağaçlar kullanır. Bu, Medium Tree modellerinin daha esnek ve daha doğru tahminler üretmesine yardımcı olur.

Medium Tree modellerinde, $g(x)$ fonksiyonu, bir bağımsız değişkenin bağımlı değişken üzerindeki etkisini gösteren bir fonksiyondur. $g(x)$ fonksiyonu, genellikle doğrusal veya logaritma fonksiyonu gibi basit bir fonksiyondur.

MATLAB'da Medium Tree modelleri, `treefitm` fonksiyonu kullanılarak oluşturulabilir. Bu fonksiyon, `treefit` fonksiyonuna benzer şekilde çalışır, ancak daha büyük ve daha karmaşık ağaçlar kullanır. Medium Tree modelleri, veri kümesinde çok sayıda bağımsız değişken olduğunda veya değişkenler arasında yüksek korelasyon olduğunda etkili bir yöntemdir. Medium Tree modelleri, daha doğru ve güvenilir tahminler üreterek, veri bilimcilerinin ve makine öğrenimi uzmanlarının veri kümelerini daha iyi anlamasına yardımcı olur.

Coarse tree

Coarse Tree modelleri, ağaç modellerinin bir alt kümesidir. Coarse Tree modelleri, Medium Tree modellerinden daha büyük ve daha karmaşık ağaçlar kullanır. Bu, Coarse Tree modellerinin daha esnek ve daha doğru tahminler üretmesine yardımcı olur.

Coarse Tree modellerinde, $g(x)$ fonksiyonu, bir bağımsız değişkenin bağımlı değişken üzerindeki etkisini gösteren bir fonksiyondur. $g(x)$ fonksiyonu, genellikle doğrusal veya logaritma fonksiyonu gibi basit bir fonksiyondur.

MATLAB'da Coarse Tree modelleri, `treefitc` fonksiyonu kullanılarak oluşturulabilir. Bu fonksiyon, `treefitm` fonksiyonuna benzer şekilde çalışır, ancak daha büyük ve daha karmaşık ağaçlar kullanır.

Coarse Tree modelleri, veri kümesinde çok sayıda bağımsız değişken olduğunda veya değişkenler arasında yüksek korelasyon olduğunda etkili bir yöntemdir. Coarse Tree modelleri, daha doğru ve güvenilir tahminler üreterek, veri bilimcilerinin ve makine öğrenimi uzmanlarının veri kümelerini daha iyi anlamasına yardımcı olur.

Ağaç modellerinin karşılaştırılması

Fine Tree, Medium Tree ve Coarse Tree, veri kümesinde bağımlı değişken ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi tanımlamak için kullanılan üç farklı karar ağacı modelidir.

Fine Tree, veri kümesinde çok sayıda veri noktası olduğunda ve bağımsız değişkenler arasında yüksek korelasyon olduğunda etkili bir yöntemdir. Fine Tree, daha doğru ve güvenilir tahminler üretme eğilimindedir. Ancak, daha karmaşıktır ve daha fazla veri gerektirir. Medium Tree, Fine Tree ve Coarse Tree arasında bir orta düzeyde karmaşıklığa sahiptir. Medium Tree, veri kümesinde orta düzeyde veri noktası olduğunda ve bağımsız değişkenler arasında orta düzeyde korelasyon olduğunda etkili bir yöntemdir. Medium Tree, Fine Tree ve Tree Coarse

Tree'den daha doğru ve güvenilir tahminler üretme eğilimindedir. Coarse Tree, veri kümesinde az sayıda veri noktası olduğunda ve bağımsız değişkenler arasında düşük korelasyon olduğunda etkili bir yöntemdir. Coarse Tree, daha basittir ve daha az veri gerektirir. Ancak, Fine Tree ve Medium Tree'den daha az doğru ve güvenilir tahminler üretme eğilimindedir. Aşağıdaki tablo, Fine Tree, Medium Tree ve Coarse Tree arasındaki temel farkları özetlemektedir:

Tablo 10. Ağaç Modelleri ve Özellikleri

Özellik	Fine Tree	Medium Tree	Coarse Tree
Karmaşıklık	Yüksek	Orta	Düşük
Gerekli veri miktarı	Çok fazla	Orta	Az
Doğruluk	Yüksek	Orta	Düşük
Korelasyon	Yüksek	Orta	Düşük

Linear SVM

Linear SVM, sınıflar arasındaki ayrımın doğrusal bir hiper düzlemle yapıldığı bir sınıflandırma algoritmasıdır. Temel amacı, veri noktalarını sınıflara ayırmak için optimal bir hiper düzlemi bulmaktır. Bu hiper düzlem, sınıflar arasındaki marjı maksimize eder. Linear SVM'nin temel amacı, iki sınıf arasında bir marj oluşturarak, veri noktalarını bu marj içinde sınıflandırmaktır. Bu marj, karar sınırları ile en yakın örnekler arasındaki mesafeyi ifade eder.

Matematiksel olarak, Linear SVM genellikle şu şekilde ifade edilir:

$$f(x) = w * x + b$$

- $f(x)$, giriş verisi x için tahmin edilen işlevi temsil eder.
- w , ağırlıkları içeren bir vektördür.
- b , bias (sapma) terimidir.

Quadratic SVM

Quadratic SVM, destek vektör makinelerinin (SVM) bir türüdür ve özellikle doğrusal olarak ayrılamayan veri setleriyle başa çıkmak için kullanılır. SVM, sınıfları belirgin bir şekilde ayıran bir hiper düzlemi bulmaya çalışır, ancak veri seti doğrusal olarak ayrılamazsa, çekirdek fonksiyonları kullanılarak daha karmaşık karar sınırları oluşturulabilir.

Matematiksel olarak, Quadratic SVM şu şekilde ifade edilir:

$$y(x) = b + \sum_{i=1}^n a_i \cdot K(x_i, x) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i \cdot a_j \cdot K(x_i, x_j)$$

Burada:

- $y(x)$, tahmin edilen sınıfı ifade eder.

- b , kesme terimidir.
- α_i , destek vektör ağırlıklarıdır.
- $K(x_i, x)$, çekirdek fonksiyonudur.

Quadratic SVM, özellikle sınıflar arasındaki ilişkiler karmaşık ise veya ilişkiler doğrusal değilse etkili olabilir. Çekirdek fonksiyonu, veri setinin özelliklerini daha yüksek boyutlu uzaylara taşıyarak ve bu uzayda doğrusal olarak ayrılabilir hale getirerek bu esnekliği sağlar. MATLAB'da, Quadratic SVM modeli oluşturmak ve eğitmek için `fitcsvm` fonksiyonu kullanılır. Bu fonksiyon, kullanıcının çekirdek fonksiyonunu seçmesine ve modelin karmaşıklığını ayarlamasına olanak tanır. Bu şekilde, doğrusal olarak ayrılamayan veri setleri üzerinde etkili bir sınıflandırma yapılabilir.

Cubic SVM

Cubic SVM, destek vektör makineleri (SVM) ailesine ait bir sınıflandırma modelidir. Bu model, özellikle doğrusal olarak ayrılamayan veri setleri üzerinde etkili olan üçüncü dereceden bir çekirdek fonksiyonunu kullanır. SVM, temelde sınıflar arasındaki karar sınırlarını belirleyen ve maksimum marjinal ayrımı sağlamaya çalışan bir algoritmadır. Doğrusal olarak ayrılamayan veri setleriyle başa çıkabilmek için çeşitli çekirdek fonksiyonları kullanılabilir ve Cubic SVM bunlardan biridir.

Matematiksel olarak, Cubic SVM şu şekilde ifade edilir:

$$y(x) = b + \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot K(x_i, x) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_i \cdot \alpha_j \cdot K(x_i, x_j) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \alpha_i \cdot \alpha_j \cdot \alpha_k \cdot K(x_i, x_j, x_k)$$

Burada:

- $y(x)$, tahmin edilen sınıfı ifade eder.
- b , kesme terimidir.
- α_i , destek vektör ağırlıklarıdır.
- $K(x_i, x)$, çekirdek fonksiyonudur.

Cubic SVM, özellikle veri setinin içerdiği karmaşıklığı ele almak ve sınıflar arasındaki karar sınırlarını daha esnek bir şekilde tanımlamak amacıyla kullanılır. Bu model, veri集中的 non-linear ilişkileri daha iyi yakalayabilir ve bu nedenle doğrusal olarak ayrılamayan veri setleri üzerinde daha iyi performans gösterebilir. MATLAB'da, Cubic SVM modelini oluşturmak ve eğitmek için `fitcsvm` fonksiyonu kullanılmaktadır. Bu fonksiyon, çeşitli çekirdek fonksiyonları arasından seçim yapmaya ve modelin karmaşıklığını belirlemeye olanak tanır.

Fine gaussian SVM

Fine Gaussian SVM modelleri, SVM'lerin bir alt kümesidir. Fine Gaussian SVM modelleri, Gauss dağılımına dayanan bir kernel fonksiyonu kullanır. Bu, SVM'lerin daha doğru ve güvenilir tahminler üretmesine yardımcı olur.

Fine Gaussian SVM modelleri, veri kümesinde çok sayıda bağımsız değişken olduğunda veya değişkenler arasında yüksek korelasyon olduğunda etkili bir yöntemdir. Fine Gaussian SVM modelleri, daha doğru ve güvenilir tahminler üreterek, veri bilimcilerinin ve makine öğrenimi uzmanlarının veri kümelerini daha iyi anlamasına yardımcı olur.

Medium gaussian SVM

Medium Gaussian SVM modelleri, SVM'lerin bir alt kümesidir. Medium Gaussian SVM modelleri, Fine Gaussian SVM modellerinden daha büyük bir kernel matrisi kullanır. Bu, SVM'lerin daha doğru ve güvenilir tahminler üretmesine yardımcı olur.

Medium Gaussian SVM modelleri, veri kümesinde çok sayıda bağımsız değişken olduğunda veya değişkenler arasında yüksek korelasyon olduğunda etkili bir yöntemdir. Medium Gaussian SVM modelleri, daha doğru ve güvenilir tahminler üreterek, veri bilimcilerinin ve makine öğrenimi uzmanlarının veri kümelerini daha iyi anlamalarına yardımcı olur.

Coarse gaussian SVM

Coarse Gaussian SVM modelleri, SVM'lerin bir alt kümesidir. Coarse Gaussian SVM modelleri, Medium Gaussian SVM modellerinden daha büyük bir kernel matrisi kullanır. Bu, SVM'lerin daha doğru ve güvenilir tahminler üretmesine yardımcı olur.

Coarse Gaussian SVM modelleri, veri kümesinde çok sayıda bağımsız değişken olduğunda veya değişkenler arasında yüksek korelasyon olduğunda etkili bir yöntemdir. Coarse Gaussian SVM modelleri, daha doğru ve güvenilir tahminler üreterek, veri bilimcilerinin ve makine öğrenimi uzmanlarının veri kümelerini daha iyi anlamalarına yardımcı olur.

SVM modellerinin karşılaştırılması

Linear SVM, Quadratic SVM, Cubic SVM ve Fine Gaussian SVM arasındaki farklar aşağıdaki gibidir:

Linear SVM, verileri bir doğrusal hiperdüzlem kullanarak ayırır. Bu model, veri kümesinde az sayıda veri noktası olduğunda veya veri kümesi dengesiz olduğunda etkilidir. Quadratic SVM, verileri bir doğrusal olmayan hiperdüzlem kullanarak ayırır. Bu model, veri

kümesinde çok sayıda veri noktası olduğunda veya veri kümesi dengesiz olduğunda etkilidir. Cubic SVM, verileri bir kübik hiperdüzlem kullanarak ayırır. Bu model, veri kümesinde çok sayıda veri noktası olduğunda ve veriler arasında doğrusal olmayan ilişki olduğunda etkilidir. Fine Gaussian SVM ise; verileri bir Gaussian kernel fonksiyonu kullanarak ayırır. Bu model de, veri kümesinde çok sayıda veri noktası olduğunda ve veriler arasında doğrusal olmayan ilişki olduğunda etkilidir.

Hangi SVM modelinin kullanılacağı, veri kümesinin özelliklerine ve tahmin probleminin gereksinimlerine bağlıdır. Aşağıdaki tabloda, Linear SVM, Quadratic SVM, Cubic SVM ve Fine Gaussian SVM arasındaki farklar özetlemektedir:

Tablo 11. SVM Modelleri Özellikleri

Model	Açıklama
SVM Linear SVM	Verileri bir doğrusal hiperdüzlem kullanarak ayırır.
SVM Quadratic SVM	Verileri bir doğrusal olmayan hiperdüzlem kullanarak ayırır.
SVM Cubic SVM	Verileri bir kübik hiperdüzlem kullanarak ayırır.
SVM Fine Gaussian SVM	Verileri bir Gaussian kernel fonksiyonu kullanarak ayırır. Bu model, Gaussian kernel fonksiyonunun parametresini daha küçük bir değere ayarlayarak oluşturulur.

Ensemble boosted trees

Ensemble Boosted Trees, ağaç tabanlı bir makine öğrenimi modelidir ve Gradient Boosting adı verilen bir teknik kullanılarak oluşturulur. Bu model, zayıf öğreniciler adı verilen temel modellerin kombinasyonu ile güçlü bir tahmin modeli oluşturmayı amaçlar. Her ağaç, önceki ağaçların hatalarını düzeltmeye odaklanır, böylece toplam model zaman içinde daha fazla öğrenir.

Matematiksel olarak, Ensemble Boosted Trees şu şekilde ifade edilir:

$$F(x) = \sum_{m=1}^M \gamma_m \cdot h_m(x)$$

Burada:

- $F(x)$, toplam tahmin edilen fonksiyonu temsil eder.
- γ_m , her ağacın ağırlığını ifade eder.
- $h_m(x)$, her bir zayıf öğrenciyi (genellikle karar ağacını) temsil eder.

Bu model, zayıf ağaçları birbirine ekleyerek, genel hata fonksiyonunu minimize etmeye çalışır. Bu, veri setindeki karmaşık ilişkileri yakalamak ve tahmin performansını artırmak için güçlü bir yöntemdir. Gradient Boosting, her ağacın önceki ağaçların hatalarına odaklanmasına

izin vererek, adım adım öğrenmeyi sağlamaktadır. MATLAB'da, Ensemble Boosted Trees modelini oluşturmak ve eğitmek için fitensemble fonksiyonu kullanılır. Bu model, özellikle regresyon ve sınıflandırma problemlerinde başarılıdır ve geniş bir uygulama alanına sahiptir.

Ensemble bagged trees

Ensemble Bagged Trees, ağaç tabanlı bir makine öğrenimi modelidir ve Bootstrap Aggregating (Bagging) tekniği kullanılarak oluşturulur. Bu model, ağaçların birbirinden bağımsız olarak eğitildiği ve ardından tahminlerin bir araya getirildiği bir topluluk (ensemble) modelidir. Her bir ağaç, farklı veri alt kümeleri üzerinde eğitilir, bu da modelin genelleme yeteneğini artırır.

Bu model, veri setindeki rastgele varyansı azaltarak ve aşırı uyarlamaya karşı direnç göstererek genelleme yeteneğini artırır. Bagging tekniği, her bir ağacın farklı bir öğrenme patikasını takip etmesini sağlar ve böylece topluluk içindeki çeşitliliği artırır. MATLAB'da, Ensemble Bagged Trees modelini oluşturmak ve eğitmek için TreeBagger sınıfı veya fitensemble fonksiyonu kullanılabilir. Bu model, özellikle regresyon ve sınıflandırma problemleri için etkilidir ve geniş bir uygulama alanına sahiptir.

Ensemble trees modellerinin karşılaştırılması

Ensemble Boosted Trees ve Ensemble Bagged Trees modelleri arasındaki temel fark, karar ağaçlarının nasıl oluşturulduğudur. Ensemble Boosted Trees modelinde, her ağaç, önceki ağaçlardan yapılan hatalara dayanarak oluşturulur. Ensemble Bagged Trees modelinde, her ağaç, veri kümesinin rastgele bir alt kümesi üzerinde oluşturulur.

Ensemble Boosted Trees modelleri, daha doğru tahminler üretme eğilimindedir. Ancak, daha karmaşıktır ve daha fazla veri gerektirir. Ensemble Bagged Trees modelleri, daha basittir ve daha az veri gerektirir. Ancak, Ensemble Boosted Trees modelleri kadar doğru tahminler üretmeyebilir. Aşağıda sunulan tabloda, Ensemble Trees modelleri arasındaki farklar özetlemektedir.

Tablo 12. Ensemble Trees Modelleri ve Karşılaştırması

Model	Açıklama
Ensemble Boosted Trees	Bir dizi karar ağacı oluşturur. Her ağaç, önceki ağaçlardan yapılan hatalara dayanarak oluşturulur.
Ensemble Bagged Trees	Bir dizi karar ağacı oluşturur. Her ağaç, veri kümesinin rastgele bir alt kümesi üzerinde oluşturulur.

Gaussian Process Regression Squared Exponential GPR

Gaussian Process Regression (GPR), regresyon analizi için kullanılan ve belirli bir veri setinin altında yatan fonksiyonel ilişkiyi öğrenmeye yönelik bir modeldir. Squared Exponential, GPR'nin bir çekirdek fonksiyonu (kernel function) türüdür. Bu çekirdek fonksiyonu, veri noktaları arasındaki benzerliği esnek bir şekilde modelleyerek veri setindeki öğrenme sürecini temsil eder. Matematiksel olarak, Gaussian Process Regression Squared Exponential çekirdek fonksiyonu şu şekildedir:

$$k(x_i, x_j) = \sigma^2 \exp(-2l^2 r^2)$$

Burada:

- $k(x_i, x_j)$, iki nokta x_i ve x_j arasındaki çekirdek fonksiyonunu temsil eder.
- σ^2 , genel varyans parametresidir.
- r , iki nokta arasındaki mesafeyi ifade eder.
- l , uzunluk ölçeği parametresidir.

Squared Exponential çekirdek fonksiyonu, benzerliği $e^{(-r^2)}$ şeklinde azaltarak veri noktaları arasındaki uzaklık ile doğru orantılı bir benzerlik ölçüsü uygular. Bu, veri setindeki düzensizlikleri ve değişkenlikleri modellemek için etkili bir yoldur. Uzunluk ölçeği parametresi, bu benzerlik ölçüsünün ne kadar hızlı azaldığını kontrol eder. MATLAB'da, Gaussian Process Regression Squared Exponential modelini uygulamak için fitrgp fonksiyonu kullanılabilir. Bu fonksiyon, veri setine uygun bir GPR modeli oluşturmanıza olanak tanır ve çekirdek fonksiyonunun parametrelerini belirlemenize yardımcı olur.

Gaussian Process Regression Matern 5/2 GPR

Matern 5/2, GPR'nin bir çekirdek fonksiyonu (kernel function) olarak adlandırılan matematiksel bir ifadesidir. Bu çekirdek fonksiyonu, belirli bir öğrenme sürecindeki verilere uyan ve bu verilerle uyumlu bir öğrenme modeli oluşturan temel bir yapıdır.

Matematiksel olarak, Gaussian Process Regression Matern 5/2 şu şekilde ifade edilir:

$$k(x_i, x_j) = \sigma^2 (1 + l^5 r + 3l^2 5r^2) \exp(-l^5 r)$$

Burada:

- $k(x_i, x_j)$, iki nokta x_i ve x_j arasındaki çekirdek fonksiyonunu temsil eder.
- σ^2 , genel varyans parametresidir.
- r , iki nokta arasındaki mesafeyi ifade eder.
- l , uzunluk ölçeği parametresidir.

Matern 5/2 çekirdeği, belirli bir öğrenme sürecindeki veri noktaları arasındaki ilişkileri esnek bir şekilde modelleyebilen bir çekirdek fonksiyonudur. Bu çekirdek fonksiyonu, veri setindeki karmaşık ve düzensiz yapıları daha iyi yakalamak amacıyla tasarlanmıştır. MATLAB'da, Gaussian Process Regression Matern 5/2 modelini uygulamak için fitrgp fonksiyonu kullanılabilir. Bu fonksiyon, veri setine uygun bir GPR modeli oluşturmaya olanak tanır ve modelin parametrelerini belirlenmesine yardımcı olur.

Gaussian Process Regression Exponential GPR

Exponential, GPR'nin bir çekirdek fonksiyonu (kernel function) türüdür. Bu çekirdek fonksiyonu, veri setindeki öğrenme sürecine uyan ve bu süreçteki belirsizlikleri dikkate alan temel bir yapı sağlar. Matematiksel olarak, Gaussian Process Regression Exponential çekirdek fonksiyonu şu şekildedir:

$$k(x_i, x_j) = \sigma^2 \exp(-lr)$$

Burada:

- $k(x_i, x_j)$, iki nokta x_i ve x_j arasındaki çekirdek fonksiyonunu temsil eder.
- σ^2 , genel varyans parametresidir.
- r , iki nokta arasındaki mesafeyi ifade eder.
- l , uzunluk ölçeği parametresidir.

Exponential çekirdek fonksiyonu, veri noktaları arasındaki uzaklığa bağlı olarak azalan bir benzerlik ölçüsü uygular. Bu, veri setindeki düzensizlikleri ve değişkenlikleri modellemek için etkili bir yol sunar. Uzunluk ölçeği parametresi, bu benzerlik ölçüsünün ne kadar hızlı azaldığını kontrol eder. MATLAB'da, Gaussian Process Regression Exponential modelini uygulamak için fitrgp fonksiyonu kullanılabilir.

Gaussian Process Regression Rational Quadratic GPR

Rational Quadratic, GPR'nin bir çekirdek fonksiyonu (kernel function) türüdür. Bu çekirdek fonksiyonu, veri noktaları arasındaki uzaklıklara karşı duyarlılık göstererek, veri setindeki değişken yapıları modellemek için tasarlanmıştır.

MATLAB'da, Gaussian Process Regression Rational Quadratic modelini uygulamak için fitrgp fonksiyonu kullanılabilir.

Gaussian Process Regression (GPR) modellerinin karşılaştırılması

Gaussian Process Regression (GPR) modelleri arasındaki farklar şöyle özetlenebilir:

Gaussian Process Linear Regression; verileri bir doğrusal fonksiyon kullanarak tahmin etmektedir. Bu model, veri kümesinde az sayıda veri noktası olduğunda veya veri kümesi dengesiz olduğunda etkilidir. Gaussian Process Squared Exponential Regression; verileri bir Gaussian kernel fonksiyonu kullanarak tahmin etmektedir. Bu model, veri kümesinde çok sayıda veri noktası olduğunda veya veri kümesi dengesiz olduğunda etkilidir. Gaussian Process Matern 5/2 Regression; verileri bir Matern 5/2 kernel fonksiyonu kullanarak tahmin etmektedir. Bu model, veri kümesinde doğrusal olmayan ilişki olduğunda etkilidir. Gaussian Process Rational Quadratic Regression; verileri bir rasyonel kuadratik kernel fonksiyonu kullanarak tahmin etmektedir. Bu model, veri kümesinde çok sayıda veri noktası olduğunda ve veriler arasında doğrusal olmayan ilişki olduğunda etkilidir.

Gaussian Process Matern 5/2 Regression ve Gaussian Process Rational Quadratic Regression modelleri, Gaussian Process Squared Exponential Regression modeline benzerdir. Ancak, farklı kernel fonksiyonları kullanırlar. Gaussian Process Matern 5/2 Regression modeli, bir Matern 5/2 kernel fonksiyonu kullanır. Gaussian Process Rational Quadratic Regression modeli, bir rasyonel kuadratik kernel fonksiyonu kullanır. Tablo 13’de, Gaussian Process Regression (GPR) modelleri arasındaki farkları özetlemektedir.

Tablo 13. Gaussian Process Regression (GPR) Modelleri ve Özellikleri

Model	Açıklama
Gaussian Process Linear Regression	Verileri bir doğrusal fonksiyon kullanarak tahmin eder.
Gaussian Process Squared Exponential Regression	Verileri bir Gaussian kernel fonksiyonu kullanarak tahmin eder.
Gaussian Process Matern 5/2 Regression	Verileri bir Matern 5/2 kernel fonksiyonu kullanarak tahmin eder.
Gaussian Process Rational Quadratic Regression	Verileri bir rasyonel kuadratik kernel fonksiyonu kullanarak tahmin eder.

Gaussian Process Linear Regression modeli, veri kümesinde çok sayıda veri noktası olduğunda veya veri kümesi dengesiz olduğunda aşırı öğrenmeye eğilimlidir. Gaussian Process Squared Exponential Regression modeli, veri kümesinde doğrusal olmayan ilişki olduğunda aşırı öğrenmeye eğilimlidir. Gaussian Process Matern 5/2 Regression modeli, veri kümesinde doğrusal olmayan ilişki olduğunda aşırı öğrenmeye daha az eğilimlidir. Gaussian Process Rational Quadratic Regression modeli ise, veri kümesinde doğrusal olmayan ilişki olduğunda aşırı öğrenmeye daha az eğilimlidir. Bu nedenle, veri kümesi için uygun Gaussian Process Regression modelini seçmek önemlidir.

Akıllı Kentlerde Drona Entegre Hava Kalitesi Ölçüm Cihazı

Hava kalitesi, kent içerisinde farklı bölgelerde değişiklik gösterebilir. Belirli bir bölgedeki hava kalitesini direk/indirek etkileyen kirletici konsantrasyonları; yerel emisyonlara, çizgisel kaynaklara (trafik) ve ortam koşullarına (meteorolojik parametreler) bağlıdır. Bu parametrelerin değişkenliğinden dolayı, hava kirliliğine sebep olan kirleticilerin konsantrasyonları kent içerisindeki farklı bölgelerde farklı değerlere sahip olabilmektedir (Völgyesi *et al.* 2008; Battista *et al.* 2016). Farklı bölgelerdeki farklı değerlerden yola çıkılarak ve yukarıdaki bilgiler ışığında; araştırma sorusunu kısaca “Yer seviyesinde konuşlandırılmış olan sabit istasyonların belirli bir alanda belirli bir yükseklikte üç boyutlu hava kalitesi ölçümü ve yine üç boyutlu kirlilik dağılım profili modellemesi ihtiyacını karşılayamaması” şeklinde vurgulayabiliriz. Günümüzde bu amaçla kullanılan mevcut hava kalitesi izleme istasyonlarının bazı dezavantajları ve bu dezavantajlara karşı **BAP tarafından desteklenen projemizde** sunulan alternatif çözümleri de aşağıdaki şekilde sıralayabiliriz;

- Mevcut sabit istasyonların belirli bir alanda üç boyutlu ölçüm (o anki mevcut meteorolojik şartlara bağlı olarak) yapmaya uygun olmamaları.

(Drona entegre mobil hava kalitesi ölçüm ünitesi veri iletişim teknolojileri ile uyumlu ve belirli bir alanda üç boyutlu ölçüm yapmayı sağlayabilecek şekilde tasarlanmıştır)

- Mevcut sabit istasyonların yüksek maliyet ve tecrübeli personel ihtiyacı

(Kent içerisindeki sabit istasyonların yaklaşık maliyeti 30.000-50.000 dolar civarında iken mobil ölçüm ünitemizin ünite başına ortalama maliyeti yaklaşık 500-800 dolardır).

- Mevcut sabit istasyonlar çakılı olarak zemine konuşlandırıldıkları için sadece yer seviyesinden (dikey pozisyon) yaklaşık 2,5-4 metre yükseklikteki noktalarda ölçüm alabilmektedir

(Drona entegre mobil hava kalitesi ölçüm ünitesi sayesinde farklı alanlardan ve koşulların elverdiği ölçüde istenilen yüksekliklerden veri alınabilmektedir)

- Mevcut sabit istasyonların çakılı olması sebebiyle yeni yerleşim alanları ve yeni semtlerin kurulmasıyla birlikte yeni kurulan alanların hava kalitesi ölçüm ihtiyacını karşılayamaması

(Hareketli tasarımıımız sayesinde, yeni yerleşim alanlarından ihtiyaç duyulan noktalarda ihtiyaç duyulan veriler kolaylıkla alınabilmektedir)

- Bir mobil cihazın gerek dikey gerekse yatay pozisyonda toplayabileceği veriyi mevcut sabit istasyonların karşılayamaması

(Çok sayıda sabit istasyonla ancak alınabilecek veriler; drona entegre hava kalitesi ölçüm ünitesi mobil özelliği sayesinde rahatlıkla alınabilecektir)

- Mevcut sabit istasyonların (mobil olmadıkları için) detaylı alansal ölçüme ve yeni yerleşim alanlarının hava kalitesi ölçümlerine uygun olmayışları

Dış kaynaklı hava kirleticiler için dikey ölçümlere ihtiyaç duyulmasının birkaç sebebi vardır. Bu sebepler şu alt başlıklar eşliğinde detaylandırılabilir:

1. Farklı yüksekliklerde farklı hava kalitesi: Dış kaynaklı hava kirleticiler, genellikle yere yakın seviyelerde daha yoğun bir şekilde bulunur. Ancak, yüksek binaların olduğu kentsel alanlarda, hava kirleticilerinin dağılımı farklı yüksekliklerde değişebilir. Dikey ölçümler, farklı yüksekliklerdeki hava kalitesini belirlemeye yardımcı olabilir.
2. Rüzgarın etkisi: Daha yüksek seviyelerdeki rüzgarın yönü ve hızı, hava kirleticilerinin dağılımını etkileyebilir. Dikey ölçümler, rüzgarın hava kirleticilerinin dağılımı üzerindeki etkisini anlamak için gereklidir.
3. Sağlık risklerinin belirlenmesi: Hava kirleticilerinin insanların sağlığı üzerine olumsuz etkiler yaptığı bilinmektedir. Rakıma bağlı olarak değişik yüksekliklerden drona entegre hava kalitesi ölçüm ünitesi ile yapılan ölçüm sonuçlarından hareketle yükselti ile dış atmosfer konsantrasyonları arasında bir korelasyon kurularak özellikle solunum yolu hastalıklarına olan etkiler daha net ortaya konulabilecektir. Bunun yanı sıra, anlık meteorolojik faktörlerin de (sıcaklık rüzgâr hızı ve yönü nem basınç vb.) kirletici ve konsantrasyonu üzerine olan etkileri tespit edilebilecektir.

Tüm bu nedenlerden dolayı; dış kaynaklı hava kirleticilerinin tespiti amacıyla yapılan gerek dikey gerekse yatay ölçümler, hava kalitesinin daha optimal bir şekilde belirlenmesinin yanı sıra hava kirliliğinin izlenmesi ve kontrolünde de yardımcı olacaktır. Dış kaynaklı hava kirleticilerin dikey ölçümleri için drone kullanımının avantajlarını şöyle sıralayabiliriz;

1. Daha yüksek çözünürlük: Uydu verileri, dikey ölçümler için kullanılmasına rağmen; çözünürlük sınırlamaları nedeniyle düşük çözünürlüklü veriler üretebiliyorken dronlar ise daha yüksek çözünürlükte veriler üretebilirler. Bu durum, hava kirleticilerinin dikey dağılımını daha doğru bir şekilde belirlememize olanak tanır.
2. Esneklik: Drone'lar, ölçüm yapmak için belirli bir yere sabitlenmek zorunda kalmadan farklı yüksekliklerdeki hava kalitesi ölçümleri yapılmasına olanak tanır ve mobil ölçüm esnekliği sağlar.

3. Daha hızlı ve düşük maliyetli: Drone'lar, tek bir uçuşla dahi çok sayıda ölçüm yapabilme yeteneğine sahiptir. Ayrıca, drone'lar hava kalitesinin belirlenmesinde uydu verilerinden daha düşük maliyetli, daha hızlı(anlık) ve daha verimli ölçümler yapabileceğimiz alternatif bir seçenektir.
4. Yerel (lokal-noktasal) ölçümler: Drone'lar, ihtiyaç duyulan tüm alanlarda (yerel istasyonların olmadığı) bölgesel ölçümler yerine, anlık lokal ölçümler yapabilmek için alternatif bir yöntemdir.

Bununla birlikte, dronlarla yapılan ölçümlerin bazı dezavantajları mevcuttur: Dronların uçuş süreleri sınırlıdır ve belirli bir yükseklikten sonraki ölçümler (40 metre ve üzeri) için uygun olmayabilirler. Ayrıca, belirli hava koşullarında (Kar-yağış) dronların kullanımı mümkün olmayabilir (Singh vd. 2021).

Bu bağlamda projenin **amacı**; kentsel hava kirliliğine ve buna bağlı olarak ortaya çıkan ciddi sağlık problemlerine neden olan hava kirleticilerinin zamansal ve mekânsal değişimlerinin akıcı bir şekilde doğru ölçümlenmesinden kaynaklanan sorunlara çözüm önerisi sunmak amacıyla “Akıllı Kentlere Uyumlu Sensör Tabanlı Düşük Maliyetli Mobil Dış Atmosfer Hava Kalitesi Ölçüm Ünitesi” tasarlanarak hava kirlilik parametrelerinin (PM_{10} , $PM_{2.5}$, SO_2 , NO_2 ve O_3) yanı sıra meteorolojik parametreler (sıcaklık, nem, atmosferik basınç vb.) anlık olarak lokal bir alanda üç boyutlu ölçümlenerek sürekli bir veri akışı sağlanabilecektir. Ayrıca en gerçekçi üç boyutlu alansal hava kalitesi kirlilik haritaları da verilerden hareketle oluşturulabilecektir. Buradan alınan veriler alansal hava kalitesi kirlilik hibrit modellerinin geliştirilmesinde katkıda bulunacaktır.

Belirtilen amaca ulaşabilmemiz için **hedefleri** maddeler halinde sıralayacak olursak:

- 1- Tasarladığımız hava kalitesi ölçüm ünitesinin gömülü devresi ile hava kirleticileri ve meteorolojik parametreleri ölçecek sensörler ölçüm ünitesi içerisinde birleştirilecek ve ilk etapta iki adet ölçüm ünitesi tasarlanarak kullanılacaktır.
- 2- Hava kalitesi ölçüm ünitesi içerisinde yer alan sensörlerin yazılımları (sensör kod yazılımları) ve kalibrasyonları (kalibrasyon kod yazılımları) yapılacaktır. $PM_{2.5}$ - PM_{10} sensörü, kükürtdioksit (SO_2) sensörü, azotdioksit (NO_2) gaz sensörü, ozon (O_3) sensörü, sıcaklık sensörü ve nem sensörü, basınç-yükseklik sensörü ve UV algılama sensörü ölçüm ünitesi içerisine yerleştirilecektir.
- 3- Hazır dron almak yerine, çok daha düşük maliyetle dron parçaları alınarak bir adet dron birleştirilecek ve denge-ağırlık testleri yapılacaktır. Dronumuzun uçabilmesi için gerekli yazılımlar tamamlanacak. Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü İnsansız

Hava Aracı Kayıt Sisteminden gerekli izinler alınarak açık alanda uçuş testleri yapılacaktır.

- 4- Uçuş testlerinden geçmiş drona, ölçüm üniteleri ve ölçüm ünitelerini taşıyan üç boyutlu yaaıcı ile üretilen mekanik kol eklenerek mobil ölçüm üniteleri oluşturulacaktır. Böylece bir adet drona entegre ölçüm ünitesi ve bir adet de yedek ölçüm ünitesi oluşturulacaktır.
- 5- Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü İnsansız Hava Aracı Kayıt Sisteminden alınacak izinler kapsamında, drona entegre ölçüm ünitesi ile kent içerisinde belirlenen ölçüm noktalarında ölçümler yapılacaktır.
- 6- Alınan tüm veriler bulut sistemine aktararak ArcGis (CBS programı) ile haritalandırılacaktır. Ayrıca SPSS (istatistik programı) yardımıyla, değişkenler arasındaki ilişki kolerasyon analizi ile ortalamalar arasındaki farklar ise tek yönlü varyans (One Way ANOVA) analizi ile yapılacaktır. Üç boyutlu kirlilik dağılım modelleri ise MATLAB (matematiksel modelleme programı) yardımıyla oluşturulacaktır.
- 7- “Akıllı Kentlerde Alansal Hava Kirliliğinin Belirlenmesi Ve Kirlilik Modellemesi: Erzurum Örneği” başlıklı doktora çalışması kapsamında Erzurum kent merkezinde alansal kirlilik haritalarının oluşturabilmesi için; şu ana kadar kent atmosferinde ölçümlenmiş tüm verilerin tez içerisinde kullanılan modellere (SURFER 17, ArcGIS, HYSPLIT) uygulanmasının yanı sıra model hesaplamalarından elde edilen sonuçlar tez çalışmasında kullanılan modellere entegre edilerek **hibrit bir model sistemi** oluşturulacaktır.

Tablo 14. Kullanılacak Modeller ve Kullanım Amaçları

MODEL ADI	KULLANIM AMACI
SPSS	Verilerin istatitiki incelenmesi (Maksimum-minimum değerlerin görüldüğü gün içerisinde Pm’lerin değişimi, kirlilik parametrelerinin yükseklik ile değişimi, kirlilik parametreleri ile meteorolojik parametreler arasındaki ilişki ve kirlilik parametlerinin kendi aralarındaki kolerasyonu)
MATLAB	Hava kirlleticilerinin mekânsal dağılımı ve kent içerisinde ölçüm alınan lokal bölgelerde üç boyutlu konumsal değişimi (Yükseklik- alansal değişim)
ArcGIS	Alansal hava kalitesi kirlilik haritaları, meteorolojik veri haritaları, trafik yoğunluk haritaları ve konfor alanlarının belirlenmesi

Bu noktadan hareketle, kent içerisinde lokal bir alanda üç boyutlu olarak hava kalitesini hızlı bir şekilde ölçebilecek, kirlilik dağılım modelleri oluşturabilecek Akıllı Kent sistemleri ile uyumlu, düşük maliyetli (Low Cost) drona entegre edilebilir hava kalitesi ölçüm sisteminin kullanılması uygun olacaktır. Bu ölçüm dronlarında kullanılacak modüller; IoT (Nesnelerin

İnterneti-Internet of Things) teknolojisi sayesinde sensör tabanlı aldıkları verileri bir wifi sistemi ile aktararak diğer modüller ile iletişim halinde bir ağ sistemi oluşturabilmelidir. Ayrıca bu sistemler gerektiği takdirde, örneğin sadece trafik kaynaklı ya da sadece bir noktasal kaynağın emisyon ölçümünü yapabilecek bir kirlitici kaynağı çevresindeki belirli bir alanda üç boyutlu hava kalitesi ölçümü yapabilecek ve ölçüm yapılan alandaki kirlilik dağılımını üç boyutlu modelleyebilecek rahatlıkla istenen noktalara taşınabilecek, hatta istenilen noktanın emisyon ölçümünü de yapabilecek kapasitede olacaktır (Medium, 2023). Sensör bazlı ölçümler sonucu alınan anlık veriler bakanlığımızın referans ölçüm sitemlerine ve ölçüm ağına eklenebilecektir ve alınan sensör bazlı verilerin doğruluğu bu referans noktaların verileri ile karşılaştırılarak doğrulanacaktır.

Yaptığımız çalışmada; drona entegre mobil hava kalitesi ölçüm ünitesi kullanarak IoT teknolojisi yardımıyla Akıllı Kentlerin en önemli özelliklerinden; Nesnelerin İnterneti, Bulut Bilişim, Büyük Veri, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) gibi yeni nesil bilgi iletişim teknolojileriyle entegre çalışabilen bir cihaz ilk kez tasarlanmış uygulamaya alınmıştır. Tasarladığımız bu ünitemizin, uygulamaya dönüştükten sonra ilerleyen aşamalarda yukarıda bahsedilen ticari ürünler ile rekabet edecek bir teknolojik seviyeye geliştirilmesi planlarımız arasındadır.

Bu çalışmada; kent içerisinde belirli alanlardan; drona entegre mobil hava kalitesi ölçüm ünitesi yardımıyla dikey ve yatay alanları kapsayacak şekilde üç boyutlu bir örnekleme ile alansal kirlilik dağılımı haritalarının oluşturulması planlanmaktadır. Böylece; insan ve canlıların nefes aldığı seviyeden başlayarak hava kirliticilerinin troposfer içerisindeki dikey olarak ulaşabildiği noktalara (dronun ve meteorolojik faktörlerin el verdiği ölçüde) çıkılarak ölçümler yapmak suretiyle dikey alanlarda; nüfus yoğunluğuna bağlı olarak yeni oluşturulmuş yerleşim merkezlerindeki (noktasal çizgisel ve alansal) yatay alanlarda sürekli bir veri akışı sağlanacaktır. Meteorolojik faktörlerde dikkate alınarak topoğrafyanın yanı sıra yükseklik ile hava kalitesi kirlilik parametreleri arasındaki ilişki çok net bir şekilde incelenebilecektir. Hava kalitesi kirlilik parametreleri mevsimsel periyotlarda da ölçülünerek ortaya konulabilecektir. Böylece kirlilik seviyeleri hem zamansal hem alansal olarak incelenerek mukayeseler yapılabilecektir. Tasarlanan prototip ölçüm modülü; yerli ve milli standartlarda piyasada var olan yabancı menşeli ticari ürünlerden oldukça düşük maliyetli (ünite başına yaklaşık 30000TL) olacağı ön görülmektedir. Mukayese edilen ticari ürünlerin yabancı menşeli olması sebebiyle Dolar/Euro kurunun da göz önünde bulundurulması önemlidir. Yerli sermaye ve desteklerle tasarlanacak ürünümüz; kendinden sonra geliştirilecek sistemlere katkı sağlayabilecek ve bu alanda tercih edilebilecek yerli, milli sensörlerin ve teknolojilerin

geliştirilmesine de yardımcı olacaktır. Sürdürülebilir bir şekilde alınan veriler yardımıyla CBS kullanılarak Üç boyutlu hava kalitesi kirlilik haritaları oluşturulabilecektir. Ölçüm ünitesinin düzenli ve sürekli ölçümler yapabilmesi için cihaz içerisinde yer alan; hava kirleticilerini ve meteorolojik parametreleri ölçecek sensörlerin, veri aktarımını sağlayacak birimin, güç ünitesinin bakımı ve kalibrasyonları pratik şekilde kolay takılıp çıkarılabilir tarzda ergonomik olarak tasarlanmış olup, gerektiğinde problem oluşturan parça rahatlıkla değiştirilebilecektir. Sürekli ölçüm akışı olurken verilerin aktarımında oluşabilecek bir eksiklik durumunda, verilerin alındığı merkez tarafından bu eksiklik hemen fark edilebilecek ve hızlıca o noktadaki cihaza ve problem çıkaran birime müdahale edilebilecektir. Prototip ölçüm ünitemiz olabildiğince küçük hacimli, kompakt yapıda ve sağlam (dış atmosferik koşullara karşı olabildiğince dayanıklı) olup; şehrin istenilen bölgelerinde dikey ve yatay pozisyonda hava kalitesi ölçümü yapabilecektir. Bu proje doğrultusunda oluşturacağımız prototip ölçüm ünitemiz inovatif, geliştirilebilir ve sürdürülebilirliği yüksek olan ve de Akıllı Kentlere entegre edilebilir bir şekilde tasarlanmış olup Türkiye’de yerli ve milli imkanlar ile üretilecektir.

Prototip ürünümüzün geliştirilmesiyle yeni Ar-Ge çalışmalarının önü açılmış olacaktır. Bu yönüyle hem Üniversite-Sanayi İşbirliğine hem de yeni Ulusal/Uluslararası Ar-Ge İşbirliklerine açık inovatif çalışmalara öncülük edebilecektir.

Prototip ürünümüzün yerli ve mili imkanlarla geliştirilmesi sonucu, sektöründeki yabancı markalarla maliyet açısından rekabet edebilecek güçte daha ekonomik ve inovatif (teknolojik olarak geliştirilebilir) bir ürün bu sektöre kazandırılmış olacaktır. Özellikle yerli ve milli dron ve sensör teknolojileri geliştirildikçe, tasarladığımız prototip ürünümüz buna paralel olarak ileri teknolojik bir ürüne evrilebilir.

Yerli yazılım ve arayüz tasarımı sayesinde ulusal veri güvenliği bağlamında hava kalitesi gibi önemli bir konudaki verilerin korunması sağlanabilecektir.

Projenin Ekonomik, Ticari, ve Sosyal Çıktıları ise şöyledir:

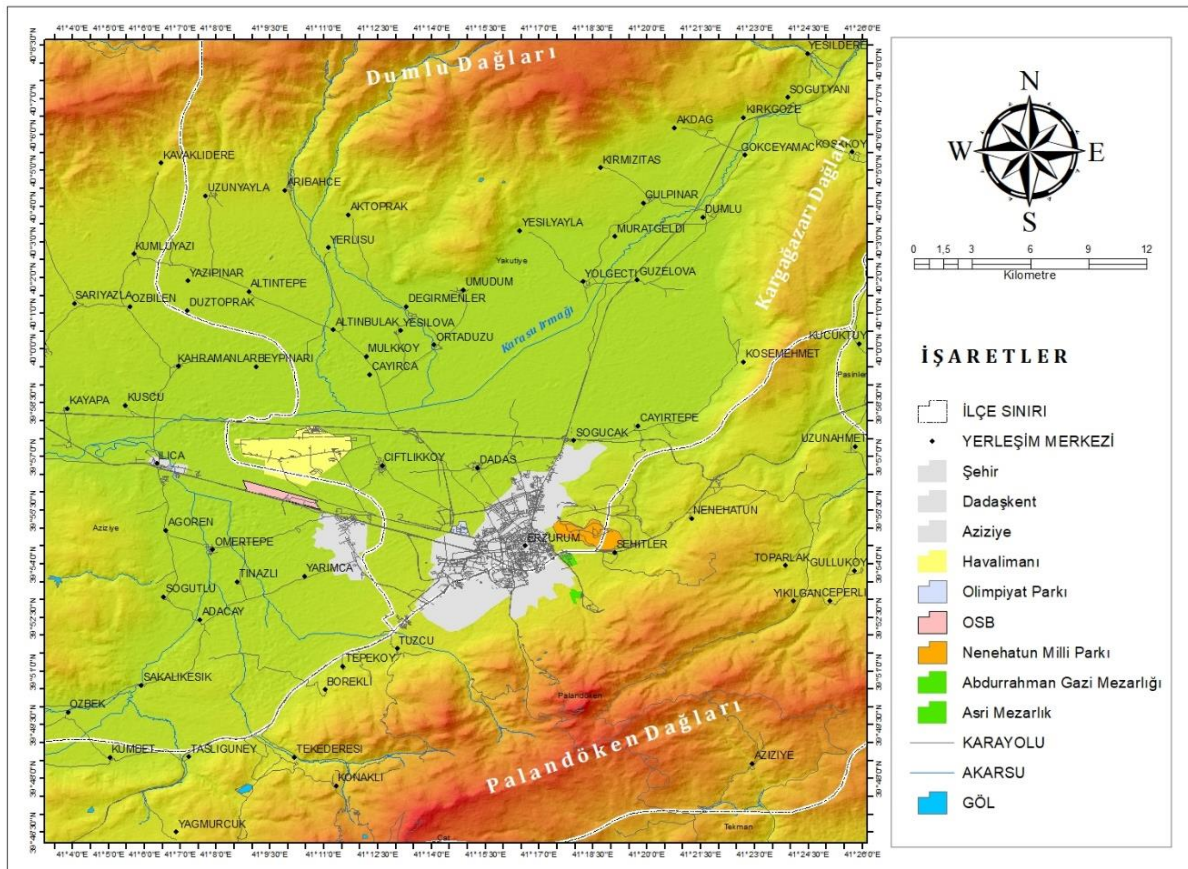
Drona entegre hava kalitesi ölçüm ünitesi, inovatif prototip bir ürün olarak sunulacaktır. Geliştirilen prototip ürün için patent başvurusu yapılabilir. Bu prototip ürün için uygun bir yazılım geliştirilecektir. Prototip ürünün ilerleyen aşamalarda devam edecek olan projelerle geliştirilmesi sonucu piyasadaki ticari ürünler ile rekabet edebilecek inovatif yerli ve milli bir ürün tasarımı yapılmış olacaktır. Bu çalışma ileride bir Start- up girişimi olarak geliştirilebilecektir.

Ölçüm cihazımızın tasarımı ve üretimi için hazırlanan projemiz; **Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi** tarafından **FDK-2023-12295** nolu doktora araştırma projesi olarak desteklenmiştir.



Coğrafi çevre özellikleri

Erzurum kenti, Erzurum Depresyonu'nun merkezi kesimlerini oluşturan Erzurum Ovası'nın güneydoğu kesiminde yer alır. Faylanmalara bağlı olarak kabaca üçgen biçim kazanmış Erzurum Ovası'nı kuzeyde Dumlu Dağları, güneyde Palandöken Dağları ve kuzeydoğuda Kargapazarı Dağları çevreler. Kent çevresinde deniz seviyesine göre en yüksek konumları kuzeyde 3169 m rakımlı Dumlu Dağı zirvesi, kuzeydoğuda 3120 m rakımlı Yurtlar Eteği Tepe (Kargapazarı D.) ve güneydoğuda 3176 m rakımlı Büyük Ejder Tepesi (Palandöken D.) oluşturur. Sahanın en alçak konumları ise Karasu Irmağı vadisinde talveg hattı boyunca (1767 m) tespit edilmektedir. Erzurum Depresyonu mevcut görünümünü, Alp tektonik hareketinden sonra Miyosen başlarında, Alt Pliyosen'de ve Kuvaterner'de kırılmalara yol açan tektonik hareketler sonucunda kazanmıştır. Bu kırılma hareketlerine bağlı olarak, depresyon alanı devamlı olarak çökmeye maruz kalırken, depresyonu çevreleyen dağlık sahalar blok halinde yükselmiştir. Yerel taban seviyesindeki değişimler, depresyonu çevreleyen dağlık alanlarda akarsu aşındırmasını hızlandırmış ve taşman malzeme depresyon alanının zamanla dolmasına neden olmuştur. Erzurum Kenti de kaynağını Palandöken Dağlarından alan akarsular tarafından oluşturulmuş birikinti yelpazeleri üzerinde yer almaktadır (Harita 16).



Şekil 16. Erzurum kenti ve çevresinin topografya haritası

Araştırma sahasının içerisinde bulunduğu Erzurum Ovası'nın yüzey suları, Karasu Irmağı tarafından toplanmaktadır. Fırat Nehri hidrografik havzası içerisinde kalan Karasu Irmağı, Karagöbek mahallesi yakınlarında Erzurum Ovası'na girdikten sonra Ortadüzü mahallesine kadar kuzeydoğu-güneybatı, Ortadüzü-Küçükgeçit mahalleleri arasında doğu-batı yönlü akış gösterir.

Araştırma sahasının iklim özelliklerini belirlemek üzere 39,9058''K-41,2544°D koordinatlarında ve 1860 metre yükseklikte kurulu Erzurum Meteoroloji İstasyonu verilerinden yararlanılmıştır. İstasyonu'nun 1929-2022 yılları arasındaki rasatlarına göre, sahada yıllık ortalama sıcaklık 5,8°C'dir. Ortalama sıcaklığın yıl içerisindeki seyri incelendiğinde, en düşük ortalama -9,1°C ile Ocak ayında, en yüksek ortalama sıcaklık ise 19,5°C ile Ağustos ayında tespit edilmektedir (Tablo 15). Sıcaklıklar, Ocak-Ağustos arasında hızlı yükselme, Ağustos-Ocak döneminde ise daha hızlı azalma eğilimi gösterir. Kış-yaz devreleri arasında sıcaklığın hızlı değişimleri ve sıcaklık amplitüdünün 28,6°C ulaşması, sahada karasallık oranının yüksek olduğuna işaret etmektedir. Ortalama sıcaklıkların, Temmuz ve Ağustos aylarında birbirlerine yakın değerler göstermesi, yazların geciktiğinin bir göstergesidir. Ayrıca ortalama sıcaklığın en fazla 19,5°C'ye çıkıyor olması ve yaz mevsimi ortalamasının 17,9°C gibi düşük sayılabilecek bir değerde olması, sıcak yazların yaşanmadığına işaret etmektedir. Araştırma sahasında günlük sıcaklığın 0°C'nin altına düştüğü günlerin ortalama yıllık toplam sayısı 169,5 gündür. Yılın %46,4'ünün donlu geçtiği sahada, Kasım ayından Nisan ayına kadar olan dönemin neredeyse tamamında, sıcaklık 0°C'nin altındadır. İnceleme sahasında gerek aylık ortalama sıcaklıklar ve gerekse de ekstrem sıcaklıklarda izlenen yüksek farklanmalar ile yılın büyük bölümünde etkili olan don olayları karasal şartların bir sonucudur. Belirlenen bu termik özelliklere göre, Erzurum Ovası'nda yazları fazla sıcak olmayan, kışları oldukça soğuk geçen ve buna rağmen amplitüdün yüksek olduğu Kontinental Termik Rejim tipi etkilidir. Erzurum Meteoroloji İstasyonu'nu verilerine göre sahaya yıllık toplam 429,3 mm yağış düşmektedir. İnceleme sahasında yağışların mevsimlere göre dağılımı incelendiğinde, toplam yağışın 162,5 mm'lik bölümünün (%37,9) İlkbahar mevsiminde düştüğü, bu mevsimi %24,3'lük oranıyla Sonbahar'ın takip ettiği görülür. Sahada en düşük yağışlar %16,2'lik oranıyla (69,5 mm) kış mevsiminde alınmaktadır. Genel olarak çalışma istasyonunda her mevsimin yağışlı geçmesi dikkat çekicidir. Ayrıca sahada yaz yağışlarının oranı da oldukça yüksektir (%21,7). Araştırma sahasında yağışın aylara ve mevsimlere göre dağılımı bir arada değerlendirildiğinde, yağış azamilerinin ilkbahar ve sonbahar mevsimlerinde; yağış minimumlarının ise yaz ve kış mevsimlerinde ortaya çıktığı görülmektedir. Yaz yağışlarının kış yağışlarından fazla olması, konveksiyonel kökenli yağışların bir sonucu olmalıdır. Konveksiyonel yağışlar ise sahada Kontinental Yağış Rejimi'nin etkili olduğuna işaret etmektedir.

Tablo 15. Erzurum Meteoroloji İstasyonuna Ait Seçilmiş İklim Elemanlarının Aylık Dağılımı (1929 - 2022)

ERZURUM	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Yıllık
Ortalama Sıcaklık (°C)	-9.1	-7.6	-2.4	5.4	10.7	14.9	19.2	19.5	14.8	8.2	1.2	-5.8	5.8
Ortalama En Yüksek Sıcaklık (°C)	-4.0	-2.3	2.6	11.0	16.9	21.8	26.6	27.3	22.7	15.2	6.9	-0.9	12.0
Ortalama En Düşük Sıcaklık (°C)	-13.9	-12.5	-7.1	0.0	4.3	7.3	11.1	11.2	6.4	1.7	-3.8	-10.2	-0.5
Ortalama Güneşlenme Süresi (saat)	3.3	4.4	5.2	6.4	8.0	10.2	11.3	10.7	9.1	6.9	4.9	3.2	7.0
Ortalama Yağışlı Gün Sayısı	11.09	11.02	12.38	13.73	16.03	10.99	6.66	5.24	5.13	9.53	9.19	10.63	121.6
Aylık Toplam Yağış Miktarı Ortalaması (mm)	21.6	25.9	35.4	54.5	72.6	48.5	26.8	17.9	24.2	47.1	32.9	21.9	429.3
En Yüksek Sıcaklık (°C)	8.0	10.6	21.4	26.5	29.6	32.7	35.6	36.5	33.3	27.0	20.7	14.0	36.5
En Düşük Sıcaklık (°C)	-36.0	-37.0	-33.2	-22.4	-7.1	-5.6	-1.8	-1.1	-6.8	-14.1	-34.3	-37.2	-37.2

Kaynak (MGM 2023b)

Erzurum İli'nde 2021 yılı itibarıyla 749.754 nüfus yaşamaktadır. İl nüfusunun ilçelere dağılımı incelendiğinde, nüfusun %49.1'inin (367.747 kişi) il yüzölçümünün sadece %6,5'ini (1612 km²) oluşturan Yakutiye ve Palandöken ilçelerinde yaşadığı dikkati çeker (Tablo 16). Bu durum Erzurum Kenti'nin Yakutiye ve Palandöken ilçelerinde yer almasıyla ilgilidir. Ayrıca Aziziye İlçesi nüfusunun önemli bir bölümü de şehrin 5 km batısındaki Selçuklu ve Saltuklu mahallelerinde yaşamaktadır. İl genelinde en fazla nüfusa sahip ilçe Yakutiye (190.373), en yüksek yoğunluğa sahip ilçe ise (265,9 km²/kişi) Palandöken'dir.

Tablo 16. Erzurum İli Nüfusunun Dağılımı (2022)

İlçe	Toplam Nüfus ¹	%	Yüzölçüm ² km ²	%	Aritmetik Yoğunluk km ² /kişi
Yakutiye	190373	25,4	945	3,8	201,5
Palandöken	177374	23,7	667	2,7	265,9
Aziziye	65553	8,7	1.529	6,1	42,9
Horasan	36519	4,9	1.740	7,0	21,0
Oltu	30075	4,0	1.441	5,8	20,9
Pasinler	27055	3,6	1.134	4,5	23,9
Karayazı	25543	3,4	1.953	7,8	13,1
Hınıs	24680	3,3	1.367	5,5	18,1
Tekman	23195	3,1	2.102	8,4	11,0
Karaçoban	22250	3,0	571	2,3	39,0
Aşkale	21494	2,9	1.507	6,0	14,3
Şenkaya	16035	2,1	1.381	5,5	11,6
Çat	15556	2,1	1.448	5,8	10,7
Tortum	15259	2,0	1.463	5,9	10,4
İspir	14607	1,9	2.129	8,5	6,9
Köprüköy	14204	1,9	777	3,1	18,3
Narman	12292	1,6	799	3,2	15,4
Uzundere	7625	1,0	505	2,0	15,1
Olur	6262	0,8	893	3,6	7,0
Pazaryolu	3803	0,5	654	2,6	5,8
TOPLAM	749754	100,0	25.005	100	30,0

Kaynak: (TÜİK, 2023; HGM, 2022).

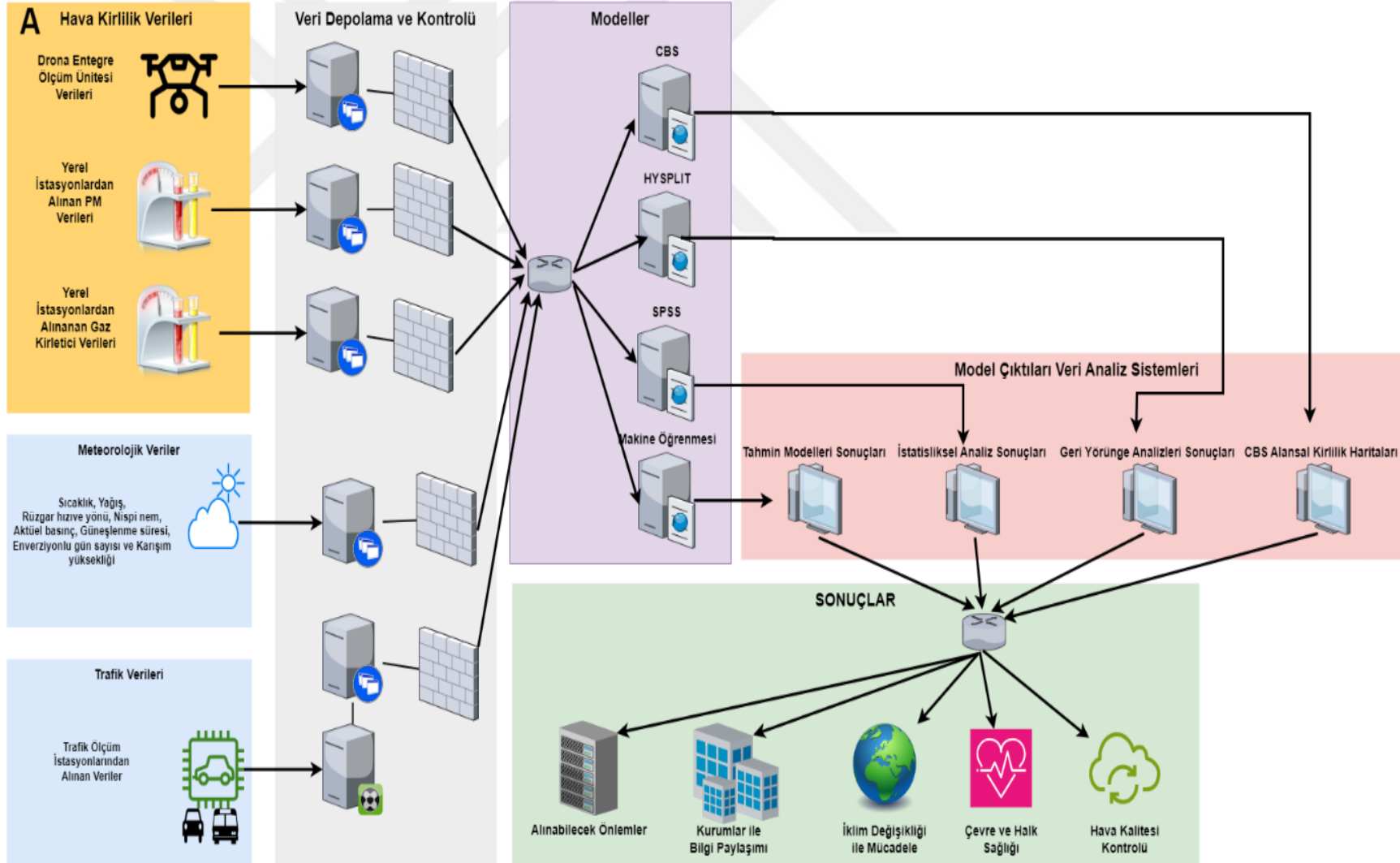
Erzurum Akıllı Kent Hava Kalitesi Ölçümü: İzleme ve Modelleme

Erzurum'un hava kalitesini izlemek, modellemek ve iyileştirmek amacıyla tasarlanan bir akıllı kent projesini olan Akıllı kentlere entegre edilebilecek Hava Kalitesi İzleme ağı bu bölümde sunulmaktadır. Erzurum'un coğrafi konumu, iklimi ve nüfus yapısı, hava kalitesi üzerine benzersiz etkiler oluşturmaktadır. Bu bağlamda, Erzurum'un özel koşullarını ve hava kalitesini anlamak, ancak etkili bir hava kalitesi modelleme ağı oluşturularak yapılabilir.

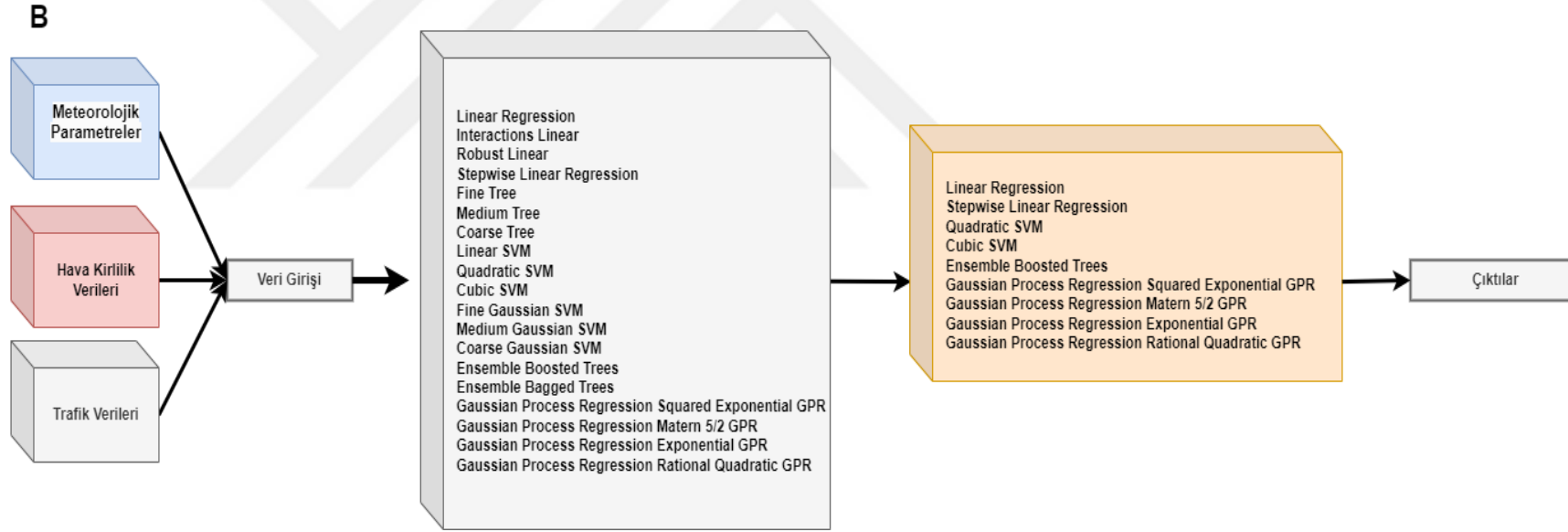
Toplanan veriler, gelişmiş analiz ve modelleme teknikleri kullanılarak işlenmiştir. Modelleme sonuçları hava kalitesi ile ilgili karmaşık ilişkileri anlamak ve gelecekteki eğilimleri tahmin etmek için kullanılmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında tasarlanan Hava Kalitesi İzleme Ağı kent merkezinde hava kalitesi modellemesinde kullanılmış, Akıllı Kentlere entegre edilebilecek bu ağ yardımıyla alınan tüm veriler bir bulut sistemine aktararak analiz edilmiştir. Hava Kalitesi İzleme Ağı Şekil 17A’de detaylı olarak verilmiştir.

Hava Kalitesi İzleme Ağı içerisinde yer alan ve tamamen kendi tasarımı olan Drona Entegre Hava Kalitesi Ölçüm Cihazı prototipini geliştirmek amacıyla Atatürk Üniversitesi Bilimsel araştırma Projeleri Birimine doktora projesi hazırlanarak sunulmuştur. Projemizin geç desteklenmesi sebebiyle Drona Entegre Hava Kalitesi Ölçüm Cihazı prototipi tez sürecinde yetişmemiştir. Malzeme alım süreci tamamlanmak üzeredir. Tasarım tamamlandıktan sonra aynı çalışma devam ettirilecektir. Bu aşamaya kadar farklı ölçüm istasyonlarından (hava kirliği ölçüm istasyonları, meteorolojik ölçüm istasyonları ve trafik ölçüm istasyonları) yedi yıllık (84 ay) veriler depolanmış, analiz edilmiş ve makine öğrenmesi yardımıyla $PM_{2,5}$ için gelecek tahminleri yapılmıştır (Şekil 17B). Doktora tezi bitiminden sonra proje devam ettirilecek ve makine öğrenmesi yardımıyla tahmin edilen $PM_{2,5}$ verilerin doğruluğu; Drona Entegre Hava Kalitesi Ölçüm Cihazı ile alınan veriler ile test edilmiş olacaktır.



Şekil 17. A) Tez kapsamında önerilen Akıllı Kentlere entegre edilebilecek hava kalitesi izleme ağı genel akış diyagramı B) Tez kapsamında 2016-2023 yılları kapsamında (Hava Kirliliği-Meteorolojik-Trafik) verilerden hareketle makine öğrenmesi metodu ile çalışılan modellerin ve çıktıların akış diyagramı



Şekil 17. A) Tez kapsamında önerilen Akıllı Kentlere entegre edilebilecek hava kalitesi izleme ağı genel akış diyagramı B)Tez kapsamında 2016-2023 yılları kapsamında (Hava Kirliliği-Meteorolojik-Trafik) verilerden hareketle makine öğrenmesi metodu ile çalışılan modellerin ve çıktıların akış diyagramı (devamı)

Veri modelleme sürecinde, hava kirliliği ölçüm istasyonlarından, meteorolojik ölçüm istasyonlarından ve trafik ölçüm istasyonlarından alınan verilerin doğruluğunu, güvenilirliğini ve anlamlılığını belirlemeyi amaçlayan kapsamlı bir süreç geliştirilmiştir.

Bu süreç, aşağıdaki ana başlıkları içermektedir;

- Veriler toplandı ve düzenli depolandı
- Veri setlerinde, ölçüm hatası olabilecek absürt değerler belirlenerek çıkarıldı. Tahmini veriler asla modellemeye konulmadı. (Bu adım, modelleme ve analiz süreçlerini daha güvenilir hale getirmek için önemlidir).
- Veriler, temel istatistiksel analizlerle değerlendirildi. (Bu adımda; ortalama, standart sapma, ve korelasyonlar belirlenir ve bu adım hava kalitesi değişkenlerinin dağılımını anlamak için kullanılır)
- Kullanılan modellerin performansı, ölçülen verilerle karşılaştırılarak değerlendirildi. (Bu adımda, modelin tahmin yetenekleri, doğruluk ve belirli hava kalitesi parametrelerini öngörebilme kapasitesi incelenir).
- Elde edilen veri setleri, uzun vadeli eğilimleri belirlemek için analiz edildi ve makine öğrenmesi yardımıyla gelecek tahminleri yapıldı. (Bu adımda, mevsimsel değişimler, trendler ve tahmin modelleri belirlenir).
- Veriler, coğrafi bilgi sistemleri (CBS) aracılığıyla haritalandırıldı. (Bu adımda, hava kirlleticilerinin üç boyutlu haritalandırılması yapılarak kent genelinde farklı bölgelerdeki değişiklikler ortaya konulur)

Veri Setlerinin Oluşturulması

Tablo 17’da görüleceği üzere modelleme çalışmalarında; gaz verileri, Pm verileri, meteorolojik veriler, trafik verileri ve diğer veriler olmak üzere hava kalitesi üzerine etkili olan farklı özelliklere sahip tüm parametre verileri kullanılmıştır.

Pm₁₀ ve Pm_{2.5} verileri için; 2016 yılı ocak-2023 temmuz dönemini kapsayacak şekilde kent içerisinde yer alan 4 istasyondan (Taşhan istasyonu, Merkez istasyonu, Palandöken istasyonu Aziziye istasyonu) ve kent arka planını temsil edecek şekilde kent merkezine 40 km uzaklıkta olan bir istasyon (Pasinler istasyonu) olmak üzere toplam 5 istasyondan alınan değerler kullanılmıştır.

Gaz kirleticisi verileri için; 2016 yılı ocak-2023 temmuz dönemini kapsayacak şekilde kent içerisinde yer alan 4 istasyondan (Taşhan istasyonu, Merkez istasyonu, Palandöken istasyonu Aziziye istasyonu) ve kent arka planını temsil edecek şekilde ve kent merkezine 40

km uzaklıkta olan bir istasyon (Pasinler istasyonu) olmak üzere toplam 5 istasyondan alınan CO, SO₂, NO, NO₂, NO_x ve O₃ değerleri kullanılmıştır.

Meteorolojik parametreler için; 2016 yılı Ocak-2023 Temmuz dönemini kapsayacak şekilde kent içerisinde yer alan 4 istasyondan (Erzurum Bölge istasyonu, Aziziye istasyonu, Havalimanı istasyonu, Palandöken Kayak Merkezi istasyonu) alınan meteorolojik parametreler kullanılmıştır. Bu meteorolojik parametreler; günlük ortalama sıcaklık (°C), günlük toplam yağış (mm kg/m²) (OMGİ), günlük ortalama rüzgar hızı (m/sn), günlük ortalama nispi nem (%), günlük ortalama aktüel basınç (hPa), günlük güneşlenme süresi (saat), aylık enverziyonlu gün sayısı ve günlük karışım yüksekliği (Sabah- öğlen m) dir (EK 1. Veri Temini ve İzinler).

Trafik verisi için; 2016 yılı ocak-2023 temmuz dönemini kapsayacak şekilde kent içerisinde yer alan 15 istasyondan alınan yıllık ortalama günlük trafik verisi (YOGT) kullanılmıştır (EK 1. Veri Temini ve İzinler).

Diğer veri seti olarak; yıl, ay, konum ve yükseklik bir özellikler modellere eklenmiştir. Yıl bilgisi ve ay bilgisi verilerin zamanla değişiminin bir göstergesi olarak modellere eklenmiş; konum değeri olarak da, ölçüm alınan istasyonların konumları matematiksel olarak modellere eklemiştir. Ayrıca ölçüm alınan istasyonların yükseklik değerleri (deniz seviyesinden yükseklik-rakım) de modellere eklenmiştir.

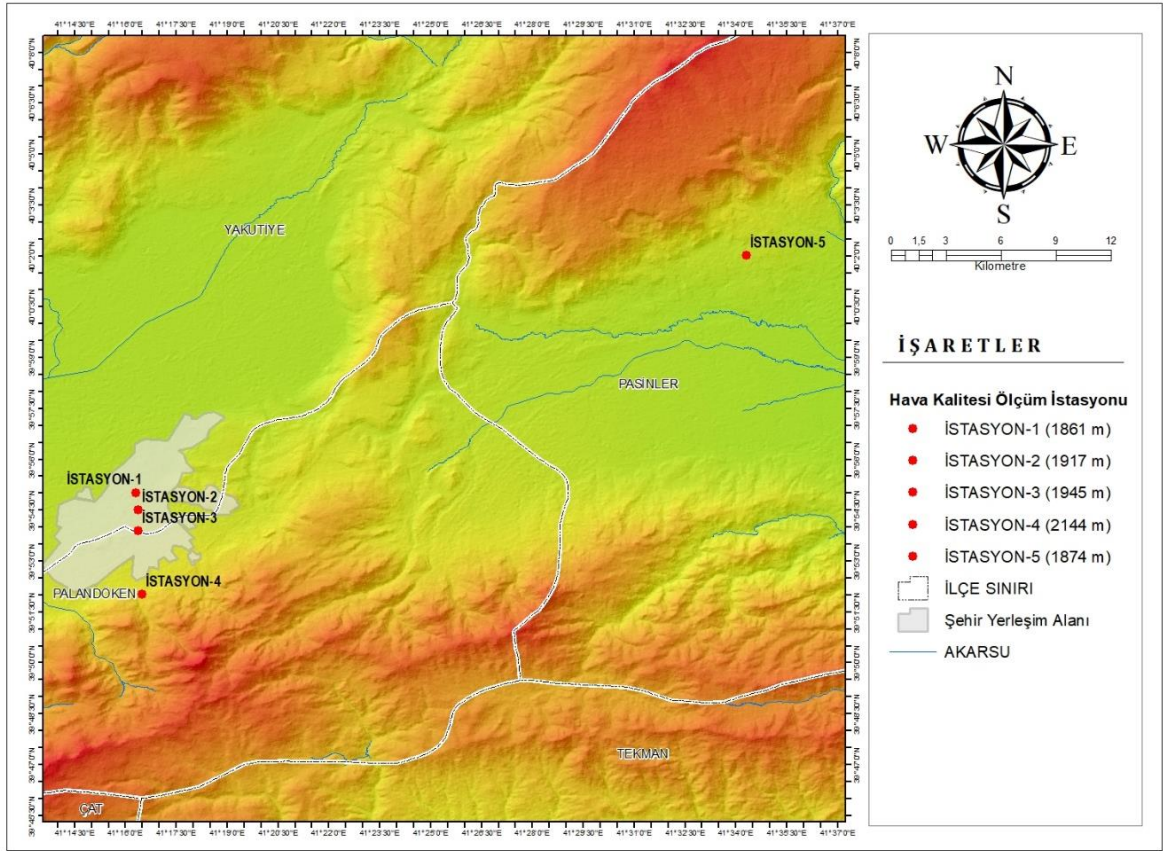
Tablo 17. Çalışmada Kullanılan Veriler

Veriler	Veri Değişkenleri
Pm ₁₀ değerleri	ThnPM10, MkzPM10, PdkPm10, AzzPM10, PsnPM10
Pm _{2.5} değerleri	ThnPM2.5
Gaz kirletici değerleri	AzzCO, PdkCO, ThnCO MkzSO ₂ , AzzSO ₂ , PdkSO ₂ MkzNO, AzzNO, PdkNO, ThnNO MkzNO ₂ , AzzNO ₂ , PdkNO ₂ , ThnNO ₂ MkzNO _x , AzzNO _x , PdkNO _x , ThnNO _x , MkzO ₃ , PdkO ₃
Meteorolojik parametreler	Sıcaklık, Rüzgar Hızı, Yağış, Nem, Basınç, Güneşlenme Süresi, Aylık Enverziyonlu Gün Sayısı, Karışım Yüksekliği
Trafik verileri	TrfIST1, TrfIST2, TrfIST3, TrfIST4, TrfIST5, TrfIST6, TrfIST7, TrfIST8, TrfIST9, TrfIST10, TrfIST11, TrfIST12, TrfIST13, TrfIST14, TrfIST15
Diğer	D1(yıl), D2(ay), Konum, Yükseklik

Yerel Hava Kirliliği Ölçüm İstasyonları Verileri

Bu çalışmada Erzurum kent merkezindeki 2016 yılı ocak-2023 haziran dönemini kapsayacak şekilde kent içerisinde yer alan ÇŞİDB Doğu Anadolu Temiz Hava Merkezine bağlı

Hava Kalitesi İzleme Ağı (UHKİA)’na bağlı beş adet hava kalitesi izleme istasyonundan alınan günlük ortalama Pm2.5-Pm10, CO, SO₂, NO, NO₂, NO_x ve O₃ verileri kullanılmıştır.



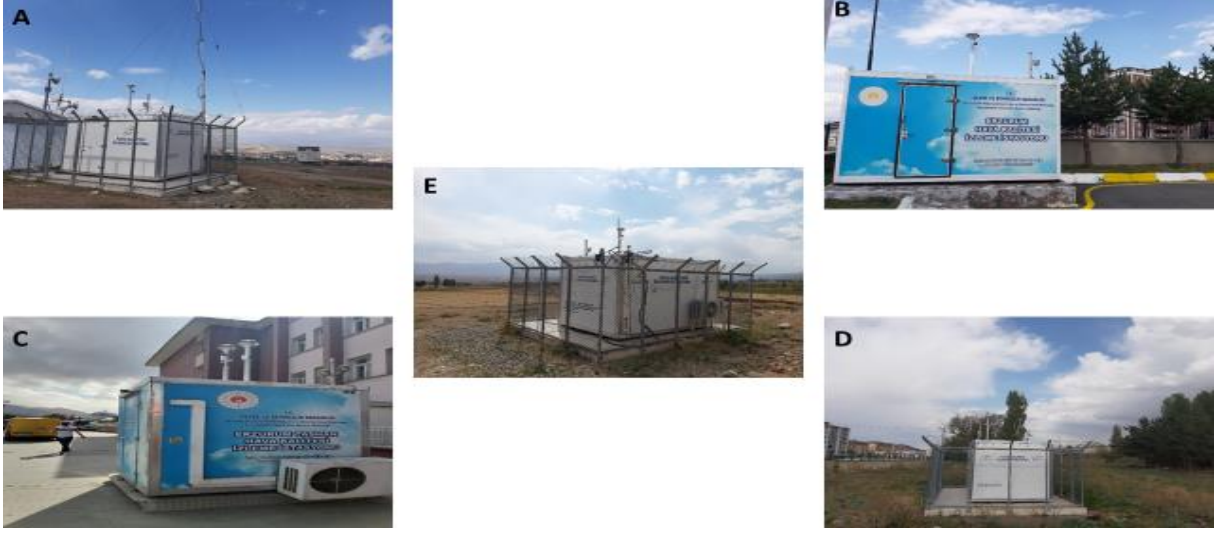
Şekil 18. Erzurum kent merkezi hava kirliliği ölçüm istasyonlarının coğrafi konumu

Hava kalitesi ölçümü yapılan bu beş istasyon; gerek veri ölçüm değerleri gerekse veri güvenilirliği açısından ÇŞİDB Doğu Anadolu Temiz Hava Müdürlüğü tarafından sürekli kontrol altındadır. Bu istasyonlardaki ünitelerin içerisinde yer alan cihazlar kalite standartları açısından oldukça güvenilir cihazlardır. Ayrıca belirli periyotlarda kalibrasyonları ve bakım onarımları da ilgili birim tarafından yapılmaktadır (Şekil 19).

Tablo 18. Hava Kalitesi İzleme Ağı (UHKİA)’na Bağlı Beş Adet Hava Kalitesi İzleme İstasyonlarının Özellikleri

İstasyon No	İstasyon Adı	Konum (Enlem-Boylam)	Yükseklik (metre)	Arazi Kullanımı (Ana Aktivite)	Özellik	Ölçülen Kirlilik Parametreleri
İstasyon 1 (Azz)	Aziziye	39° 55’ 08’’ N 41° 16’ 18’’ E	1861	Yerleşim Sanayi	Kentsel	Pm ₁₀ (µg/m ³) SO ₂ (µg/m ³) NO (µg/m ³) NO ₂ (µg/m ³) NO _x (µg/m ³) CO (µg/m ³)
İstasyon 2 (Thn)	Taşhan	39° 54’ 30’’ N 41° 16’ 23’’ E	1917	Yerleşim Ticari	Kentsel	Pm ₁₀ (µg/m ³) Pm _{2.5} (µg/m ³) NO (µg/m ³) NO ₂ (µg/m ³) NO _x (µg/m ³) CO (µg/m ³)
İstasyon 3 (Mkz)	Merkez-Erzurum	39° 53’ 53’’ N 41° 16’ 22’’ E	1945	Yerleşim	Kentsel	Pm ₁₀ (µg/m ³) SO ₂ (µg/m ³) NO (µg/m ³) NO ₂ (µg/m ³) NO _x (µg/m ³) CO (µg/m ³) O ₃ (µg/m ³)
İstasyon 4 (Pdk)	Palandöken	39° 52’ 03’’ N 41° 16’ 30’’ E	2144	Turizm Yerleşim	Kentsel	Pm ₁₀ (µg/m ³) SO ₂ (µg/m ³) NO (µg/m ³) NO ₂ (µg/m ³) NO _x (µg/m ³) CO (µg/m ³) O ₃ (µg/m ³)
İstasyon 5 (Psn)	Pasinler	40° 02’ 00’’ N 41° 34’ 19’’ E	1874	Tarım	Kırsal	Pm ₁₀ (µg/m ³) SO ₂ (µg/m ³) NO (µg/m ³) NO ₂ (µg/m ³) NO _x (µg/m ³) O ₃ (µg/m ³)

Erzurum kent merkezinde Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı öngörülerine istinaden; noktasal, çizgisel ve alansal kirlilik boyutunda en yoğun olan bölge baz alınarak diğer parametrelerin yanı sıra sadece iki nolu (Taşhan) istasyonda Pm_{2,5} verisi alınmaktadır. Pm_{2,5}’un tek bir istasyondaki ölçümü sadece Erzurum’a özel olmayıp; bölgesel olarak Doğu Anadolu Temiz Hava Merkezi Müdürlüğüne bağlı kentlerdeki (Artvin, Erzincan, Erzurum, Iğdır, Kars, Rize) hava kalitesi izleme istasyonlarında Pm_{2,5} ölçüm yapılmaktadır.



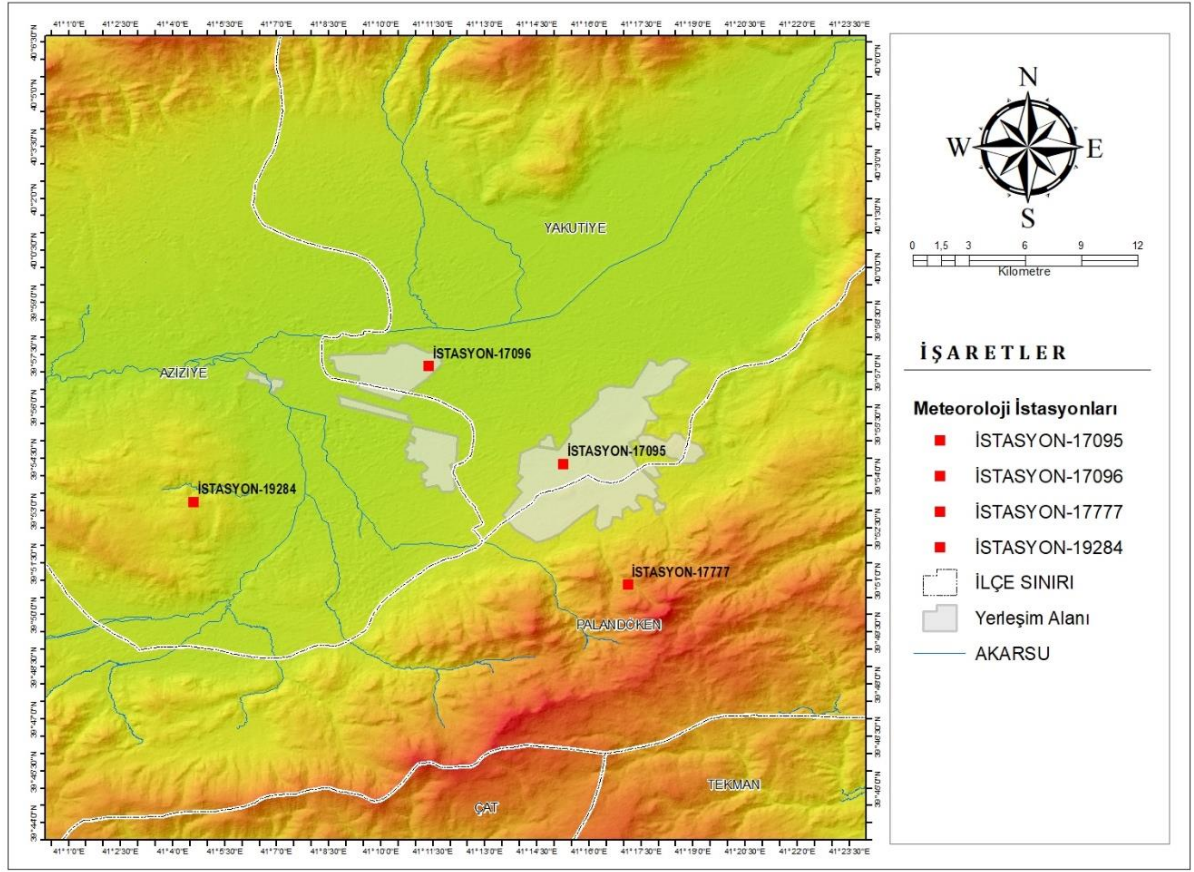
Şekil 19. Hava kalitesi izleme istasyonları güncel fotoğrafları A)Palandöken İstasyonu (İstasyon 4), B) Merkez İstasyonu (İstasyon 3), C) Taşhan İstasyonu (İstasyon 2), D) Aziziye İstasyonu (İstasyon 1), E) Pasinler İstasyonu (İstasyon 5)

Meteorolojik Ölçüm İstasyon Verileri

Çalışmada kullanılan meteorolojik veriler için; 2016 yılı ocak-2023 haziran dönemini kapsayacak şekilde kent içerisinde yer alan 4 istasyondan (Erzurum Bölge istasyonu, Aziziye istasyonu, Havalimanı istasyonu, Palandöken kayak merkezi istasyonu) alınan meteorolojik parametreler kullanılmıştır (Tablo 19). Bu meteorolojik parametreler; günlük ortalama sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$), günlük toplam yağış ($\text{mm}=\text{kg}/\text{m}^2$) (OMGİ), günlük ortalama rüzgar hızı (m/sn) ve yönü, günlük ortalama nispi nem (%), günlük ortalama aktüel basınç (hPa), günlük güneşlenme süresi (saat), aylık enverziyonlu gün sayısı ve günlük karışım yüksekliği (Sabah- öğlen m) dir. Ölçüm istasyonları Aziziye İst. No- 19284, Erzurum Havalimanı İst. No-17096, Erzurum Bölge İst. No- 17095 ve Palandöken Kayak Merkezi İst. No- 17777 dir.

Tablo 19. Meteoroloji Genel Müdürlüğü'ne Bağlı Dört Adet Meteorolojik Ölçüm İstasyonu Özellikleri

İstasyon No	İstasyon Adı	Konum (Enlem-Boylam)	Arazi Kullanımı (Ana Aktivite)	Özellik	Ölçülen Meteorolojik Parametreler
İstasyon M1 İst. No-17095	Erzurum Bölge	39°54'20.9"N 41°15'15.8"E	Yerleşim Ticari	Kentsel	Sıcaklık (°C) Günlük Toplam Yağış (mm=kg÷m ²) OMGİ Günlük Ortalama Rüzgar Hızı ve Yönü (m÷sn) Günlük Ortalama Nispi Nem (%) Günlük Ortalama Aktüel Basınç (hPa) Günlük Güneşlenme Süresi (saat) Günlük Karışım Yüksekliği Sabah-öğlen (m).
İstasyon M2 İst. No-19284	Aziziye	39°53'15.7"N 41°04'35.8"E	Tarım	Kırsal	Sıcaklık (°C) Günlük Toplam Yağış (mm=kg÷m ²) OMGİ Günlük Ortalama Rüzgar Hızı ve Yönü (m÷sn) Günlük Ortalama Nispi Nem (%) Günlük Ortalama Aktüel Basınç (hPa)
İstasyon M3 İst. No-17096	Erzurum Havalimanı	39°57'10.4"N 41°11'22.9"E	Yerleşim	Yarı Kırsal	Sıcaklık (°C) Günlük Toplam Yağış (mm=kg÷m ²) OMGİ Günlük Ortalama Rüzgar Hızı ve Yönü (m÷sn) Günlük Ortalama Nispi Nem (%) Günlük Ortalama Aktüel Basınç (hPa) Günlük Güneşlenme Süresi (saat)
İstasyon M4 İst. No-17777	Palandöken Kayak Merkezi	39°50'52.5"N 41°17'07.0"E	Turizm Yerleşim	Yarı Kırsal	Sıcaklık (°C) Günlük Toplam Yağış (mm=kg÷m ²) OMGİ Günlük Ortalama Rüzgar Hızı ve Yönü (m÷sn) Günlük Ortalama Nispi Nem (%)



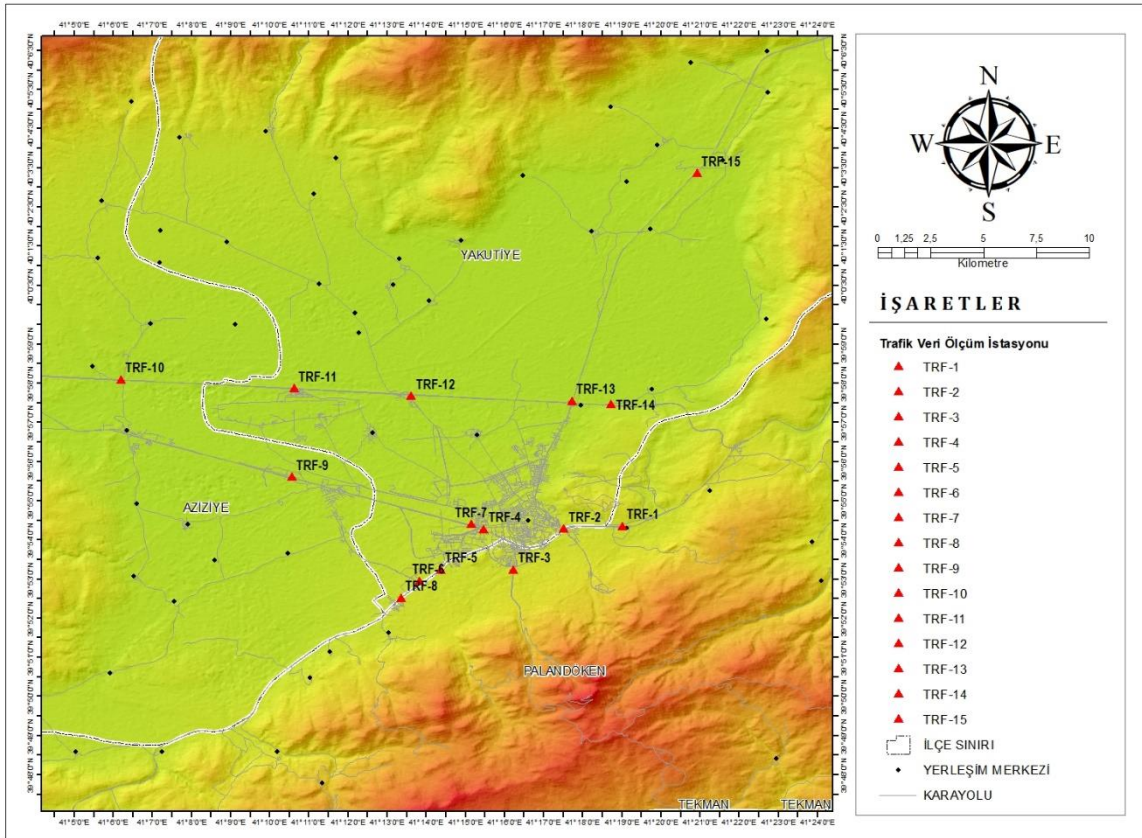
Şekil 20. Erzurum kent merkezi meteorolojik ölçüm istasyonlarının coğrafi konumu

Yerel Trafik Ölçüm İstasyon Verileri

Trafik Verisi için; 2016 yılı Ocak-2023 Haziran dönemini kapsayacak şekilde kent içerisinde yer alan 15 istasyondan alınan yıllık ortalama günlük trafik verisi (YOGT) kullanılmıştır. Ölçüm alınana istasyonlar ve istasyonların yer aldığı karayolları şu şekildedir:

- İstasyon TRF1-İstasyon No= 2-41-100-29 Nene Hatun-Pasinler,
- İstasyon TRF2-İstasyon No=12-67-260-21 Türbe Yolu Cad. Ayr.-Nene Hatun,
- İstasyon TRF3-İstasyon No= 12-113-260-21 Palandöken Kayakolu Ayr.-Türbe Yolu Cad. Ayr,
- İstasyon TRF4-İstasyon No= 12-141-260-21 Atatürk Üniv. Kavşağı-Palandöken Kayakolu Ayr.,
- İstasyon TRF5-İstasyon No= 12-140-950-04 Erzurum-Bölge Eğitim Araş. Has.,
- İstasyon TRF6-İstasyon No= 12-94-950-04 Bölge Eğitim Araş. Has.-İhsan Doğramacı Bulvarı,
- İstasyon TRF7-İstasyon No= 12-188-950-04 İhsan Doğramacı Bulvarı-Konaklı Ayrımı
- İstasyon TRF8-İstasyon No= 12-139-260-21 Dadaşkent Ayr.-Atatürk Üniv. Kavşağı,

- İstasyon TRF9-İstasyon No= 12-389-260-21 Aziziye-Dadaşkent Ayr.,
- İstasyon TRF10-İstasyon No= 12-64-260-21 Aşkale-Çevre Yolu Ayr.-Aziziye,
- İstasyon TRF11-İstasyon No= 12-60-100-28 (Aşkale-Aziziye)Ayr.-Havaalanı Çevre. Yolu.,
- İstasyon TRF12-İstasyon No= 12-139-100-28 Havaalanı-Erzurum İl Yol. Ayrımı. Çevre Yolu,
- İstasyon TRF13-İstasyon No= 12-138-100-28 Erzurum Ayr.-Tortum Dv. Yl. Ayr.- Çevre.Yolu.,
- İstasyon TRF14-İstasyon No= 12-61-100-28 Tortum Ayr.-Pasinler Ayr.- Çevre.Yolu.,
- İstasyon TRF15-İstasyon No= 12-135-950-03 Dumlu-Erzurum.



Şekil 21. Erzurum kent merkezi trafik verisi ölçüm istasyonlarının coğrafi konumu

İstasyonlardan Alınan Verilerden Hareketle Yapılan İstatistiksel Analizler

Hava kalitesi verilerden hareketle, hem hava kalitesi değişkenlerinin özelliklerini anlamak hem de modellerin tahmin yeteneklerini değerlendirmek için kapsamlı kapsamlı istatistiksel analizler yapılmıştır.

Depolanan veriler kullanılarak SPSS istatistik programı yardımıyla, değişkenler arasındaki ilişki kolerasyon analizi ile ortalamalar arasındaki farklar ise tek yönlü varyans (One Way ANOVA) analizi ile belirlenmiştir.

İlk olarak, tüm veri setlerinin temel istatistiksel özellikleri incelenmiştir. Böylece, ortalama, standart sapma, minimum ve maksimum değerler gibi temel istatistikler ile hava kalitesi değişkenlerinin genel dağılımı hakkında ön bilgi oluşturmuştur. Hava kalitesi değişkenleri arasındaki ilişkileri değerlendirmek için korelasyon analizi yapılarak, bir değişkenin diğerine olan bağımlılığı ölçülmüş ve böylece hangi faktörlerin birbirleriyle ilişkili olduğu belirlenmiştir. Zaman serisi analizleri ise, hava kalitesi değişkenlerinin zaman içindeki değişimlerini (mevsimsel eğilimler ve günlük değişimler) değerlendirmek için kullanılmıştır.

Hava kirleticilerini etkileyen faktörlerin belirlenmesi amacıyla regresyon analizi yapılmıştır. Bu analiz, hava kalitesi değişkenleri ile meteorolojik faktörler veya emisyon kaynakları arasındaki ilişkileri modellemeye yardımcı olmuştur.

Elde Edilen Verilerden Hareketle Coğrafi Bilgi Sistemleri Kullanılarak Alansal Hava Kirlilik Haritalarının Oluşturulması (ArcGIS)

Alınan verilerin Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) yazılımlarıyla analiz edilmesi ve üç boyutlu haritalarının oluşturulması adına pek çok Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) incelenmiştir.

CBS arasında bizim veri setlerimizle en çok uyumlu olan ArcGIS yazılımı olduğuna karar verilmiştir. Zamansal analizler istatistiksel olarak detaylı incelendikten sonra mekânsal analizler ArcGIS yazılımı ile incelenmiştir. Üst seviyede bir ArcGIS yazılımı versiyonu Atatürk Üniversitesi tarafından lisans hakları ile birlikte satın alınmış BAUM merkezi aracılığıyla kullanıcıların hizmetine sunulmuştur.

ARCGIS yazılımı, ESRI şirketi tarafından geliştirilmiş, ölçeklendirilebilir entegre bir Coğrafi Bilgi Sistemi yazılımıdır. Yazılım desktop ve server tarafında, tek veya çok kullanıcıli ortamlarda Coğrafi Bilgi Sistemi uygulamaları için ölçeklendirilebilir bir altyapı sağlar.

Kullanıcılara etkin bir yüzey veri görüntüleme ve analiz imkanı tanırken üç boyutlu verinin birçok katmanını görüntülemek ve yüzey yaratımı ve analizi için ara yüz sağlar. (ESRI, 2023).

Yerel İstasyonlardan Elde Edilen $Pm_{2,5}$ - Pm_{10} Verileri Kullanılarak HYSPLIT Geri Yörünge Modellemesi Yardımıyla Toz Haritalarının Oluşturulması

Bu model; Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) modeli olarak adlandırılan ve tekil kirletici parçacıkların geçmişte izlediği veya gelecekte

izleyeceği yörüngeleri hesaplayan bir modeldir. Model NOAA – ARL (Ulusal Okyanus ve Atmosfer Dairesi-Hava Kaynakları Laboratuvarı) tarafından geliştirilmiştir (NOAA 2022).

HYSPLIT modelleri, yerel ölçekten küresel ölçeğe, atmosfer aracılığıyla taşınan ve transfer edilen maddelerin dağılımını ve yörüngesini simüle eden bir modeldir. HYSPLIT, basit hava hareket yörüngelerinin yanı sıra karmaşık taşıma, dağılım, kimyasal dönüşüm ve biriktirme simülasyonlarını hesaplamak için ideal bir sistem olup atmosferik bilimlerde en yaygın olarak kullanılan atmosferik taşıma ve dağılım modelidir. En yaygın kullanım alanlarından biri; hava kütlelerinin kökenini belirlemek ve kaynak-alıcı ilişkileri kurmak için geri yörünge analizidir. HYSPLIT ayrıca kirleticilerin ve tehlikeli maddelerin atmosferik taşınmasını, dağılmasını ve birikmesini açıklayan çeşitli simülasyonlarda da kullanılmaktadır (Su *et al.* 2015).

HYSPLIT modelinin kullanım alanlarından bazıları;

- Radyoaktif malzemeleri izleme ve tahmin etme,
- Gerçek zamanlı orman yangını duman tahminleri
- Rüzgârlarla taşınan toz,
- Çeşitli sabit ve mobil emisyon kaynaklarından gelen kirleticiler,
- Alerjenler ve volkanik kül salınımının izlenmesi ve tahmin edilmesi
- Kaynak-alıcı ilişkileri kurmak için geri yörünge analizi dir.

Modelin hesaplama yöntemi, yörüngeler veya hava parselleri ilk konumlarından hareket ederken, adveksiyon ve difüzyon hesaplamaları için hareketli bir referans çerçevesi kullanan Lagrange yaklaşımı ile sabit bir üç boyutlu ızgara kullanan Euler metodolojisi arasında hibrit bir yöntemdir. HYSPLIT, basitleştirilmiş tek yörüngeleri tahmin ederek yerel ve küresel ölçeklerde taşınan, dağılan ve biriken birden fazla etkileşimli kirleticiyi modellemek için 30 yılı aşkın bir süredir kullanımda olup ihtiyaca binaen geliştirilmektedir (NOAA 2022).

HYSPLIT modeli, hava kütlesi yörünge analizleri başta olmak üzere, hava kalitesi izleme ve aerosol taşınımı çalışmalarından, meteorolojik afet analizlerine kadar oldukça geniş bir yelpazede kullanılmaktadır (NOAA 2022).

Bu çalışmada HYSPLIT modeli ile, yeryüzüne yakın yükseklikte gerçekleştirilen analizlerde, topografik koşullar da modelleme sürecine dahil ederek gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edilerek yorumlanmıştır. Modellemede 1500, 2000 ve 3000 m olmak üzere üç farklı optimal yükseklik düzeyi kullanılmıştır. Belirlenen optimal yüksekliklerden hareketle optimum sürenin 72 saat olduğu belirlenmiştir.

Pm_{2.5} Değerlerinin Makine Öğrenmesi Yardımıyla Tahmini

Tez çalışmasının bu bölümünde, Pm_{2.5} değerlerini belirlemek için makine öğrenmesi yöntemlerinin kullanılabilirliğini vurgulamakta ve hava kalitesi izleme sistemlerinin geliştirilmesinde pratik bir yaklaşım sunulmaktadır. Elde edilen sonuçlar, hava kalitesi yönetimi ve toplum sağlığı açısından önemli uygulamalara yönelik ileriye dönük araştırmalara yol göstermektedir. Farklı makine öğrenimi yöntemlerinin karşılaştırılması, eğitim verilerinin kalitesinin iyileştirilmesi ve modellerin yeni koşullara uyum sağlama yeteneklerinin geliştirilmesi gelecekteki araştırmalara ışık tutabilecektir.

Makine öğrenimi yardımıyla Pm_{2.5} değerlerinin belirlenmesinde öncelikle modellere girdi verisi oluşturacak olan veri setleri hazırlanmıştır. Kullanılan veri seti, çeşitli hava kalitesi sensörlerinden elde edilen Pm_{2.5} ölçümlerini içermektedir. Ayrıca, meteorolojik veriler, trafik yoğunluğu ve zaman gibi faktörleri içeren ek özellikler de içermektedir. Veri seti temizleme ve ön işleme aşamalarında, eksik veya hatalı verilerin düzeltilmesi ve gereksiz özelliklerin kaldırılması süreçleri uygulanmıştır.

Kuramsal temeller bölümünde detayları verilen 19 adet tahmin modeli bu bölümde kullanılmıştır. Bu modeller sırasıyla aşağıda verilmiştir:

1. Linear Regression
2. Interactions Linear
3. Robust Linear
4. Stepwise Linear Regression
5. Fine Tree
6. Medium Tree
7. Coarse Tree
8. Linear SVM
9. Quadratic SVM
10. Cubic SVM
11. Fine Gaussian SVM
12. Medium Gaussian SVM
13. Coarse Gaussian SVM
14. Ensemble Boosted Trees
15. Ensemble Bagged Trees
16. Gaussian Process Regression Squared Exponential GPR
17. Gaussian Process Regression Matern 5/2 GPR
18. Gaussian Process Regression Exponential GPR

19. Gaussian Process Regression Rational Quadratic GPR

Dört farklı deneme kümesi oluşturulmuştur. İlk kümede sadece Pm_{10} değerleri kullanılarak tahminler yapılırken diğer kümelerde meteorolojik parametreler gaz parametreleri ve trafik verileri kullanılmıştır. Sonra tüm veriler kullanılarak optimum değerler ve bu değerlere ulaşılan modeller tespit edilmiştir. Denemelerde kullanılan veriler ise şöyle sıralanabilir:

Pm_{10} değerleri için; 2016 yılı Ocak-2023 Haziran dönemini kapsayacak şekilde kent içerisinde yer alan 4 istasyondan (Taşhan istasyonu, Merkez istasyonu, Palandöken istasyonu ve Aziziye istasyonu) alınan Pm_{10} değerleri kullanılmıştır.

Gaz kirletici değerleri için; 2016 yılı ocak-2023 haziran dönemini kapsayacak şekilde kent içerisinde yer alan 4 istasyondan (Taşhan istasyonu, Merkez istasyonu, Palandöken istasyonu ve Aziziye istasyonu) alınan CO , SO_2 , NO , NO_2 , NO_x ve O_3 değerleri kullanılmıştır. CO değeri için 3 istasyondan (Aziziye istasyonu, Palandöken istasyonu ve Taşhan istasyonu), SO_2 değeri için 3 istasyondan (Merkez istasyonu, Aziziye istasyonu ve Palandöken istasyonu); NO değeri için 4 istasyondan (Merkez istasyonu, Aziziye istasyonu, Palandöken istasyonu ve Taşhan istasyonu), NO_2 değeri için 4 istasyondan (Merkez istasyonu, Aziziye istasyonu, Palandöken istasyonu ve Taşhan istasyonu), NO_x değeri için 4 istasyondan (Merkez istasyonu, Aziziye istasyonu, Palandöken istasyonu ve Taşhan istasyonu) ve O_3 değeri için 2 istasyondan (Merkez istasyonu ve Palandöken istasyonu) alınan değerler kullanılmıştır.

Meteorolojik parametreler için; 2016 yılı ocak-2023 haziran dönemini kapsayacak şekilde kent içerisinde yer alan 3 istasyondan (Erzurum Bölge istasyonu, Havalimanı istasyonu, Palandöken Kayak Merkezi istasyonu) alınan meteorolojik parametreler kullanılmıştır. Sıcaklık değeri için 3 istasyondan (Erzurum Bölge istasyonu, Havalimanı istasyonu, Palandöken Kayak Merkezi istasyonu), yağış miktarı için 2 istasyondan (Erzurum Bölge istasyonu, Palandöken Kayak Merkezi istasyonu), Ortalama rüzgar hızı için 3 istasyondan (Erzurum Bölge istasyonu, Havaalanı istasyonu, Palandöken Kayak Merkezi istasyonu), nispi nem için 3 istasyondan (Erzurum Bölge istasyonu, Havaalanı istasyonu, Palandöken Kayak Merkezi istasyonu), aktüel basınç 2 istasyondan (Erzurum Bölge istasyonu, Palandöken Kayak Merkezi istasyonu) ve güneşlenme süresi 1 istasyondan (Havalimanı istasyonu alınan veriler kullanılmıştır.

Trafik Verisi için; 2016 yılı ocak-2023 haziran dönemini kapsayacak şekilde kent içerisinde yer alan 6 istasyondan (İST1-İstasyon No=12-67-260-21 Türbe Yolu Cad. Ayr.-Nene Hatun, İST2-İstasyon No= 12-113-260-21 Palandöken Kayakyolu Ayr.-Türbe Yolu Cad. Ayr, İST3-İstasyon No= 12-141-260-21 Atatürk Üniv. Kavşağı-Palandöken Kayakyolu Ayr., İST4-İstasyon No= 12-140-950-04 Erzurum-Bölge Eğitim Araş. Has., İST5-İstasyon No= 12-94-

950-04 Bölge Eğitim Araş. Has.-İhsan Doğramacı Bulvarı, İST6-İstasyon No= 12-139-260-21 Dadaşkent Ayr.-Atatürk Üniv. Kavşağı) alınan yıllık ortalama günlük trafik verisi (YOGT) kullanılmıştır.

Diğer veri seti olarak; yıl, ay, konum ve yükseklik bir özellikler modellere eklenmiştir. Yıl bilgisi ve ay bilgisi verilerin zamanla değişiminin bir göstergesi olarak modellere eklenmiş; konum değeri olarakda, ölçüm alınan istasyonların konumları matematiksel olarak modellere eklemiştir. Ayrıca ölçüm alınan istasyonların yükseklik değerleri (deniz seviyesinden yükseklik-rakım) de modellere eklenmiştir.

Tablo 20. Pm_{2,5} Konsantrasyonu Tahmini İçin Bağımsız Değişkenler

Veriler	Bağımsız Değişkenler
Pm ₁₀ değerleri	ThnPM10, MkzPM10, PdkPm10, AzzPM10
Gaz kirletici değerleri	AzzCO, PdkCO, ThnCO MkzSO ₂ , AzzSO ₂ , PdkSO ₂ MkzNO, AzzNO, PdkNO,, ThnNO MkzNO ₂ , AzzNO ₂ , PdkNO ₂ , ThnNO ₂ MkzNOX, AzzNOX, PdkNOX, ThnNOX MkzO ₃ , PdkO ₃
Meteorolojik parametreler	Sıcaklık, Rüzgar Hızı, Yağış, Nem, Basınç, Güneşlenme Süresi
Trafik Verisi	TrfIST1, TrfIST2, TrfIST3, TrfIST4, TrfIST5, TrfIST6
Diğer	D1(yıl), D2(ay), Konum, Yükseklik

Modelleme çalışmalarında MATLAB R2020b (MathWorks Inc., Natick, USA) programı kullanılmıştır. MATLAB veya diğer bir programlama dilinde, bu tür bir regresyon modellerini uygulamak için genellikle özel bir fonksiyon veya kütüphane kullanılır. Çalışmamızda MATLAB içerisinde yer alan Regression Learner App.uygulaması ve kütüphanesi kullanılmıştır. Modelin girdileri belirlenmiş; her bir parametre için veri setleri hazırlanmış ve modelle girilmiştir.

Tüm veriler kullanılarak bağımsız değişkenler için **322 deneme** gerçekleştirilmiştir. Kök Ortalama Kare Hatası (Root Mean Squared Error-RMSE), Ortalama Kare Hatası (Mean Squared Error-MSE), R Kare (R²) ve Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error-MAE) gibi regresyon ölçütleri kullanılarak yapılan değerlendirmeler sonucunda; optimum model performansı ve optimum bağımsız değişkenlerin yer aldığı denemeler belirlenmiştir. Daha sonra optimum modeller ve bağımsız değişkenler yardımıyla 2023 yılı ilk altı ayı için tahminler yapılmıştır.

Pm_{2,5} değerlerinin tahmin edilmesinde kullanılan makine öğrenmesi modellerinin optimum performans değerleri incelenmiştir. Araştırmanın odak noktası, farklı modellerin

Pm_{2.5} tahminindeki etkinliğini değerlendirmek ve en iyi performans gösteren modeli belirlemek üzerine kurulmuştur. İlk olarak, kullanılan modellerin eğitim süreçlerinde elde edilen performans metrikleri gözden geçirilmiştir. Mean Absolute Error (MAE), Root Mean Squared Error (RMSE), ve R-squared (R^2) gibi yaygın ölçütler, modellerin tahmin yeteneklerini değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır. Modellerin eğitim aşamasındaki bu değerlendirmeler, her bir modelin başlangıç performansını ortaya koymuştur. Daha sonra, modellerin test verileri üzerindeki performansları detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Test verilerinde elde edilen MAE, RMSE ve R-squared (R^2) değerleri, modellerin genelleme yeteneklerini ve gerçek dünya verileriyle ne kadar uyumlu olduklarını göstermiştir. Bu değerlendirmeler, modellerin tahminlerinin ne kadar doğru ve güvenilir olduğunu belirleme konusunda kritik bir rol oynamıştır.

Hava kirliliği sensör füzyonu, çeşitli sensörlerin kullanılarak hava kalitesi ile ilgili verilerin entegrasyonu ve analizini ifade eder. Bu süreç, farklı sensör türlerinin ölçtüğü çeşitli hava kirliliği parametrelerini birleştirerek daha kapsamlı ve güvenilir bir hava kalitesi değerlendirmesi sağlamayı amaçlar.

Örneğin, bir bölgedeki hava kalitesini değerlendirmek için kullanılan sensörler arasında partikül madde sensörleri, gaz sensörleri ve meteorolojik sensörler bulunabilir. Her bir sensör, belirli bir parametreyi ölçer; partikül sensörleri havadaki toz ve partikül madde miktarını, gaz sensörleri belirli kirleticilerin konsantrasyonlarını, meteorolojik sensörler ise hava sıcaklığı, nem ve rüzgar hızı gibi atmosferik koşulları ler. Sensör füzyonu, bu sensörlerden gelen verileri entegre ederek hava kalitesi durumu hakkında daha kapsamlı bir resim sunar. Bu entegrasyon, farklı sensörlerin güçlü yanlarını birleştirerek doğruluk düzeyini artırabilir ve tek bir sensörün ölçüm hatalarını telafi edebilir. Sonuç olarak, hava kirliliği sensör füzyonu, daha güvenilir hava kalitesi analizleri ve karar destek sistemleri için temel oluşturur.

Pm_{2.5} değerlerinin tahmin edilmesinde kullanılan makine öğrenmesi modellerinin optimum performans değerleri incelenmiştir. Araştırmanın odak noktası, farklı modellerin Pm_{2.5} tahminindeki etkinliğini değerlendirmek ve en iyi performans gösteren modeli belirlemek üzerine kurulmuştur.

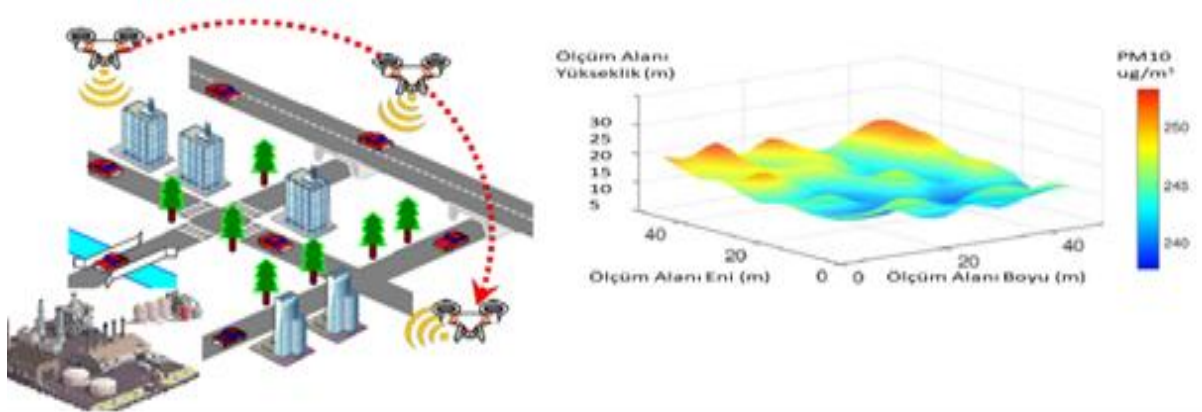
İlk olarak, kullanılan modellerin eğitim süreçlerinde elde edilen performans metrikleri gözden geçirilmiştir. Mean Absolute Error (MAE), Root Mean Squared Error (RMSE), ve R-squared (R^2) gibi yaygın ölçütler, modellerin tahmin yeteneklerini değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır. Modellerin eğitim aşamasındaki bu değerlendirmeler, her bir modelin başlangıç performansını ortaya koymuştur. Daha sonra, modellerin test verileri üzerindeki performansları detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Test verilerinde elde edilen MAE, RMSE ve R-squared (R^2)

değerleri, modellerin genelleme yeteneklerini ve gerçek dünya verileriyle ne kadar uyumlu olduklarını göstermiştir. Bu değerlendirmeler, modellerin tahminlerinin ne kadar doğru ve güvenilir olduğunu belirleme konusunda kritik bir rol oynamıştır.

Optimum modelin belirlenmesi için, farklı hiperparametre ayarları ve özellik kombinasyonlarıyla gerçekleştirilen deneme-yanılma süreçleri de ele alınmıştır. Bu süreçler, modellerin performansını maksimize etmek ve en iyi sonuçları elde etmek için yapılmıştır. En iyi modelin seçilmesinde, hem eğitim hem de test verileri üzerinde elde edilen performans değerleri dikkate alınmıştır.

Drona Entegre Hava Kalitesi Ölçüm Cihazının Tasarımı

Tasarladığımız drona entegre hava kalitesi ölçüm ünitesi; Hava Kalitesi İzleme Ağı ismini verdiğimiz genel sistemin bir parçası olup, kent içerisinde istenilen alanlardan üç boyutlu hava kirletici verilerinin alınmasına olanak sağlamaktadır. Prototip hava kalitesi ölçüm ünitesi genel akış diyagramı Şekil 22’de detaylı olarak verilmiştir.

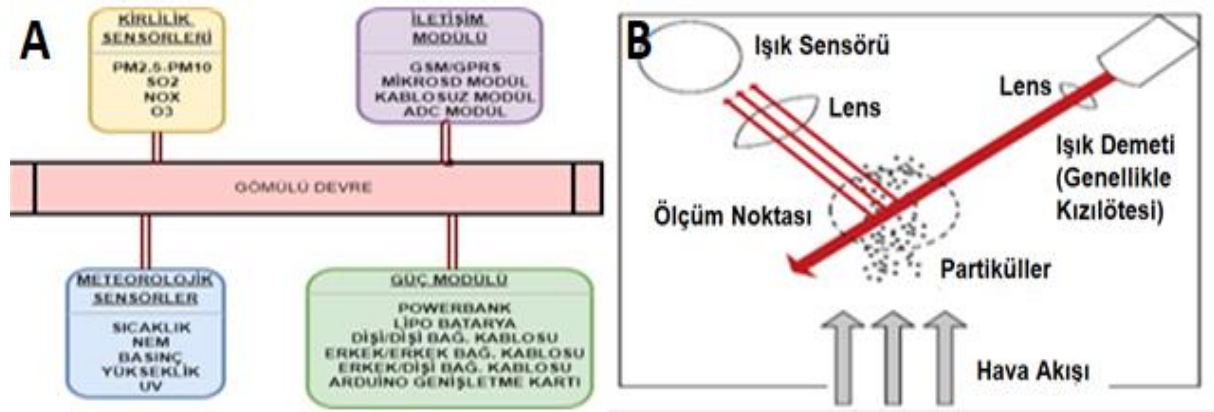


Şekil 22. Sistemin genel diyagramı, ölçüm alanında planlanan 3-boyutlu ölçüm ve modelleme örneği

Tasarladığımız mobil ölçüm ünitesi; Hava kalitesi verilerini ölçümleyen modül ve bu modülün entegre edileceği dron dan oluşmaktadır. Tasarladığımız ünitemiz, ana gömülü devreye kolaylıkla entegre edilebilecek bazı temel hava kirleticileri ölçüm sensörlerini ve atmosfer parametrelerini ölçen sensörleri içermektedir. Bu nedenle ana gövdeye ihtiyaca göre kolaylıkla takılıp çıkarılabilen sensör bağlantıları tasarlanmıştır.

Tasarlanan hava kalitesi ölçüm ünitesi ile, dış atmosfer ortamında (outdoor) belirli bir alanda hava kirleticilerinin miktarları belirleyecektir. Kent içerisinde, dış ortam havasında. SO₂, NO₂, O₃, Pm/Pm_{2,5}- Pm₁₀ ve meteorolojik parametrelerin (sıcaklık, nem, basınç, yükseklik, UV) ölçülmesi planlanmaktadır. Ölçüm ünitesinde kullanılacak sensörler, ölçüm aralıkları ve özellikleri Tablo 21’de detaylı olarak verilmiştir. İletişim modülü olarak GSM/GPRS modülü,

kablosuz modül (Wi-Fi) ve veri yedeklemek amacıyla microSD modülü kullanılacaktır. Güç kaynağı olarak kullanışlı olması açısından bir powerbank kullanılırken, üniteye yedek batarya olarak ekstra bir Lipo batarya bulunacaktır (Şekil 23A). Tüm sensörler ve gömülü devre, 220X150X85 mm plastik bir kutu içerisine yerleştirilecektir. Tasarladığımız ölçüm ünitesi; üniversitemiz bünyesindeki teknokentte yer alan firmalar ve üniversitemizin Bilgisayar Mühendisliği-Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümleri öğretim üyeleri ile görüşülerek; tecrübelerinden yararlanılarak hazırlanmıştır. Ayrıca projenin ilerleyen aşamalarında alanında deneyimli firmalardan hizmet alımı da yapılacaktır.



Şekil 23. Hava kalitesi ölçüm modülünün basitleştirilmiş genel diyagramı (A) ve Pm konsantrasyonunu algılamak için ışık saçılım yöntemi diyagramı (B) (Gao vd., 2016)

Ölçüm için kullanacağımız sensörlerin ölçüm yöntemi hakkında kısaca bilgi vermek gerekirse; Pm ölçümü için kullanacağımız sensörler lazer parçacık ölçüm yöntemi kullanmaktadır. Bu yöntemde; tarama alanındaki parçacıklar lazer saçılım ile algılanır. Yani havada asılı parçacıkları yaymak için lazer kullanarak saçılma üretilir, daha sonra saçılan ışık belirli bir derecede toplanır ve sonunda zamanla saçılan ışık değişimi eğrisini elde edilir ve mikrokontrolcü/bilgisayara iletilir. Sonuç olarak, birim hacimdeki eşdeğer parçacık çapı ve farklı çaptaki parçacık sayısı hesaplanabilir (Şekil 23B) (Gao vd., 2016). Gazların ölçümü için kullanılan sensörler ise elektrokimyasal ölçüm yöntemini kullanmaktadır. Bu yöntem; sisteminin algılayıcısı olan yarı iletken metalik oksitlere dayanır. Bir gaz ile etkileşim giren SMO üzerinde değişiklikler meydana gelir ve elektronik yük yoğunluğu oluşarak yük hareketliliğindeki değişiklikler hesaplanarak ölçüm yapılır (Cretescu vd., 2017). Atmosfer koşullarının ölçümünde kullanılan sensörler ise ortam şartlarının değişiminden etkilene iletkenlerin akım değişimini değiştirmesi ile ölçüm yöntemini kullanmaktadır.

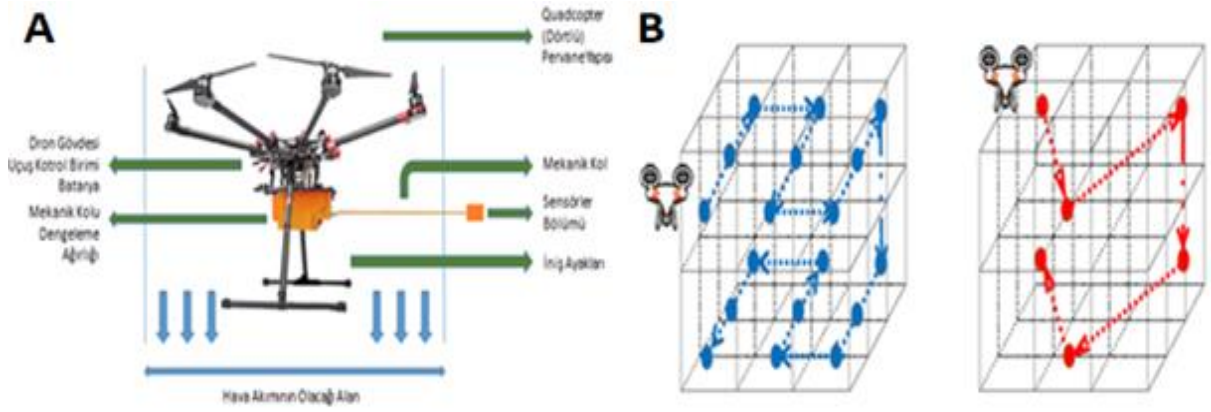
Tablo 21. Ölçüm Ünitesinde Kullanılan Sensörler ve Özellikleri

SENSÖR	ÖLÇÜM ARALIĞI	ÖZELLİKLER
Pm_{2.5}-Pm₁₀ Sensörü	0.0-999.9 ug/m ³	Lazer parçacık ölçüm yöntemi kullanmaktadır. Dijital çıkışa sahip Arduino ve diğer geliştirme kartları ile uyumlu
Kükürtdioksit Sensörü	0 -20 ppm max 150 ppm	Elektrokimyasal ölçüm yöntemi kullanmaktadır Arduino ve diğer geliştirme kartları ile uyumlu Çalışma sıcaklığı: -20 °C- 40 °C'
NO₂ Gaz Sensörü	0.05 – 10 ppm	Elektrokimyasal ölçüm yöntemi kullanmaktadır Arduino ve diğer geliştirme kartları ile uyumlu Çalışma ortamı sıcaklığı: -30 - 85°C
O₃ Sensörü	10-1000 ppb	Elektrokimyasal ölçüm yöntemi kullanmaktadır Arduino ve diğer geliştirme kartları ile uyumlu
Sıcaklık ve Nem Sensörü	Sıcaklık ölçüm aralığı: -40°C - 80°C Nem ölçüm aralığı: %0-100 RH	Ortam şartlarını kullanarak ölçüm alınmaktadır. Ölçüm doğruluğu: 0.5°C Bağıl nem ölçüm doğruluğu: %2.0 RH (Relative humidity- Bağıl Nem)
Basınç-Yükseklik Sensörü	260-1260 mbar (26-126 kPa)	Ortam şartlarını kullanarak ölçüm alınmaktadır. Arduino ve diğer geliştirme kartları ile uyumlu
UV-Algilama Sensörü	240-370 nm (nanometre)	Ortam şartlarını kullanarak ölçüm alınmaktadır. Arduino ve diğer geliştirme kartları ile uyumlu

İnsansız hava araçları dünyada ve Türkiye’de son yıllarda gelişme göstererek havacılıkta önemli bir aşamaya gelmiştir. insansız hava araçları içerisinde özellikle dönerkanatlar yani dronlar çok çeşitli versiyonları, kullanım kolaylığı ve yaygınlıkları ile gelecekte önemli hava araçları içerisinde yer alacaktır. Ülkemizde başlayan **yerli ve milli** savunma sanayi hamlesi ile birçok önemli uçan savunma aracı tasarlanmış ve üretilmiştir. Buradan hareketle insansız hava araçlarının gelecekte pek çok alanda kullanılacağı ve özellikle “Akıllı Kentlerde” kirlilik ölçümünde kullanılabileceği öngörülmüştür. Dronumuzun tüm tasarım süreci üniversitemiz bünyesindeki dron takımları ile görüşülerek tamamlanmıştır.

Tasarladığımız dronumuzunun sorunsuz bir şekilde uçuş gerçekleştirebilmesi için Ardupilot uçuş control kartına ihtiyacı vardır. Ardupilot yer istasyonu ile bütünleşik çalışabilen açık kaynak kodlu kontrol kartıdır. En büyük seçim etmeni; kalibrasyonları kolay basit bir arayüz sunması, birçok ekipmanla sorunsuz uyum sağlaması ve konu ile ilgili bolca kaynağın bulunmasıdır. Ayrıca geliştirme aşaması devam ederken dronumuza uygun otoplot sistemi de eklenebilecektir. Dronumuzun sorunsuz bir şekilde tüm hava koşullarında uçabilmesini sağlayacak dayanıklı bir gövde tasarımı yapılmıştır. Uçuş pervaneleri olarak DC fırçasız motor ve plastik pervane kullanılmıştır. Dronda 4 adet 980 KV multirotor fırçasız drone motoru kullanılmaktadır ve bunların her biri 40 A ESC fırçasız motor sürücü modülüne bağlıdır. Teknik veri tablosu incelenip, gerekli hesaplamalar yapılarak bu motorun seçimine karar verilmiştir

Uçuş esnasında dron ile haberleşmemiz Uzun Menzilli Radyo Telemetry Seti ile sağlayacaktır. Bu ekipman bize; uzaktan irtifa durumu, kalibrasyon, anlık konum bilgisi gibi verileri iletecektir. Drone için gerekli güç hesabı, batarya kapasitesinin belirlenmesi gibi değerler hesaplanarak en iyi uçuş performansını sağlanması amacıyla 14,8 Volt, 5200 mAh 65C – 4S Lipo Batarya kullanılacaktır. Dron üzerine bir “Mekanik Kol” eklenmiştir ve ölçüm yapacak sensörler; dronun hava akımının olacağı alanın dışına uzatılacak şekilde yer alacaktır. “Mekanik Kolu” dengelemek için dronun arka bölümüne bu kol ile eşit ağırlıkta bir dengeleme ağırlığı eklenecektir (Şekil 23A). Dronların hava akım alanı, kullanılan dronun boyutlarına ve tasarımına göre değiştiği yapılan pek çok araştırmada ortaya konmuştur. Genellikle, dronların pervane çapları 10 -30 cm arasında değişebilmektedir ve buna bağlı olarak ta pervanelerin dönüş hızları ve hava akım alanları da değişiklik göstermektedir. Dronların hava akım alanının, genellikle dronun pervanelerinin döndüğü düzlemde daha yoğun olduğu ancak, hava akımının dronun hızına, yönüne ve çevresel faktörlere de (rüzgâr hızı ve yönü gibi) bağlı olarak değişebildiği bilinmektedir. Dronların hava akım alanı, kullanım amaçlarına göre de farklılık gösterebilir. Örneğin, dronların hava fotoğrafçılığı veya videografi için kullanılması ya da üzerinde bir ölçüm sistemi ile ölçüm yapması durumunda, pervanelerin hava akımı en aza indirilerek mümkün olduğunca sessiz ve hava akımından etkilenmeyen uçuş sağlanmaya çalışılır. Böylece, pervanelerin oluşturduğu hava akımının görüntü ya da ölçüm kalitesini düşürmesi engellenmiş olur (Villa *et al.* 2016; Do *et al.* 2020). McKinney ve ekibi tarafından (2019), pervane boyutunun hava akımı üzerindeki etkisine dair yapılan bir araştırmada; farklı pervane boyutlarına sahip dronlar kullanılarak ölçümler yapılmış ve 8 inç (20 cm) pervanelerle donatılmış bir dronun hava akım alanının 1.2 metrekare, 10 inç (24.5cm) pervanelerle donatılmış bir dronun hava akım alanının 1.7 metrekare ve 12 inç (30.48cm) pervanelerle donatılmış bir dronun hava akım alanının 2.4 metrekare olduğu bulunmuştur. Bu sonuçlar, pervane boyutunun hava akım alanı üzerinde etkisi olduğunu net bir şekilde ortaya koymuştur. Bu bağlamda projede; hava kalitesi ölçümü için tüm kriterler göz önüne alınarak bir tasarım yapılmış ve hava akımının minimum seviyede tutulmasına yönelik olarak bir dron tasarlanmıştır. Özellikle projemizde yer alan dronun tasarımında; hava kalitesi ölçümü gibi hassas bir uygulama yapabilmek için; dronun pervane hızları, pervane motorlarının gücü ve konumları, proje ölçüm esaslarına uygun olarak planlanıp olası olumsuzluklardan asgari seviyede etkilenecek şekilde tasarım yapılmıştır. Yukarıda sunulan literatür verileri de dikkate alındığında, bu projede kullanacağımız pervanelerin uzunluğu yaklaşık 25 cm (9,8 inç); pervanelerin oluşturacağı hava akım alanının ise yaklaşık 1,73 metrekare olacağı öngörülebilir. Böylece tasarlanan mekanik kol yardımıyla ölçüm sensörlerinin, dronun pervanelerinin oluşturacağı hava akım alanından etkilenmeyecek şekilde tasarlandığı söylenebilir.



Şekil 24. Drona entegre hava kalitesi ölçüm ünitesinin (A) genel görüntüsü ve (B) Tam izleme ölçüm/seçici izleme ölçüm

Bazı teknik özellikler aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

Drone Ünitesi ile İletişim: Ünite, eşzamanlı GPRS ve WIFI iletişim özellikleriyle geliştirilmiştir. GPRS, yeni bulut sunucu tabanlı Drone Bilgi Yönetim Sistemi Arayüzü (DBYS) veri göndermek için kullanılır. Güvenli çevrimiçi sistemimiz, drone hava kalitesi ölçüm sistemini uzaktan izlemenize, kontrol etmenize, toplanan verileri depolamanıza ve işlemenize olanak tanımaktadır. Boyutlar: Dronumuz, döner kanatlar hariç 190X320X265 mm ölçülerindedir. Örneklem Hızı: Saniyede 1 ile dakikada 1 arasında ayarlanabilir. Örneklem Süresi: Uçuş süresiyle eş zamanlı olarak yaklaşık 15 dk dır. Güç Tüketimi: Tam pil dolumu 2,5-4 saat ve uçuş süresi yaklaşık 15 dk dır. Uçuş Süresi: Drone pil ömrüne bağlı olarak yaklaşık 15 dk dır. Ağırlık: Yaklaşık 2626 gramdır. (Ölçüm ünitesi<1000 gr-Dron yaklaşık 1626gr)

Drona Entegre Hava Kalitesi Ölçüm Ünitesi, yer seviyesinden 30 (biri metre aralıklar-birer m3 hayali hacimlerin orta noktalarından) metreye kadar yüksekliklerde ortam havasını analiz etmek için kullanılacaktır. Bu yükseklikler Erzurum kentinin genelde yatay yapılaşması, maliyet (daha iyi dronlar için maliyetin artması) ve dronun uçuş güvenliği için, üniversitemiz bünyesindeki profesyonel dron takımları ile görüşülerek belirlenmiştir. Dron içerisine yapılacak bir kodlama ile üç boyutlu alansal ölçümlemede “Tam İzleme Ölçüm” ve “Seçici İzleme Ölçüm” yapılabilecektir (Şekil 24B). Dron tasarımıımızın performans parametreleri yaklaşık olarak hesaplanarak aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 22. Tasarımımızın Yaklaşık Olarak Belirlenen Uçuş Performans Parametreleri

ÖZELLİK	DEĞER
Dolu batarya ile uçuş süresi:	12 dakika
Batarya tam dolma süresi:	180 dk
Maksimum yük taşıma kapasitesi	2000 gramdan az
Uçuş yüksekliği	30 metre
Gövde genişliği	540-560 mm

Bu aşamada tasarımsal olarak dron (İHA-0) ölçüm ünitesinin ağırlık ve denge tablosu oluşturulmuştur. Tablo 23’de drone hava kalitesi ölçüm ünitesine ait ağırlık bilgileri verilmektedir.

Tablo 23. Drone Parçaları ve Tahmini Ağırlık Tablosu

No	Parça Adı	Ağırlık (gram)	Adet	Toplam Ağırlık (gram)
1	Uçuş Kontrol Sistemi	250	1	250
2	980KV CW/CCW Aksesuarlı Drone Motoru	49	6	294
3	20 A ESC - Fırçasız Motor Sürücü Modülü	19	6	114
4	Plastik CW/CCW Pervane	10.5	6	63
5	11.1 V 3S Lipo Batarya 10000 mAh 35C	400	1	400
6	F550 Quadcopter Frame Gövdesi	405	1	405
7	Kamera (opsiyonel)	100	1	100
8	Tasarlanacak olan Hava Kalitesi Ölçüm Ünitesi	1000 den az	1	1000
TOPLAM				2626

Ölçüm ünitelerinin verimli bir şekilde çalışmasını ve dron ile entegrasyonunu sağlayacak yazılım tamamlanmıştır. Hava kalitesi ölçüm ünitesi içerisinde yer alan sensörlerin yazılımları ve kalibrasyonları yapılmıştır. Dış atmosfer analizlerinin yapılması aşamasında; öncelikle Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü İnsansız Hava Aracı Kayıt Sistemine üye olunmuş gerekli izinler alınmıştır. Sisteminden gerekli izinler alınarak öncelikle Atatürk Üniversitesi bünyesinde yerleşimin olmadığı Teknokent ve spor sahasında 4 gün olarak yapılacaktır. Deneme uçuşlarının yapılmasındaki esas amaç imal edilen dronun dengeli bir şekilde uçuşmasının veri aktarımının doğru bir şekilde yapılmasının sağlanması iken verilerin doğruluğu ve güvenilirliğinin testleri hava kalitesi ölçüm ünitelerinin yakınında alınan ölçümler ile kontrol edilecektir. Kent içerisinde yapılacak uçuşlar için İnsansız Hava Aracı Kayıt Sisteminden gerekli izinler alınacaktır. Deneme uçuşlarından sonra; yapacağımız çalışmada; ilkbahar–yaz bir periyot (iki ay en az 30 gün), sonbahar-kış bir periyot (iki ay en az 30 gün) olmak üzere toplamda iki periyotluk süreçte, Erzurum kent merkezinde iki örnekleme noktasında (Atatürk Üniversitesi kampüsü spor sahası ve Palandöken istasyonu çevresinde) çalışma koşullarına (beklenmeyen hava koşulları haricinde) göre her iki örnekleme noktasında günde üç kez (birinci örnekleme noktasında 8-12-17 saatlerinde ve ikinci örnekleme noktasında 9-13-16 saatlerinde) ve ölçüm noktasında üç tekrarlı olacak şekilde toplam 1440 ölçüm alınacaktır. Her iki örnekleme alanında 40 m-40 m alanda 30 m yükseklikte her bir m³ hava hacminin orta noktalarından birer ölçüm alacak şekilde yapılacaktır.

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Verilerin İstatistik Analizi

Hava kalitesi verileri

Kent merkezinde yer alan istasyonlardan alınan Pm (Pm₁₀-Pm_{2,5}) ve gaz (SO₂, NO, NO₂, NO_x, CO, O₃) verileri detaylı olarak incelenmiştir. Erzurum kent merkezi atmosferindeki veriler detaylı incelenerek hava kalitesini etkileyen temel kirletici parametreler için maksimum-minimum-ortalama değerler ve ölçümlenen toplam veri sayısı Tablo 24’de sunulmuştur.

Tablo 24. Hava Kirleticilerinin İstatistiksel Özellikleri

İstasyon No / İstasyon Adı	Parametre (µg/m ³)	Minimum Değer/ Minimum Değerin Olduğu Tarih	Maksimum Değer/Maksimum Değerin Olduğu Tarih	Ortalama Değer	Veri Adeti	Olmaması Gereken Veri	Data Yüzdesi	Standart Sapma
İstasyon 1 Aziziye	Pm ₁₀	3.93 23.08.2020	414.03 20.12.2016	52.75	2027	2120	95.61	46.82
İstasyon 1 Aziziye	SO ₂	1.46 15.08.2020	111.65 22.01.2019	14.28	1957	2150	90,9	16,67
İstasyon 1 Aziziye	NO _x	4,33 24.04.2020	314,88 20.12.2016	50,93	2032	2150	94,43	41,86
İstasyon 1 Aziziye	NO ₂	3,08 24.04.2020	158,57 20.12.2016	34,83	2032	2150	94,43	23,23
İstasyon 1 Aziziye	NO	0,59 17.07.2016	166,03 13.12.2017	14,72	2722	2896	93,99	21,18
İstasyon 1 Aziziye	CO	123,89 14.01.2016	3801,55 20.12.2016	721,53	2074	2150	96,42	551,95
İstasyon 2 Taşhan	Pm ₁₀	7.79 24.05.2020	394.36 16.01.2017	68.44	2020	2122	95.19	51.00
İstasyon 2 Taşhan	Pm _{2,5}	4.79 24.04.2020	549.30 20.12.2016	44.22	1985	2122	93.54	48.67
İstasyon 2 Taşhan	CO	139,99 11.04.2021	8212,63 20.12.2016	1363,75	2056	2152	95,48	1014
İstasyon 2 Taşhan	NO _x	6,05 24.05.2020	560,84 13.12.2017	114,8	2085	2152	96,84	77,17
İstasyon 2 Taşhan	NO ₂	4,87 24.05.2020	202,76 4.02.2016	60,12	2084	2152	96,8	28,49
İstasyon 2 Taşhan	NO	1,01 19.04.2020	386,65 13.12.2017	52,55	2819	2898	97,27	42,68
İstasyon 3 Merkez	Pm ₁₀	1.89 4.10.2013	572.29 13.03.2012	43.67	3261	3956	82.43	39.55
İstasyon 3 Merkez	SO ₂	0,51 30.04.2014	136,63 25.11.2015	11,43	3442	3986	86,25	14,29

Tablo 24. (devamı)

İstasyon 3	NO_x	8,7	418,98	81,09	1901	3986	47,3	58,21
Merkez		23.05.2021	20.01.2019					
İstasyon 3	NO₂	6,41	187	52,41	1903	3986	47,35	26,19
Merkez		20.07.2019	22.01.2019					
İstasyon 3	NO	0,58	239,87	28,61	2602	2906	89,54	35,21
Merkez		9.08.2016	4.12.2021					
İstasyon 3	O₃	4,24	140,2	46,16	2006	3986	49,95	24,98
Merkez		3.01.2017	21.07.2019					
İstasyon 4	Pm₁₀	2,13	265,91	27,09	1772	2124	83,43	18,32
Palandöken		21.05.2017	21.12.2017					
İstasyon 4	SO₂	1,07	43,93	6,71	1932	2154	89,55	4,19
Palandöken		18.11.2016	12.02.2016					
İstasyon 4	NO_x	1,42	113,61	16,64	1848	2154	85,59	12,53
Palandöken		13.07.2016	19.12.2016					
İstasyon 4	NO₂	1,32	93,45	13,08	1848	2154	85,59	10,64
Palandöken		13.07.2016	19.12.2016					
İstasyon 4	NO	0,10	25,27	3,66	2570	2900	88,62	2,59
Palandöken		17.07.2016	11.01.2019					
İstasyon 4	CO	45,98	1167,68	382,64	1946	2154	90,21	144,97
Palandöken		24.12.2020	11.01.2019					
İstasyon 4	O₃	23,89	155,05	91,57	1950	2154	90,4	18,55
Palandöken		3.12.2018	4.07.2017					
İstasyon 5	Pm₁₀	1,92	260,59	23,15	1603	2119	75,65	19,29
Pasinler		23.11.2020	21.12.2017					
İstasyon 5	SO₂	0,28	19,89	5,89	1594	2149	74	3,5
Pasinler		2.06.2021	12.01.2018					
İstasyon 5	NO_x	2,04	96,1	9,99	1401	2149	64,89	10,2
Pasinler		25.01.2016	8.07.2021					
İstasyon 5	NO₂	0,8	92,9	8,56	1370	2149	63,43	10,21
Pasinler		17.03.2018	8.07.2021					
İstasyon 5	NO	0,10	7,21	1,89	1941	2895	67,05	1,64
Pasinler		11.03.2016	06.12.2018					
İstasyon 5	O₃	19,33	167,85	82,63	1770	2149	82,35	24,69
Pasinler		7.06.2021	21.02.2017					

Süreç içerisinde toplanan hava kalitesi verilerine göre;

Pm₁₀ için minimum değer **1,92** µg/m³ olarak istasyon 5’de (Pasinler) 23.11.2020 tarihinde ölçülmüştür. Bu veri; kent merkezinden 40 km uzakta ana faaliyeti tarım olan kırsal bir alanda kış periyodunda ölçülmüştür. **Pm₁₀** için maksimum değer **307,99** µg/m³ ile istasyon 2’de (Taşhan) 20.12.2019 tarihinde ölçülmüştür. Bu istasyon kent merkezinin tam orta noktasında ticari-konut-trafik yoğunluğunun en üst düzeyde olduğu bir bölgede yer almaktadır ve ölçülen bu maksimum değer ısınma kaynaklı hava kirliliğinin en fazla olduğu kış

periyodunda ölçülmüştür. **Pm₁₀** için istasyonları *en düşük ortalama değere* göre sıralayacak olursak; $\mu\text{g}/\text{m}^3$ cinsinden, **23,88** (İstasyon 5) < **28,53** (İstasyon 4) < **37,34** (İstasyon 1) < **39,80** (İstasyon 3) < **57,33** (İstasyon 2) şeklinde sıralanmaktadır. Sıralamaya göre Pm₁₀ ortalama değerlerine bakıldığında; en düşük veriye sahip istasyon 5'i (kırsal) hariç tuttuğumuzda, palandöken dağından itibaren rakım farkı düştükçe Pm₁₀ kirlilik seviyesinin arttığı net bir şekilde gözlemlenmektedir.

Pm_{2,5} için ise daha öncede vurguladığımız üzere tek bir istasyon ölçümü söz konusu olup; minimum değer **4,79** $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ile 24.04.2020 tarihinde bahar periyodunda ve maksimum değer **266,91** $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ile 19.12.2019 tarihinde kış periyodunda istasyon 2'de (Taşhan) ölçülmüştür. Veriler arasındaki gözlenen (aynı istasyon olmasına rağmen) bu ciddi fark, 2019 yılında pandeminin çok yoğun yaşanmayıp insan faaliyet ve ihtiyaçlardan dolayı oluşan kirliliği, 2020 yılının post pandemi sürecinden dolayı insani faaliyetlerin kısıtlandığı dönemi net bir şekilde yansıttığını söyleyebiliriz.

Yine Tablo 24'de görüleceği üzere toplanan verilere göre;

SO₂ için *minimum değer* **0,51** $\mu\text{g}/\text{m}^3$ olarak istasyon 3'de (Merkez) 30.04.2014 tarihinde ölçülmüştür. Bu veri; kent merkezinde kentsel bir alanda bahar periyodunda ölçülmüştür. **SO₂** için *maksimum değer* **136,63** $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ile istasyon 3'de (Merkez) 25.11.2015 tarihinde ölçülmüştür. Bu istasyon kent merkezinin tam orta noktasında ticari-konut-trafik yoğunluğunun en üst düzeyde olduğu bir bölgede yer almaktadır ve ölçülen bu maksimum değer ısınma kaynaklı hava kirliliğinin en fazla olduğu kış periyodunda ölçülmüştür. **SO₂** için istasyonları *en düşük ortalama değere* göre sıralayacak olursak; $\mu\text{g}/\text{m}^3$ cinsinden, **5,89** (İstasyon 5) < **6,71** (İstasyon 4) < **11,43** (İstasyon 3) < **14,28** (İstasyon 1) şeklinde sıralanmaktadır. İstasyon 2'de SO₂ verisi ölçülmemiştir. Sıralamaya göre SO₂ ortalama değerlerine bakıldığında; en düşük veriye sahip istasyon 5'i (kırsal) hariç tuttuğumuzda, palandöken dağından itibaren kod farkı düştükçe SO₂ kirlilik seviyesinin arttığı net bir şekilde gözlemlenmektedir.

NO_x için *minimum değer* **1,42** $\mu\text{g}/\text{m}^3$ olarak istasyon 4'de (Palandöken) 13.07.2016 tarihinde ölçülmüştür. Bu veri; kent merkezinde yarı kentsel bir alanda yaz periyodunda ölçülmüştür. **NO_x** için *maksimum değer* **560,84** $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ile istasyon 2'de (Taşhan) 13.12.2017 tarihinde ölçülmüştür. Bu istasyon kent merkezinin tam orta noktasında ticari-konut-trafik yoğunluğunun en üst düzeyde olduğu bir bölgede yer almaktadır ve ölçülen bu maksimum değer ısınma kaynaklı hava kirliliğinin en fazla olduğu kış periyodunda ölçülmüştür. **NO_x** için istasyonları *en düşük ortalama değere* göre sıralayacak olursak; $\mu\text{g}/\text{m}^3$ cinsinden, **9,99** (İstasyon 5) < **16,64** (İstasyon 4) < **50,93** (İstasyon 1) < **81,09** (İstasyon

3) < **114,8** (İstasyon 2) şeklinde sıralanmaktadır. Sıralamaya göre NO_x ortalama değerlerine bakıldığında; en düşük veriye sahip istasyon 5'i (kırsal) hariç tuttuğumuzda, NO_x kirlilik seviyesinin trafiğin arttığı alanlarda arttığı net bir şekilde gözlemlenmektedir.

NO için minimum değer 0,10 µg/m³ olarak istasyon 4'de (Palandöken) 17.07.2016 tarihinde ve istasyon 5'de (Pasinler) 11.03.2016 tarihinde ölçülmüştür. Bu veri; kent merkezinden yaklaşık 40 km uzaklıkta referans noktası olarak alınabilecek kırsal bir alanda yaz periyodunda ölçülmüştür. **NO için maksimum değer 386,65** µg/m³ ile istasyon 2'de (Taşhan) 13.12.2017 tarihinde ölçülmüştür. Bu istasyon kent merkezinin tam orta noktasında trafik yoğunluğunun en üst düzeyde olduğu bir bölgede yer almaktadır. **NO için istasyonları en düşük ortalama değerden en yüksek ortalama değere** göre sıralayacak olursak; µg/m³ cinsinden, **1,89** (İstasyon 5) < **3,66** (İstasyon 4) < 14,72 (İstasyon 1) < **28,61** (İstasyon 3) < **52,55** (İstasyon 2) şeklinde sıralanmaktadır. Sıralamaya göre NO ortalama değerlerine bakıldığında; en düşük veriye sahip istasyon 5'i (kırsal) hariç tuttuğumuzda, NO kirlilik seviyesinin trafik emisyonların arttığı alanlarda arttığı net bir şekilde gözlemlenmektedir.

NO₂ için minimum değer 0,8 µg/m³ olarak istasyon 5'de (Pasinler) 17.03.2018 tarihinde ölçülmüştür. Bu veri; kent merkezinden yaklaşık 40 km uzaklıkta referans noktası olarak alınabilecek kırsal bir alanda bahar periyodunda ölçülmüştür. **NO₂ için maksimum değer 202,76** µg/m³ ile istasyon 2'de (Taşhan) 4.02.2016 tarihinde ölçülmüştür. Bu istasyon kent merkezinin tam orta noktasında ticari-konut-trafik yoğunluğunun en üst düzeyde olduğu bir bölgede yer almaktadır ve ölçülen bu maksimum değer ısınma kaynaklı hava kirliliğinin en fazla olduğu kış periyodunda ölçülmüştür. **NO₂ için istasyonları en düşük ortalama değerden en yüksek ortalama değere** göre sıralayacak olursak; µg/m³ cinsinden, **8,56** (İstasyon 5) < **13,08** (İstasyon 4) < **52,41** (İstasyon 3) < **34,83** (İstasyon 1) < **60,12** (İstasyon 2) şeklinde sıralanmaktadır. Sıralamaya göre NO₂ ortalama değerlerine bakıldığında; en düşük veriye sahip istasyon 5'i (kırsal) hariç tuttuğumuzda, NO₂ kirlilik seviyesinin trafiğin ve kentsel emisyonların arttığı alanlarda arttığı net bir şekilde gözlemlenmektedir.

CO için minimum değer 45,98 µg/m³ olarak istasyon 4'de (Palandöken) 24.12.2020 tarihinde ölçülmüştür. Bu veri; kent merkezinde en yüksek noktaya konuşlanmış istasyonda yarı kentsel bir alanda ölçülmüştür. **CO için maksimum değer 8212,63** µg/m³ ile istasyon 2'de (Taşhan) 20.12.2016 tarihinde ölçülmüştür. Bu istasyon kent merkezinin tam orta noktasında ticari-konut-trafik yoğunluğunun en üst düzeyde olduğu bir bölgede yer almaktadır ve ölçülen bu maksimum değer ısınma kaynaklı hava kirliliğinin en fazla olduğu kış periyodunda ölçülmüştür. **CO için istasyonları en düşük ortalama değerden en yüksek ortalama değere** göre sıralayacak olursak; µg/m³ cinsinden, **382,64** (İstasyon 4) < **721,53** (İstasyon 1) < **1363,75**

(İstasyon 2) şeklinde sıralanmaktadır. İstasyon 3 ve istasyon 5’de CO verisi alınmamaktadır. Sıralamaya göre CO ortalama değerlerine bakıldığında; CO kirlilik seviyesinin kış periyodunda kentsel emisyonların arttığı alanlarda arttığı net bir şekilde gözlemlenmektedir.

O₃ için minimum değer 4,24 µg/m³ olarak istasyon 3’de (Merkez) 3.01.2017 tarihinde ölçülmüştür. Bu veri; kent merkezinde kentsel bir alanda kış periyodunda ölçülmüştür. **O₃ için maksimum değer 167,85 µg/m³** ile istasyon 5’de (Pasinler) 21.02.2017 tarihinde ölçülmüştür. Ölçülen bu maksimum değer ısınma kaynaklı hava kirliliğinin en fazla olduğu kış periyodunda ölçülmüştür. **O₃ için istasyonları en düşük ortalama değerden en yüksek ortalama değere göre** sıralayacak olursak; µg/m³ cinsinden, **82,63 (İstasyon 5) < 91,57 (İstasyon 4) < 46,16 (İstasyon 3)** şeklinde sıralanmaktadır. İstasyon 1 ve 2’de O₃ verisi ölçülmemiştir.

Detaylı olarak incelenen yıllar içerisinde 2020 yılı ayrı bir öneme sahiptir. 2020 yılında Çin’de ortaya çıkan ve küresel bir salgın haline gelen COVID-19 virüsü, insan sağlığını ölümcül şekilde etkilemektedir. Virüsün ortaya çıkışı ve pandemi döneminde dünya genelinde birçok önlem ve tedbir alınmıştır. Bu önlemler arasında endüstriyel üretim süreçlerinin durdurulması, lojistik ve insan hareketliliğinin ülkeler arası geçişlere kapatılması ve hatta zaman zaman ülke yönetimleri tarafından sokağa çıkma yasağı getirilmesi gibi benzer kısıtlamalar bazı şehirlerde hava kalitesini olumlu yönde etkilemiştir. Pandemi döneminde değişen insan ihtiyaçları ve faaliyetleri nedeniyle hava kirliliği, enerji kullanımı, küresel ısınma ve iklim değişikliği konularında önemli değişiklikler ve gelişmeler yaşanmıştır. Tüm bu nedenlerle, kentsel ortamlardaki hava kirlitici konsantrasyonlarında 2020 ve 2021 yılında önemli düşüşlerin olduğu vurgulanabilir (Ceylan and Korkmaz, 2019; Korkmaz and Ceylan 2021a).

Meteorolojik veriler

Bu bölüm, şehrin iklimsel özelliklerinin yani meteorolojik parametrelerin hava kirliliği üzerindeki etkilerini derinlemesine anlamayı amaçlamaktadır. Elde edilen meteorolojik verilerin analizi, rüzgar hızı, sıcaklık ve nem gibi faktörlerin hava kirliliği dinamiklerine olan etkilerini belirleme amacını taşımakta ve hava kalitesi modellemelerine daha kesin ve bölgesel özellikler ekleme potansiyeline sahiptir.

Tablo 25. Meteorolojik Verilerin Yıllara Göre Değişimi

	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Erzurum Bölge Günlük Ortalama Sıcaklık (°C)	6,79	7,27	8,56	7,59	7,80	8,36	7,92	7,85
Aziziye Günlük Ortalama Sıcaklık (°C)	-	-	-	-	-	7,52	7,04	7,01
Erzurum Havalimanı Günlük Ortalama Sıcaklık (°C)	5,53	5,76	7,64	6,32	6,79	7,11	6,85	6,54
Palandöken Kayak Günlük Ortalama Sıcaklık (°C)	3,33	3,81	4,71	4,17	4,13	4,57	3,80	4,12
Aziziye Günlük Toplam Yağış (mm kg/m ²) OMGI	-	-	-	-	0,01	0,85	0,99	0,89
Erzurum Bölge Toplam Yağış (mm kg/m ²) OMGI	1,35	0,76	1,36	0,97	0,91	0,95	1,19	1,13
Palandöken Kayak Merkezi Toplam Yağış (mm kg/m ²) OMGI	3,51	1,55	2,48	1,38	1,97	1,83	1,87	1,84
Aziziye Günlük Ortalama Rüzgar Hızı (m/sn)	-	-	-	-	0,91	1,16	1,15	1,16
Erzurum Bölge Günlük Ortalama Rüzgar Hızı (m/sn)	1,47	1,35	1,32	1,16	1,31	1,41	1,29	1,23
Erzurum Havalimanı Günlük Ortalama Rüzgar Hızı (m/sn)	3,40	3,03	3,06	2,78	3,31	3,35	3,11	3,11
Palandöken Kayak Merkezi Günlük Ortalama Rüzgar Hızı (m/sn)	4,01	3,86	4,04	4,02	4,11	4,15	3,78	3,86
Aziziye Günlük Ortalama Nispi Nem (%)	-	-	-	-	67,83	61,57	64,54	65,14
Erzurum Bölge Günlük Ortalama Nispi Nem (%)	62,08	56,93	63,61	59,71	59,93	60,05	62,05	61,01
Erzurum Havalimanı Günlük Ortalama Nispi Nem (%)	66,37	63,22	69,222	65,73	63,86	62,762	64,41	65,14
Palandöken Kayak Merkezi Günlük Ortalama Nispi Nem (%)	61,23	57,13	63,61	57,44	58,168	58,44	57,329	57,26
Aziziye Günlük Ortalama Aktüel Basınç (hPa)	-	-	-	-	826,43	825,256	822,426	823,16
Erzurum Bölge Günlük Ortalama Aktüel Basınç (hPa)	812,11	813,19	812,99	813	813,404	813,288	812,96	813,53
Erzurum Havalimanı Günlük Ortalama Aktüel Basınç (hPa)	823,97	824,42	823,803	823,85	824,281	824,04	823,499	823,89
Erzurum Bölge Günlük Güneşlenme Süresi (saat)	-	-	6,594	6,906	6,852	7,2616	6,96	6,95
Erzurum Havalimanı Günlük Güneşlenme Süresi (saat)	7,15	7,863	7,183	7,916	8,179	7,83	7,9478	7,85

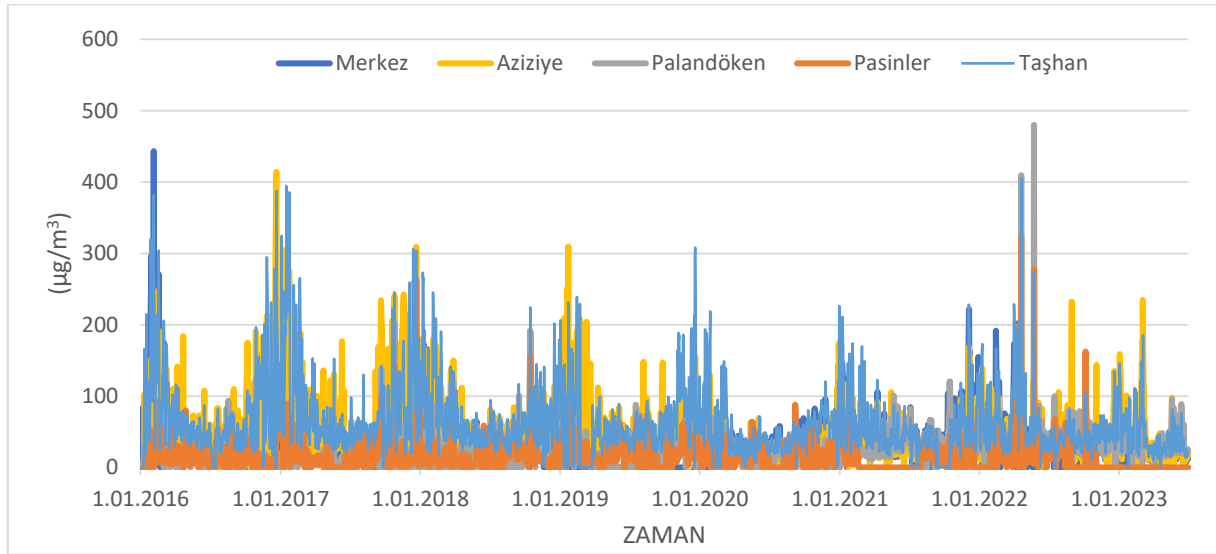
Kirlilik Konsantrasyonlarının Zamansal ve Mekânsal Değişimi

Bu bölümde, Erzurum'un hava kirliliği konsantrasyonlarının zaman içindeki ve mekânsal değişimini detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Kent atmosferinin kirlilik dinamikleri, özellikle Pm ve gaz konsantrasyonları incelenerek, bu kirleticilerin hava kalitesine etkilerinin anlaşılması hedeflenmektedir. Zamansal değişim analizinde, mevsimsel ve yıllık dalgalanmalar belirlenmiş, kirlilik seviyelerindeki potansiyel artışlar ve azalışlar ortaya konulmuştur. Ayrıca, mekânsal değişimin incelenmesi (kent içinde yer alan farklı ölçüm istasyonları yardımıyla), farklı şehir bölgelerinin kirlilik profilleri ortaya konulmuştur.

Partikül madde değişimi

Pm₁₀ değerlerinin değişimi

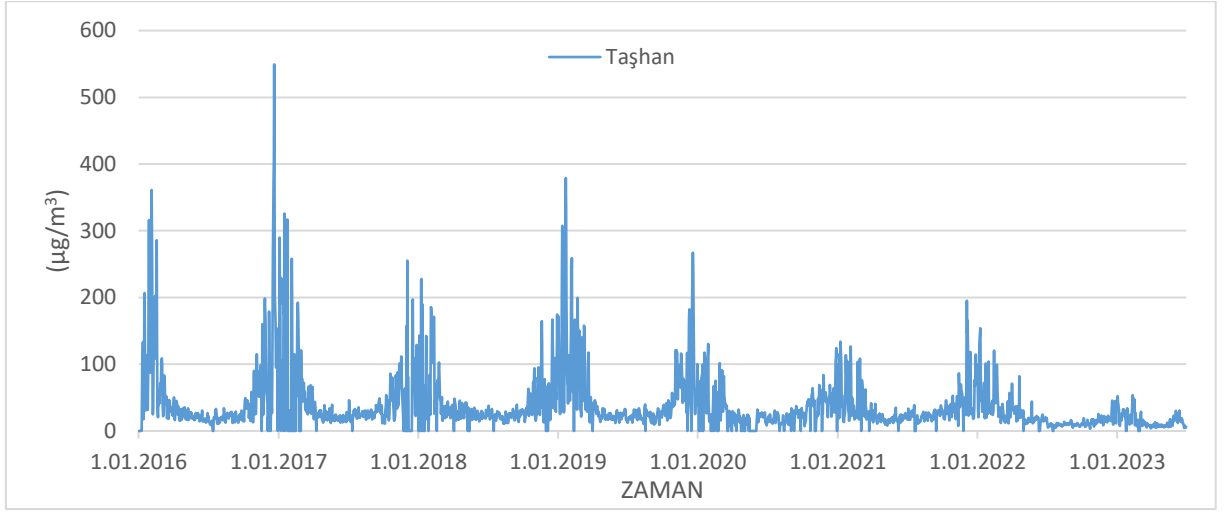
Pm₁₀ konsantrasyonlarının zaman içindeki dinamikleri, mevsimsel değişimler ve uzun vadeli eğilimler üzerinden incelenmiştir. Aşağıda verilen bilgiler Pm₁₀'un atmosferdeki davranışları ve potansiyel kaynaklarının anlaşılmasında ve maksimum gün değerlerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Ayrıca, mekânsal değişimin analizi (kent içinde yer alan farklı ölçüm istasyonları yardımıyla), şehir içindeki farklı bölgelerdeki Pm₁₀ seviyelerindeki değişimleri ortaya koymuştur.



Şekil 25. İstasyonlara göre Pm₁₀ zamansal değişim (µg/m³)

Pm_{2.5} değerlerinin değişimi

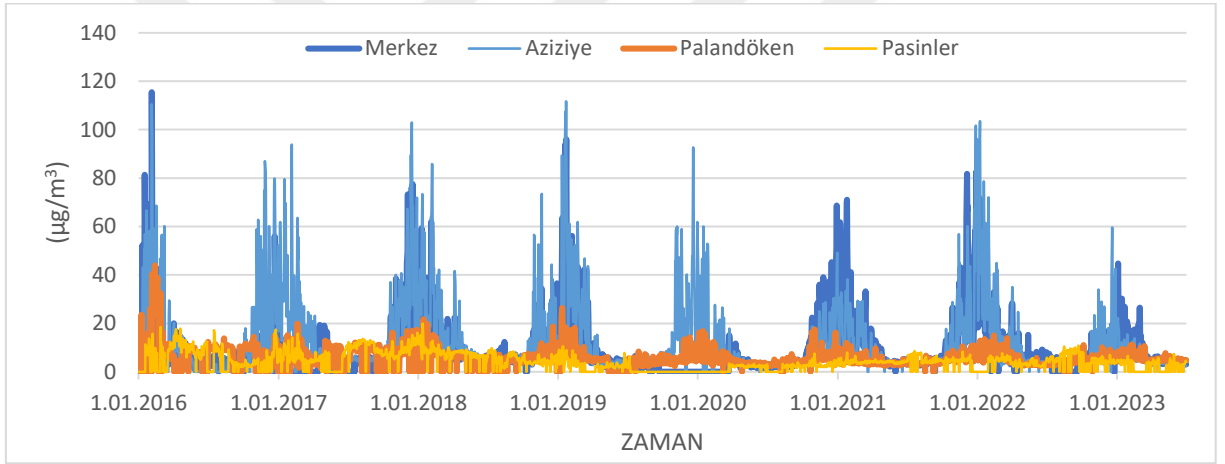
Kent atmosferindeki Pm_{2.5} konsantrasyonlarının zaman içindeki değişimleri incelenerek, mevsimsel dalgalanmaları ve uzun vadeli eğilimleri anlama ortaya konulabilir, böylece ölçümü zor bu ince partikül maddelerin atmosferdeki hareketleri ve muhtemel kaynaklarını daha iyi anlaşılabilir. Kent içinde tek noktadan alınan Pm_{2.5} verilerinin mekânsal değişimin derinlemesine analizi mümkün değildir. şehir içindeki farklı bölgelerdeki Pm_{2.5} seviyelerindeki değişimleri ancak bu noktalara yeni ölçüm istasyonlarının kurulumu ile mümkündür.



Şekil 26. Taşhan istasyonuna göre $PM_{2,5}$ zamansal değişim ($\mu g/m^3$)

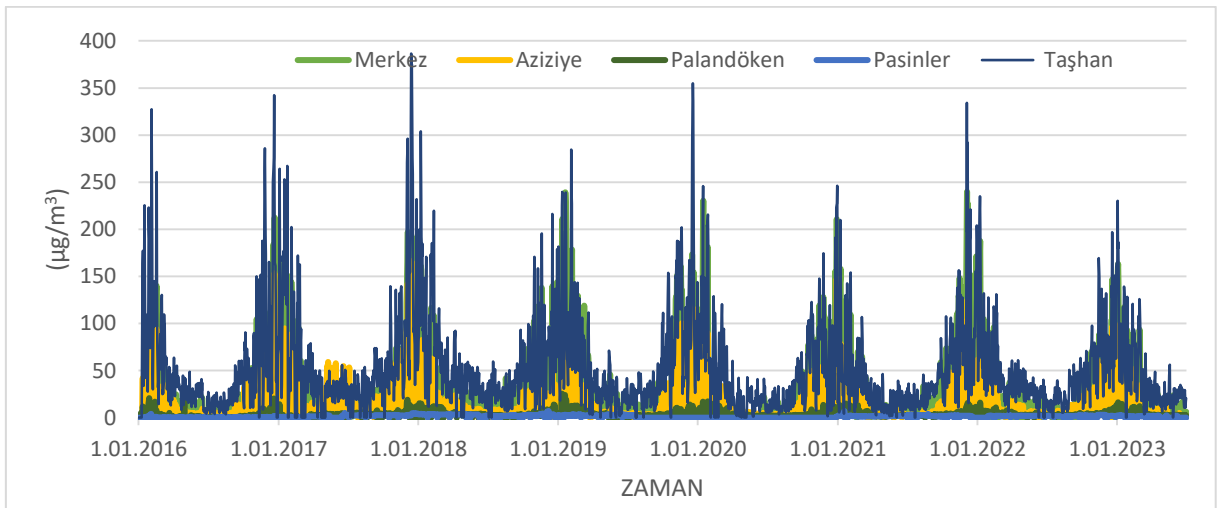
Gaz kirleticilerin değişimi

SO₂ zamansal değişimi



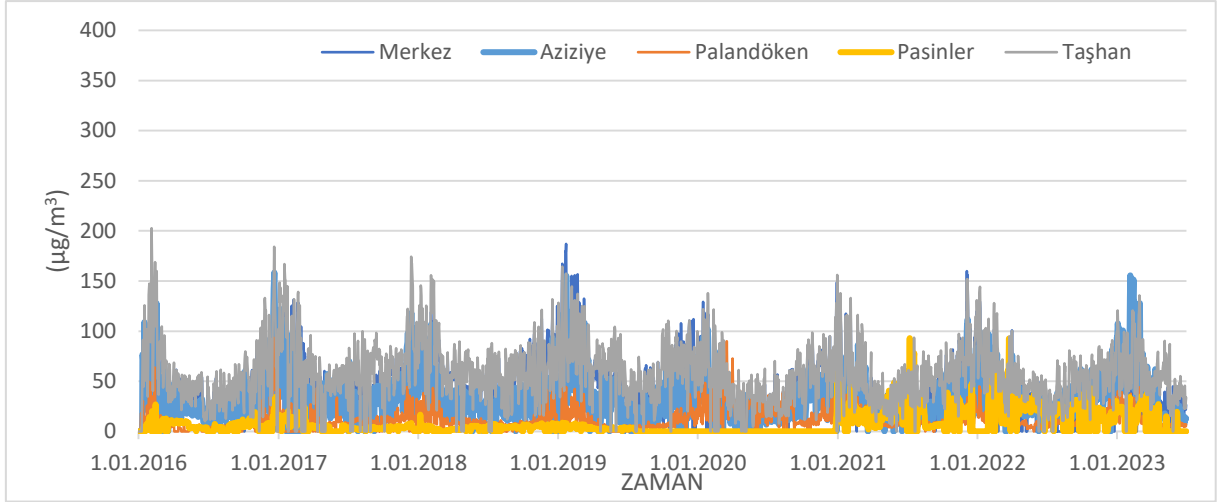
Şekil 27. İstasyonlara göre SO_2 zamansal değişim ($\mu g/m^3$)

NO değişimi



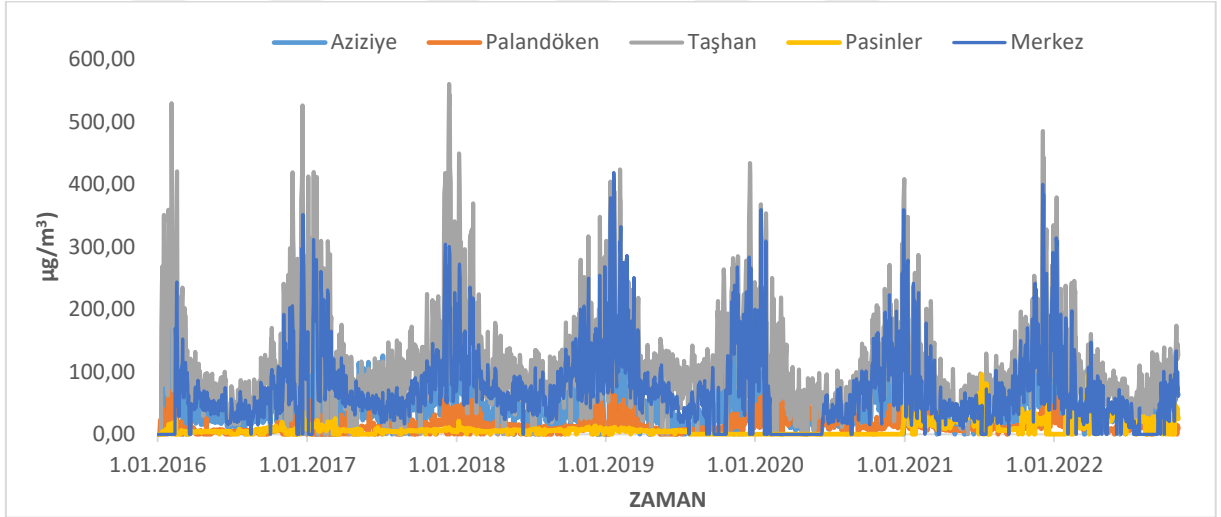
Şekil 28. İstasyonlara göre NO zamansal değişim ($\mu g/m^3$)

NO₂ değişimi



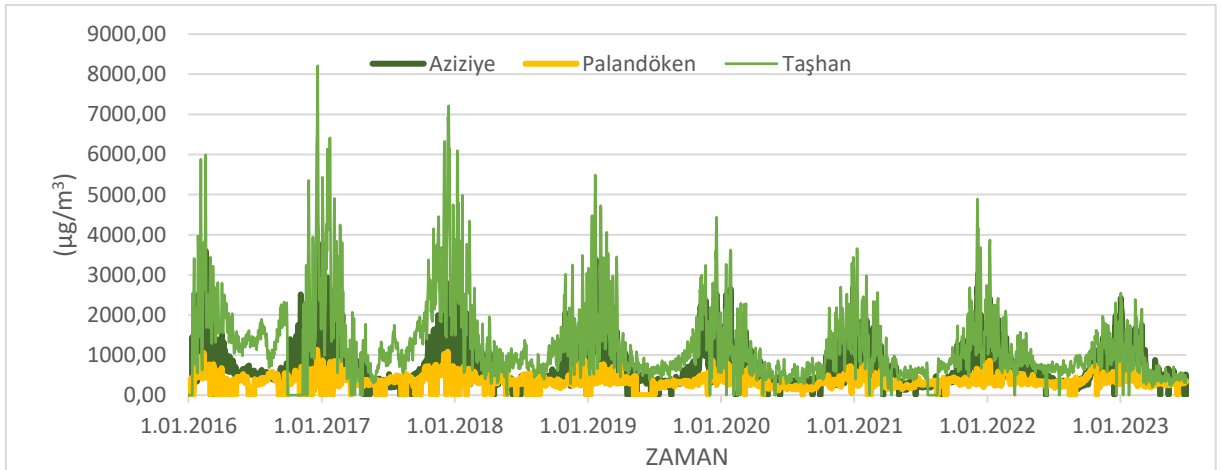
Şekil 29. İstasyonlara göre NO₂ zamansal değişim (µg/m³)

NO_x değişimi



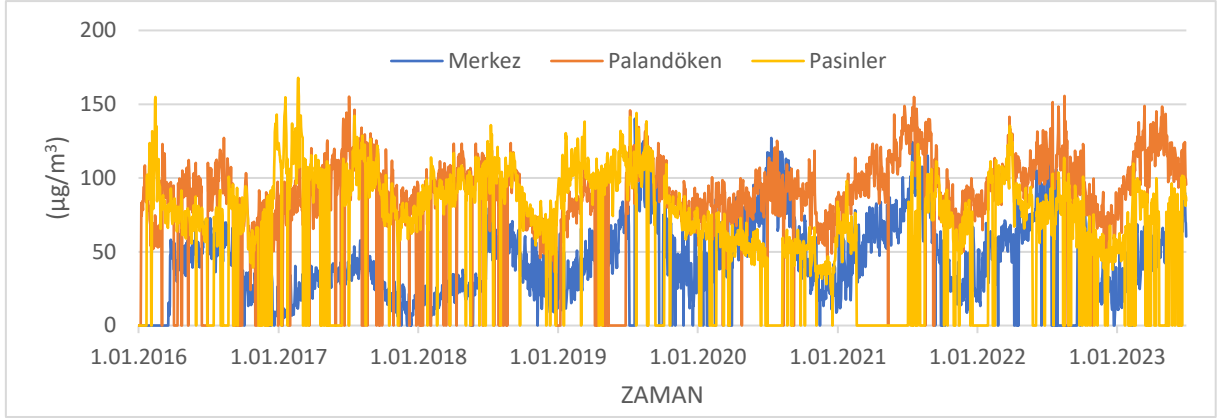
Şekil 30. İstasyonlara göre NO_x zamansal değişim (µg/m³)

CO değişimi



Şekil 31. İstasyonlara göre CO zamansal değişim (µg/m³)

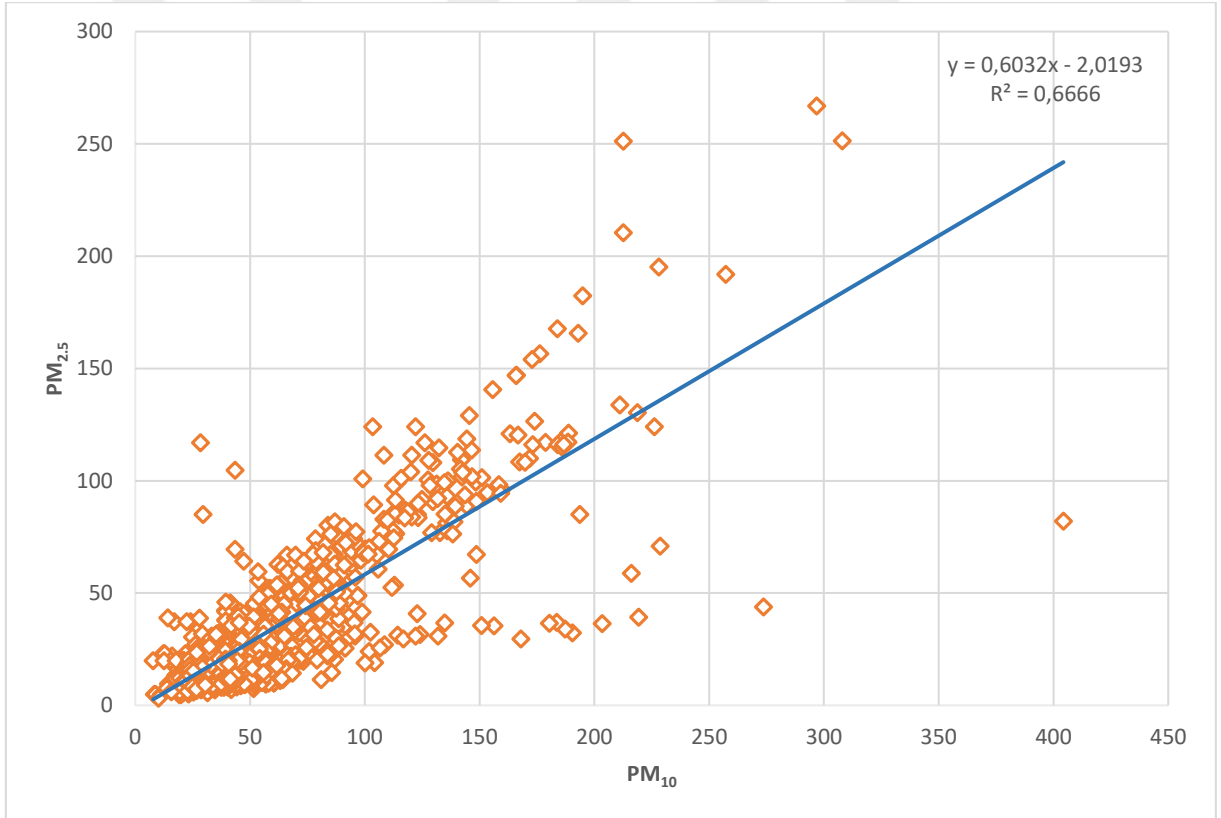
O₃ değişimi



Şekil 32. İstasyonlara göre O₃ zamansal değişim (µg/m³)

Kirlilik Konsantrasyonlarının Arasındaki Korelasyon

Pm'ler arasındaki korelasyon



Şekil 33. Pm₁₀-Pm_{2,5} dağılımı (aylık ortalamalar-µg/m³)

Pm_{2,5} ve Pm₁₀ arasındaki ilişkiyi tespit etmek amacıyla Peardon Korelasyon Analizi kullanılmıştır. Bu analiz, Pm_{2,5} değerleri ve Pm₁₀ verileri arasındaki istatistiksel ilişkileri anlamak için güçlü bir araçtır. Tüm Pm₁₀ verileri (MkzPM10, AzzPM10, PdkPM10, PsnPM10, ThnPM10) dikkate alınarak korelasyon testi yapılmıştır. Elde edilen bulgular aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Tablo 26. Pm_{2,5} ve Pm₁₀ Arasındaki Kolerasyon Tablosu

		ThnPM25	MkzPM10	AzzPM10	PdkPM10	PsnPM10	ThnPM10
Pearson Correlation	ThnPM25	1,000	,784	,777	,027	,376	,898
	MkzPM10	,784	1,000	,681	,448	,574	,849
	AzzPM10	,777	,681	1,000	,261	,469	,861
	PdkPM10	,027	,448	,261	1,000	,661	,303
	PsnPM10	,376	,574	,469	,661	1,000	,520
	ThnPM10	,898	,849	,861	,303	,520	1,000
Sig. (1-tailed)	ThnPM25	.	,000	,000	,198	,000	,000
	MkzPM10	,000	.	,000	,000	,000	,000
	AzzPM10	,000	,000	.	,000	,000	,000
	PdkPM10	,198	,000	,000	.	,000	,000
	PsnPM10	,000	,000	,000	,000	.	,000
	ThnPM10	,000	,000	,000	,000	,000	.
N	ThnPM25	986	986	986	986	986	986
	MkzPM10	986	986	986	986	986	986
	AzzPM10	986	986	986	986	986	986
	PdkPM10	986	986	986	986	986	986
	PsnPM10	986	986	986	986	986	986
	ThnPM10	986	986	986	986	986	986

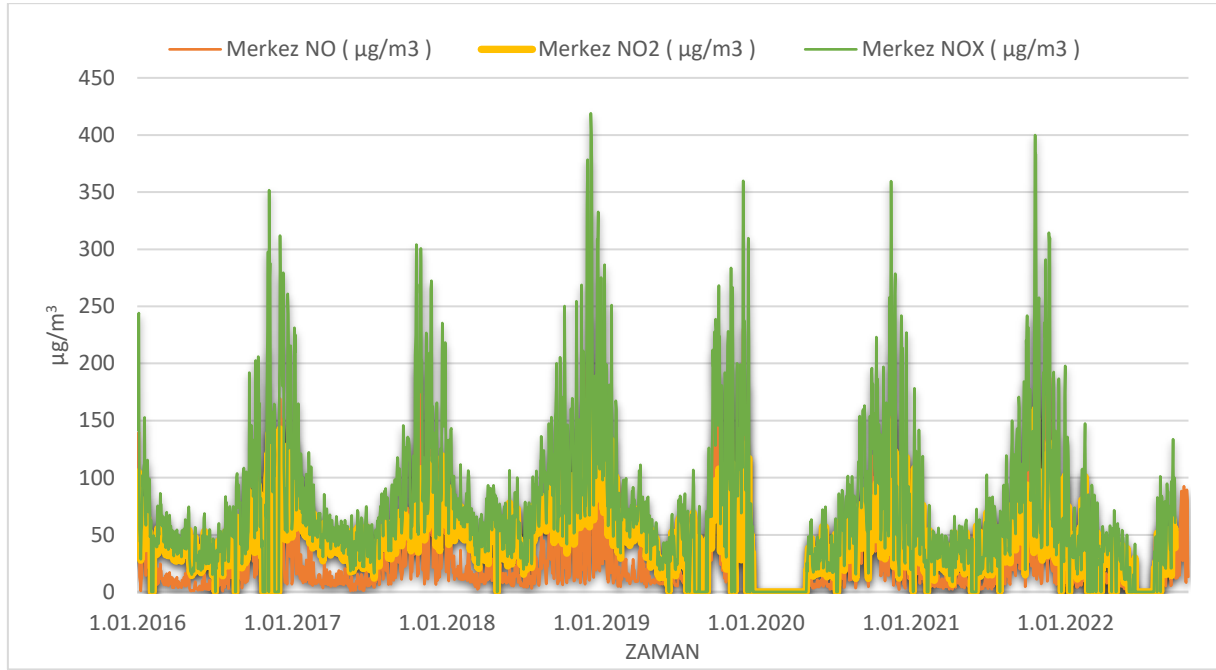
Analiz sonuçlarına göre, Pm_{2,5} ve Pm₁₀ verileri arasında anlamlı korelasyonlar tespit edilmiştir. Özellikle, Pm_{2,5} ile ölçüm alınan tüm Pm₁₀ istasyon verileri arasında güçlü pozitif korelasyon dikkat çekicidir. Pm_{2,5} ve Pm₁₀ arasında en güçlü pozitif ilişki Taşhan Pm₁₀ verileri arasındadır ki bu aynı istasyonda olmaları sebebiyledir. Güçlü düzeyde pozitif ve anlamlı (p <0,05) bir ilişki bulunmuştur.

Tablo 27. Pm_{2,5} ile Pm₁₀ Arasındaki Regrasyon Tablosu

Model	Standartlanmamış		t	Sig.	95,0% Güven		Korelasyonlar			Doğrusallık	
	Katsayılar				Aralığı					İstatistikleri	
	B	Std. Hata			Alt Sınır	Üst Sınır	Sıfır dereceli	Kısmi	Parça	Hata payı	VIF
(Katsayı)	-,265	,874	-,304	,761	-1,980	1,449					
MkzPM10	,387	,027	14,532	,000	,334	,439	,784	,421	,147	,227	4,410
AzzPM10	,067	,020	3,351	,001	,028	,106	,777	,106	,034	,246	4,060
PdkPM10	-,746	,028	-27,008	,000	-,801	-,692	,027	-,653	-,274	,523	1,913
PsnPM10	,156	,030	5,206	,000	,097	,214	,376	,164	,053	,445	2,245
ThnPM10	,552	,024	22,654	,000	,504	,599	,898	,586	,230	,125	7,993

Pm₁₀'un Pm_{2,5} üzerindeki etkilerini anlamak ve nicel olarak değerlendirmek amacıyla birçok değişkenli regresyon analizi gerçekleştirmiştir. Bu analiz, Pm₁₀ verilerinin Pm_{2,5} düzeylerini nasıl etkileyebileceğini anlamak için önemli bir araç sağlamaktadır. Şekil 12'de görüleceği üzere Pm₁₀ atmosferde fiziksel dönüşüm süreçleri ile savrulma ve ufalanma nedeniyle Pm_{2,5}'a dönüştüğü bilinmektedir. Bu ilişki regrasyon analizi ile gösterilmiştir.

NO, NO₂ ve NO_x zamansal değişimi



Şekil 34. NO NO₂ NO_x zamansal değişimi

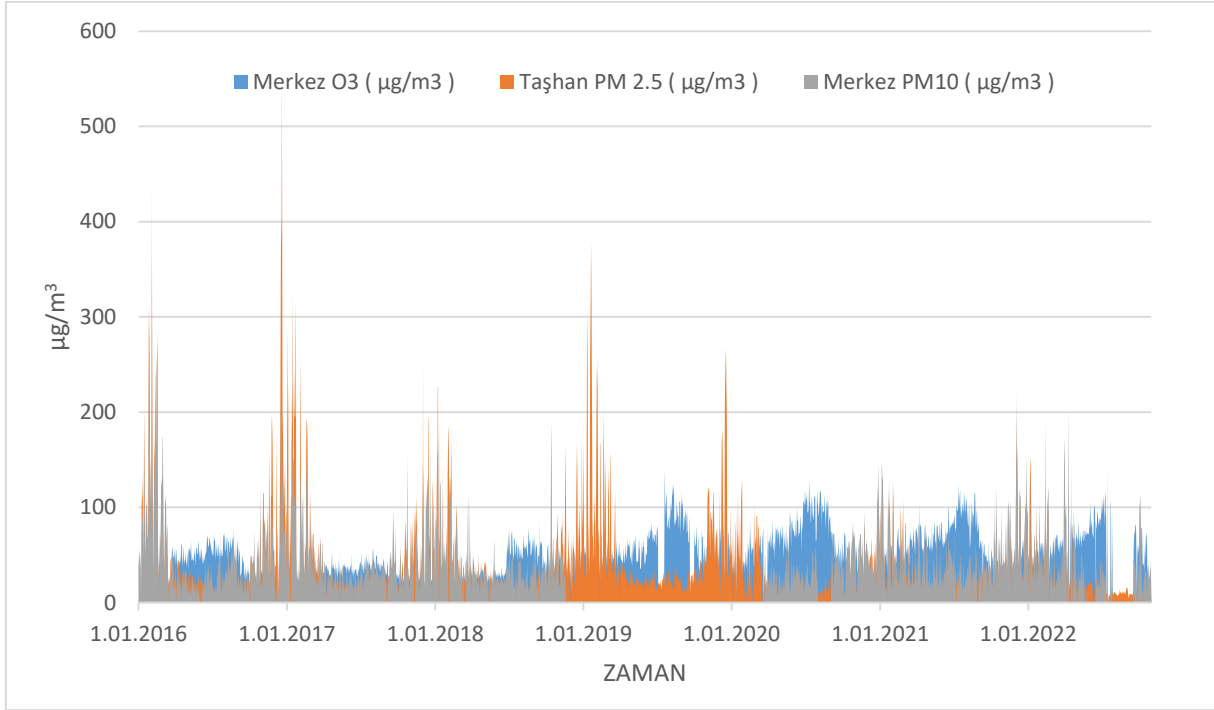
Pm'ler ile O₃ arasındaki kolerasyon

Yapılan Pearson kolerasyon analizleri ile kent merkezinde Pm_{2,5} ile O₃ arasında ve Pm₁₀ ile O₃ arasında negatif bir kolerasyonun olduğu belirlenmiştir (EK 4). Aşağıdaki tabloda bu ilişkiler detaylı şekilde gösterilmiştir.

Tablo 28. Pm_{2,5} ve Pm₁₀ ile O₃ Arasındaki Kolerasyon Tablosu (Pearson Katsayıları)

	Merkez O ₃	Palandöken O ₃
Taşhan Pm _{2,5}	-0,497	-0,329
Taşhan Pm ₁₀	-0,484	-0,213
Merkez Pm ₁₀	-0,369	-0,196
Aziziye Pm ₁₀	-0,498	-0,183

Pm_{2,5}-Pm₁₀ ile meteorolojik faktörler (sıcaklık, güneşlenme süresi, atmosferik basınç, nem) arasındaki ilişkinin, O₃ ile meteorolojik faktörler arasındaki ilişkiden çok farklı olduğu belirlenmiştir (Chen *et al.* 2022). PM_{2,5}-Pm₁₀ ve O₃'ün yıllar içerisindeki konsantrasyon değişikliklerinin belirgin bir şekilde ters orantılı olduğu ve Pm konsantrasyonlarının yüksek olduğu kış periyodunda O₃ konsantrasyonlarının düşük, yine Pm konsantrasyonlarının düşük olduğu yaz periyodunda ise O₃ konsantrasyonunun yüksek olduğu yapılan detaylı analizler sonucu ortaya konulmuştur.

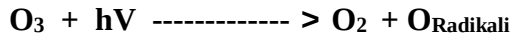


Şekil 35. Pm'ler ile O₃ zamansal değişimi

Pm'lerin üstlendiği katalizör rolü eşliğinde; O₃ 'un güneşten gelen ultraviyole (hv) ışınlarıyla alternatif fotokimyasal parçalanma reaksiyonları;

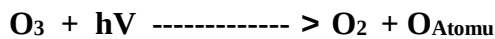
1. Alternatif Parçalanma Reaksiyonu

Katalizör (Pm_{2,5-10})



2. Alternatif Parçalanma Reaksiyonu

Katalizör (Pm_{2,5-10})

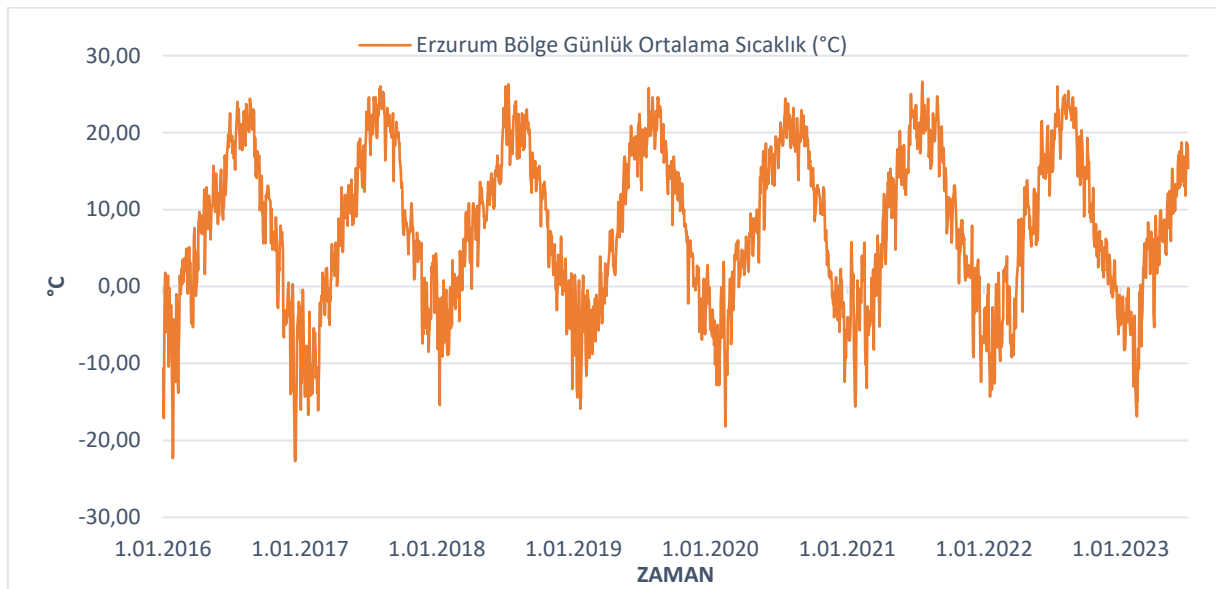


Tıpkı katalitik hidrojenasyon reaksiyonlarda Pd/Ni yada Ra/Ni gibi yüzey alanı genişletilmiş ağır metallerin katalitik etki (indirgenecek çift bağı yakalayarak yüzeyine bağlamak suretiyle indirgeyici görev yapan hidrojen ile daha kolay ve hızlı reaksiyon vermesini sağlamak) yaptığı gibi burada da partikül maddeler (Pm_{2.5-10}) yüzey alanları geniş olduğu için benzer mekanizma ile katalitik etki yaparlar. Bilindiği gibi; partikül boyutu küçüldükçe yüzey alanı genişler, yüzey alanı genişledikçe de adsorplama yani yüzeyde tutma kapasitesi artar. Pm_{2,5}'un yüzey alanı Pm₁₀'lara göre dört kat daha geniştir. Dolayısıyla Pm_{2,5} 'un yüzeyinde daha fazla tutunan O₃, güneşten gelen hV (UV) etkisine daha çok maruz kalır. Bu da O₃'ün daha çok parçalanması demektir. Tablo 28'de de görüldüğü üzere Pm ler ile O₃ arasında bir ters orantı,yani bir tahteravalli etkisi (biri arttıkça diğərinin azalması) söz konusu olup Pm miktarı arttıkça da bu etki artmaktadır.

Meteorolojik Parametrelerin Zamansal Değişimi

Sıcaklığın zamansal değişimi

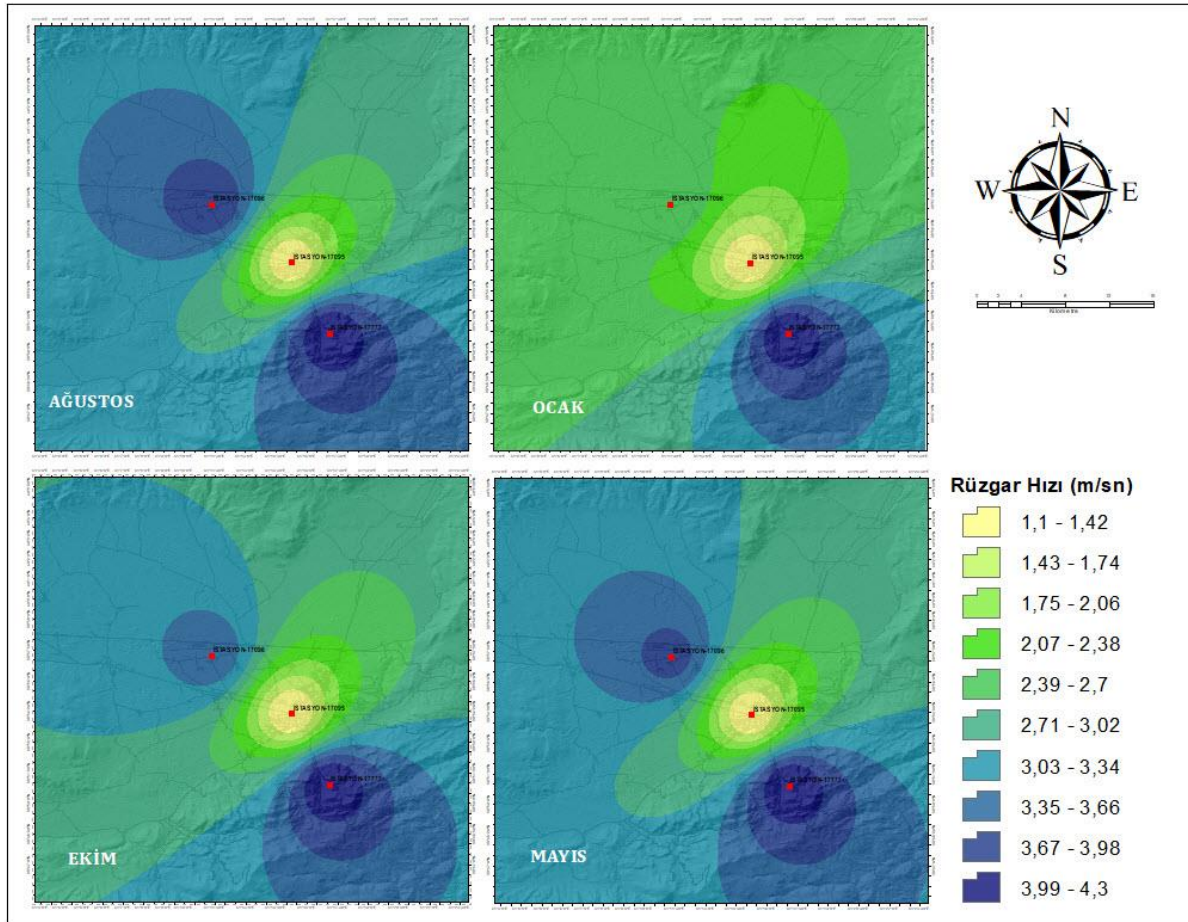
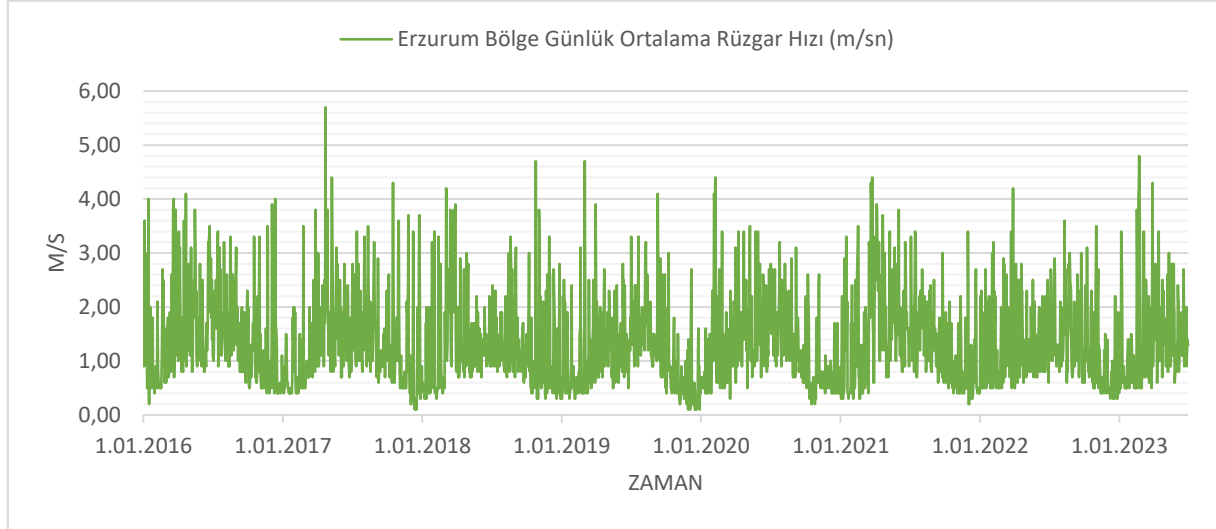
Sıcaklık, atmosferdeki hava kirletici konsantrasyonlarını etkileyen önemli bir faktördür. Birçok araştırma, sıcaklığın hava kalitesi üzerinde belirgin etkilerinin olduğunu ortaya koymuştur. Yüksek sıcaklık seviyeleri, ozon gibi reaktif kirleticilerin oluşumunu artırabilir, çünkü ısınan hava, emisyon kaynaklarından salınan gazları kimyasal reaksiyonlara daha duyarlı hale getirir. Öte yandan, soğuk hava koşulları, partikül madde konsantrasyonlarını artırmaktadır, çünkü soğuk hava, partikül madde oluşumunu artırmaktadır.



Şekil 36. Günlük ortalama sıcaklık değėrlerinin değışimi

Rüzgar hızının zamansal değişimi

Rüzgar hızı ve yönü, atmosferdeki hava kirletici konsantrasyonları üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Yapılan araştırmalar, rüzgar hızının artmasıyla birlikte hava kirleticilerin dağılımında önemli değişikliklerin meydana geldiğini göstermektedir.

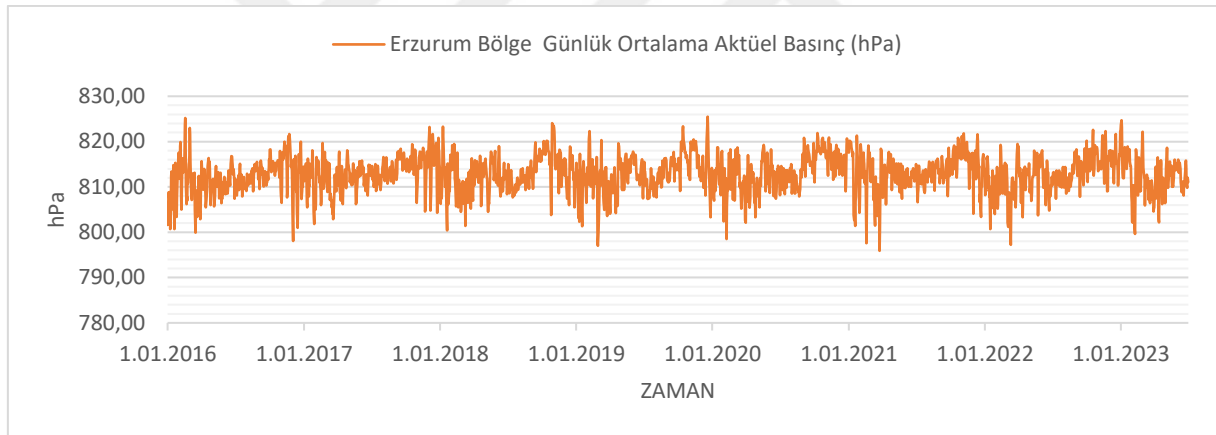


Şekil 37. Günlük Ortalama Rüzgar Hızı değerlerinin zamansal değişimi ve alansal değişimi

Yüksek rüzgar hızları, emisyon kaynaklarından salınan kirleticilerin dispersiyonunu artırarak atmosferde daha geniş bir alana yayılmalarına olanak tanır. Aynı zamanda, rüzgarın yönü, kirleticilerin taşınım yollarını belirleyebilir, bu da belirli bölgelerin daha yoğun kirlilikle karşılaşmasına neden olabilir. Özellikle rüzgarın yönü, kentsel alanlarda emisyon kaynaklarından uzak bölgelerin hava kalitesini etkileyebilir.

Aktüel basıncın zamansal değişimi

Aktüel basınç, atmosferdeki hava kirleticilerinin konsantrasyonları üzerinde etkili olan bir parametredir. Yapılan araştırmalar, düşük atmosfer basıncının, kirleticilerin yükselmesini ve atmosferde daha uzun süre kalmasını teşvik edebileceğini göstermektedir. Bu durum, özellikle zayıf rüzgar koşullarıyla birleştiğinde, emisyon kaynaklarından salınan kirleticilerin lokal olarak birikmesine yol açabilir. Aksine, yüksek atmosfer basıncı, kirleticilerin dispersiyonunu artırarak atmosferde daha geniş bir alana yayılmalarına olanak tanır. Atmosfer basıncının değişkenliği, hava kirleticilerinin seyreltme oranını ve uzak bölgelere taşınmasını etkileyebilir.

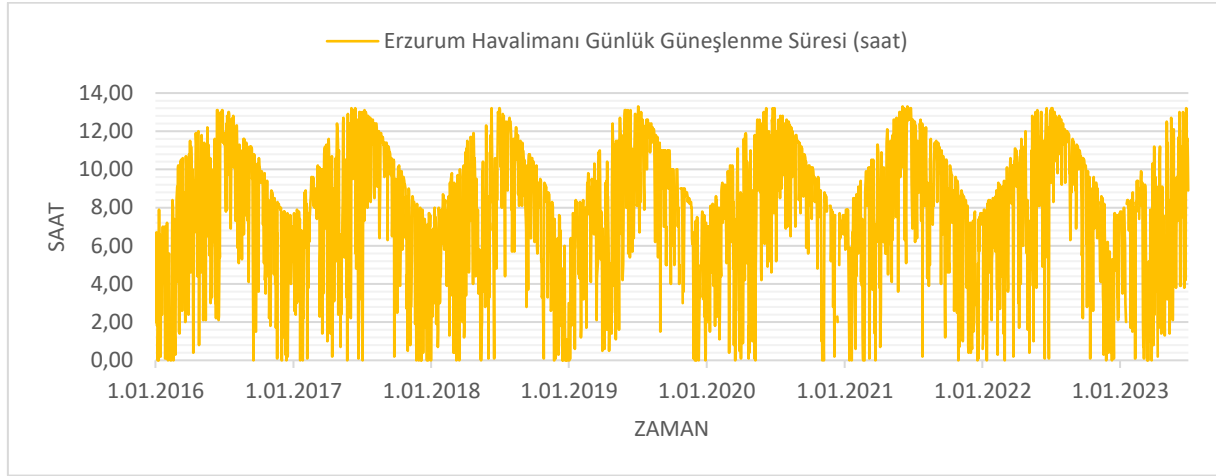


Şekil 38. Günlük Ortalama Aktüel Basınç değerlerinin değişimi

Güneşlenme süresinin zamansal değişimi

Güneşlenme süresinin, hava kirleticilerinin atmosferik konsantrasyonları üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu gösteren araştırmalar mevcuttur. Güneş ışığı, atmosferdeki kimyasal reaksiyonları tetikleyerek ozon oluşumunu artırabilir. Bu durum, özellikle nitrojen dioksit gibi önemli kirleticilerin fotokimyasal dönüşümlerine katkıda bulunabilir. Ayrıca, güneşlenme süresi, partikül madde oluşumunu etkileyerek hava kalitesini etkileyebilir. Yoğun güneşlenme süreleri, ozon ve partikül madde konsantrasyonlarının artmasına neden olabilir, çünkü bu süreçler atmosferdeki kimyasal dengeleri etkiler. Ancak, bu etkiler, bölgesel iklim ve hava kalitesi özelliklerine bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Güneşlenme süresinin hava kirleticileri üzerindeki etkilerini anlamak, atmosferik bileşenler arasındaki karmaşık

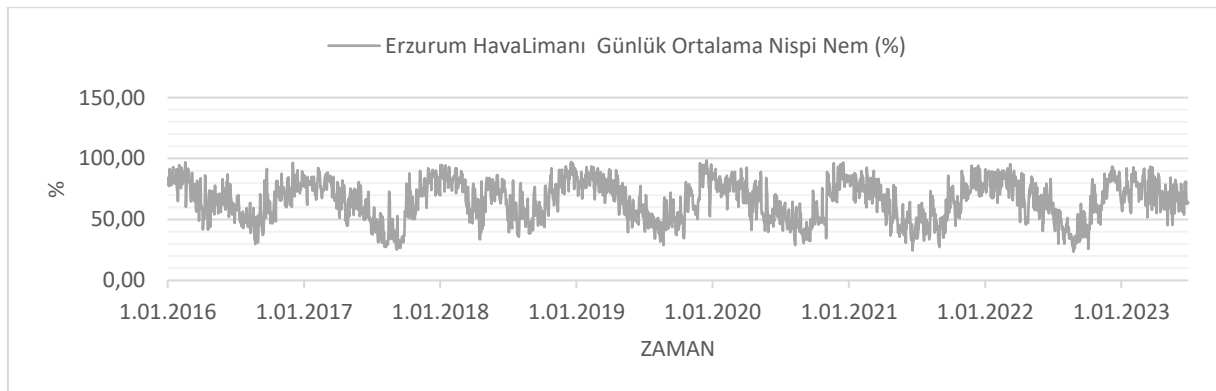
etkileşimleri değerlendirmek ve hava kalitesi yönetim stratejilerini geliştirmek açısından önemlidir.



Şekil 39. Günlük Güneşlenme Süresi değerlerinin değişimi

Nispi nemin zamansal değişimi

Nispi nem, atmosferdeki hava kirleticilerinin konsantrasyonları üzerinde önemli bir etkindir ve birçok araştırma bu etkileşimleri incelemiştir. Yüksek nispi nem seviyeleri, ozon gibi reaktif kirleticilerin atmosferde uzun süre kalmasını ve birikmesini destekleyebilir. Ayrıca, nemin artması, partikül madde oluşumunu teşvik edebilir, çünkü su buharı, partikül çekirdeklerinin büyümesine ve atmosferde asılı kalmasına katkıda bulunabilir. Öte yandan, düşük nispi nem seviyeleri, kirleticilerin dispersiyonunu artırarak atmosferde daha geniş bir alana yayılmalarına olanak tanır. Bu karmaşık etkileşimler, hava kalitesi üzerinde nemin oynadığı rolü anlamak için önemlidir.

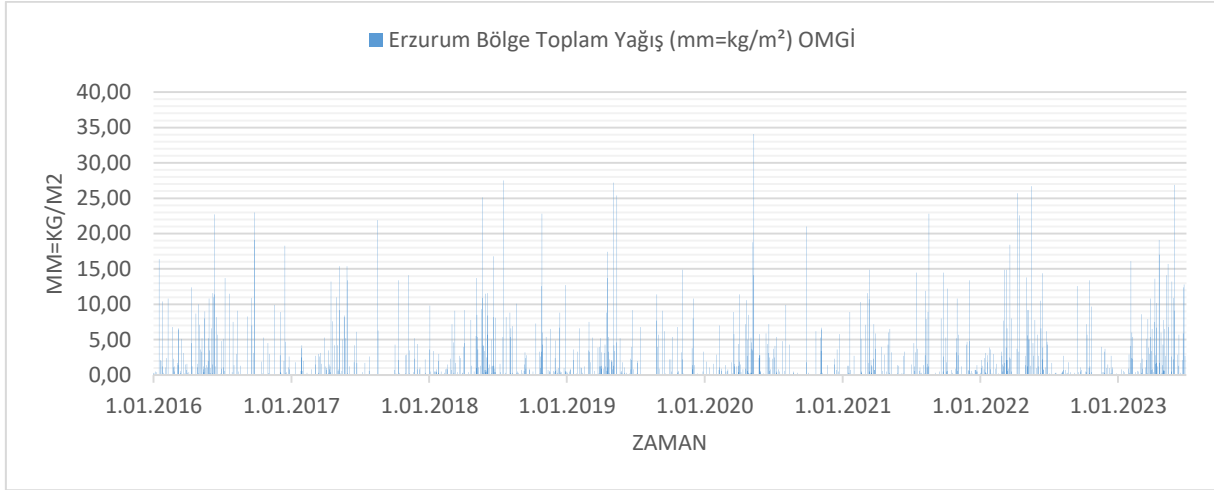


Şekil 40. Günlük Ortalama Nispi Nem değerlerinin değişimi

Günlük toplam yağışın zamansal değişimi

Yağış, atmosferdeki kirleticilerin temizlenmesinde etkin bir mekanizma olarak görülmektedir. Yağmur damlaları, atmosferde asılı olan partikül maddeleri ve gazları yakalayıp yüzeye doğru taşır ve bu sayede hava kalitesini iyileştirir. Özellikle aerosol

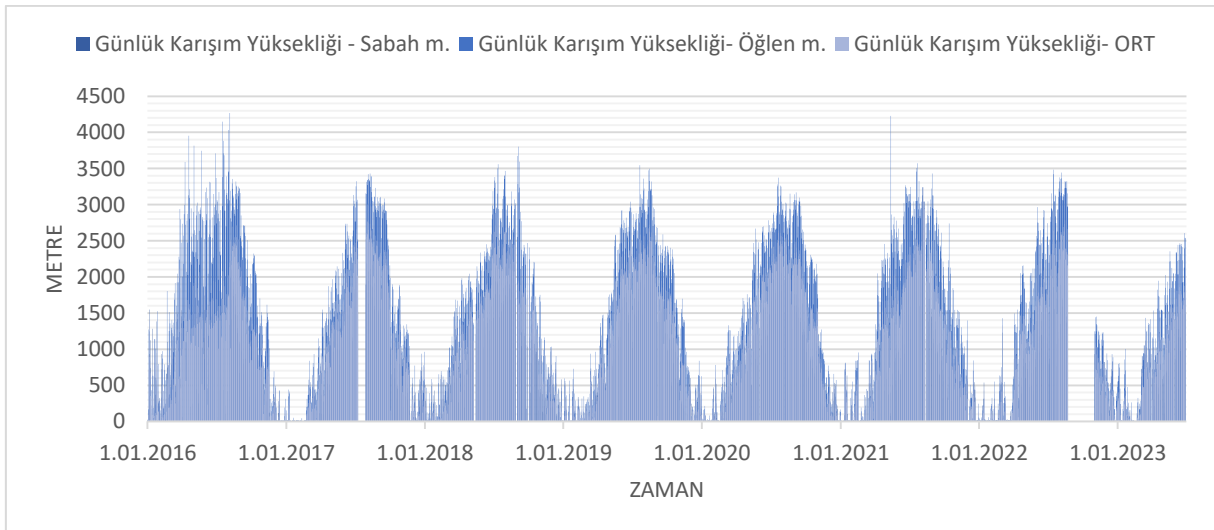
kirleticilerin yağış yoluyla temizlenmesi, atmosferdeki zararlı partikül madde miktarını azaltabilir. Bununla birlikte, araştırmalar, yağışın hava kalitesini sadece temizleme özelliği ile sınırlı olmadığını, aynı zamanda yağış miktarının atmosferdeki kimyasal reaksiyonları da etkileyerek bazı kirleticilerin oluşumunu tetikleyebileceğini göstermektedir. Dolayısıyla, günlük toplam yağış miktarının hava kirleticilerinin atmosferik dinamikleri üzerindeki bu karmaşık etkileşimlerini anlamak, hava kalitesi yönetimi stratejilerinin daha etkili bir şekilde tasarlanması için önemli bir bilgi sağlar.



Şekil 41. Günlük toplam yağış değerlerinin değişimi

Karışım yüksekliğinin zamansal değişimi

Genellikle, yüksek karışım tabakaları, emisyon kaynaklarından salınan kirleticilerin daha iyi dağılmasına ve seyrelmesine olanak tanır. Bu durum, atmosferin üst katmanlarına doğru kirleticilerin taşınımını kolaylaştırarak yüzeydeki konsantrasyonları azaltabilir. Öte yandan, düşük karışım tabakaları, kirleticilerin daha yakın mesafelerde birikmesine ve birçok durumda yerel olarak yoğun kirlilik olaylarına neden olabilir.



Şekil 42. Yaz ve kış periyodu inversiyon/ karışım yüksekliği tabakası (metre)

Araştırmalar, karışım yüksekliğinin mevsimsel ve coğrafi değişkenliklere bağlı olarak farklılık gösterebileceğini ve bu değişkenliklerin hava kirleticilerinin uzaklaştırılması veya birikmesi üzerinde belirleyici bir etkisi olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, karışım yüksekliği ile hava kirleticileri arasındaki etkileşimleri anlamak, kent içerisinde hava kalitesi yönetimi stratejilerinin belirlenmesi ve uygulanmasında önemli bir faktördür.

Kent İçerisinde Trafik Verisinin İncelenmesi

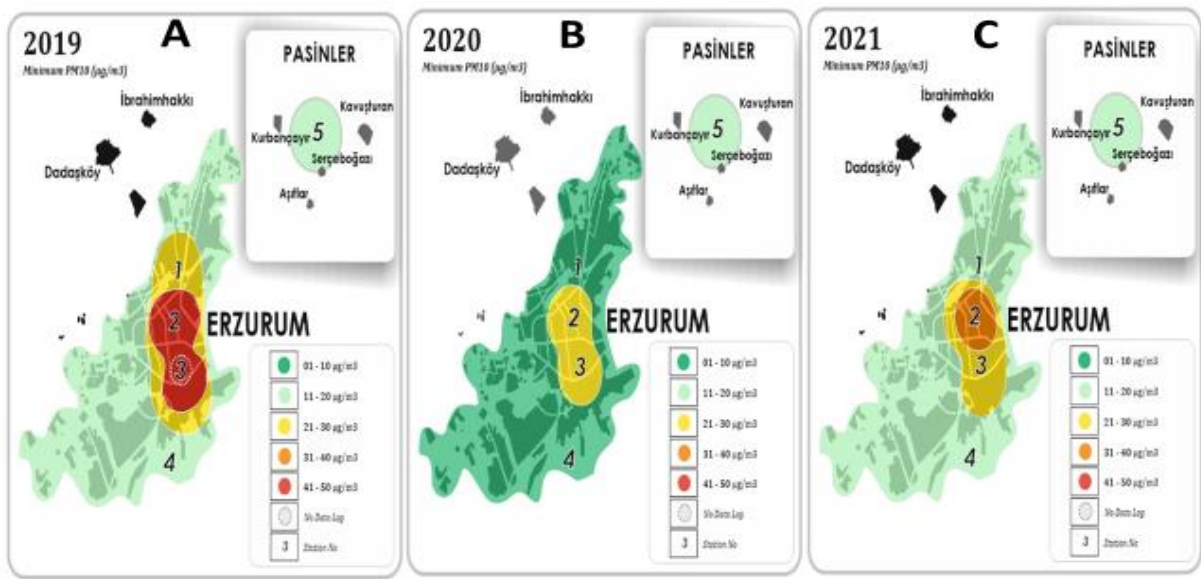
Kent içerisinde trafik verisinin incelenmesi, atmosferdeki hava kirleticilerinin konsantrasyonları üzerindeki etkileri anlamak açısından önemli bir araştırma alanını oluşturmaktadır. Hava kirliliği, özellikle büyük kentsel bölgelerde trafik kaynaklı emisyonlarla doğrudan ilişkilidir ve bu kaynaklar atmosfere çeşitli zararlı maddelerin salınımına neden olmaktadır. Bu bağlamda, trafik verilerinin detaylı bir şekilde incelenmesi, yoğun trafik bölgelerindeki emisyonların miktarını ve dağılımını belirleyerek atmosferdeki kirletici konsantrasyonları üzerindeki etkilerini analiz etmeyi sağlar. Araştırmanın bu bölümünde, kent içi trafik akışının, hava kalitesi üzerindeki dinamik etkileşimleri anlamak ve bu bilgilerin hava kalitesi yönetimi stratejilerinin geliştirilmesine katkıda bulunmak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, trafik verilerinin ayrıntılı analizi, kentsel alanlardaki hava kirliliği sorunlarına çözüm odaklı yaklaşımların belirlenmesine olanak sağlayacak kritik bulgular sunacaktır.

TÜİK 2023 Ekim ayı verilerine göre Erzurum 130 bin 879 kayıtlı araçla Türkiye sıralamasında 49. basamakta yer aldı. Erzurum'da trafiğe kayıtlı araçlarda otomobil 65 bin 929 ile ilk sırada yer alırken, minibüs sayısı 2 bin 430, otobüs sayısı bin 229, kamyonet sayısı 28 bin 566, kamyon sayısı 6 bin 106, motosiklet sayısı 4 bin 536, özel amaçlı araç sayısı 729 ve traktör sayısı 21 bin 354 oldu.

istatistiksel incelenmesi; emisyon kaynaklarını belirleme, trafiği düzenleme ve toplu taşıma sistemlerini geliştirme gibi stratejik adımları destekleyerek, kentsel ulaşımın çevresel etkilerini en aza indirmeye yönelik çözümler sunmayı amaçlamaktadır.

Alansal Hava Kalitesi Kirlilik Haritaları

Erzurum kent merkezinde yer alan dört istasyon (İstasyon 1-Aziziye, İstasyon 2-Taşhan, İstasyon 3-Merkez, İstasyon 4-Palandöken) ve kent merkezine 40 km uzaklıktaki (kent merkezi verilerine göre referans noktası olarak kabul edilebilecek) bir istasyon (İstasyon 5-Pasinler) olmak üzere toplam beş istasyonda alınan tüm veriler kullanılarak ARCGIS programı yardımıyla $Pm_{2,5}$ ve Pm_{10} için mekânsal dağılım haritaları çizilmiştir (Korkmaz *et al.* 2021).



A) Pre-pandemik dönem B) 1. Post-pandemik dönem C) 2. Post-pandemik dönem

Şekil 45. Erzurum kent merkezinde yer alan istasyonlardaki minimum Pm_{10} konsantrasyon değerlerinden hareketle alansal hava kalitesi kirlilik haritaları

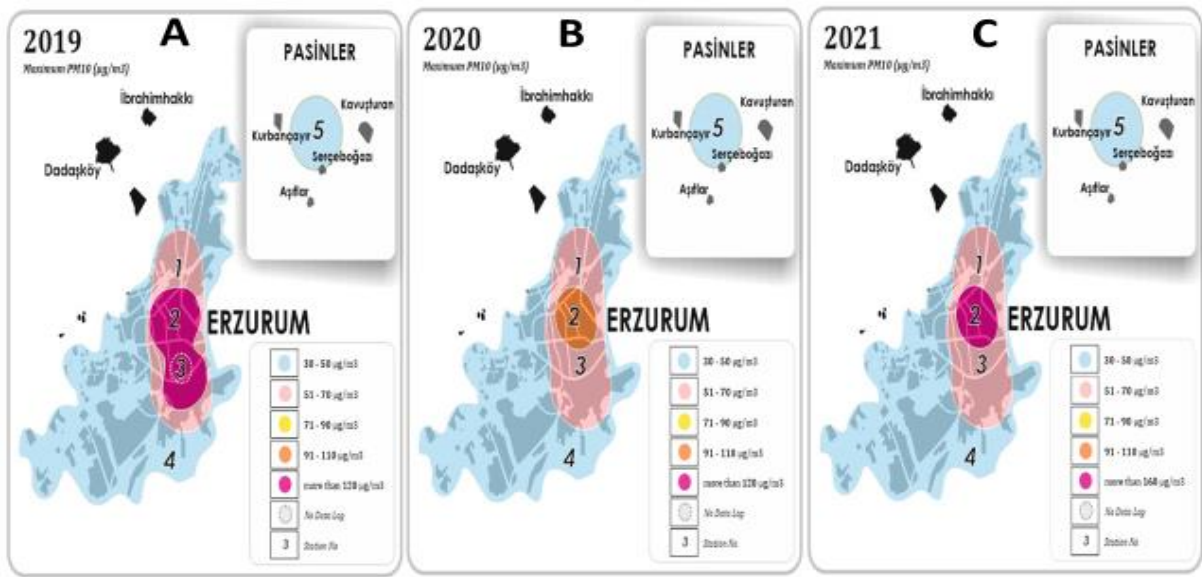
Erzurum kent merkezinde yer alan istasyonlardaki **minimum Pm_{10}** konsantrasyon değerlerine göre alansal dağılım haritaları incelendiğinde, Pm_{10} 'un pre-pandemik dönemde (2019 yılı) kent merkezinde en düşük değerleri, istasyon 1 ve istasyon 4 çevresinde ölçülmüştür.

Pandeminin ve kısıtlamaların başlaması ile birlikte 1. Post-pandemik dönemde kent içerisinde tüm alanlarda Pm_{10} değerleri düşerken en düşük değerler, istasyon 1 ve istasyon 4 çevresinde ölçülmüştür.

2.post-pandemik dönemde kent merkezinde özellikle istasyon 2 çevresinde minimum Pm_{10} değerleri yeniden yükselmektedir. Tüm dönemler boyunca (pre/1.post/2.post-pandemik) kırsal kesimde referans olarak alınan istasyon 5'de hava kalitesi değişmemiştir.

Kent içerisinde Pre-pandemik dönem boyunca minimum PM_{10} değerinin en az olduğu bölge, istasyon 4 çevresidir.

1.ve 2. Post-pandemi dönemlerinde ise; istasyon 1 ve istasyon 4 ‘ün minimum PM_{10} değerleri paralellik arz etmektedir. İstasyon 4’ün bulunduğu bölge turizmin yoğun yerleşimin az olduğu, yüksekliğin ise fazla olduğu, Palandöken dağı eteklerinde yer alan kayak merkezinin çevresidir. Ayrıca kent içerisinde kuzeyden güneye doğru yüksekliğin artışına bağlı olarak, PM_{10} değerleri genelde düşüş göstermektedir. Bu nedenle kentin yüksek kesimlerinde hava kalitesinin arttığı söylenebilir. İstasyon 1’in ise oldukça açık bir alanda ve doğu-batı istikametinde esen rüzgarın en yoğun etki ettiği bölgede yer almasından dolayı PM_{10} değerinin düştüğü rahatlıkla söylenebilir.



A) Pre-pandemik dönem B) 1. Post-pandemik dönem C) 2. Post-pandemik dönem

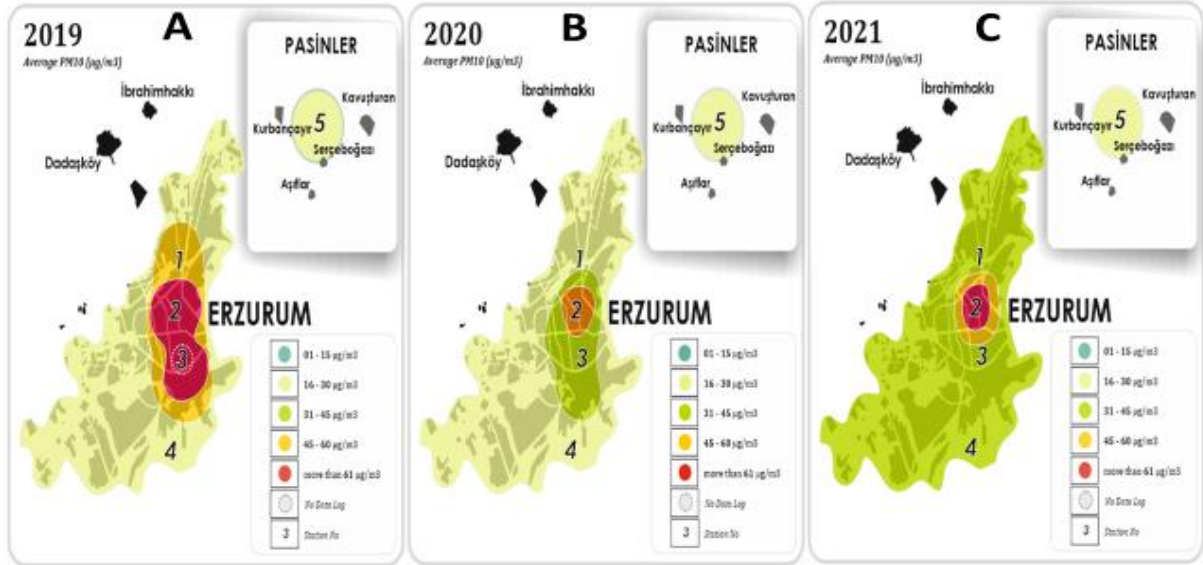
Şekil 46. Erzurum kent merkezinde yer alan istasyonlardaki maksimum PM_{10} konsantrasyon değerlerinden hareketle alansal hava kalitesi kirlilik haritaları

Erzurum kent merkezinde yer alan istasyonlardaki **maksimum PM_{10}** konsantrasyon değerine göre alansal dağılım haritaları incelendiğinde, PM_{10} ‘un pre-pandemi döneminde (2019 yılı) kent merkezinde en yüksek değerleri, istasyon 2 ve istasyon 3 çevresinde ölçülmüştür.

Pandeminin ve kısıtlamaların başlaması ile birlikte 1. ve 2. Post-pandemik dönemde kent içerisinde tüm alanlarda PM_{10} değerleri düşerken en yüksek değer, daha öncede vurguladığımız üzere trafik, ticaret ve insan sirkülasyonunun en yoğun olduğu istasyon 2 çevresinde ölçülmüştür. İstasyon 2 çevresinde; 1. Post-pandemi döneminden 2. Post-pandemi dönemine geçerken ciddi bir artışın olduğu haritadan gözlemlenmektedir. Bu durumu da yine

aşılma oranlarının artışına paralel olarak kısıtlamaların kaldırılması ve insani faaliyetlerin artışına bağlayabiliriz.

Tüm dönemler boyunca (pre-1.post-2.post pandemik) kırsal kesimde referans olarak alınan istasyon 5’de Pm değerleri değişmemiştir.



A) Pre-pandemik dönem B) 1. Post-pandemik dönem C) 2. Post-pandemik dönem

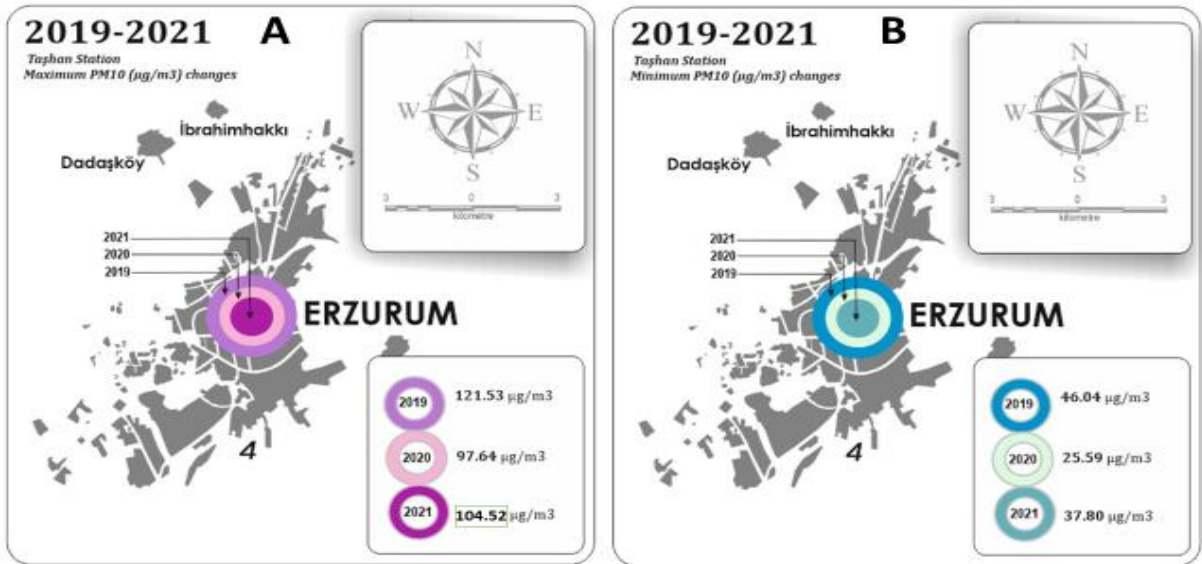
Şekil 47. Erzurum kent merkezinde yer alan istasyonlardaki ortalama Pm₁₀ konsantrasyon değerlerinden hareketle alansal hava kalitesi kirlilik haritaları

Kent merkezinde yer alan istasyonlardaki **ortalama Pm₁₀** konsantrasyon değerine göre alansal dağılım haritaları incelendiğinde; ortalama Pm₁₀ ‘un pre-pandemik dönemde kent merkezinde en yüksek değerleri, istasyon 2 ve istasyon 3 çevresinde görülmüştür.

Kısıtlamaların başlaması ile birlikte 1. Post-pandemik dönemde kent içerisinde tüm alanlarda ortalama Pm₁₀ değerleri düşerken, ortalama en yüksek değerler yukarıda da açıkladığımız üzere istasyon 2 çevresinde görülmüştür.

2. post-pandemik dönemde kent merkezinde özellikle istasyon 2 çevresinde ortalama Pm₁₀ değerleri yeniden yükselişe geçmiştir.

Tüm dönemler boyunca (pre-1.post-2.post pandemik) istasyon 5’de ortalama Pm₁₀ değeri değişmemektedir. Bu nokta kente olan uzaklığı nedeniyle kent içerisindeki ve çevresindeki salınımlardan etkilenmemektedir.

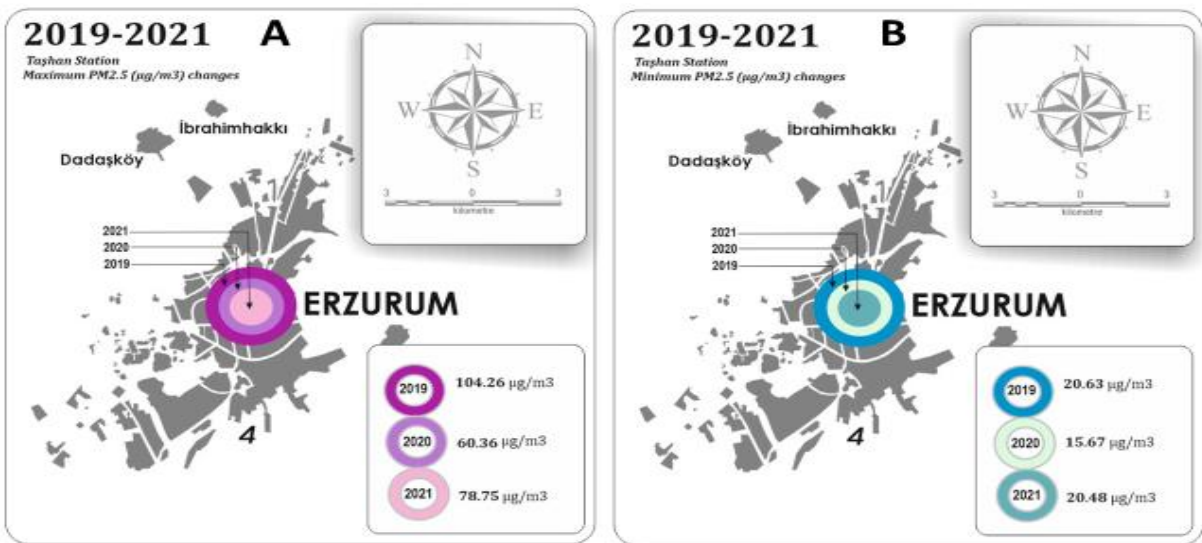


A)Maksimum B) Minimum

Şekil 48. İstasyon 2’de Pm_{10} konsantrasyon değerlerinden hareketle alansal hava kalitesi kirlilik haritaları

Pm_{10} ’un yanı sıra $\text{Pm}_{2,5}$ verisinin de alındığı tek istasyon olan istasyon 2’deki 2019-2021 yılları arasında maksimum ve minimum Pm_{10} konsantrasyon değerlerine göre çizilen alansal dağılım haritaları verilmektedir. Bu dağılım incelendiğinde,

Pm_{10} ‘un maksimum değerlerine göre yayılımın en üst düzeyde olduğu dönemin, Pre-pandemik dönem olduğu görülmektedir. Bu değeri 2.Post-pandemik dönem izlerken, en az yayılımın olduğu dönem ise 1. Post-pandemik dönemdir.Benzer şekilde **Pm_{10} ‘un minimum** değerlerine göre yayılımının en üst düzeyde olduğu dönemin, pre-pandemik dönem olduğu görülmektedir.



A)Maksimum B) Minimum

Şekil 49. İstasyon 2’de $\text{Pm}_{2,5}$ konsantrasyon değerlerinden hareketle alansal hava kalitesi kirlilik haritaları

İstasyon 2'deki 2019-2021 yılları arasındaki maksimum ve minimum $Pm_{2,5}$ konsantrasyon değerine göre çizilen alansal dağılım haritaları ise Şekil 49'de verilmektedir. Bu haritalar incelendiğinde;

$Pm_{2,5}$ 'un maksimum değerlerine göre yayılımın en üst düzeyde olduğu dönemin, Pre-pandemik dönem olduğu görülmektedir. Bu değeri 2. Post-pandemik dönem izlerken, en az yayılımın olduğu dönem ise 1. Post-pandemik dönem olarak görülmektedir. Benzer şekilde **$Pm_{2,5}$ 'un minimum** değerlerine göre yayılımının en üst düzeyde olduğu dönemin, yine pre-pandemik dönem olduğunu söyleyebiliriz.

İstasyon-2 de gerek **Pm_{10}** gerekse **$Pm_{2,5}$** verilerinin maksimum ve minimum ortalama değerlerinin gidişatının paralellik arz ettiği ve 2. Post-pandemik dönemin 2. Altı aylık verileri tamamlandığında (Mart-2022) sıralamanın yine ;

Pre-pandemi > 2. Post-pandemi > 1. Post-pandemi olduğu ve bu durumunda; kapanmayı müteakiben aşılama oranlarının artması neticesinde gerek eğitim kurumlarının açılması gerekse insan sirkülasyonundaki aşırı artış durumuyla örtüştüğü ortaya çıkmıştır.

Ayrıca istasyon 2 ye ait verilerin diğer istasyonlara göre gerek minimum ortalama gerekse maksimum ortalama değerler açısından diğer istasyonların çok üzerinde olduğu da gözlenmiştir.

HYSPLIT Geri Yörünge Analizleri

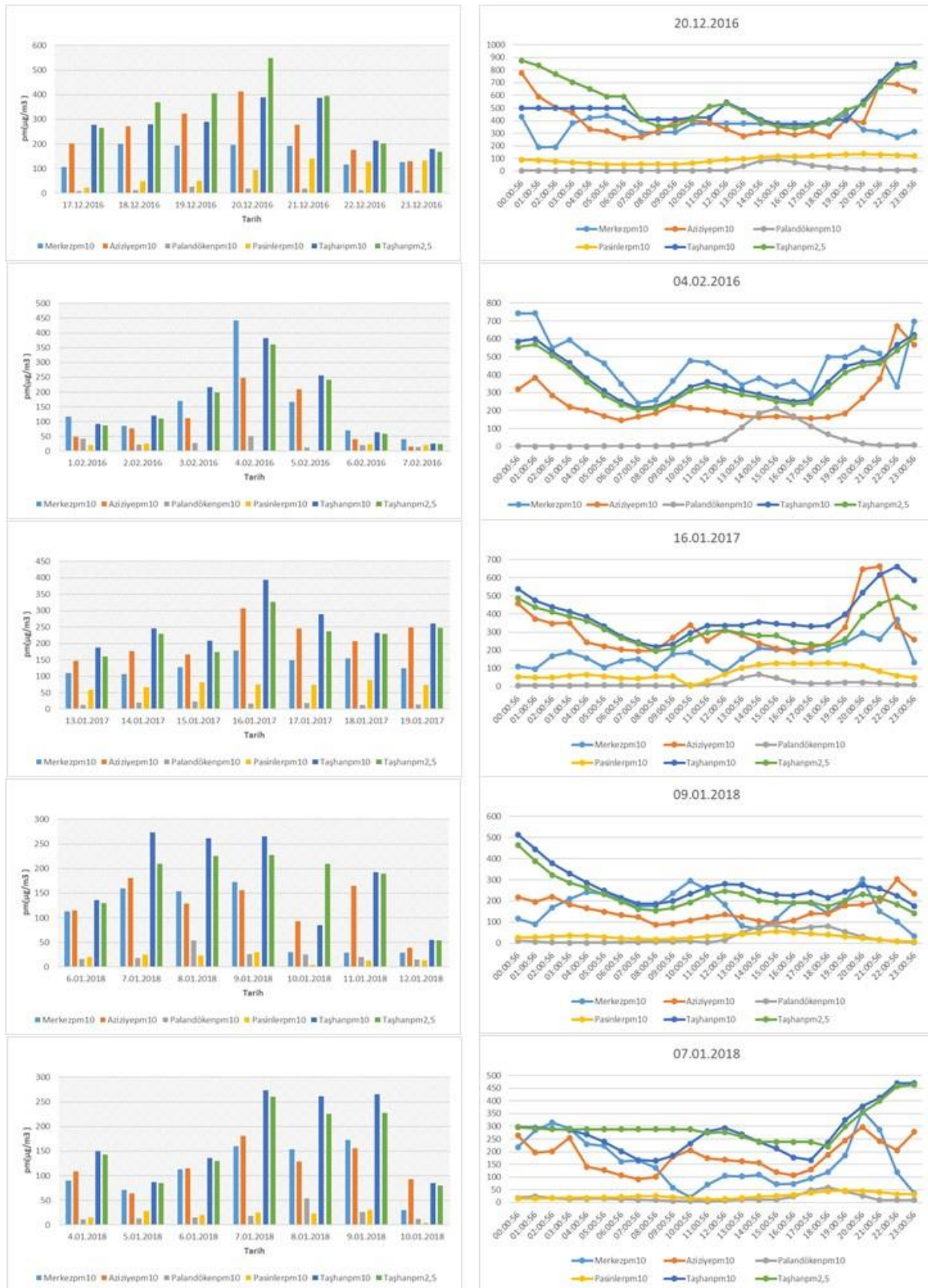
Erzurum kenti için HYSPLIT Geri Yörünge Analizleri, hava kirliliği kaynaklarının belirlenmesinde önemli bir araç olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu analizler, atmosferde taşınan kirleticilerin hareketlerini anlamak ve Erzurum'un hava kalitesini etkileyen faktörleri tespit etmek adına kapsamlı bir inceleme sunmaktadır. HYSPLIT geri yörünge analizleri, özellikle uzak bölgelerden taşınan kirleticilerin kentin atmosferik koşulları üzerindeki etkilerini değerlendirmek için kullanılarak, Erzurum'un hava kalitesi profiline daha derinlemesine bir bakış sağlamayı amaçlamaktadır (Korkmaz and Ceylan 2023).

Araştırma bulguları bölümünde de görüleceği üzere Pm 'lerin zamansal ve mekânsal değişimleri detaylı olarak incelenmiş ve 2016-2023 yılları arasında her yıl için maksimum Pm değerleri belirlenmiştir. Buna göre;

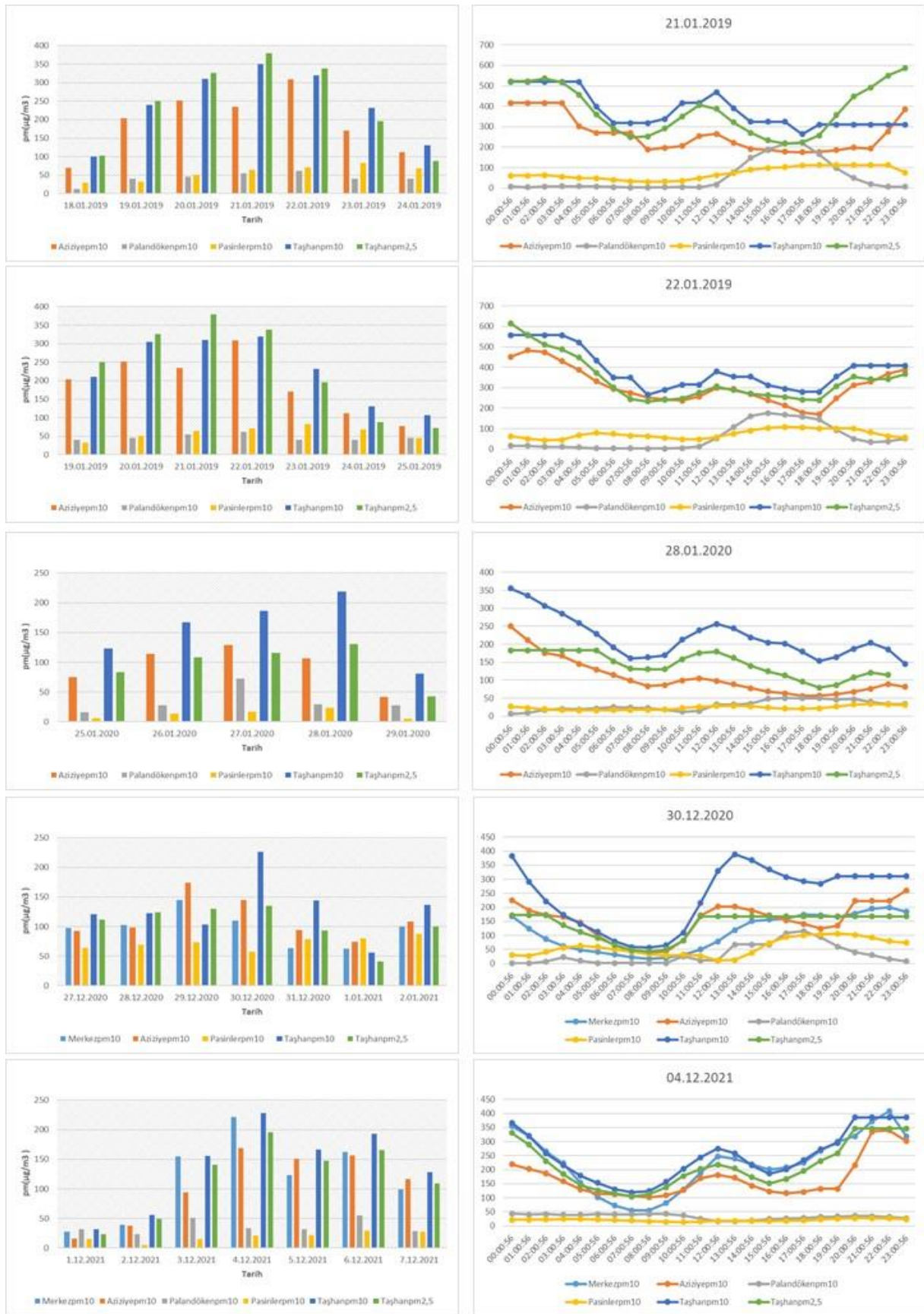
- 2016 yılı için maksimum günlük ortalama Pm_{10} değeri $443,2 \mu g/m^3$ ile 4 Şubat tarihinde iken, maksimum günlük ortalama $Pm_{2,5}$ değeri $549 \mu g/m^3$ ile 20 Aralık tarihinde görülmüştür.

- 2017 yılı için maksimum günlük ortalama Pm_{10} değeri 394,06 $\mu g/m^3$ ile 16 Ocak tarihinde iken, maksimum günlük ortalama $Pm_{2,5}$ değeri 325,77 $\mu g/m^3$ ile yine 16 Ocak tarihinde görülmüştür.
- 2018 yılı için maksimum günlük ortalama Pm_{10} değeri 273,18 $\mu g/m^3$ ile 07 Ocak tarihinde iken, maksimum günlük ortalama $Pm_{2,5}$ değeri 227,71 $\mu g/m^3$ ile 09 Ocak tarihinde görülmüştür.
- 2019 yılı için maksimum günlük ortalama Pm_{10} değeri 309,41 $\mu g/m^3$ ile 22 Ocak tarihinde iken, maksimum günlük ortalama $Pm_{2,5}$ değeri 378,93 $\mu g/m^3$ ile 21 Ocak tarihinde görülmüştür.
- 2020 yılı için maksimum günlük ortalama Pm_{10} değeri 226,11 $\mu g/m^3$ ile 30 Aralık tarihinde iken, maksimum günlük ortalama $Pm_{2,5}$ değeri 130,33 $\mu g/m^3$ ile 28 Ocak tarihinde görülmüştür.
- 2021 yılı için maksimum günlük ortalama Pm_{10} değeri 228,12 $\mu g/m^3$ ile 04 Aralık tarihinde iken, maksimum günlük ortalama $Pm_{2,5}$ değeri 195,18 $\mu g/m^3$ ile 04 Aralık tarihinde görülmüştür.
- 2022 yılı için maksimum günlük ortalama Pm_{10} değeri 479,95 $\mu g/m^3$ ile 23 Mayıs tarihinde iken, maksimum günlük ortalama $Pm_{2,5}$ değeri 153,98 $\mu g/m^3$ ile 08 Ocak tarihinde görülmüştür.

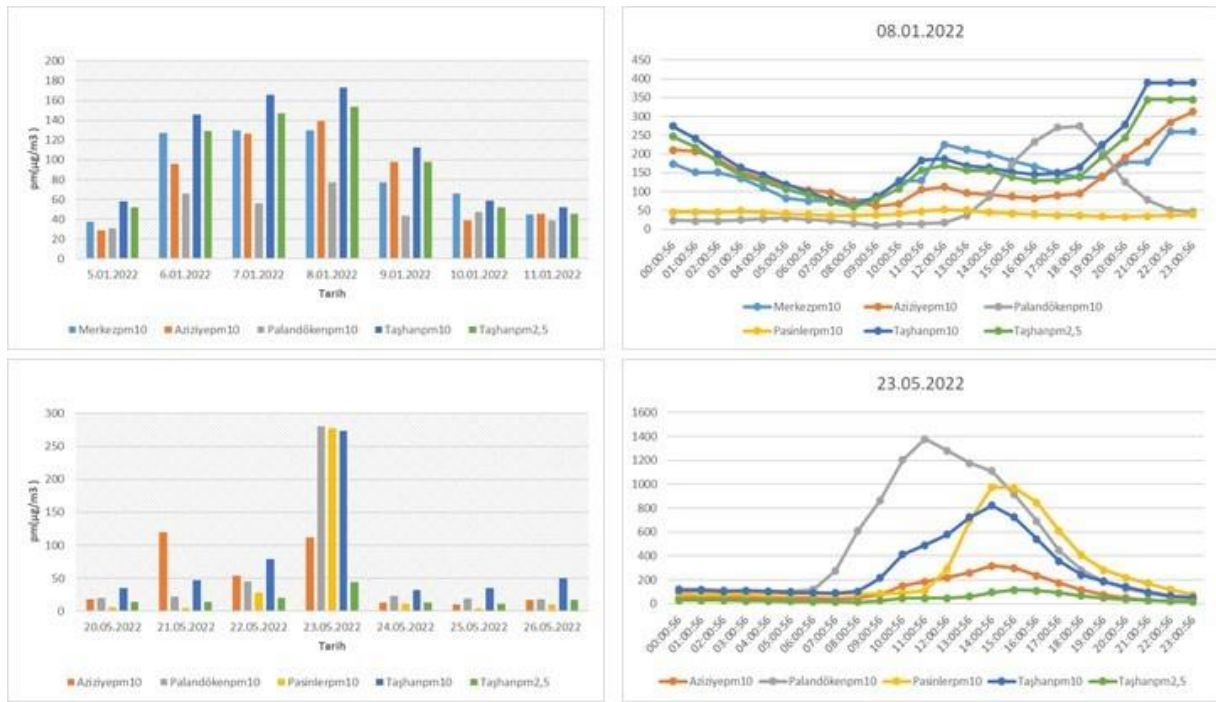
Erzurum'a uzun menzil taşınarak kent merkezinde etkili olan kirleticilerin Pm konsantrasyonlarını artırdığı saatler incelenmiştir. Saatlik veriler incelenerek taşınımının en etkili olduğu saatler dikkate alınarak sonra bu saatlerden geri yörüngeler çizilerek hava kütlelerinin kaynakları ve taşınım yörüngeleri belirlenmiştir.



Şekil 50. 2016-2017-2018 yıllarına ait yerel ölçüm istasyonlarındaki haftalık maksimum değerler ve toz yağışının saatlik değişimi (Merkez-Aziziye-Taşhan-Palandöken-Pasinler İstasyonu)

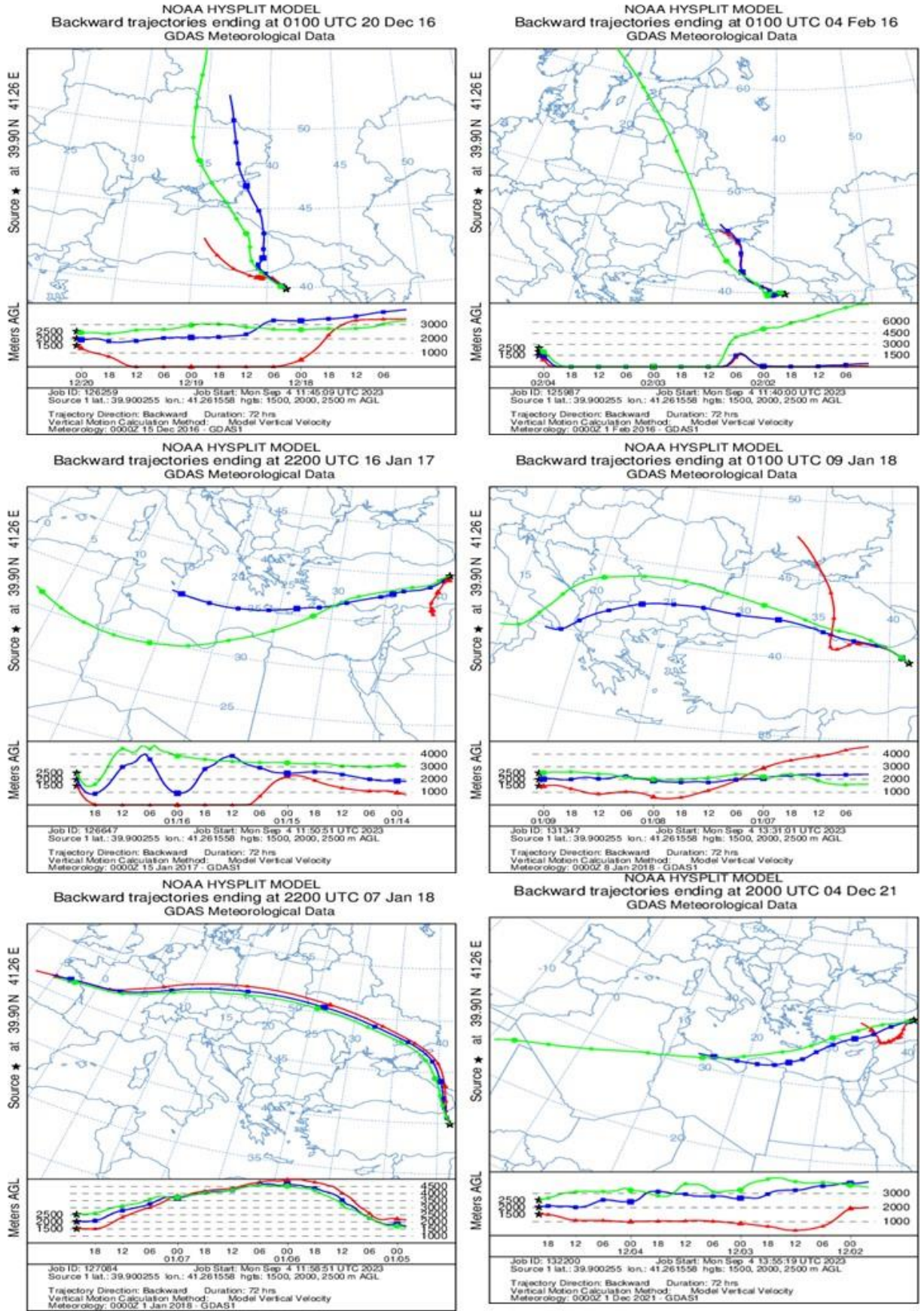


Şekil 51. 2019-2020-2021 yıllarına ait yerel ölçüm istasyonlarındaki haftalık maksimum değerler ve toz yağışının saatlik değişimi (Merkez-Aziziye-Taşhan-Palandöken-Pasinler İstasyonu)

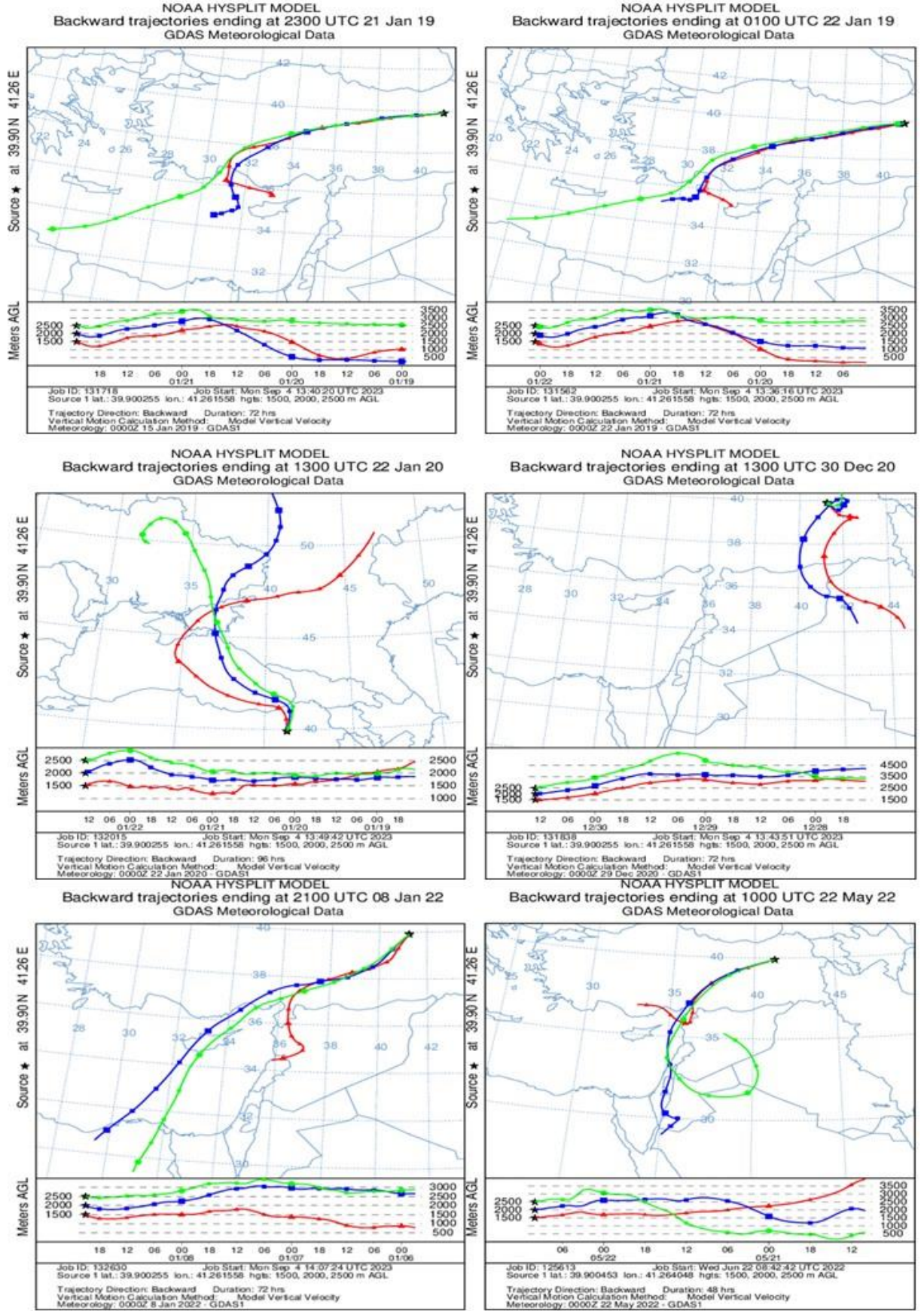


Şekil 52. 2022 yılına ait Yerel ölçüm istasyonlarındaki haftalık maksimum değerler ve toz yağışının saatlik değişimi (Merkez-Aziziye-Taşhan-Palandöken-Pasinler İstasyonu)

Yapılan HYSPLIT geri yörünge (back trajectory) analizlerinde yer seviyesinden 1500, 2000 ve 2500 m yüksekliklerde yörünge analizlerinde, hava akımlarının; maksimum Pm seviyelerinden sorumlu olduğu anlaşılmaktadır. Erzurum merkezli olmak suretiyle 72 saatlik geri yörünge analizleriyle veri alınan tüm yıllarda yıllık maksimum Pm seviyelerinin olduğu günler için uzun menzil taşınımalar belirlenmiştir. Erzurum'a ulaşan tüm yörüngeler ve uzun menzil kaynak bölgeleri Şekil 53 ve 54'de gösterilmiştir.



Şekil 53. 2016-2017-2018-2021 yıllarına ait maksimum Pm seviyelerinin görüldüğü günler için HYSPLIT geri yörünge analizleri



Şekil 54. 2019-2020-2022 yıllarına ait yıllarına ait maksimum Pm seviyelerinin görüldüğü günler için HYSPLIT geri yörünge analizleri

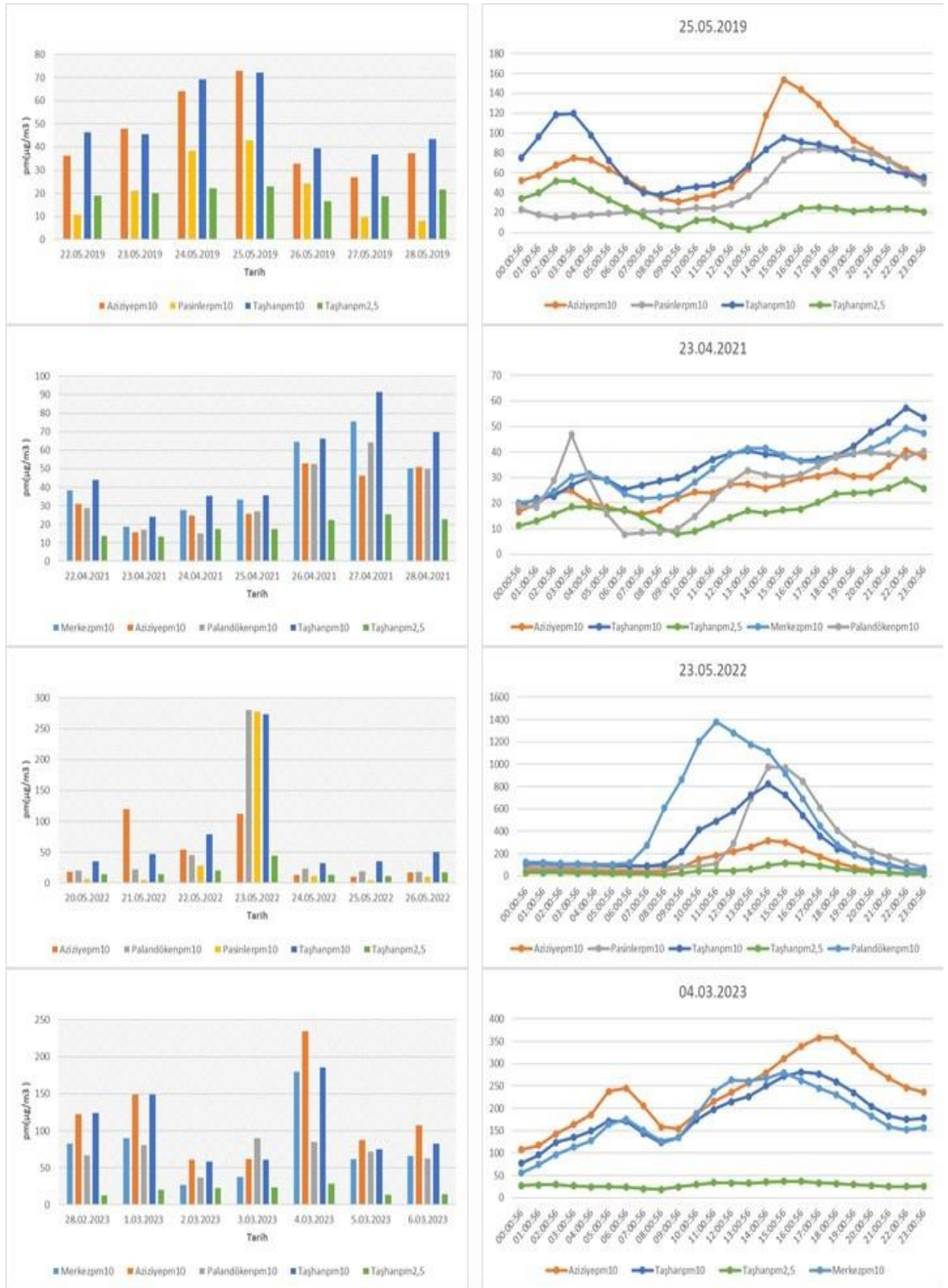
Erzurum kent merkezinde 2016-2023 yılları arasında dört kez yoğun çöl tozu taşınımının olduğu tespit edilmiştir. Bu tarihler;

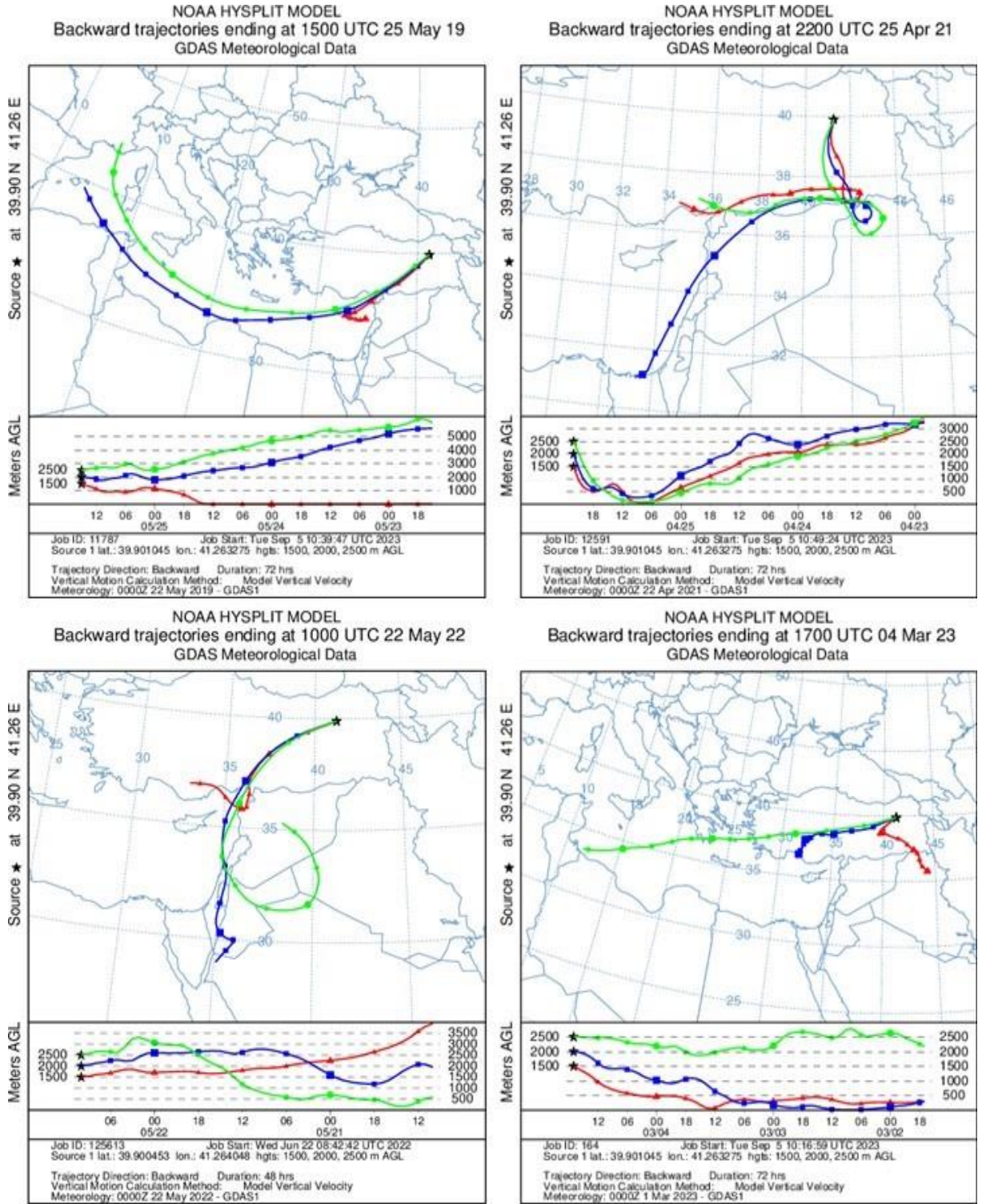
- 25 Mayıs 2019
- 25 Nisan 2021
- 22 Mayıs 2022
- 4 Mart 2023 dır.



Şekil 55. Kent merkezindeki yoğun toz taşınımı ve yağışı örnek fotoğrafı (23 Mayıs 2022)

Kent içerisinde yer alan istasyonlarda toş taşınımının olduğu günlerde belirgin pik artışlarının olduğu net bir şekilde görülmektedir. Günlük ortalama Pm verileri; normal seyrinden bir anda anormal bir artışla ayrılmaktadır. Kent merkezine 40 km uzaklıkta olan ve arka plan kırsal referans ölçüm noktası olan Pasinler istasyonunda da Pm verilerinde (Pm_{10}) artışın olması çöl tozu taşınımının yalnızca kent merkezinde değil çevrede de etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum özellikle Pm lerde meydana gelen bu artışın kent kaynaklı bir etkenden dolayı olmadığını uzun menzil taşınım sonucu bölgeye Pm taşındığını kanıtlamaktadır. Ayrıca bu dönemde hava kalitesinde etkili olan diğer kirleticilerin miktarlarında genel anlamda bir artışın olmadığı ancak Pmlerde anormal bir artışın olduğu söylenebilir. Erzurum’a ulaşan çöl tozu bulutlarının kent merkezinde etkili olduğu ve Pm konsantrasyonlarını artırdığı saatler incelenmiş; bu saatlerde kent içerisinde bu artışına neden olabilecek herhangi insani veya meteorolojik faktör bulunamamıştır. Bu nedenle bu saatlerdeki anormal artışın uzun menzil taşınım ile açıklanabileceği ortadadır. Saatlik veriler incelenerek çöl tozu taşınımının en etkili olduğu saatler belirlendikten sonra bu saatlerden geri yörüngeler çizilerek hava kütlelerinin kaynakları ve taşınım yörüngeleri belirlenmiştir.

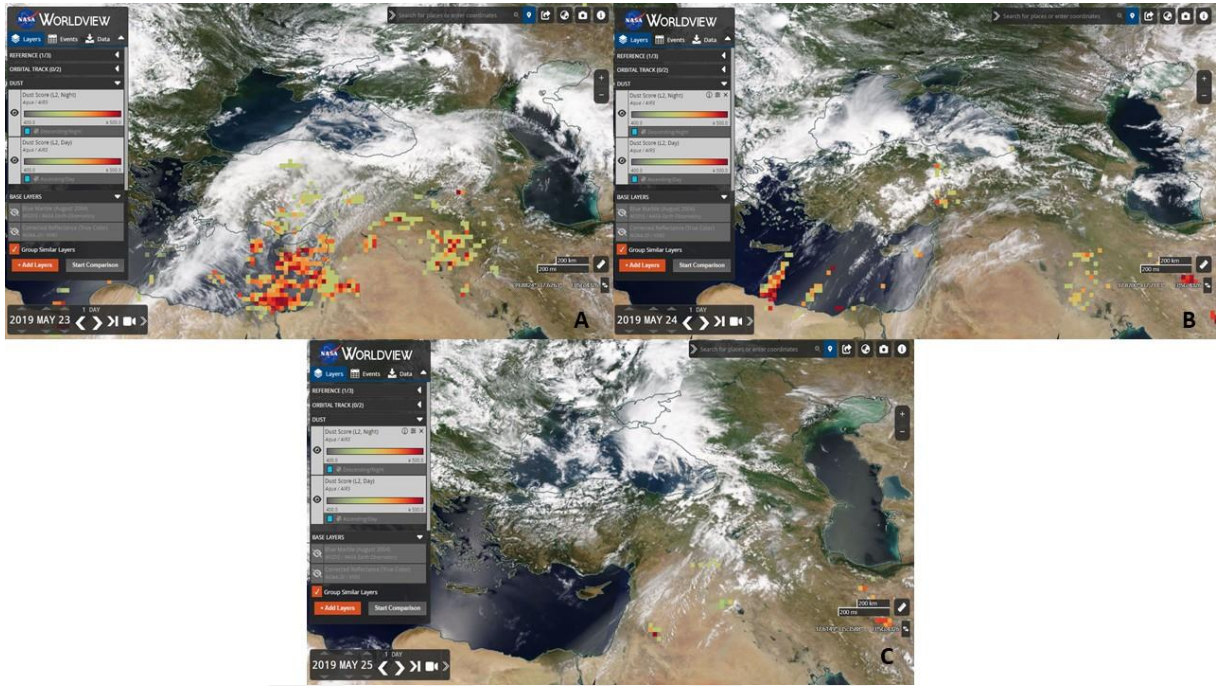




Şekil 57. 2019-2021-2022-2023 yıllarına ait toz taşınımlarının HYSPLIT geri yörünge analizleri

NASA Worldwiew renkli gerçek zamanlı dünya görüntüleri incelenerek toz taşınımının dağılışı detaylı olarak belirlenmiştir. Uydu Fotoğraflarında taşınım öncesi tarihlerde (22 Mayıs 2019, 22 Mayıs 2022 ve 2 Mart 2023) (Şekil 58A-58A-58A) ve taşınım sonrası tarihlerinde (24 Mayıs 2019, 24 Mayıs 2022 ve 4 Mart 2023) (Şekil 60C-60C-60C) toz skoru (dust score) ve uydu görüntülerinde toz gözükmezken; özellikle konsantrasyon değerlerinin pik yaptığı ve

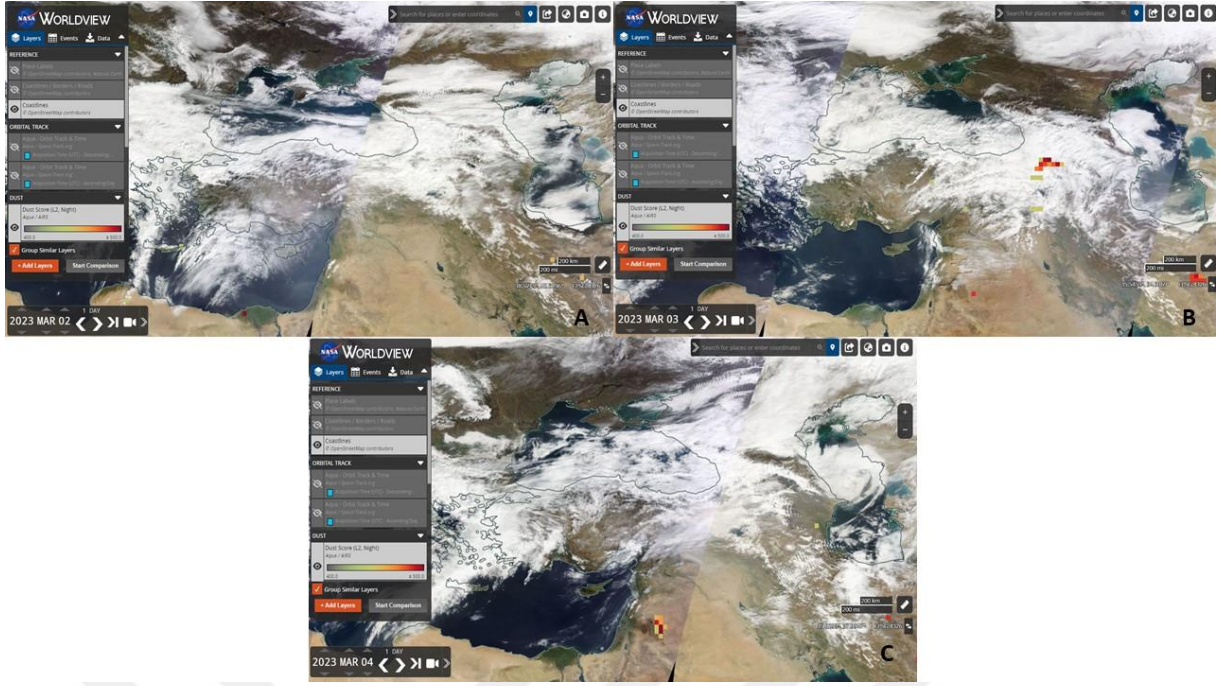
sahada da toz yağışının gözlemlendiği tarihlerde (23 Mayıs 2019, 23 Mayıs 2022 ve 3 Mart 2023) (Şekil 59B-59B-59B) Erzurum kent merkezi çevresinde toz yağışının olduğu ve bu bölgede toz yoğunluğunun (toz skoru oldukça yüksek) oldukça fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 58. Toz taşınımı ve yağışının gerçek zamanlı uydu görüntüleri 2019A)23 Mayıs B)24 Mayıs ve C) 25 Mayıs tarihleri (NASA 2023)



Şekil 59. Toz taşınımı ve yağışının gerçek zamanlı uydu görüntüleri 2022 A)22 Mayıs B)23 Mayıs ve C)24 Mayıs tarihleri (NASA 2023)



Şekil 60. Toz taşınımı ve yağışının gerçek zamanlı uydu görüntüleri 2023A)2 Mart B)3 Mart ve C) 4 Mart tarihleri (NASA 2023)

HYSPLIT back-trajectory modeli yardımıyla ve 72 saatlik geri yörüngeler incelenerek; bu partiküllerin kaynaklarının ülkemizin güneyinde yer alan ülkelerin (Irak Ürdün Lübnan Suriye, Kuzey Afrika) çöl bölgelerinden Doğu Anadolu'ya gelen hava kütleleri olduğu belirlenmiştir. Bu hava kütlelerinin, ildeki PM_{10} ve $PM_{2.5}$ konsantrasyonlarını arttırdığı belirlenmiştir ve bu olay uydu fotoğraflarıyla da desteklenmiştir. Çöl tozlarının en etkili olduğu günde görüş mesafesi azalmış insan sağlığı olumsuz etkilenmiş ve çevresel problemlerden biri olan hava kalitesinin azaldığı gözlenmiştir. Sonuç olarak; Türkiye, konumu itibarıyla çöl bölgelerine sahip ülkelere yakın veya komşu ve hava akımları sonucu uzun menzil taşınım ile bu çöl tozlarından etkilenebilecek bir bölgede yer almaktadır. Bu nedenle sıklıkla yaşanan ve çevre ve insan sağlığı üzerinde çok önemli etkilere sahip çöl tozu taşınımının akademik anlamda daha detaylı şekilde incelenmesi gereklidir. Çöl tozu içeriğindeki Pmlerin karakterizasyonlarının fizikokimyasal özelliklerinin ve kaynaklarının ve yörüngelerinin daha detaylı şekilde incelenmesi elzemdir. Kentte yaşayan insanların çöl tozu taşınım dönemlerinde etkilenebilecekleri ve gelen Pmlerin kent atmosferinde pek çok probleme (Hava kalitesinin azalması, görüş mesafesinin düşmesi, çamur yağışları, tarihi yapıların Pmlerden etkilenmesi, bitkilerin yaprak dokularında tortu birikmesi, yüzeysel sulara Pm geçişi, bazı endüstriyel yapılarda toz birikmesi vb.) neden olacağı bir gerçektir. Gerekli tedbirlerin kişisel ve toplumsal bazda alınmasının bir zorunluluk olduğu anlaşılmıştır. Bu noktada çöl tozu taşınımın fark edilmesi ile birlikte il idaresi tarafından gerekli tedbirlerin hızlıca alınması gerekmektedir. Gerekli görülmesi halinde tehlike altındaki grupların bu olayın gözlemlendiği dönemlerde kapalı

alandaki kalmalarının tavsiye edilmesi ve akıllı kent yönetim sistemleri ile halkın bu olayın yanı sıra ekstrem hava olaylarına karşı hızlıca uyarılmasını sağlayacak bir sistemin geliştirilmesi önem arz etmektedir.

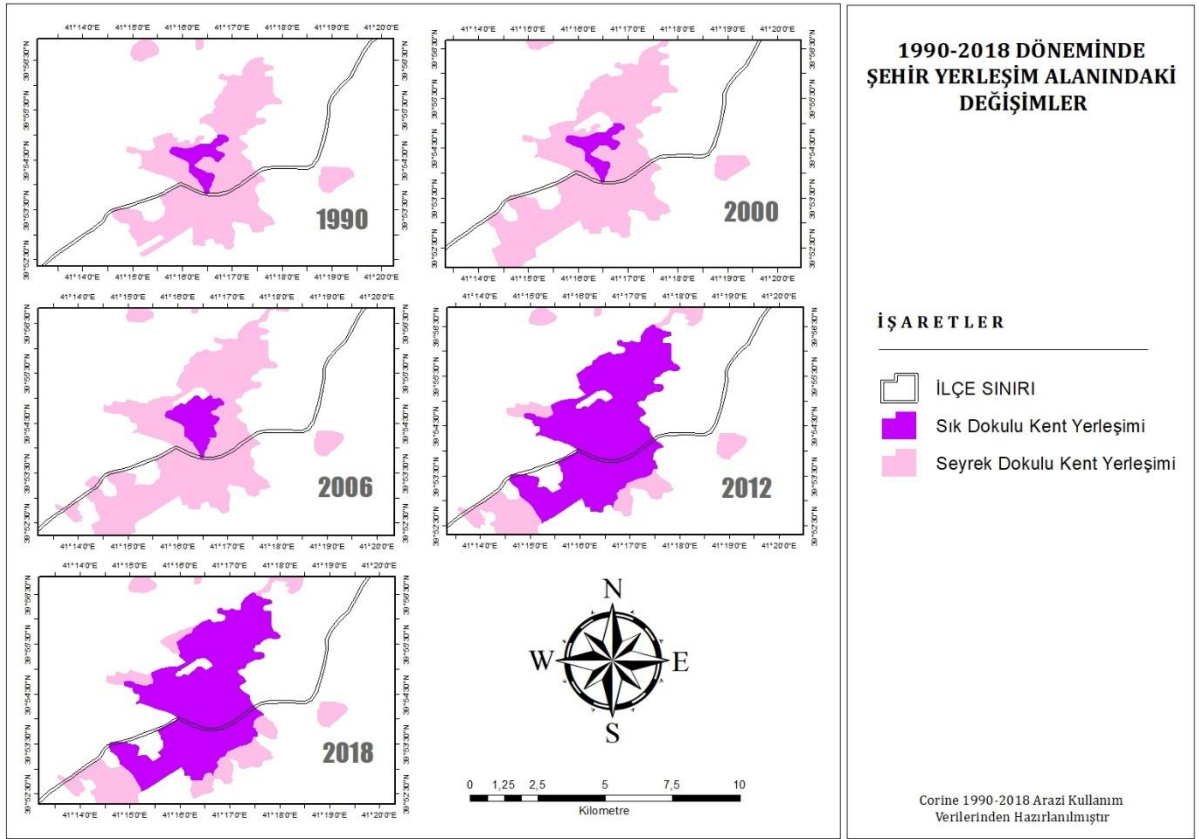
Gelecekte Erzurum Kent Merkezi Büyüme Oranının ve Bölgelerin Tahmini

Erzurum kent merkezinin alınan uydu fotoğrafları detaylı şekilde incelenmiş 1984-2023 yılları içerisindeki kent dokusu değişimi belirlemiştir. Kent gelişiminin son 40 yılı incelendiğinde kurulacak yeni yerleşim alanlarının hangi merkezde konuşlandırılacağı ve bu bölgelerin kent hava kalitesini nasıl etkileyebileceği belirlenebilir.

Erzurum'un kent merkezinin gelişimine dair 1984-2023 yılları arasında Erzurum'un şehirleşme haritası incelendiğinde, başlangıç noktasından itibaren özenle yönetilen bir büyüme sürecine tabi tutularak, ekonomik, sosyal ve çevresel faktörleri dengede tutma amacının ön plana çıktığı görülmektedir. Erzurum'un şehirleşme haritası 1984 yılına ait uydu görüntülerinde, bir çekirdek noktada kümelenmiş durumda iken daha sonraki yıllarda özellikle havaalanı yani batı yönünde ve kuzey yönde gelişmiştir. Güneyde Palandöken dağları doğal bir set oluşturmaktadır ve kent genel anlamda batı, kuzey ve kuzey batı yönde gelişmektedir. 2023 yılına doğru ilerledikçe, kentin genişleme eğiliminde olduğu ve bu genişleme sürecinin özellikle belirli bir yöne odaklandığı görülmektedir (Sevindi ve Demir 2019).

Bu büyüme eğiliminin altında yatan faktörler arasında ekonomik aktivitelerin yoğunlaştığı alanlar, altyapı projelerinin gelişimi ve nüfus artışı gibi etkenler bulunmaktadır. Ayrıca, kentin özellikle kentin güneyindeki Palandöken sıradağları nedeniyle kuzey yöne doğru uzanan ovanın kullanım alanına pozitif etkisi ve çevresel faktörler de büyüme yönünü etkilemiştir.

Erzurum'un kent planlamasındaki bu belirgin genişleme, şehrin sadece fiziksel büyümesini değil, aynı zamanda kent hava kalitesini de etkilemiş olabilir. Bu süreçte, çeşitli mahallelerin oluşumu, ticaret, sanayi ve kurumların ihtiyaca binaen artması gibi unsurlar, hava kalitesinin kentin kuzeyinde düşük olmasına neden olmuştur.



Şekil 61. Erzurum kenti'nin 1990-2018 devresindeki gelişimi

Erzurum Şehri'nin yatay yöndeki mevcut yayılım düzeni, gelişimin Çat-Tortum yol güzergâhlarını takiben güneybatı-kuzeydoğu yönlü sürdüğünü göstermektedir (Sevindi, 2019). Ancak şehir kuzeydoğuda sulak alan koruma bölgesi sınırına dayanmış olduğundan, bu yöndeki gelişim hemen durmuştur. Doğudaki büyüme askeri alanlar ve Nenehatun Milli Parkı; batı yönlü gelişim ise Atatürk Üniversitesi arazileri ve Organize Sanayi Bölgesi arazileri nedeniyle sınırlı kalmıştır (Sevindi, 2022; Doğanay, 1989). Sonuç olarak Erzurum Şehri güneydoğu ve güneybatı yönlerinde, dağlık alanlara doğru büyümeye devam etmektedir (Sevindi, 2018).

Erzurum'un kent merkezinin belirgin bir yönde genişlemesi, şehirdeki hava kirliliği üzerinde olumsuz çeşitli etkilere neden olmuştur. Bu genişleme sürecinde, doğu batı yönde genişleyen trafik ağı ve artan trafik yoğunluğu ile birlikte trafik kaynaklı emisyonların ve hava kirliliğinin potansiyel olarak bu doğrultuda arttığı söylenebilir. Ayrıca, yeni sanayi ve ticaret alanlarının kuzey batı yönde oluşturulması; endüstriyel faaliyetlerin artmasına ve zararlı emisyonların (hakim rüzgâr yönü olan kuzey-doğu/güney-batı etkisiyle) kent merkezine ve rakımı düşük olan kuzey yönüne taşınımını artırmaktadır. Batı yönünde gelişen yeni yerleşim alanlarındaki konut ve ticari yapılar da enerji tüketimini artırarak fosil yakıtların kullanımını artırmakta, bu da hava kalitesini olumsuz etkileyen kirletici emisyonlarına yol açmaktadır. Aynı zamanda, genişleme süreciyle yeşil alanların azalması ve kentin kuzeyinde yer alan doğal sulak alanların ve sucul ekosistemlerin tahrip olması, hava kalitesi üzerindeki olumsuz etkileri

artırmaktadır. Ancak, etkiler genellikle kent planlaması, çevresel düzenlemeler ve sürdürülebilir kalkınma stratejileri gibi faktörlere bağlı olarak azaltılabilir.

Gelecekteki $Pm_{2.5}$ Konsantrasyonlarının Makine Öğrenmesi Yardımıyla Tahmini

$Pm_{2.5}$ değerlerinin makine öğrenmesi yöntemleriyle belirlenmesi, hava kalitesi izleme sistemlerinin geliştirilmesinde bir etkili yaklaşım sunmaktadır. Yapılan analizler ve uygulanan makine öğrenmesi modelleri üzerinde gerçekleştirilen denemeler, çeşitli önemli bulgular ortaya koymaktadır. Bu bölümde, $Pm_{2.5}$ değerlerinin makine öğrenmesi kullanılarak belirlenmesi konusundaki araştırma temel bulguları özetlemektedir.

İlk olarak, Pm ler arasında yüksek bir kolerasyon ilişkisinin varlığı nedeniyle Pm_{10} ile $Pm_{2.5}$ arasındaki ilişki araştırılmış; ocak 2016 ile aralık 2022 yılları arasındaki Pm_{10} verileri kullanılarak 2023 yılı ilk altı ayı (Ocak –Temmuz) $Pm_{2.5}$ verileri tahmin edilmeye çalışılmıştır. Daha sonra sırasıyla meteorolojik parametreler, gaz verileri ve trafik verileri denemelere eklenerek $Pm_{2.5}$ verileri tahminlenmiştir. Bu analiz, Pm_{10} değerlerinin yanı sıra; meteorolojik koşulların, trafik yoğunluğunun ve zamanın $Pm_{2.5}$ düzeyleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca, modelin sınırlamalarını anlamak ve iyileştirme potansiyellerini değerlendirmek amacıyla çeşitli deneme-yanılma süreçleri uygulanmıştır.

Öte yandan, eğitilen makine öğrenmesi modellerinin başarılı bir şekilde $Pm_{2.5}$ değerlerini tahmin ettiği gözlemlenmiştir. Linear Regression, Stepwise Linear Regression, Quadratic SVM, Cubic SVM, Ensemble Boosted Trees, Gaussian Process Regression Matern 5/2 GPR, Gaussian Process Regression Exponential GPR, Gaussian Process Regression Squared Exponential GPR ve Gaussian Process Regression Rational Quadratic GPR modelleri değişkenler arasındaki ilişkileri öğrenme yeteneği sayesinde, $Pm_{2.5}$ tahmininde etkili modeller olarak kullanılabilecek güçlü araçlar olarak ortaya çıkmıştır.

Tüm veriler kullanılarak bağımsız değişkenler için 322 deneme gerçekleştirilmiştir ve optimum model performansı ve optimum bağımsız değişkenlerin yer aldığı denemeler belirlenmiştir. Daha sonra optimum modeller ve bağımsız değişkenler yardımıyla 2023 yılı ilk altı ayı için $Pm_{2.5}$ değerleri tahmin edilmiştir. Makine öğrenmesi sonucu elde edilen tahmin değerleri ile gerçek değerler karşılaştırılmış ve kolerasyon ilişkisi incelenmiştir (EK 4. Meteorolojik Parametreler İle Kirlilik Parametreleri Arasındaki Detaylı Kolerasyon Tabloları). Denemelerde kullanılan tüm öğrenme modellerinin performans ölçekleri ve modellere girdi oluşturan değişkenler Ekler bölümünde yer alan EK 3. Optimum tahmin modelleri performans değerleri ve kullanılan öğrenme modelleri tablosu'nda detaylı olarak sunulmuştur.

Pm₁₀ değerleri kullanılarak Pm_{2.5} değerlerinin tahmini

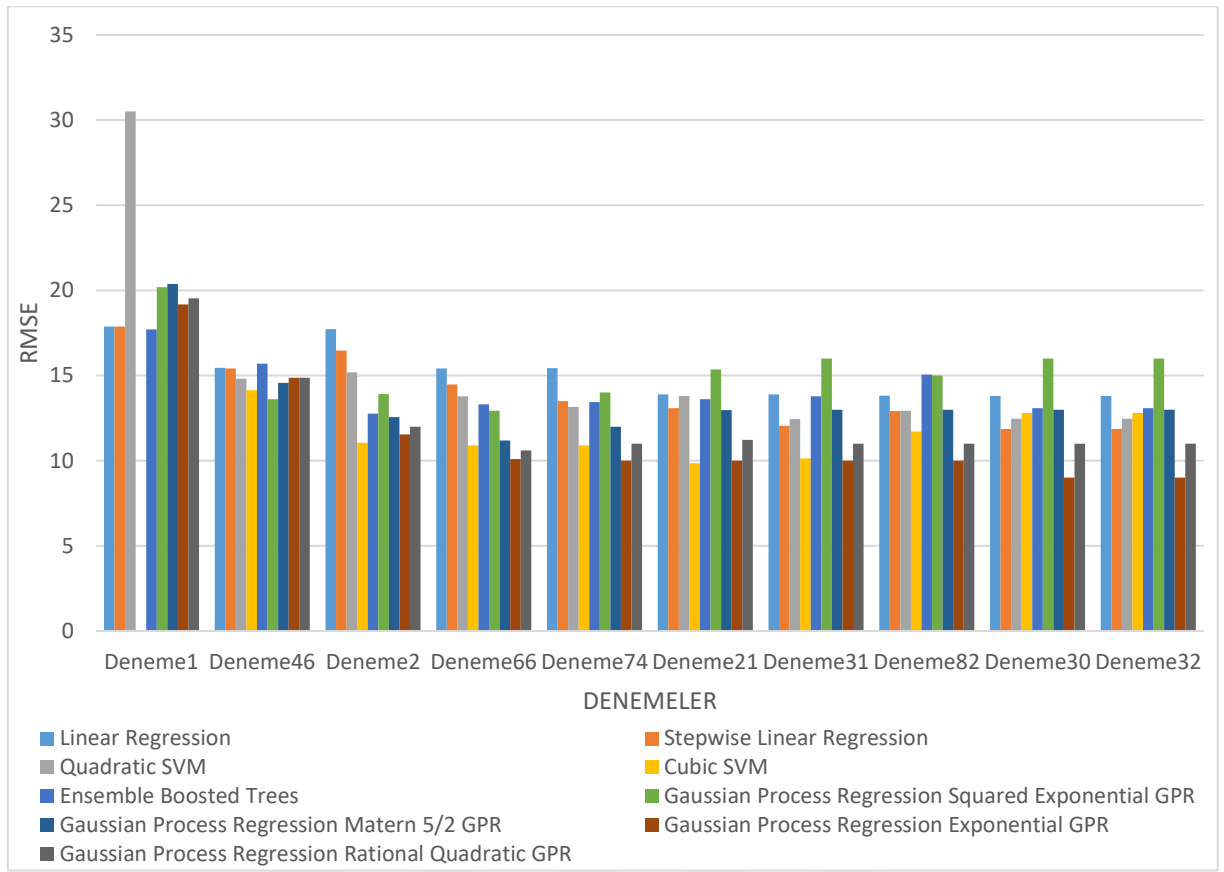
Bu bölümde, Pm₁₀ değerlerin kullanılarak Pm_{2.5} değerlerinin tahmin edilmesine odaklanmıştır. Pm₁₀ ve Pm_{2.5} hava kalitesinin belirlenmesinde kritik öneme sahip partikül madde düzeyleridir. Bu bağlamda, Pm₁₀ değerlerinin Pm_{2.5} değerlerini tahmin etmek için kullanılabilirliği ve etkinliği üzerine kapsamlı bir analiz gerçekleştirilmiştir.

İlk olarak, Pm₁₀ ve Pm_{2.5} değerleri arasındaki doğrusal ve doğrusal olmayan ilişkilerin anlaşılması amacıyla veri seti üzerinde detaylı bir analiz yapılmıştır. Yapılan bu analiz, Pm₁₀ değerlerinin Pm_{2.5} düzeylerini belirleme potansiyeline işaret etmiş ve bu iki parametre arasındaki ilişkiyi ortaya koymuştur (Şekil 33).

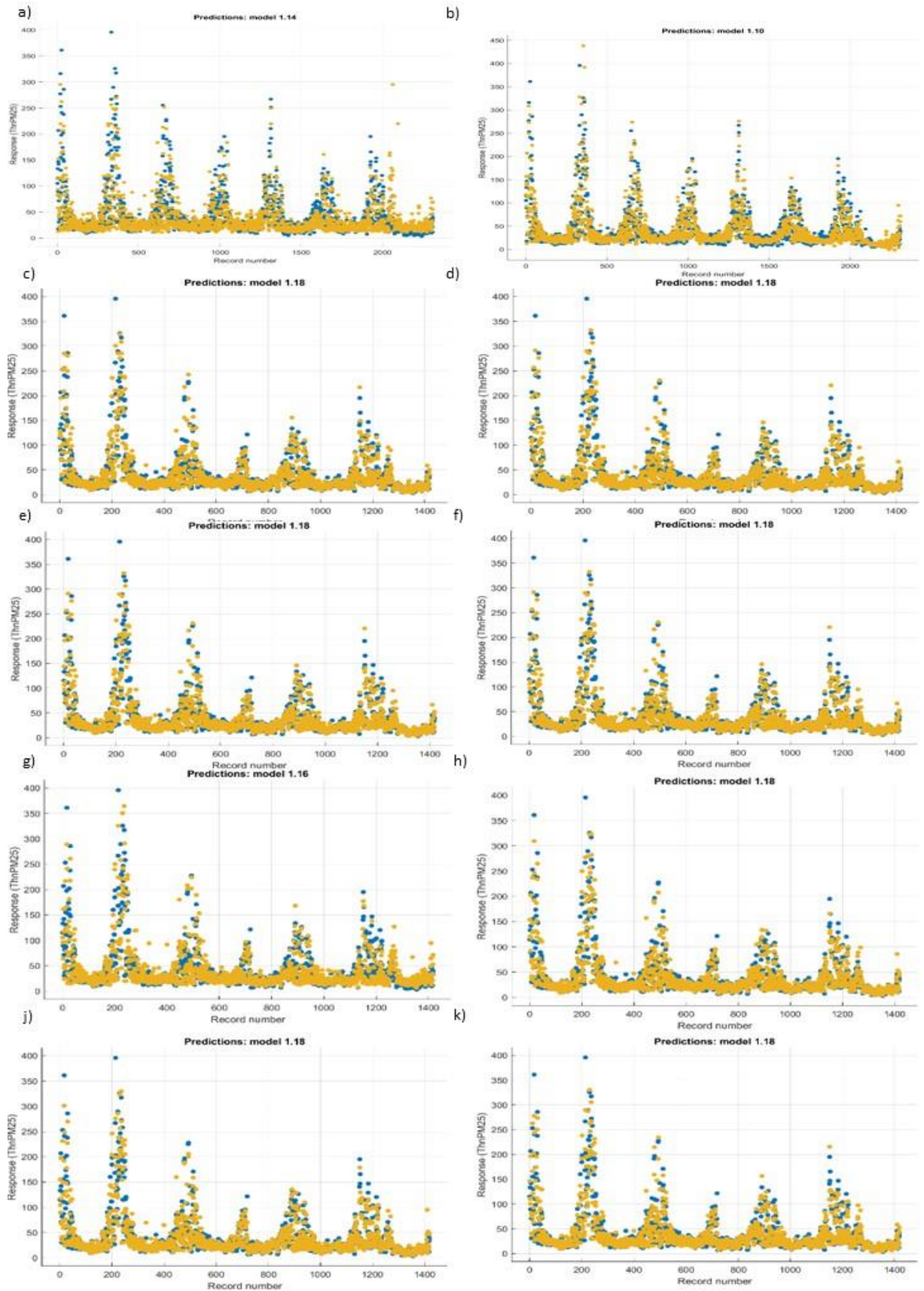
Ayrıca, Pm₁₀'nun Pm_{2.5} tahminindeki rolünü daha iyi anlamak için meteorolojik koşullar, trafik yoğunluğu ve diğer değişkenlerde ilerleyen aşamalarda modellere eklenerek modeller geliştirilmiş modellerin öğrenme yeteneğini artırılarak Pm_{2.5} tahminlerinde daha kapsamlı bir yaklaşım sunulmuştur. Pm₁₀ verileri kullanılarak yapılan tahminlerde en etkili öğrenme modelleri, değişkenler ve RMSE değerleri en düşük denemeler aşağıdaki tabloda sunulmuştur.

Tablo 29. Pm₁₀ Verileri Kullanılarak Yapılan Tahminlerde En Etkili Öğrenme Modelleri ve Değişkenler

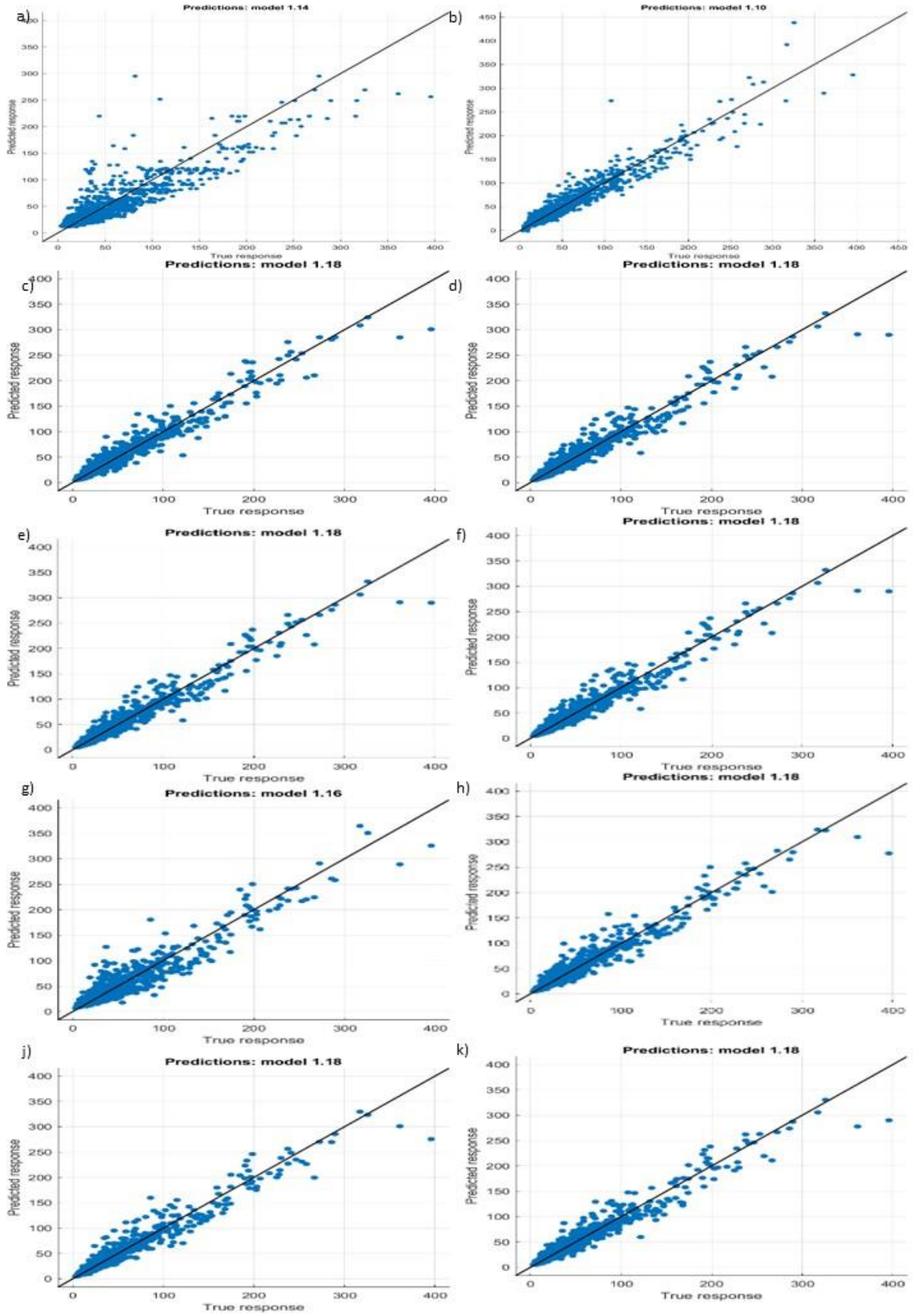
Deneme No	Performans Ölçeği				Öğrenme Modelleri	Değişkenler
	RMSE	R ²	MSE	MAE		
Deneme1	17.701	0.81	313.3	10.298	Ensemble Boosted Trees	ThnPM10
Deneme46	13.617	0.90	185.4	8.6129	Gaussian Process Regression Squared Exponential GPR	ThnPM10, PdkPm10
Deneme2	11.056	0.93	122.2	6.4856	Cubic SVM	ThnPM10, D1(yıl), D2(ay)
Deneme66	10.097	0.94	101.9	5.735	Gaussian Process Regression Exponential GPR	ThnPM10, PdkPm10, D1(yıl), D2(ay), Konum+Yükseklik
Deneme74	10.058	0.94	101.1	5.58	Gaussian Process Regression Exponential GPR	ThnPM10, PdkPm10, AzzPM10, D1(yıl), D2(ay)
Deneme21	9.8552	0.95	96.53	5.6214	Gaussian Process Regression Exponential GPR	ThnPM10, MkzPM10, PdkPm10, D1(yıl), D2(ay), Konum
Deneme31	9.7359	0.95	94.78	5.4236	Gaussian Process Regression Exponential GPR	ThnPM10, MkzPM10, PdkPm10, AzzPM10, D1(yıl), D2(ay), Konum
Deneme82	9.4839	0.95	89.943	5.3023	Gaussian Process Regression Exponential GPR	ThnPM10, MkzPM10, PdkPm10, AzzPM10, D1(yıl), D2(ay), Yükseklik
Deneme30	9.4839	0.95	99.94	5.3023	Gaussian Process Regression Exponential GPR	ThnPM10, MkzPM10, PdkPm10, AzzPM10, D1(yıl)+D2(ay)
Deneme32	9.3839	0.95	89.94	5.3023	Gaussian Process Regression Exponential GPR	ThnPM10, MkzPM10, PdkPm10, AzzPM10, D1(yıl), D2(ay), Konum, Yükseklik



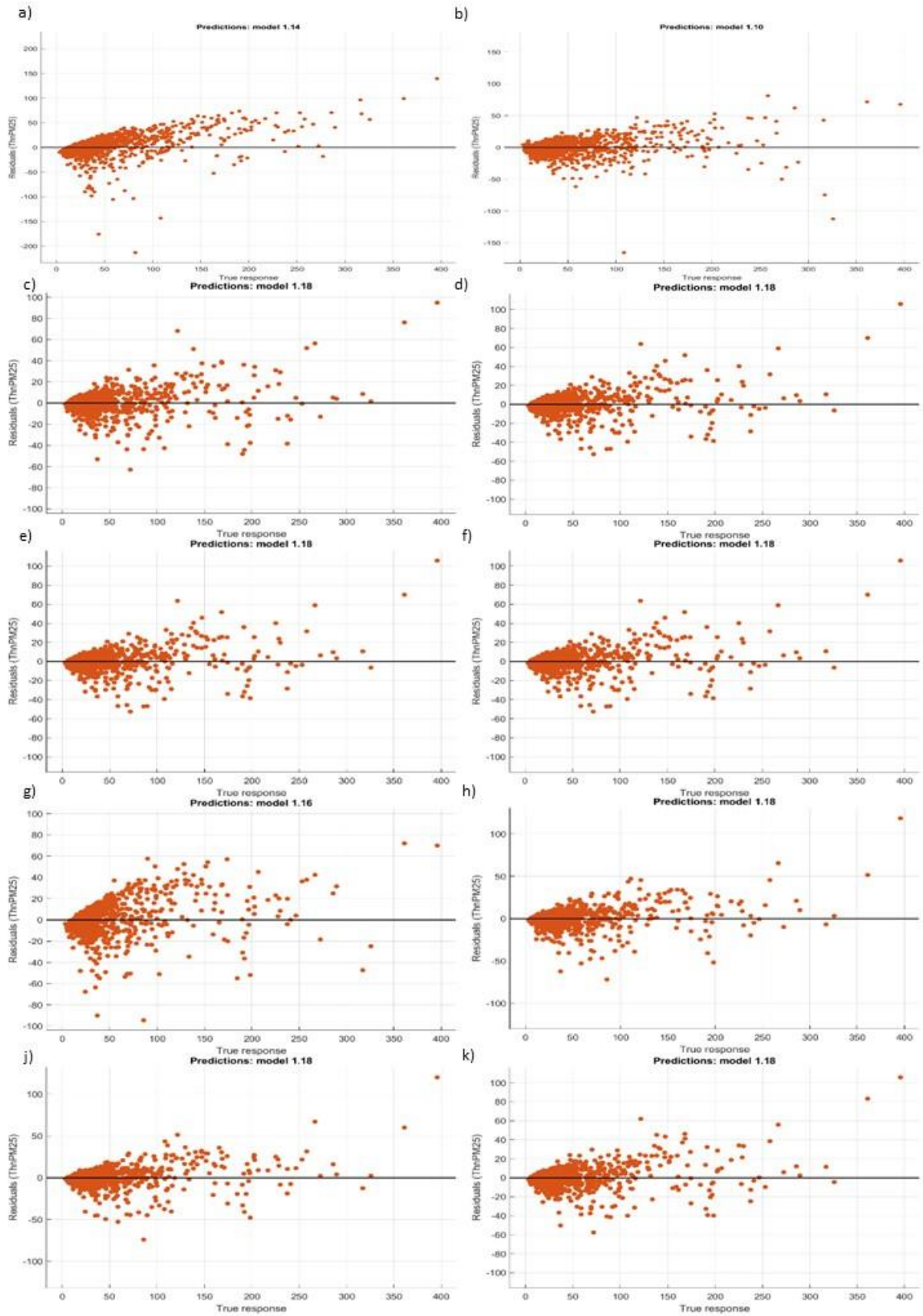
Şekil 62. Pm_{10} verileri kullanılarak yapılan tahminlerde en etkili öğrenme modelleri RMSE değerleri



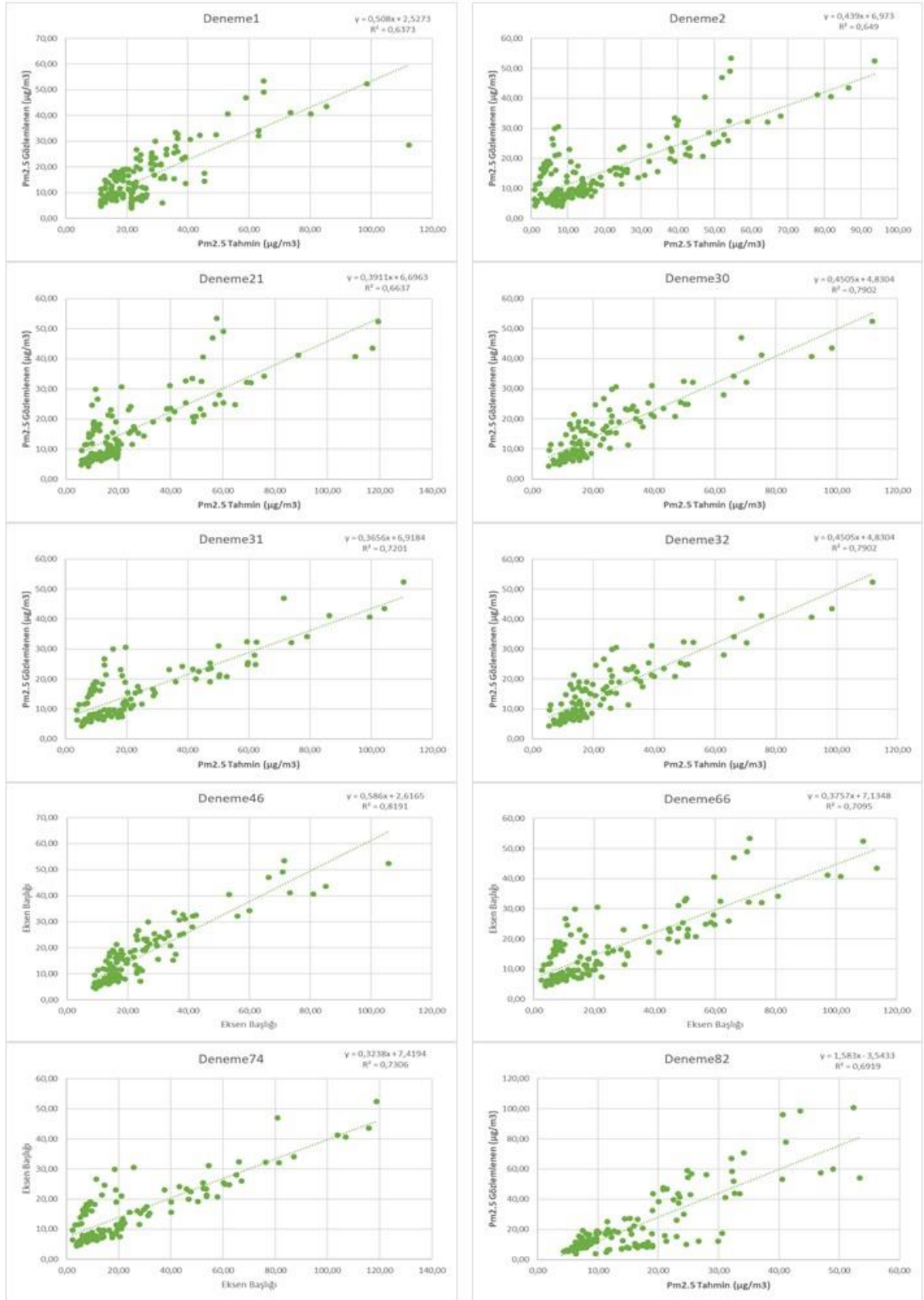
Şekil 63. Pm_{10} verileri kullanılarak yapılan tahminlerde en etkili öğrenme modelleri tahmin değerleri (sarı) ve gerçek değerler (mavi) program çıktıları a)Deneme 1, b)Deneme 2, c)Deneme 21, d)Deneme 30, e)Deneme 31, f)Deneme 32, g)Deneme 46 h)Deneme 66 j)Deneme 74 ve k)Deneme 82



Şekil 64. Pm_{10} verileri kullanılarak yapılan tahminlerde en etkili öğrenme modelleri kolerasyon ilişkisi program çıktıları a)Deneme 1, b)Deneme 2, c)Deneme 21, d)Deneme 30, e)Deneme 31, f)Deneme 32, g)Deneme 46 h)Deneme 66 j)Deneme 74 ve k)Deneme 82



Şekil 65. Pm_{10} verileri kullanılarak yapılan tahminlerde en etkili öğrenme modelleri gerçek değerden sapma saçılım grafikleri program çıktıları a)Deneme 1, b)Deneme 2, c)Deneme 21, d)Deneme 30, e)Deneme 31, f)Deneme 32, g)Deneme 46 h)Deneme 66 j)Deneme 74 ve k)Deneme 82



Şekil 66. Pm₁₀ verileri kullanılarak eğitilen öğrenme modelleri sonucu tahmin edilen değerler ile 2023 yılı ilk altı ay gerçek değerler kolerasyon ilişkisi



Şekil 67. Pm₁₀ verileri kullanılarak eğitilen öğrenme modelleri sonucu tahmin edilen değerler ile 2023 yılı ilk altı ay gerçek değerler arasındaki zamansal ilişki

Çalışma sürecinde, Pm_{10} değerlerinin $Pm_{2.5}$ tahmininde kullanılmasının, hava kalitesi izleme sistemlerinde yeni bir yaklaşım sunabileceğini gösteren önemli veri tabanlı kanıtlar elde edilmiştir. Bu yaklaşım, özellikle $Pm_{2.5}$ değerlerinin doğrudan ölçümünün zor olduğu durumlarda, hava kalitesi tahminlerini güçlendirmek ve hava kalitesi yönetimini geliştirmek için potansiyel sunmaktadır. Ayrıca, gelecekteki çalışmaların, bu yaklaşımın farklı coğrafi bölgelerde ve değişen iklim koşullarında nasıl performans gösterebileceğinin daha ayrıntılı bir şekilde incelemesi gerekmektedir. Bu araştırmanın katkıları, hava kalitesi izleme ve yönetimine yeni bir perspektif sunarak, gelecekteki çevresel araştırmalara rehberlik edebilir.

Pm_{10} verileri ve meteorolojik parametreler kullanılarak $Pm_{2.5}$ değerlerinin tahmini

Bu bölümde; meteorolojik parametrelerin kullanılarak $Pm_{2.5}$ partikül madde düzeylerinin tahmin edilmesine odaklanmıştır. Meteorolojik koşullar, atmosferik partikül madde düzeyleri üzerinde mekanik parçalanma ile belirgin bir etkiye sahiptir. Bu bağlamda, meteorolojik parametrelerin $Pm_{2.5}$ tahminindeki rolünü değerlendirmek amacıyla kapsamlı bir analiz gerçekleştirilmiştir.

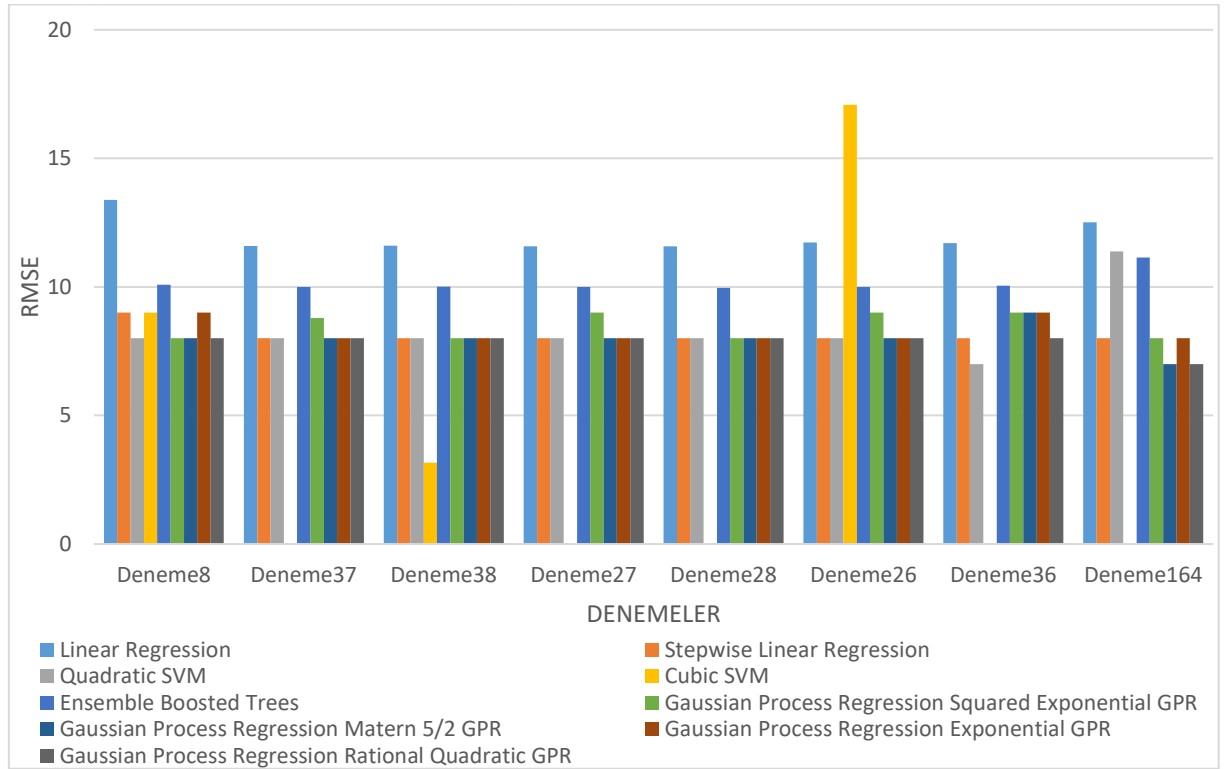
Bu modellerin eğitim sürecinde, meteorolojik değişkenlerin mevsimsel ve günlük değişimler dikkate alınmış ve modellerin bu değişkenlere uyum sağlama yetenekleri göstermiştir. Meteorolojik parametreler kullanılarak yapılan tahminlerde en etkili öğrenme modelleri ve değişkenler ve RMSE değerleri en düşük denemeler aşağıdaki tabloda sunulmuştur.

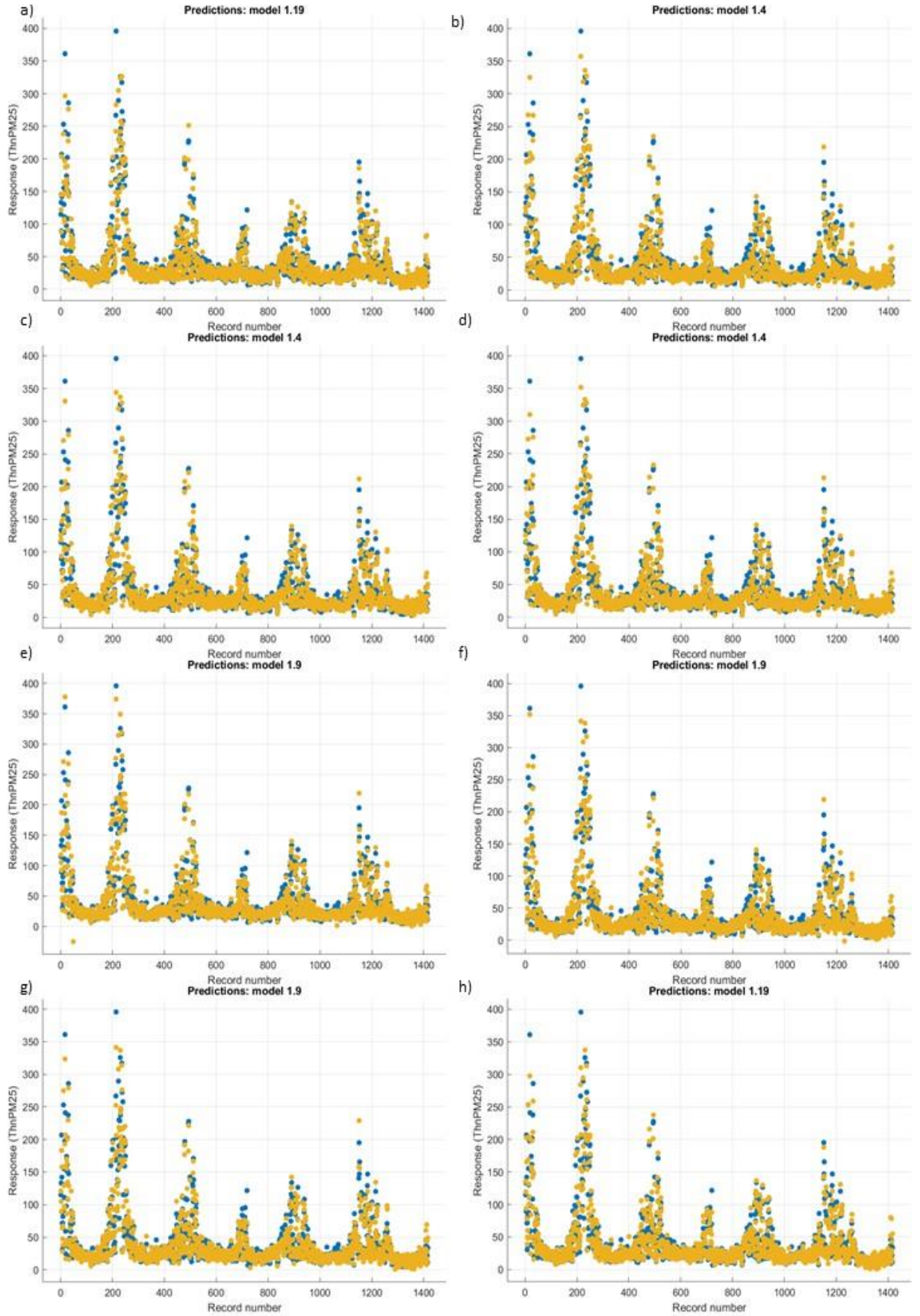
Tablo 30. Meteorolojik Parametreler Kullanılarak Yapılan Tahminlerde En Etkili Öğrenme Modelleri ve Değişkenler

Deneme No	Performans Ölçeği				Öğrenme Modelleri	Değişkenler
	RMSE	R ²	MSE	MAE		
Deneme8	7.8894	0.97	62.243	4.5769	Gaussian Regression Quadratic	ThnPM10, D1(yıl), D2(ay), Sıcaklık, Rüzgar Hızı, Yağış Miktarı, Nem, Basınç, Güneşlenme Süresi
Deneme37	7.6404	0.97	58.376	4.8593	SVM Quadratic	ThnPM10, MکزPM10, PdkPM10, AzzPM10, D1(yıl), D2(ay), Konum, Yükseklik, Sıcaklık, Rüzgar Hızı, Yağış Miktarı, Nem, Basınç
Deneme38	7.5795	0.97	57.448	4.902	SVM Quadratic	ThnPM10, MکزPM10, PdkPM10, AzzPM10, D1(yıl), D2(ay), Konum, Yükseklik, Sıcaklık, Rüzgar Hızı, Yağış Miktarı, Nem, Basınç, Güneşlenme Süresi
Deneme27	7.5746	0.97	57.374	5.0851	Stepwise Regression	Linear ThnPM10, MکزPM10, PdkPM10, D1(yıl), D2(ay), Konum, Yükseklik, Sıcaklık, Rüzgar Hızı, Yağış Miktarı, Nem, Basınç

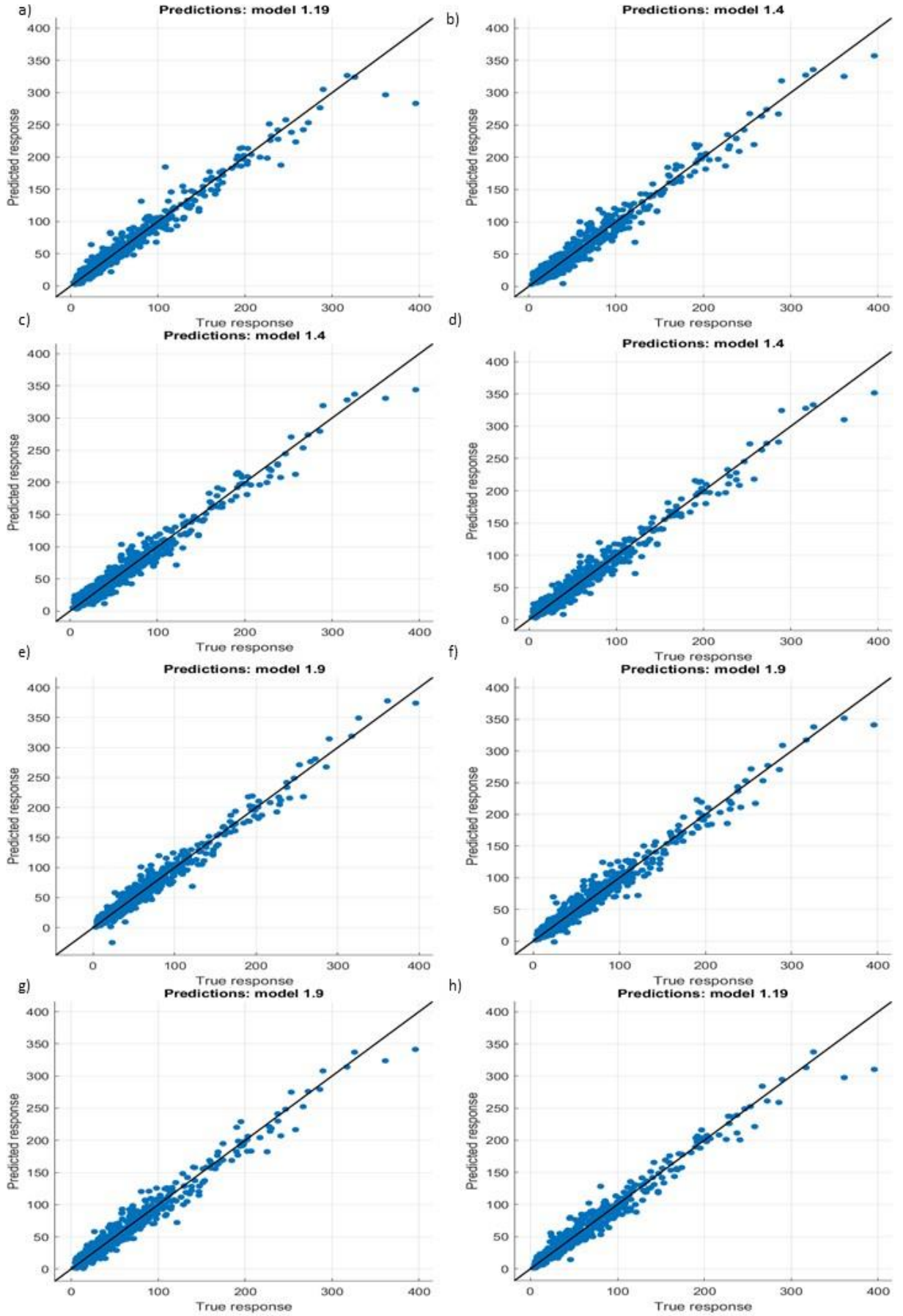
Tablo 30. (devamı)

Deneme28	7.5677	0.97	57.27	5.0654	Stepwise Regression	Linear	ThnPM10, MkzPM10, PdkPm10, D1(yıl), D2(ay), Konum, Yükseklik, Sıcaklık, Rüzgar Hızı, Yağış Miktarı, Nem, Basınç, Güneşlenme Süresi
Deneme26	7.5422	0.97	56.885	5.0248	Stepwise Regression	Linear	ThnPM10, MkzPM10, PdkPm10, D1(yıl), D2(ay), Konum, Yükseklik, Sıcaklık, Rüzgar Hızı, Yağış Miktarı, Nem
Deneme36	7.3928	0.97	54.654	4.7881	SVM Quadratic		ThnPM10, MkzPM10, PdkPm10, AzzPM10, D1(yıl), D2(ay), Konum, Yükseklik, Sıcaklık, Rüzgar Hızı, Yağış Miktarı, Nem
Deneme164	7.3713	0.97	54.336	4.5025	Gaussian Regression Quadratic	Process Rational GPR	ThnPM10+ PdkPm10, D1(yıl), D2(ay), Konum, Yükseklik, Sıcaklık, Rüzgar Hızı, Yağış, Nem

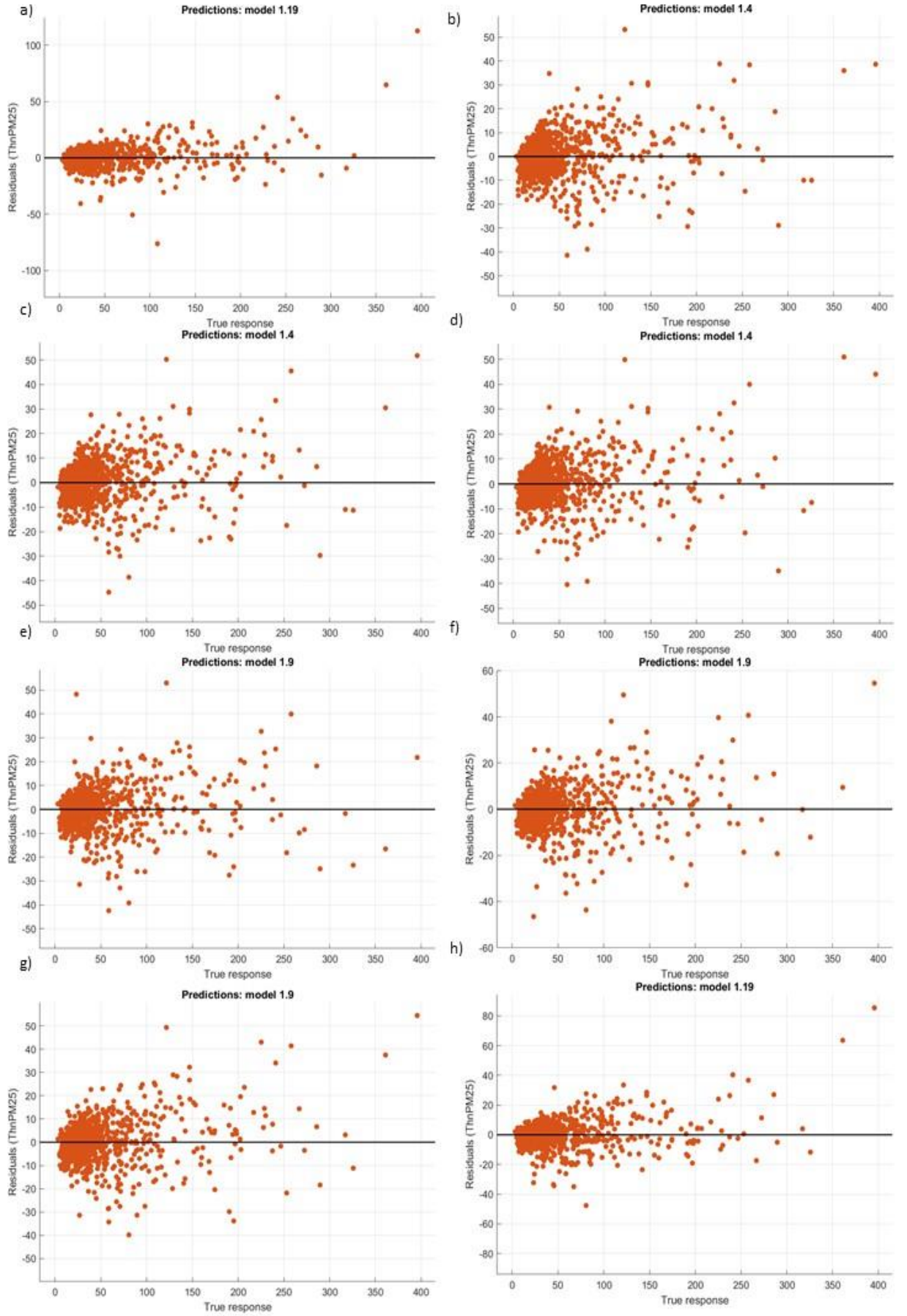
**Şekil 68.** Meteorolojik parametreler kullanılarak yapılan tahminlerde en etkili öğrenme modelleri RMSE değerleri



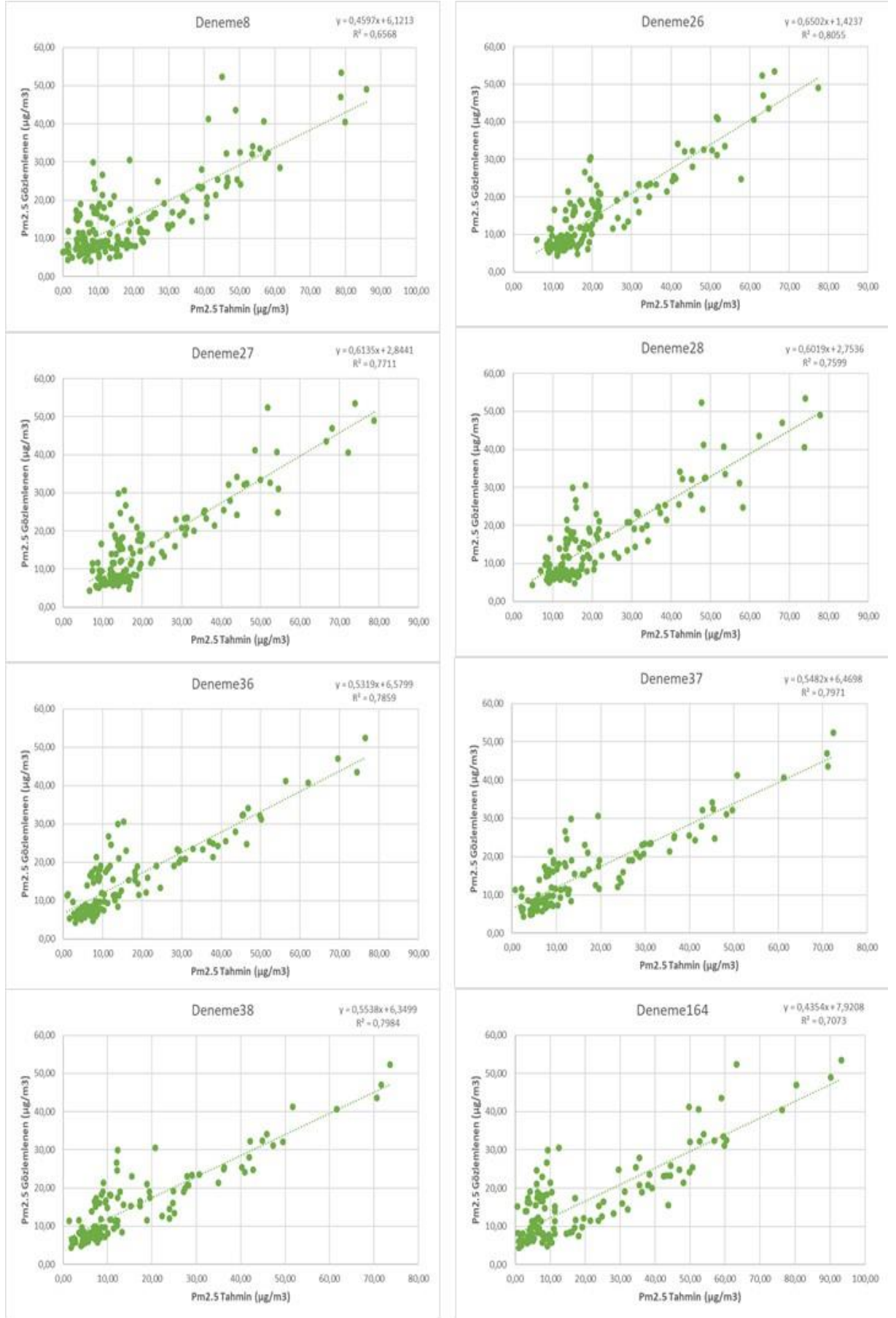
Şekil 69. Meteorolojik parametreler kullanılarak yapılan tahminlerde en etkili öğrenme modelleri tahmin değerleri (sarı) ve gerçek değerler (mavi) program çıktıları a)Deneme 8, b)Deneme 26, c)Deneme 27, d)Deneme 28, e)Deneme 36, f)Deneme 37, g)Deneme 38 ve h)Deneme 164



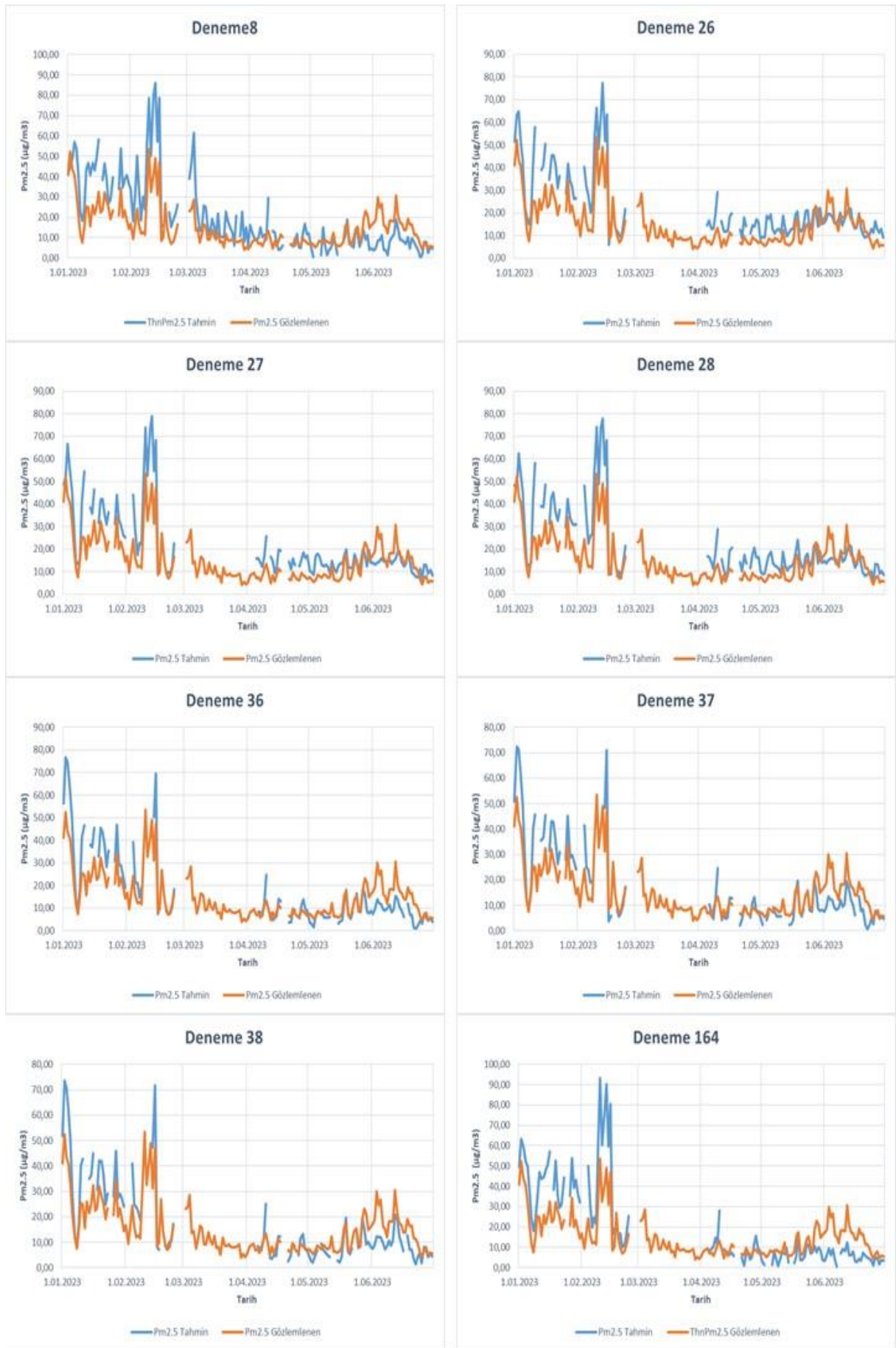
Şekil 70. Meteorolojik parametreler kullanılarak yapılan tahminlerde en etkili öğrenme modelleri kolerasyon ilişkisi program çıktıları a)Deneme 8, b)Deneme 26, c)Deneme 27, d)Deneme 28, e)Deneme 36, f)Deneme 37, g)Deneme 38 ve h)Deneme 164



Şekil 71. Meteorolojik parametreler kullanılarak yapılan tahminlerde en etkili öğrenme modelleri gerçek değerden sapma saçılım grafikleri program çıktıları a)Deneme 8, b)Deneme 26, c)Deneme 27, d)Deneme 28, e)Deneme 36, f)Deneme 37, g)Deneme 38 ve h)Deneme 164



Şekil 72. Meteorolojik parametreler kullanılarak eğitilen öğrenme modelleri sonucu tahmin edilen değerler ile 2023 yılı ilk altı ay gerçek değerler kolerasyon ilişkisi



Şekil 73. Meteorolojik parametreler kullanılarak eğitilen öğrenme modelleri sonucu tahmin edilen değerler ile 2023 yılı ilk altı ay gerçek değerler arasındaki zamansal ilişki

Elde edilen bulgular, meteorolojik koşulların $Pm_{2.5}$ düzeyleri üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu ve bu etkinin makine öğrenmesi modelleri aracılığıyla değerlendirilebileceğini göstermektedir.

Pm_{10} , meteorolojik parametreler ve gaz kirletici verileri kullanılarak $Pm_{2.5}$ değerlerinin tahmini

Gaz kirleticiler, partikül maddelere tutunma yetenekleri sayesinde Pm çekirdekleri etrafında tutunarak füme benzeri yapılar oluşturabilir ve oluşumları sırasında yanma reaksiyonları sonucunda Pm ler ile birlikte hareket edebilir ve böylece $Pm_{2.5}$ gibi partikül madde düzeylerinin tahmininde potansiyel bir öngörücü olabilir. Bu bağlamda, gaz kirleticilerin $Pm_{2.5}$ tahminindeki etkinliği ve kullanılabilirliği üzerine detaylı bir analiz gerçekleştirilmiştir.

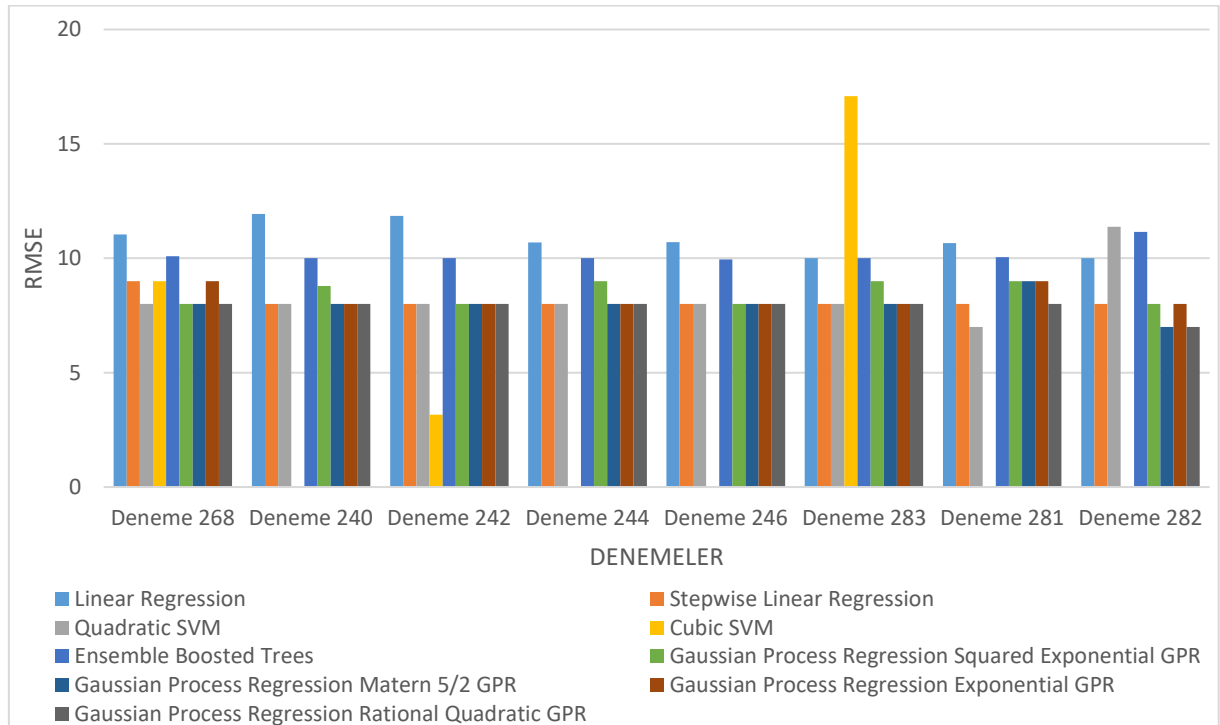
Makine öğrenmesi modelleri, gaz kirleticilerin $Pm_{2.5}$ tahmininde etkin bir şekilde kullanılabileceğini ortaya koymuştur. Regresyon tabanlı modeller, özellikle gaz kirleticilerin yanı sıra meteorolojik değişkenleri de içeren geniş bir özellik kümesini kullanarak başarılı tahminler gerçekleştirmiştir. Bu modellerin eğitim süreci, gaz kirleticilerin mevsimsel değişimlerini ve diğer çevresel faktörlerle olan etkileşimlerini dikkate almıştır. Gaz kirletici değerleri kullanılarak yapılan tahminlerde en etkili öğrenme modelleri ve değişkenler ve RMSE değerleri en düşük denemeler aşağıdaki tabloda sunulmuştur.

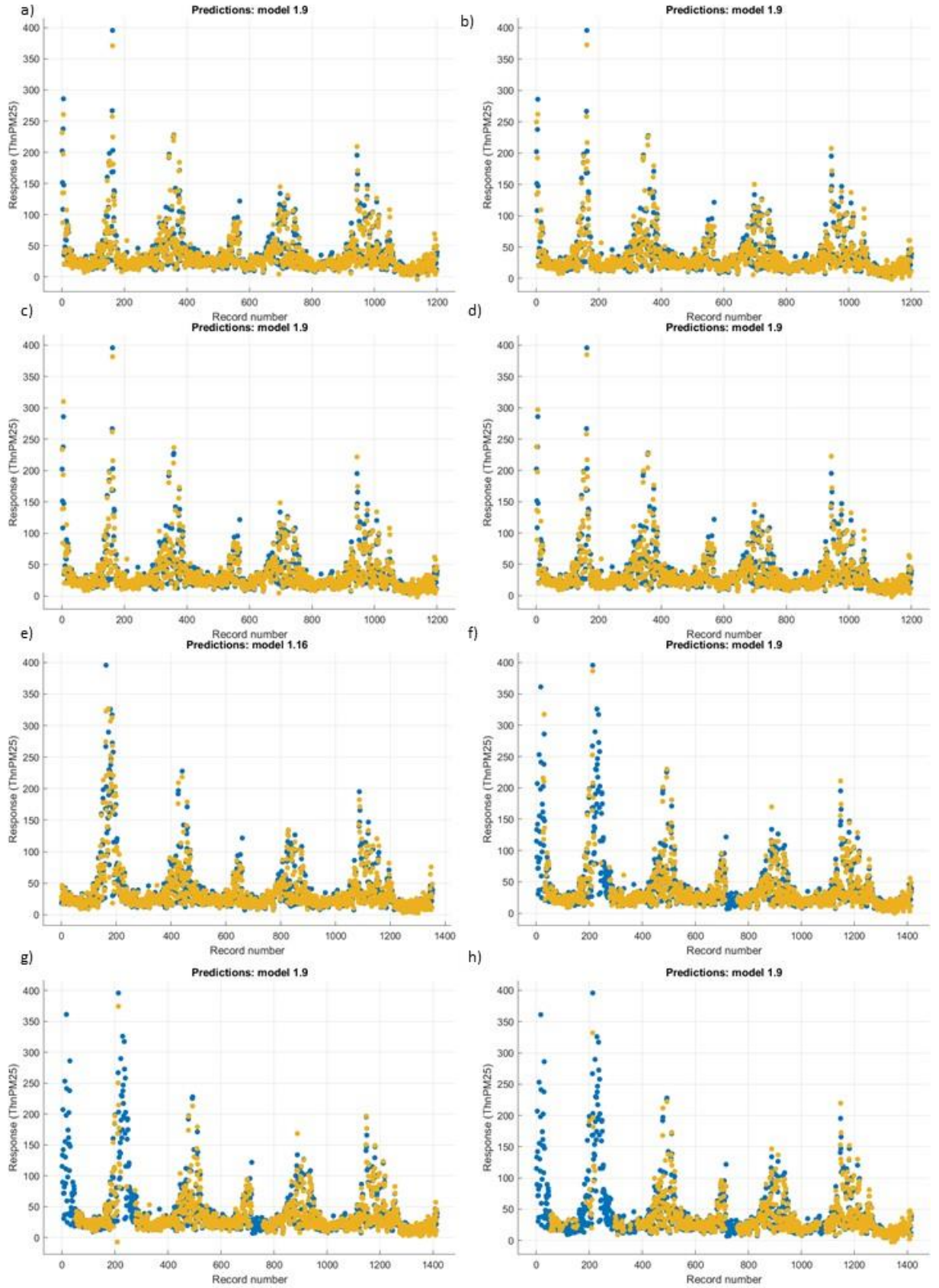
Tablo 31. Gaz Kirletici Değerleri Kullanılarak Yapılan Tahminlerde En Etkili Öğrenme Modelleri ve Değişkenler

Deneme No	Performans Ölçeği				Öğrenme Modelleri	Değişkenler
	RMSE	R ²	MSE	MAE		
Deneme 268	6.5684	0.97	43.143	4.1692	Gaussian Process Regression Squared Exponential GPR	MkzO3, PdkO3, D1(yıl), D2(ay), Konum, Yükseklik, ThnPM10, MkzPm10, PdkPM10, AzzPM10, Sıcaklık, Rüzgar Hızı, Yağış, Nem+Basınç, Güneşlenme Süresi
Deneme 240	6.3195	0.96	39.936	4.2926	Quadratic SVM	MkzNO2, AzzNO2, PdkNO2, ThnNO2, D1(yıl), D2(ay), Konum, Yükseklik, ThnPM10, Sıcaklık, Rüzgar Hızı, Yağış, Nem, Basınç, Güneşlenme Süresi
Deneme 242	6.2128	0.97	38.598	4.0594	Quadratic SVM	MkzNO2, AzzNO2, PdkNO2, ThnNO2, D1(yıl), D2(ay), Konum, Yükseklik, ThnPM10, MkzPM10, Sıcaklık, Rüzgar Hızı, Yağış, Nem, Basınç, Güneşlenme Süresi
Deneme 244	6.1667	0.97	38.028	3.9953	Quadratic SVM	MkzNO2, AzzNO2, PdkNO2, ThnNO2, D1(yıl), D2(ay), Konum, Yükseklik, ThnPM10, MkzPm10, PdkPM10, Sıcaklık, Rüzgar Hızı, Yağış, Nem, Basınç, Güneşlenme Süresi

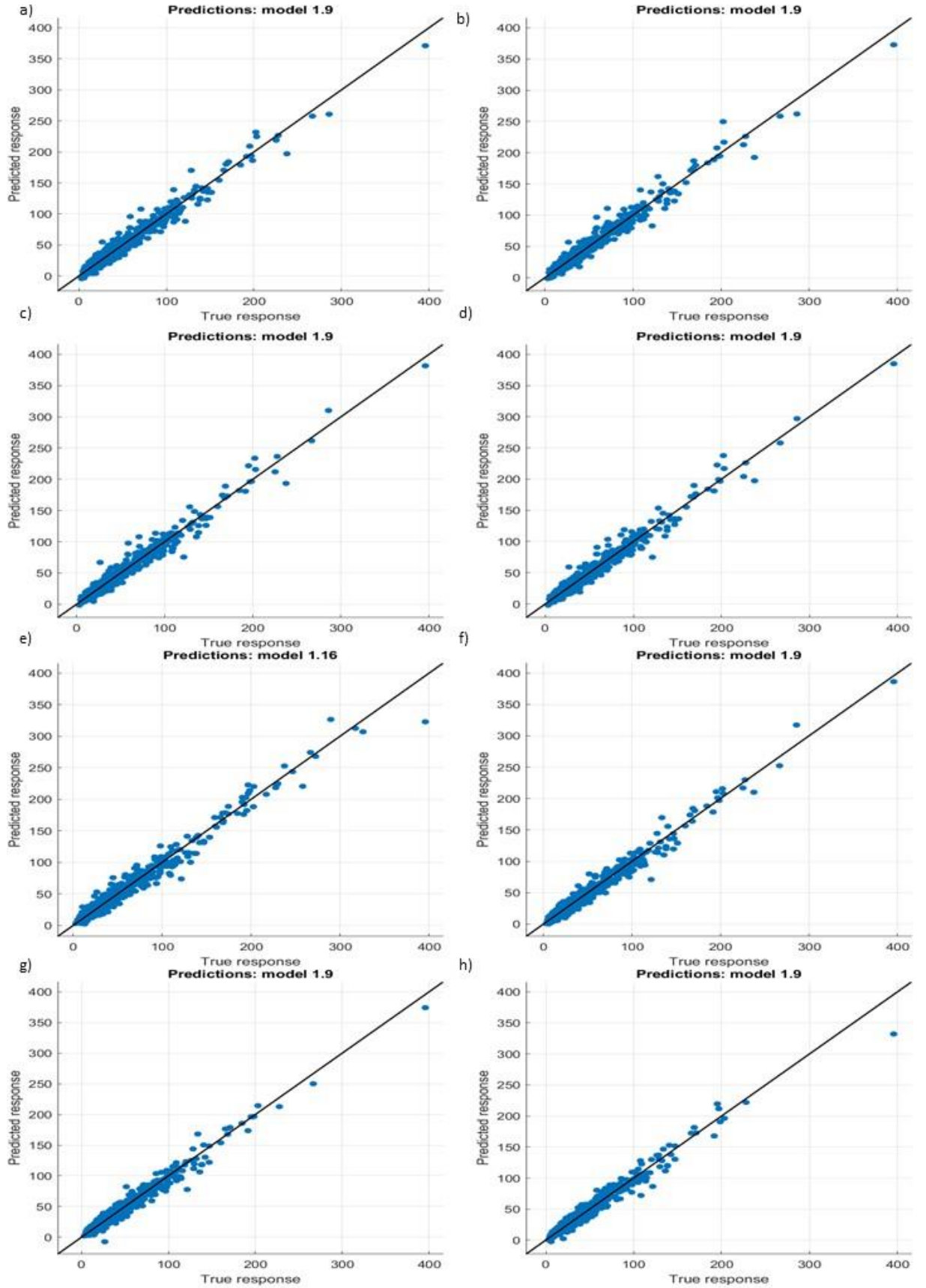
Tablo 31. (devamı)

Deneme 246	6.0774	0.97	36.935	4.0069	Quadratic SVM	MkzNO ₂ , AzzNO ₂ , PdkNO ₂ , ThnNO ₂ , D1(yıl), D2(ay), Konum, Yükseklik, ThnPM ₁₀ , MkzPm ₁₀ , PdkPM ₁₀ , AzzPM ₁₀ , Sıcaklık, Rüzgar Hızı, Yağış, Nem, Basınç, Güneşlenme Süresi
Deneme 283	5.9462	0.96	35.358	3.9446	Quadratic SVM	AzzCO, PdkCO, ThnCO, MkzSO ₂ , AzzSO ₂ , PdkSO ₂ , MkzNO, AzzNO, PdkNO, ThnNO, MkzNO ₂ , AzzNO ₂ , PdkNO ₂ , ThnNO ₂ , MkzNOX, AzzNOX, PdkNOX, ThnNOX, MkzO ₃ , PdkO ₃ , D1(yıl), D2(ay), Konum, Yükseklik, ThnPM ₁₀ , MkzPm ₁₀ , PdkPM ₁₀ , AzzPM ₁₀ , Sıcaklık, Rüzgar Hızı, Yağış, Nem, Basınç, Güneşlenme Süresi
Deneme 281	5.8582	0.97	34.319	3.9798	Quadratic SVM	MkzNO, AzzNO, PdkNO, ThnNO, MkzNO ₂ , AzzNO ₂ , PdkNO ₂ , ThnNO ₂ , MkzNOX, AzzNOX, PdkNOX, ThnNOX, D1(yıl), D2(ay), Konum, Yükseklik, ThnPM ₁₀ , MkzPm ₁₀ , PdkPM ₁₀ , AzzPM ₁₀ , Sıcaklık, Rüzgar Hızı, Yağış, Nem, Basınç, Güneşlenme Süresi
Deneme 282	5.6867	0.97	32.338	3.8586	Quadratic SVM	MkzNO, AzzNO, PdkNO, ThnNO, MkzNO ₂ , AzzNO ₂ , PdkNO ₂ , ThnNO ₂ , MkzNOX, AzzNOX, PdkNOX, ThnNOX, MkzO ₃ , PdkO ₃ , D1(yıl), D2(ay), Konum, Yükseklik, ThnPM ₁₀ , MkzPm ₁₀ , PdkPM ₁₀ , AzzPM ₁₀ , Sıcaklık, Rüzgar Hızı, Yağış, Nem, Basınç, Güneşlenme Süresi

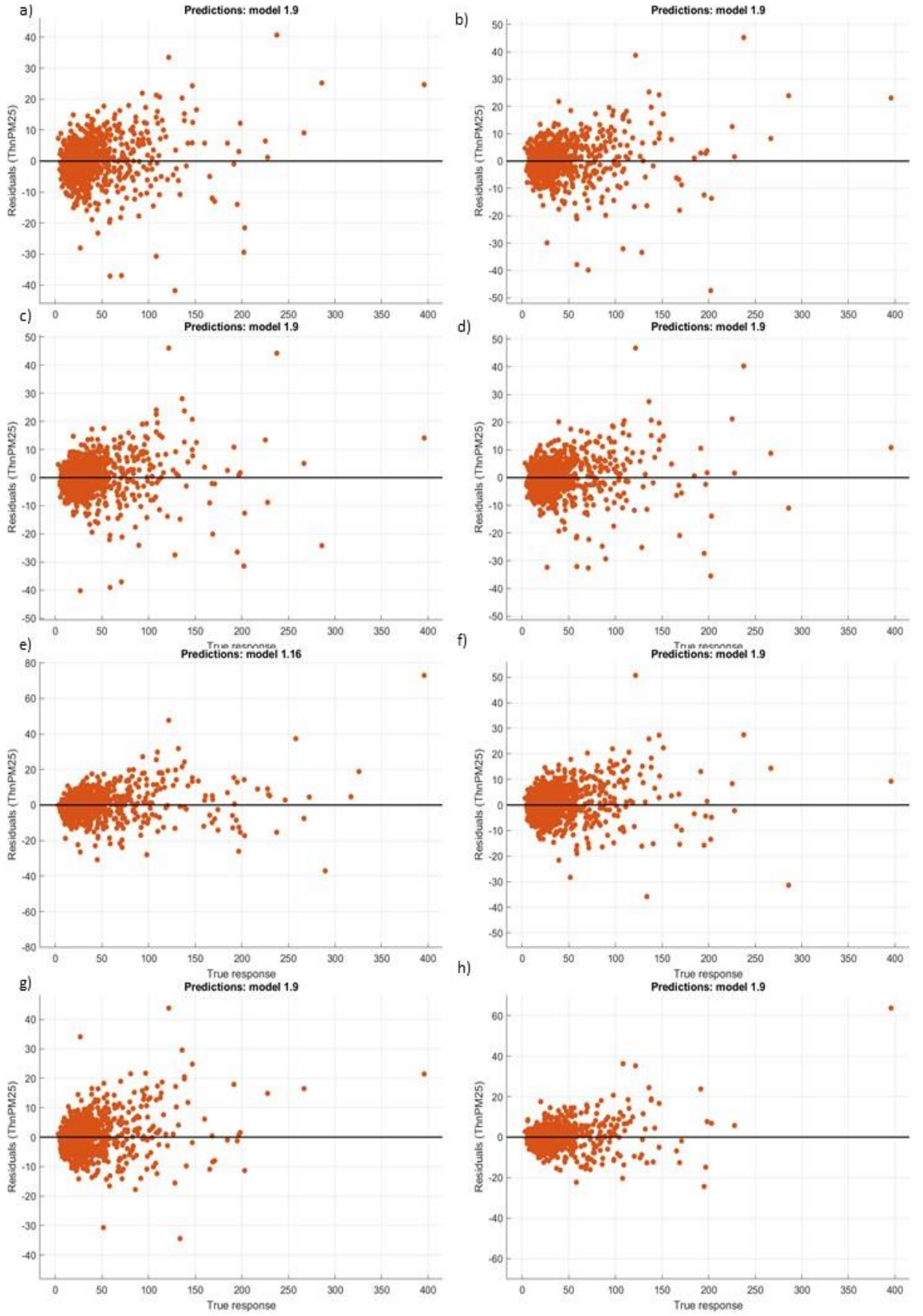
**Şekil 74. Gaz kirletici verileri kullanılarak yapılan tahminlerde en etkili öğrenme modelleri RMSE değerleri**



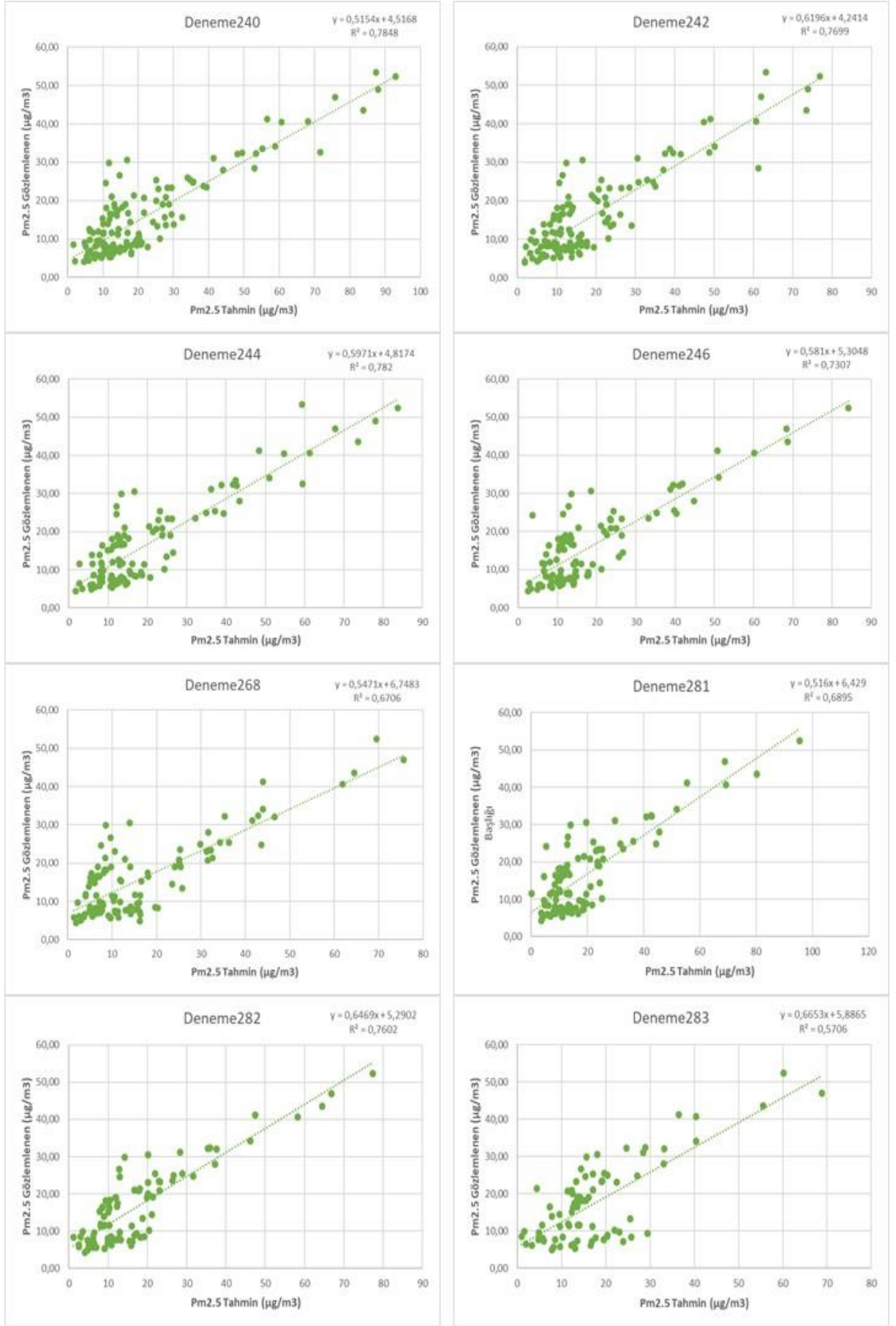
Şekil 75. Gaz kirletici değerleri kullanılarak yapılan tahminlerde en etkili öğrenme modelleri tahmin değerleri (sarı) ve gerçek değerler (mavi) program çıktıları a)Deneme 240, b)Deneme 242, c)Deneme 244, d)Deneme 246, e)Deneme 268, f)Deneme 281, g)Deneme 282 ve h)Deneme 283



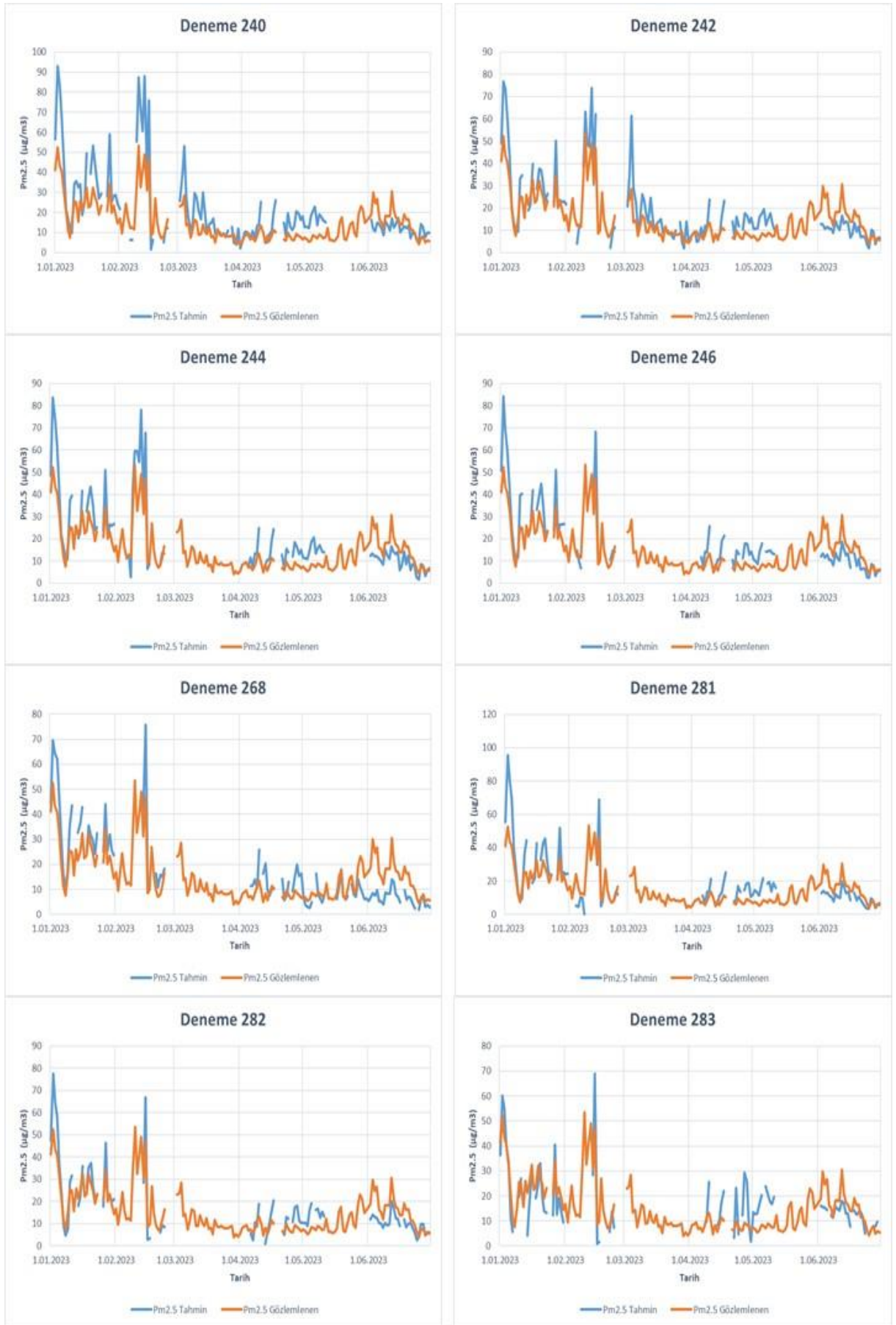
Şekil 76. Gaz kirletici değerleri kullanılarak yapılan tahminlerde en etkili öğrenme modelleri kolerasyon ilişkisi program çıktıları a)Deneme 240, b)Deneme 242, c)Deneme 244, d)Deneme 246, e)Deneme 268, f)Deneme 281, g)Deneme 282 ve h)Deneme 283



Şekil 77. Gaz kirletici değerleri kullanılarak yapılan tahminlerde en etkili öğrenme modelleri gerçek değerden sapma saçılım grafikleri program çıktıları a)Deneme 240, b)Deneme 242, c)Deneme 244, d)Deneme 246, e)Deneme 268, f)Deneme 281, g)Deneme 282 ve h)Deneme 283



Şekil 78. Gaz kirletici değerleri kullanılarak eğitilen öğrenme modelleri sonucu tahmin edilen değerler ile 2023 yılı ilk altı ay gerçek değerler kolerasyon



Şekil 79. Gaz kirleticiler kullanılarak eğitilen öğrenme modelleri sonucu tahmin edilen değerler ile 2023 yılı ilk altı ay gerçek değerler arasındaki zamansal ilişki

Elde edilen bulgular, gaz kirleticilerin $Pm_{2.5}$ tahmininde önemli bir rol oynayabileceğini ve hava kalitesi izleme sistemlerinin geliştirilmesinde değerli bir araç olabileceğini göstermektedir. Araştırma sürecinde ortaya çıkan bulgular, gaz kirleticilerin $Pm_{2.5}$ tahminindeki rolünü anlamak ve bu bilgiyi pratik uygulamalara dönüştürmek için önemli bir temel sağlamaktadır.

Pm_{10} , meteorolojik parametreler, gaz kirletici verileri ve trafik verileri kullanılarak $Pm_{2.5}$ değerlerinin tahmini

Trafik, kentsel alanlarda hava kalitesini belirleyen önemli bir faktördür ve $Pm_{2.5}$ düzeyleri üzerinde de etkisi olabilmektedir. Bu bağlamda, trafik verisinin $Pm_{2.5}$ tahminindeki rolünü değerlendirmek amacıyla kapsamlı bir analiz gerçekleştirilmiştir.

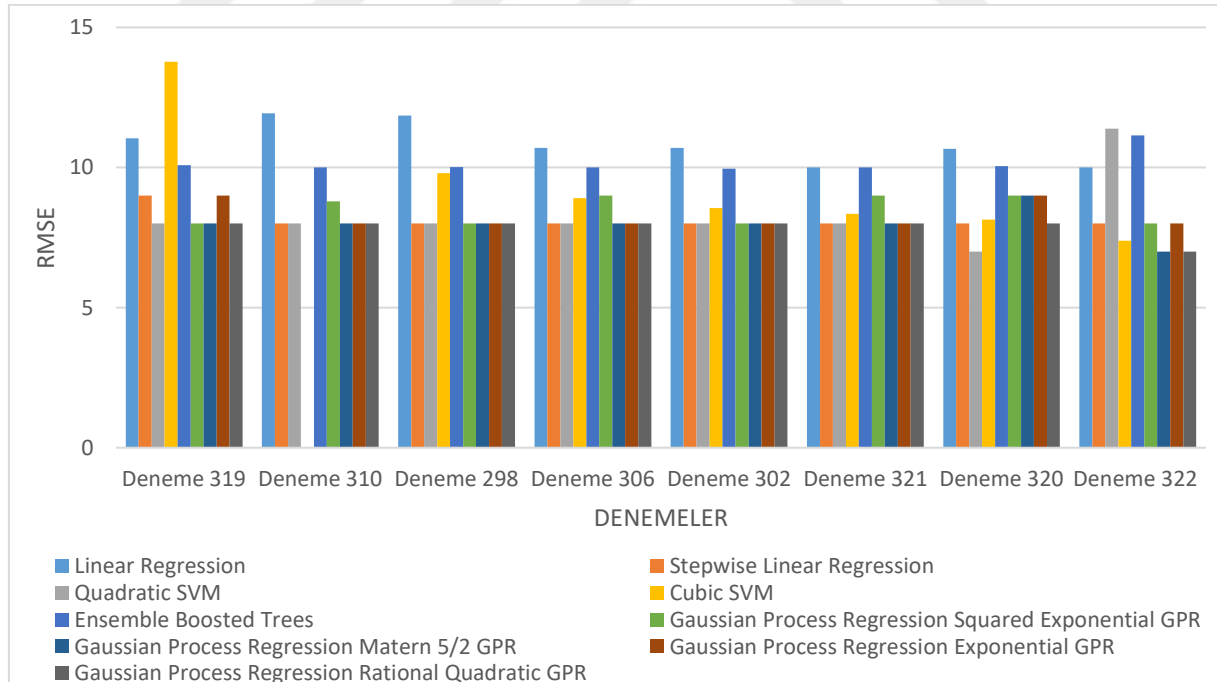
Bu analizler, farklı trafik verisinin $Pm_{2.5}$ düzeylerini farklı düzeylerde etkilediğini göstermiştir. Trafik verileri kullanılarak yapılan tahminlerde en etkili öğrenme modelleri, değişkenler ve RMSE değerleri en düşük denemeler aşağıdaki tabloda sunulmuştur.

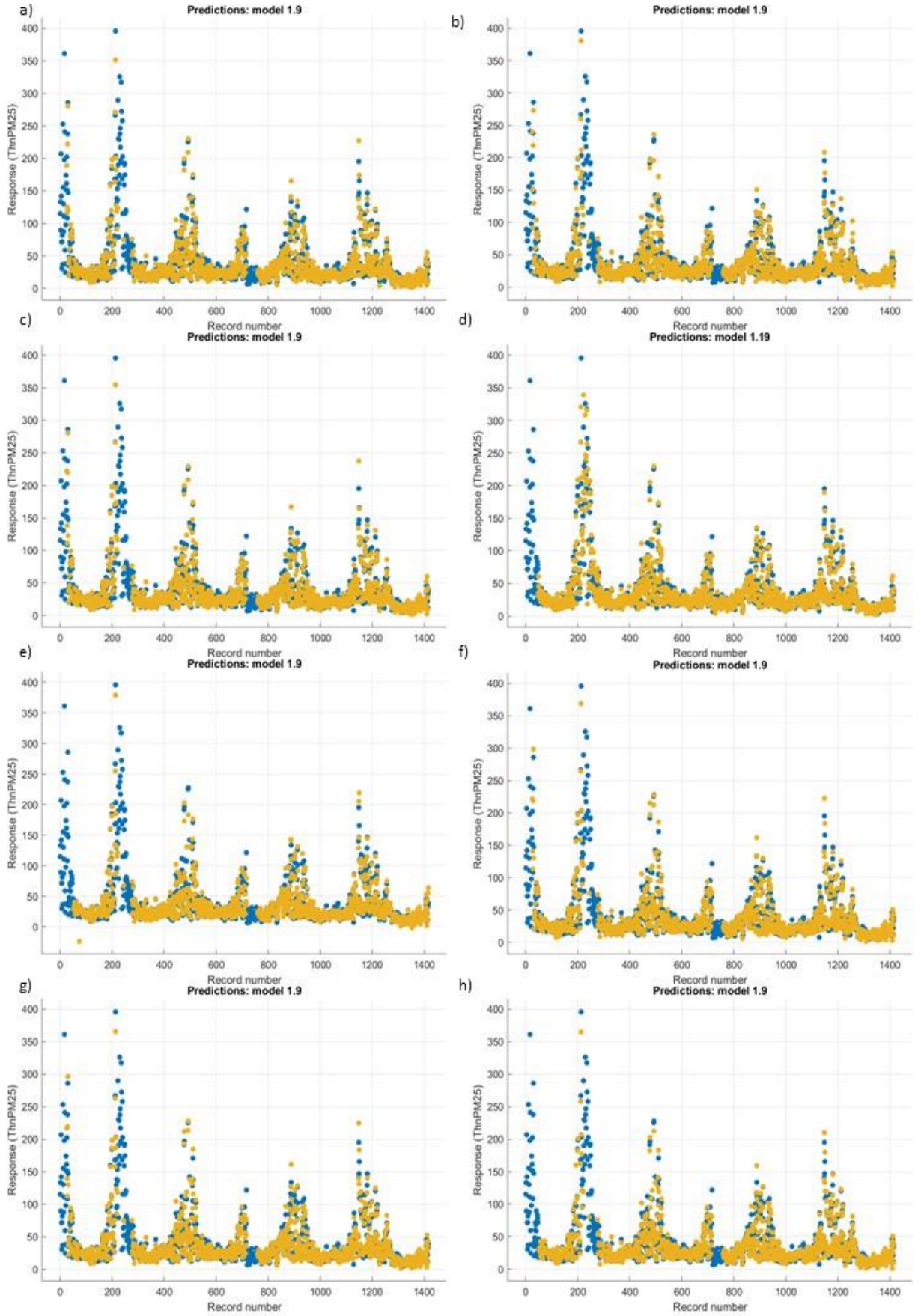
Tablo 32. Trafik Verileri Kullanılarak Yapılan Tahminlerde En Etkili Öğrenme Modelleri ve Değişkenler

Deneme No	Performans Ölçeği				Öğrenme Modelleri	Değişkenler
	RMSE	R ²	MSE	MAE		
Deneme 319	6.5938	0.96	43.478	4.0608	Quadratic SVM	TrfIST1, TrfIST2, TrfIST3, TrfIST4, TrfIST5, TrfIST6, D1(yıl), D2(ay), Konum, Yükseklik, MkzNO, AzzNO, PdkNO, ThnNO, MkzNO2, AzzNO2, PdkNO2, ThnNO2, MkzNOX, AzzNOX, PdkNOX, ThnNOX, MkzO3, PdkO3, ThnPM10, MkzPm10, PdkPM10, AzzPM10
Deneme 310	5.8685	0.98	34.439	3.5965	Gaussian Regression Quadratic GPR	Process Rational TrfIST1, TrfIST2, TrfIST3, TrfIST4, TrfIST5, TrfIST6, D1(yıl), D2(ay), Konum, Yükseklik, MkzO3, PdkO3, ThnPM10, MkzPm10, PdkPM10, AzzPM10
Deneme 298	5.8438	0.97	34.149	3.8191	Quadratic SVM	TrfIST1, TrfIST2, TrfIST3, TrfIST4, TrfIST5, TrfIST6, D1(yıl), D2(ay), Konum, Yükseklik, MkzNO, AzzNO, PdkNO, ThnNO, ThnPM10, MkzPm10, PdkPM10, AzzPM10
Deneme 306	5.7788	0.97	33.395	3.8329	Quadratic SVM	TrfIST1, TrfIST2, TrfIST3, TrfIST4, TrfIST5, TrfIST6, D1(yıl), D2(ay), Konum, Yükseklik, MkzNOX, AzzNOX, PdkNOX, ThnNOX, ThnPM10, MkzPm10, PdkPM10, AzzPM10
Deneme 302	5.6425	0.97	31.837	3.7763	Quadratic SVM	TrfIST1, TrfIST2, TrfIST3, TrfIST4, TrfIST5, TrfIST6, D1(yıl), D2(ay), Konum, Yükseklik, MkzNO2, AzzNO2, PdkNO2, ThnNO2, ThnPM10, MkzPm10, PdkPM10, AzzPM10

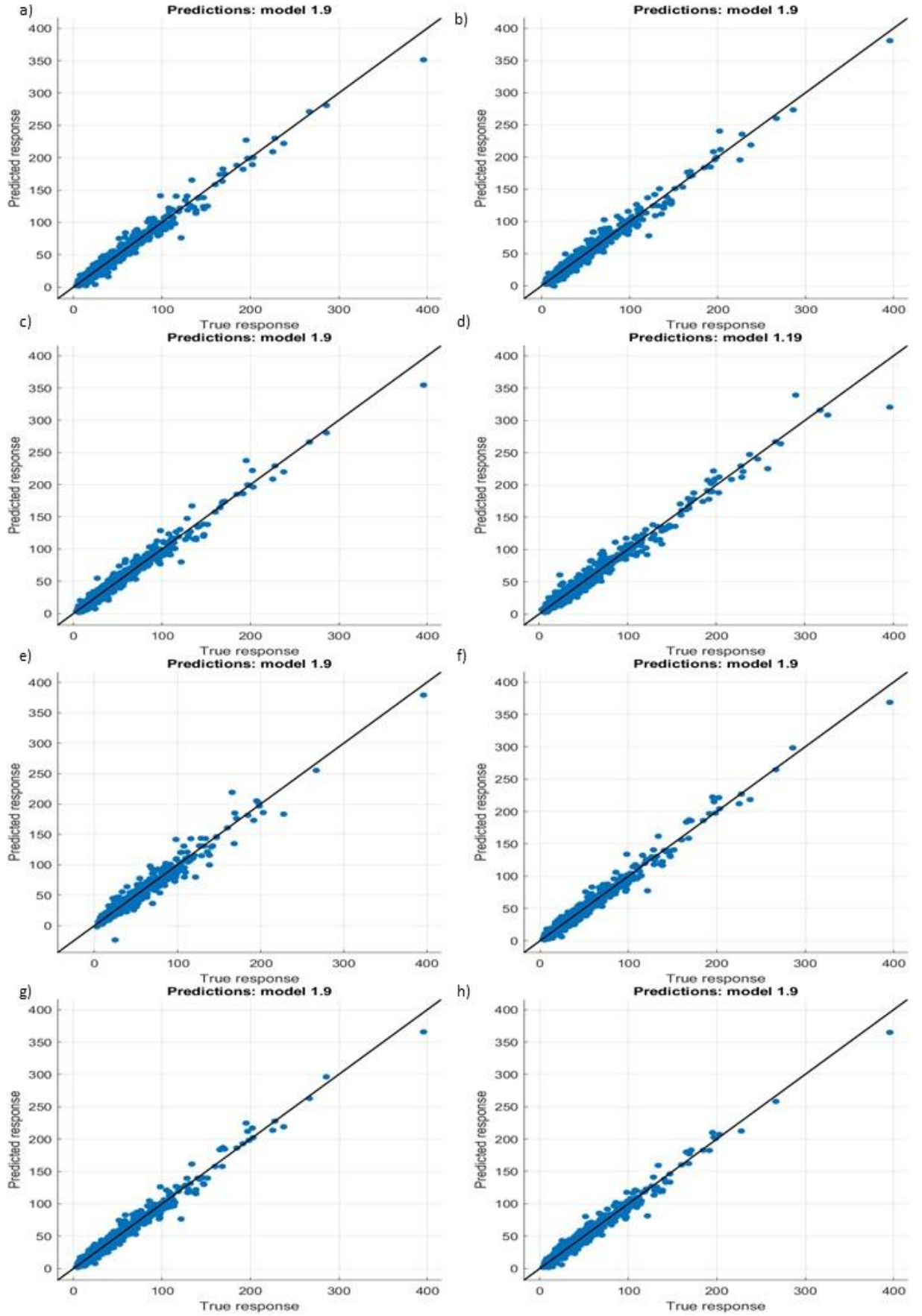
Tablo 32. (devamı)

Deneme 321	5.4082	0.97	29.248	3.644	Quadratic SVM	TrfIST1, TrfIST2, TrfIST3, TrfIST4, TrfIST5, TrfIST6, D1(yıl), D2(ay), Konum, Yükseklik, MkzNO, AzzNO, PdkNO, ThnNO, MkzNO2, AzzNO2, PdkNO2, ThnNO2, MkzNOX, AzzNOX, PdkNOX, ThnNOX, ThnPM10, MkzPm10, PdkPM10, AzzPM10, Sıcaklık, Rüzgar Hızı, Yağış, Nem, Basınç, Güneşlenme Süresi
Deneme 320	5.3982	0.97	29.14	3.6357	Quadratic SVM	TrfIST1, TrfIST2, TrfIST3, TrfIST4, TrfIST5, TrfIST6, D1(yıl), D2(ay), Konum, Yükseklik, MkzNO, AzzNO, PdkNO, ThnNO, MkzNO2, AzzNO2, PdkNO2, ThnNO2, ThnPM10, MkzPm10, PdkPM10, AzzPM10, Sıcaklık, Rüzgar Hızı, Yağış, Nem, Basınç, Güneşlenme Süresi
Deneme 322	5.0609	0.97	25.613	3.4216	Quadratic SVM	TrfIST1, TrfIST2, TrfIST3, TrfIST4, TrfIST5, TrfIST6, D1(yıl), D2(ay), Konum, Yükseklik, MkzNO, AzzNO, PdkNO, ThnNO, MkzNO2, AzzNO2, PdkNO2, ThnNO2, MkzNOX, AzzNOX, PdkNOX, ThnNOX, MkzO3, PdkO3, ThnPM10, MkzPm10, PdkPM10, AzzPM10, Sıcaklık, Rüzgar Hızı, Yağış, Nem, Basınç, Güneşlenme Süresi

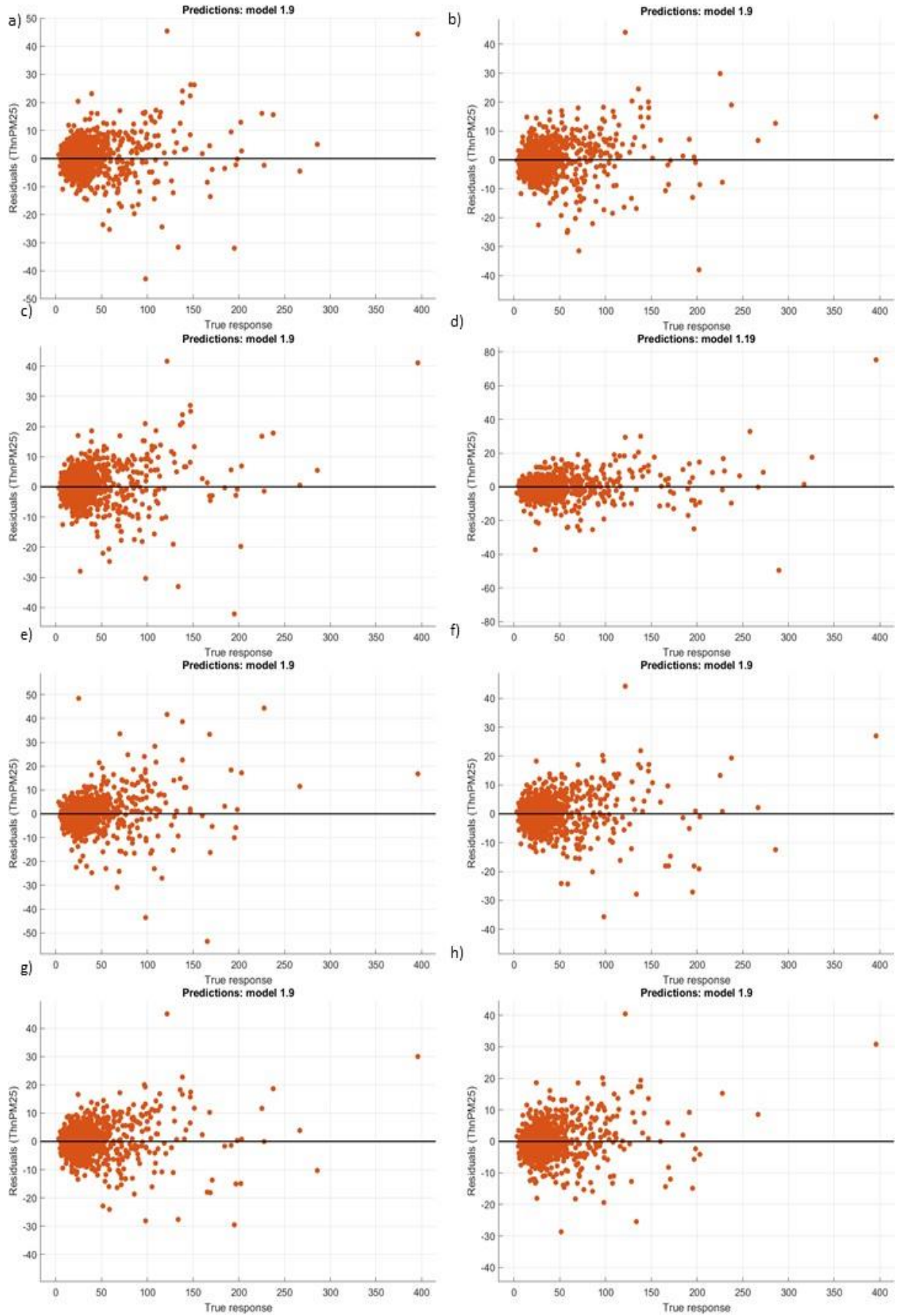
**Şekil 80.** Pm₁₀, meteorolojik parametreler, gaz kirlotici verileri ve trafik verileri kullanılarak yapılan tahminlerde en etkili öğrenme modelleri RMSE değerleri



Şekil 81. Trafik verileri kullanılarak yapılan tahminlerde en etkili öğrenme modelleri tahmin değerleri (sarı) ve gerçek değerler (mavi) program çıktıları a)Deneme 298, b)Deneme 302, c)Deneme 306, d)Deneme 310, e)Deneme 319, f)Deneme 320, g)Deneme 321 ve h)Deneme 322



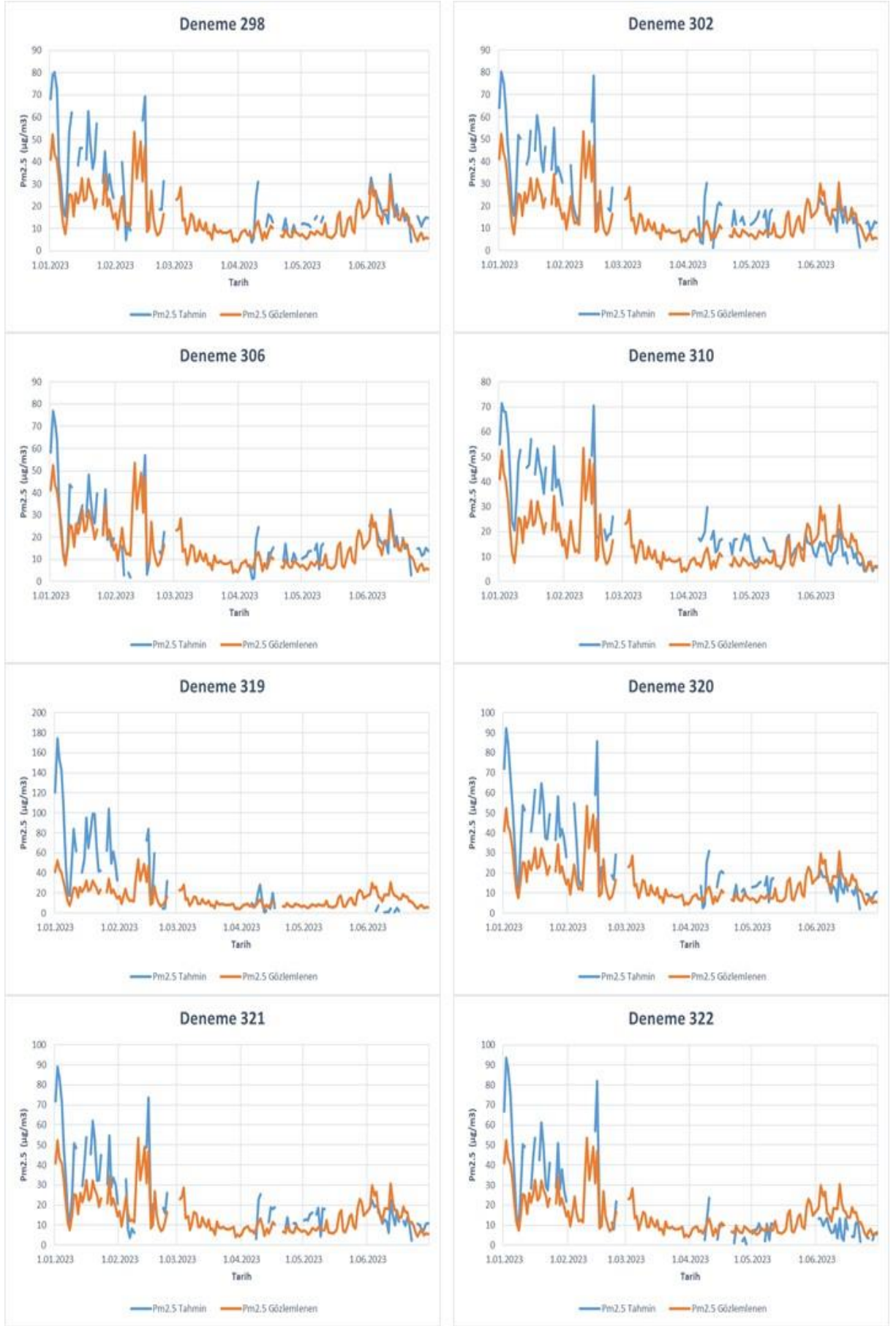
Şekil 82. Trafik verileri kullanılarak yapılan tahminlerde en etkili öğrenme modelleri kolerasyon ilişkisi program çıktıları a)Deneme 298, b)Deneme 302, c)Deneme 306, d)Deneme 310, e)Deneme 319, f)Deneme 320, g)Deneme 321 ve h)Deneme 322



Şekil 83. Trafik verileri kullanılarak yapılan tahminlerde en etkili öğrenme modelleri gerçek değerden sapma saçılım grafikleri program çıktıları a)Deneme 298, b)Deneme 302, c)Deneme 306, d)Deneme 310, e)Deneme 319, f)Deneme 320, g)Deneme 321 ve h)Deneme 322



Şekil 84. Trafik verileri kullanılarak eğitilen öğrenme modelleri sonucu tahmin edilen değerler ile 2023 yılı ilk altı ay gerçek değerler kolerasyon



Şekil 85. Trafik verileri kullanılarak eğitilen öğrenme modelleri sonucu tahmin edilen değerler ile 2023 yılı ilk altı ay gerçek değerler arasındaki zamansal ilişki

Elde edilen bulgular, günlük trafik yoğunluğu ve diğer tüm parametreler eklendiğinde $PM_{2.5}$ tahminlerinin oldukça geliştirdiğini göstermektedir. $PM_{2.5}$ verilerinin ölçüldüğü Taşhan istasyonundan alınan PM_{10} verileri kullanılarak yapılan denemede (Deneme1), 2023 yılı ilk altı ay tahmin değerleri ile gerçek değerler arasında $0,63 R^2$ değeri belirlenmiş, daha sonra kent içerisinde yer alan tüm istasyonlardaki PM_{10} verisi kullanıldığında (Deneme32) ise R^2 değeri $0,79$ 'a yükselmiştir. PM_{10} verilerinin yanı sıra modellere meteorolojik parametreler ve trafik verisi eklendiğinde kolerasyon değerlerinin arttı gözlenmiştir. Yapılan denemelerde tahmin edilen $PM_{2.5}$ değerleri ile 2023 yılı ilk altı ay gerçek $PM_{2.5}$ değerler arasında en yüksek kolerasyona $R^2 = 0,8196$ 'lık değeri ile 298. Denemede (Bağımsız değişkenler: trafik zaman (yıl-ay), konum, yükseklik, NO, PM_{10}) daha sonra $R^2 = 0,8138$ değeri ile 306. Denemede (Bağımsız değişkenler: trafik, zaman(yıl-ay), konum, yükseklik, NO_x) ve $R^2 = 0,7904$ değeri ile 302. Denemede (Bağımsız değişkenler: trafik, zaman(yıl-ay), konum, yükseklik, NO_2 , PM_{10}) ulaşılmıştır. Buda bizlere en etkili $PM_{2.5}$ tahminlerinin PM_{10} verisinin yanı sıra NO, NO_x , konum, yükseklik, ve zaman (yıl-ay) bağımsız değişkenleri ile yapılabileceğini göstermektedir. Bu sonuç, en etkili $PM_{2.5}$ tahminlerinin; PM_{10} verisinin yanı sıra NO, NO_x , konum, yükseklik, ve zaman (yıl-ay) bağımsız değişkenleri ile yapılabileceğini ve en yüksek kolerasyon oranına Quadratic SVM öğrenme modeli ile ulaşılabileceğini göstermektedir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Erzurum ili özelinde akıllı kent konsepti içerisinde kent merkezi hava kalitesi izleme ağı verileri (Şekil 17) yardımıyla, alansal hava kirlilik haritalarının belirlenmesi, kirleticilerin uzun menzil taşınımının modellenmesi ve gelecekteki konsantrasyonlarının makine öğrenmesi yardımıyla tahmin edilmesi üzerine ayrıntılı olarak çalışılmıştır. Detaylı çalışmalar neticesinde son derece tutarlı sonuçlar veren modeller yardımıyla elde edilen geleceğe dair değerlerin tahminlenmesi, akıllı kent konseptinde kullanılarak önceden bilgilendirmek suretiyle alınacak önlemler konusunda yardımcı olacaktır. Özetle elde edilen veriler; akıllı kent uygulamaları kapsamında hava kalitesi gidişatı konusunda mükemmel bir ivme kazandıracak için kentlerin planlaması, alt yapılarının oluşturulması, binaların yükseklik ve yönleri, imar ve şehir planlamalarının yanı sıra rekreasyon alanları ve kentin hangi yönlerde büyümeye daha elverişli olacağı gibi daha pek çok stratejik konularda ciddi katkılar sağlayacağı aşikardır.

Akıllı kentlerin, teknoloji ve veri kullanımını merkeze alan kapsamlı planlama ve yönetim yaklaşımlarıyla geleceğin şehirleri olarak tüm dünyada öncelenen bir konu olduğu vurgulanmıştır. Akıllı kent uygulamaları çeşitli çevresel sorunların çözümünde ön planda yer almaktadır. Önemli çevresel sorunlardan birisi olan hava kirliliği, kentsel yaşam kalitesini önemli ölçüde etkileyen parametreler arasındadır. Erzurum kent merkezi, kendine özgü coğrafi (topografik), meteorolojik (rüzgar hızı ve yönü vb.) ve demografik özellikleri ile dikkat çeken bir şehir olarak, hava kirliliğiyle mücadelede benzersiz bir çalışma ortamı sunmaktadır. Bu kapsamda, hava kirliliği ile mücadelede etkili bir strateji oluşturmak için, öncelikle kentin hava kalitesi profili ve kirlilik kaynakları tüm detaylarıyla analiz edilmiştir.

Tablo 33. Altı farklı meteorolojik parametrenin $Pm_{2,5-10}$ ve gaz kirleticiler üzerine olan etkilerinin kolerasyon sonucu

METEOROLOJİK PARAMETRELER	KİRLETİCİLER							
	$Pm_{2,5}$	Pm_{10}	SO_2	NO_x	NO_2	NO	CO	O_3
Sıcaklık (°C)	-0,560 (Thn)	-0,440 (Thn)	-0,623 (Mkz)	-0,622 (Azz)	-0,639 (Azz)	-0,593 (Pdk)	-0,687 (Azz)	0,580 (Mkz)
Yağış(mm kg/m ²)	-0,119 (Thn)	-0,205 (Mkz)	-0,132 (Mkz)	-0,143 (Mkz)	-0,139 (Mkz)	-0,128 (Mkz)	-0,112 (Thn)	0,076 (Mkz)
Rüzgar Hızı(m/sn)	-0,419 (Thn)	-0,379 (Thn)	-0,427 (Azz)	-0,559 (Mkz)	-0,613 (Thn)	-0,512 (Mkz)	-0,480 (Azz)	0,426 (Mkz)
Nem(%)	0,304 (Thn)	-0,207 (Pdk)	0,339 (Mkz)	0,362 (Pdk)	0,337 (Pdk)	0,341 (Pdk)	0,385 (Azz)	-0,507 (Pdk)

Tablo 33. (devamı)

Atmosferi Basınç(hPa)	0,241 (Thn)	0,311 (Thn)	0,270 (Mkz)	0,400 (Mkz)	0,323 (Mkz)	0,406 (Mkz)	0,308 (Azz)	-0,232 (Mkz)
Güneşlenme Süresi(saat)	-0,147 (Thn)	0,314 (Pdk)	-0,303 (Pdk)	-0,208 (Pdk)	-0,195 (Pdk)	-0,181 (Pdk)	-0,275 (Pdk)	0,391 (Mkz)

Tablo 33’de özetlenmiş olan meteorolojik parametrelerin kirlilik parametreleri üzerine olan etkilerini tüm kirlilik parametreler için en güçlü etkiden en zayıf etkiye doğru sıralayacak olursak;

Pm_{2,5} için Sıcaklık > Rüzgar Hızı>Nem>Atm Basınç>Güneş.Süresi>Yağış

Pm₁₀ için Sıcaklık > Rüzgar Hızı> Atm Basınç >Nem>Yağış >Güneş.Süresi

SO₂ için Sıcaklık > Rüzgar Hızı> Nem> Güneş.Süresi >Atm Basınç >Yağış

CO için Sıcaklık > Rüzgar Hızı>Nem>Atm Basınç>Güneş.Süresi>Yağış

NO_x için Sıcaklık > Rüzgar Hızı> Atm Basınç >Nem >Güneş.Süresi>Yağış

NO₂ için Sıcaklık > Rüzgar Hızı>Nem>Atm Basınç>Güneş.Süresi>Yağış

NO için Sıcaklık > Rüzgar Hızı> Atm Basınç >Nem>Yağış >Güneş.Süresi

O₃ için Sıcaklık > Nem>Rüzgar Hızı>Güneş.Süresi > Atm Basınç >Yağış

Gerek Tablo 33 gerekse sıralamalardan elde edilen sonuçlara göre tüm kirlilik parametreleri için (O₃ Hariç) en etkin meteorolojik faktör önce sıcaklık sonra rüzgar hızıdır. Gerek sıcaklık artışı gerekse rüzgar hızıyla kirlilik parametrelerinin (O₃ Hariç) artışı ters orantılı olduğu gözlemlenmektedir. En az etkili faktör ise genelde (Pm₁₀ ve NO Hariç) yağıştır. Bu durumu mevsimsel geçişlere bağlı olarak hava durumuna göre ısınma amaçlı yakıt tüketimi artışı ile izah edebiliriz. Yine O₃ hariç ikinci sırada en etken parametre olan rüzgarın kirleticilerin taşınmasında etkili bir faktör olduğu aşıkardır. Rüzgar hızının kirlilik parametreleri ile ters orantılı olması rüzgarın taşınım ve dağıtım üzerine olan etkisindendir. Tablo 33 den ve etki sıralamasından bakılarak tüm bunların yanısıra daha pek çok çıkarımlar yapılabilir.

ÇŞİDB akıllı kentler ile ilgili hazırlamış olduğu 2020–2023 Ulusal Akıllı Şehirler Strateji ve Eylem Planı (UAŞSEP) kapsamında; ülkemizde akıllı kentlerin geliştirilmesinde, tüm akıllı kent paydaşlarına yön gösterebilecek şekilde mevcut durum analizleri yapılmak suretiyle ihtiyaçlar belirlenmiştir. Bu ihtiyaçlara binaen dört adet stratejik hedef ve yirmi altı adet eylem planı hazırlanmıştır. Bu dört önemli stratejik hedef sırasıyla;

- Şehirlere özgü yerel akıllı şehir stratejilerinin ve yol haritalarının hazırlanması,

- Akıllı şehir olgunluk değerlendirme modeli kullanılarak akıllı şehir endeksinin oluşturulması,
- Akıllı şehir projelerinin geliştirilip etkin bir şekilde planlanarak hayata geçirilmesi
- Finansal olarak teşvik edici ve kolaylaştırıcı ortam oluşturulmasıdır.

Yirmi altı adet eylem planı içerisinde ise; “akıllı kent stratejisi ve yol haritası, olgunluk programları, akıllı kent indeksi, izlemeler değerlendirmeler, kamu değeri, kaynakların etkin kullanımı, finansal, akıllı kent teknolojileri, akıllı kent pazarı, ulusal akıllı kent yönetim mekanizması, yerel akıllı kent yönetim mekanizması, akıllı kent çözümleri, şehircilik hizmetleri, paydaşlar arasında işbirliği, akıllı kent bileşenlerinin olgunlaştırılması, akıllı kent terminolojisi, ulusal akıllı kent mimarisinin geliştirilmesi, yerel akıllı kent mimarisinin geliştirilmesi, akıllı kent açık veri platformları, şehircilik hizmetleri tanıtım kanalları, akıllı kent çözüm üreticileri, bilgi güvenliği yönetimi, kişisel verilerin korunumu, kullanıcıların katılımı, akıllı bölgeler,” ana başlıkları sırasıyla vurgulanmıştır.

2016-2023 verilerinden hareketle (yerel istasyonlardan alınan tüm ölçüm sonuçları, meteorolojik veriler, trafik verileri) Pm’ler ve kirletici gazların arasındaki korelasyonların detaylı olarak belirlenmesinin yanı sıra partikül madde üzerine uzun menzil taşınımın HYspilt metodu kullanılarak uluslararası güzergahlarının ortaya konulması ve makine öğrenmesi tekniği ile istenilen bir kirleticinin (Pm ya da Gaz) gelecekteki miktarlarının tahmin edilebilmesi ve tasarlanmış olan mobil hava kalitesi ölçüm ünitesinden alınan verilerin değerlendirilmesi, bu çalışmanın eylem planına sunacağı katkılar boyutunda, yukarıda bahsedilen 2020–2023 UAŞSEP kapsamındaki eylem planları içerisinde özellikle,

- Akıllı kent indeksinin oluşturulması
- Akıllı kent teknolojilerinin geliştirilmesi
- Yerel akıllı kent yönetim mekanizmasının işletilmesi
- Akıllı kent sorunlarının çözümü ve
- Akıllı kent açık veri platformlarının oluşturulmasında etkin olarak kullanılabilecektir.

Araştırma bulguları, pek çok faktörün aynı anda etkin olduğu alansal hava kirliliğinin karmaşıklığının anlaşılmasını ve çözümlenmesini kolaylaştırmıştır. Erzurum'un coğrafi özellikleri, özellikle de topoğrafik ve iklimsel faktörler, hava kalitesini etkileyen dinamikler arasındadır. Bu bağlamda, elde edilen sonuçlar, akıllı kentlerin geliştirilmesinde Erzurum'un yanı sıra diğer benzer coğrafyalardaki akıllı kent uygulamalarına da rehberlik edebileceğini düşünmekteyiz.

Trafik yoğunluğu, endüstriyel faaliyetler ve enerji üretimi gibi ana kaynaklar üzerinde uygulanacak etkili düzenlemeler, hava kalitesini iyileştirmek adına temel adımlar olacaktır. Ayrıca, enerji verimliliği projeleri, kent içi yeşil alanların artırılması ve çevreci ulaşım sistemlerinin teşvik edilmesi gibi stratejiler, kentin genel çevresel performansını güçlendirirken hava kalitesinin artırılmasında da önemli rol oynayacaktır.

Kent içerisinde alınabilecek aşağıda da özetlenmiş olan bazı tedbirler, hava kalitesinin artırılmasında (kısa-orta ve uzun vadede) akıllı kent konsepti içerisinde çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada kolaylık sağlayacaktır.

Bu tedbirleri özetleyecek olursak:

- Kirlilik emisyonlarının azaltılabilmesi için, fosil kökenli olmayan, yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarına tedrici olarak geçilmelidir. Fosil kökenli yakıtlardan en masum olanı doğal gaz olup, onunda atmosfere sera etkisini tetikleyen gazlardan CO₂ ve H₂O buharı yayıyor olmasından dolayı artık günümüz koşullarında çok fazla tercih edilmemesi gerekmektedir. Her ne kadar da 2004 yılında Erzurum kent merkezinde üst seviyelere çıkan hava kirliliğine acil çözüm bulma adına doğal gaz kullanımı teşvik edilmiş olsa da; artık günümüzde global çevre problemlerinin boyutu değişmiş ve radikal iklim değişikliklerinden dolayı fosil kökenli yakıtların kullanımı mecburen terk edilme durumuna gelmiştir.
- Erzurum kent merkezi içerisindeki rekreasyon alanları, ağaçlandırma, park ve bahçe sayısı artırılarak hakim rüzgar yönü olan **kuzey doğu-güney batı** yönünde eko hava koridorları oluşturulmalıdır. Hakim rüzgar yönleri ve iklim değişkenleri de dikkate alınarak yeşil altyapının oluşturulmasında uygun seçimler yapılmalı.
- Güney doğu ve güney batı yönlerinde genişlemeye(büyümeye) devam eden Erzurum'un; kent merkezi hakim rüzgar yönünün **kuzey doğu-güney batı** olduğu göz önüne alınarak, kirleticileri bu noktalardan kent merkezine doğru sürükleyeceği gerçeği şehir planlama stratejileri adına önem arz etmektedir.
- Trafik kaynaklı hava kirliliği ve C- emisyonları göz önüne alındığında; düşük ya da sıfır emisyonlu araç ve yakıt teknolojilerinin acilen hayata geçirilmesi gerekmektedir. Bunların başında düşük yakıt tüketimine sahip ekonomik araçlar, düşük emisyonlu temiz yakıtlar ve emisyonları tamamen ortadan kaldıracak elektrikli araçlar gelmektedir.
- Erzurum merkez ilçelerinde de insan yoğunluğunun bulunduğu noktalarda toplu taşımanın özendirilerek artırılması ve toplu taşıma araçlarında temiz araç teknolojilerine yönelik politikalar geliştirilmesi gerekmektedir.

- Kent içerisinde yaygın raylı taşıma sistem ağının geliştirilmesi aciliyet arz etmektedir.
- Sosyal düzeni de koruyarak trafik hacmini sınırlamak ve trafik sıkışıklığını azaltmaya yönelik ücretli uygulamalar geliştirmek gerekmektedir.
- Okulların, hastanelerin, tarihi eserlerin ve parkların etrafındaki hava kalitesini artırmak için araç trafiğinin azaltılmasına yönelik güzergah düzenlemeleri yapılmalıdır.
- Ulaşım açısından kent dışından geçen çevre yolu ağır vasıtalar için kullanılmalı ve kent içerisinde bu vasıtaların ulaşımının yasaklanması, çevre yolunun teşvik edilmesi gerekmektedir.
- Kirlilik kontrolü için doğru mimari tasarım ve bölgesel planlama yapılmalıdır..
- Erzurum Ulaşım Ana Planı (EUAP) çalışması etkin şekilde ihtiyaca binaen güncellenerek acilen uygulanmalıdır.

Diğer taraftan; toplumsal bilinçlendirme ve duyarlılığın artırılması, akıllı kentlerde önemli bir unsurdur. Erzurum adına yapılan çalışmalarda elde edilen bulgular; hava kalitesiyle ilgili toplumsal farkındalığın önemli bir faktör olduğunu ortaya koymuştur. Zira kuramsal temellerde de tüm detaylarıyla vurguladığımız üzere; Akıllı Kent 3.0 ve 4.0 konseptlerinin geliştirilmesinde insanı önceleyen, kent sakinlerinin konforunu artıracak odaklı yaklaşımlar ön plandadır. Dolayısıyla toplumsal hassasiyet ve bilincin geliştirilmesi adına alınacak her tür önlem akıllı kent konseptini güçlendirecektir. Burada göz ardı edilmemesi gereken bir diğer durum da, kent halkının sosyoekonomik durumudur. Bu sorunun çözümünde doğru planlanmış devlet teşviklerinin yanı sıra farkındalık faaliyetleri son derece önemlidir.

Ayrıca; Erzurum kent merkezinde hava kirliliğinin modellenmesine yapılacak katkılar; kent planlaması ve yönetimi açısından kritik bir öneme sahip olup; şehir sakinlerinin yaşam kalitesini artırmaya yönelik stratejilerin belirlenmesinde ve çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine (SKA-3, SKA-11, SKA-13) ulaşmada yol gösterici olacaktır. Mobil hava kalitesi ölçüm verileri ve detaylı istatistiksel modellerle yardımıyla ; hava kirliliği daha hassas bir şekilde belirlenerek kentin farklı bölgelerindeki verilerin hava kalitesi üzerine olan etkileri daha net bir şekilde ortaya konmuştur. Bu noktada elde edilen sonuçlar, Erzurum'un kentsel dönüşüm süreçlerinde ve çevresel politikanın oluşturulmasında önemli bir rol oynayacaktır.

Bu çalışmanın sonuçlarının değerlendirilmesinden hareketle ; **SKA-3** (Sağlık ve Kaliteli yaşam) nolu amacın altındaki özellikle **3.9** nolu hedef (2030'a kadar zararlı kimyasallardan ve hava, su ve toprak kirliliğinden kaynaklanan hastalıkların ve ölümlerin sayısının büyük ölçüde azaltılması) ve **3.D** nolu hedef (Başta gelişmekte olan ülkeler olmak üzere bütün ülkelerin ulusal

ve küresel sağlık risklerine karşı erken uyarı, riski azaltma ve risk yönetimi kapasitelerinin güçlendirilmesi); **SKA-11**(Sürdürülebilir Şehirler ve Topluluklar) nolu amacın altındaki **11.3** nolu hedef (2030'a kadar bütün ülkelerde kapsayıcı ve sürdürülebilir kentleşmenin geliştirilmesi ve katılımcı, entegre ve sürdürülebilir insan yerleşimlerinin planlanması ve yönetilmesi için kapasitenin güçlendirilmesi) ve **11.6** nolu hedef (2030'a kadar hava kalitesine ve belediye atık yönetimi ve diğer atık yönetimlerine özel önem göstererek kentlerin kişi başına düşen olumsuz çevresel etkilerinin azaltılması) ve **SKA-13** (İklim Eylemi) nolu amacın altındaki **13.2** nolu hedef (İklim değişikliğiyle ilgili önlemlerin ulusal politikalara, stratejilere ve planlara entegre edilmesi) ve **13.3** nolu hedef (İklim değişikliği azaltımı, iklim değişikliğine uyum, etkinin azaltılması ve erken uyarı konularında eğitimin, farkındalık yaratmanın ve insani ve kurumsal kapasitenin geliştirilmesi) hedeflerine katkılar sağlayacağı söylenebilir.



KAYNAKÇA

- Akdamar, E., 2017. Akıllı Kent İdealine Ulaşmada Büyük Verinin Rolü. Kent Akademisi Dergisi, 10 (2), 200-215.
- Akiner, M. E., 2016. Smart Cities Transformation in Turkey. International Journal of Contemporary Architecture, 3(3), 8-16.
- Akyürek, Ö., Arslan, O., Karademir, A., 2013. SO₂ Ve PM₁₀ Hava Kirliliği Parametrelerinin CBS İle Konumsal Analizi: Kocaeli Örneği. TMMOB Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi 2013, Ankara.
- Alvarado, M., Gonzalez, F., Fletcher, A., Doshi, A. 2015. Towards The Development of A Low Cost Airborne Sensing System to Monitor Dust Particles After Blasting At Open-Pit Mine Sites. Sensors (Basel), 15, 19667-19687.
- Amegah, A. K., Jaakkola, J. J., Quansah, R., 2017. Household Air Pollution and The Sustainable Development Goals. Bulletin of The World Health Organization, 95(10), 736.
- Ankara Belediyesi., 2023. Ankara Büyükşehir Belediyesi, <https://www.Ankara.Bel.Tr/>, Erişim Tarihi 16.3.2023.
- Antalya Bel, 2023. Antalya Büyükşehir Belediyesi, <http://www.Antalya.Bel.Tr/>, Erişim Tarihi 16.5.2023.
- Antalyaspor, 2023, Antalyaspor Websitesi, <http://www.Antalyaspor.Com.Tr/Tr/Tesislerimiz/Antalyaspor-Stadyumu.Html>, Erişim Tarihi 16.5.2023.
- ASKİ, 2023. Ankara Su ve Kanalizasyon İdaresi. <http://Aski.Gov.Tr/TR/Anasayfa>, Erişim Tarihi 18.8.2023.
- AŞBB, 2023. Akıllı Şehirler Beyaz Bülteni, Ministry Of Environment And Urbanization Of The Republic Of Turkey. Web Page: https://Webdosya.Csb.Gov.Tr/Db/Cbs/Menu/Akillisehirler-Kitap_20190311022214_20190313032959.Pdf, Erişim Tarihi 19.4.2023.
- Ayturan, Y. A., Ayturan, Z. C., Altun, H. O., 2018. Air Pollution Modelling with Deep Learning: A Review. International Journal of Environmental Pollution And Environmental Modelling, 1(3), 58-62.
- Bağcı, R., Şengün, T. 2012. Çöl Tozlarının Beşeri Çevre Ve Bitkiler Üzerindeki Etkileri. Marmara Coğrafya Dergisi, 24,409-433.
- Balram, D., Lian, K. Y., Sebastian, N., 2019. Air Quality Warning System Based on A Localized PM_{2.5} Soft Sensor Using A Novel Approach of Bayesian Regularized Neural Network Via Forward Feature Selection. Ecotoxicol Environ Saf, 182, 109386.
- Baltacı, H., Alemdar, C.S.O., Akkoyunlu, B.O., 2020. Background atmospheric conditions of high PM₁₀ concentrations in Istanbul, Turkey, Atmospheric Pollution Research, 11(9), 1524-1534. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.06.020>.
- Baltacı, H., Ezber, Y. 2022. Characterization of atmospheric mechanisms that cause the transport of Arabian dust particles to the southeastern region of Turkey. Environ Sci Pollut Res 29, 22771–22784 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17526-y>

- Baltacı, H., Tumay, G., Labban, A. H., 2023. Impact of Drought Conditions on Air Pollution over Turkey. *International Journal of Climatology*.
- Battista, G., Pagliaroli, T., Mauri, L., Basilicata, C., De Lieto Vollaro, R., 2016. Assessment of The Air Pollution Level in The City of Rome (Italy). *Sustainability*, 8(9), 838.
- Bekkar, A., Hssina, B., Douzi, S., & Douzi, K., 2021. Air-Pollution Prediction in Smart City, Deep Learning Approach. *Journal of Big Data*, 8(1), 1-21.
- Berglund, E. Z., Monroe, J. G., Ahmed, I., Noghabaei, M., Do, J., Pesantez, J. E., Levis, J., 2020. Smart Infrastructure: A Vision For The Role Of The Civil Engineering Profession in Smart Cities. *Journal of Infrastructure Systems*, 26(2), 03120001.
- Bernstein, J. A., Alexis, N., Barnes, C., Bernstein, I. L., Nel, A., Peden, D., Williams, P. B., 2004. Health Effects of Air Pollution. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 114(5), 1116-1123.
- Beyhun, N. E., Vançelik, S., Acemoğlu, H., Koşan, Z., Güraksın, A., 2008. Erzurum ili kent merkezinde 2003–2006 yılları arasında hava kirliliği. *TSK Koruyucu Hekimlik Bülteni*, 7(3), 237-242.
- Bibri, S. E., Krogstie, J., 2020. Environmentally Data-Driven Smart Sustainable Cities: Applied Innovative Solutions For Energy Efficiency, Pollution Reduction, And Urban Metabolism. *Energy Informatics*, 3, 1-59.
- Bodhani, A., 2012. Smart Transport. *Engineering & Technology*, 7(6), 70-73.
- Brzozowski, K., Ryguła, A., Maczyński, A., 2019. The Use of Low-Cost Sensors for Air Quality Analysis in Road Intersections. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 77, 198-211.
- Byjus 2023. <https://byjus.com/chemistry/> Erişim Tarihi 3.3.2023.
- Cabis, 2023. Akıllı Bisiklet Kiralama Terminali, Çabis Akıllı Bisiklet Kiralama Sistemi. Web Page: <https://cabis.canakkale.bel.tr/>, Retrieval Date: 15.04.2021.
- Calder, K. E., 2016. Singapore: Smart City, Smart State. Brookings Institution Press.
- Castell, N., Schneider, P., Grossberndt, S., Fredriksen, M. F., Sousa-Santos, G., Vogt, M., Bartonova, A., 2018. Localized Real-Time Information on Outdoor Air Quality at Kindergartens in Oslo. Norway Using Low-Cost Sensor Nodes, *Environ Res*, 165, 410-419.
- Ceylan Z. 2023. Çevre Sağlığı Ve Sürdürülebilir Atık Yönetimi Lisans Üstü Dersi Ders Notları.
- Ceylan, Z., Korkmaz, Ş., 2019. An Overview Of The Effects Of Pms, An Important Atmospheric Pollutant, On The Spread Of Covid-19. 3rd International City, Environment and Health Congress 2021 (Online).
- Chang, K. T., 2016. Geographic Information System. *International Encyclopedia of Geography: People, The Earth. Environment And Technology*, 1-10.
- Chen, D., Zhou, L., Wang, C., Liu, H., Qiu, Y., Shi, G., Song, D., Tan, Q., Yang, F., 2022. Characteristics of ambient volatile organic compounds during spring O₃ pollution episode in Chengdu, China. *Journal of Environmental Sciences*, 114, 115-125.
- Chun, Y., Boo, K.O., Kim, J., Park, S.U., Lee, M. 2000. Synopsis, Transport, and Physical Characteristics of Asian dust in Korea. *Journal of Geophysical Research* 106(D16), 18-469.
- Clements, A. L., Reece, S., Conner, T., Williams, R. 2019. Observed data quality concerns involving low-cost air sensors, *Atmospheric Environment: X*, 3.

- Clements, A. L., Reece, S., Conner, T., Williams, R., 2019. Observed Data Quality Concerns Involving Low-Cost Air Sensors. *Atmospheric Environment: X*, 3.
- Cohen, B., 2014. Smart City Index Master Indicators Survey. <https://Smartcitiescouncil.Com/Resources/Smart-City-Index-Master-Indicators-Survey>. Yayın Tarihi 2014, Erişim Tarihi 11.02. 2023.
- Cordero, J. M., Borge, R., Narros, A. 2018. Using statistical methods to carry out in field calibrations of low cost air quality sensors, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 267, 245-254.
- Costa, D. G., Peixoto, J. P. J., Jesus, T. C., Portugal, P., Vasques, F., Rangel, E., Peixoto, M., 2022. A Survey of Emergencies Management Systems in Smart Cities. *IEEE Access*, 10, 61843-61872.
- Cretescu, I., Lutic, D., Manea, L. R. 2017. Electrochemical Sensors for Monitoring of Indoor and Outdoor Air Pollution, *Electrochemical Sensors Technology*, Chapter 4, 65-84. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.68512>
- Curto, A., Donaire-Gonzalez, D., Barrera-Gomez, J., Marshall, J. D., Nieuwenhuijsen, M. J., Wellenius, G. A., Tonne, C., 2018. Performance of Low-Cost Monitors to Assess Household Air Pollution. *Environ Res*, 163, 53-63.
- Çanakkale Bel, 2023. Çanakkale Metropolitan Municipality. Web Page: <https://www.Canakkale.Bel.Tr/Tr/Sayfa/Home>, Retrieval Date: 15.04.2021.
- Çapraz, Ö., Deniz, A. 2021. Particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}) concentrations during a Saharan dust episode in Istanbul. *Air Qual Atmos Health* 14, 109–116. <https://doi.org/10.1007/s11869-020-00917-4>
- Çevre Koruma, 2023. İstanbul Büyükşehir Belediyesi Çevre Koruma Müdürlüğü. [Http://Cevrekoruma.Ibb.Gov.Tr/Hava/Sayfalar/11/Havakalitesiagimiz](http://Cevrekoruma.Ibb.Gov.Tr/Hava/Sayfalar/11/Havakalitesiagimiz), Erişim Tarihi: 07.04.2023.
- ÇŞİDB, 2023. Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. Akıllı Şehirler Beyaz Bülteni. https://Webdosya.Csb.Gov.Tr/Db/Cbs/Menu/Akillisehirler.Kitap_20190311022214_20190313032959.Pdf. Erişim Tarihi 12.06.2023.
- Daly, A., Zannetti, P., 2007. Air Pollution Modeling—An Overview. *Ambient Air Pollution*, 15-28.
- Dcceew 2023. <https://Www.Dcceew.Gov.Au/Environment> Erişim Tarihi 3.3.2023.
- Do, S., Lee, M., Kim, J.S., 2020. The Effect of A Flow Field on Chemical Detection Performance of Quadrotror Drone. *Sensors*, 20, 3262.
- Dogan, T.R., Yalcın, S.P., 2020. The Atmospheric Transported Desert Dust Over Sanliurfa (Turkey) And Its Structural Properties. *Sigma J Eng & Nat Sci* 38 (4), 1837-1848.
- Doğan, T.R., Yeşilnacar, M.İ., Çullu, M.A., 2018. Seasonal Investigation of Atmospheric Desert Dust Affecting Sanliurfa Using Modis Satellite And HYSPLIT Model Data. *Sigma J Eng & Nat Sci* 36 (3), 905-916.
- Doğanay, H., 1989. Erzurum’da Yeni Bir Sanayi Bölgesi “Erzurum-Ilıca Aksı Çevresi. Atatürk Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Yay.No.55, Edebiyat Kesimi Yay.No.37, Coğrafya Bölümü Yay. No.3, Coğrafya Bölümü “Coğrafya Makaleleri”, Erzurum.
- Dominici, F., Sheppard, L., Clyde, M., 2003. Health Effects Of Air Pollution: A Statistical Review. *International Statistical Review*, 71(2), 243-276.
- Earth.Google 2023. <https://Earth.Google.Com/Web/@39.9017323,41.25826238,1886.35698377a,14959.54799294d,35y,-2.03538514h,51.54000011t,0r> Erişim Tarihi 3.3.2023.

- Elbir, T., Müezzinoğlu, A., Bayram, A., 2000. Evaluation of Some Air Pollution Indicators in Turkey. *Environment International*, 26(1-2), 5-10.
- Elvan, L., Terzi F., Ocakçı, M., Kayapınar, E., Özdil, S., Tekir, A., Benli, B., Gezer, M., Doğan, M., Yılmaz, A.Z., Erten, D., Baraçlı, H., Onaygil, S., Büyükkınacı, B., Güler, Ö., Yurtseven, M. B., Erken, A., Güler, K., 2017. Akıllı Şehirler, Teknik Üniversitesi Vakfı Yayını, Sayı 77, İstanbul, 6-51.
- Enerji İstanbul, 2023. <https://www.enerji.istanbul/gunes-enerjisi/>. Erişim Tarihi Aralık 3, 2020.
- EPA 2023. United States Environmental Protection Agenc. Particulate Matter (PM) Pollution.. <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics> Erişim Tarihi 3.5.2023.
- Erkekoğlu, H., Uslu, H., 2021. Endüstri 4.0 Teknolojik Dönüşüm Sürecinde Seçilmiş Ülkeler ve Türkiye'nin Durumu: Ampirik Bir Analiz. *Verimlilik Dergisi/Journal of Productivity*, 4, 51-65.
- Gaga, E. O., Döğeroğlu, T., Özden, Ö., Ari, A., Yay, O. D., Altuğ, H., Van Doorn, W., 2012. Evaluation of Air Quality By Passive and Active Sampling in An Urban City in Turkey: Current Status and Spatial Analysis of Air Pollution Exposure. *Environmental Science and Pollution Research*, 19, 3579-3596.
- Gao, Y., Dong, W., Guo, K., Liu, X., Chen, Y., Liu, X., Bu, J., Chen, C., 2016. Mosaic: A Low-Cost Mobile Sensing System for Urban Air Quality Monitoring. *IEEE INFOCOM-The 35th Annual IEEE International Conference on Computer Communications*.
- Gaziantep Bel, 2023. Gaziantep Büyükşehir Belediyesi. <https://Gaziantep.Bel.Tr/>, Erişim Tarihi: 20.05.2023.
- Ghasempour, F., Sekertekin, A., Kutoglu, S. H., 2021. Google Earth Engine Based Spatio-Temporal Analysis Of Air Pollutants Before And During The First Wave COVID-19 Outbreak Over Turkey Via Remote Sensing. *Journal Of Cleaner Production*, 319, 128599.
- Glencross, D. A., Ho, T. R., Camina, N., Hawrylowicz, C. M., Pfeffer, P. E., 2020. Air Pollution And Its Effects on The Immune System. *Free Radical Biology and Medicine*, 151, 56-68.
- Gupta, S., Mustafa, S. Z., Kumar, H., 2017. Smart People For Smart Cities: A Behavioral Framework for Personality and Roles. *Advances in Smart Cities*, 23-30.
- Hajduk, S., 2016. The Concept of A Smart City in Urban Management. *Business, Management and Education*, 14(1), 34-49.
- Hajjaji, Y., Boulila, W., Farah, I. R., Romdhani, I., Hussain, A., 2021. Big Data and Iot-Based Applications in Smart Environments: A Systematic Review. *Computer Science Review*, 39, 100318.
- Hall, R. E., Bowerman, B., Braverman, J., Taylor, J., Todosow, H., Von Wimmersperg, U., 2000. The Vision of A Smart City. Brookhaven National Lab.(BNL), Upton, NY (United States).
- Harishkumar, K. S., Yogesh, K. M., Gad, I., 2020. Forecasting Air Pollution Particulate Matter (PM_{2.5}) Using Machine Learning Regression Models. *Procedia Computer Science*, 171, 2057-2066.
- Hava Kalitesi, 2023, Akıllı Şehirler Kapsamında Bir İlk, İstanbul Air Quality Monitoring Center, Web Page: <https://Havakalitesi.lbb.istanbul/>, Retrieval Date: 15.04.2021.

- He, Z., Guo, Q., Wang, Z., & Li, X., 2022. Prediction Of Monthly PM_{2.5} Concentration In Liaocheng In China Employing Artificial Neural Network. *Atmosphere*, 13(8), 1221.
- HGM, 2023. Harita Genel Müdürlüğü. <https://www.harita.gov.tr/>. Erişim Tarihi: 21.11.2023.
- Ilten, N., Selici, A. T., 2008. Investigating The Impacts of Some Meteorological Parameters on Air Pollution in Balıkesir, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 140, 267-277.
- Işık, A.G., Oğuz, K., Oğuz, E., Dündar, C. 2015. Toz-Yağış İlişkisinin Uydu Verileri ile İncelenmesi. Erişim 2 Aralık 2015, kaynak <https://www.researchgate.net>
- Işık, Ü. , Çevik, U. , Bal Akkoca, D. , Oğuz, K. & Damla, N. 2022. Chemical and Radiological Characterizations of the Desert Dust Coming from Northern Africa to Batman (Southeastern Turkey) . *Cumhuriyet Science Journal* , 43 (3) , 526-533 . DOI: 10.17776/csj.1052281
- ITC, 2023. ITC Integrated Solid Waste Systems, Web Page: <https://www.itcturkiye.com/tr>, Retrieval Date: 12.05.2021.
- İBB. 2023. İstanbul Büyükşehir Belediyesi. <https://uyum.ibb.gov.tr/>. Erişim Tarihi 3.3.2023.
- İSTAÇ. 2023. <https://www.istac.istanbul.tr>. Erişim Tarihi 10.3.2023.
- İTÜ, 2023. Türkiye'nin İlk Süper Kentini İTÜ Projelendirdi, İstanbul Teknik Üniversitesi. <http://www.itu.edu.tr/itu-hakkinda/haberler/2016/04/11/turkiyenin-ilk-super-kentini-itu-projelendirdi>, Erişim Tarihi.22.05.2023.
- Jang, J., Shin, S., Lee, H., Moon, I. C., 2020. Forecasting The Concentration of Particulate Matter in the Seoul Metropolitan Area Using A Gaussian Process Model. *Sensors*, 20(14), 3845.
- Johnson, K. K., Bergin, M. H., Russell, A. G., Hagler, G. S. W. 2018. Field Test of Several Low-Cost Particulate Matter Sensors in High and Low Concentration Urban Environments, *Aerosol and Air Quality Research*, 18, 565-578.
- Kampa, M., Castanas, E., 2008. Human Health Effects of Air Pollution. *Environmental Pollution*, 151(2), 362-367.
- Karaci, A., 2018. Akıllı şehir hava takip sistemi ve astım hastaları için pm_{2.5} konsantrasyonu ölçüm aracının geliştirilmesi, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* 6(3), 418 – 425.
- Karadağ T., 2013. An Evaluation of The Smart City Approach, Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- Karimian, H., Li, Q., Wu, C., Qi, Y., Mo, Y., Chen, G., Sachdeva, S., 2019. Evaluation of Different Machine Learning Approaches to Forecasting Pm_{2.5} Mass Concentrations. *Aerosol and Air Quality Research*, 19(6), 1400-1410.
- Konya Bel, 2023, Konya Büyükşehir Belediyesi. <http://www.konya.bel.tr/>, Erişim Tarihi: 21.05.2023.
- Kopar, İ., Zengin, M. 2015. Coğrafi Faktörlere Bağlı Olarak Erzurum Kentinde Hava Kalitesinin Zamansal ve Mekânsal Değişiminin Belirlenmesi. *Türk Coğrafya Dergisi*, 53, 51-69. <https://doi.org/10.17211/tcd.80672>
- Korkmaz, Ş., Ceylan, Z. 2021b. Smart environment applications and general status in Turkey, *International Journal of Environmental Pollution and Environmental Modelling*, 4(2), 64-75.

- Korkmaz, Ş., Ceylan, Z., 2021. An Overview: The Effects Of Particulate Matters, An Important Atmospheric Pollutant, On The Spread Of Covid19. *Jurnal Kesehatan Lingkungan*, 13(3), 159-165. Doi Numarası: 10.20473/jkl.v13i3.2021.159-165
- Korkmaz, Ş., Ceylan, Z., 2023. Investigation of the Effect Atmospherically Transported Desert Dust on $pm_{2.5}$ - pm_{10} Values Using HYSPLIT Back Trajectory Model in Erzurum Turkey. 1st International Multidisciplinary Conference on Emerging Trends in Engineering Technology-IMCEET. 9-11 May 2023. Khairpur Mirs, Pakistan.
- Korkmaz, Ş., Ceylan, Z., Sevindi, C., 2021 Investigation Of The Change Of Particulate Matter (Pm_{10} - $Pm_{2.5}$) Concentrations İn Erzurum City Center Atmosphere İn The Pre- And Post-COVID-19 Pandemic Period, Drawing And Comparison Of Areal Air Quality Pollution Maps. 3rd International Environmental Chemistry Congress (Envirochem), 01-04 November 2021, Mirage Park Resort Hotel - Antalya Türkiye.
- Koşan, Z., Kavuncuoğlu, D., Çalıkoğlu, E. O., Yerli, E. B., 2018. Evaluation of air pollution by PM10 and SO2 levels in Erzurum province, Turkey: Descriptive study. *Journal of Surgery and Medicine*, 2(3), 265-268.
- Kumar, T. V., Dahiya, B., 2017. Smart Economy in Smart Cities. *Smart Economy in Smart Cities*, 3-76.
- Kumar, V., 2020. Smart Environment for Smart Cities. *Smart Environment for Smart Cities*, 1-53.
- Lai, C. S., Jia, Y., Dong, Z., Wang, D., Tao, Y., Lai, Q. H., Lai, L. L., 2020. A Review of Technical Standards for Smart Cities. *Clean Technologies*, 2(3), 290-310.
- Limpinsel, M., Kuo, D., Vijh, A. 2018. Smarts Modeling of Solar Spectra at Stratospheric Altitude and Inluence on Performance of Selected III-V Solar Cells.
- Liu, H., Duan, Z., Chen, C., 2019. A Hybrid Framework For Forecasting PM2.5 Concentrations Using Multi-Step Deterministic And Probabilistic Strategy. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 12, 785-795.
- Lu, Y., Giuliano, G., Habre, R. 2021. Estimating hourly $pm_{2.5}$ concentrations at the neighborhood scale using a low-cost air sensor network: A Los Angeles case study, *Environmental Research*, 195, 110653.
- Madakam, S., Lake, V., Lake, V., Lake, V., 2015. Internet of Things (Iot): A Literature Review. *Journal of Computer and Communications*, 3(05), 164.
- Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., Bezirtzoglou, E., 2020. Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review. *Frontiers in Public Health*, 8, 14.
- Marjovi, A., Arfire, A., Martinoli, A. 2015. High Resolution Air Pollution Maps in Urban Environments Using Mobile Sensor Networks, 2015 International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems, 11-20.
- Mckendry, I. G., 2002. Evaluation of Artificial Neural Networks for Fine Particulate Pollution (PM_{10} And $PM_{2.5}$) Forecasting. *Journal of The Air & Waste Management Association*, 52(9), 1096-1101.
- McKinney, K., Wang, D., Ye, J., De Fouchier, J.B., Guimarães, P., Batista, C., Souza, R., Alves, E., Gu, D., Guenther, A., Martin, S. 2019. A sampler for atmospheric volatile organic compounds by copter unmanned aerial vehicles. *Atmospheric Measurement Techniques*. 12. 3123-3135. 10.5194/amt-12-3123-2019
- Mead M. I., Popoola, O. A. M., Stewart, G. B., Landshoff, P., Calleja, M., Hayes, M., Baldovi1, J. J., Hodgson, T. F., Mcleod, M. W., Dicks, J., Lewis, A., Cohen, J., Baron, R., Saffell,

- J. R., Jones, R. L., 2013. The Use of Electrochemical Sensors for Monitoring Urban Air Quality in Low-Cost, High-Density Networks. *Atmospheric Environment*, 70, 186-203.
- Medium 2023. Low-Cost Ambient Air Quality Monitoring System. <https://Medium.Com/@Oizom/Low-Cost-Ambient-Air-Quality-Monitoring-System-11f8dba184e2> Erişim Tarihi 5.10.2023. Erişim Tarihi 3.4.2023.
- Mevzuat, 2023. Mevzuat Bilgi Sistemi. <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=12188&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5> erişim Tarihi: 23.11.2023.
- MGM, 2023a. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü. Türkiye ve Çevresi Aerosol (Toz Taşınımı) Analizleri 2003-2022. Araştırma Raporu. Ankara, 2023.
- MGM, 2023b. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü. <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=ERZURUM> Erişim Tarihi: 21.12.203.
- Miskell, G., Salmond, J. A., and Williams, D. E. 2018. Solution to the Problem of Calibration of Low-Cost Air Quality Measurement Sensors in Networks, *ACS Sens*, 3, 832-843.
- Miskell, G., Salmond, J., Williams, D. E. 2017. Low-cost sensors and crowd-sourced data: Observations of siting impacts on a network of air-quality instruments, *Sci Total Environ*, 575, 1119-1129.
- Moch, N., Wereda, W., 2020. Smart Security in The Smart City. *Sustainability*, 12(23), 9900.
- NASA 2023. NASA Worldview. <https://worldview.earthdata.nasa.gov/> Erişim Tarihi 3.12.2023.
- NOAA 2022. HYSPLIT. HYSPLIT models simulate the dispersion and trajectory of substances transported and dispersed through our atmosphere, over local to global scales. <https://www.arl.noaa.gov/hysplit/> Erişim Tarihi 3.9.2023.
- O'Dwyer, E., Pan, I., Acha, S., Shah, N., 2019. Smart Energy Systems for Sustainable Smart Cities: Current Developments, Trends and Future Directions. *Applied Energy*, 237, 581-597.
- Oğuz, K., Dünder, C., Pekin, M.A. 2015. 7-12 Eylül 2015 tarihli Toz Fırtınasının Uzaktan Algılama Verileri ile Analizi. Erişim 3 Mayıs 2016, kaynak <https://www.researchgate.net>
- Oğuz, K., Pekin, M.A., Dünder, C. 2013. Uzaktan Algılama Verileri ile Toz Taşınımı Analizi. I. Meteorolojik Uzaktan Algılama Çalıştayı, 5-7 Kasım 2013, Antalya.
- Özdemir, E.T. 2019. Investigations of a Southerly Non-Convective High Wind Event in Turkey and Effects on PM10 Values: A Case Study on April 18, 2012. *Pure Appl. Geophys.* 176, 4599–4622 <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02240-1>
- Öztaner, Y. B., Özdemir, E.T., Sezen, İ., Deniz, A., Efe, B., 2013. Türkiye’de 18 Nisan 2012’de Meydana Gelen Güneyli Fırtınada Havalimanlarında Gözlemlenen Kum Ve Tozların Atmosferik Taşınımalarının Ve Pm10 Profillerinin İncelenmesi. Conference: OSTIV 2013, Meteorological PanelAt: Antalya / TurkeyVolume: 1 September 2013
- Öztaner, Y.B., Kahraman, A., Çalışkan, E., Tilev Tanrıöver, Ş., Kahya, C., Aksoy, B., İncecik, S., Topçu, S., Aslan, S., Barutçu, B., Sezen, İ., Sakarya, S., Deniz, A. 2014. Açık Gökyüzü Şartlarında Güneş Radyasyonunun WRF Modeli ile Kısa Vadeli Tahmininde Aerosol Etkisinin Değerlendirilmesi, *Hava Kirliliği Araştırmaları Dergisi*, 3, 2-11.

- Peng, J., Han, H., Yi, Y., Huang, H., Xie, L., 2022. Machine Learning and Deep Learning Modeling and Simulation for Predicting PM 2.5 Concentrations. *Chemosphere*, 308, 136353.
- Pope, C. A., Dockery, D. W., Schwartz, J., 1995. Review of Epidemiological Evidence of Health Effects of Particulate Air Pollution. *Inhalation Toxicology*, 7(1), 1-18.
- Popoola, O., Carruthers, D., Lad, C., Bright, V., Mead, M., Stettler, M., Saffell, J., Jones R. I., 2018. Use Of Networks of Low Cost Air Quality Sensors To Quantify Air Quality in Urban Settings. *Atmospheric Environment*, 194 58-70.
- Pramanik, M. I., Lau, R. Y., Demirkan, H., Azad, M. A. K., 2017. Smart Health: Big Data Enabled Health Paradigm within Smart Cities. *Expert Systems with Applications*, 87, 370-383.
- Pubchem 2023. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/> Erişim Tarihi 3.3.2023.
- Qian, L., Luo, Z., Du, Y., Guo, L., 2009. Cloud Computing: An Overview. in *Cloud Computing: First International Conference*, Beijing, China, December 1-4, 2009. *Proceedings 1* (Pp. 626-631). Springer Berlin Heidelberg.
- Razmjoo, A., Nezhad, M. M., Kaigutha, L. G., Marzband, M., Mirjalili, S., Pazhoohesh, M., Piras, G., 2021. Investigating Smart City Development Based on Green Buildings, Electrical Vehicles and Feasible İndicators. *Sustainability*, 13(14), 7808.
- Remourban, 2023, Regeneration Model For Accelerating The Smart Urban Transformation, Web Page: [Http://Remourban.Tepebasi.Bel.Tr/Hakkimizda.Html](http://Remourban.Tepebasi.Bel.Tr/Hakkimizda.Html), Retrieval Date: 22.05.2021.
- Rohi, G., Ejofodomi, O., Ofualagba, G. 2020. Autonomous monitoring, analysis, and countering of air pollution using environmental drones, *Heliyon*, 6(1), e03252. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03252>.
- Rückerl, R., Schneider, A., Breitner, S., Cyrus, J., Peters, A., 2011. Health Effects of Particulate Air Pollution: A Review of Epidemiological Evidence. *Inhalation Toxicology*, 23(10), 555-592.
- Sagiroglu, S., Sinanc, D., 2013. Big Data: A Review. in *2013 İnternational Conference on Collaboration Technologies and Systems (CTS)*. 42-47, IEEE.
- Sağol, S., Bingöl, Z., Demircioğlu, N., 2008. Erzurum İli Hava Kirleticilerinin 1996-2008 Yıllarındaki Değişimlerinin İncelenmesi Hava Kirliliği ve Kontrolü Ulusal Sempozyumu-2008, 22-25 Ekim 2008, Hatay, Türkiye.
- Sahin, F., Kara, M. K., Koc, A., Sahin, G., 2020. Multi-Criteria Decision-Making Using GIS-AHP For Air Pollution Problem in Iğdir Province/Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 36215-36230.
- Sevindi, C., 2018. Erzurum Ovası'nda 1947-2015 Yılları Arasında Arazi Kullanımındaki Değişmeler. *Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 22(3), 2885-2873.
- Sevindi, C., 2019. Alaybeyi Höyüğü (Erzurum-Aziziye) ve Çevresinin Mekânsal Özellikleri. Gülşah Altunkaynak (Ed.), *Alaybeyi Höyük*, (ss.33-64), Ankara: Bilgin Kültür Sanat Yayınları.
- Sevindi, C., 2022. Erzurum İlinde Arazi Kullanımı. *Erzurum İlinde Coğrafya Araştırmaları*, İstanbul: Kriter Yayınevi. 267-344.
- Sevindi, C., Demir, Ş., 2019. Erzurum İli'nde Arazi Kullanımı. *Middle East International Conference On Contemporary Scientific Studies-II*, Gaziantep, Türkiye, 19-22 Eylül 2019, 259-272.

- Shahid, N., Shah, M. A., Khan, A., Maple, C., Jeon, G., 2021. Towards Greener Smart Cities and Road Traffic Forecasting Using Air Pollution Data. *Sustainable Cities and Society*, 72, 103062.
- Shamsuzzoha, A., Nieminen, J., Piya, S., Rutledge, K., 2021. Smart City for Sustainable Environment: A Comparison of Participatory Strategies From Helsinki, Singapore and London. *Cities*, 114, 103194.
- Sınmaz, S. 2013. Yeni Gelişen Planlama Yaklaşımları Çerçevesinde Akıllı Yerleşme Kavramı ve Temel İlkeleri, *Megaron*, 8(2), 76-86.
- SİM CBS 2023. Hava Kalitesi İzleme Sistemi. Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. <https://sim.csb.gov.tr/Home/HKI?baslik=HAVZA%20%C4%B0ZLEME%20S%C4%B0STEM%C4%B0>
- Simo, A., Dzitac, S., Dzitac, I., Iliasa, M. F., Iliasa, F. M. F. 2021. Air Quality Assessment System Based on Self-Driven Drone and Lorawan Network, *Computer Communications*, 175, 13-24.
- Singh, D., Dahiya, D.M., Kumar, R., Nanda, C. 2021. Sensors And Systems For Air Quality Assessment Monitoring and Management: A Review. *Journal of Environmental Management*, 289, 112510.
- Soe, R.M., 2021, The Smart City Wheel By Boyd Cohen, Web Page: https://www.researchgate.net/figure/The-Smart-City-Wheel-By-Boyd-Cohen_Fig3_317269039, Erişim Tarihi 3.6.2023.
- Srivastava, A., Rao, B. P. S., 2011. Urban Air Pollution Modeling. *Air Quality-Models and Applications*, 364.
- Su L, Yuan Z, Fung JC, Lau AK. 2018. A comparison of HYSPLIT backward trajectories generated from two GDAS datasets. *Sci Total Environ*. 2015 Feb 15;506-507:527-37. doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.11.072.
- Svítek M., Skobelev P., Kozhevnikov S., 2019. Smart City 5.0 As An Urban Ecosystem of Smart Services, International Workshop on Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing. *Service Oriented, Holonic and Multi-Agent Manufacturing Systems for Industry of The Future*, 426-438.
- Şengün, T. ve Kıranşan, K. 2012. Çöl Tozlarının Türkiye’de Doğal Ve Beşeri Ortam Üzerine Etkisi. *Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 22(2), 1-15.
- Şengün, T. ve Kıranşan, K. 2013. Sahra Çölü Tozlarının Akdeniz Havzasına Etkisi, 3rd International Geography Symposium - GEOMED 2013. In R. Efe, İ. Atalay, İ. Cürebal (Eds.). *Symposium Proceedings* (pp.582-596), Kemer, Antalya, TURKEY, 10 – 13 Haziran 2013.
- Şentürk, A., Kara, R. 2017. Low Cost Air Pollution Monitoring with Wireless Sensor Networks, *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology*, 4(10), 8497-8503.
- Tagle M., Rojas, F., Reyes, F., Vásquez, Y., Hallgren, F., Lindén, J., Kolev, D., Watne, A. K., Oyola, P., 2020. Field Performance Of A Low-Cost Sensor in The Monitoring of Particulate Matter in Santiago, Chile. *Environ Monit Assess*, 192(3), 171.
- Tan, M. 2016. Exploring The Relationship Between Vegetation and Dust-Storm İntensity (DSI) in China. *Geographical Sciences*, 26(4), 387-396.
- Tasdemir, Y., Cindoruk, S. S., Esen, F., 2005. Monitoring of Criteria Air Pollutants in Bursa, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 110, 227-241.

- Tepe, A.M., Doğan, G., 2021. Chemical characterization of PM_{2.5} and PM_{2.5-10} samples collected in urban site in Mediterranean coast of Turkey, *Atmospheric Pollution Research*, 12(1), 46-59, <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.08.012>.
- Tepebaşı 2023. Tepebaşı Belediyesi. [Http://www.Tepebasi.Bel.Tr/Projeler.Asp](http://www.Tepebasi.Bel.Tr/Projeler.Asp), Erişim Tarihi 13.3.2023.
- Topuz, M., Karabulut, M. 2017. Eylül 2015 Hatay Çöl Tozu Taşınımı Değerlendirmesi / Desert Dust Transport Assessment in Hatay in September 2015, *Turkish Studies -International Periodical for the Languages, Literature and History of Turkish or Turkic* Volume 12(3).
- Tuba R. D., Demet Y. Serife Y., 2021. Gamma ray characterization of the albedo of atmospheric dust from Southeast Anatolia, Turkey, *Instrumentation Science & Technology*, 49:6, 604-615, DOI: 10.1080/10739149.2021.1915797
- Turan, G., Bozkurt, Z., 2020. Spatiotemporal Analysis of Air Pollution and Health Risk Assessment in Erzurum, Turkey. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 8(12), 2831-2838.
- TÜİK, 2023. Türkiye istatistik kurumu. <https://data.tuik.gov.tr/>. Erişim Tarihi: 12.09.2023.
- Uçar, A., Şemşit, S., Negiz N., 2017. Avrupa Birliği Akıllı Kent Uygulamaları ve Türkiye'deki Yansımaları. *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 22 (Kayfor15 Özel Sayısı), 1785-1798.
- UHKIA. 2023. Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Sürekli İzleme Sistemi. <https://sim.csb.gov.tr/>. Erişim Tarihi 15.11.2023
- Ullo, S. L., Sinha, G. R., 2020. Advances in Smart Environment Monitoring Systems Using Iot and Sensors. *Sensors*, 20(11), 3113.
- Usmonov, M., 2021. Basic Concepts of Information Security. *Science Web Academic Papers Collection*. 5(1), 5-8.
- Villa, T.F., Gonzalez, F., Miljevic, B., Ristovski, Z.D., Morawska, L., 2016. An Overview of Small Unmanned Aerial Vehicles for Air Quality Measurements: Present Applications and Future Prospectives. *Sensors*, 16, 1072.
- Völgyesi, P., Nádas, A., Koutsoukos, X., Lédeczi, A. 2008. Air Quality Monitoring with SensorMap, 2008 International Conference on Information Processing in Sensor Networks (ipsn 2008), 529-530.
- Wang, P., Zhang, H., Qin, Z., Zhang, G., 2017. A Novel Hybrid-Garch Model Based on ARIMA and SVM For PM 2. 5 Concentrations Forecasting. *Atmospheric Pollution Research*, 8(5), 850-860.
- Wang, Y., Guo, Z., Han, J., 2021. The Relationship Between Urban Heat Island and Air Pollutants and Them With Influencing Factors in The Yangtze River Delta, China. *Ecological Indicators*, 129, 107976.
- Weissert, L. F., Alberti, K., Miskell, G., Pattinson, W., Salmond, J. A., Henshaw, G., Williams, D. E., 2019. Low-Cost Sensors And Microscale Land Use Regression: Data Fusion to Resolve Air Quality Variations With High Spatial and Temporal Resolution, *Atmospheric Environment*, 213, 285-295.
- WHO 2023. Ambient (outdoor) 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). Erişim Tarihi 15.11.2023
- Xiao, F., Yang, M., Fan, H., Fan, G., Al-Qaness, M. A., 2020. An Improved Deep Learning Model for Predicting Daily PM 2. 5 Concentration. *Scientific Reports*, 10(1), 20988.

- Yeo, I., Choi, Y., Lops, Y., Sayeed, A., 2021. Efficient PM 2.5 Forecasting Using Geographical Correlation Based on Integrated Deep Learning Algorithms. *Neural Computing and Applications*, 33(22), 15073-15089.
- Yıldız A., 2018. Endüstri 4.0 ve Akıllı Fabrikalar, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22 (2), 546-556.
- Zamani Joharestani, M., Cao, C., Ni, X., Bashir, B., Talebiesfandarani, S., 2019. PM 2.5 Prediction Based on Random Forest, Xgboost, and Deep Learning Using Multisource Remote Sensing Data. *Atmosphere*, 10(7), 373.
- Zeydan, Ö., Yildirim, Y., Karademir, A., Durmuşoğlu, E., 2014. Hava Kalitesi Modellenmesinde Coğrafi Bilgi Sistemlerinin Kullanımı: Zonguldak Örneği, 5. Uzaktan Algılama-Cbs Sempozyumu (Uzal-Cbs 2014), İstanbul.
- Zhao, B., Yu, L., Wang, C., Shuai, C., Zhu, J., Qu, S., Taiebat, M., Xu, M., 2021. Urban Air Pollution Mapping Using Fleet Vehicles as Mobile Monitors and Machine Learning”, *Environmental Science and Technology*, 55(8), 5579-5588.
- Zhou, Y., Chang, F. J., Chang, L. C., Kao, I. F., Wang, Y. S., Kang, C. C., 2019. Multi-Output Support Vector Machine for Regional Multi-Step-Ahead PM 2.5 Forecasting. *Science of The Total Environment*, 651, 230-240.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Şahin KORKMAZ
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	
Lisans:	
Yüksek lisans:	
Doktora:	
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	
Tezden Üretilmiş Yayınlar (Makale ve Uluslararası Kongre Sunumları)	

