



T.C.

BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
TEKNOLOJİ TRANSFER OFİSİ

## AKADEMİK İNCELEME RAPORU

Hazırlayan:

**Prof.Dr. S. Sıddık CİNDORUK**

Bu rapor, Mudanya Belediyesi tarafından hazırlanmıştır. Her hakkı mahfuzdur.

Mart 2025, BURSA

## İçindekiler

1. Giriş.....	3
2. Literatür Taraması .....	3
2.1. Klasik Hava Kirleticiler .....	3
2.1.1. Doğal Hava Kirleticileri .....	4
2.1.2. Antropojenik Hava Kirleticileri.....	4
2.2. Hava Kirleticilerin Özellikleri ve Etkileri.....	4
2.2.1. Kükürt dioksit (SO <sub>2</sub> ) .....	4
2.2.2. Azot oksitler (NO <sub>x</sub> ).....	5
2.2.3. Ozon (O <sub>3</sub> ) .....	6
2.2.4. Partikül Madde (PM) .....	6
2.2.5. Karbonmonoksit (CO) .....	7
3. Hava Kalitesi İndeksi.....	9
4. Materyal ve Yöntem .....	13
4.1. Geleneksel Ölçüm Yöntemleri .....	13
4.2. Sensör Tabanlı Ölçüm Yöntemleri .....	14
4.3. Karşılaştırmalı Değerlendirme ve Veri İşleme .....	15
4.4. Sensör teknolojilerinin literatürde kullanımı.....	16
5. Bulgular.....	17
5.1. Tirilye.....	18
5.2. Halitpaşa.....	20
5.3. Ömerbey.....	25
5.4. Yenimahalle .....	29
5.5. Eğitim.....	33
6. Değerlendirme.....	36
7. Sonuç.....	44
8. Kaynaklar .....	46

## Şekiller Dizini

Şekil 1. Hava kalitesi ölçümlerinin yapıldığı noktalar .....	13
Şekil 2. Airqoon sensörlü ölçüm cihazı .....	14
Şekil 3. Tirilye Mahallesi ölçüm sonuçları (2023) .....	18
Şekil 4. Tirilye Mahallesi ölçüm sonuçları (2024) .....	18
Şekil 5. Halitpaşa Mahallesi ölçüm sonuçları (2023) .....	20
Şekil 6. Halitpaşa Mahallesi ölçüm sonuçları (2024) .....	21
Şekil 7. Ömerbey Mahallesi ölçüm sonuçları (2023) .....	25
Şekil 8. Ömerbey Mahallesi ölçüm sonuçları (2024) .....	26
Şekil 9. Yenimahalle Mahallesi ölçüm sonuçları (2023) .....	29
Şekil 10. Yenimahalle Mahallesi ölçüm sonuçları (2024) .....	30
Şekil 11. Eğitim Mahallesi ölçüm sonuçları (2023) .....	33
Şekil 12. Eğitim Mahallesi ölçüm sonuçları (2024) .....	34
Şekil 13. PM <sub>10</sub> dağılım haritası .....	37
Şekil 14. PM <sub>2.5</sub> dağılım haritaları .....	39
Şekil 15. NO <sub>2</sub> dağılım haritaları .....	40
Şekil 16. O <sub>3</sub> dağılım haritaları .....	42
Şekil 17. SO <sub>2</sub> dağılım haritaları .....	43

## Tablolar Dizini

Tablo 1. Hava kirletici kaynakları, çevre ve sağlığa etkileri .....	7
Tablo 2. Hava kalitesi sınır değerleri .....	10
Tablo 3. Ulusal Hava Kalitesi İndeksi .....	11
Tablo 4. Ulusal Hava Kalitesi İndeksi (HKİ) Kesme Noktaları .....	11
Tablo 5. İndeks hesaplanan parametrelerin sınır değerleri .....	12
Tablo 6. Kirletici parametreler ve sağlık etkileri .....	13
Tablo 7. Airqoon sensör teknik özellikleri .....	15
Tablo 8. Airqoon sensör çalışma performansı .....	15
Tablo 9. Sensör teknolojilerinin kullanıldığı hava kalitesi izleme çalışmaları .....	16

## 1. Giriş

Hava kalitesi, insanların sağlığı, yaşam kalitesi ve çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu bağlamda, Mudanya Belediyesi'nin hava kirliliği ile mücadele ve çevre sağlığının korunması yönündeki stratejik yaklaşımları doğrultusunda, ilçemizde bulunan beş farklı hava kalitesi ölçüm istasyonu – Tirilye, Halitpaşa, Ömerbey, Yenimahalle ve Eğitim – üzerinden gerçekleştirilen ölçümler titizlikle incelenmiştir. Bu raporda, 2023 ve 2024 yılları boyunca elde edilen veriler ışığında PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> ve SO<sub>2</sub> gibi başlıca kirleticilerin dağılımı, yoğunluğu ve zamansal değişimleri detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir.

Araştırmanın temel amacı, ilçemizin hava kalitesini etkileyen çeşitli kirleticilerin mevcut durumunu belirleyerek, olası risklerin ve iyileştirme alanlarının tespit edilmesidir. Bu amaç doğrultusunda, seçilen ölçüm istasyonlarından elde edilen veriler, hem mevsimsel hem de yıllık bazda analiz edilerek, hava kirliliği kaynaklarının ve yoğunluklarının belirlenmesi hedeflenmiştir. Özellikle PM<sub>10</sub> ve PM<sub>2.5</sub> gibi partikül maddelerin sağlık üzerindeki olumsuz etkileri göz önünde bulundurularak, bu kirleticilerin sınır değerlerle uyumunun sağlanıp sağlanmadığı dikkatle izlenmiştir. Aynı zamanda, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> ve SO<sub>2</sub> gibi gaz halindeki kirleticilerin yoğunlukları, endüstriyel faaliyetler, trafik ve diğer insan kaynaklı etkilerle ilişkilendirilmiş, detaylı karşılaştırmalar yapılmıştır.

Çalışmanın kapsamı, ölçüm istasyonlarının coğrafi konumlarına ve bölgesel özelliklerine göre farklılık gösterebilecek hava kirliliği dinamiklerini ortaya koymayı amaçlamaktadır. Her bir istasyonun bulunduğu çevre, yerleşim alanları, sanayi bölgeleri ve yeşil alanların dağılımı gibi etmenler, verilerin yorumlanmasında önemli rol oynamaktadır. Bu nedenle, elde edilen sonuçların yorumlanması sürecinde yerel özellikler de göz önünde bulundurulmuş; kirleticilerin mevsimsel dalgalanmaları ve potansiyel sağlık etkileri bilimsel yöntemlerle ele alınmıştır.

Rapor, mevcut hava kalitesi durumunun yanı sıra, geleceğe yönelik öneriler ve iyileştirme stratejilerinin geliştirilmesine de ışık tutmayı hedeflemektedir. Elde edilen veriler, özellikle yerel yönetim ve ilgili paydaşlar için politika oluşturma süreçlerinde rehber niteliğinde olup, toplum sağlığına yönelik atılacak adımların belirlenmesinde önemli bir temel teşkil etmektedir. Böylece, hem bugünün çevresel sorunlarının çözümüne katkı sağlanması hem de gelecekte daha sağlıklı bir çevre için gerekli düzenlemelerin yapılması amaçlanmaktadır.

Sonuç olarak, bu rapor; hava kirliliğinin mevcut durumu, bölgesel farklılıkları ve potansiyel riskler üzerine kapsamlı bir değerlendirme sunarken, aynı zamanda yerel halkın yaşam kalitesinin artırılması ve sürdürülebilir çevre politikalarının oluşturulmasına katkıda bulunmayı hedeflemektedir.

## 2. Literatür Taraması

### 2.1. Klasik Hava Kirleticiler

Kentsel alanda kirletici maddeler insan sağlığına, canlı hayatına ve ekolojik dengeye zarar verecek şekilde, yoğunlukta ve sürede havada katı, sıvı ve gaz formlarda bulunmaktadır. Klasik hava kirleticileri CO, azot oksitler, sülfür oksitler, hidrokarbonlar ve partikül

maddelerdir (hem katı hem de sıvı). Hava kirleticileri, doğal ve antropojenik (insan faaliyetleri neticesinde ortaya çıkan) olmak üzere temel iki kaynağı bulunmaktadır.

### 2.1.1. Doğal Hava Kirleticileri

Volkanik patlamalar, orman yangınları, biyojenik faaliyetler, bitki ve hayvan artıklarının bozulması atmosfere çeşitli gaz ve partiküllerin salınmasına neden olmaktadır. Dünyanın çeşitli yerlerinde zaman zaman volkanik faaliyet gösteren yanardağlar önemli bir doğal hava kirletici kaynaktır. Benzer şekilde, özellikle yaz aylarında meydana gelen orman yangınları da atmosfere kirletici gaz ve toz yaymaktadır. Bunların dışında tarımsal faaliyetler, bitki ve hayvan artıklarının bozulma ürünleri de hava kirletici kaynakları arasında yer almaktadır.

### 2.1.2. Antropojenik Hava Kirleticileri

Hava kirliliğine neden olan antropojenik kaynaklar, insanların faaliyetleri sonucu oluşan kaynaklardır. Klasik hava kirleticiler genellikle antropojenik faaliyetler sonucu atmosfere deşarj edilmektedir. Isıtma amacıyla konutlarda/iş yerlerinde yakıt kullanımı, ulaşım, taşıt trafiği, sanayi faaliyetleri olarak sınıflandırılabilir. Ev ve işyerlerinde ısınma amacıyla kullanılan katı (kömür), sıvı (fuel oil) ve gaz (doğal gaz) yakıtların yanması sonucu hava kirleticileri ortaya çıkmaktadır. Isınma sistemlerinden kaynaklanan hava kirliliği yakıt özelliğine ve yakma sistemine bağlı değişiklik göstermektedir. Ortaya çıkan bu kirleticiler, yerleşim alanlarında yaşanan hava kirliliğinin önemli bir bölümünden sorumludur. Yakma sistemlerinden kaynaklanan kirleticiler, yaşadığımız kentlerde özellikle kış mevsiminde önemli bir hava kirliliği sorunu oluşturmaktadır. Karbon monoksit (CO), kükürt dioksit (SO<sub>2</sub>), azot oksitler (NO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>x</sub>), ozon (O<sub>3</sub>) ve partikül madde (PM) başlıca hava kirleticileri olarak sayılabilmektedir.

Klasik hava kirleticiler aşağıdaki şekilde tanımlanırlar:

- **Partikül Madde (PM<sub>10</sub> ve PM<sub>2.5</sub>):** Çapı 10 mikrometreden küçük olan PM<sub>10</sub> ve 2.5 mikrometreden küçük olan PM<sub>2.5</sub> partikülleri solunum yoluyla akciğerlere ulaşarak sağlık sorunlarına neden olabilir.
- **Kükürt Dioksit (SO<sub>2</sub>):** Genellikle fosil yakıtların yanmasıyla oluşur ve solunum yolları hastalıklarını tetikleyebilir.
- **Azot Oksitler (NO<sub>x</sub>, NO ve NO<sub>2</sub>):** Trafik ve endüstriyel faaliyetlerden kaynaklanır ve solunum hastalıklarına, asit yağmurlarına neden olabilir.
- **Karbon Monoksit (CO):** Eksik yanma sonucu ortaya çıkan renksiz ve kokusuz bir gazdır, yüksek seviyelerde zehirlenmelere yol açabilir.
- **Ozon (O<sub>3</sub>):** Stratosferde koruyucu bir tabaka olarak faydalı olsa da, troposferde (yeryüzüne yakın bölgede) oluştuğunda solunum rahatsızlıklarına ve çevresel zararlara neden olur.
- **Kurşun (Pb):** Eski yakıt türleri, metal üretimi ve piller gibi kaynaklardan yayılır ve sinir sistemi üzerinde toksik etkiler gösterebilir.
- **Benzen (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>) ve Diğer Uçucu Organik Bileşikler (VOC'ler):** Endüstriyel ve evsel kullanım kaynaklıdır, uzun süreli maruziyet kanser riskini artırabilir.

## 2.2. Hava Kirleticilerin Özellikleri ve Etkileri

### 2.2.1. Kükürt dioksit (SO<sub>2</sub>)

Kükürt dioksit (SO<sub>2</sub>), Kükürt oksitler (SO<sub>x</sub>) en çok bilinen hava kirleticilerdendir. Havadaki kükürt oksitler içerisinde en önemli pay SO<sub>2</sub> gazına aittir. SO<sub>2</sub>, kükürt içeren kömür ve petrolün yanmasından meydana gelir. Özellikle katı ve sıvı yakıtlarda bulunan kükürdün yanması sonucu oluşan, renksiz, yanmayan ve parlamayan bir gazdır. Kükürt, ham petrol, kömür, alüminyum, bakır, çinko, kurşun, demir gibi maden cevherlerinde doğal olarak bol

miktarda bulunmaktadır.  $SO_x$  gazları ise petrol, kömür gibi kükürt içeren katı ve sıvı yakıtların yanması sonucu oluşmaktadır. Petrolden benzin ekstrakte edilmesi ve maden cevherlerinden metallerin zenginleştirilmesi gibi prosesler sonucunda da  $SO_x$  gazları oluşmaktadır. Elektrik üretiminde kullanılan yakıtlar atmosfere salınan  $SO_2$ 'nin en büyük kaynağıdır.

Yakıt olarak kömür kullanan termik santraller büyük miktarlarda  $SO_2$  emisyonu salmaktadır. Petrol rafineleri, çimento fabrikaları, metalürji endüstrisi gibi tesisler de atmosfere  $SO_2$  salınımını gerçekleştirmektedir. Atmosferde kalıcılık süresi 40 günü bulan kükürt dioksit, 9 kuvvetli bir solunum sistemi tahriş edicisi olan sülfürik asit oluşturacak şekilde kimyasal tepkimeye girebilir. Yanardağlardan ve kükürt içeren yakıtların sanayide yüksek sıcaklıklarda yanmasından kaynaklanan  $SO_2$ , bulutlarla havada yükselir. Bu esnada havadaki oksijen ve su ile tepkimeye girerek, ikincil kirleticiler olarak önce sülfüroz asit ( $H_2SO_3$ ), daha sonra da sülfürik asit ( $H_2SO_4$ ) oluşturarak asit yağmurlarına dönüşür. Kükürt dioksit ve azot oksit atmosferde su molekülleri ile tepkimeye girerek asit üretir ve asit yağmurlarına yol açar. Asit yağmurları göl ve akarsulardaki hayvan popülasyonlarına zararlı olur. Göl ve gölcüklerde suyun pH'sını düşürerek pek çok organizmayı öldürebilir veya üreme yeteneklerini etkileyebilir. Aynı zamanda ağaçların ve diğer bitkilerin yaprak ve köklerine zarar verir. Asit yağmurları metal ile taş bina ve heykellere de zarar verir. Asit yağmurları sadece kirleticinin kaynağında değil aynı zamanda hava kütlelerinin hareketine bağlı olarak yüzlerce kilometre uzakta da meydana gelir.

İnsan sağlığına etkileri açısından  $SO_2$ , asidik bir gazdır. Özellikle astım, kalp ve akciğer hastaları, çocuk ve yaşlılar  $SO_2$  kirliliği açısından risk altındadır. Sağlıklı kişilerin yüksek konsantrasyonlarda uzun süreli maruziyetleri sonucunda solunum sistemi tahribatı, kalp hastalıklarının tetiklenmesi gibi etkiler meydana gelmektedir. Dünyada yılda yaklaşık olarak 80 milyon ton kükürt oksitler atmosfere verilmektedir. Asit ve sülfatlar yağış yolu ile atmosferden uzaklaştırılır.

### 2.2.2. Azot oksitler ( $NO_x$ )

Azot, atmosferin doğal bileşenidir. Hem asit çökmesi hem de fotokimyasal duman (ozon) oluşumunda önemlidir ve azot yüklemesine neden olmaktadır. Azot bazlı gübreler, ormansızlaşma, fosil yakıtların yakılması ve biyokütle yakımından dolayı azot oksitler oluşmaktadır. İnsan faaliyetlerinden yılda 30 ila 50 milyon ton ve doğal olarak yılda 10 ila 20 milyon ton meydana gelmektedir. Atmosferdeki ortalama kalma süresi günler sürmektedir.

Azot monoksit (NO) ve azot dioksit ( $NO_2$ ) toplamı azot oksitleri ( $NO_x$ ) oluşturmaktadır. Azot oksitler genellikle (%90 durumda) NO olarak dışarı verilmektedir. NO ve  $NO_2$ 'nin ozon veya radikallerle (OH veya  $HO_2$  gibi) reaksiyonu sonucunda oluşmaktadır. Benzin, mazot ve doğal gazların yüksek sıcaklıklı yanmasından meydana gelir. İnsan sağlığını en çok etkileyen azot oksit türü olması itibari ile  $NO_2$  kentsel bölgelerdeki en önemli hava kirleticilerinden biridir. Azot oksitler sıcaklık terselmesi sırasında şehirleri kaplayan tehlikeli bir sis olan havadaki dumanın başlıca bileşenleridir. Azot dioksit güneş ışığına maruz kaldığında, kirli kahverengimsi bir renk alır. Azot oksit ( $NO_x$ ) emisyonları insanların yarattığı kaynaklardan oluşmaktadır. Ana kaynakların başında kara, hava ve deniz trafiğindeki araçlar ve endüstriyel tesislerdeki yakma kazanları gelmektedir.

İnsan sağlığına etkileri açısından, sağlıklı insanların çok yüksek  $NO_2$  derişimlerine kısa süre dahi maruz kalmaları şiddetli akciğer tahribatlarına yol açabilmektedir. Kronik akciğer rahatsızlığı olan kişilerin ise bu derişimlere maruz kalmaları akciğerde kısa vadede fonksiyon bozukluklarına yol açabilmektedir. Uzun süre maruz kalınması durumunda ise solunum yolu rahatsızlıklarının ciddi oranda arttığı gözlenmektedir.

### 2.2.3. Ozon (O<sub>3</sub>)

Ozon, üç oksijen atomundan oluşan bir gazdır. Yer seviyesi atmosferde kompleks reaksiyonlar sonucu oluşmaktadır. Ozon, atmosferde bulunduğu yere göre “faydalı” veya “zararlı” olabilmektedir. Atmosferdeki ozonun yaklaşık %10’u atmosferin alt katlarında, troposferde bulunur. Buna karşılık yaklaşık %90’nın bulunduğu stratosferdeki ozon, canlı yaşamında önemli rol oynar. Stratosferdeki ozon, güneşten gelen morötesi ışınların enerjisini alıkoyan bir döngü içinde sürekli parçalanıp yeniden oluşur. Bu olgu, atmosferin bu katmanında 77 °C ye varan bir sıcaklık artışı sağlar. Özellikle sıcak yaz günlerinde güneş ışığının etkisiyle yüksek miktarlarda ozon üretilmektedir.

Ozon kimyasal formülü O<sub>3</sub> olan inorganik bir moleküldür. Farklı bir biçimde keskin kokulu, soluk mavi renkte bir gazdır. Ozon ultraviyole ışığın ve aynı zamanda atmosferik elektriksel akım boşaltımının etkisiyle dioksijenden oluşur ve dünya atmosferinde düşük derişimde bulunur. Ozon, toplamda atmosferin sadece 0,00 ile 0,07 ppm’lik kısmını oluşturur.

Ozon üretimi uçucu organik bileşikler (VOC) ve karbon monoksit sayesinde hızlandırılmaktadır veya güçlendirilmektedir. Ozonun oluşması için en önemli öncü bileşenler NO<sub>x</sub> (Azot oksitler) ve VOC’dır. Yüksek güneş ışınlarının etkisiyle Akdeniz ülkelerinde ozon derişimi Kuzey-Avrupa ülkelerinden daha yüksektir. Sebebi ise güneş ışınlarının ozonun fotokimyasal oluşumundaki fonksiyonundan kaynaklanmasıdır. Diğer kirleticilere kıyasla ozon doğrudan ortam havasına karışmamaktadır. Yeryüzüne yakın seviyede karmaşık kimyasal reaksiyonlar yoluyla oluşmaktadır. Bu reaksiyonlara NO<sub>x</sub>, metan, CO ve VOC’ler (etan, etilen, propan,benzen, toluen, xylene) gibi kimyasal maddeler de eklenmektedir.

Ozon çok güçlü bir oksidasyon maddesi olduğundan birçok biyolojik madde ile etkileşimde bulunmaktadır. Tüm solunum sistemine zarar verebilmektedir. Ozonun zararlı etkisi, derişim oranına ve ozona maruziyet süresine bağlıdır. Çocuklar büyük bir risk grubunu oluşturmaktadır. Diğer gruplar arasında öğlen saatlerinde dışarıda fiziksel aktivitede bulunanlar, astım hastaları, akciğer hastaları ve yaşlılar yer almaktadır.

### 2.2.4. Partikül Madde (PM)

Partikül madde havada asılı bulunan katı partiküllerin ve sıvı damlacıkların bir karışımıdır. Partikül boyutları çok geniş bir aralığa sahiptir. Toz, duman, is gibi bazı partiküller gözle görülebilecek kadar büyüktür. Fakat mikroskopla görülebilen boyutlarda partiküller de bulunmaktadır. Çapları 10 µm’den küçük, 2,5 µm’den büyük partikül maddeler “kaba partiküller” olarak adlandırılmaktadır. Daha çok kırma ve öğütme işlemleri ile yol tozlarından kaynaklanmaktadır. Çapları 2,5 µm’den daha küçük partiküller ise “ince partiküller” olarak adlandırılmaktadır. Katı ve sıvı yakıtlar, motorin ve kurşunlu benzin kullanan taşıtlar, termik santraller gibi yanma işlemlerinden ve bazı endüstriyel aktivitelerden kaynaklanmaktadır. Enerji santralleri, endüstri ve otomobil gibi kaynaklardan salınan partiküller asitler (sülfat, nitrat gibi), organik kimyasallar, metaller, toprak veya toz partikülleri, bakteri, küf, mantar, deniz suyunun buharlaşması ile ortaya çıkan tuzlar ve alerjik polenlerden oluşmaktadır.

Atmosferdeki partikül maddelerin kaynakları toprak, çöl, deniz, bataklık, volkan vb. doğal kaynaklar ile fosil yakıt yakılması, endüstri vb. insan kaynaklı olup bunların etki oranları bölgesel olarak değişebilmektedir. Şehir atmosferindeki PM konsantrasyonlarının büyük bir kısmından fosil yakıt yakılması, endüstri gibi kaynaklar sorumludur. Çöller ve aktif volkanların bulunduğu bölgelerde ise doğal kaynakların PM konsantrasyonlarına etkisi çok daha büyüktür.

EPA (US Environmental Protection Agency) genellikle gırtlaktan ve burundan geçerek akciğerlere giren 10 mikrometre çapında veya daha küçük tanecikleri hedeflemektedir.

Solunduktan sonra, bu tanecikler kalp ve akciğerleri etkilemekte ve sağlıkla ilgili ciddi sonuçlar doğurmaktadır. EPA tanecik kirliliğini iki kategoride sınıflandırmaktadır. Bunlar,

1. Solunabilir kaba tanecikler, yol kenarlarında ve tozlu endüstrilerde bulunabilen, 2,5 mikrometreden büyük ve 10 mikrometreden küçük (PM<sub>10</sub>) olanlardır.
2. İnce partiküller, duman ve iste bulunan 2,5 mikrometre ve daha küçük çapta (PM<sub>2,5</sub>) olanlardır. Bu tanecikler doğrudan orman yangınlarından veya güç santrallerinden, endüstrilerden ve arabalardan çıkan gazlardan çevreye yayılabilirler.

PM, insan sağlığı açısından öksürük, boğaz ağrısı veya diğer ciddi solunum problemlerinin gelişmesine neden olabilir. PM kirliliği binaların ve diğer yapıların renklerinin bozulmasına da neden olur. PM'nin belirlenen en önemli çevresel etkileri solar enerji ve görüş mesafesini azaltmaları, ışık azalması nedeniyle çeşitli tarım ürünlerinde rekolte düşüşüne neden olmaları, hava-su transferi ile sucul ekosistemleri etkilemeleri ve solunabilir kısımlardaki ağır metaller nedeniyle zehirlenme (toksikite) oluşturmalarıdır.

### 2.2.5. Karbonmonoksit (CO)

Karbonmonoksit (CO), kokusuz ve renksiz bir gazdır. Yakıtların yapısındaki karbonun tam yanmaması sonucunda oluşmaktadır. CO derişimleri, tipik olarak soğuk mevsimlerde en yüksek değere ulaşmaktadır. Soğuk mevsimlerde çok yüksek değerlere ulaşılmasının bir sebebi de enverziyon durumudur. CO'in global arka plan konsantrasyonu 0,06 ve 0,17 mg/m<sup>3</sup> arasında bulunmaktadır. 2000/69/EC sayılı AB direktifinde CO ile ilgili sınır değerler tespit edilmiştir. Enverziyon, sıcak havanın soğuk havanın üzerinde bulunarak, havanın dikey olarak birbiriyle karışmasının engellenmesi durumudur. Kirlilik böylece yer seviyesine yakın soğuk hava tabakasının içerisinde toplanmaktadır. CO'in ana kaynağı trafik ve trafikteki sıklığıdır.

İnsan sağlığına etkileri açısından CO, akciğer yolu ile kan dolaşımına girmektedir ve kimyasal olarak oksijeni hücrelere taşıyan hemoglobinle bağlanmaktadır. Bu yolla, organ ve dokulara ulaşan oksijen miktarını azaltmaktadır. Sağlıklı kişilerin yüksek seviyelerdeki CO'e maruz kalması ile algılama ve gözün görme gücü etkilenebilmektedir. Hafif ve daha ağır kalp ve solunum sistemi hastalığı olan kişiler ve henüz doğmamış veya yeni doğmuş bebekler, CO kirliliğine karşı en riskli grubu oluşturmaktadır.

Birincil bir hava kirletici olan CO, tam olmayan bir yanma sonucunda CO<sub>2</sub> yerine meydana gelmektedir. Kırmızı kan hücrelerinin hemoglobini ile kolaylıkla birleşir ve oksijen taşıma yeteneklerini azaltır. CO düşük derişimlerde baygınlığa ve yavaş tepki süresine neden olabilir. Yüksek derişimlerde ölüme neden olur. CO zehirlenmeleri daha çok kış aylarında ve rüzgârlı havalarda ev kazası olarak ortaya çıkmaktadır. CO yangınlar sırasında da ortaya çıkar. Önemli bir CO kaynağı taşıtların egzoz gazıdır. Şehir havasındaki CO miktarı insan sağlığını etkilemektedir. Dünyadaki CO üretiminin yaklaşık %70'inden fazlasının ulaşım sektöründen geldiği bilinmektedir. Bu sonuç, bu sektördeki kontrol teknolojilerinin önemi açıklamaktadır.

Hava kirletici kaynakları, çevre ve sağlığa etkileri Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Hava kirletici kaynakları, çevre ve sağlığa etkileri

Kirletici Tipi	Temel Kirletici Kaynakları	Çevreye/Sağlığa Etkileri
<b>Kükürt dioksit (SO<sub>2</sub>)</b> Kükürt oksitler (SO <sub>x</sub> 'ler), 6 farklı kükürt oksit	Antropojenik kaynaklar: <ul style="list-style-type: none"><li>• Kükürt içeren fosil yakıtların yakılması,</li><li>• bazı kimyasal tesisler,</li><li>• metal işleme tesisleri ve</li></ul>	SO <sub>2</sub> renksiz bir gaz olup, havadaki 0,3-1 ppm seviyelerde ağızda karakteristik bir tat bırakmakta, 3 ppm'in üstünde ise boğucu bir hisse yol açmaktadır. SO <sub>2</sub> atmosferde oldukça hızlı bir oksitlenmeyle kükürt trioksit (SO <sub>3</sub> ) ve sülfatlara (SO <sub>4</sub> ) dönüşür ve

<p>formunda bulunurlar (SO, SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, S<sub>2</sub>O<sub>7</sub>,SO<sub>4</sub>). Havadaki kükürt oksitler içerisinde en önemli pay SO<sub>2</sub>'dir.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• çöplerin yakılması</li> </ul> <p>Doğal şekillerde:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• organik maddelerin bozunması ve yanması,</li> <li>• volkanlardan kaynaklanan H<sub>2</sub>S gazının oksitlenmesi</li> </ul>	<p>yağmur veya yoğunlaşmış nem (sis) damlalarıyla birleşerek havada bu asidin damlacıklarının oluşmasına yol açar SO<sub>x</sub>'ler bitkilerin yapraklarını sarartmakta, mermer yapıları aşındırmakta, demir ve çeliğe korozif etkide bulunmakta, görüş mesafesini ve güneş ışınlarını azaltmakta, insanların üst solunum sistemini ve akciğerlerini tahriş etmekte ve yüksek konsantrasyonlarda bulunduğu ise sağlığı bozucu ve hatta öldürücü etki gösterebilmektedir. Sülfatlar ise 0,2-0,9 µm çapa sahip katı tanecikler şeklinde olup ışığın 0,4- 0,7 µm olan dalga boyları ile girişim yaparak görüş mesafesini azaltır ve güneş radyasyonunu engelleyerek yerel iklimlerde soğumaya yol açar.</p>
<p><b>Karbon monoksit (CO)</b></p>	<p>Şehirlerde;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• çoğunlukla motorlu taşıt egzozları</li> </ul> <p>Diğer CO emisyon kaynakları;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• endüstriyel prosesler (Metal prosesi ve kimyasal imalathaneleri gibi),</li> <li>• evsel ısınma,</li> </ul> <p>Doğal kaynaklardan;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• orman yangınları</li> <li>• Volkanlar</li> <li>• bazı deniz mikroorganizmalarının karbon monoksit üretimi</li> </ul>	<p>Toksik etkilerinin yanında yanıcı ve yüksek konsantrasyonlarda patlayıcı bir gazdır. Havada %0,3 oranında bulunduğu öldürücü etkiye sahiptir.</p>
<p><b>Azot oksitler (NO<sub>x</sub>'ler)</b>, 6 farklı formda bulunabilirler (NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). NO<sub>x</sub>'ler, havadaki kirletici gazlardandır ve bunlar içinde NO ve NO<sub>2</sub> en önemli paya sahip olup büyük miktarlarda atmosfere verilirler.</p>	<p>Ana kaynaklar;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>•motorlu taşıtlar</li> </ul> <p>Doğal kaynaklar;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>•orman yangınları</li> <li>•yanardağlar</li> <li>• topraktaki organik çürümeler ve mikrobiyolojik faaliyetler</li> </ul>	<p>NO oldukça inert bir gaz olup orta derecede zehirlidir ancak atmosferde uzun süre bu formda kalmayıp NO<sub>2</sub>'ye oksitlendiği için büyük miktarda sağlığa zararlı olduğu düşünülmez. Her ne kadar NO, CO gibi kandaki hemoglobinin ile birleşme yeteneğine sahipse de dış havadaki konsantrasyonu 1 ppm'i geçmediği için tehlikeli bir durum ortaya çıkmaz. Ancak NO<sub>2</sub>, akciğer alveollerinde tahrişe yol açtığı ve solunum sistemini tahriş edip olumsuz etkide bulunduğu için daha fazla zararlı etkiye sahiptir.</p>
<p><b>Ozon (O<sub>3</sub>)</b></p>	<p>Ozon atmosferde iki şekilde bulunur:</p> <p>a) Strotosferik Ozon: Ozonun atmosferdeki konsantrasyonu yerden 25-35 km yukarıdaki strotosfer tabakasında yaklaşık olarak 10 ppm'e çıkar. Bu yüzden stratosfer ozon tabakası olarak bilinir. Stratosferik ozon, toplam</p>	<p>Güneşli ve sıcak mevsimlerde (özellikle yazın) havada zararlı konsantrasyonlara ulaşır. Kırsal kesimlerde bile ozon seviyesinde artışlar görülebilir, çünkü ozon rüzgarlarla kirletici kaynağından yüzlerce kilometre uzağa taşınabilir. Ozona maruz kalmaya karşı en yüksek risk grubu, özellikle yazın dış ortamda oyun oynayan çocuklardır. Ancak tüm yaş grupları ve</p>

	<p>ozonun ~%90'ını oluşturur ve ultraviyole radyasyonunu absorbe etmesi nedeniyle büyük önem taşır.</p> <p>b) Troposferik Ozon: Yeryüzüne yakın seviyelerde bulunan ve insan etkisi ile oluşan ozondur. Toplam ozonun ~%10'nu oluşturur. Yer seviyesinde NO<sub>x</sub> ve uçucu organik bileşiklerden (UOB'ler) sıcaklık ve güneş ışınlarının etkisiyle kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşur.</p> <p>Motorlu taşıt emisyonu ve endüstriyel emisyonlar, petrol buharları, kimyasal solventler ve birkaç başlıca NO<sub>x</sub> ve UOB kaynakları ozon oluşumuna neden olur.</p>	<p>dışarıda aktif olan kişiler de risk altındadırlar. Solunum yollarını tahriş edebilir (Öksürük, boğaz tahrişi, göğüste rahatsızlık hissi vb.). Bitkilerde çiçeklerin ve meyvelerin azalmasına, suyun verimli kullanılmasının engellenmesine sebep olur. Ozon bitkileri hastalıklara, böceklere ve kuraklığa karşı hassaslaştırır ve zayıflatır.</p>
<b>Partikül Madde (PM)</b>	<p>Yapay kaynaklar:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Yakma prosesinin gerçekleştirildiği endüstriler,</li> <li>• Maden çıkarma ve inşaat yapım aktiviteleri,</li> <li>• Taşıt egzozları,</li> <li>• Çöp yakma,</li> <li>• Madenlerin yığılması, taşınması ve ayrışması gibi mekanik işlemler,</li> <li>• Evsel amaçlı yakma işlemleri.</li> </ul> <p>Doğal Kaynaklar:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Volkanik patlamalar,</li> <li>• Orman yangınları,</li> <li>• Rüzgâr fırtınaları,</li> <li>• Polenler,</li> <li>• Okyanuslardan gelen su zerrecikleri</li> </ul>	<p>Çeşitli aktiviteler sonucu açığa çıkan ve havada bulunan partiküller, solunum yoluyla insan ve hayvan vücuduna girebilmekte, çökme yoluyla da bina ve yapıların üzerinde birikebilmektedirler. PM'lerin insan sağlığına zararlı etkileri; partiküllerin çap, yoğunluk, büyüklük ve şekline bağlıdır. Havada bulunan polenlerin oluşturduğu alerjik partiküller, insanlarda astım, yüksek ateş gibi hastalıklara yol açmakta ve daha ileri boyutlarda bronşit ortaya çıkmaktadır. PM'lerin etkileri maruz kalma süresine bağlı olarak değişir. Partiküllerin bazıları, özellikle biyolojik partiküller alerjiye neden olurlar. Partikül formundaki toksik maddeler, akciğer ve mide kanserine yol açar.</p>

### 3. Hava Kalitesi İndeksi

Modern yaşamın getirdiği şehirleşmenin bir sonucu olan hava kirliliği, yerel ve bölgesel olduğu kadar küresel ölçekte de etki alanına sahiptir. Hava kirliliğinin insan sağlığına önemli etkileri olması sebebiyle, hava kalitesi konusuna tüm dünyada büyük önem verilmektedir. Tüm dünyada yaygın olarak kullanılan, Hava Kalitesi İndeksi (HKİ) denilen bu sınıflama sistemi ile havadaki kirleticilerin konsantrasyonlarına göre hava kalitesini iyi, orta, kötü, tehlikeli vb. şeklinde derecelendirme yapılmaktadır (Tablo 3).

Bir ulusun hava kalitesinin iyileştirilmesi konusundaki başarısı, yerel ve ulusal hava kirliliği problemleri ve kirlilik azaltmadaki gelişmeler konusunda doğru ve iyi bilgilendirilmiş vatandaşların desteğine bağlıdır.

Belli bir bölgedeki hava kalitesinin karakterize edilmesi için ülkelerin kendi sınır değerlerine göre dönüştürdükleri ve kirlilik sınıflandırılmasının yapıldığı bu indekse Hava Kalitesi İndeksi (HKİ) (Air Quality Index/AQI) adı verilmektedir. Ulusal Hava Kalitesi İndeksi, EPA

Hava Kalitesi İndeksini ulusal mevzuatımız ve sınır değerlerimize uyarlayarak oluşturulmuştur (Tablo 4). 5 temel kirletici için hava kalitesi indeksi hesaplanmaktadır. Bunlar; partikül maddeler (PM<sub>10</sub>), karbon monoksit (CO), kükürt dioksit (SO<sub>2</sub>), azot dioksit (NO<sub>2</sub>) ve ozon (O<sub>3</sub>)'dur.

Hava Kalitesi Sınır Değerleri Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2. Hava kalitesi sınır değerleri

İnsan Sağlığı ve Ekosistemin Korunması İçin Hava Kalitesi Sınır Değerleri				
Kirletici Parametreler	Ölçüm Periyodu	Sınır Değerler		Uyum Takvimi
		Ülkemizde Uygulanan (2015 Yılı)	AB Üye Ülkelerde Uygulanan	
Kükürtdioksit SO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	Saatlik	470	350	1.1.2019
	Günlük	225	125	
	Uyarı Eşiği (3 ardışık saat)	500	500	
	Saatlik Aşım Sayısı	-	24	
	Günlük Aşım Sayısı	-	3	
	Yıllık (Ekosistem)	20	20	1.1.2014
Partikül Madde PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	Günlük	90	50	1.1.2019
	Yıllık	56	40	
	Günlük Aşım Sayısı	-	35	

Tablo 3. Ulusal Hava Kalitesi İndeksi

İndeks	HKİ	SO <sub>2</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]	NO <sub>2</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]	CO [µg/m <sup>3</sup> ]	O <sub>3</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]	PM <sub>10</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]
		1 Sa. Ort.	1 Sa. Ort.	8 Sa. Ort.	8 Sa. Ort.	24 Sa. Ort.
İyi	0 – 50	0-100	0-100	0-5500	0-120	0-50
Orta	51 – 100	101-250	101-200	5501-10000	121-160	51-100
Hassas	101 – 150	251-500	201-500	10001-16000	161-180	101-260
Sağlıksız	151 – 200	501-850	501-1000	16001-24000	181-240	261-400
Kötü	201 – 300	851-1100	1001-2000	24001-32000	241-700	401-520
Tehlikeli	301 – 500	>1101	>2001	>32001	>701	>521

Tablo 4. Ulusal Hava Kalitesi İndeksi (HKİ) Kesme Noktaları

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 sayıdaki insanlar için bazı kirleticiler 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.

Parametrelerin sınır değerleri ve olası sağlık etkileri Tablo 5 ve 6’da özetlenmiştir.

Tablo 5. İndeks hesaplanan parametrelerin sınır değerleri

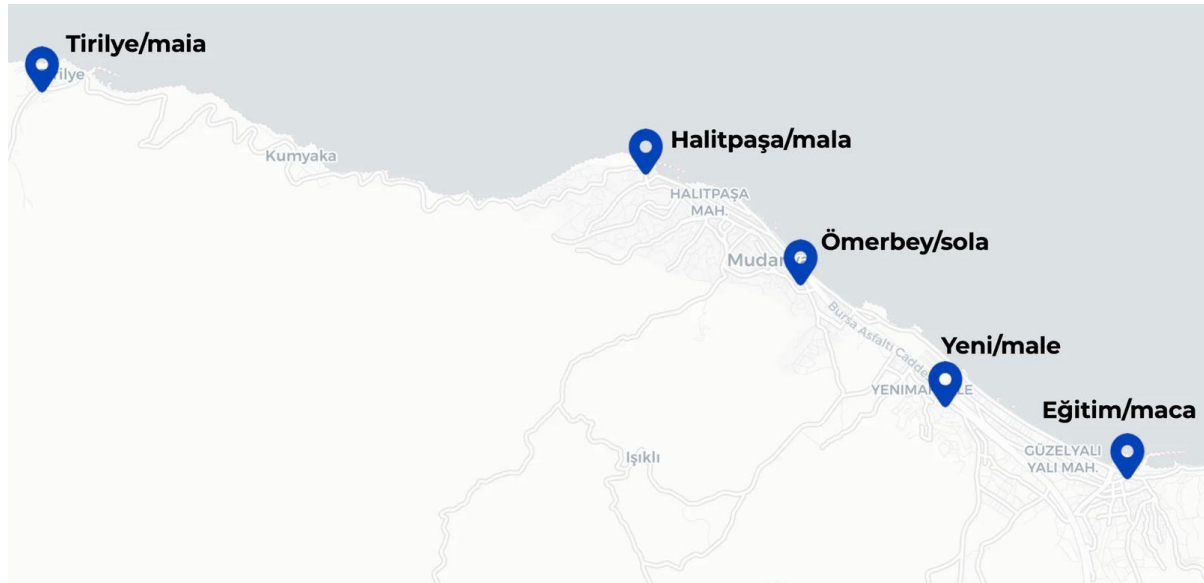
Parametre	SO <sub>2</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]	NO <sub>2</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]	CO [µg/m <sup>3</sup> ]	O <sub>3</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]	PM10 [µg/m <sup>3</sup> ]
	1 Sa. Ort.	1 Sa. Ort.	8 Sa. Ort.	8 Sa. Ort.	24 Sa. Ort.
<b>Ulusal Sınır Değer</b>	470	290	14.000	120	90
<b>AB Üye Ülkeleri Sınır Değeri</b>	350	200	10.000	120	50

Tablo 6. Kirletici parametreler ve sağlık etkileri

Kirletici	Ana Kaynağı	Sağlık Etkisi
Kükürtdioksit	Fosil yakıt yanması	Solunum yolu hastalıkları
Azotoksitler	Taşıt emisyonları, Yüksek sıcaklıkta yakma prosesleri	Göz ve solunum yolu hastalıkları, asit yağmurları
Partikül Madde	Sanayi, yakıt yanması, tarım ve ikincil kimyasal reaksiyonlar	Kanser, kalp problemleri, solunum yolu hastalıkları, bebek ölüm oranlarında artış
Karbonmonoksit	Eksik yanma ürünü, taşıt emisyonları	Kandaki hemoglobinin ile birleşerek oksijen taşıma kapasitesinde azalma, ölüm
Ozon	Trafikten kaynaklanan azot oksitler ve uçucu organik bileşiklerin(VOC) güneş ışığıyla değişimi	Solunum sistemi problemleri, göz ve burunda iritasyon, astım, vücut direncinde azalma

#### 4. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada, Mudanya ilçesinde bulunan beş ölçüm noktasında (Tirilye, Halitpaşa, Ömerbey, Yenimahalle ve Eğitim) 2023 ve 2024 yılları boyunca saatlik hava kirliliği konsantrasyonları incelenmiştir (Şekil 1). Ölçümlerde, airqoon firmasının geliştirdiği sensör teknolojisine dayalı cihazlar kullanılmış; bu cihazlar, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> ve SO<sub>2</sub> kirleticilerinin konsantrasyonlarını yüksek hassasiyetle tespit edebilmek amacıyla tasarlanmıştır.



Şekil 1. Hava kalitesi ölçümlerinin yapıldığı noktalar

#### 4.1. Geleneksel Ölçüm Yöntemleri

Geleneksel ölçüm metotları, genellikle sabit istasyonlarda kurulan gravimetrik örnekleme sistemleri, kimyasal analiz yöntemleri ve referans cihazlar kullanılarak yapılmaktadır. Bu yöntemler; numune toplama, laboratuvar ortamında analiz ve uzun süreli ortalama değer hesaplamaları gibi adımları içermektedir. Geleneksel yöntemler, uzun yıllara dayanan standartlaşmış protokoller ile çalışsa da, saatlik veri üretme kapasitesi sınırlı olup, anlık

değişikliklere dair detaylı bilgi sağlamada sensör tabanlı yaklaşıma kıyasla daha az esnek kalabilmektedir.

#### 4.2. Sensör Tabanlı Ölçüm Yöntemleri

Sensör tabanlı ölçümler, sürekli veri akışı sağlayan gerçek zamanlı ölçümler yapabilme kapasitesiyle öne çıkmaktadır. Cihazlar, çevresel koşullara dayanıklı yapıları sayesinde, belirlenen noktalarda kesintisiz saatlik veri kaydı gerçekleştirmiştir. Ölçüm sonuçları, dahili kalibrasyon mekanizmaları ve otomatik hata düzeltme algoritmaları ile doğruluk ve güvenilirlik açısından standartların üzerinde performans sergilemiştir. Bu sensörler, özellikle veri yoğunluğunun yüksek olduğu durumlarda (örneğin trafik yoğunluğunun artması ya da ani hava değişimlerinde) çevresel kirliliğin dinamiklerini anlık olarak yansıtabilmektedir.



Şekil 2. Airqoon sensörlü ölçüm cihazı

Airqoon cihazı, havada asılı kalan sıvı/katı parçacıkların konsantrasyonunu hızlı ve doğru bir şekilde tespit edebilen sensör kullanır. Airqoon sensörü, hava kirliliğinin izlenmesi için düşük maliyetli bir sensördür “low cost sensor” (LCS) Cihazı, çapı 2,5  $\mu\text{m}$ 'den (PM<sub>2,5</sub>) küçük olan havadaki partikülleri ölçmek için Lazer tabanlı ışık saçılımını sensör mekanizması olarak kullanıyor. Sensör üniteleri ayrıca ortamın hava sıcaklığını ve nemini de ölçmektedir. Airqoon cihazı -19 C ila +50 C arasındaki sıcaklıklarda çalışır ve  $\pm 15\%$  ölçüm doğruluğuna sahiptir. Sensörler iki yıllık bir süre boyunca kesintisiz ve müdahalesiz çalışabilir. Airqoon partikül sensörü, TSI 8530 aerosol monitörü ile doğrulanmaktadır. Sensör sistemleri, airqoon tarafından tasarlanan ve üretilen düşük maliyetli sensörlerin performans değerlendirme deneylerini yapmak için kullanılır. Airqoon sensör ünitesi V2, dış ortamdaki hava kirlleticilerini izlemek için özel olarak tasarlanmış kompakt ve hafif bir sensör sistemidir. Sıcaklığı, bağıl nemi ve basıncı izlerken PM<sub>2,5</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> ve O<sub>3</sub>'ü ölçebilir. PM<sub>2,5</sub>'i ölçmek için bu sistem, 0-1000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ölçüm aralığına sahip düşük maliyetli bir nefelometrik sensörle (Honeywell, HPM115S0) birlikte kullanılır. Bu üniteler güneş enerjisiyle çalışır ve GSM ve WIFI olmak üzere çoklu bağlantı özelliklerine sahiptir. Böylece, veriler daha fazla doğrulama

ve gelecekteki kalibrasyon ihtiyaçları için periyodik olarak airqoon bulutuna gönderilir. Aşağıdaki Tablo 7 ve Tablo 8’de, üretici tarafından sağlanan sensörün teknik özellikleri ve performansı gösterilmektedir.

Tablo 7. Airqoon sensör teknik özellikleri

Parametre	Özellik
Numune alma Süresi (Ayarlanabilir)	1, 5, 10, 15, 30, 60 dakika
Çalışma ömrü.	5+ yıl (tercih edilen örnekleme süresine bağlı olarak)
Bağlantı	Hücreyel 2G/NB-IoT, Wifi
Çalışma koşulları	(-10°-+50°C)
Montaj	Direğe ve duvara montaj için kitler mevcuttur
Boyut	30cm x 22cm x 17cm
Ağırlık	Güneş paneli ile 2.7kg
Kutu tipi IP68 ve IP34	IP68 ve IP34
Güç gereksinimleri	Güneş paneli veya 5V DC güç kaynağı
Pil	3.7V 10.5Ah
Opsiyonel ölçüm parametreleri	CO, SO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> S, VOC
Standart	CE

Tablo 8. Airqoon sensör çalışma performansı

Sensör Adı	Sensör Tipi	Doğruluk	Aralık
Pm <sub>2,5</sub>	Lazer saçılma **	0-100 µg/m <sup>3</sup> (±15µg/m <sup>3</sup> ) >100 µg/m <sup>3</sup> (±15%) r <sup>2</sup> * >0.8	0- 1000 µg/m <sup>3</sup> , 1µg/m <sup>3</sup> çözünürlük ile
NO <sub>2</sub>	Elektro kimyasal	r <sup>2</sup> * >0.8	0 – 5000 ppb, 1 µg/m <sup>3</sup> çözünürlük ile
Sıcaklık	Entegre çevre sensör	0°C-65°C ±1,0°C 0°C-20°C ±1.25°C	-20°C-60°C
Nem	Entegre çevre sensör	20-80%RH 25°C derecede ±3%RH	(0-100) %

\* r<sup>2</sup>-skorları, bir FEM cihazına göre kolokasyon denemeleri sırasında hesaplanır.

\*\* Nefelometrik sensör.

### 4.3. Karşılaştırmalı Değerlendirme ve Veri İşleme

Her iki ölçüm yöntemi de, yerel hava kalitesinin detaylı değerlendirilmesi amacıyla kullanılmıştır. Sensör tabanlı ölçümler, geleneksel yöntemlerle paralel olarak gerçekleştirilen periyodik kalibrasyon çalışmaları ile desteklenmiş; böylece iki farklı metodoloji arasındaki uyum ve farklar karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Ölçüm verileri, veri temizleme ve istatistiksel analiz süreçlerinden geçirilerek, saatlik konsantrasyon değerlerinin güvenilirliği ve tutarlılığı sağlanmıştır. Ayrıca, coğrafi konum ve yerel çevresel etkenler göz önünde

bulundurulur, elde edilen verilerin yorumlanmasında bölgesel farklılıkların etkisi de değerlendirilmiştir.

#### 4.4. Sensör teknolojilerinin literatürde kullanımı

Geleneksel ölçüm yöntemlerinin pahalı ve çok yaygın olmamasından dolayı hızlı ve ucuz ölçüm araçları olarak kullanılmaya başlanan sensörlere yönelik bilimsel literatürde yapılan çalışmalar incelenmiştir.

**Sensör Çeşitliliği:** Çoğu çalışmada partikül madde (PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>) ölçümü için lazer saçılım veya optik sensörler (ör. PMS5003, GP2Y<sub>1010</sub>) ve gaz konsantrasyonu için elektrokimyasal veya yarı iletken (MOX) sensörler (ör. MQ7, MQ135, Alphasense modelleri) kullanılıyor.

**İletişim Teknolojileri:** LoRa, Wi-Fi, GSM/GPRS gibi farklı kablosuz haberleşme yöntemleri öne çıkıyor. LoRa düşük güç tüketimi ve uzak mesafe avantajı sunarken, GSM/GPRS özellikle kapsama alanı genişliğinde yararlı oluyor. Wi-Fi ise genellikle daha kısa mesafe ama yüksek veri hızları için.

**IoT Platformları:** Blynk, Google App Services, özel MQTT sunucuları veya yerel veri tabanı çözümleri (SD kart) kullanılıyor. Gerçek zamanlı gösterim ve coğrafi haritalama (GIS) olanakları, kentsel ortamlarda hava kalitesi izlemeyi kolaylaştırıyor.

**Mobil veya Sabit İstasyonlar:** Bazı projeler sabit (ör. sabit istasyon direkleri) izleme yaparken, bazıları mobil (ör. taşıt üstü, giyilebilir veya elde taşınır) ölçümlerle daha geniş veya dinamik kapsam elde ediyor.

**Kalibrasyon ve Çevresel Etkenler:** Elektrokimyasal sensörlerde sıcaklık ve nem gibi çevresel faktörlere duyarlılık söz konusu. Bu nedenle çoğu sistem, sıcaklık/nem sensörlerini de entegre ederek ölçümleri kalibre etmeye veya düzeltmeye çalışıyor.

Sensörlerin yer aldığı çalışmalardan bazıları Tablo 9’da özetlenmiştir:

Tablo 9. Sensör teknolojilerinin kullanıldığı hava kalitesi izleme çalışmaları

Ölçülen Parametreler	Kullanılan Sensör(ler) / Donanım	Başlıca	İletişim Teknolojisi	Temel Yöntem / Öne Çıkan Özellikler	Referans
PM <sub>1.0</sub> , PM <sub>2.5</sub> , PM <sub>10</sub> , Formaldehit (HCHO), Sıcaklık, Nem	PMS5003ST (Partikül + HCHO + Sıcaklık + Nem), SIM800L	ESP32,	GSM/GPRS (Hücreli)	- Düşük maliyetli IoT düğümleri - Mobil istasyon yaklaşımı - Google App Services üzerinde veri depolama ve web gösterimi	Flores-Cortez vd. 2023
CO, Toz Partikülü (PM <sub>2.5</sub> seviyesinde), Sıcaklık, Nem, Işık şiddeti	MQ <sub>7</sub> (CO), GP <sub>2</sub> Y <sub>1010</sub> (PM <sub>2.5</sub> ), DHT11 (Sıcaklık + Nem), BH1750 (Işık)		LoRa (915 MHz), Ağ geçidi + MQTT	- LoRa tabanlı kablosuz sensör ağı - Coğrafi Bilgi Sistemi (GIS) tabanlı haritalama - Düşük	Maulana ve Edward. 2023

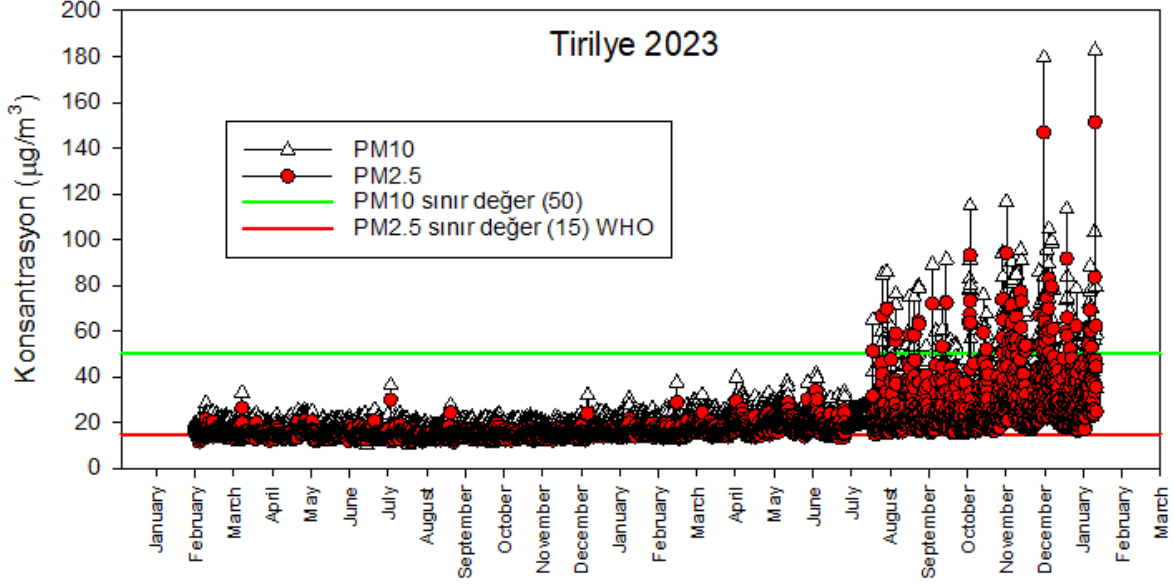
			güç, uzak mesafe veri iletimi	
<b>Çeşitli gazlar (CO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, VOC vb.), PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub></b>	<b>Plantower PMS5003 (PM), MOX/Elektrokimyasal sensörler (VOC, CO, NO<sub>2</sub>, vb.)</b>	Wi-Fi, LoRa, GSM vb. (makalede çoklu örnek)	- Literatür taraması ve trendler - Düşük maliyetli PM ve VOC sensörlerinin doğruluk & kalibrasyon zorlukları - Sabit, mobil ve giyilebilir sistem örnekleri	Krupp 2025
<b>Sıcaklık, Nem, Hava Kalitesi (çok amaçlı MQ135 ile)</b>	<b>DHT11 (Nem), LM35 (Sıcaklık), MQ135 (Gaz/Hava Kalitesi), Arduino Uno, ESP8266</b>	Wi-Fi (ESP8266), Blynk Cloud	- Gerçek zamanlı veriyi cep telefonu uygulamasıyla izleme - Düşük maliyetli sensörler ve Arduino tabanlı kontrol - IoT bulut entegrasyonu	Hashim vd. 2023
<b>CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, Sıcaklık, Nem</b>	<b>Alphasense Elektrokimyasal Sensörler (CO-B4, NO<sub>2</sub>-B43F, SO<sub>2</sub>-B4, OX-B431), SHT-31 (T ve RH)</b>	(Makale detayı: SD karta kayıt; haberleşme vurgusu daha az)	- Elektrokimyasal sensörlerle çoklu kirletici ölçümü - Arduino Due + ADS1115 ADC - Ortam sıcaklık-nem telafisi - Düşük maliyet, sabit istasyon yaklaşımı	Guerron vd. 2024

## 5. Bulgular

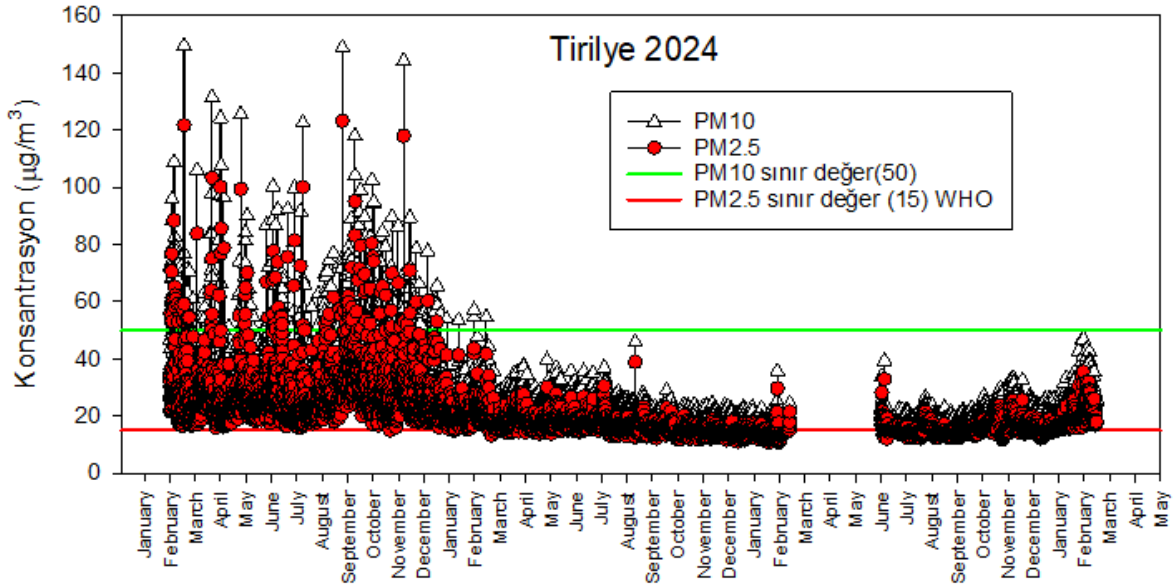
Hava kalitesi izleme sensörleri ile 2023 yılı ve 2024 yılı ölçüm sonuçları incelenmiştir. Tirilye, Halitpaşa, Ömerbey, Yenimahalle ve Eğitim mahalleleri için yapılan ölçümlere ait değerlendirmeler her mahalle için ayrı ayrı değerlendirilmiştir:

## 5.1. Tirilye

Tirilye Mahallesi'nde 2023 ve 2024 yılında yapılan ölçüm sonuçları Şekil 3 ve 4'te verilmiştir.



Şekil 3. Tirilye Mahallesi ölçüm sonuçları (2023)



Şekil 4. Tirilye Mahallesi ölçüm sonuçları (2024)

- Şekil 3 ve 4 incelendiğinde, 2023 yılının Ocak ayından itibaren sınır değeri olan  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  'ün büyük oranda aşılmadığı görülmektedir. Ancak yaz ayları ile birlikte turistik hareketliliğe ve tarımsal faaliyete bağlı olarak yükselmeye baözellikle Ocak ve Şubat aylarında  $\text{PM}_{10}$  değerlerinin  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  sınır değerini sıkça aştığı, hatta yer yer  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 'ün üzerine çıktığı görülmektedir.  $\text{PM}_{2.5}$

konsantrasyonlarının da  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  sınırını belirli periyotlarda aştığı dikkat çekmektedir.

- Bu yüksek değerler, kış aylarında ısınma amaçlı yakıt (kömür, odun vb.) kullanımının artmasına ve olumsuz meteorolojik koşullar (hava inversiyonu, rüzgârın yetersiz kalması vb.) nedeniyle kirleticilerin dağılmamasına bağlı olarak açıklanabilir.
- Veriler, Nisan ayından itibaren  $\text{PM}_{10}$  ve  $\text{PM}_{2.5}$  seviyelerinde genel bir düşüş yaşandığını, yaz aylarında ise çoğunlukla sınır değerlerin altında kaldığını göstermektedir.
- Mevsimsel olarak hava sirkülasyonunun artması, ısınma kaynaklı emisyonların azalması ve yağışlı dönemlerin etkisiyle partikül madde birikiminin sınırlanması, bu düşüşün başlıca nedenleri arasında sayılabilir.
- Sonbahar aylarında, yazın sonuna kıyasla kısmi bir yükselme eğilimi gözlenmektedir. Bu dönemde  $\text{PM}_{10}$  ve  $\text{PM}_{2.5}$  seviyeleri, özellikle Ekim ve Kasım aylarında yeniden artış göstermektedir.
- Bu artışta, hava sıcaklıklarının düşmesiyle ısınma sezonunun kademeli olarak başlaması, tarımsal atık yakma (bölgede varsa), ulaşım yoğunluğu veya inşaat faaliyetleri gibi bölgesel faktörler etkili olabilir.
- Grafiğin Aralık ayından itibaren tekrar yükselen pikler gösterdiği görülmektedir. Kış mevsimine geçişle birlikte  $\text{PM}_{10}$  konsantrasyonlarında  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  sınırının sıklıkla aşıldığı,  $\text{PM}_{2.5}$  değerlerinin de WHO sınır değeri olan  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 'ün üzerine çıktığı dikkat çekmektedir.
- Kış aylarına özgü faktörlerin (ısınma amaçlı emisyonlar, meteorolojik inversiyonlar vb.) etkisi bu dönemde tekrar belirgin hale gelmiştir.
- **$\text{PM}_{10}$  için:** Kış aylarında tepe noktaları görülen aşımalar, ısınma yakıtları ve diğer bölgesel kaynaklarla ilişkilendirilebilir. Bu durum, hassas gruplar (yaşlılar, çocuklar, kronik solunum yolu hastaları vb.) üzerinde olumsuz etkiler yaratabilir.
- **$\text{PM}_{2.5}$  için:**  $\text{PM}_{2.5}$ 'in  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  WHO sınır değerini aşması, özellikle kardiyovasküler ve solunum yolları rahatsızlıkları açısından dikkat çekicidir.  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{PM}_{10}$ 'a göre daha küçük partiküllerden oluştuğu için akciğerin derin bölgelerine nüfuz edebilir ve sağlık riskleri daha yüksek olabilir.

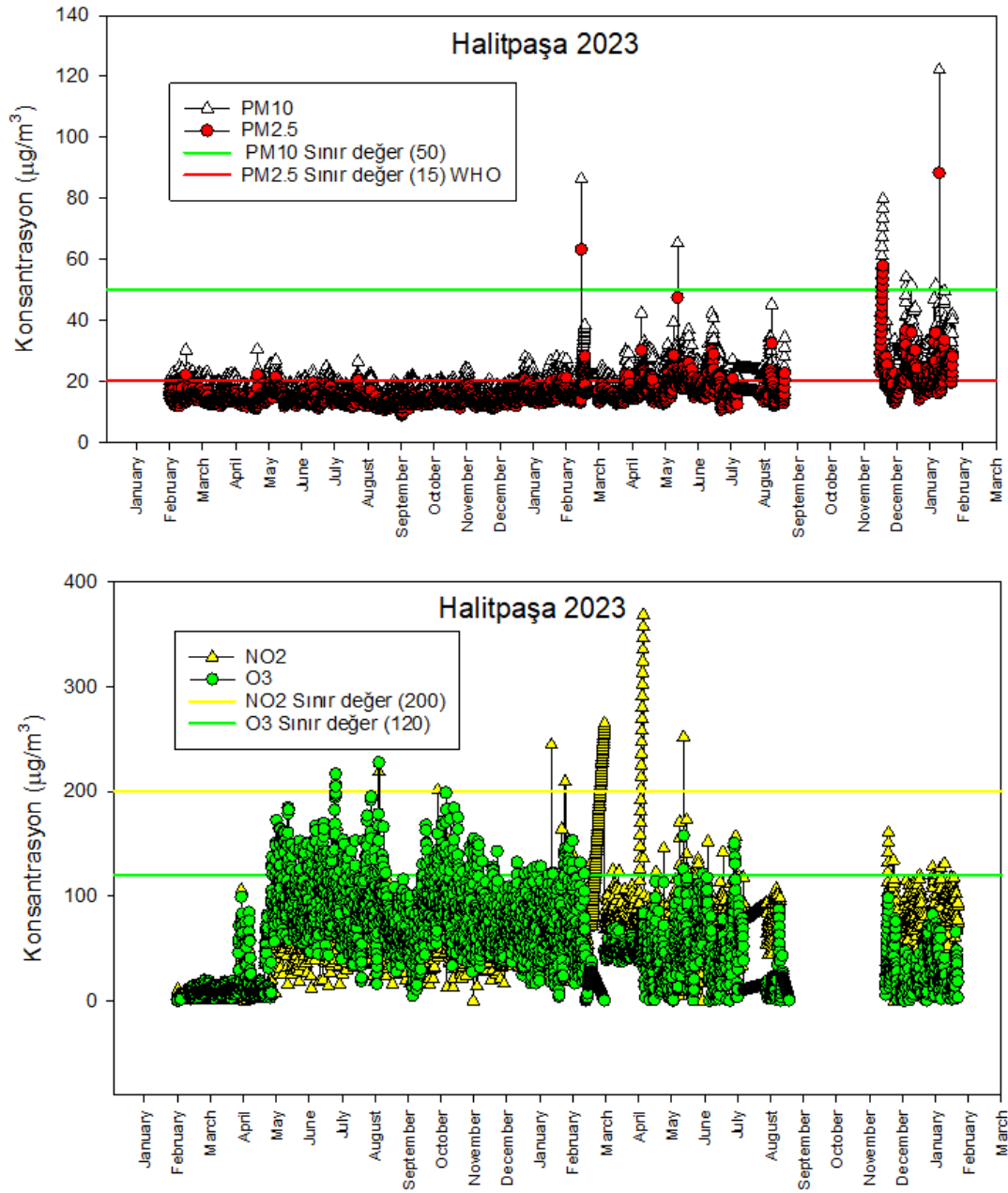
## Genel Sonuçlar ve Öneriler

- **Kış dönemindeki yüksek konsantrasyonlar:** Alternatif ısınma yöntemlerinin teşvik edilmesi, daha temiz yakıt kullanımının özendirilmesi ve yakma sistemlerinin (sobalar, kazanlar vb.) periyodik bakımları, kirlilik düzeyini azaltmada önemlidir.
- **Mevsimsel dalgalanmaların yönetimi:** İlkbahar ve yaz dönemlerinde hava kalitesi daha iyi seyretse de, özellikle sonbahar ve kış aylarında alınacak önlemler (ör. hava kirliliği ile ilgili farkındalık kampanyaları, yakıt denetimleri, yeşil alanların artırılması) kalıcı bir iyileşme sağlayabilir.
- **Sürekli izleme ve veri analizi:** Saatlik ve günlük bazda ölçümlerin sürdürülmesi, ani piklerin ve kronik kirlilik seviyelerinin tespitinde kritik öneme sahiptir. Elde edilen verilerin düzenli aralıklarla kamuoyu ve ilgili kurumlarla paylaşılması, etkin bir çevre politikası geliştirilmesini destekleyecektir.

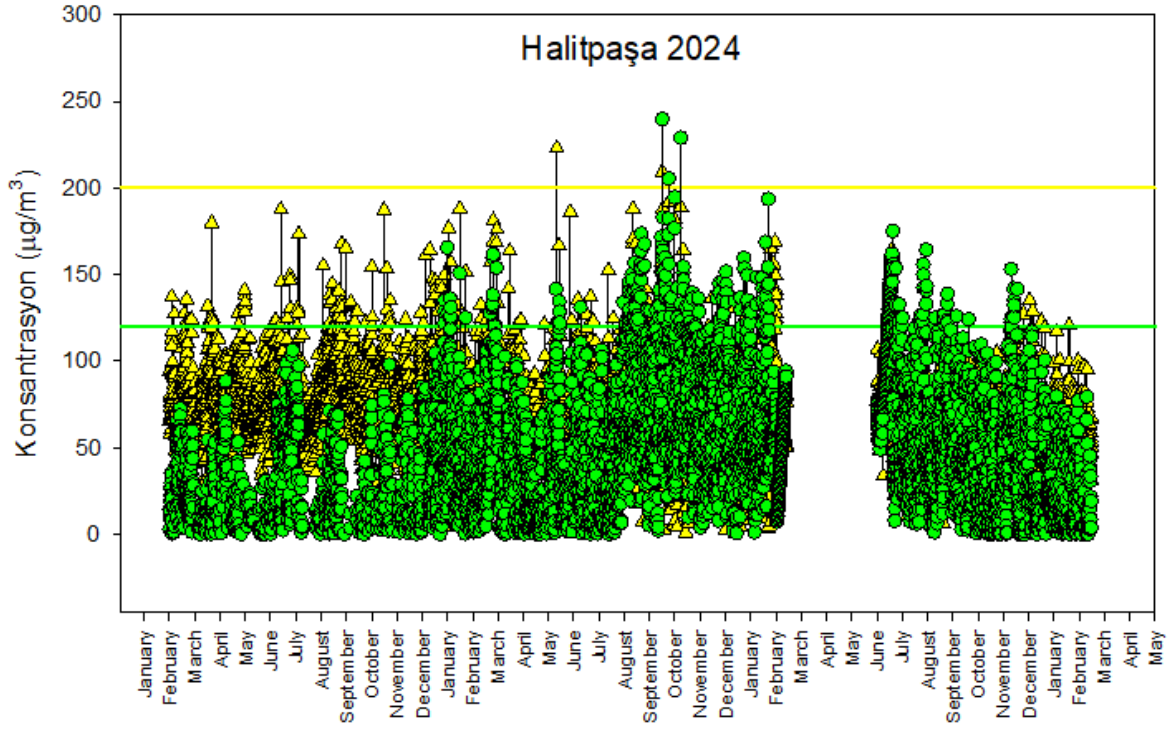
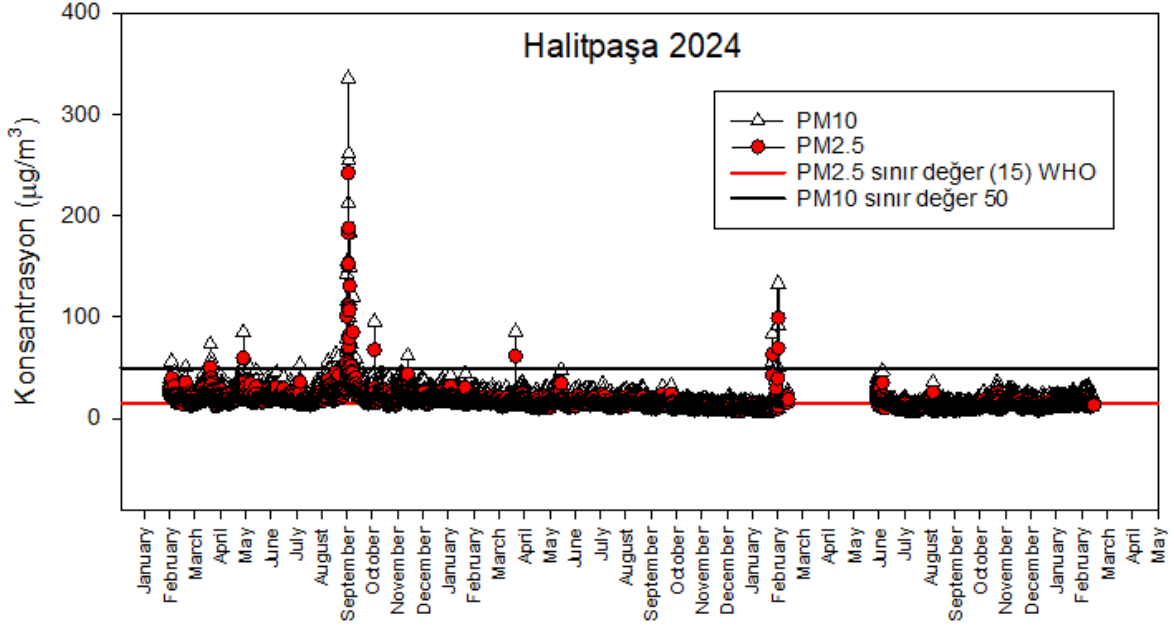
**Sonuç olarak**, 2024 yılı verileri, kış aylarında  $PM_{10}$  ve  $PM_{2.5}$  değerlerinin zaman zaman sınır değerlerin üzerine çıktığını, ilkbahar ve yaz aylarında ise önemli ölçüde gerilediğini göstermektedir. Bu durum, mevsimsel ve bölgesel faktörlerin Tirilye semtindeki hava kalitesi üzerindeki belirgin etkisini ortaya koymaktadır. Özellikle kış dönemine yönelik kirlilik kaynaklarının (ısınma, ulaşım, sanayi vb.) kontrol altına alınması, hava kalitesinin korunması ve halk sağlığının iyileştirilmesi açısından öncelikli bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır.

## 5.2. Halitpaşa

Halitpaşa Mahallesi'nde 2023 ve 2024 yılında yapılan ölçüm sonuçları Şekil 5 ve 6'da verilmiştir.



Şekil 5. Halitpaşa Mahallesi ölçüm sonuçları (2023)



Şekil 6. Halitpaşa Mahallesi ölçüm sonuçları (2024)

- **PM<sub>10</sub>:**
  - Kış aylarında (Ocak-Şubat) ve kısmen sonbahar döneminde (Ekim-Kasım) 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 'lük sınırın zaman zaman aşıldığı görülmektedir. Bu pik değerler çoğunlukla kış mevsimine özgü ısınma amaçlı yakıt kullanımı (kömür, odun vb.), hava şartlarının (inversiyon, düşük rüzgâr hızları) kirleticilerin dağılmasını engellemesi ve/veya bölgedeki inşaat veya ulaşım kaynaklı emisyonların artmasıyla ilişkilendirilebilir.
  - İlkbahar ve yaz dönemlerinde (Nisan-Eylül) PM<sub>10</sub> konsantrasyonlarının genellikle sınır değerinin altında seyrettiği dikkat çekmektedir. Mevsimsel koşulların (daha yüksek sıcaklık, artan rüzgâr sirkülasyonu) partikül madde birikimini azaltması bu düşüşte etkili olmaktadır.
  - 2024'te, grafikte kış aylarında yine 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  sınırının aşıldığı pikler gözlemlenmektedir. Ancak 2023'e göre bazı aylarda pik sayısının veya şiddetinin değiştiği (örneğin daha az veya daha yoğun pikler) görülebilir. Bu farklar, o yıla özgü meteorolojik koşullar, yakıt kullanım tercihleri ya da yerel faaliyetlerden kaynaklanabilir.
  - İlkbahar ve yaz dönemlerinde sınır değerinin altında seyreden değerler, mevsimsel iyileşme eğiliminin 2024'te de devam ettiğini göstermektedir.
- **PM<sub>2.5</sub>:**
  - PM<sub>2.5</sub> için grafikte referans olarak alınan 15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (WHO kılavuz değeri) zaman zaman aşılsa da PM<sub>10</sub>'a kıyasla daha düşük seviyelerde dalgalanmalar görülmektedir.
  - Kış aylarında, ısınma kaynaklı emisyonların artmasıyla birlikte PM<sub>2.5</sub> seviyeleri de yükselme eğilimi göstermekte; özellikle Aralık, Ocak ve Şubat aylarında bu değerlerin kısa süreli piklere ulaştığı görülmektedir.
  - Bahar ve yaz aylarında PM<sub>2.5</sub> konsantrasyonları genel olarak daha düşük seviyelerde seyretmektedir.
  - Kış aylarında PM<sub>2.5</sub> seviyelerinde yine belirgin artışlar görülmektedir. 15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  değerinin aşıldığı dönemler, ısınma sezonu ve hava şartlarının kirleticileri tutma potansiyelinin yüksek olduğu zamanlara denk gelmektedir.
  - Yaz aylarında PM<sub>2.5</sub> seviyelerinin büyük ölçüde düşük kaldığı, genellikle rehber değerinin altında seyrettiği dikkat çekmektedir.
- **NO<sub>2</sub>:**
  - NO<sub>2</sub> konsantrasyonları, genellikle kış aylarında daha yüksek değerlere ulaşır. Bunun nedeni, ısınma kaynaklı emisyonların ve araç trafiğinin yoğun olduğu dönemlerde (soğuk havalarda araç motor verimliliğinin düşmesi, rölantide çalışma sürelerinin uzaması vb.) artmasıdır.
  - Grafikte yer yer yüksek pikler gözlenmekte olup, 1 saatlik ortalama sınır değeri olan 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 'e yaklaşan veya onu aşan değerlerin görülmesi olasıdır. Özellikle Ocak-Şubat gibi kış aylarında bu aşımalar daha belirgin olabilir.

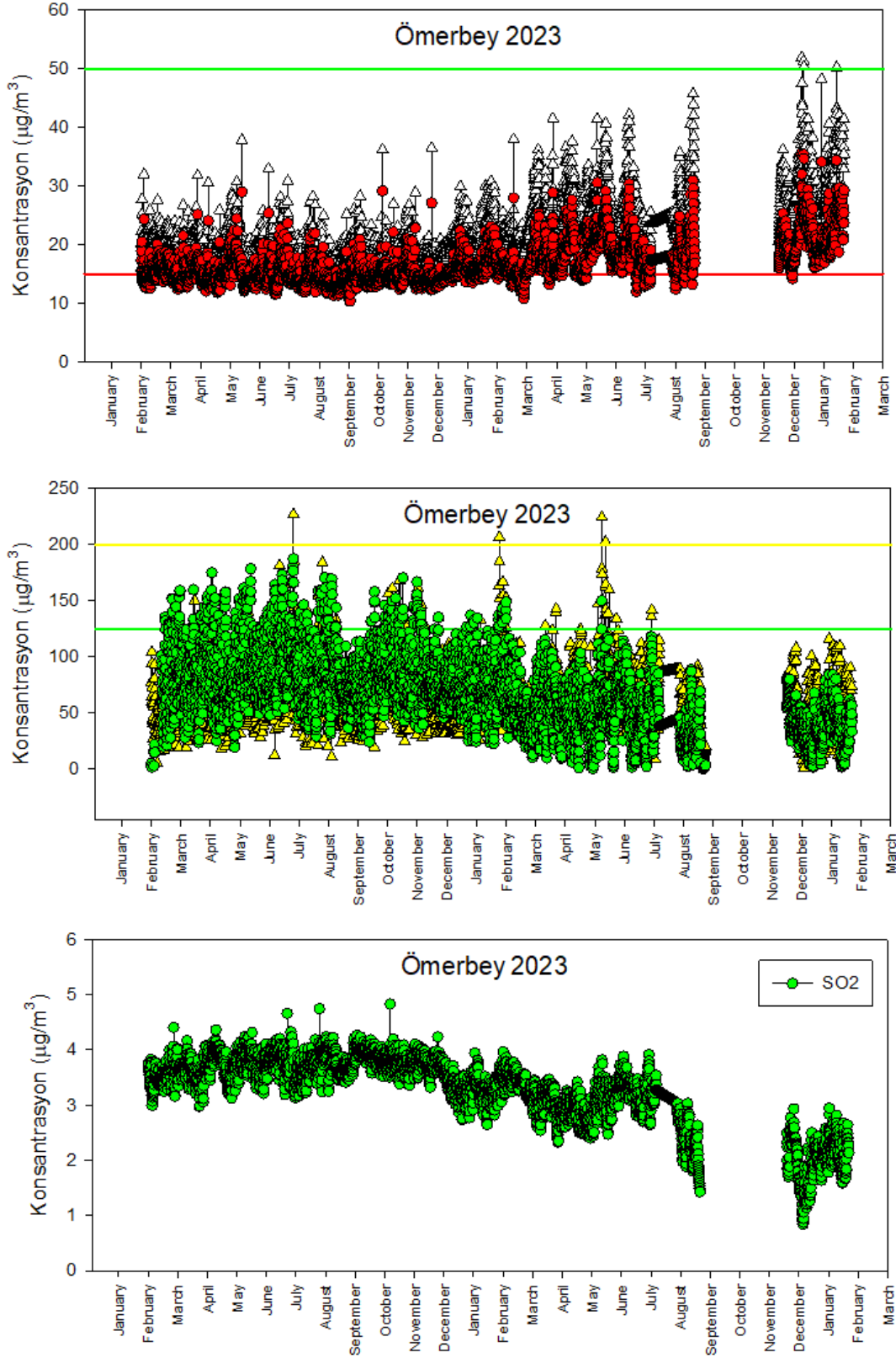
- 2024 grafiğinde de kış aylarında NO<sub>2</sub> piklerinin devam ettiği, 200 µg/m<sup>3</sup>'e yaklaşan veya onu aşan durumların oluşabildiği gözlemlenebilir.
- Yaz aylarında ise NO<sub>2</sub> seviyelerinin genellikle daha düşük olduğu, ancak trafik veya endüstriyel kaynaklı ani piklerin de zaman zaman yaşandığı görülmektedir.
- **O<sub>3</sub> (Ozon):**
  - Ozon kirliliği genellikle yaz aylarında, güneş ışığının yoğun olduğu dönemlerde artış gösterir. Grafikte O<sub>3</sub> için 120 µg/m<sup>3</sup> rehber değeri işaretlenmiştir.
  - Yaz döneminde (Haziran-Temmuz-Ağustos) ozon konsantrasyonlarının artarak 120 µg/m<sup>3</sup> seviyesini aştığı pikler dikkat çekebilir. Bu durum, sıcaklık artışı ve fotokimyasal reaksiyonların hızlanmasıyla ilişkilidir.
  - Kış aylarında ozon seviyeleri nispeten düşük seyretmektedir.
  - 2024 yılında da yaz aylarında ozonun yükseldiği; 120 µg/m<sup>3</sup> rehber değerinin üstüne çıkan piklerin görüldüğü anlaşılmaktadır.
  - Bu artış, özellikle sıcak ve güneşli günlerde azot oksitler (NO<sub>x</sub>) ve uçucu organik bileşiklerin (VOC) fotokimyasal reaksiyonlarıyla tetiklenir. Halitpaşa semtinin yerel trafik ve endüstri yoğunluğuna göre ozon seviyesi değişiklik gösterebilir.
- Kış döneminde ısınma amaçlı yakıt kullanımı (özellikle katı yakıtlar), olumsuz meteorolojik koşullar (inversiyon, düşük rüzgâr) ve trafik kaynaklı emisyonların birleşimiyle hem partikül madde hem de NO<sub>2</sub> değerlerinde ani yükselişler gözlenmektedir.
- Bu pikler, sınır değer aşımalarına ve hava kalitesi indeksinin olumsuz etkilenmesine yol açmaktadır.
- Yaz döneminde fotokimyasal reaksiyonların etkisiyle ozon seviyeleri yükselmekte ve özellikle 120 µg/m<sup>3</sup> rehber değerinin üstüne çıkan pikler oluşabilmektedir.
- O<sub>3</sub> artışı, yüksek sıcaklık, yoğun güneş ışınımı ve azot oksit (NO<sub>x</sub>) ile uçucu organik bileşiklerin (VOC) varlığıyla tetiklenir.
- PM<sub>2.5</sub>, akciğerlerin derin bölgelerine nüfuz edebildiği için kalp-damar ve solunum yolu hastalıkları açısından PM<sub>10</sub>'a göre daha büyük risk taşır. Kış aylarındaki artış, özellikle hassas gruplar (çocuklar, yaşlılar, kronik hastalar) üzerinde olumsuz etkiler yaratabilir.

Halitpaşa semtinde 2023 ve 2024 yıllarına ait ölçüm verileri, mevsimsel ve kaynak temelli dalgalanmaların hava kalitesi üzerinde belirgin etkisi olduğunu göstermektedir. Kış aylarında partikül madde ve NO<sub>2</sub> değerlerinin, yaz aylarında ise ozonun sınır değerleri aşabildiği görülmektedir. Bu nedenle, hem kış hem de yaz dönemlerine yönelik spesifik kirlilik kontrol önlemlerinin uygulanması, halk sağlığının korunması ve hava kalitesinin iyileştirilmesi açısından kritik önem taşımaktadır.

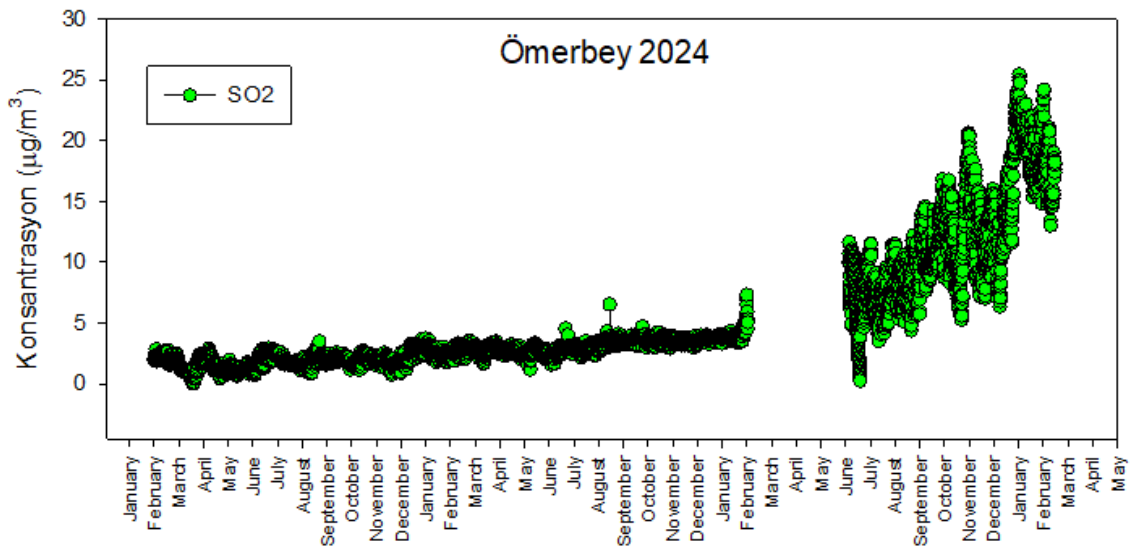
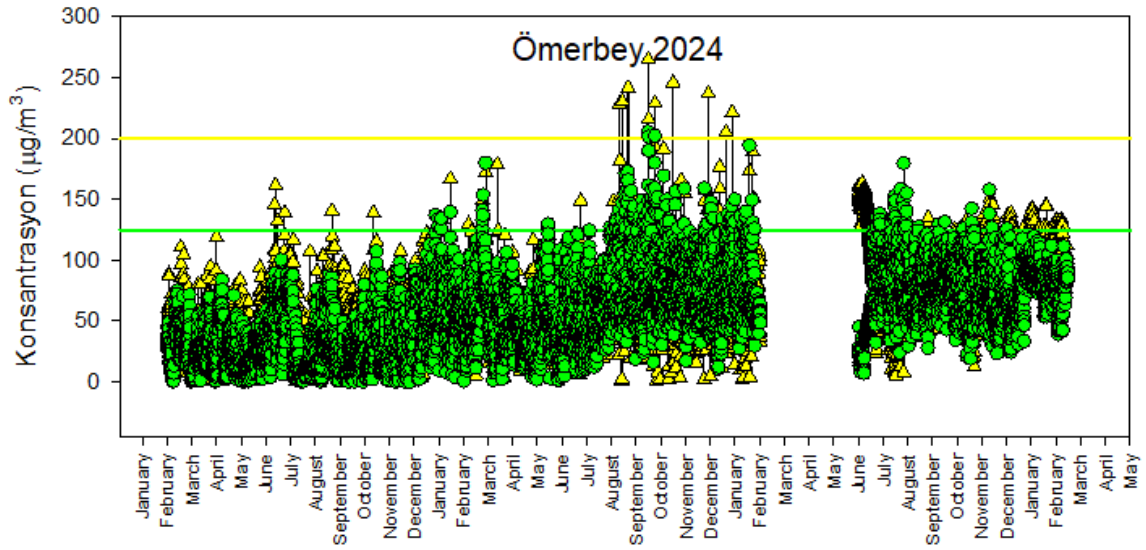
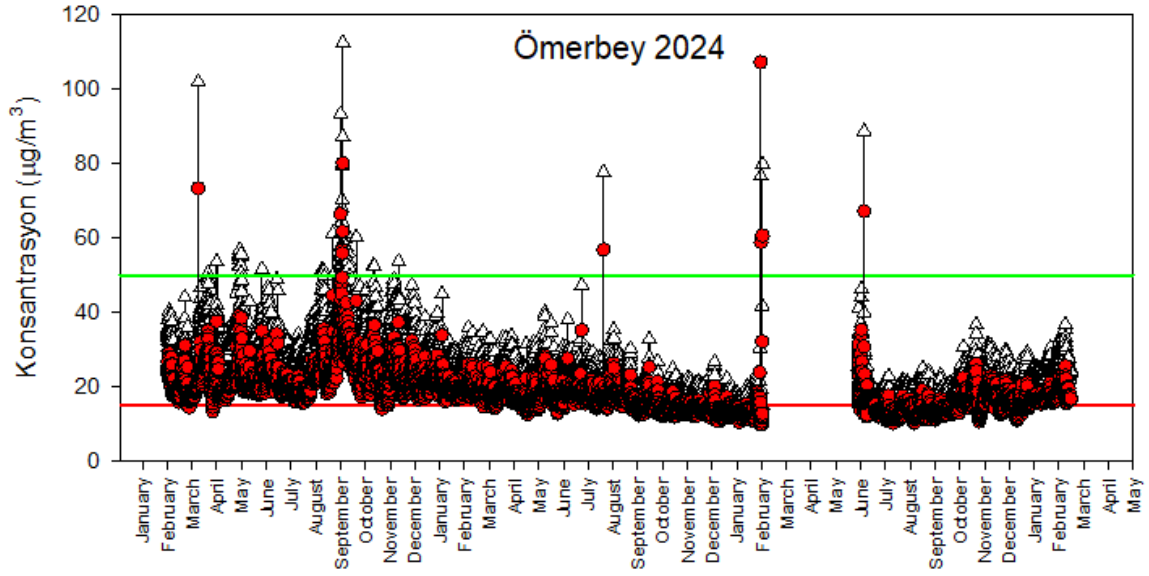


### 5.3. Ömerbey

Ömerbey Mahallesinde 2023 ve 2024 yılında yapılan ölçüm sonuçları Şekil 7 ve 8’de verilmiştir.



Şekil 7. Ömerbey Mahallesi ölçüm sonuçları (2023)



Şekil 8. Ömerbey Mahallesi ölçüm sonuçları (2024)

- **PM<sub>10</sub>**

- Grafikte PM<sub>10</sub> için 50 µg/m<sup>3</sup> sınır değeri işaretlenmiştir. Kış aylarında (özellikle Ocak-Şubat) ve kısmen sonbahar döneminde (Ekim-Kasım) sınır değerin zaman zaman aşıldığı pikler görülmektedir.
- Yaz aylarında (Haziran-Temmuz-Ağustos) PM<sub>10</sub> seviyeleri çoğunlukla sınırın altında seyretmektedir. Bu düşüş, daha yüksek hava sıcaklığı ve rüzgâr sirkülasyonunun artmasıyla partikül maddelerin dağılmasına bağlanabilir.
- 2024 verilerinde de özellikle kış aylarında (Ocak-Mart) 50 µg/m<sup>3</sup> sınır değerini aşan pikler göze çarpmaktadır. Bu artışlar, ısınma amaçlı yakıt kullanımı ve uygun olmayan meteorolojik koşullar (inversiyon, düşük rüzgâr vb.) nedeniyle partikül maddelerin atmosferde birikmesiyle ilişkilendirilebilir.
- İlkbahar ve yaz döneminde ise PM<sub>10</sub> seviyelerinin sınır değerin altında seyrettiği genel bir iyileşme eğilimi gözlenmektedir.

- **PM<sub>2.5</sub>**

- WHO'nun 15 µg/m<sup>3</sup> kılavuz değeri dikkate alındığında, kış aylarında PM<sub>2.5</sub> değerlerinde dönemsel artışlar ve sınır aşımına yakın veya üstünde pikler görülmektedir.
- Yaz ve ilkbahar aylarında PM<sub>2.5</sub> konsantrasyonları genellikle daha düşük seviyelerde kalmakta, zaman zaman 15 µg/m<sup>3</sup>'ün altında seyretmektedir.
- Kış aylarında 15 µg/m<sup>3</sup> düzeyini aşan pikler, ısınma faaliyetlerinden kaynaklı emisyonların artmasıyla uyumludur.
- Yaz döneminde PM<sub>2.5</sub> değerlerinin düşmesi, yüksek sıcaklık ve atmosferik karışımın artmasıyla açıklanabilir.

- **NO<sub>2</sub>**

- Özellikle kış aylarında (Ocak-Mart), NO<sub>2</sub> değerlerinde artışlar gözlemlenmekte; bu dönemde 1 saatlik 200 µg/m<sup>3</sup> sınırına yaklaşan veya aşan pikler ortaya çıkabilmektedir.
- Araç trafiği, ısınma kaynaklı emisyonlar ve endüstriyel faaliyetler (varsa) NO<sub>2</sub> artışında rol oynayabilir.
- 2024 verilerinde de kış aylarında NO<sub>2</sub> piklerinin devam ettiği, 200 µg/m<sup>3</sup> düzeyine yaklaşan veya aşan dalgalanmaların olduğu dikkat çekmektedir.
- Yaz aylarında NO<sub>2</sub> seviyeleri görece daha düşük seyretmekle birlikte, yoğun trafik veya endüstriyel kaynakların etkili olduğu günlerde ani artışlar gözlenebilir.

- **O<sub>3</sub> (Ozon)**

- Ozon genellikle yaz aylarında (Haziran-Temmuz-Ağustos) artış eğilimindedir. 120 µg/m<sup>3</sup> rehber değerinin üzerine çıkan pikler, sıcak ve güneşli hava koşullarında fotokimyasal reaksiyonların hızlanmasıyla ilişkilidir.
- Kış aylarında ozon değerleri nispeten düşük kalmaktadır.
- Yaz döneminde 120 µg/m<sup>3</sup> değerinin aşıldığı pikler 2024'te de sürmektedir. Bu durum, yüksek sıcaklık ve güneşlenme süresi ile ozon öncül maddelerinin (NO<sub>x</sub> ve VOC'ler) varlığından kaynaklanmaktadır.

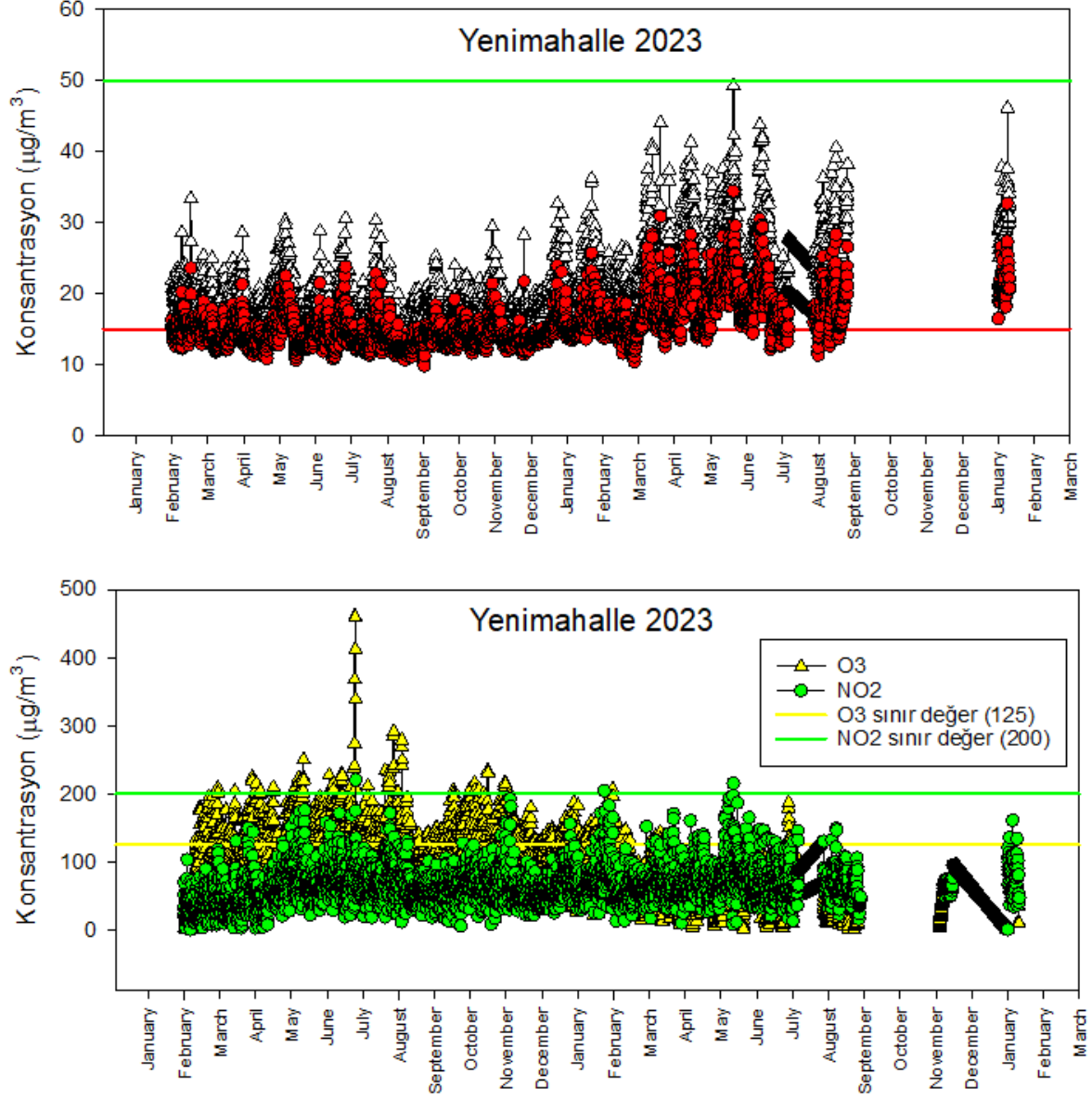
- **SO<sub>2</sub>**

- Grafikte 2023 yılı boyunca SO<sub>2</sub> konsantrasyonlarında belirli dönemlerde hafif dalgalanmalar görülmekle birlikte, genel olarak yüksek piklerin daha sınırlı olduğu anlaşılmaktadır.
- Kış aylarında artış gözlenmesi, kükürt içeriği yüksek yakıt kullanımına (kömür vb.) bağlı olabilir. Yine de çoğu ölçümde 350 µg/m<sup>3</sup> (1 saatlik) veya 125 µg/m<sup>3</sup> (24 saatlik) gibi sınır değerlerin altında kalındığı görülmektedir.
- 2024 grafiğinde yılın ikinci yarısına doğru SO<sub>2</sub> seviyelerinde bir artış eğilimi dikkat çekmektedir. Bu artış, yakıt kalitesinde değişim, endüstriyel faaliyetlerde artış ya da meteorolojik faktörler (ör. düşük rüzgâr hızları, inversiyonlar) nedeniyle oluşmuş olabilir.
- Ölçülen değerlerin, sınır değerlerin ne kadarına ulaştığına bakılarak halk sağlığı açısından risk değerlendirmesi yapılmalıdır. Eğer 125 µg/m<sup>3</sup> gibi 24 saatlik sınır değerlere yakın veya üzerinde ölçümler varsa, özellikle kış aylarında yakıt kalitesinin denetlenmesi ve uygun arıtma/filtre teknolojilerinin kullanılması önem taşır.

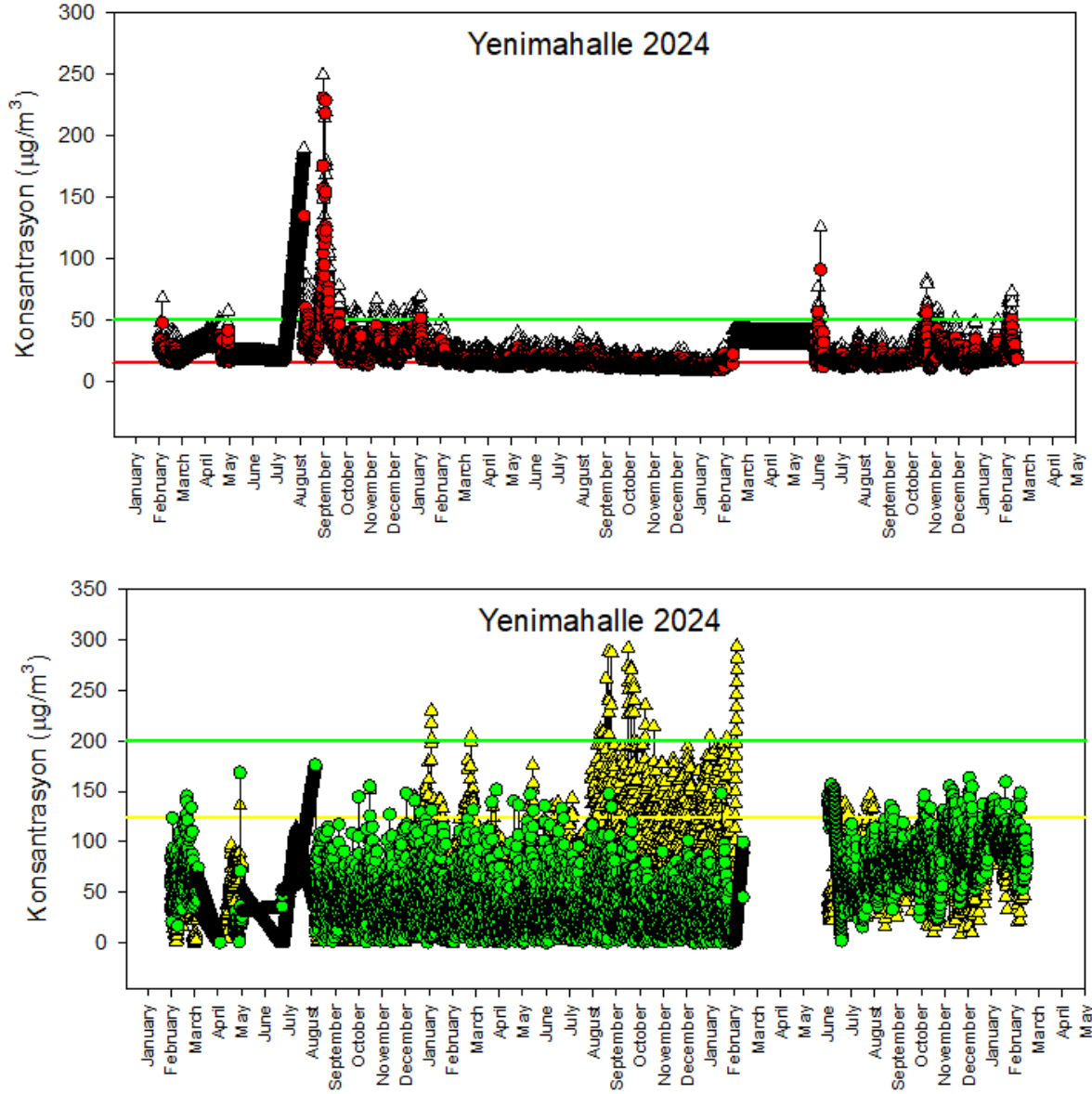
Ömerbey semtinde 2023 ve 2024 yıllarına ait veriler, özellikle kış aylarında PM ve NO<sub>2</sub> seviyelerinin, yaz aylarında ise ozon konsantrasyonlarının sınır değerleri aşabildiğini göstermektedir. SO<sub>2</sub> düzeyleri büyük ölçüde kontrol altında görünmekle birlikte, 2024'teki artış eğilimi yakıt kalitesi ve emisyon kaynaklarının dikkatle izlenmesini gerektirmektedir. Mevsimsel ve bölgesel faktörleri dikkate alan bütüncül bir hava kalitesi yönetimi yaklaşımıyla, bu kirleticilerin sınır değerlerin altına çekilmesi ve halk sağlığının korunması mümkün olacaktır.

#### 5.4. Yenimahalle

Yenimahalle Mahallesi'nde 2023 ve 2024 yılında yapılan ölçüm sonuçları Şekil 9 ve 10'da verilmiştir.



Şekil 9. Yenimahalle Mahallesi ölçüm sonuçları (2023)



Şekil 10. Yenimahalle Mahallesi ölçüm sonuçları (2024)

- **PM<sub>10</sub>**

- Üst grafikte (2023), siyah sembollerle gösterilen PM<sub>10</sub> değerlerinin yılın belirli dönemlerinde 50 µg/m<sup>3</sup> sınır çizgisinin üzerine çıktığı gözlemlenmektedir. Özellikle kış aylarında (Ocak-Şubat) ve kısmen sonbaharda (Ekim-Kasım) daha yoğun pikler mevcuttur.
- İlkbahar ve yaz aylarında (Nisan-Ağustos) PM<sub>10</sub> seviyelerinin çoğunlukla 50 µg/m<sup>3</sup> sınırının altında kaldığı dikkat çekmektedir. Bu durum, mevsimsel olarak artan hava sirkülasyonu ve daha az ısınma amaçlı yakıt kullanımıyla ilişkilendirilebilir.
- 2024 verilerinde (üst sağ grafikte), özellikle Ocak-Mart döneminde 50 µg/m<sup>3</sup> sınırının üzerine çıkan daha keskin pikler gözlemlenmektedir. Bu artışlar, kış

koşullarının yanı sıra ısınma kaynaklı emisyonların veya bölgedeki inşaat/trafik faaliyetlerinin yoğunluğuyla ilişkilendirilebilir.

- İlkbahar ve yaz aylarında PM<sub>10</sub> değerlerinin önemli ölçüde düştüğü ve çoğunlukla sınır değerlerin altında seyrettiği görülmektedir.
- Grafiğin son aylarında (sonbahar-kış dönemine geçişte) tekrar sınır değerinin üzerinde kısa süreli pikler oluşabilir; bu da mevsimsel döngünün tipik bir yansımasıdır.

- **NO<sub>2</sub>**

- Aynı grafikte (kırmızı semboller) NO<sub>2</sub> değerleri çoğunlukla 1 saatlik 200 µg/m<sup>3</sup> sınırının oldukça altında kalmakla birlikte, kış aylarında zaman zaman yükselme eğiliminde olduğu görülmektedir.
- Trafik yoğunluğu, endüstriyel faaliyetler (varsa) ve kışın ısınma amaçlı emisyonlar, NO<sub>2</sub> artışının başlıca kaynakları olarak değerlendirilebilir. Ancak 200 µg/m<sup>3</sup> düzeyini aşan çok yüksek pikler 2023 grafiğinde nispeten sınırlı görünmektedir.
- 2024 NO<sub>2</sub> ölçümleri (üst sağ grafikteki kırmızı semboller), kış aylarında bir miktar yükselmekle beraber 200 µg/m<sup>3</sup> sınırına ulaşan çok sayıda pik göstermemektedir. Yine de mevsimsel olarak artış ve düşüş trendi (kışın artış, yazın düşüş) belirgindir.
- Yıl içinde bazı ani yükselmeler, trafik yoğunluğunun arttığı saatler veya endüstriyel kaynaklı emisyonların geçici artışlarıyla açıklanabilir.

- **O<sub>3</sub> (Ozon)**

- Alt soldaki grafikte yeşil semboller (O<sub>3</sub>) ve sarı semboller (NO<sub>2</sub>) birlikte verilmiştir. O<sub>3</sub> için işaretlenen 120-125 µg/m<sup>3</sup> sınır çizgisinin yaz aylarında (Haziran-Temmuz-Ağustos) zaman zaman aşıldığı pikler dikkat çekmektedir. Bu, sıcak ve güneşli hava koşullarında fotokimyasal reaksiyonların hızlanması sonucu oluşan tipik yaz dönemi ozon artışıdır.
- Kış aylarında ozon seviyesi görece düşük seyretmektedir; bu da mevsimsel bir normaldir.
- Alt sağ grafikte 2024 yılına ait ozon ölçümlerinde de yaz döneminde 120-125 µg/m<sup>3</sup> sınırının üzerinde pikler olduğu gözlemlenmektedir. Bu piklerin sayısı ve şiddeti, o yılki meteorolojik koşullara (sıcaklık, güneşlenme süresi) ve NO<sub>x</sub>/VOC emisyon miktarlarına bağlı olarak değişebilir.
- Kış aylarında ozon seviyeleri yine düşük, ancak bahar ve yaz dönemine doğru artış eğilimi belirgin.

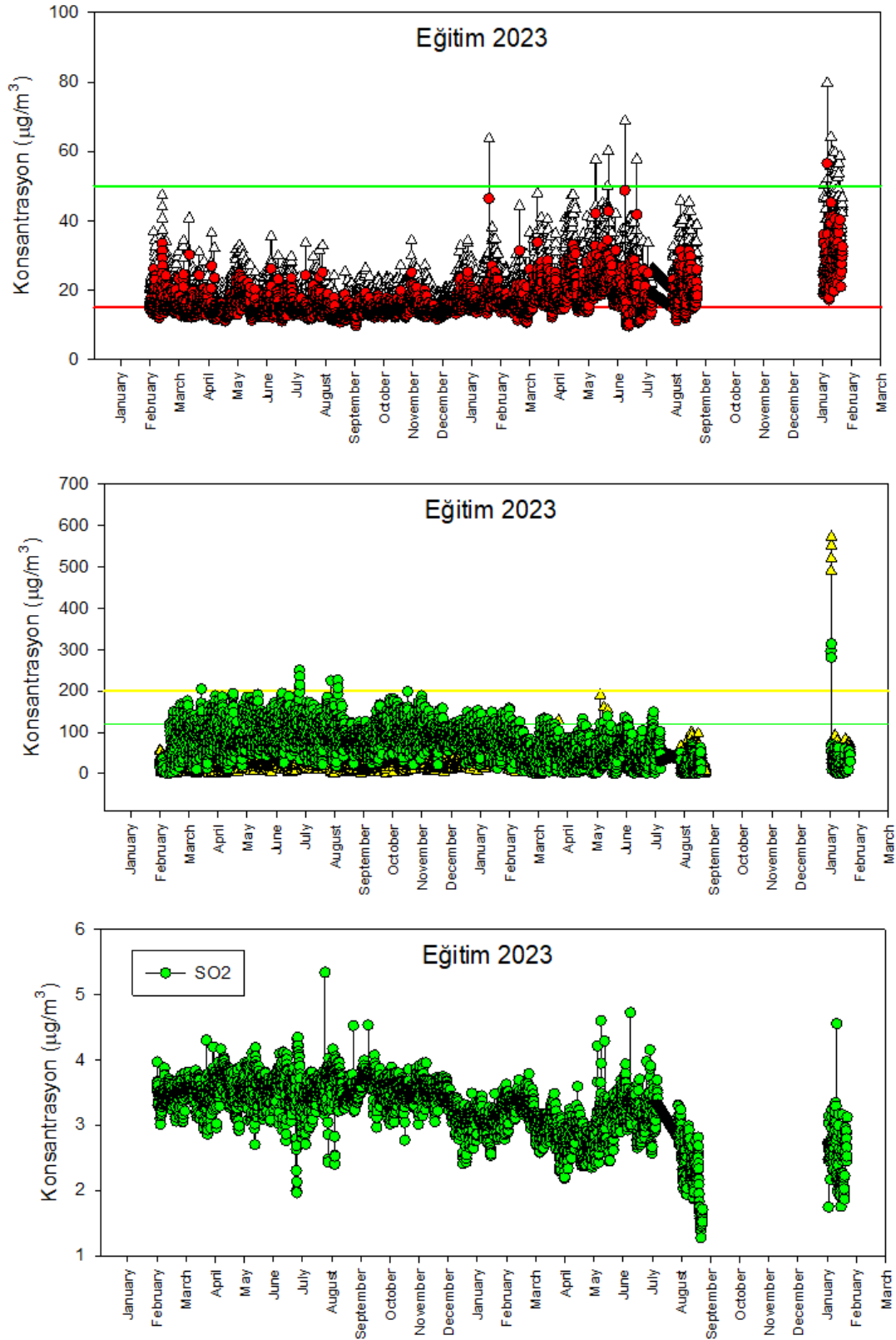
- **NO<sub>2</sub>**

- Aynı grafikte NO<sub>2</sub> değerlerinin (sarı semboller) özellikle kış aylarında yükseldiği, yaz aylarında ise nispeten düşük olduğu görülmektedir. NO<sub>2</sub> ve O<sub>3</sub> arasındaki ters ilişki (biri yüksekken diğerinin nispeten düşük olması), fotokimyasal süreçlerden kaynaklanır.
- 2024'te NO<sub>2</sub> pikleri (sarı semboller) yine kış aylarında yükseliş gösterirken, yaz aylarında genel olarak daha düşük değerlerde seyretmektedir.
- Trafik, ısınma ve endüstri kaynaklı emisyonların yoğun olduğu dönemlerde veya saatlerde ani pikler gözlemlenebilir.

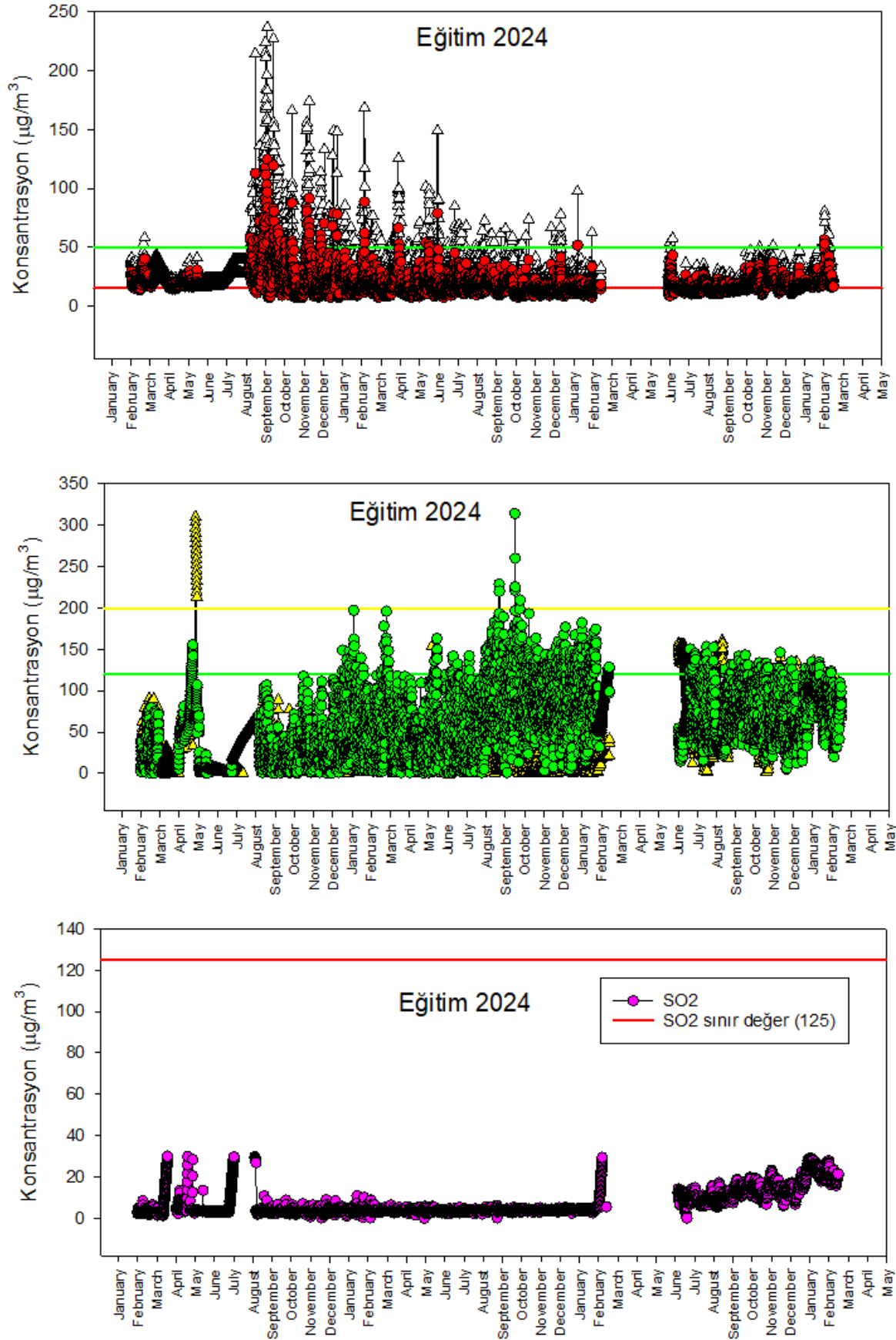
Yenimahalle semtinde 2023 ve 2024 verileri, mevsimsel farklılıkların belirgin etkisini ortaya koymaktadır. Kışın PM<sub>10</sub> ve NO<sub>2</sub>, yazın ise ozon (O<sub>3</sub>) düzeyleri yükselerek zaman zaman sınır değerleri aşabilmektedir. Bu nedenle, kış ve yaz dönemlerine özgü önlemler alınması ve hava kirliliğiyle ilgili sürekli izleme ve bilinçlendirme faaliyetlerinin yürütülmesi, halk sağlığının korunması ve hava kalitesinin iyileştirilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

## 5.5. Eğitim

Eğitim Mahallesinde 2023 ve 2024 yılında yapılan ölçüm sonuçları Şekil 11 ve 12’de verilmiştir



Şekil 11. Eğitim Mahallesi ölçüm sonuçları (2023)



Şekil 12. Eğitim Mahallesi ölçüm sonuçları (2024)

- **PM<sub>10</sub> (50 µg/m<sup>3</sup> sınır çizgisi)**

- Kış aylarında (Ocak-Şubat) ve sonbahar başında (Eylül-Ekim) 50 µg/m<sup>3</sup> sınırının üzerine çıkan pikler görülmektedir. Bu pikler, ısınma amaçlı yakıt kullanımı (kömür, odun vb.), inşaat veya trafik yoğunluğu gibi yerel emisyon kaynaklarının artışıyla ilişkilendirilebilir.
- İlkbahar ve yaz aylarında (Mart-Ağustos) PM<sub>10</sub> seviyeleri genellikle sınırın altında seyretmektedir. Bu durum, mevsimsel olarak daha iyi hava sirkülasyonu ve ısınma kaynaklı emisyonların azalmasıyla açıklanabilir.
- 2024 yılında da kış aylarında (Ocak-Mart) 50 µg/m<sup>3</sup> sınırının sıklıkla aşıldığı pikler dikkat çekmektedir. Bu, yine ısınma amaçlı katı yakıt kullanımı ve olumsuz meteorolojik koşullarla (durgun hava, inversiyon) ilişkilendirilebilir.
- İlkbahar ve yaz döneminde PM<sub>10</sub> değerlerinin düştüğü ve genellikle sınır değer altında seyrettiği görülür. Ancak sonbahara geçişle birlikte kısa süreli pikler tekrar ortaya çıkabilir.

- **PM<sub>2.5</sub> (15 µg/m<sup>3</sup> WHO önerisi)**

- Grafikte PM<sub>2.5</sub> verileri (kırmızı semboller) varsa, kış döneminde PM<sub>2.5</sub> değerlerinin zaman zaman 15 µg/m<sup>3</sup> rehber düzeyini aştığı pikler görülebilir. PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>'a kıyasla daha küçük çaplı partiküllerden oluştuğu için sağlık açısından daha kritik olup, özellikle kışın yakıt kaynaklı emisyonlar bu değeri yükseltmektedir.
- Yaz aylarında PM<sub>2.5</sub> seviyelerinin önemli ölçüde düştüğü, çoğunlukla 15 µg/m<sup>3</sup>'ün altında kaldığı gözlemlenir.
- Kış aylarında PM<sub>2.5</sub> seviyelerinin artması beklenir. Veriler, 15 µg/m<sup>3</sup> rehber değerinin zaman zaman aşıldığını gösteriyorsa, bu artışlar yine ısınma kaynaklı emisyonlarla açıklanabilir.
- Yaz aylarında ise PM<sub>2.5</sub> konsantrasyonları büyük oranda düşmektedir.

- **NO<sub>2</sub>**

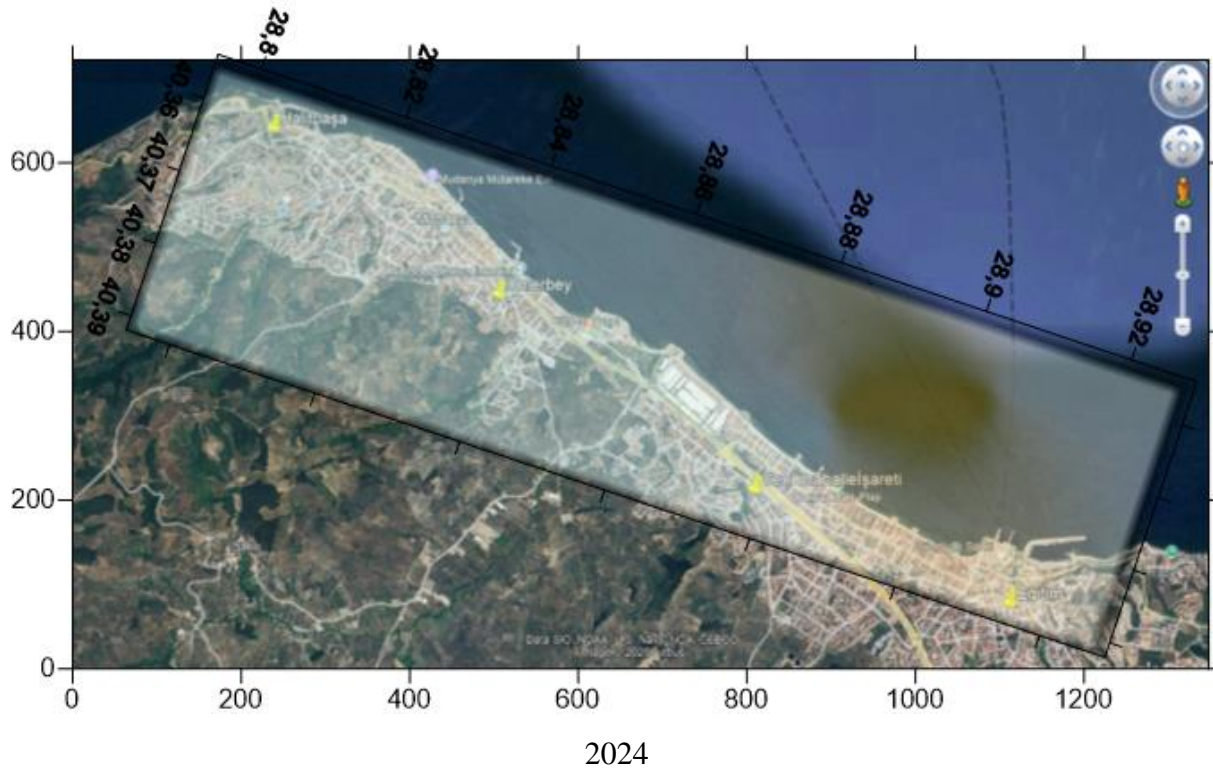
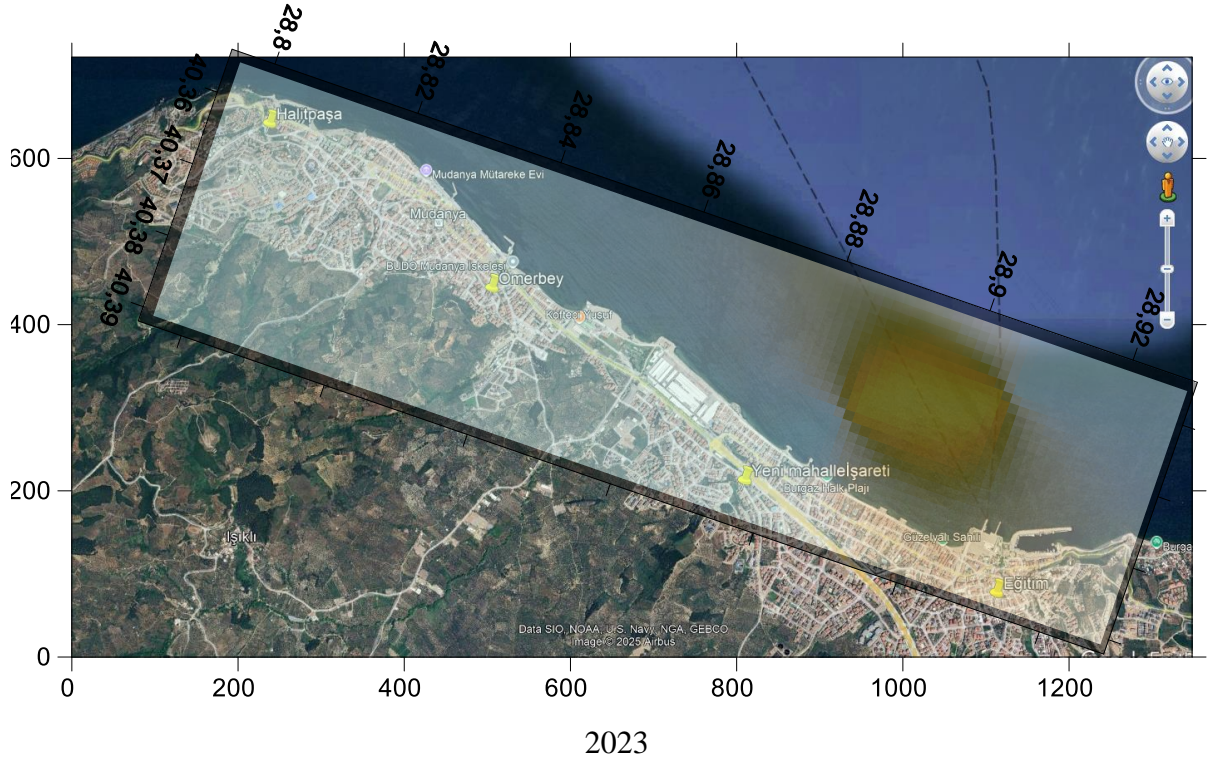
- Kış aylarında (Özellikle Ocak-Şubat), trafik yoğunluğu ve ısınma kaynaklı emisyonların artmasıyla NO<sub>2</sub> seviyelerinde kısmi yükselmeler görülmektedir. Ancak 200 µg/m<sup>3</sup> sınırını aşan çok sayıda pik yoksa, genel olarak sınırın altında kaldığı söylenebilir.
- Yaz aylarında NO<sub>2</sub> seviyeleri nispeten düşük seyretmektedir.
- 2024'te de benzer şekilde, kış aylarında NO<sub>2</sub> pikleri görülmekle birlikte 200 µg/m<sup>3</sup> sınırının aşılması nadir olabilir. Yine de özellikle akşam saatlerinde trafik yoğunluğunun artması veya soğuk havalarda ısınma amaçlı yakıt kullanımının etkisiyle ani yükselmeler gözlemlenebilir.

- **O<sub>3</sub> (120 µg/m<sup>3</sup> rehber çizgisi)**
  - Ozon, yaz aylarında (Haziran-Temmuz-Ağustos) yüksek sıcaklık ve güneşlenme süresiyle fotokimyasal reaksiyonların artması sonucu yükselir. 120 µg/m<sup>3</sup> rehber değerinin üzerine çıkan pikler, özellikle Temmuz-Ağustos döneminde göze çarpabilir.
  - Kış aylarında ozon seviyesi çoğunlukla düşük kalmaktadır.
  - Yaz aylarında 120 µg/m<sup>3</sup> seviyesinin üzerinde ozon pikleri 2024'te de devam etmektedir. Bu piklerin sayısı ve şiddeti, mevsimsel meteorolojik koşullara (sıcaklık, güneşlenme, rüzgâr hızı) ve azot oksit (NO<sub>x</sub>) ile uçucu organik bileşik (VOC) emisyonlarına bağlı olarak değişir.
- **SO<sub>2</sub>**
  - 2023 yılında SO<sub>2</sub> seviyeleri, çoğunlukla 125 µg/m<sup>3</sup> sınırının altında seyretmektedir. Kış aylarında katı yakıt (özellikle kükürt içeriği yüksek kömür) kullanımının artmasıyla dönemsel yükselmeler olsa da grafiğe göre belirgin, çok yüksek pikler sınırlı görünmektedir.
  - Bu değerlerin kısa süreli aşımaları varsa, genellikle yoğun ısınma ya da endüstriyel kaynaklı emisyonlarla ilişkilendirilebilir.
  - 2024 grafiğinde, özellikle yılın ilk aylarında ve sonbahara geçiş döneminde SO<sub>2</sub> seviyelerinde bir miktar yükselme eğilimi gözlemlenmektedir. 125 µg/m<sup>3</sup> sınırına yaklaşan veya onu aşan pikler, yakıt kalitesi (kükürt oranı) ve emisyon kontrollerine bağlı olarak ortaya çıkabilir.
  - Yaz aylarında SO<sub>2</sub> konsantrasyonlarının düştüğü, çoğunlukla sınır değerlerin altında kaldığı görülmektedir. Bu, ısınma amaçlı emisyonların azalması ve meteorolojik koşulların daha uygun olmasıyla bağlantılıdır.

Eğitim semtindeki ölçümler, kış aylarında partikül madde (PM<sub>10</sub>/PM<sub>2,5</sub>), NO<sub>2</sub> ve kısmen SO<sub>2</sub> değerlerinde; yaz aylarında ise ozon (O<sub>3</sub>) seviyelerinde sınır değer aşımalarının veya aşımaya yakın piklerin yaşandığını göstermektedir. Mevsimsel ve kaynak temelli (ısınma, trafik, endüstri vb.) faktörler, kirlilik düzeylerinde belirgin rol oynamaktadır. Bu nedenle, kış ve yaz aylarına özgü hava kirliliği kontrol önlemlerinin alınması, temiz yakıt ve emisyon azaltımı politikalarının yaygınlaştırılması, hava kalitesinin iyileştirilmesinde ve halk sağlığının korunmasında kilit önem taşımaktadır.

## 6. Değerlendirme

Bu çalışmada, Mudanya ilçesinde yer alan beş farklı hava kalitesi ölçüm istasyonundan (Tirilye, Halitpaşa, Ömerbey, Yenimahalle ve Eğitim) 2023–2024 yılları arasında elde edilen saatlik veri analizleri, bölgesel ve mevsimsel farklılıkların hava kirliliği dinamikleri üzerindeki etkisi tartışılmıştır. Her noktadaki ortalama kirletici konsantrasyonları kullanılarak 2023 yılı ve 2024 yılı için ayrı ayrı dağılım haritaları oluşturulmuştur. Şekil 13'te PM<sub>10</sub>'un 2023 ve 2024 yılları için oluşturulan dağılım haritası görülmektedir.



Şekil 13. PM<sub>10</sub> dağılım haritası

“Sıcak nokta” (hotspot) kıyı şeridinde, özellikle denize doğru uzanan kısımda yoğunlaşmıştır.

Kıyı bölgesindeki trafik, ısınma, sanayi veya liman/feribot kaynaklı emisyonlar,

- o Rüzgârın kara tarafından denize doğru esmesi sonucu partiküllerin deniz üstünde birikmesine yol açmış olabilir.

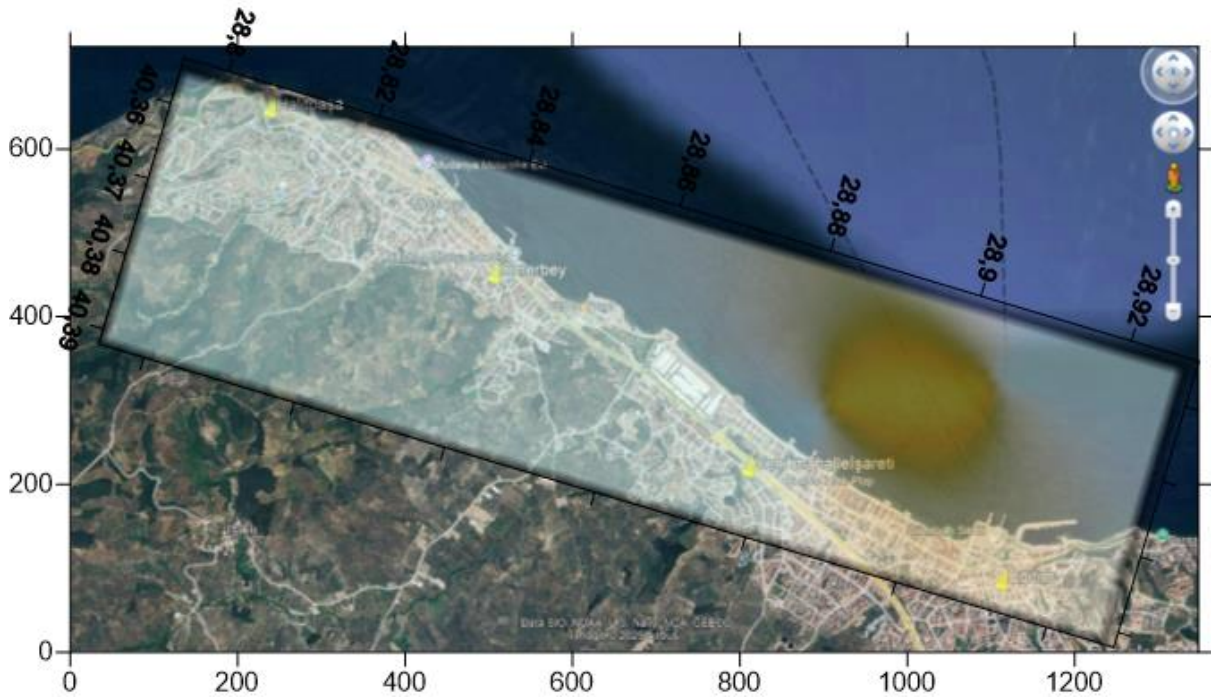
2024 yılı için de yine kıyıya yakın deniz üzerinde turuncu-kahverengi bir bölge göze çarpıyor ancak 2023'e göre büyüklüğü, yoğunluğu ya da konumu farklı olabilir.

2024'te emisyonların azalması (temiz yakıt kullanımı, sanayi veya ulaşımda alınan önlemler, vb.),

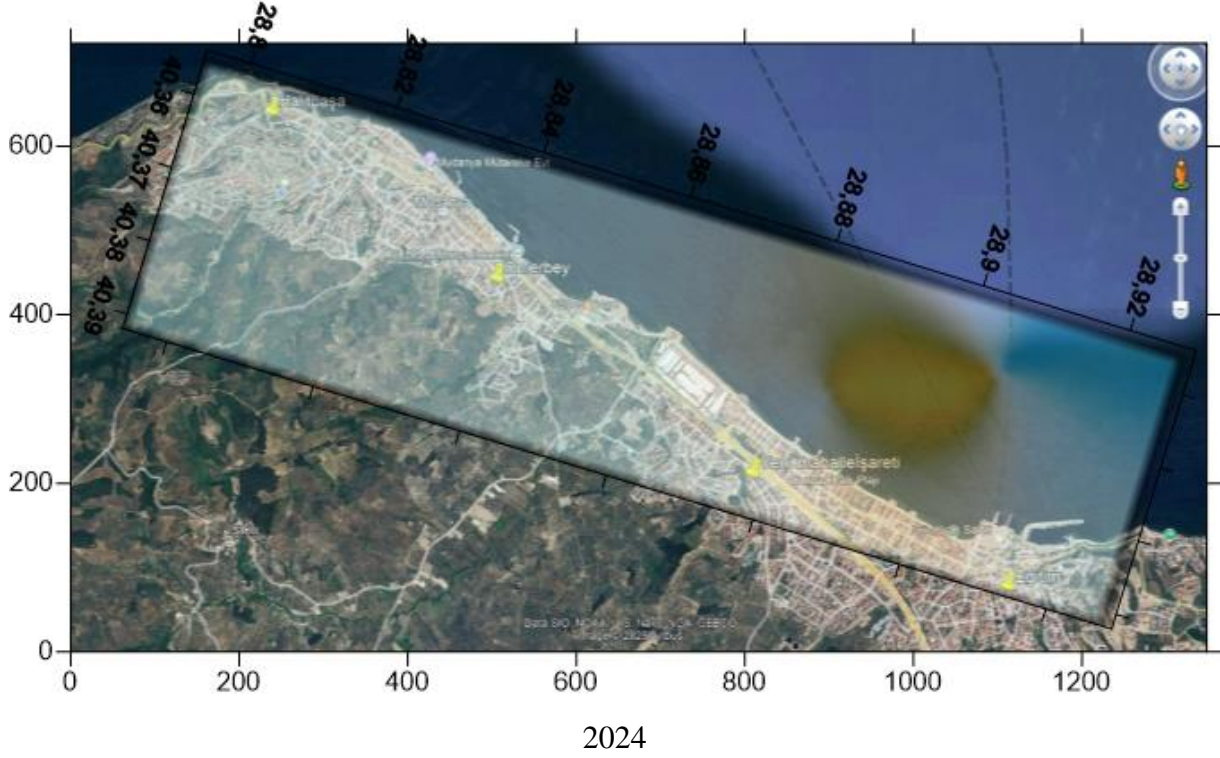
Daha elverişli meteorolojik koşullar (rüzgâr, yağış, hava sirkülasyonu),

Model parametrelerinde veya ölçüm yöntemlerinde değişiklik (daha fazla/hassas istasyon, farklı mevsim verileri, vb.).

Şekil 14'de PM<sub>2.5</sub> in 2023 ve 2024 yılları için oluşturulan dağılım haritası görülmektedir.



2023

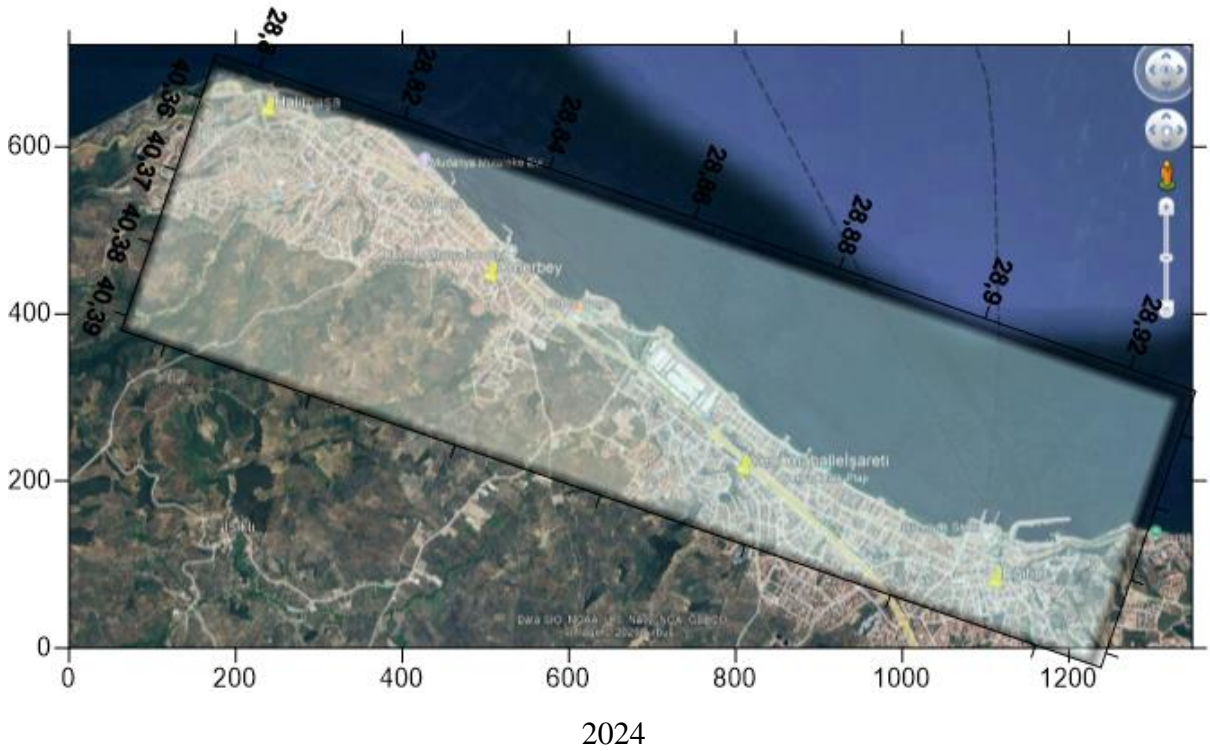
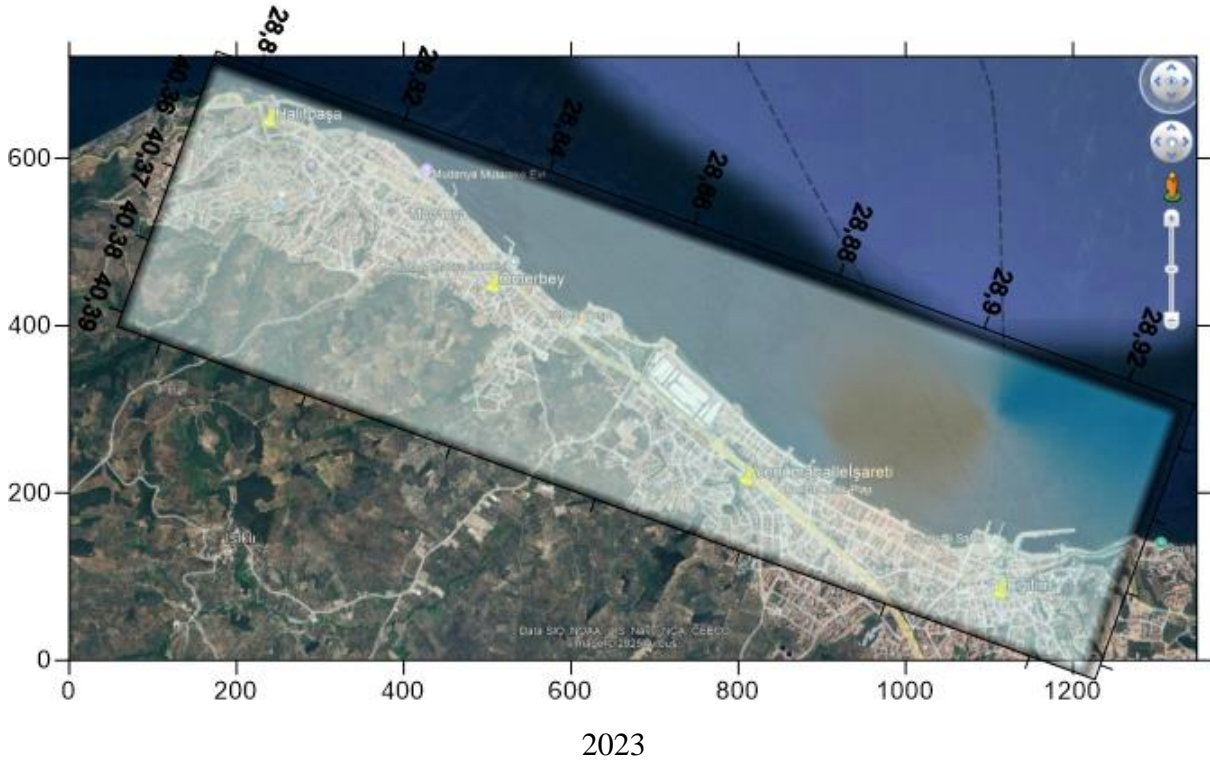


Şekil 14. PM<sub>2,5</sub> dağılım haritaları

Turuncu/kahverengi dairesel alanın, kıyı şeridinin hemen açıklarında deniz üzerinde yoğunlaştığı görülüyor. PM<sub>2,5</sub> değerinin en yüksek olduğu noktanın deniz tarafında konumlandığı anlaşılmaktadır. Bu durumun,

- Rüzgârın kıyıdan denize doğru esmesi ve karadaki emisyon kaynaklarını deniz üzerine taşınması,
- Deniz taşımacılığı (gemiler) veya liman kaynaklı emisyonlar,
- Modelleme esnasında kullanılan veri girişlerinde (örneğin meteorolojik ya da emisyon kaynak verisi) denize yakın noktalarda bir yığılma öngörülmesi gibi etkenlerden kaynaklanabildiği düşünülmektedir.
- **Şehir merkezi ve ulaşım:** Mudanya'nın merkezinde ve kıyı şeridinde kara trafiği veya feribot/liman faaliyetleri kaynaklı emisyonlar olabilir.
- **Sanayi veya yerel ısınma:** Kıyı şeridine yakın bölgelerde sanayi tesisleri veya konut kaynaklı emisyonlar (kömür, doğalgaz, vb.) dönemsel olarak artabilir.
- **Meteorolojik faktörler:** Rüzgâr yönü, hızı ve atmosferik karışım koşulları, karadaki kirleticilerin deniz üzerine taşınmasına neden olabilir. Ayrıca inversiyon koşulları (özellikle kış aylarında) kıyı bölgelerinde partikül madde birikimini artırır.

Şekil 15’de ise NO<sub>2</sub> için oluşturulan dağılım haritaları verilmiştir.



Şekil 15. NO<sub>2</sub> dağılım haritaları

“Sıcak nokta” (hotspot) denize doğru kıyıya yakın bir alanda konumlanmıştır. Bu, Mudanya sahil şeridindeki trafik, yerel ısınma, liman faaliyetleri, gemi emisyonlarıyla ilgili olabilir. Rüzgârın kara tarafından denize doğru esmesi veya belirli mevsimsel/meteorolojik koşullar, karadaki emisyonların kıyıya yakın bölgede birikmesine sebep olabilir. Sağdaki haritada

2023'e kıyasla dikkat çeken büyük bir kahverengi/turuncu "yoğunluk alanı" görülüyor; renk dağılımı daha açık veya daha homojen.

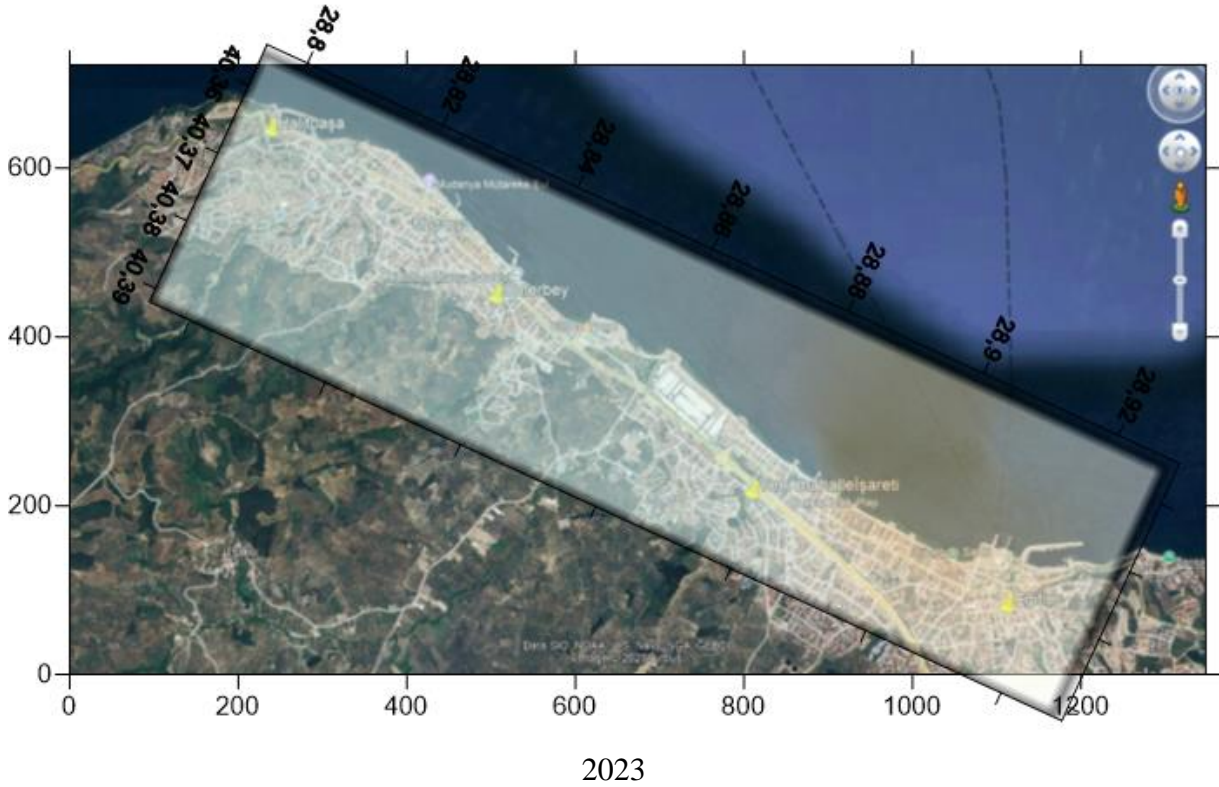
Bu durum, 2024 yılında NO<sub>2</sub> konsantrasyonunun azaldığını veya en azından haritada göze çarpan yoğunlaşmaların daha düşük seviyede olduğunu gösteriyor olabilir.

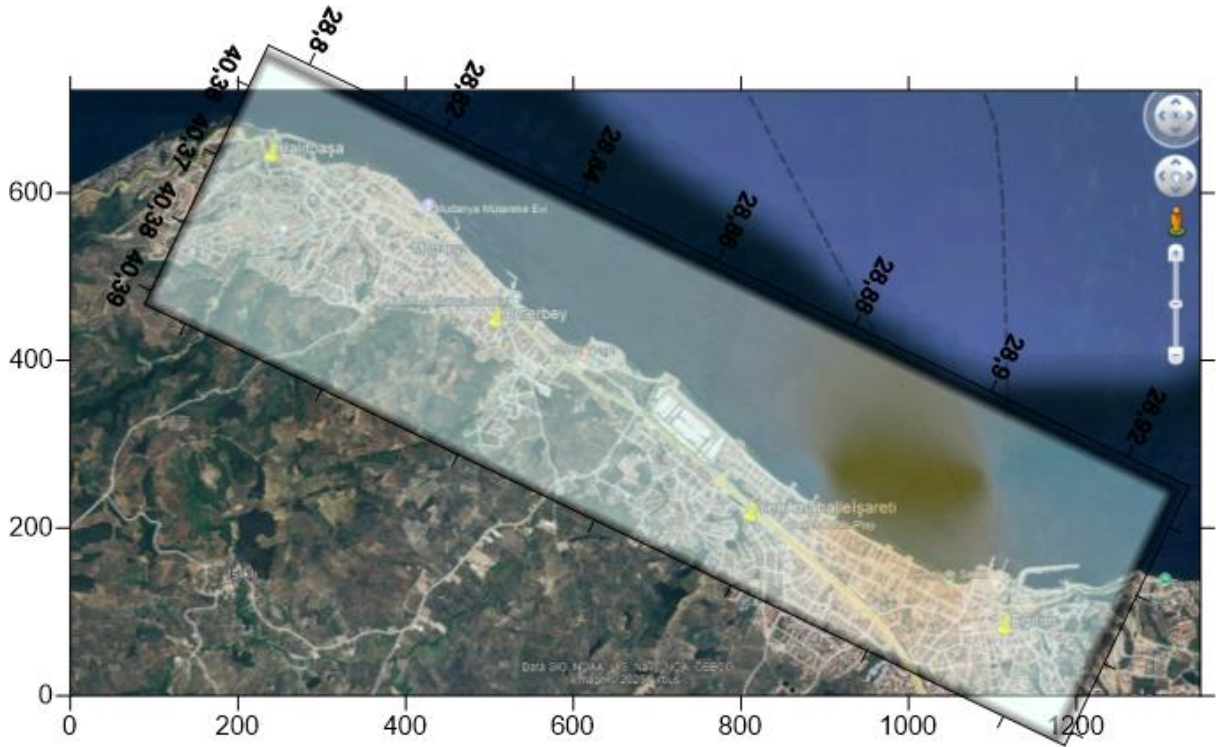
Eğer veriler gerçek ölçüm istasyonlarından ya da tutarlı bir modelleme çalışmasından elde edildiye, 2024 yılında NO<sub>2</sub> kaynaklı emisyonların (örneğin araç trafiği, gemi trafiği, sanayi, ısınma gibi) azaltılması, yeni düzenlemeler, yakıt türü değişiklikleri veya meteorolojik farklar (daha fazla rüzgâr, yağış vb.) bu düşüşe neden olmuş olabilir.

**Emisyonlarda azalma:** 2024'te emisyonu azaltıcı tedbirler (daha temiz yakıt kullanımı, endüstriyel kontroller, araç sayısında veya yakıt türünde değişiklik) devreye girmiş olabilir.

**Meteorolojik farklar:** 2023 ve 2024 arasındaki rüzgâr yönü, hız, inversiyon koşulları gibi etkenler farklılık gösterebilir. NO<sub>2</sub> gibi kirleticiler, uygun rüzgâr koşullarında daha hızlı dağılabilir ve konsantrasyonlar daha düşük gözükür.

Şekil 16'da O<sub>3</sub>'ün 2023 yılı ve 2024 yılı için oluşturulan dağılım haritaları görülmektedir.



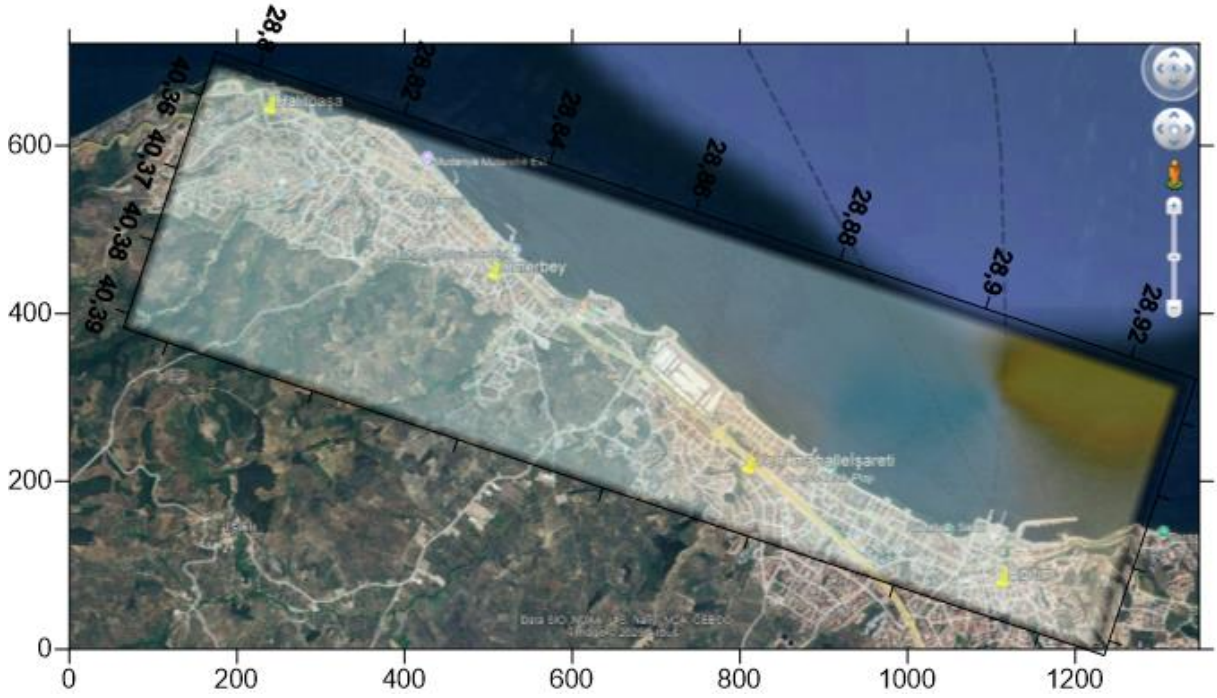


2024

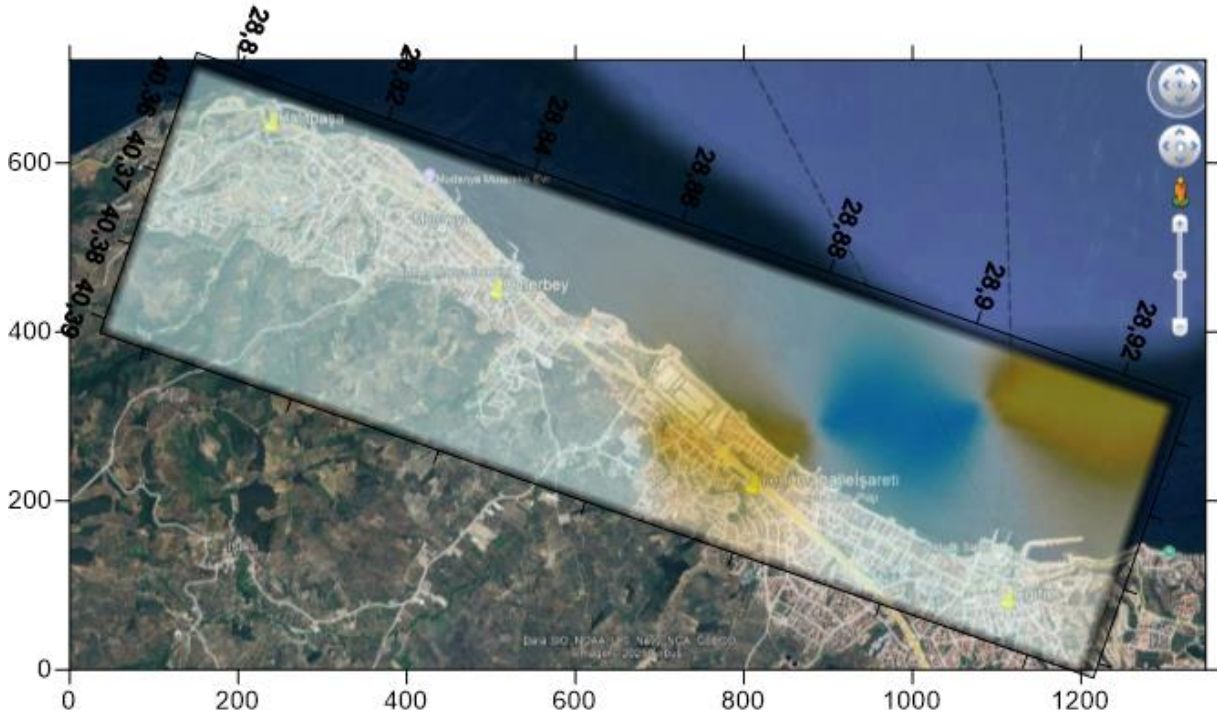
Şekil 16. O<sub>3</sub> dağılım haritaları

- Ozonun yüksek olduğu bölgeler genellikle NO<sub>x</sub> emisyonu olan (trafik, sanayi, gemi, liman vb.) ancak aynı zamanda yeterli güneş ışığı ve VOC kaynağının da bulunduğu alanların rüzgâr yardımıyla “aşağı rüzgâr yönünde” birikmesiyle ilişkilendirilebilir.
- Kıyı bölgelerinde, deniz meltemi veya kara-deniz rüzgâr etkileşimi sonucunda, ozon ve öncül maddelerin taşınmasıyla bu tür lokal yoğunlaşmalar oluşabilir.
- 2024 yılında da kıyıya yakın bir bölgede turuncu/kahverengi birikme göze çarpıyor, ancak 2023’tekinden konum veya yoğunluk açısından kısmen farklı olabilir.
- Eğer renk ölçeği ve ölçüm/ model parametreleri aynı ise, 2024’teki dağılımın ya **daha dar bir alanda** ya da **daha düşük/orta yoğunlukta** olduğu gözlenebilir (tam olarak hangisinin geçerli olduğu, haritanın ölçeğine ve kullanılan renk aralığına bağlı).
- Bu fark, 2024’teki meteorolojik koşulların (örneğin daha kuvvetli rüzgâr, farklı rüzgâr yönü, bulutluluk durumu vb.) ozonu seyrelterek dağıtması veya öncül kirletici emisyonlarında (NO<sub>x</sub>, VOC) azalma ya da kontrol tedbirlerinin devreye girmesi sonucu meydana gelmiş olabilir.
- **Ozon seviyesi yüksek bölgeler**, solunum yolu rahatsızlıklarını tetikleyebileceğinden insan sağlığı için risk oluşturabilir.
- Mudanya gibi kıyı bölgelerinde yaz dönemlerinde kara-deniz rüzgârları, yüksek güneş ışığı ve şehir kaynaklı emisyonlar birleştiğinde ozon oluşumu artabilir.
- 2023’te görece daha geniş bir “yüksek ozon alanı” varken, 2024’te bu alanın daraldığı ya da yoğunluğunun azaldığı düşünülebilir.
- **Meteorolojik Farklar:** Güneşlenme süresi, sıcaklık, rüzgâr yönü ve hızı, nem vb. faktörler yıllar arasında değişerek ozon konsantrasyonlarını ciddi ölçüde etkiler.

Şekil 17’de SO<sub>2</sub>’nin 2023 yılı ve 2024 yılı için oluşturulan dağılım haritaları görülmektedir.



2023



2024

Şekil 17. SO<sub>2</sub> dağılım haritaları

- SO<sub>2</sub> emisyonu kaynaklarının (örneğin gemi trafiği, liman faaliyetleri, konut ısınması veya sanayi) olduğu ve meteorolojik koşulların (rüzgâr yönü, hız, inversiyon vb.) kirliliği orada biriktirdiği bir bölgeyi işaret ediyor olabilir.
- Kıyı bölgelerinde rüzgârın karadan denize doğru esmesi veya deniz-kara meltemi, emisyonların deniz üzerinde veya kıyı hattında yoğunlaşmasına sebep olabilir.
- 2024 yılında, sarı-turuncu alanın daha geniş bir bölgeye yayılmış olduğu veya birden fazla “hotspot” şeklinde (örneğin ortada ve sağ alt kısımda) belirdiği göze çarpıyor.
- Bu durum, SO<sub>2</sub> emisyonlarının tek bir noktada toplanmak yerine farklı konumlarda ya da daha geniş bir alana yayılmış olduğunu gösterebilir.
- Eğer renk skalası ve ölçüm/ modelleme yöntemi aynı ise, 2024’te Mudanya sahil şeridinde SO<sub>2</sub>’nin dağılımında daha farklı bir yapı ya da potansiyel olarak yer yer daha yüksek değerler söz konusu olabilir.
- **Yakıt Kaynaklı Emisyonlar:** Kükürt dioksit genellikle yüksek kükürt içeren fosil yakıtların (kömür, fuel-oil vb.) yanmasından kaynaklanır. Eğer 2024 yılında gemi trafiği, feribot veya sanayi tesislerinde kullanılan yakıt türünde değişim olduysa (daha yüksek veya düşük kükürt içeriği gibi), bu doğrudan konsantrasyon haritasına yansiyabilir.
- **Meteorolojik Koşullar:** Rüzgâr yönü ve hızındaki farklılıklar, SO<sub>2</sub>’nin dağılımını büyük ölçüde değiştirebilir. 2024’te daha değişken rüzgârlar, birden fazla bölgede birikime sebep olmuş olabilir.

## 7. Sonuç

Bu rapor, Mudanya Belediyesi’nin hava kirliliğiyle mücadeleye yönelik stratejik yaklaşımını temel alarak, 2023–2024 yılları arasında Tirilye, Halitpaşa, Ömerbey, Yenimahalle ve Eğitim semtlerinde gerçekleştirilen saatlik hava kirliliği ölçümlerini kapsamlı olarak değerlendirmiştir. Önemli veriler arasında PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> ve SO<sub>2</sub> konsantrasyonlarının mevsimsel ve bölgesel dağılımları yer almaktadır. Ölçümler, hem geleneksel gravimetrik yöntemlerle hem de airqoon firmasının geliştirdiği sensör tabanlı sistemlerle elde edilerek, verilerin doğruluğu ve tutarlılığı periyodik kalibrasyon çalışmalarıyla desteklenmiştir.

Raporun temel bulguları, özellikle kış döneminde ısınma kaynaklı emisyonların ve olumsuz meteorolojik koşulların (örneğin, hava inversiyonu ve düşük rüzgâr hızı) etkisiyle PM<sub>10</sub> ve PM<sub>2.5</sub> değerlerinde belirgin artışlar olduğunu göstermektedir. Kış aylarında bazı semtlerde ölçülen değerlerin 50 µg/m<sup>3</sup> ve 15 µg/m<sup>3</sup> gibi sınır değerleri aştığı; bu durumun, özellikle hassas gruplar (yaşlılar, çocuklar, kronik solunum yolu hastaları) için kritik sağlık riskleri oluşturduğu vurgulanmıştır.

Buna karşılık, ilkbahar ve yaz aylarında artan hava sirkülasyonu, daha az ısınma kaynaklı emisyon ve artan yağış gibi faktörler sayesinde kirlenici konsantrasyonlarında genel bir düşüş gözlemlenmiştir. Özellikle yaz döneminde, güneş ışığının etkisiyle oluşan fotokimyasal reaksiyonlar O<sub>3</sub> seviyelerinde yükselişlere neden olurken, NO<sub>2</sub> değerlerinde nispeten düşük seyreden bir trend ortaya konulmuştur.

Rapor, ölçüm istasyonlarının coğrafi konumlarına ve bölgesel özelliklerine dikkat çekerek, bölgesel farklılıkların hava kalitesi üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır. Örneğin, kıyı şeridinde rüzgârın karadan denize doğru esmesi sonucu bazı alanlarda “sıcak nokta” (hotspot) oluştuğu, emisyon kaynaklarının (trafik, sanayi, liman faaliyetleri) etkisinin bu bölgelerde daha belirgin olduğu belirtilmiştir. Bu kapsamda, elde edilen veriler ışığında alınması gereken önlemler arasında; alternatif ısınma yöntemlerinin teşvik edilmesi, daha temiz yakıt kullanımının özendirilmesi, periyodik cihaz kalibrasyonlarının sürdürülmesi ve halkın bilinçlendirilmesine yönelik farkındalık kampanyalarının yer aldığı vurgulanmaktadır.

Sonuç olarak, raporda ortaya konulan bulgular, mevsimsel dalgalanmaların ve bölgesel emisyon kaynaklarının hava kalitesinde önemli rol oynadığını, özellikle kış dönemlerinde alınacak önlemlerin hayati önem taşıdığını göstermektedir. Geleceğe yönelik öneriler, sürekli veri izleme, erken uyarı sistemleri ve yerel yönetimlerin, halk sağlığını korumak amacıyla daha etkin çevre politikaları geliştirmeleri yönünde odaklanmaktadır. Böylece, hem mevcut sorunların giderilmesi hem de sürdürülebilir çevre politikalarının oluşturulması hedeflenmektedir.

Prof.Dr. S. Sıddık CİNDORUK  
Bursa Uludağ Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi  
Çevre Mühendisliği Bölümü  
Öğretim Üyesi

## 8. Kaynaklar

Bursa Büyükşehir Belediyesi Hava Kalitesi İzleme ve Değerlendirme Projesi – Bursa Büyükşehir Belediyesi (2021).

Bursa Hava Kalitesi Değerlendirmesi Raporu – TMMOB Çevre Mühendisleri Odası Bursa Şubesi (2023).

CBS ve Hava Kalitesi Verileri Kullanılarak Marmara Bölgesinin Kış Sezonunda Hava Kalitesinin Değerlendirilmesi – *Kadir Osman Demirarslan, Hakan Akıncı* (2017).

Coğrafi Bilgi Sistemi Haritalama ile Gerçek Zamanlı Hava Kalitesi İzleme için IoT Etkin LoRa Kablosuz Sensör Ağı – *Maulana, N., & Edward, IJM* (2023). *2023 Uluslararası Bilişim, Multimedya, Siber ve Bilgi Sistemleri Konferansı (ICIMCIS)* (s. 387-392). IEEE.

Düşük Maliyetli Bir Sensör Düğümüne Dayalı Bir Hava Kirliliği İzleme Sisteminin Tasarımı – *Guerrón, RA, Carni, DL, Lanuzza, M., D'Amore, F., Bencardino, M., Lamonaca, F., & Taco, R.* (2024). *2024'te Yaşayan Çevre için Metroloji Uluslararası Çalıştayı (MetroLivEnv)* (s. 384-389). IEEE.

Düşük maliyetli sensörler ve IoT ile ince taneli hava kalitesi izleme: trendler, zorluklar ve gelecekteki yönler – *Krupp, B.* (2022). *2022'de 7. Uluslararası Akıllı ve Sürdürülebilir Teknolojiler Konferansı (SpliTech)* (s. 1-6). IEEE.

Gelişmekte Olan Ülkelerde Hava Kalitesi İzleme İçin Düşük Maliyetli Bir IoT Mobil Sistemi, El Salvador'da Bir Çalışma Örneği – *Flores-Cortez, OO, Jimenez, CP, Arévalo, F., López, RL, Martínez, DP, & Rafael, OP* (2023). *2023'te Akıllı Uygulamalar, İletişim ve Ağlar (SmartNets) Uluslararası Konferansı* (s. 1-8). IEEE.

Hava Kalitesi İndeksi (HKİ) – TC Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (ty).

Hava Kalitesi İzleme Sistemi – *T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı*.

Hava Kalitesi İzleme Teknolojilerinin Gelişimi – *Emily Johnson* (2019).

Hava Kalitesi Kirleticileri – TC Çevre, Şehircilik ve İklim Bakanlığı Bakanlığı (ty).

Hava Kalitesi Parametrelerinin Tahmini ve Mekânsal Dağılımı İçin Makine Öğrenmesi Yöntemlerinin Kullanılması – *Yeşim Dokuz, Aslı Bozdağ, Öznur Begüm Gökçek* (2020).

Hava Kalitesi Yönetiminde Politika ve Stratejiler – *Robert Green* (2021). Bu çalışma, hava kalitesi yönetiminde kullanılan politika ve stratejileri analiz etmektedir.

Hava Kalitesinin İyileştirilmesi İnsanların Sağlığını İyileştirir, Üretkenliğini Artırır – *Avrupa Çevre Ajansı* (2021).

Hava Kirliliği Kaynaklarının Belirlenmesi: Kimyasal İzleme Yöntemleri – *Sarah Lee* (2017).

"Hava Kirliliği ve Sağlık: Güncel Yaklaşımlar" – *Dünya Sağlık Örgütü* (2020).

Hava Kirliliğinin Sağlık Etkileri – *Health and Environment Alliance* (2022). Bu bilgi notu, hava kirliliğinin halk sağlığı üzerindeki etkilerini ve alınabilecek önlemleri tartışmaktadır.

IOT Tabanlı Ortam Sistemi Kullanılarak Hava Kalitesinin Gerçek Zamanlı İzlenmesi – Hashim, H., Hazwan, MN, Saad, PSM, & Harun, Z. (2023). 19. IEEE Sinyal İşleme ve Uygulamaları Uluslararası Sempozyumu (CSPA) (s. 54-58). IEEE.

Kentsel Alanlarda Hava Kalitesi Modellenmesi ve Tahmini – *John Doe, Jane Smith* (2018).

Niğde İli Temiz Hava Eylem Planı – TC Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (2020).

Partikül Madde ve Sağlık: Epidemiyolojik Bulgular – *Michael Brown* (2020).

Türkiye Ormanlarında Hava Kirliliği ve Orman Koruma Üzerine Etkileri – Karadeniz Teknik Üniversitesi Orman Fakültesi (ty).

Türkiye'de Seçilen Hava Kalitesi İzleme İstasyonları için Eğilim (Trend) Değerlendirmeleri – *Eyüp Şişman* (2019).

Ulusal Hava Kalitesi Gözlemleri Bağlamında Türkiye'de Hava Kirliliğinin Yerel Durum ve Eğilim Görünümlerinin Belirlenmesi – *Abdulvahap Dikmen* (2019).

Yapay Zekâ Tabanlı Hava Kalitesi İyileştirme Stratejilerinin Değerlendirilmesi – *Tuğçe Pekdoğan* (2023).