



İstanbul'da Kentsel Arka Planda Atmosferik Siyah Karbon Konsantrasyon Değişiminin Değerlendirilmesi

Zehra ÇOLAK^{1*} Burcu ONAT¹ Melike Servin COŞGUN¹ Burcu UZUN AYVAZ¹ Coşkun AYVAZ¹
S. Levent KUZU² Elif YAVUZ³ Hilal ÇETİN² Zeynep FİDAN² Ülkü ALVER ŞAHİN¹

¹İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

²İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

³Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Received: 04.10.2024

Accepted: 04.12.2024

Published: 31.12.2024

Atıf yapmak için: Çolak, Z., Onat, B., Coşgun, M.S., Uzun Ayvaz, B., Ayvaz, C., Kuzu, S.L., Yavuz, E., Çetin, H., Fidan, Z. & Alver Şahin, Ü. (2024). İstanbul'da kentsel arka planda atmosferik siyah karbon konsantrasyon değişiminin değerlendirilmesi. *J. Anatolian Env. and Anim. Sciences*, 9(4), 648-659. <https://doi.org/10.35229/jaes.1561066>

How to cite: Çolak, Z., Onat, B., Coşgun, M.S., Uzun Ayvaz, B., Ayvaz, C., Kuzu, S.L., Yavuz, E., Çetin, H., Fidan, Z. & Alver Şahin, Ü. (2024). Assessment of Atmospheric Black Carbon Concentration Change in Urban Background in Istanbul. *Anadolu Çev. ve Hay. Dergisi*, 9(4), 648-659. <https://doi.org/10.35229/jaes.1561066>

* <https://orcid.org/0000-0002-2726-4255>
<https://orcid.org/0000-0002-3036-2809>
<https://orcid.org/0009-0007-0333-4582>
<https://orcid.org/0000-0002-0228-5674>
<https://orcid.org/0000-0003-0052-0842>
<https://orcid.org/0000-0002-2251-3400>
<https://orcid.org/0000-0001-8690-8092>
<https://orcid.org/0009-0007-6331-1956>
<https://orcid.org/0009-0003-4081-9563>
<https://orcid.org/0000-0002-1075-707X>

*Corresponding author's:

Zehra ÇOLAK

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik
Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü,
İstanbul, Türkiye

✉: colakzhr@gmail.com

Öz: Siyah karbon (Black Carbon, BC), eksik bir yanma ürünüdür ve ince partikül madde bileşeni olup solunduğunda insan sağlığı için zararlıdır. Ayrıca BC iklim değişikliğinde kısa ömürlü iklim zorlayıcısı (short lived climate force) olarak tanımlanmakta ve CO₂'den sonra önemli bir ısı tutma etkisine sahiptir. Dünyanın diğer kentlerinde atmosferik BC konsantrasyon değişimi oldukça yaygın çalışılmışken, Türkiye'de sadece İstanbul'da kısıtlı sayıda ve sadece trafik alanlarında çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmada, İstanbul'da ilk kez yarı kent arka planı bir alanda BC'nin değişimleri ve diğer parametrelerle ilişkisi mevsimsel olarak incelenmiştir. BC ölçümleri tek dalga boyunda (880 nm) tek kanallı AE51 aethalometre ile yapılmıştır. Mevsimsel ortalama BC konsantrasyon değişimleri yaz, sonbahar, kış ve ilkbahar mevsimlerinde gerçekleştirilmiş örnekleme dönemlerinde sırasıyla $1,97 \pm 3,10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1,77 \pm 2,36 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $3,33 \pm 4,29 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $3,22 \pm 3,25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ olarak ölçülmüştür. En yüksek konsantrasyon kış mevsiminde gerçekleştirilen örnekleme döneminde gözlenmiştir. BC ile partikül madde ve trafik ile ilgili kirleticiler (NO_x gibi) arasında pozitif yüksek korelasyonlar olduğu tespit edilmiştir. BC'nin gün içi saatlik değişimleri incelendiğinde trafiğin yoğun olduğu sabah ve akşam saatlerinde İstanbul trafiğinin bölgesel emisyonlara katkısı olduğu görülmüştür. Rüzgâr hızı, PBLH gibi meteorolojik parametrelerin ve mevsimsel konsantrasyon üzerinde önemli bir etkisi olduğu ve trafik kaynağının kentsel arka plan bölgesinde her mevsim önemli bir BC kaynağı olduğu söylenebilir. Kentsel ortamlarda BC'nin mekânsal dağılımının anlaşılması için uzun süreli mevsimsel farklar ortaya konulmasını ve hem sabit hem mobil ölçümlerle izlenmesini tavsiye ediyoruz.

Keywords: Siyah karbon, İstanbul, kentsel arka plan.

Assessment Of Atmospheric Black Carbon Concentration Change In Urban Background In Istanbul

Abstract: Black carbon (BC) is an incomplete combustion product and a component of fine particulate matter that is harmful to human health when inhaled. BC is also identified as a short lived climate forcing in climate change and has a significant heat-trapping effect after CO₂. While atmospheric BC concentration changes have been widely studied in other cities of the world, there are only a limited number of studies in traffic areas in Istanbul, Turkey. In this study, for the first time in Istanbul, the seasonal variations of BC in the urban background and its relationship with other parameters were investigated seasonally. Seasonal mean BC concentration changes were measured as $1,97 \pm 3,10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1,77 \pm 2,36 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $3,33 \pm 4,29 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $3,22 \pm 3,25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in summer, autumn, winter and spring, respectively. The highest concentration was observed in winter. There were high positive correlations between BC and particulate matter and traffic-related pollutants (such as NO_x). When the hourly variations of BC during the day were analyzed, it was seen that Istanbul traffic contributed to regional emissions in the morning and evening hours when the traffic was heavy. It can be said that meteorological parameters such as wind

***Sorumlu yazar:**

Zehra ÇOLAK

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa,
Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği

Bölümü, Avcılar, İstanbul, Türkiye

✉: colakzhr@gmail.com

speed, PBLH and seasonal concentrations have a significant effect on BC concentrations and that the traffic source is an important source of BC in the urban background region in all seasons. In order to understand the spatial distribution of BC in urban environments, we recommend that long-term seasonal differences should be demonstrated and monitored with both fixed and mobile measurements.

Anahtar kelimeler: Black carbon, Istanbul, urban background.

GİRİŞ

Siyah karbon (Black Carbon, BC), fosil ve biyoyakıtların yanması sonucu oluşan yanmamış karbonu temsil eden bir kirleticidir. Ayrıca kurum (soot)'un ışık emici özelliği ölçüldüğünde "siyah karbon" (BC) olarak adlandırılırken, termal-optik tekniklerle ölçüldüğünde "elemental karbon" (EC) olarak adlandırılmaktadır (Viana vd. 2012). Bu iki parametre arasında genelde iyi bir korelasyon olduğu belirtilirken (Ahmed vd., 2009) bazı çalışmalarda BC'nin EC'ye göre 1.5-2 kat daha yüksek ölçüldüğü sonucuna ulaşılan çalışmalarda mevcuttur (Watson vd. 2005; Ozdemir vd. 2014).

BC endüstriyel faaliyetler, taşıt emisyonları ve orman yangınları gibi kaynaklardan atmosfere yayılır (Mao vd., 2023). BC atmosferdeki görünür ışığı güçlü bir şekilde absorbe ederek atmosferi ısıtabilir ve bu da iklim üzerinde pozitif ısınım etkisine neden olur (Myhre & Samset, 2015). BC, CO₂'den sonra sera etkisine en fazla katkıda bulunan ikinci kirletici olarak kabul edilmektedir (Bond vd., 2013). BC'nin atmosferik ömrü bölgesel ve zamansal farklılıklara göre değişmekle birlikte yaklaşık bir-iki haftadır (Cape vd., 2012; Ramanathan & Carmichael, 2008). Bu nedenle BC, Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'nin altıncı değerlendirme raporunda kısa ömürlü iklim zorlayıcısı olarak da adlandırılır (IPCC, 2019).

BC'nin optik özellikleri ve atmosferik ısınmadaki rolü aerosolün organik madde içeriği, yaşlanma süreci, higroskopik özelliklerine göre değişkenlik gösterir (Ma vd., 2020; Wang vd., 2020; Zeng vd., 2019). BC partiküllerinin karla kaplı yüzeylerde birikmesi albedoyu azaltarak güneş radyasyonunun daha fazla emilmesine ve dolayısıyla sıcaklık artışına yol açar (Beres vd., 2020) ve kar erimesini hızlandırır. Bu etki, kutup ve dağlık bölgelerde, kar ve buzun atmosferik sıcaklıklarda önemli bir rol oynadığı yerlerde daha belirgindir. Ayrıca BC, aerosollerin bulut damlacığı oluşturma potansiyelini arttırmaktadır (Motos vd., 2019).

BC, iklim değişikliğini etkilemesinin yanı sıra ince partikül maddenin önemli bir bileşeni (Klimont vd., 2017) olmasından dolayı kısa ve uzun süreli maruziyetinde insan sağlığı üzerinde olumsuz etkisi bulunmaktadır. BC'nin solunum morbiditesi ve mortalitesi ile ilişkilendirildiği, akciğer fonksiyonlarını azalttığı, yaşlılarda ventriküller aritmi riskini artırdığı ve hem çocuklarda hem de yaşlılarda bilişsel fonksiyonları azalttığı (Nguyen & Roper, 2024), solunum ve kardiyovasküler hastalık sorunlarına yol

açabilen toksik bir bileşen olduğu (Abdillah & Wang, 2023), uzun vadeli BC maruziyetinin doğal ölüm ve kardiyovasküler hastalıklarla ilişkili olabileceği (Nilsson Sommar vd., 2021), prematüre ölüm ve solunum ile kardiyovasküler hastalıkların artışına neden olduğu (Gu vd., 2020), ve ayrıca kanser riskine önemli bir katkı sağladığı (Hu vd., 2021) yapılan çalışmalarda belirtilmiştir.

BC tüm bu iklim değişikliği ve sağlık üzerindeki etkileri nedeni ile son yıllarda üzerinde oldukça yoğun şekilde çalışılan bir kirletici parametredir. Yapılan çalışmaların çoğu BC'nin farklı bölgelerde konsantrasyonunun zamansal değişimi, meteorolojik faktörlerin etkisi ve kaynaklarının belirlenmesi konularında olduğu görülmektedir. Tüm bu çalışmalar neticesinde Dünya Sağlık Örgütü (WHO) ve Avrupa Birliği BC'nin önemli bir atmosferik kirletici parametre olduğunu belirtmiş ve 2030 ve sonrasında sınır değerlerinin tanımlanarak kentsel alanlarda izlenmesini tavsiye etmiştir (Ritz vd., 2019). Ayrıca IPCC; kısa ömürlü iklim zorlayıcı bir (short lived climate forces, SLCFs) parametre olarak BC'yi tanımlamakta ve ulusal envanterlerde SLCFs'lerin hesaplanması için metodoloji geliştirme çalışmalarını yürütmektedir (IPCC, 2019).

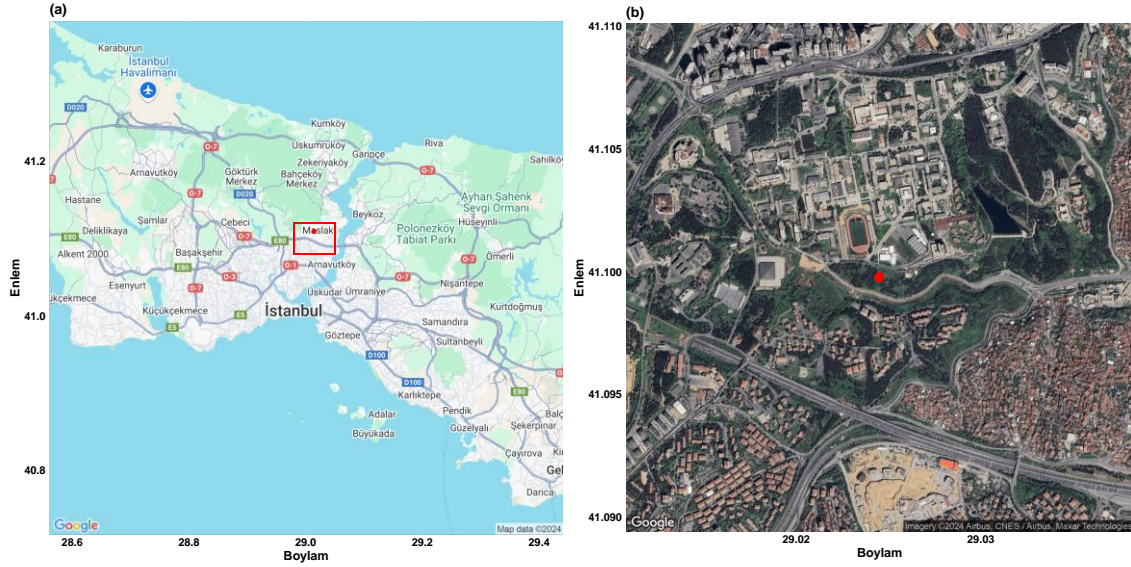
Türkiye'de atmosferik BC konsantrasyonlarının belirlenmesine yönelik yapılan oldukça kısıtlı sayıda çalışma mevcuttur ve bu çalışmalarda İstanbul'da trafik kaynaklı kirliliğin temsil edildiği alanlardadır (Kuzu vd., 2020; Ozdemir vd., 2014; Şahin vd., 2020). Bu çalışma kapsamında Türkiye'de ve İstanbul'da ilk kez yarı kentsel arka planı olan bir bölgede BC'nin dört mevsimde gerçekleştirilen örnekleme dönemlerini temsilen dakikalık ortalama ölçümleri yapılmış ve zamansal değişimleri, diğer kirleticilerle ve meteorolojik değişkenlerle ilişkisi incelenmiştir.

MATERYAL VE METOT

Çalışma Alanı: İstanbul 16 milyonluk nüfusuyla Türkiye'nin en kalabalık metropol şehridir (TÜİK, 2023). Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (ÇŞİDB) ve İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB) bünyesinde toplam 39 tane olmak üzere sürekli Hava Kalitesi İzleme İstasyonu (HKİİ) bulunmaktadır. Bu istasyonların teknik bilgileri ve hava kirliliği tespitlerine dair zamansal ve mekânsal detaylı analizler Şahin vd. (2024) makalesinde ayrıntılı olarak verilmiştir. Bu çalışma kapsamında BC ölçümleri İstanbul'un kuzeyinde yer alan Maslak ilçesinde bulunan

İstanbul Teknik Üniversitesi Kampüsünde (41°5'59.17"N, 29°1'28.19"E) kurulmuş olan yarı kentsel arka plan istasyonunda yapılmıştır. Üniversite yerleşke alanında ormanlık ve yeşil alanlar, eğitim amaçlı kullanılan binalar ve

personel lojmanları bulunmaktadır. Yerleşkenin etrafında konutlar, iş ve ticaret merkezleri mevcuttur. Şekil 1'de İstanbul'daki Maslak Hava Kalitesi Ölçüm İstasyonu'nun yeri gösterilmektedir.



Şekil 1. İstanbul Maslak Bölgesi (a), Maslak ölçüm istasyonunun konumu (b).

Figure 1. Maslak District of Istanbul (a), location of Maslak measurement station (b).

Kirleticilerin Ölçümleri;

BC: Çalışmamızda BC ölçümleri taşınabilir bir aethalometer (AethLabs, ABD) olan microAeth AE51 kullanılarak yapılmıştır. Cihazın akış hızı 50 ml/dk, ölçüm sıklığı 60 sn olarak ayarlandı. Ölçüm hassasiyeti $\pm 0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ olup cihazın veri depolama özelliği bulunmaktadır. Aethalometre kuvars filtreden geçen ışık miktarını periyodik olarak ölçerek, filtre üzerindeki BC kütlesini 880 nm dalga boyunda hesaplamaktadır. BC'nin optik absorpsiyonunun en doğru ölçüldüğü dalga boyudur. Ayrıca bu dalga boyu, BC ölçümünde alandaki çalışmalar ve cihazlar arasında tutarlılık ve karşılaştırılabilirlik sağlamak için tercih edilmektedir (Zhang vd., 2023).

Aethalometre, parçacıklar toplanırken kuvars filtreden geçen ışık miktarını ölçer. Azalan ışık yoğunluğunun ölçümü filtre şeridi üzerindeki BC konsantrasyonuyla doğrusal orantılıdır. BC kütlesi formül 1'deki şekilde hesaplanır (Hansen vd., 1984), ışık zayıflaması (ATN), iletilen ışık yoğunluğunun ölçümlerinden formül 2'deki şekilde hesaplanır. Burada I_0 ve I ışık yoğunlukları sırasıyla başlangıç ve ölçüm sonrası filtre koşullarına karşılık gelmektedir. Işığın yansıma oranını değişmesine neden olan filtre koyulaşması etkisi ise Kirchstetter ve Novakov (Kirchstetter & Novakov, 2007) tarafından verilen algoritmalarla hesaplanarak gerekli düzeltmeler yapılmaktadır.

$$BC = \frac{ATN}{\sigma} \quad 1$$

$$ATN = 100 \times \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad 2$$

BC ölçüm cihazı kapalı bir kutu içine örnek başlığı dışarda olacak şekilde kurulup Maslak ölçüm istasyonunun üzerine, yerden yaklaşık 3 metre yüksekliğe yerleştirilmiştir. Mevsimsel örneklemenin gerçekleştirilmesi için yaz mevsiminde 21 gün (21 Temmuz -29 Ağustos 2023), sonbahar mevsiminde 19 gün (08-28 Eylül 2023), kış mevsiminde 14 gün, (15 Şubat-29 Şubat 2024) ve ilkbahar mevsiminde 32 gün (01 Mart-04 Nisan 2024) boyunca BC ölçümleri yapıldı. 1 dk ortalama ölçüm kaydı ile 123840 adet konsantrasyon ölçüm verisi alınmış ve analiz edilmiştir.

Kriter kirlenici ve meteorolojik parametreler: BC ile ilişkilerini incelemek üzere Maslak istasyonunda ölçülen diğer konvansiyonel hava kirlenici parametreler ve meteorolojik parametrelere ait veriler IBB veri temini web sayfasından indirilerek alınmıştır (İHKİA, 2024). Maslak istasyonunda ölçülen parametreler: Azot oksit (NO), Azot dioksit (NO₂); Azot oksitler (NO_x), Ozon (O₃), 2,5 mikrometre çapından küçük partikül madde (PM_{2.5}), 10 mikrometre çapından küçük partikül madde (PM₁₀), kükürt dioksit (SO₂), basınç (P), sıcaklık (T), rüzgâr hızı (WS), rüzgâr yönü (WD), bağıl nem (RH) gibi meteorolojik parametreler ölçülmektedir. İstasyon verileri erişime açıktır ve ilgili siteden ölçüm alınan BC zaman aralıkları seçilerek 15 dakikalık ortalama olarak indirilmiştir. Gezegenel Sınır Tabaka Yüksekliği (Planetary Boundary Layer Height, PBLH) ölçümleri yapılmadığından, "Weather Research and Forecasting (WRF) model" (Skamarock WC, 2008) kullanılarak saatlik karışma yüksekliği verileri hesaplanmıştır. Çalışmada arazi verileri için arazi yüksekliği, arazi kullanım kategorisi, toprak kategorilerini

içeren UCAR (University Corporation of Atmospheric Research) tarafından sağlanan veri seti kullanılmıştır. Başlangıç ve sınır koşulları grib formatındaki NCEP-GFS (National Centers for Environmental Prediction-Global Forecast System) analizi seti ile oluşturulmuştur. WRF model alanı 10 km çözünürlüklü dış alan ve 3,3 km çözünürlüklü iç alan olmak üzere iç içe iki alandan oluşturulmuştur. Dış alanda 28×28 ızgara noktası, iç alanda ise 16×16 ızgara noktası bulunmaktadır. Simülasyonlarda yüzeyden 50 hPa'ya kadar 33 dikey seviye kullanılmıştır. Atmosferik sınır tabaka parametrelendirme şemaları sınır tabakasının simülasyonunda kritik bir rol oynamaktadır. Bu çalışmada, WRF modelinin performansının üç farklı gezegensel sınır katmanı şemasından Yonsei Üniversitesi (YSU) sınır tabakası şeması kullanılmıştır (Ezber & Sen, 2022). Seçilen diğer fiziksel parametrelendirmeler arasında Lin mikrofizik şeması (Lin vd., 1983), Grell 3D kümülüs şeması, birleşik Noah kara yüzey modeli, revize edilmiş MM5 Monin-Obukhov yüzey katman fiziği şeması, rrtmg uzun ve kısa dalga radyasyonu şeması yer almaktadır.

İstatistiksel Analiz: Ölçülen tüm parametrelerin konsantrasyon değerleri Excel üzerinden kontrol edildi ve anomaliler (negatif, sıfır ve tekli pik değerler) veri setinden çıkarıldı. Veri görselleştirmede R yazılımının 4.3.1 sürümü kullanıldı (R Core Team, 2023). Zamansal değişimi daha iyi anlamak için dakika, saat, günlük ve aylık ve mevsimsel grafikler ile görselleştirmeler gerçekleştirildi. Hava kirleticilerin kaydedilme süresi ortalama 15 dakikadır. Ölçüm cihazından dakikalık ortalaması alınan BC konsantrasyonlarının anlık dalgalanmalarda aşırı uç değerlerden etkilenmesini azaltmak için 15 dakikalık medyan değerleri hesaplandı ve sonraki analizlerde tüm bu değerler kullanıldı. Günün farklı saat dilimlerinde BC ile diğer parametreleri karşılaştırmak ve daha stabil bir veri seti

elde etmek amacıyla, 15 dakikalık verilerden saatlik veri seti oluşturuldu. Yüksek BC konsantrasyon seviyelerini belirlemek amacıyla belirli rüzgâr yönü ve hızına bağlı olarak iki boyutlu koşullu olasılık fonksiyonunu (the conditional probability function, CPF) kullanan istatistiksel yöntem ile kutupsal grafikler (polar plot) oluşturuldu. BC oranlarının arttığı yüksek kirliliğin taşınma yollarının daha belirgin hale geldiği durumları incelemek için veri setinde 60-95% aralığı seçildi.

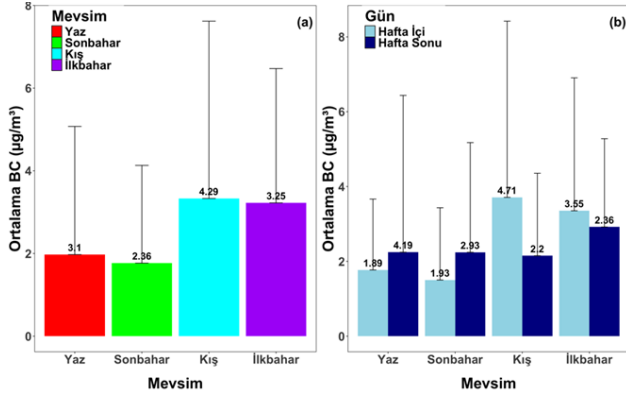
TARTIŞMA VE SONUÇ

Ölçülen BC ve aynı zaman aralığında ölçülen diğer hava kirleticiler ve meteorolojik parametrelerin mevsimsel ortalama değerleri ve standart sapma değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Türkiye Hava Kirliliği Kontrolü ve Değerlendirme Yönetimi Yönetmeliğinde (HKDYY) (HKDYY, 2008) tanımlanan yıllık sınır değerler SO_2 için $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{10} ve NO_2 için $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 'dür. Bu çalışma süresince ölçülen bu kirleticilerin ulusal yıllık sınır değerleri aşmadığı tespit edilmiştir. $PM_{2.5}$ için ise henüz ulusal bir sınır değer tanımlanmamıştır. $PM_{2.5}$ yıllık ortalama değeri $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 'dür ve bu değer Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ) tarafından 2021 yılında $PM_{2.5}$ için önerilen yıllık ortalama $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ değerinden en az 3 kat daha fazla olduğu görülmektedir. Şahin vd., (2024) tarafından yapılan ve İstanbul'un 7 yıllık dönemde hava kalitesinin değişiminin incelendiği çalışmada Maslak kentsel arka plan istasyonundaki ortalama konsantrasyonlar PM_{10} için $33,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, NO_2 için $30,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, SO_2 için $2,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ve $PM_{2.5}$ için $18,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ hesaplanmıştır (Şahin vd., 2024). Bu çalışma sürecinde yapılan ölçümlerin Maslak hava kalitesi istasyonunun genel eğilimi ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Table 1. Kirleticilerin mevsimsel örnekleme dönemi ortalama ve standart sapma değerleri T: sıcaklık, RH: Relatif Nem, P: Basınç, WS: Rüzgâr hızı, PBLH: Karışma Yüksekliği.

Table 1. Seasonal mean and standard deviation values of pollutants T: temperature, RH: Relative Humidity, P: Pressure, WS: Wind speed, PBLH: Mixing Height.

Parametreler	Mevsimsel örnekleme dönemi ortalamaları				Ortalama	
	Yaz	Sonbahar	Kış	İlkbahar		
Hava kirleticileri ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	BC	1,91 ± 3,15	1,78 ± 2,4	3,33 ± 3,69	3,22 ± 3,26	2,61 ± 3,31
	PM_{10}	24,17 ± 18,55	21,37 ± 16,32	31,43 ± 20,30	35,79 ± 24,3	28,68 ± 21,36
	$PM_{2.5}$	14,60 ± 10,42	12,23 ± 7,26	18,30 ± 10,81	20,01 ± 10,7	16,34 ± 10,48
	NO	22,10 ± 25,66	15,29 ± 21,54	27,00 ± 47,60	28,59 ± 45,39	23,90 ± 39,07
	NO_2	17,20 ± 13,17	27,62 ± 21,89	43,09 ± 26,95	43,86 ± 24,83	33,80 ± 25,79
	NO_x	50,74 ± 48,85	51,02 ± 49,04	84,49 ± 91,74	87,72 ± 86,65	70,35 ± 77,41
	O_3	40,54 ± 11,78	39,20 ± 15,16	36,30 ± 25,47	36,22 ± 27,37	37,67 ± 21,31
	SO_2	2,20 ± 0,78	2,20 ± 1,62	6,21 ± 7,38	5,50 ± 4,04	4,36 ± 5,69
Meteorolojik Parametreler	T	25,97 ± 3,66	21,94 ± 2,81	8,96 ± 4,06	10,00 ± 4,72	16,30 ± 8,37
	RH	68,81 ± 17,05	51,52 ± 8,96	64,33 ± 12,45	63,21 ± 12,28	62,45 ± 15,04
	P	1001,41 ± 3,33	1016,89 ± 1,16	1016,34 ± 4,54	1015,90 ± 4,42	1011,78 ± 7,94
	WS	2,53 ± 1,56	2,48 ± 1,61	2,58 ± 1,71	2,53 ± 1,74	2,51 ± 1,66
	PBLH	545,44 ± 364,97	752,3 ± 428,47	383,37 ± 306,04	387,02 ± 335,06	497,01 ± 382,39



Şekil 2. İstanbul Maslak Hava Kalitesi Ölçüm İstasyonunda kaydedilen mevsimsel ortalama BC konsantrasyon değerleri (a) ve mevsimsel olarak hafta içi ve hafta sonu günlerinde ortalama BC değişimi (b).

Figure 2. Seasonal average BC concentration values recorded at Istanbul Maslak Air Quality Measurement Station (a) and seasonal average BC variation on weekdays and weekend days (b).

BC'nin ölçüm sürecindeki genel yıllık ortalaması $2,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ olarak ölçülmüş ve en yüksek ortalama değeri $3,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ile kış mevsiminde gerçekleştirilmiş örnekleme döneminde, en düşük ortalama değeri ise $1,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ile yaz mevsiminde gerçekleştirilmiş örnekleme döneminde tespit edilmiştir (Tablo 1). Şekil 2'de BC'nin mevsimsel ve hafta içi/sonu ortalama ve standart sapmaları gösterilmiştir. Kış-ilkbahardaki ve yaz-sonbahardaki dönemlerinde gerçekleştirilmiş örnekleme BC ortalamaları birbirine oldukça yakın iken hava sıcaklığının düşük olduğu kış-ilkbahar ($8,2$ ve $10,1^\circ\text{C}$) dönemlerinde gerçekleştirilmiş örnekleme, sıcaklığın yüksek olduğu yaz-sonbahar ($25,9$ ve $21,9^\circ\text{C}$) dönemlerinde gerçekleştirilmiş örnekleme BC ortalamalarından yaklaşık $1,8$ kat daha yüksektir. BC'nin atmosferdeki konsantrasyonunun temel nedeni fosil yakıtların yanması iken çoğu zamanda BC konsantrasyonu sıcaklığın atmosferdeki karışım süreçlerine etkisiyle doğrudan bağlantılı olabilmektedir. Yazın yüksek sıcaklıklarda daha iyi karışım ve taşınım, BC'nin atmosferde daha geniş alanlara yayılmasına neden olabilir, düşük sıcaklıklar ise BC birikimini artırabilir (Glojek vd., 2022).

BC'nin kentsel ve trafik alanlarında izlenmesine yönelik literatürde birçok çalışma mevcuttur. Ancak bu çalışmaya benzer alanlarda (kent arka planı veya yarı kentsel alanlar) yapılan çalışmalar kısıtlıdır. Bu çalışmalar incelendiğinde BC ortalama konsantrasyonlarının mevsimsel değişime bağlı olarak Hindistan Nagpur'da $2,3$ ile $4,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aralığında (Kant vd., 2020), Hindistan Delhi'de $5,0$ ile $14,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aralığında (Şahin vd. 2022), Yunanistan Atina'da $1,3$ ile $3,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aralığında (Liakakou vd., 2020), Almanya'da $1,9$ ile $2,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aralığında (Kutzner vd., 2018), Taylan'da $14,5$ ile $29,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aralığında (Srithawirat vd., 2021) ve Litvanya Vilnius'ta $0,5$ ile $1,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aralığında (Pashneva vd., 2024) tespit edilmiştir. Bu çalışma kapsamında ölçülen BC değişim aralığı ($1,9$ - $3,3$) Atina ve Almanya kentsel arka

planında yapılan ölçümlerle benzerlik gösterirken, Hindistan ve Tayvan'dan daha düşük değerler almakta ve Litvanya'dan ise daha yüksek bir BC konsantrasyonunun ölçüldüğü görülmektedir. Genel olarak bu çalışma bulgularıyla da benzer şekilde tüm kentsel arka planlarda ölçülen BC konsantrasyonlarının kentsel ve trafik alanlarından önemli düzeyde daha düşük olduğu ancak buna karşın BC'nin gün içinde belirgin trafik piklerini (sabah, akşam) sergilediği, öğle saatlerinde minimum seviyelere ulaştığı ve kış mevsiminde ısınmaya bağlı biyokütle yakımı sebebiyle daha yüksek konsantrasyonlar oluştuğu belirtilmektedir. BC'nin atmosferdeki dağılımı hakkındaki araştırmalar; kaynak çeşitliliği, farklı topografya yapısı, atmosferik taşınımların etkisi, sınır tabaka dinamikleri ve meteorolojik koşulların etkisinden dolayı oldukça değişkenlik göstermektedir ve her kentte izlenmesi bir gerekliliktir.

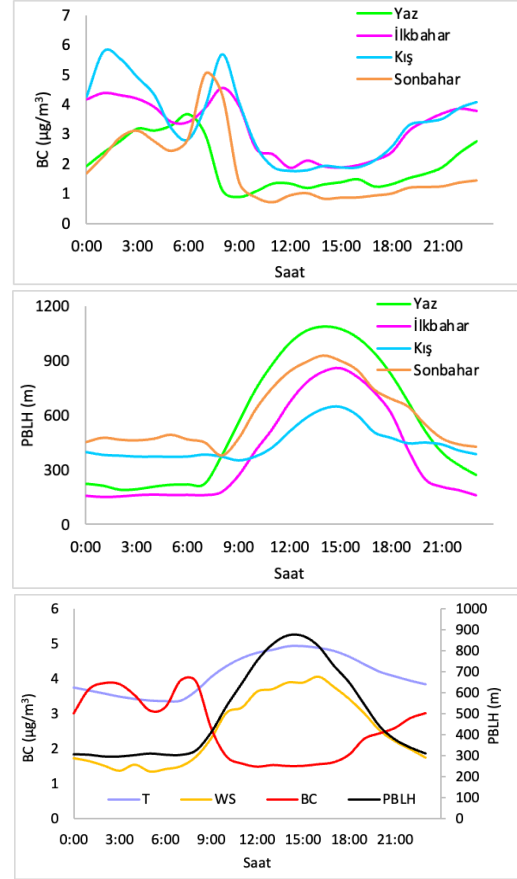
İstanbul'da atmosferik BC konsantrasyonları konusunda yapılmış üç çalışma bulunmaktadır. Ancak tüm çalışmalar farklı özelliklerde de olsa trafik yanı alanlarda yapılmıştır. Özdemir vd.,(2014) tarafından yapılan çalışmada İstanbul Beşiktaş'ta seçilen 4 trafik yanı alanında ölçümler alınmış bunlardan sadece 1 tanesinde bir yıl süreyle ölçüm yapılırken diğer noktalarda sadece 18 gün ilkbaharda ölçüm yapılmıştır. Bir başka çalışmada (Şahin vd., 2020) ise yine trafik yanı bir istasyon olan Aksaray'da bir yıllık BC ölçümleri yapılmıştır. Kuzu vd., (2020) tarafından ise 10 ay süreyle Esenler ilçesinde bulunan ve etrafı yoğun yerleşimle çevrili Yıldız Teknik Üniversitesi Davutpaşa yerleşkesinde BC ölçümleri yapılmıştır (Kuzu vd., 2020). Bu çalışmalarda trafik yakını alanlar olan Beşiktaş ve Aksaray'da sırasıyla ortalama BC değerleri $12,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Ozdemir vd., 2014) ve $6,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Şahin vd., 2020) olarak tespit edilmiştir. Kentsel alan olan Esenlerde ise ortalama BC konsantrasyonu $2,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Kuzu vd., 2020) olarak ölçülmüş olup bu çalışmada İTÜ Maslak yerleşkesinde ölçtüğümüz ortalama BC konsantrasyonu ($2,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$) benzerlik gösterdiği görülmüştür. Türkiye'nin birçok şehrinde atmosferik ortamda günlük örneklenen partikül madde filtrelerinde elementel karbon (EC) tespitine yönelik çalışma yapılmışken (Yatkin ve Bayram, 2007; Öztürk ve Keleş, 2016; Koçak vd., 2021), İstanbul'da Flores vd. (2020) tarafından gün içinde 2 saatlik örnekleme yapılan filtrelerde EC konsantrasyonlarını bir trafik alanında izlemişlerdir ve yıllık ortalama EC değerini $4,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ olarak tespit etmişlerdir.

Havanın sıcak olduğu örnekleme döneminde (yaz ve ilkbahar) hafta sonu ölçülen ortalama BC konsantrasyonu hafta içi konsantrasyonuna göre % 24 daha fazla olurken, soğuk olduğu örnekleme döneminde (sonbahar ve kış) hafta içi konsantrasyonu hafta sonu konsantrasyonundan yaklaşık % 46 daha fazla olduğu

belirlenmiştir. İstanbul'daki trafik yoğunluğunun BC seviyeleri üzerindeki etkilerinin detaylı incelendiği bir çalışmada hafta içi ve sonu BC değerleri oldukça yakın olup $6,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ve $6,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ olarak tespit edilmiştir (Şahin vd., 2020). Kaynağın çok yakınında yapılan bu ölçümlerde BC mevsimlere ve hafta sonu ve hafta içine göre anlamlı değişimler göstermezken, bu çalışmamızda olduğu gibi kaynaktan uzaklaştıkça ve kentsel arka plan özelliği gösteren alanlarda doğrudan kaynaktan etkilenmeyen ancak tüm kentin dağılan atmosferik koşulları temsil edildiği, dolayısıyla kışın daha çok yanma kaynağının (ısınma) etkili olduğu ve buna bağlı olarak da BC'nin baskın olduğu söylenebilir. Bazı çalışmalarda ise haftanın farklı günlerindeki antropojenik faaliyetlerin hafta içi ve hafta sonu konsantrasyonlarına etki gösterdiği vurgulanmaktadır (Suresh Kumar Reddy vd., 2012). Bu çalışmadaki sıcak havanın olduğu yaz dönemlerinde BC'nin hafta sonu daha yüksek olmasının temel sebebi İstanbul'un turistik bir şehir olması ve hafta sonu ve içi trafiğin her zaman yoğunluk göstermesi olduğu düşünülmektedir.

Kirleticilerin günlük değişimleri, yerel antropojenik faaliyetlerin ve mezo ölçekli atmosferik süreçlerin rolünü etkili bir şekilde yansıtabilmektedir (Suresh Kumar Reddy vd., 2012; Zhou vd., 2018). BC konsantrasyonu, PBHL'nin her mevsim için gün içi saatlik değişimi mevsimsel olarak Şekil 3a ve 3b'de verilmiştir. Ayrıca Şekil 3c'de tüm yıllık ortalama gün içi saatlik BC değişiminin rüzgâr hızı, sıcaklık ve PBHL ile değişimi gösterilmiştir. Genel olarak tüm mevsimlerde sabah saatlerinde BC konsantrasyonu hızla yükselmekte, öğle saatlerinde düşmekte ve akşam saatlerinde ise tekrar artış göstermektedir (Şekil 3a). İstanbul'da gün içi saatlerinde trafik akışı değişimi sabah saatlerinde artış gösterip gün içinde çok az azalma gösterip gece saatlerinde önemli bir azalma göstermektedir (Şahin vd., 2024). Tipik sabah akşam trafiğe bağlı BC piklerinin oluşumu Şekil 3a'da görülürken atmosferik koşulların (gün ortasında rüzgâr hızında, PBHL'de ve sıcaklıkta artış) etkisi ile gün ortasında BC konsantrasyonunda (Şekil 3c) azalma görülmektedir. Yapılan çalışmalarda PBHL'nin BC konsantrasyonlarının gün içindeki saatlere göre dağılımını etkileyebileceği (Liang vd., 2013; Şahin vd., 2020) belirtilmektedir ve Şekil 3'de görüleceği gibi gün ortasında PBLH değerleri yüksek, BC değerleri buna bağlı olarak düşüktür. Kış mevsimi örnekleme dönemi saatlik ortalama BC seviyeleri en yüksek iken yaz mevsimi örnekleme döneminde en düşük seviyelerdedir. Metropol alanda fosil yakıtların BC'un ana kaynağı olduğu, kış mevsiminde biyokütle yakmanın BC konsantrasyonlarını arttırdığı (Luoma vd., 2021), evsel ısınma emisyonlarının artmasının (Liakakou vd., 2020a) önemli bir BC artış sebebi olduğu yapılan çalışmalarla tespit edilmiştir. Bu çalışmada da hava

sıcaklığının 10°C 'nin altına düştüğü gece saatlerinde sıcak dönemlere kıyasla neredeyse 3 kata yakın bir BC artışı olduğu görülmektedir. Buna karşın İstanbul'da trafik yakını bir alanda yapılan EC izleme çalışmasında ise EC'nin trafik alanında mevsimsel bir değişim göstermediği sonucuna varılmıştır (Flores vd. 2020).

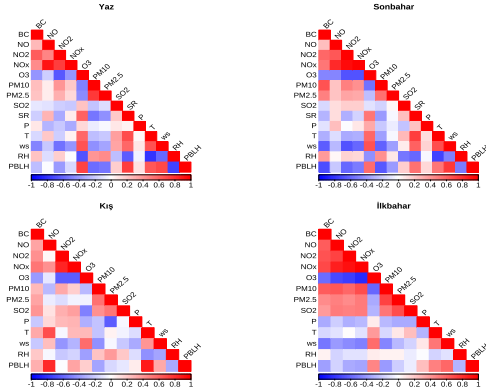


Şekil 3. İstanbul Maslak Hava Kalitesi Ölçüm İstasyonunda kaydedilen BC (sol üst) ve PBLH (sağ üst) değerlerinin ölçüm dönemi ortalamalarına göre mevsimsel gün içi saatlik değişimi ve BC, PBHL, Sıcaklık ve Rüzgâr Hızının genel ortalama gün içi saatlik değişimi (alt).

Figure 3. Seasonal intraday hourly changes of BC (top left) and PBLH (top right) values recorded at the Istanbul Maslak Air Quality Measurement Station according to the measurement period averages and the general average intraday hourly changes of BC, PBHL, Temperature and Wind Speed (bottom).

BC'nin mevsimsel, meteorolojik, konumsal olarak dağılımının nasıl değiştiğine odaklanan çalışmalar; mevsimsel farklılıklar ve meteorolojik koşullardan kaynaklı farklı hava şartları yağış gibi süreçlerin günlük ortalama BC değerlerini değiştireceği (Williams vd., 2019) metropol alanda fosil yakıtların BC'nin ana kaynağı olduğunu, kış mevsiminde biyokütle yakmanın BC konsantrasyonlarını arttırdığını (Luoma vd., 2021) evsel ısınma emisyonlarının artması (Liakakou vd., 2020b), düşük rüzgâr hızının BC konsantrasyonlarını arttırdığı ayrıca trafik yoğunluğunun BC salınımı etkileyebileceği (Jereb vd., 2021), yağışın BC'yi atmosferden uzaklaştırmada etkili bir yol olduğu (Barrett vd., 2019), PBLH'nin BC konsantrasyonlarının gün içindeki saatlere göre dağılımını etkileyebileceği (Ran vd., 2016) yaz aylarında ise düşük

BC konsantrasyonlarının dikey karışma yükseklik değişimlerinden etkilenebileceği (Dumka vd., 2019) belirtilmektedir.



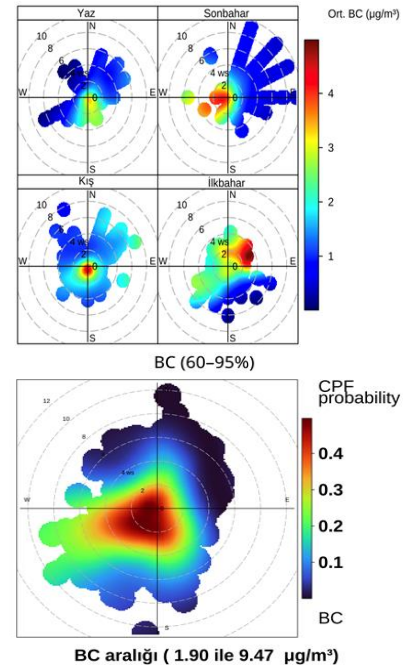
Şekil 4. İstanbul Maslak Hava Kalitesi Ölçüm İstasyonunda kaydedilen tüm parametreler arasındaki korelasyon seviyeleri. (Mavi renkler negatif korelasyonları kırmızı renkler pozitif korelasyonları ve renklerin koyulaşması korelasyonun kuvvetinin artışı göstermektedir).

Figure 4. Correlation levels between all parameters recorded at İstanbul Maslak Air Quality Measurement Station. (Blue colors indicate negative correlations, red colors indicate positive correlations and darker colors indicate an increase in the strength of the correlation).

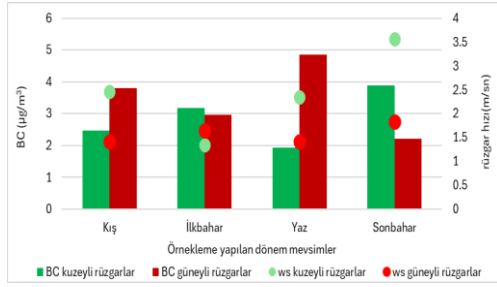
BC ölçümleri sırasında eş zamanlı yapılan diğer parametreler ile BC arasındaki korelasyon seviyesi Şekil 4'te verilmiştir. BC ile NO arasındaki ilişki örneklem dönemleri ortalama kış ($r = 0,36, p < 0,001$); yaz ($r = 0,27, p < 0,001$); sonbahar ($r = 0,25, p < 0,001$) mevsimlerinde zayıfken, ilkbaharda ($r = 0,64, p < 0,001$) bu korelasyon daha güçlüdür. BC ile NO₂ arasında kışın ($r = 0,43, p < 0,001$) orta düzeyde, ilkbahar ($r = 0,67, p < 0,001$) ve yaz ($r = 0,64, p < 0,001$) mevsimlerinde güçlü, sonbaharda ($r = 0,59, p < 0,001$) ise orta düzeyde bir ilişki bulunmaktadır. BC ile PM₁₀ arasındaki korelasyon yaz ($r = 0,25, p < 0,001$) ve kış ($r = 0,27, p < 0,001$) mevsimlerinde zayıfken ilkbahar ($r = 0,63, p < 0,001$) ve sonbahar ($r = 0,67, p < 0,001$) mevsimlerinde güçlü bir korelasyon gözlemlenmiştir. BC ile PM_{2.5} arasında yaz ($r = 0,23, p < 0,001$) ve kış ($r = 0,35, p < 0,001$) mevsiminde zayıf bir ilişki varken ilkbahar ($r = 0,45, p < 0,001$) ve sonbahar ($r = 0,49, p < 0,001$) mevsimlerinde orta düzeyde bir ilişki gözlemlenmiştir. BC ile O₃ arasında kışın ($r = -0,38, p < 0,001$) zayıf bir negatif ilişki, ilkbahar ($r = -0,56, p < 0,001$); yaz ($r = -0,40, p < 0,001$); sonbahar ($r = -0,48, p < 0,001$) mevsiminde orta düzeyde negatif bir ilişki bulunmuştur. BC ile SO₂ arasında kışın ($r = 0,42, p < 0,001$) orta düzeyde, ilkbaharda ($r = 0,40, p < 0,001$) zayıf, yaz ($r = -0,08, p = 0,087$) ve sonbahar ($r = -0,16, p < 0,01$) mevsimlerinde ise çok zayıf negatif bir ilişki bulunmuştur. BC ile WS arasında kışın ($r = -0,21, p < 0,001$) zayıf bir negatif, ilkbahar ($r = -0,53, p < 0,001$) ve yaz ($r = -0,47, p < 0,001$) mevsiminde orta düzeyde negatif, sonbaharda ($r = -0,64, p < 0,001$) ise güçlü bir negatif korelasyon ilişkisi bulunmuştur. BC ile T arasında kışın ($r = 0,32, p = 0,949$) zayıf, ilkbahar ($r = -0,15, p < 0,001$) ve yaz ($r = -0,15, p <$

0,01) mevsimlerinde çok zayıf negatif, sonbaharda ($r = -0,32, p < 0,001$) zayıf bir negatif ilişki bulunmaktadır. BC ile SR arasında yazın ($r = -0,18, p < 0,001$) çok zayıf negatif; sonbaharda ($r = -0,28, p < 0,001$) ise zayıf bir negatif korelasyon bulunmaktadır. BC ile P arasında yazın ($r = 0,10, p < 0,05$) çok zayıf; sonbaharda ($r = -0,10, p < 0,05$) ise çok zayıf negatif bir ilişki gözlemlenmiştir. BC ile RH arasında yaz ($r = 0,24, p < 0,001$); sonbahar ($r = 0,39, p < 0,001$); kış ($r = 0,2, p = 0,127$) mevsimlerinde zayıf bir ilişki, ilkbahar ($r = 0,05, p = 0,234$) mevsiminde çok zayıf bir ilişki bulunmaktadır. BC ile PBLH arasında kışın ($r = 0,32, p < 0,001$) zayıf bir ilişki, ilkbahar ($r = -0,37, p < 0,001$) ve yaz ($r = -0,25, p < 0,001$) mevsiminde zayıf negatif bir ilişki, sonbaharda ($r = -0,69, p < 0,001$) güçlü negatif bir ilişki gözlemlenmiştir.

Yapılan çalışmalarda kentsel alanlarda BC ile diğer kirleticiler arasındaki korelasyonların mevsimsel ve alansal olarak değişkenlik gösterdiği belirtilmektedir. Genel olarak trafiğin yakını alanlarda BC ile PM_{2.5}, NO₂ arasında güçlü bir korelasyon olduğu görülür. BC ile O₃ arasında görülen negatif korelasyon BC'nin birincil kirletici emisyonu olması ve O₃'ün ise atmosferde oluşan bir kirletici olması nedeni ile doğal bir sonuçtur. Bu çalışma sonuçlarına benzer şekilde soğuk mevsimlerde ısınma faaliyetleri arttığından SO₂ ile pozitif korelasyonların arttığı belirtilmiştir (Ngarambe vd., 2021; F. Wang vd., 2021).



Şekil 5. İstanbul Maslak Hava Kalitesi Ölçüm İstasyonunda kaydedilen saatlik ortalama BC konsantrasyon değişiminin örneklem dönem ortalamasına bağlı mevsimlere göre polar plot grafikleri (sol), tüm veri setinin maksimum %60-95 aralığı için CPF polar plot grafiği (sağ). **Figure 5.** Polar plot graphs of hourly average BC concentration change recorded at the İstanbul Maslak Air Quality Measurement Station according to the seasons depending on the sampling period average (left), CPF polar plot graph for the maximum 60-95% range of the entire data set (right).



Şekil 6. BC ve rüzgâr hızının kuzeyli ve güneyli rüzgâr yönlerinde ortalama değerleri.

Figure 6. The average BC and wind speed during the northerly and westerly wind directions.

Şekil 5'te saatlik BC ölçümlerinin rüzgâr yönü ve hızına göre değişimini gösteren polar plot grafikleri verilmiştir. Yaz ve sonbahar mevsimlerinde düşük BC konsantrasyonlarının çoğunlukla rüzgâr yönünün kuzey, doğu, güney yönlerinden hâkim olduğu dönemlerde gerçekleştiği, buna karşın yüksek BC konsantrasyonlarının düşük rüzgâr hızının olduğu dönemlerde ölçüm istasyonu çevresindeki ve istasyonun kuzey-batısında bulunan kaynaklardan geldiği anlaşılmaktadır. Kış ve ilkbahar mevsimlerinde hemen hemen tüm yönlerden istasyona BC taşındığı ama yüksek konsantrasyonların düşük rüzgâr hızı ve doğu-güney-batı yönlü olduğunda gerçekleştiği görülmektedir. Ayrıca Şekil 6'da kuzeyli (kuzey, kuzeybatı ve kuzeydoğu) ve güneyli (güney, güneybatı ve güneydoğu) rüzgarların hakimiyetinde ortalama BC ve rüzgâr hızı değerleri gösterilmiştir. Bu grafikte açıkça güneyli rüzgarların hakimiyetinde ve düşük rüzgâr hızları olduğunda kış ve yaz dönemlerinde yüksek BC değerleri görülmektedir. İlkbaharda anlamlı bir değişim olmazken sonbaharda kuzeyli ve yüksek hızlı rüzgâr hakimiyetinde yüksek BC değerleri oluşmuştur. Yaz ve kış döneminde kırsal (kuzeyli) ve kentsel (güneyli) etki açıkça görülürken, yüksek rüzgâr hızı olan bahar dönemlerinde boğaz ve Karadeniz üzerinden gelen gemi kaynaklı emisyonların etkili olabileceği değerlendirilmiştir.

Maslak Bölgesinin kuzeybatı yönünde Atatürk Oto sanayi bölgesi bulunmaktadır. Bu bölge yoğun araç trafiği alanı olduğundan potansiyel bir kirlilik kaynağı olabilir. Maslak bölgesinin güney ve batı yönünde İstanbul'un batısından doğusuna uzanan uluslararası Avrupa otoyolu (E80) bulunmakta ve ayrıca bu yönde yoğun kentleşme alanları yer almaktadır (Şekil 1). Düşük rüzgâr hızında yüksek konsantrasyonların görülmesinin muhtemel sebebi ölçümlerin yürütüldüğü istasyonun üniversite yerleşkesi içinde okul servis araçları park alanının ve bu araçların kullandığı yola çok yakın bir lokasyonda olmasıdır. Ölçüm noktası çevresindeki kirlilik kampüs trafiği ile ilişkilendirilebilir.

BC konsantrasyonlarının düşük ve aşırı yüksek değerleri göz ardı edilerek orta ve yüksek aralıklarının görülebileceği kirlilik olasılığını hesaplamak için CPF istatistiksel yöntem uygulanmış ve mevsimsel sonuçları Şekil

5-b'de verilmiştir. BC konsantrasyonlarının her rüzgâr hızında ölçüm noktasının güneybatı yönlerinden gelen rüzgârın etkisi ile en yüksek değerler aldığı, genel olarak düşük konsantrasyonların ise yüksek rüzgâr hızı olan kuzey rüzgarlarının hakimiyetinde gerçekleştiği görülmektedir. Karayolları Genel Müdürlüğü'nün 2023 yılı Trafik ve Ulaşım Bilgileri rapor verilerine göre E80 otoyolu üzerinde yapılan ölçümlerde günlük ortalama 100.000'den fazla araç geçişinin olduğu belirtilmektedir. Maslak istasyonunun güneyinden batısına kadar uzanan E80 otoyolunun İstanbul'daki en yoğun arterlerden biri olduğu bilinmektedir. Her ne kadar arka plan istasyon olarak genel ortalama BC değeri düşük ise de E80 trafiğinin yüksek konsantrasyonlarda önemli etkisi olduğu ve kent arka plan atmosferinde trafiğin önemli bir BC kaynağı olduğu açıkça görülmektedir.

ÇALIŞMANIN SINIRLAMALARI

Bu çalışmada BC ölçümleri tek dalga boyunda (880 nm) tek kanallı AE51 aethalometre ile yapılmıştır. Çok kanallı farklı dalga boylarında ölçüm yapabilen aethalometre cihazı mevcut olmadığından odun dumanı, tütün, biyokütle yanması gibi kaynakları temsil eden 375 nm dalga boyundaki BrC (kahverengi karbon) ölçülemediği Vernooij vd., tarafından yürütülen bir çalışmada 750 nm üzerindeki dalga boylarında BrC emiliminin katkısının % 10'dan daha az olduğu, ultraviyoledeki (100-400 nm) emilimin ise BrC tarafından domine edildiğini gösterilmiştir (Vernooij vd., 2022). Dolayısıyla 880 nm'deki emilimin sadece BC'den kaynaklandığını varsaymak çok yanlış bir yaklaşım olmasa da BC konsantrasyonunu % 10'dan daha az oranlarda fazla ölçüldüğünü söyleyebiliriz. Mevcutta tek bir BC ölçüm cihazı olduğu için mevsimsel ölçümler eş zamanlı yapılamamıştır.

GENEL DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER

Bu çalışmada İstanbul yarı kentsel alanı olan Maslak İstanbul Teknik Üniversitesi Kampüsünde her mevsim dakikalık izleme ile en az 20 gün farklı zamanlarda BC ölçümleri alınmış ve zamansal değişimleri ve diğer kirletici ve meteorolojik parametrelerle ilişkisi incelenmiştir. Ortalama BC konsantrasyonu 2.6 µg/m³ ölçülmüştür ve kış mevsiminde en yüksek konsantrasyonlara ulaşırken, sırasıyla ilkbahar, yaz ve sonbahar mevsimlerinde daha düşük konsantrasyonlar gözlenmiştir. İstanbul kentsel arka planında tespit edilen ortalama BC konsantrasyonu genel olarak Avrupa kentsel arka planlarından çok az miktar yüksek veya benzer sonuçlar alırken, Asya kentsel arka plan ölçümlerinden çok daha düşük değerler almıştır. Gün içi saatlik BC değişimi

kentsel alanlarda ve trafik yanı alanlarda çoğunlukla temel kaynağın trafik olmasına bağlı olarak sabah ve akşam bariz pik değerler görülmektedir. Bu çalışmada da benzer bir sonuç gözlenmiş ve buna ilaveten ise sabah piklerinin çok daha belirgin olduğu görülmüştür. Kış döneminde yapılan ölçümlerin yaza kıyasla 1.7 kat daha yüksek olduğu ve gece değerlerin gündüze kıyasla 2 kat daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Mevsimsel ve gün içi saatlik BC değişimlerinde meteoroloji koşullarında önemli bir etken olduğu tespit edilmiştir. Kentsel arka plan ölçüm noktalarında BC'nin kaynağı tüm kent dinamiklerini temsil edecek şekilde gerçekleşmektedir. Trafik en önemli kaynak olurken, kışın ısınma önemli bir kaynaktır.

Kentsel alanlarda BC'nin esas olarak araç emisyonlarından kaynaklandığı ve tüm kentsel atmosfere dağıldığı değerlendirildiğinde özellikle dizel araçlarda etkin filtre sisteminin kullanılması BC azaltımı için önemli bir çözüm olarak önerilmektedir. Coğrafi konum, mevsimsel farklılıklar, yerleşim yerlerindeki emisyon çeşitlilikleri ve meteorolojik koşullar gibi faktörlerin BC konsantrasyonlarını etkilemesinden dolayı genelde çalışmalar hem bölgesel hem de küresel ölçekte BC'nin uzun vadeli ölçümlerinin yetersiz olduğunu vurgulamaktadır. Türkiye'de kentsel ortamlarda BC'nin mekânsal dağılımının anlaşılması için uzun süreli mevsimsel farklar ortaya konarak hem sabit hem mobil ölçümlerle izlenmesi ve ilgili azaltıcı önlem politikalarının geliştirilmesi gerekmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 122Y079 numaralı proje ve İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, BAP koordinatörlüğü FBA-2024-36086 numaralı proje tarafından desteklenmiş ve finanse edilmiştir. Bu destek için İUC_BAP ve TÜBİTAK'a teşekkür ederiz. Ayrıca, Maslak hava kalitesi istasyonunda ölçümlerin yapılmasında verdikleri izin ve destek ve ayrıca hava kirleticileri ve meteorolojik parametre verilerini sağlamadaki destekleri için İstanbul Büyükşehir Belediyesi, Çevre Koruma ve Kontrol Daire Başkanlığı'na (İBB-ÇKKDB) ve tüm çalışanlarına özellikle de Muhammet Doğan ve Nurten Şentürk'e çok teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Abdillah, S.F.I. & Wang, Y.F. (2023).** Ambient ultrafine particle (PM_{0.1}): Sources, characteristics, measurements and exposure implications on human health. İçinde *Environmental Research* (C. 218). DOI: [10.1016/j.envres.2022.115061](https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.115061)
- Ahmed, T., Dutkiewicz, V.A., Shareef, A., Tuncel, G., Tuncel, S. & Husain, L. (2009).** Measurement of black carbon (BC) by an optical method and a

thermal-optical method: intercomparison for four sites. *Atmos. Environ.*, *43*, 6305-6311.

- Barrett, T.E., Ponette-González, A.G., Rindy, J.E. & Weathers, K.C. (2019).** Wet deposition of black carbon: A synthesis. İçinde *Atmospheric Environment* (C. 213). DOI: [10.1016/j.atmosenv.2019.06.033](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.06.033)
- Beres, N.D., Lapuerta, M., Cereceda-Balic, F. & Moosmüller, H. (2020).** Snow surface albedo sensitivity to black carbon: Radiative transfer modelling. *Atmosphere*, *11*(10). DOI: [10.3390/atmos11101077](https://doi.org/10.3390/atmos11101077)
- Bond, T.C., Doherty, S. J., Fahey, D.W., Forster, P.M., Berntsen, T., Deangelo, B.J., Flanner, M.G., Ghan, S., Kärcher, B., Koch, D., Kinne, S., Kondo, Y., Quinn, P.K., Sarofim, M.C., Schultz, M.G., Schulz, M., Venkataraman, C., Zhang, H., Zhang, S., ... & Zender, C.S. (2013).** Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, *118*(11). DOI: [10.1002/jgrd.50171](https://doi.org/10.1002/jgrd.50171)
- Cape, J.N., Coyle, M. & Dumitrean, P. (2012).** The atmospheric lifetime of black carbon. *Atmospheric Environment*, *59*. DOI: [10.1016/j.atmosenv.2012.05.030](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.05.030)
- Dumka, U. C., Kaskaoutis, D. G., Devara, P. C. S., Kumar, R., Kumar, S., Tiwari, S., Gerasopoulos, E. & Mihalopoulos, N. (2019).** Year-long variability of the fossil fuel and wood burning black carbon components at a rural site in southern Delhi outskirts. *Atmospheric Research*, *216*. DOI: [10.1016/j.atmosres.2018.09.016](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.09.016)
- Ezber, Y. & Sen, O. L. (2022).** WRF sensitivity simulations of a dense advection fog event in Istanbul. *Theoretical and Applied Climatology*, *148*(1-2). DOI: [10.1007/s00704-022-03966-0](https://doi.org/10.1007/s00704-022-03966-0)
- Glojek, K., Močnik, G., Alas, H. D. C., Cuesta-Mosquera, A., Drinovec, L., Gregorič, A., Ogrin, M., Weinhold, K., Ježek, I., Müller, T., Rigler, M., Remškar, M., Van Pinxteren, D., Herrmann, H., Ristorini, M., Merkel, M., Markelj, M. & Wiedensohler, A. (2022).** The impact of temperature inversions on black carbon and particle mass concentrations in a mountainous area. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *22*(8). DOI: [10.5194/acp-22-5577-2022](https://doi.org/10.5194/acp-22-5577-2022)
- Gu, Y., Zhang, W., Yang, Y., Wang, C., Streets, D.G. & Yim, S.H.L. (2020).** Assessing outdoor air quality and public health impact attributable to residential black carbon emissions in rural China. *Resources, Conservation and Recycling*, *159*. DOI: [10.1016/j.resconrec.2020.104812](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104812)
- Flores, R.M., Mertoğlu, E., Özdemir, H., Akkoyunlu, B.O., Demir, G., Ünal, A. & Tayanç, M. (2020).** A high-time resolution study of PM_{2.5}, organic carbon, and elemental carbon at an urban traffic site in Istanbul. *Atmospheric Environment*, *223*, 117241.
- Hansen, A.D.A., Rosen, H. & Novakov, T. (1984).** The aethalometer - An instrument for the real-time

- measurement of optical absorption by aerosol particles. *Science of the Total Environment*, *The*, *36*(C). DOI: 10.1016/0048-9697(84)90265-1
- Hu, D., Alfarra, M.R., Szpek, K., Langridge, J.M., Cotterell, M.I., Belcher, C., Rule, I., Liu, Z., Yu, C., Shao, Y., Voliotis, A., Du, M., Smith, B., Smallwood, G., Lobo, P., Liu, D., Haywood, J.M., Coe, H. & Allan, J.D. (2021). Physical and chemical properties of black carbon and organic matter from different combustion and photochemical sources using aerodynamic aerosol classification. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *21*(21). DOI: 10.5194/acp-21-16161-2021
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2019). "Methodology Report on Short-lived Climate Forcers". <https://www.ipcc.ch/report/methodology-report-on-short-lived-climate-forcers/>
- İstanbul Hava Kalitesi İzleme Ağı. (2024). <https://havakalitesi.ibb.gov.tr/>. (Erişim Tarihi:8.10.2024)
- Jereb, B., Gajšek, B., Šipek, G., Kovše, Š. & Obrecht, M. (2021). Traffic density-related black carbon distribution: Impact of wind in a basin town. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *18*(12). DOI: 10.3390/ijerph18126490
- Kant, Y., Shaik, D.S., Mitra, D., Chandola, H.C., Babu, S.S. & Chauhan, P. (2020). Black carbon aerosol quantification over north-west Himalayas: Seasonal heterogeneity, source apportionment and radiative forcing. *Environmental Pollution*, *257*, 113446.
- Kirchstetter, T.W. & Novakov, T. (2007). Controlled generation of black carbon particles from a diffusion flame and applications in evaluating black carbon measurement methods. *Atmospheric Environment*, *41*(9). DOI: 10.1016/j.atmosenv.2006.10.067
- Klimont, Z., Kupiainen, K., Heyes, C., Purohit, P., Cofala, J., Rafaj, P., Borken-Kleefeld, J. & Schöpp, W. (2017). Global anthropogenic emissions of particulate matter including black carbon. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *17*(14). DOI: 10.5194/acp-17-8681-2017
- Koçak, E., Kılavuz, S.A., Öztürk, F., İmamoğlu, İ. & Tuncel, G. (2021). Characterization and source apportionment of carbonaceous aerosols in fine particles at urban and suburban atmospheres of Ankara, Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, *28*, 25701-25715.
- Kutzner, R.D., von Schneidmesser, E., Kuik, F., Quedenau, J., Weatherhead, E.C. & Schmale, J. (2018). Long-term monitoring of black carbon across Germany. *Atmospheric Environment*, *185*, 41-52.
- Kuzu, S.L., Yavuz, E., Akyüz, E., Saral, A., Akkoyunlu, B.O., Özdemir, H., Demir, G. & Ünal, A. (2020). Black carbon and size-segregated elemental carbon, organic carbon compositions in a megacity: a case study for Istanbul. *Air Quality, Atmosphere and Health*, *13*(7). DOI: 10.1007/s11869-020-00839-1
- Liakakou, E., Stavroulas, I., Kaskaoutis, D.G., Grivas, G., Paraskevopoulou, D., Dumka, U.C., Tsagkaraki, M., Bougiatioti, A., Oikonomou, K., Sciare, J., Gerasopoulos, E. & Mihalopoulos, N. (2020a). Long-term variability, source apportionment and spectral properties of black carbon at an urban background site in Athens, Greece. *Atmospheric Environment*, *222*. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2019.117137
- Liakakou, E., Stavroulas, I., Kaskaoutis, D.G., Grivas, G., Paraskevopoulou, D., Dumka, U.C., Tsagkaraki, M., Bougiatioti, A., Oikonomou, K., Sciare, J., Gerasopoulos, E. & Mihalopoulos, N. (2020b). Long-term variability, source apportionment and spectral properties of black carbon at an urban background site in Athens, Greece. *Atmospheric Environment*, *222*. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2019.117137
- Liang, M. S., Keener, T. C., Birch, M. E., Baldauf, R., Neal, J., & Yang, Y. J. (2013). Low-wind and other microclimatic factors in near-road black carbon variability: A case study and assessment implications. *Atmospheric Environment*, *80*. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2013.07.057
- Lin, Y. L., Farley, R. D., & Orville, H. D. (1983). Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *Journal of Climate & Applied Meteorology*, *22*(6). DOI: 10.1175/1520-0450(1983)022<1065:BPOTSF>2.0.CO;2
- Luoma, K., Niemi, J.V., Aurela, M., Lun Fung, P., Helin, A., Hussein, T., Kangas, L., Kousa, A., Rönkkö, T., Timonen, H., Virkkula, A. & Petäjä, T. (2021). Spatiotemporal variation and trends in equivalent black carbon in the Helsinki metropolitan area in Finland. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *21*(2). DOI: 10.5194/acp-21-1173-2021
- Ma, Y., Huang, C., Jabbour, H., Zheng, Z., Wang, Y., Jiang, Y., Zhu, W., Ge, X., Collier, S. & Zheng, J. (2020). Mixing state and light absorption enhancement of black carbon aerosols in summertime Nanjing, China. *Atmospheric Environment*, *222*. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2019.117141
- Mao, M., Zhou, Y. & Zhang, X. (2023). Evaluation of MERRA-2 Black Carbon Characteristics and Potential Sources over China. *Atmosphere*, *14*(9). DOI: 10.3390/atmos14091378
- Motos, G., Schmale, J., Corbin, J.C., Modini, R.L., Karlen, N., Bertò, M., Baltensperger, U. & Gysel-Beer, M. (2019). Cloud droplet activation properties and scavenged fraction of black carbon in liquid-phase clouds at the high-alpine research station Jungfraujoch (3580ma.s.l.). *Atmospheric Chemistry and Physics*, *19*(6). DOI: 10.5194/acp-19-3833-2019
- Myhre, G. & Samsset, B. H. (2015). Standard climate models radiation codes underestimate black

- carbon radiative forcing. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *15*(5). DOI: [10.5194/acp-15-2883-2015](https://doi.org/10.5194/acp-15-2883-2015)
- Ngarambe, J., Joen, S. J., Han, C. H., & Yun, G. Y. (2021).** Exploring the relationship between particulate matter, CO, SO₂, NO₂, O₃ and urban heat island in Seoul, Korea. *Journal of Hazardous Materials*, *403*. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2020.123615](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123615)
- Nguyen, H.T. & Roper, C. (2024).** Black carbon concentrations, sources, and health risks at six cities in Mississippi, USA. *Air Quality, Atmosphere and Health*, *17*(1). DOI: [10.1007/s11869-023-01433-x](https://doi.org/10.1007/s11869-023-01433-x)
- Nilsson Sommar, J., Andersson, E.M., Andersson, N., Sallsten, G., Stockfelt, L., Ljungman, P.L.S., Segerström, D., Eneroth, K., Gidhagen, L., Molnar, P., Wennberg, P., Rosengren, A., Rizzuto, D., Leander, K., Lager, A., Magnusson, P.K.E., Johansson, C., Barregard, L., Bellander, T., ... & Forsberg, B. (2021).** Long-term exposure to particulate air pollution and black carbon in relation to natural and cause-specific mortality: A multicohort study in Sweden. *BMJ Open*, *11*(9). DOI: [10.1136/bmjopen-2020-046040](https://doi.org/10.1136/bmjopen-2020-046040)
- Ozdemir, H., Pozzoli, L., Kindap, T., Demir, G., Mertoglu, B., Mihalopoulos, N., Theodosi, C., Kanakidou, M., Im, U. & Unal, A. (2014).** Spatial and temporal analysis of black carbon aerosols in Istanbul megacity. *Science of the Total Environment*, *473-474*. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2013.11.102](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.11.102)
- Öztürk, F. & Keleş, M. (2016).** Wintertime chemical compositions of coarse and fine fractions of particulate matter in Bolu, Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, *23*, 14157-14172.
- Pashneva, D., Minderytė, A., Davulienė, L., Dudoitis, V. & Byčienienė, S. (2024).** Understanding the Dynamics of Source-Appportioned Black Carbon in an Urban Background Environment. *Atmosphere*, *15*(7), 832.
- R Core Team. (2023).** *R: A language and environment for statistical computing* (4.3.1). R Foundation for Statistical Computing.
- Ramanathan, V. & Carmichael, G. (2008).** Global and regional climate changes due to black carbon. *İçinde Nature Geoscience* *1*(4). DOI: [10.1038/ngeo156](https://doi.org/10.1038/ngeo156)
- Ran, L., Deng, Z., Xu, X., Yan, P., Lin, W., Wang, Y., Tian, P., Wang, P., Pan, W. & Lu, D. (2016).** Vertical profiles of black carbon measured by a micro-aethalometer in summer in the North China Plain. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *16*(16). DOI: [10.5194/acp-16-10441-2016](https://doi.org/10.5194/acp-16-10441-2016)
- Ritz, B., Hoffmann, B. & Peters, A. (2019).** The effects of fine dust, ozone, and nitrogen dioxide on health. *İçinde Deutsches Arzteblatt International* *116*(51-52). DOI: [10.3238/arztebl.2019.0881](https://doi.org/10.3238/arztebl.2019.0881)
- Skamarock W.C., et al. (2008).** A description of the advanced research WRF version 3, NCAR Tech. Note, NCAR/TN-468+STR. *Natl. Cent. for Atmos. Res. Boulder, Colorado, June.*
- Suresh Kumar Reddy, B., Raghavendra Kumar, K., Balakrishnaiah, G., Rama Gopal, K., Reddy, R.R., Reddy, L.S.S., Nazeer Ahammed, Y., Narasimhulu, K., Krishna Moorthy, K. & Suresh Babu, S. (2012).** Potential source regions contributing to seasonal variations of black carbon aerosols over Anantapur in southeast India. *Aerosol and Air Quality Research*, *12*(3). DOI: [10.4209/aaqr.2011.10.0159](https://doi.org/10.4209/aaqr.2011.10.0159)
- Srithawirat, T., Garivait, S. & Brimblecombe, P. (2021).** Seasonal variation of black carbon in fine particulate matter in semi-urban and agricultural areas of Thailand. *Aerosol Science and Engineering*, *5*(4), 419-428.
- Şahin, Ü.A., Ayvaz, C., Hama, S., Onat, B., Uzun, B., Dogan, M., Bediroglu, G. & Harrison, R.M. (2024).** Assessment of ambient particulate matter and trace gases in Istanbul: Insights from long-term and multi-monitoring stations. *Atmospheric Pollution Research*, *15*(5). DOI: [10.1016/j.apr.2024.102089](https://doi.org/10.1016/j.apr.2024.102089)
- Şahin, Ü.A., Onat, B., Akin, Ö., Ayvaz, C., Uzun, B., Mangır, N., Doğan, M. & Harrison, R. M. (2020).** Temporal variations of atmospheric black carbon and its relation to other pollutants and meteorological factors at an urban traffic site in Istanbul. *Atmospheric Pollution Research*, *11*(7). DOI: [10.1016/j.apr.2020.03.009](https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.03.009)
- Şahin, Ü. A., Harrison, R. M., Alam, M. S., Beddows, D. C. S., Bousiotis, D., Shi, Z., Crilley, L. R., Bloss, W., Brean, J., Khanna, I., and Verma, R. (2022)** Measurement report: Interpretation of wide-range particulate matter size distributions in Delhi, *Atmos. Chem. Phys.*, *22*, 5415-5433. DOI: [10.5194/acp-22-5415-2022](https://doi.org/10.5194/acp-22-5415-2022).
- Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). (2023).** *İstanbul Nüfus Verileri 2023*. <https://www.tuik.gov.tr/>. (Erişim Tarihi:8.10.2024)
- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2008).** Hava kalitesi değerlendirme ve yönetimi yönetmeliği. <https://www.mevzuat.gov.tr/> (Erişim tarihi: 29 Eylül 2024)
- Vernooij, R., Winiger, P., Wooster, M., Strydom, T., Poulain, L., Dusek, U., Grosvenor, M., Roberts, G. J., Schutgens, N. & Van Der Werf, G.R. (2022).** A quadcopter unmanned aerial system (UAS)-based methodology for measuring biomass burning emission factors. *Atmospheric Measurement Techniques*, *15*(14). DOI: [10.5194/amt-15-4271-2022](https://doi.org/10.5194/amt-15-4271-2022)
- Viana, M., Querol, X., Reche, C., Favez, O., Malherbe, L., Ustache, A., ... & Guerreiro, C. (2012).** Particle number (PNC) and black carbon (BC) in European urban air quality networks. ETC/ACM Technical Paper, 6.
- Wang, F., Xu, J., Huang, Y. & Xiu, G. (2021).** Characterization of black carbon and its

correlations with vocs in the northern region of hangzhou bay in shanghai, china. *Atmosphere*, *12*(7). DOI: [10.3390/atmos12070870](https://doi.org/10.3390/atmos12070870)

- Wang, M., Chen, Y., Fu, H., Qu, X., Li, B., Tao, S. & Zhu, D. (2020).** An investigation on hygroscopic properties of 15 black carbon (BC)-containing particles from different carbon sources: Roles of organic and inorganic components. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *20*(13). DOI: [10.5194/acp-20-7941-2020](https://doi.org/10.5194/acp-20-7941-2020)
- Watson, J.G., Chow, J.C., Chen, L.W.A., 2005.** Summary of organic and elemental carbon/black carbon analysis methods and intercomparisons. *Aerosol Air Qual. Res.* *5*, 65-102.
- Williams, M. A., Kumar, T. V. L., & Rao, D. N. (2019).** Characterizing black carbon aerosols in relation to atmospheric boundary layer height during wet removal processes over a semi urban location. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, *182*. DOI: [10.1016/j.jastp.2018.11.018](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.11.018)
- Yatkin, S., & Bayram, A. (2007).** Elemental composition and sources of particulate matter in the ambient air of a Metropolitan City. *Atmospheric Research*, *85*(1), 126-139.
- Zeng, C., Liu, C., Li, J., Zhu, B., Yin, Y. & Wang, Y. (2019).** Optical Properties and Radiative Forcing of Aged BC due to Hygroscopic Growth: Effects of the Aggregate Structure. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *124*(8). DOI: [10.1029/2018JD029809](https://doi.org/10.1029/2018JD029809)
- Zhang, Z., Cheng, Y., Liang, L. & Liu, J. (2023).** The Measurement of Atmospheric Black Carbon: A Review. *Toxics*, *11*(12), 975. DOI: [10.3390/toxics11120975](https://doi.org/10.3390/toxics11120975)
- Zhou, B., Wang, Q., Zhou, Q., Zhang, Z., Wang, G., Fang, N., Li, M. & Cao, J. (2018).** Seasonal characteristics of black carbon aerosol and its potential source regions in Baoji, China. *Aerosol and Air Quality Research*, *18*(2). DOI: [10.4209/aaqr.2017.02.0070](https://doi.org/10.4209/aaqr.2017.02.0070)
- Zhou, J., Tie, X., Yu, Y., Zhao, S., Li, G., Liu, S., Zhang, T. & Dai, W. (2020).** Impact of the emission control of diesel vehicles on black carbon (BC) concentrations over China. *Atmosphere*, *11*(7). DOI: [10.3390/atmos11070696](https://doi.org/10.3390/atmos11070696)