

Balıkesir Şehir Merkezinde Hava Kirliliği Seviyelerinin Zamansal ve Mekansal Analizleri

İhsan Çıldır^{1*}, Atilla Mutlu¹

¹Çevre Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, Türkiye

Makale Tarihiçesi

Gönderim: 11.06.2021

Kabul: 19.11.2021

Yayın: 10.06.2022

Araştırma Makalesi

Öz – Bu çalışmada, Güney Marmara bölgesinde bulunan Balıkesir şehir merkezinde meteorolojik faktörlerin etkisinde partikül madde (PM₁₀) ve kükürt dioksit (SO₂) konsantrasyonlarının zamansal ve mekansal analizleri yapılmıştır. Bu çalışmada, mevcut meteorolojik koşullar ve hava kirlenmelerinin seviyeleri istatistiksel olarak incelenmiştir. Çalışmada, hava kirlenmelerini ve meteorolojik parametreler (sıcaklık, rüzgar hızı, nem, basınç ve karışım yüksekliği (sabah – öğlen)) arasındaki ilişkinin belirlenmesi amacıyla yapılan analizlerde özellikle sonbaharın sonlarında ve kış aylarında pik yaptığı tespit edilmiştir. Balıkesir şehir merkezinde, PM₁₀ ve SO₂ seviyelerindeki değişimler ile ilgili en yüksek korelasyon katsayısına sahip olan meteorolojik parametreler sırasıyla, rüzgar hızı (r=-0,45) ve sıcaklık (r=-0,53) olarak tespit edilmiştir. PM₁₀ değişimini açıklayabilmek için yapılan regresyon analizinde, nem(rh) ve karışım yüksekliği (sabah) verilerinin modelde etkilerinin olmadığı görülmüştür (pnem=0,60 > 0,05 ve pKar. Yük. Sab.=0,34 > 0,05). Yine, SO₂ tahmini için oluşturulan regresyon modelinde ise sadece karışım yüksekliği (öğlen) verilerinin modelde etkisinin olmadığı görülmüştür (pKar. Yük. Ög.=0,65 > 0,05).

PM₁₀ için ölçüm değeri 100 µg/m³'ten büyük olan, 2017-2019 yılları arasında toplam 4 farklı dönemden oluşan epizot dönem tespit edilmiştir. Korelasyon analizi sonuçlarına göre birinci dönemdeki PM₁₀ değerleri ile karışım yüksekliği (öğlen) değerleri ile aralarında pozitif yönde r=0,58 değerinde korelasyon tespit edilmiştir. Diğer dönemlerde ise PM₁₀ seviyelerindeki değişimlerin karışım yüksekliği (sabah-öğlen) değerleri ile istatistiksel olarak önemli düzeyde ilişki saptanmamıştır.

Anahtar Kelimeler – Epizot 1, Hava Kirliliği 2, HYSPLIT 3, Korelasyon 4, Meteoroloji 5

Temporal and Spatial Analyses of Air Pollution Levels in Downtown Balıkesir

¹Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Balıkesir University, Balıkesir, Türkiye

Article History

Received: 11.06.2021

Accepted: 19.11.2021

Published: 10.06.2022

Research Article

Abstract – In this study, temporal and spatial analyses of particulate matter (PM₁₀) and sulfur dioxide (SO₂) concentrations under the influence of meteorological factors were performed in Balıkesir that is located in the Southern Marmara region. In this study, long term meteorological conditions and levels of air pollutants were investigated statistically. Analysis results indicated that the correlation between air pollutants and meteorological parameters (temperature, wind speed, humidity, pressure and mixing heights) had peaks especially in the late autumn and in the winter. In downtown Balıkesir, the meteorological parameters with the highest correlation coefficients related to the changes in PM₁₀ and SO₂ levels were determined as wind speed (r=-0.45) and temperature (r=-0.53), respectively. In the regression analysis performed to explain the PM₁₀ change, it was observed that the humidity (rh) and the mixing height (morning) data had no effect on the model (phumidity=0,60 > 0,05 and pMix.Heiht-Morning=0,34 > 0,05). Moreover, in the regression model created for SO₂ estimation, only the mixing height (noon) data was found to have no effect on the model (pMix.Heiht-Noon =0,65 > 0,05). Episode periods with PM₁₀ levels above 100 µg/m³ and consisting of a total of 4 different periods were determined between 2017 and 2019. According to the results of the correlation analysis, a positive correlation (r=0.58) was found between the PM₁₀ and the mixing height (noon) in the first period. In other periods, there was no statistically significant correlation between the changes in PM₁₀ and the mixing height (morning-noon) levels.

Keywords – Air pollution 1, Correlations 2, Episode 3, HYSPLIT 4, Meteorology 5

¹ ihsan.cildir199720@gmail.com

² amutlu@balikesir.edu.tr

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author

1. Giriş

Hava kirliliği, canlıların sağlığını olumsuz yönde etkileyen atmosferin genel bileşiminde bulunan veya bulunmayan maddelerin, normalin üzerinde miktarda ve sürede atmosferde bulunması sonucu oluşmaktadır. Hava kirliliğine neden olan kirleticiler kaynak bakımından ikiye ayrılır bunlar: Doğal kaynaklı kirleticiler ve insan kaynaklı (antropojenik) kirleticilerdir. Doğal kaynaklı kirleticiler, insan kaynaklı kirleticilere oranla atmosferde daha yüksek konsantrasyonlarda bulunabilir fakat havaya karışırken atmosferde kalma süreleri bakımından süreklilik göstermezler. İnsan kaynaklı kirleticiler ise, doğal kaynaklı kirleticilere göre atmosferde düşük veya zaman zaman yüksek konsantrasyonlarda bulunmakla birlikte etki bakımından süreklidirler. Doğal kaynaklı kirleticiler zaman içerisinde atmosfer tarafından kontrol edilebilirler fakat insan kaynaklı kirleticiler sürekli olduklarından zaman zaman kontrol dışına çıktıkları görülmektedir (Mutlu, 2019). Üretim faaliyetlerinin bir sonucu olarak ortaya çıkan kirleticiler atmosferdeki hava ile karışarak havanın kalitesini bozarak kirlenmesine yol açtığı bilinmektedir. Kirlenen hava daha sonrasında yeryüzündeki canlılara ve yapılara temas ederek olumsuz yönde etkiler meydana getirmektedir (Akyürek vd., 2013).

Hava kirliliği günümüzde toplum sağlığını tehdit eden çevresel faktörlerin en başında yer almaktadır (WHO, 2016). Meteorolojik, topoğrafik özellikler ve kentleşme hava kirleticilerinin atmosferdeki dağılımına, depolanmasına ve kimyasal yönden dönüşüm süreçlerine etki eden önemli faktörlerdir. Her bir hava kirleticisinin etki süresi, konsantrasyonu ve diğer karakteristiklerine bağlı olarak insan sağlığı üzerinde etkileri olmaktadır. WHO verilerine göre 2016 yılında dünyada yaklaşık 4,2 milyon ölümün, dış ortam hava kirliliğine bağlı olduğu belirtilmektedir. Ayrıca bu ölümlerin yaklaşık olarak %91'ini oluşturan düşük ve sınırlı gelire sahip ülkelerin (Güney Doğu Asya ve Batı Pasifik bölgeleri) her birinde yaklaşık olarak 1,3 milyon ölümün ana sebebi dış ortam hava kirliliği olduğu belirtilmektedir (WHO, 2018).

Ülkemizde hava kirliliğiyle ilgili ilk çalışmaların başkent Ankara'da 1960'lı yıllarda başladığı bilinmektedir. Ülkemiz genelinde diğer bölgelerde de yaşanan hava kirliliği sorunları nedeniyle bu alandaki çalışmaların genişlemesine yol açmıştır (Tuncel, 2013). Konuyla ilgili daha önce yapılan çalışmalar incelendiğinde özellikle kış aylarda meteorolojik şartların baskın olduğu dönemlerde partikül madde (PM₁₀) ve kükürt dioksit (SO₂) seviyelerinin yükseliş yönünde bir eğilime sahip oldukları tespit edilmiştir (Başar vd., 2005; İbrahimova, 2013; Tecer, 2013). Dış ortam PM₁₀ ve SO₂ kirletici seviyelerindeki artışlar, solunumla akciğerlere alınan havanın normal bir şekilde dışarı verilememesi şeklinde semptomları olan ve kronik rahatsızlık olarak değerlendirilen KOAH (Kronik obstrüktif akciğer hastalığı), ayrıca üst solunum yolu enfeksiyonu, bronşit ve astım gibi birçok kronik hastalıkların halk sağlığı açısından risk oluşturmasına ve bu hastalıklardan hastanelere yapılan başvuruların özellikle yüksek kirlilik günlerinde artış eğiliminde olduğu tespit edilmiştir (Menteşe, 2011; Saygın, 2019; Çıldır, 2021).

Günümüzde hava kirletici seviyelerinin yorumlanmasında sadece sabit veya mobil hava kalitesi ölçüm istasyonlarından ölçmek yeterli olmamaktadır. Aynı zamanda ölçülen hava kirleticileri ile birlikte çalışma alanına ait meteorolojik faktörlerin, çalışma alanına etkisi olan bölgesel ve kıtasal kirletici taşınımının zaman ve mekan parametrelerine bağlı olarak yeniden yorumlanması önem arz etmektedir. Bu hususlar göz önüne alındığında, yapılan bu çalışmada, sanayi faaliyetleri ve nüfus dağılımı bakımından orta ölçekli bir il olan Balıkesir'de 2017-2019 yılları arasında kaydedilen PM₁₀ ve SO₂ seviyelerinin yine aynı zaman diliminde bölgeye ait meteorolojik koşullar altında nasıl değişim gösterdikleri zamansal ve mekansal olarak analiz edilmiştir.

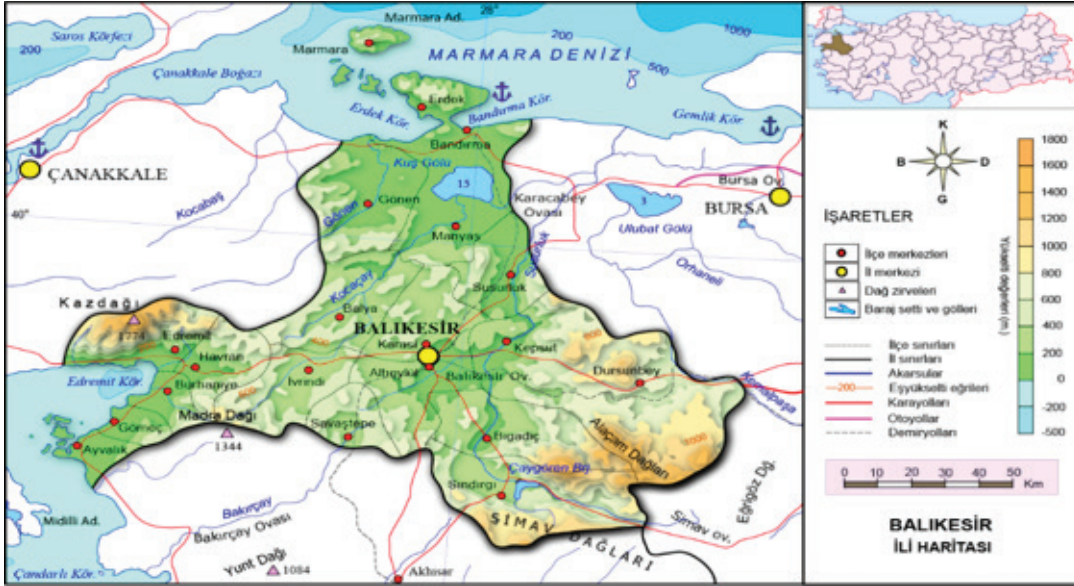
Yapılan bu çalışma, Balıkesir Üniversitesinde gerçekleştirilen ve Balıkesir'de hava kirliliği seviyelerinin meteorolojik parametrelere bağlı olarak solunum yolu hastalıkları üzerindeki etkilerinin incelenmesi adlı yüksek lisans tez çalışmasının da ilk kısmını oluşturmaktadır (Çıldır, 2021).

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Çalışma Alanı

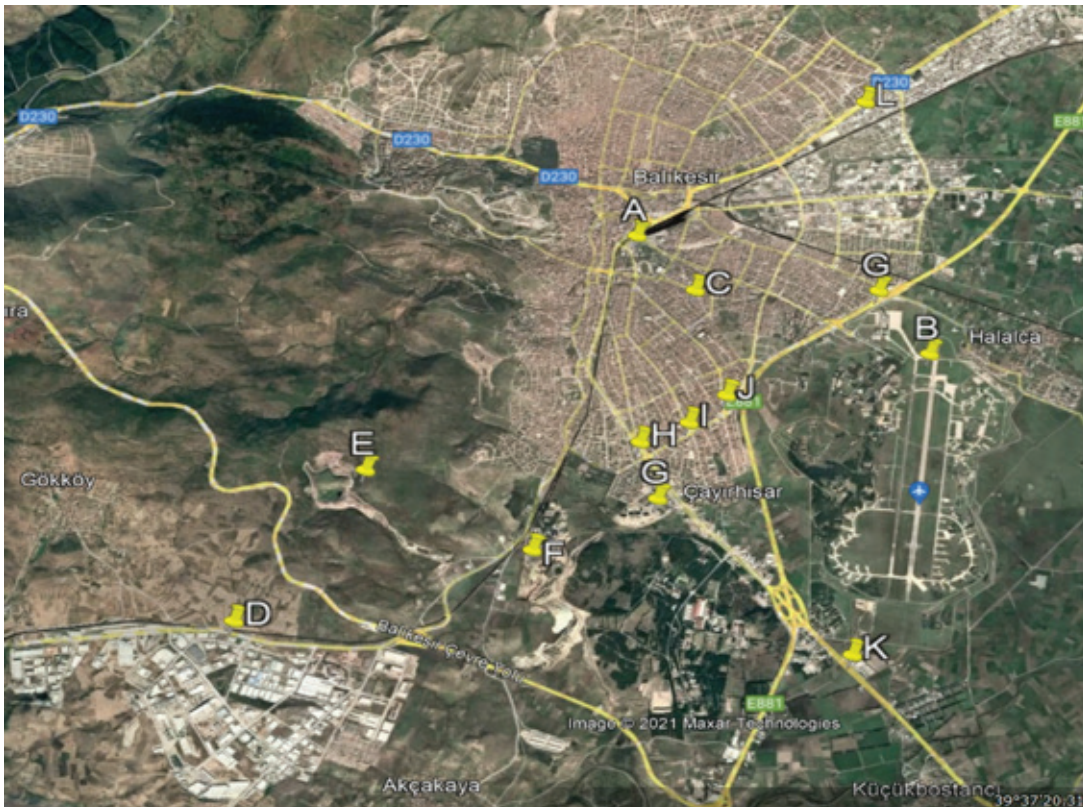
Balıkesir şehir merkezi, Şekil 1'de sunulduğu gibi, Güney Marmara bölgesinde (39°37'–39°42' K) enlemleri ve yaklaşık olarak (27°50'–27°57' D) boylamları arasında yer almaktadır. Şehirde yaşayan nüfusun yaklaşık 1.240 milyon olduğu tahmin edilmektedir (TÜİK, 2020). Şehir merkezi Balıkesir Ovası'nın

batısında yer almakta ve çanak şeklindeki ovanın tabanına doğru ilerlemektedir. Çanak şeklindeki ova Susurluk Nehri ve kollarının faaliyetleri sonucu oluşmuştur. Ovanın etrafı 500 m’yi aşan dağlar ve tepelerle çevrenmektedir. Şehir merkezindeki yükselti farkı 195 m’dir. (Tağül, 2007).



Şekil 1. Balıkesir ilinin lokasyon haritası.

Balıkesir şehrinin Marmara ve Ege Denizine kıyısı bulunmaktadır. Şehrin karakteristik iklim özellikleri, iç kesimlerde Karasal iklim özellikleri görülmeyle birlikte kıyı bölgelerinde Akdeniz iklimi hüküm sürmektedir. Balıkesir şehirde karakteristik olarak 4 mevsim görülmektedir. Şehir merkezinin de yer aldığı iç bölgelerde kışları yağışlı ve daha soğuk olmakla birlikte kıyı kesimlerde yağışlı fakat daha ılık geçmektedir (Tağül, 2007).



Şekil 2. Balıkesir hava kalitesi izleme istasyonu ve çevresi.

Balıkesir şehrinde bir adet hava kalitesi izleme istasyonu mevcuttur. 2018 yılı itibarıyla konumu Meteoroloji Müdürlüğü bahçesine taşınmıştır. Balıkesir şehir merkezinde hava kirliliği mevsimsel olarak değişiklik göstermektedir (Mutlu, 2019). Kış ayları, sonbaharın geç dönemleri ile ilkbaharın erken dönemlerinde tespit edilen kirlilik epizotları mevcuttur (Tecer, 2013; Mutlu, 2019). İl Merkezinde, OSB dışında farklı bölgelerde, küçük sanayi sitesi, haddehaneler, marangozlar sitesi bulunmaktadır. Bu bölgeden kaynaklanan kirletici unsurlarda bu bölgenin şehir merkezine olan yakınlığı sebebiyle şehir merkezinin hava kalitesini olumsuz etkilemektedir (Balıkesir Çevre ve Şehircilik Müdürlüğü, 2020). Balıkesir şehir merkezindeki hava kalitesi ölçüm istasyonu ve meteoroloji istasyonu konumları, sanayi kaynaklı PM₁₀ ve SO₂ kaynakları için organize ve küçük ölçekli sanayi bölgesi, çimento fabrikası, trafik kaynaklı PM₁₀ ve SO₂ kaynakları olarak ana bağlantı yolları ve başlıca kavşaklar konumları sunulmuş olup Şekil 2 üzerindeki işaretlenmiştir. Ayrıca, Şekil 2 üzerinde gösterilen her bir noktanın açıklamaları Tablo 1’de sunulmuştur (Balıkesir Çevre ve Şehircilik Müdürlüğü, 2020).

Tablo 1

Şekil 2’deki noktaların açıklamaları

Nokta Simgesi	Nokta Açıklaması	Nokta Simgesi	Nokta Açıklaması
(A)	Şehir merkezi	(G)	İzmir-İstanbul Yolu
(B)	Meteoroloji istasyonu	(H)	Adliye Kavşağı
(C)	Hava kalitesi izleme istasyonu	(I)	Mehmetçik Kavşağı
(D)	Organize sanayi bölgesi	(J)	Savaştepe Kavşağı
(E)	Katı atık deponi sahası	(K)	Eski İzmir Yolu
(F)	Çimento fabrikası	(L)	K. Ölçekli Sanayi Sitesi

2.2. Çalışmada Kullanılan Veriler

Bu çalışmada kullanılan veriler, şehir merkezine ait hava kalitesi ölçümleri ve çalışma bölgesine ait meteorolojik parametrelerinden oluşmaktadır.

Hava kalitesi verileri: Çalışma bölgesine ait hava kalitesi verileri şehir merkezinde hava kalitesi izleme istasyonunun (HKİİ) eski ve yeni lokasyonlarından olmak üzere 2017-2019 yılları arasında Çevre ve Şehircilik Bakanlığı’na ait Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı (UHKİA) veri tabanları kullanılarak elde edilmiştir. (www.havaizleme.gov.tr). Ölçülen PM₁₀ ve SO₂ kirleticileri belirtilen yıllar kapsamında günlük ortalama değerler olarak değerlendirilmiştir.

Meteoroloji verileri: Çalışma bölgesine ait temsili meteoroloji verileri şehir merkezinde bulunan hava üsündeki meteoroloji gözlem istasyonundan (WMO# 17150) 2017-2019 yıllarını kapsayacak şekilde temin edilmiştir. Günlük ortalama değerler olmak üzere sıcaklık (t), rüzgar hızı (ws), nem (rh), basınç (p) ve karışım yüksekliği (sabah – öğlen) elde edilmiştir.

2.3. Veri Analizinde Uygulanan Yöntemler

Nüfus yoğunluğu giderek artan şehir merkezlerinde, günümüzün en büyük sorunlarından biri olan hava kirliliği probleminin büyük riskler oluşturma potansiyelinin yüksek olduğu bilinmektedir. Başta hava kirliliği olmak üzere bu çevresel sorunla başa çıkabilmek için atılması gereken ilk adım incelemeye alınan bölgedeki hava kirliliğinin türü, miktarı ve bölgedeki kirletme süresinin belirlenmesidir. Hava kirliliğinin azaltılabilmesi için izlenecek yolun belirlenmesinde ele alınan bölgedeki hava kirletici parametrelerin belirli bir zaman dilimi boyunca izlenmesi, ölçümlerin yapılması ve bu ölçümlerin kayıtlarının tutulması ge-

rekmette ve elde edilen sonuçların meteorolojik faktörler göz önünde bulundurularak yorumlanması ayrıca önem arz etmektedir.

Hava kirleticilerinin (PM_{10} ve SO_2) ve meteoroloji (sıcaklık-t, rüzgar hızı-ws, nem-rh, basınç-p ve karışım yüksekliği (sabah – öğlen)) verilerinin genel tanımlayıcı istatistikleri (ortalama, minimum/maksimum değerler, varyans değerleri, %95 önem düzeyinde güven aralıkları ve standart sapma değeri) hesaplanmıştır. Hava kirleticilerine ait varyans analizi (ANOVA) yapılarak ölçülen hava kirleticilerinin mevsimsel değişimleri arasında anlamlı fark olup olmadığı incelenmiştir. Ölçülen hava kirleticilerine ait saatlik değişimlerinin kendi aralarında ilişkilerinin olup olmadığını inceleyen ikili korelasyon analizleri (Pearson Correlation Analysis ve Kendall's Tau Analysis) yapılmıştır. Elde edilen hava kirletici (PM_{10} ve SO_2) verileri setleri ve meteorolojik (sıcaklık-t, rüzgar hızı-ws, nem-rh, basınç-p ve karışım yüksekliği (sabah – öğlen)) verileri setleri arasında çoklu regresyon analizi yapılarak, incelenen bölgedeki meteorolojik faktörlerin ölçülen hava kirleticisine ait değişimler üzerindeki etkileri belirlenmeye çalışılmıştır.

Hava kalitesi ve meteorolojik verilerin arasındaki korelasyonların açıklanabilmesi için SPSS istatistiksel analiz programı kullanılmıştır ve analiz sonuçlarına ait görseller R ortamlarında değerlendirilmiştir (IBM-SPSS, 2016; Carslaw, 2012; Carslaw, 2015).

Epizot ile ilgili yapılan çalışmalara bakıldığında PM_{10} verisi için toplam gün bakımında art arda en az 5 günü ve sınır değer olarak da $100 \mu g/m^3$ 'ü aşan periyotların seçildiği ifade edilmiştir (Orhun, 2013). Bu kapsamda en az birbirini takip eden art arda 5 gün, ölçüm değeri $100 \mu g/m^3$ 'ü aşan ölçüm günleri, epizot günleri olarak seçilmiştir. Oluşan bu epizot dönemlerinin tam olarak neden kaynaklandığını belirleyebilmek adına meteorolojik (karışım yüksekliği (sabah – öğlen)) faktörler ile korelasyon ve regresyon analizleri yapılmıştır.

HYSPLIT yörünge taşınım modeli, Ulusal Atmosfer ve Okyanus İdaresi – NOAA tarafından atmosferde gerçekleşen taşınım ve dağılım hareketlerini takip edebilmek için geliştirilmiş bir modeldir (NOAA, 2021). HYSPLIT modeli, basit hava paketi yörüngelerinin yanı sıra karmaşık taşıma, dağılım, kimyasal dönüşüm ve biriktirme simülasyonlarını hesaplamak için eksiksiz bir sistemdir. HYSPLIT, atmosfer bilimleri topluluğunda en yaygın olarak kullanılan atmosferik taşıma ve dağılım modellerinden biridir. Model hesaplama yöntemi, yörüngeler veya hava parselleri başlangıç konumlarından hareket ederken ilerleme ve yayılma hesaplamaları için hareketli bir referans çerçevesi kullanan Lagrangian yaklaşımı ile sabit bir üç boyutlu ızgara kullanan Euler metodolojisi arasında bir karışımdır (NOAA, 2021).

HYSPLIT modeli kullanılarak yapılan çalışmalar incelendiğinde, geriye dönük tespit gerektiren çalışmalarda sıkça kullanıldığı dikkat çekmiştir. Orman yangınları, sel felaketleri, taşkın afetleri ve hava kirliliği çalışmalarında olayın gerçekleşme tarihinde çevresel şartların ne durumda olduğu belirleyebilmek adına kullanılan ve olumlu yaklaşımlar elde edilen bir model olarak karşımıza çıkmaktadır (Durmuş, 2016; Mutlu, 2019; Canpolat vd., 2020; Oğuz vd., 2021).

Meteorolojik (karışım yüksekliği (sabah – öğlen)) faktörler ile etkileşimi olmayan epizot dönemlerinin muhtemel kıtasal taşınım senaryoları NOAA HYSPLIT geri yörünge (back-trajectory) modeline göre hava kütlesi taşınım modeli oluşturulmuştur. Kullanılan bu modelde, düşey hareket (vertical motion) modeli seçilerek, epizot tarihinden geriye doğru son 72 saat içerisinde olan hava taşınımları incelenmiştir. Modelde yörünge yükseklikleri olarak yeryüzüne en yakın ölçüm seviyesi olan 500 m seçilmiştir. Modelde kullanılan meteorolojik veri seti, NCEP Global Data Assimilation System (GDAS) veri tabanları içerisinde, 0,5 derecelik gridler halinde kullanılmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Hava Kirleticilerinin ve Meteorolojik Verilerin Genel İstatistikleri

Araştırmayı kapsayan 2017-2019 yılları arasındaki hava kirleticileri (PM_{10} ve SO_2) ve meteoroloji verilerine (sıcaklık-t, rüzgar hızı-ws, nem-rh, basınç-p ve karışım yüksekliği (sabah – öğlen)) ait genel tanımlayıcı istatistikler (ortalama değerler, %95 önem düzeyinde ortalama değerler için güven aralıkları, verilerle ait değişim aralıkları (minimum/maksimum ve standart sapma) Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2

Hava kirleticilerinin ve meteorolojik verilerin genel istatistikleri

İstatiksel Tanımlayıcı Parametreler	Hava Kalitesi Parametreleri				Meteorolojik Parametreler				
	PM ₁₀ (µg/m ³)	SO ₂ (µg/m ³)	t (°C)	ws (m/sn)	rh (%)	p (mbar)	Karışım Yük. Sabah (m)	Karışım Yük. Öğlen (m)	
Ortalama	45,95	8,21	15,32	2,80	72,30	1003,60	2008,95	2395,68	
Güven Aralığı*	Alt limit	43,92	7,66	14,86	2,67	71,56	1003,26	1968,03	2347,48
	Üst limit	47,98	8,75	15,78	2,93	73,04	1003,93	2049,87	2443,88
Değişim Aralığı	Minimum	5,70	0,40	-4,10	0,00	36,30	987,50	283,00	231,00
	Maksimum	290,60	65,00	30,60	11,10	99,70	1020,50	3415,00	4178,00
Standart Sapma	34,23	9,17	7,83	2,16	12,47	5,65	690,09	812,80	
N	1095	1095	1095	1095	1095	1095	1095	1095	

*%95 önem düzeyinde ortalamanın sahip olduğu alt ve üst limit değerler
N: veri sayısı

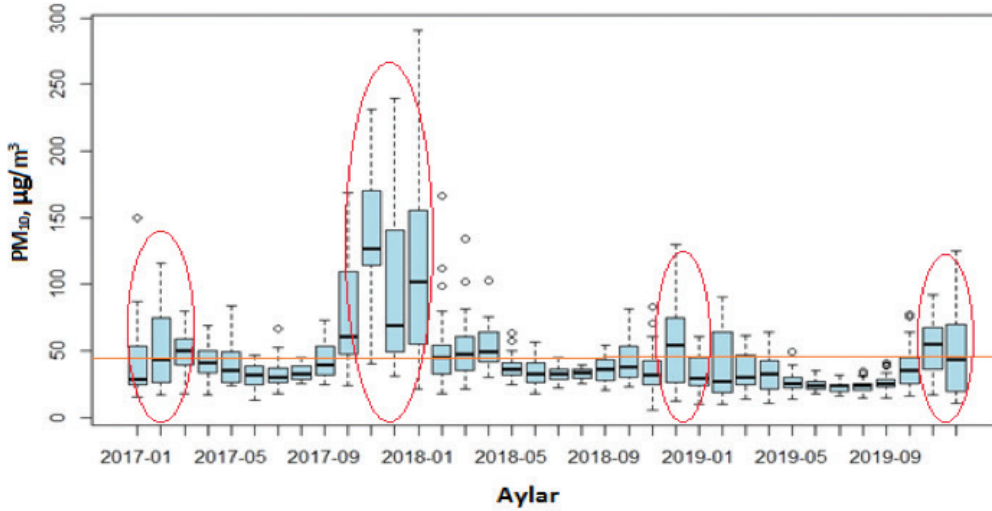
Şehir merkezinde ölçülen yıllık PM₁₀ kirleticisinin ortalama değeri 45,95 µg/m³ olduğu ve istatistiksel açıdan %95 önem seviyesinde PM₁₀ parametresinin ortalama değerinin 43,92 – 47,98 µg/m³ arasında olabileceği hesaplanmıştır. Şehir merkezinde ölçülen yıllık SO₂ parametresinin ortalama değeri 8,21 µg/m³ olduğu ve istatistiksel açıdan %95 önem seviyesinde PM₁₀ parametresinin ortalama değerinin 7,66 – 8,75 µg/m³ arasında olabileceği hesaplanmıştır.

Çalışma periyodu süresince (2017-2019) ölçülen en yüksek PM₁₀ konsantrasyonu 8.Ocak.2018 Pazartesi günü ölçülmüş olup, ölçülen pik değerin şehir merkezinde trafik yoğunluğundan ve ısıtma amaçlı kullanılan yakıtlardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Yine aynı şekilde bu durum SO₂ konsantrasyonu için de benzer durumlardan kaynaklandığı ve ölçülen en yüksek SO₂ konsantrasyonu 2.Aralık.2018 Cumartesi günü ölçülmüş olup, konutlarda ısınma amacıyla şehrin bir kısmında halen kömürün başlıca ısınma amaçlı yakıt olarak kullanılmasına bağlı olduğu düşünülmektedir.

3.2. Kirleticilerin Zamansal Dağılımları

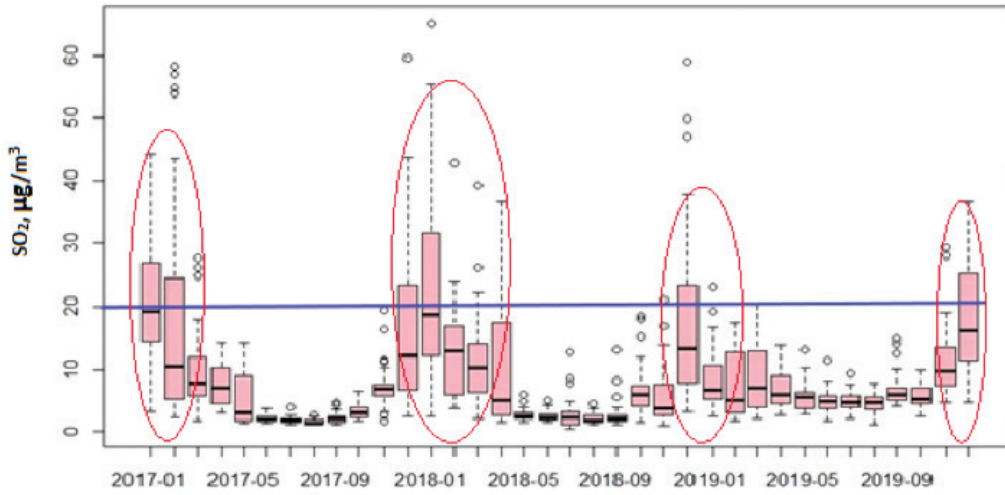
Şehir merkezinde ölçülen hava kirleticilerinin (PM₁₀ ve SO₂) 2017-2019 yılları arasında zamansal değişimlerini ifade eden 3 yıllık veri setlerinin aylık ortalama değerlerinin değişimini gösteren box-plot grafikleri Şekil 3 ve Şekil 4’de sunulmuştur.

Şekil 3’de sunulan box-plot grafiğinde turuncu hatlar yıllara ait kademeli olarak azalım gösteren yasal sınır değerlerini (2017 için 48 µg/m³, 2018 için 44 µg/m³ ve 2019 için 40 µg/m³) temsil etmektedir (HKDYY, 2008) ve yine aynı şekilde kırmızı alanların karşılık geldiği dönemler incelendiğinde PM₁₀ kirletici seviyesinin özellikle sonbaharın sonlarında ve kış aylarında pik yaptığı açıkça görülmektedir.



Şekil 3. PM₁₀ seviyelerinin zamansal değişimleri.

Özellikle 2017 yılı son ayları ve 2018 yılı ilk aylarında PM₁₀ yönünden lokal kaynakların dışında kıtasal taşınımın da etkili olduğu önemli epizotlar görülmesi nedeniyle diğer yıllara oranla daha yüksek PM₁₀ seviyeleri gözlemlenmiştir.



Şekil 4. SO₂ seviyelerinin zamansal değişimleri.

Yine aynı durum Şekil 4’de sunulan box-plot grafiğindeki kırmızı alanların karşılık geldiği dönemler incelendiğinde SO₂ kirlenici seviyesinin özellikle sonbaharın sonlarında ve kış aylarında pik yaptığı açıkça görülmektedir. Yine aynı grafik üzerinde mavi hat ise SO₂ için yıllık ve kış dönemleri için yasal sınır değeri olan 20 µg/m³ değerini göstermektedir (HKDYY, 2008).

3.3. Varyans Analizi (ANOVA)

2017 – 2019 yılları arasında 3 yıllık süre zarfında kirleneticilerin hangi aralıklarda en yüksek veya en düşük seviyelere geldiğini belirlemek adına ve ölçülen kirlenici seviyelerinin yıllar bazında aralarında fark olup olmadığını tespit etmek amacıyla varyans analizli (ANOVA) ve Post-Hoc LSD (Least Significant Difference) çoklu karşılaştırma testi yapılmıştır. Yapılan analiz sonuçları Tablo 3 ve 4’de sunulmuştur

Tablo 3

2017-2019 yılları arasında PM₁₀ ve SO₂ istatistikleri

Kirlenici	Yıllar	N	Ortalama	Std. Sapma	Güven Aralıkları*		Minimum	Maksimum
					Alt Limit	Üst Limit		
PM ₁₀	2017	365	56,30	41,82	51,99	60,60	13,2	239,6
	2018	365	47,83	33,94	44,34	51,32	5,7	290,6
	2019	365	33,72	18,96	31,76	35,67	9,5	124,8
SO ₂	2017	365	8,04	10,05	7,01	9,08	1,1	59,6
	2018	365	8,74	10,84	7,62	9,85	0,4	65,0
	2019	365	7,84	5,82	7,24	8,44	1,1	36,8

* %95 önem düzeyinde ortalamanın sahip olduğu alt ve üst limit değerler

PM₁₀ ve SO₂ istatistikleri toplam 3 yıllık süre boyunca, her yıl için toplam 365 adet verinin yıllar bazında PM₁₀ kirlenici seviyelerinin ortalamalarına bakıldığında yıllık ortalamaların 95% önem düzeyinde ortalamalara ve ANOVA testi sonucuna bağlı olarak birbirine eşit olmadığı görülmüştür. Yıllar arasında farklılıklar olduğu tespit edilmiştir (PM₁₀ için pvalue < 0,05). SO₂ kirlenici seviyelerinin ortalamalarına bakıldığında yıllık ortalamaların 95% önem düzeyinde ortalamalara ve ANOVA testi sonucuna bağlı olarak birbirine eşit olduğu ve yıllar arasında farklılıklar olmadığı tespit edilmiştir (SO₂ için pvalue > 0,05).

Tablo 4

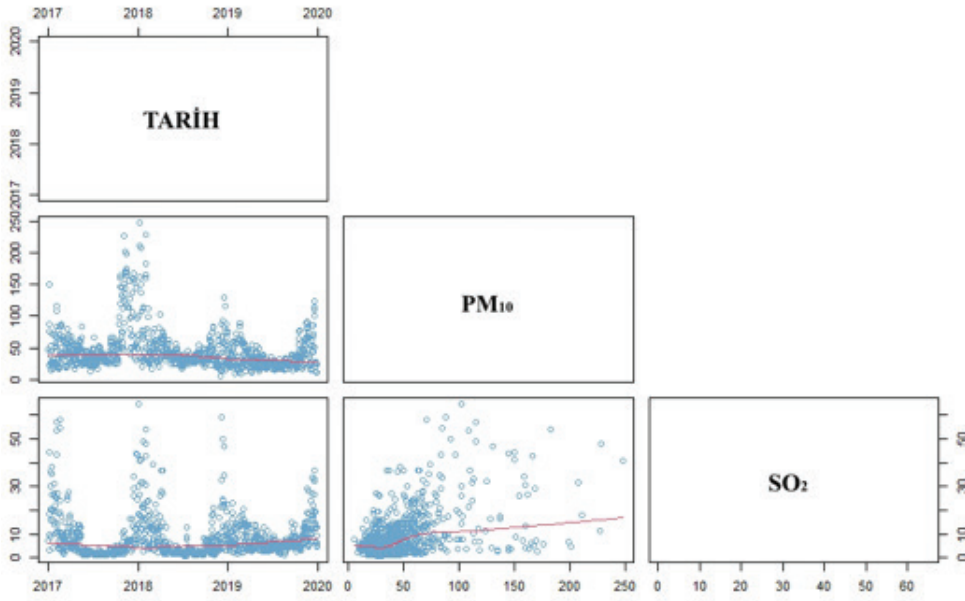
2017-2019 yılları arasında PM₁₀ ve SO₂ kirlenicilerinin çoklu karşılaştırma sonuçları

Kirlenici	(I) Yıl	(J) Yıl	Ortalama Farkı (I-J)	P _{values}	Kirlenici	(I) Yıl	(J) Yıl	Ortalama Farkı (I-J)	P _{values}
PM ₁₀	2017	2018	8,47	0,00	SO ₂	2017	2018	-0,69	0,31
		2019	22,58	0,00			2019	0,21	0,76
	2018	2017	-8,47	0,00		2018	2017	0,69	0,31
		2019	14,11	0,00			2019	0,90	0,19
	2019	2017	-22,58	0,00		2019	2017	-0,21	0,76
		2018	-14,11	0,00			2018	-0,90	0,19

Post-Hoc çoklu karşılaştırma testi LSD (Least Significant Difference) yöntemi sonuçlarına göre PM₁₀ için hesaplanan en yüksek yıllık ortalama 2017 yılında kaydedilmiştir. En düşük değer ise 2019 yılında kaydedildiği tespit edilmiştir. Yıllara ait farklılıklar anlamlıdır (p_{value} < 0.05). SO₂ için en hesaplanan en yüksek yıllık ortalama 2018 yılında kaydedilmiştir. En düşük değer ise 2019 yılında kaydedildiği tespit edilmiştir. Yıllara ait anlamlı bir fark tespit edilmemiştir (p_{value} > 0.05).

3.4. Hava kirlenicilerinin ve Meteorolojik Parametrelerin İlişkisi

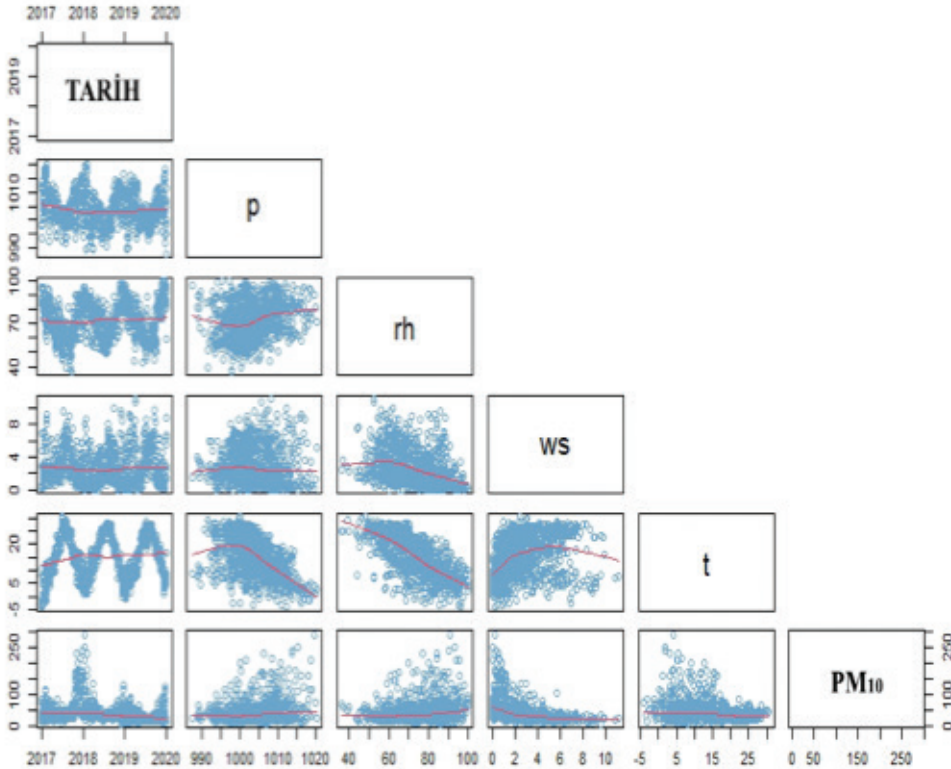
Yapılan çalışma kapsamında, hava kirlenicilerinin (PM₁₀ ve SO₂) uzun yıllık verileri ile bu aynı süre içerisinde alınan meteorolojik verileri Carslaw ve Ropkins (2012) ve Carslaw (2015) tarafından oluşturulan ve R ortamında kullanılan "Openair" algoritmaları yardımıyla analiz edilmiştir (Carslaw ve Ropkins, 2012; Carslaw, 2015). Hava kirlenicileri ve meteorolojik parametreler arasındaki ilişki oluşturulan grafikler yardımıyla açıklanmaya çalışılmıştır.



Şekil 5. Hava kirlenim verilerinin zamansal değişimi ve aralarındaki ilişki.

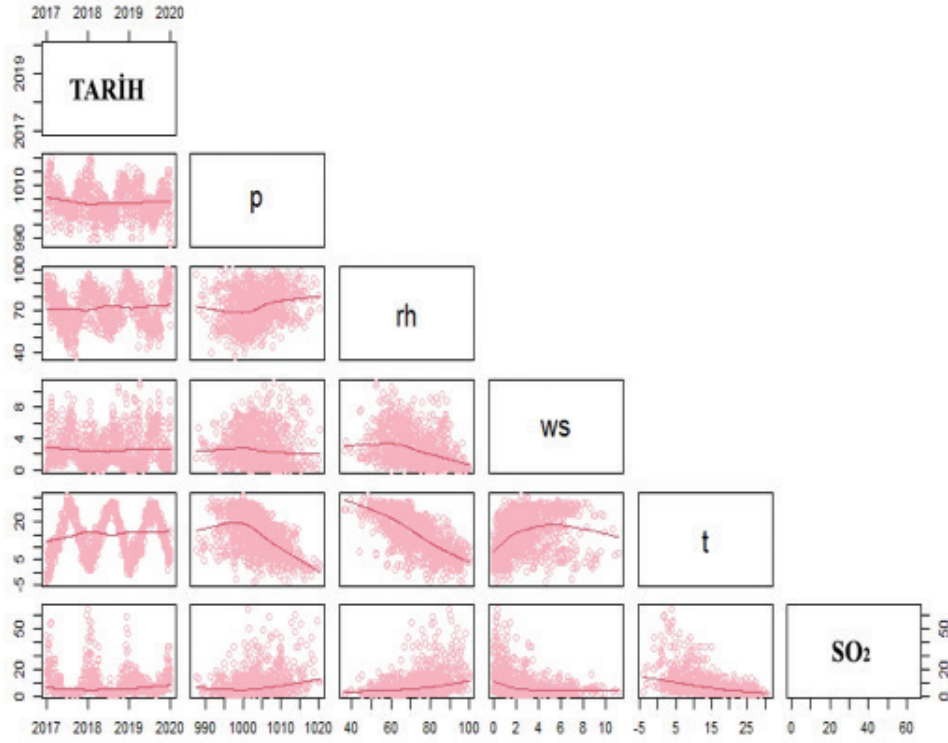
Şekil 5’de PM₁₀ ve SO₂’nin 2017-2019 yılları arasındaki zamansal değişimine bakıldığında özellikle kış döneminde bir artış göze çarpmakta, PM₁₀ ve SO₂’nin kendi aralarındaki ilişkiyi ifade eden grafiğe bakıldığında kirlenim arasında güçlü bir korelasyondan bahsedilebilir. Başka bir ifade ile PM₁₀ kirlenim seviyelerinin artmasına karşı SO₂ verilerinde de bir artış söz konusu olmaktadır. Zamansal grafiklere göre bu olay genellikle kış döneminde yani soğuk mevsimlerde gerçekleşmektedir.

Hava kirlenim verileri (PM₁₀ ve SO₂) ve meteorolojik faktörler (sıcaklık-t, rüzgar hızı-ws, nem-rh, basınç-p ve karışım yüksekliği (sabah – akşam)) arasındaki ilişkinin anlaşılabilmesi amacıyla her ikisi arasındaki dağılımı ifade eden grafikler oluşturulmuştur (Şekil 6 ve Şekil 7).



Şekil 6. PM₁₀ ve meteorolojik parametrelerin ilişkisi.

Şekil 6’da 2017-2019 yılları arasında 3 yıllık zaman diliminde Balıkesir şehir merkezindeki hava kirleticisi (PM_{10}) ve yine Balıkesir şehir merkezi meteoroloji verileri (sıcaklık-t, rüzgar hızı-ws, nem-rh, basınç-p ve karışım yüksekliği (sabah – akşam)) arasındaki ilişkiyi açıklayan grafik Şekil 5’de sunulmuştur. PM_{10} seviyelerinde değişimlere neden en önemli faktörler sıcaklık (t) ve rüzgar hızıdır (ws). Grafikten de anlaşılacağı üzere sıcaklık seviyeli arttıkça PM_{10} seviyelerinde azalma gerçekleşmekte ve aynı durum rüzgar hızı (ws) için de geçerli olduğu görülmektedir.



Şekil 7. SO₂ ve meteorolojik parametrelerin ilişkisi.

Şekil 7’de 2017-2019 yılları arasında 3 yıllık zaman diliminde Balıkesir şehir merkezindeki hava kirleticisi (SO₂) ve yine Balıkesir şehir merkezi meteoroloji verileri (sıcaklık-t, rüzgar hızı-ws, nem-rh, basınç-p ve karışım yüksekliği (sabah – akşam)) arasındaki ilişkiyi açıklayan grafik Şekil 6’da sunulmuştur. SO₂ seviyelerinde farklılık oluşturan en önemli parametreler faktörler sıcaklık (t) ve rüzgar hızıdır (ws). Grafikten de anlaşılacağı üzere sıcaklık seviyeleri arttıkça SO₂ seviyelerinde azalma gerçekleşmekte ve aynı durum rüzgar hızı (ws) için de geçerli olduğu görülmektedir.

3.5. Korelasyon Analizleri

Yapılan çoklu korelasyon analizleri (Pearson korelasyon) sonuçları Tablo 5’de sunulmuştur. Balıkesir şehir merkezinde PM_{10} seviyelerindeki değişimler iki parametre ile ilişkilendirilebilir. En yüksek korelasyon katsayısına sahip olan rüzgar hızı (ws) ile PM_{10} arasında $r = -0,45$ değerinde negatif bir korelasyon olduğu tespit edilmiştir. İkinci en yüksek korelasyon katsayısı sıcaklık (t) ile PM_{10} arasında $r = -0,34$ değerinde yine negatif bir korelasyon olduğu tespit edilmiştir. Özet olarak, şehir merkezindeki önem seviyesine göre sırasıyla rüzgar hızı (ws) ve sonrasında sıcaklığın (t) azalması durumunda PM_{10} seviyeleri artmaktadır.

Yine aynı şekilde, Balıkesir şehir merkezinde en yüksek korelasyon katsayısına sahip olan SO₂ ve sıcaklık (t) verileri arasında $r = -0,53$ değerinde negatif bir korelasyon olduğu tespit edilmiştir. İkinci en yüksek korelasyon katsayısı SO₂ ve karışım yüksekliği (sabah) ile arasında $r = 0,48$ değerinde pozitif bir korelasyon olduğu tespit edilmiştir. Özet olarak, şehir merkezindeki önem seviyesine göre sırasıyla sıcaklık (t) ve karışım yüksekliği (sabah) değerlerinin artması durumunda SO₂ değerlerinde azalma söz konusudur.

Tablo 5

Çoklu korelasyon sonuçları

		PM ₁₀	SO ₂	t	ws	rh	p	Karışım Yük. Sabah	Karışım Yük. Öğlen
PM ₁₀	r	1	0,51*	-0,34*	-0,45*	0,27*	0,28*	-0,32*	-0,24*
	P _{values}		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SO ₂	r	0,51*	1	-0,53*	-0,35*	0,37*	0,31*	-0,48*	-0,46*
	P _{values}	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
t	r	-0,34*	-0,54*	1	0,24*	-0,70*	-0,51*	0,93*	0,94*
	P _{values}	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ws	r	-0,45*	-0,35*	0,26*	1	-0,36*	-0,01	0,08*	0,19*
	P _{values}	0,00	0,00	0,00		0,00	0,71	0,00	0,00
rh	r	0,27*	0,37*	-0,70*	-0,36*	1	0,24*	-0,59*	-0,69*
	P _{values}	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00
p	r	0,29*	0,31*	-0,51*	-0,01	0,24*	1	-0,50*	-0,41*
	P _{values}	0,00	0,00	0,00	0,71	0,00		0,00	0,00
Karışım Yük. Sabah	r	-0,32*	-0,49*	0,93*	0,31*	-0,59*	-0,50*	1	0,92*
	P _{values}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00
Karışım Yük. Öğlen	r	-0,25*	-0,46*	0,94*	0,19*	-0,69*	-0,41*	0,92*	1
	P _{values}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

*Fark %95 önem düzeyinde istatistiksel olarak önemlidir

Sıklıkla kullanılan bir diğer korelasyon yöntemi olan Kendall's Tau korelasyon analizi sonuçları Tablo 6'da verilmiştir.

Yapılan bu analizin Tablo 6'teki sonuçlarına bakıldığında, bir önceki korelasyon analizleri (Pearson korelasyon) sonuçlarına benzer sonuçlar elde edilmiştir. PM₁₀ seviyelerindeki değişimler en yüksek korelasyon (negatif korelasyon) katsayısına sahip olan rüzgar hızı (ws) ile ilişkilendirilirken SO₂ seviyelerindeki değişimler en yüksek korelasyon (negatif korelasyon) katsayısına sahip olan sıcaklık (t) ile ilişkilendirilmektedir.

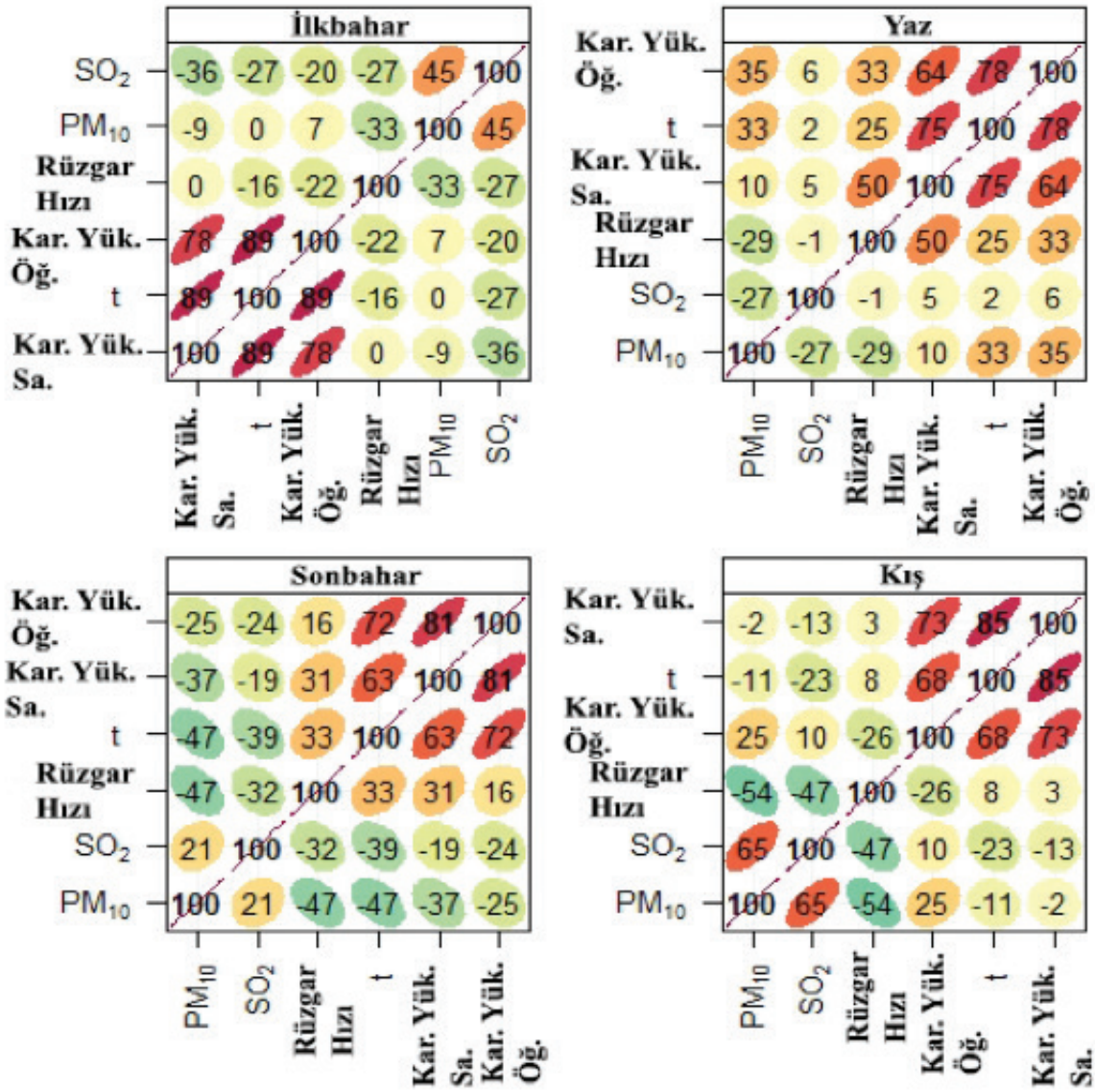
Yapılan analizler kapsamında, verilerin mevsimlere ait korelasyonları da incelenmiş ve mevsimlere ait grafikleri R ortamında oluşturulmuştur.

Tablo 6

Çoklu korelasyon sonuçları

		PM ₁₀	t	ws	rh	p	Kar. Yük. Sabah	Kar. Yük. Öğlen	
Kendall's Tau Korelasyonu	PM ₁₀	r	1,00	-0,20*	-0,44*	0,16*	0,15*	-0,21*	-0,15*
		P _{values}	.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		N	1095	1095	1095	1095	1095	1095	1095
SO ₂	SO ₂	r	1,00	-0,45*	-0,29*	0,29*	0,21*	-0,42*	-0,40*
		P _{values}	.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		N	1095	1095	1095	1095	1095	1095	1095

*Fark %95 önem düzeyinde istatistiksel olarak önemlidir.



Şekil 8. Mevsimsel korelasyon sonuçları.

Şekil 8’de mevsimsel korelasyon analizlerine göre en yüksek korelasyon değeri kış mevsiminde sıcaklık ve karışım yüksekliği (sabah) verileri arasında ve (0,85) değerinde pozitif yönlü korelasyon katsayısı olarak görülmektedir. Kış mevsimlerinde PM₁₀ ve rüzgar hızı (ws) arasında (-0,54) değerinde negatif korelasyon, yine kış mevsimlerinde SO₂ ile rüzgar hızı (ws) arasında (-0,47) değerinde negatif korelasyon tespit edilmiştir.

3.6. Regresyon Analizleri

Hava kirlenmeleri (PM₁₀ ve SO₂) verilerinin meteorolojik verilerden hangi düzeyde ve hangi parametreden daha fazla etkilendiğini yorumlayabilmek adına her bir kirlenme parametresi için ayrı ayrı regresyon modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan modelde kullanılan hava kirlenmeleri (PM₁₀ ve SO₂) verileri bağımlı değişken, çalışmada kullanılan tüm meteorolojik veriler ise bağımsız değişken olarak işlenmiş ve her model için regresyon modelleri oluşturulmuştur. Model sonuçları, PM₁₀ tahminleri için Tablo 7’de ve SO₂ tahminleri için Tablo 8’de sunulmuştur.

Tablo 7

PM₁₀ için regresyon modeli

Model Değişkenleri	Model Katsayıları (β)	p _{values}	RMSE	F istatistiği	adjR ²
β ₀	-1111,19	0,00			
β ₁ (ws)	-6,46	0,00			
β ₂ (rh)	-0,06	0,60			
β ₃ (p)	1,17	0,00	28,62	79,3 (p=0,00)	0,301
β ₄ (t)	-2,05	0,00			
β ₅ (Kar. Yük. Sabah)	0,004	0,34			
β ₆ (Kar. Yük. Öğlen)	0,011	0,00			
β ₀	-1078,76	0,00			
β ₁ (ws)	-6,24	0,00			
β ₂ (p)	1,14	0,00	28,60	118,91 (p=0,00)	0,301
β ₃ (t)	-1,89	0,00			
β ₄ (Kar. Yük. Öğlen)	0,013	0,00			

Tablo 7’de PM₁₀ değişimini açıklayabilmek için tüm meteorolojik parametrelerin (rüzgar hızı (ws), nem (rh), basınç (p), sıcaklık (t) ve karışım yüksekliği (sabah – akşam)) gibi değişkenlerin eklenmesi ile modelin PM₁₀ değişimini açıklayabilme oranı adjR²= 0,301 olarak hesaplanmış olup nem(rh) ve karışım yüksekliği (sabah) verilerinin oluşturulan modelde etkilerinin olmadığı görülmüştür ($p_{nem}=0,60 > 0,05$) ($p_{kar. Yük. Sab.}=0,34 > 0,05$). Bu nedenle, ilk modelde anlamsız olarak belirlenen değişkenler modelden çıkartılarak, yeniden model oluşturulmuştur. Yeni oluşturulan modelde kullanılan tüm değişkenlerin anlamlı olduğu tespit edilmiştir ve yeni oluşturulan bu modele ait hata miktarı, RMSE değeri 28,60 değerine inerken ve modelin anlamlılığının ölçüsü olan F istatistiği ise 118,91 değerine yükselmiştir. Sonuç olarak, oluşturulan regresyon modeli aşağıdaki denklem (3.1) ile ifade edilebilir.

$$PM_{10} = -1078,76 - 6,24\{ws\} + 1,14\{p\} - 1,89\{t\} + 0,013\{Kar. Yük. Öğlen\} \quad (3.1)$$

Oluşturulan regresyon modelinde, en etkin değişken olan rüzgar hızının (ws) 1 m/sn artması ile PM₁₀ seviyesinde yaklaşık 6,24 (~ 6) µg/m³ azalma olabileceği ayrıca, bir diğer etkin değişken olan sıcaklık (t) değerinin yaklaşık olarak 1 °C artması ile PM₁₀ seviyesinde 1,89 (~2) µg/m³ azalma olabileceği tahmin edilmiştir.

Tablo 8’de SO₂ tahmini için oluşturulan regresyon modelinde bütün meteorolojik parametrelerin (rüzgar hızı (ws), nem (rh), basınç (p), sıcaklık (t) ve karışım yüksekliği (sabah – akşam)) eklenmesi halinde modelin açıklanabilirliği (adjR²=0,349) olarak hesaplanmış olup karışım yüksekliği (öğlen) verilerinin modelde etkisinin olmadığı görülmüştür ($p_{kar. Yük. Öğ.}=0,65 > 0,05$). Bu nedenle, ilk modelde anlamsız olarak belirlenen değişken modelden çıkartılarak, yeniden model oluşturulmuştur. Yeni oluşturulan modelde kullanılan tüm değişkenlerin anlamlı olduğu tespit edilmiştir ve yeni oluşturulan modele ait hata miktarı, RMSE değeri 7,39 değerine düşerken ve modelin anlamlılığının ölçüsü olan F istatistiği ise 118,4 değerine yükselmiştir. Sonuç olarak, oluşturulan regresyon modeli aşağıdaki denklem (3.2) ile ifade edilebilir.

$$SO_2 = -113,1 - 1,16\{ws\} - 0,08\{rh\} + 0,136\{p\} - 0,86\{t\} + 0,003\{Kar. Yük. Sabah\} \quad (3.2)$$

Tablo 8

SO₂ için regresyon modeli

Model Adımları	Model Katsayıları β	p _{values}	RMSE	F istatistiği	adjR ²
β_0	-106,6	0,03			
β_1 (ws)	-1,14	0,00			
β_2 (rh)	-0,08	0,01			
β_3 (p)	0,13	0,01	7,40	98,6 (p=0,00)	0,349
β_4 (t)	-0,88	0,00			
β_5 (kar. Yük. Sabah)	0,003	0,01			
β_6 (kar. Yük. Öğlen)	0,00	0,65			
β_0	-113,1	0,02			
β_1 (ws)	-1,16	0,00			
β_2 (rh)	-0,08	0,003			
β_3 (p)	0,136	0,004	7,39	118,4 (p=0,00)	0,349
β_4 (t)	-0,86	0,00			
β_5 (kar. Yük. Sabah)	0,003	0,00			

SO₂ için oluşturulan regresyon modelinde ise, en etkin değişken olan rüzgar hızının (ws) 1 m/sn artması ile SO₂ seviyesinde yaklaşık 1,16 (~1) µg/m³ azalma olabileceği ayrıca, bir diğer etkin değişken olan sıcaklık (t) değerinin yaklaşık olarak 1 °C artması ile SO₂ seviyesinde yaklaşık 0,8 (~1) µg/m³ azalma olabileceği tahmin edilmiştir.

3.7. Epizot Analizleri

Belirli dönemlerde yaşanan pik değerlerin hangi düzeyde meteorolojik parametrelerden kaynaklandığını daha iyi anlayabilmek, hem de hava kirliliğine sebep olan partikül madde (PM₁₀) kirleticisinin meteorolojik verilerden (karışım yüksekliği (sabah-öğlen)) hangi düzeyde etkilendiğini yorumlayabilmek için epizot dönemleri belirlenmiştir. Ölçüm değeri 100 µg/m³'ten daha büyük olan ve birbirini takip eden art arda toplam 5 günden daha uzun bir aralığa sahip olan ölçüm aralıkları, epizot dönemleri olarak seçilmiştir. Epizot dönemleri Tablo 9'da sunulmuştur.

Tablo 9

PM₁₀ dönemsel epizot aralıkları

Birinci Dönem		İkinci Dönem		Üçüncü Dönem		Dördüncü Dönem	
Tarih	Değer (µg/m ³)	Tarih	Değer (µg/m ³)	Tarih	Değer (µg/m ³)	Tarih	Değer (µg/m ³)
07.11.2017	144,66	07.12.2017	159,56	02.01.2018	101,87	19.01.2018	112,47
08.11.2017	201,65	08.12.2017	176,10	03.01.2018	101,87	20.01.2018	115,26
09.11.2017	167,11	09.12.2017	136,59	04.01.2018	101,87	29.01.2018	160,30
10.11.2017	135,20	10.12.2017	107,03	05.01.2018	101,87	30.01.2018	228,20
11.11.2017	171,12	11.12.2017	175,91	06.01.2018	161,66	31.01.2018	182,29
12.11.2017	170,01	12.12.2017	154,53	07.01.2018	247,80	01.02.2018	166,07
13.11.2017	199,32	13.12.2017	168,55	08.01.2018	290,58		
14.11.2017	176,38	14.12.2017	158,68	09.01.2018	211,19		
15.11.2017	164,90	15.12.2017	131,20	10.01.2018	137,52		
16.11.2017	118,20			11.01.2018	207,86		
17.11.2017	114,00			12.01.2018	150,20		
18.11.2017	114,00						
19.11.2017	114,00						
20.11.2017	114,00						
21.11.2017	114,00						
22.11.2017	114,00						
23.11.2017	114,00						
24.11.2017	157,15						
25.11.2017	231,43						
26.11.2017	213,11						
27.11.2017	128,30						

Tablo 9'da görüleceği üzere PM₁₀ için ölçüm değeri 100 µg/m³'ten büyük olan, 2017-2019 yılları arasında toplam 4 farklı dönemden oluşan epizot dönemleri mevcuttur. Birinci dönem 07.11-27.11.2017 tarihleri arasında toplam 21 günden oluşmaktadır. İkinci dönem 07.12-15.12.2017 tarihleri arasında toplam 9 günden oluşmaktadır. Üçüncü dönem ise 02.01-12.01.2018 tarihleri arasında 11 günde gerçekleşirken dördüncü ve son epizot dönemi 19.01-01.02.2018 tarihleri arasında toplam 6 günden ibarettir. PM₁₀ için tespit edilen epizot dönemlerinin meteorolojik parametreler (karışım yüksekliği (sabah-öğlen)) ile muhtemel ilişki öncelikle korelasyon analizleri ile incelenmiştir. Buna göre gerçekleştirilen korelasyon analizi sonuçları Tablo 10'da sunulmuştur.

Tablo 10

PM₁₀ Epizot Dönemleri için korelasyon analiz sonuçları

Dönem		PM ₁₀	Karışım Yük. Sabah	Karışım Yük. Öğlen	
1	PM ₁₀	r	1	-0,16	0,58*
		P _{values}		0,49	0,01
	Karışım Yük. Sabah	r	-0,16	1	0,48*
		P _{values}	0,49		0,03
	Karışım Yük. Öğlen	r	0,58*	0,48*	1
		P _{values}	0,01	0,03	
2	PM ₁₀	r	1	-0,67*	-0,29
		P _{values}		0,05	0,45
	Karışım Yük. Sabah	r	-0,67*	1	0,43
		P _{values}	0,05		0,25
	Karışım Yük. Öğlen	r	-0,29	0,43	1
		P _{values}	0,45	0,25	
3	PM ₁₀	r	1	-0,16	0,18
		P _{values}		0,64	0,59
	Karışım Yük. Sabah	r	-0,16	1	-0,55
		P _{values}	0,64		0,08
	Karışım Yük. Öğlen	r	0,18	-0,55	1
		P _{values}	0,59	0,08	
4	PM ₁₀	r	1	-0,71	-0,51
		P _{values}		0,11	0,30
	Karışım Yük. Sabah	r	-0,71	1	0,84*
		P _{values}	0,11		0,04
	Karışım Yük. Öğlen	r	-0,51	0,84*	1
		P _{values}	0,30	0,04	

* Fark %95 önem düzeyinde istatistiksel olarak önemlidir

Balıkesir şehir merkezinde dönemsel PM₁₀ seviyelerindeki pik artışlara ilişkin, meteorolojik parametreler (karışım yüksekliği (sabah-akşam)) ile yapılan korelasyon analizi sonuçlarına göre, birinci dönemdeki PM₁₀ değerleri ile karışım yüksekliği (öğlen) değerleri ile aralarında pozitif yönde 0,58 değerinde korelasyon tespit edilmiştir. İkinci dönemde ise PM₁₀ değerleri ile karışım yüksekliği (sabah) değerleri ile aralarında negatif yönde 0,67 değerinde korelasyon tespit edilmiştir. Üçüncü ve dördüncü adımlarda ise PM₁₀ seviyelerindeki değişimlerin karışım yüksekliği (sabah-öğlen) değerleri ile istatistiksel olarak önemli düzeyde ilişki saptanmamıştır ($p_{\text{kar. Yük. Sabah-akşam.}} > 0,05$).

Tablo 11

PM₁₀ epizot dönemleri için regresyon model sonuçları

Dönem	β	Model Katsayıları	P _{values}	RMSE	F istatistiği	adjR ²
1	β_0	95,2	0,04	25,73	12,6	0,53
	β_1	-0,09	0,04			
	β_2	0,11	0,00			
2	β_0	227,3	0,01	17,75	2,40	0,26
	β_1	-0,05	0,10			
	β_2	-0,001	0,98			
3	β_0	146,59	0,60	72,33	0,16	-0,20
	β_1	-0,03	0,84			
	β_2	0,04	0,75			
4	β_0	309,11	0,04	39,0	1,6	0,19
	β_1	-0,24	0,30			
	β_2	0,04	0,75			

 β_0 : Regresyon Sabiti β_1 : Karışım Yüksekliği-Sabah β_2 : Karışım Yüksekliği-Öğlen

Tablo 11’de PM₁₀ verileri için oluşturulan dönemsel model adımlarına göre, dönemlerde modele bağımsız değişken olarak karışım yüksekliği (sabah-akşam) verileri dahil edilmiştir buna göre, birinci adımda doğruluk değerli (adjR²=0,53) olarak hesaplanmıştır. İkinci, üçüncü ve dördüncü adımda modele eklenen karışım yüksekliği verilerinin istatistiksel olarak önemsiz olduğu görülmüştür ($p_{\text{kar. Yük. Sabah-akşam}} > 0,05$). Sonuç olarak, Tablo 11’de verilen epizot dönemlerinden sadece 1. Döneme ait olan 7-27.Kasım.2017 tarihlerinde gerçekleşen epizot dönemlerinde sabah ve öğlen vakti karışım yüksekliklerinin model sonuçlarına göre anlamlı olduğu belirlenmiştir. Oluşturulan regresyon modeli aşağıda verilen denklem (3.3) ile sunulmuştur.

$$PM_{10} = 95.2 - 0,09\{Kar. Yük. Sabah\} + 0.11\{Kar. Yük. Öğlen\} \quad (3.3)$$

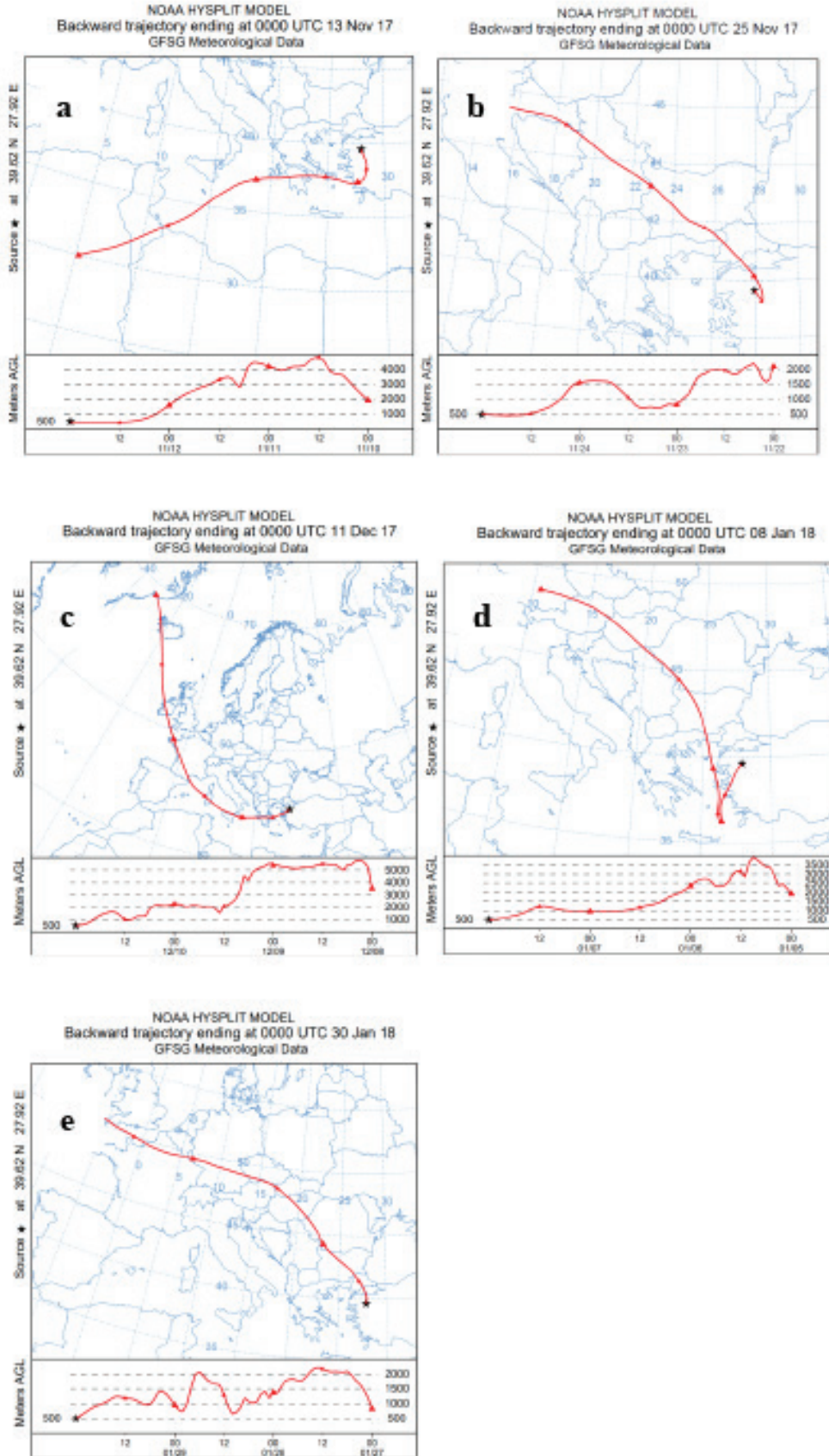
Karışım yükseklikleri değişimlerinin PM₁₀ seviyelerinin tahmin edilmesi için oluşturulan regresyon modelinde istatistiksel olarak anlamlı olduğu ve PM₁₀ seviyelerinin tahmin edilmesinde, sabah vaktinde oluşan karışım yüksekliğinin negatif yönde, öğle vakti oluşan karışım yüksekliklerinin ise pozitif yönde etkili olabileceği düşünülmektedir.

3.8. HYSPLIT Model Analizleri

PM₁₀ için toplam 3 yıllık (2017-2019) değerlendirme süresince epizot günleri belirlenmiştir buna göre PM₁₀ seviyeleri için en yüksek konsantrasyonların yaşandığı tarihler sırasıyla 13.11.2017, 25.11.2017, 11.12.2017, 08.01.2018 ve 30.01.2018 olmak üzere belirlenmiştir.

Epizot gününe ait olağan dışı durumun incelenmesinde HYSPLIT Model kullanılmıştır. Şehir merkezinin olduğu bölgede dış bölgelerden gelen toz taşınımı önem kazanmaktadır ve zaman zaman da etkili olduğu tespit edilmiştir.

Tarihlere göre taşınım senaryoları Şekil 9: (a), (b), (c), (d) ve (e) verilmiştir.



Şekil 9. Epizot günlerine ait HYSPLIT geri yörünge PM_{10} taşınımları.

HYSPLIT modeli sonuçlarına göre, PM₁₀ için (a) 13.11.2017 tarihinde şehir merkezinde ölçülen 199,32 µg/m³ pik değer Kuzey Afrika'dan başlayan ve Balıkesir ilinin de içinde bulunduğu ülkenin batı kısımlarını etkileyen hava kütlesi hareketinin olduğu görülmektedir. (b) 25.11.2017, (d) 08.01.2018 ve (e) 30.01.2018 tarihlerinde şehir merkezinde sırasıyla ölçülen 231,43 µg/m³, 290,58 µg/m³ ve 228,20 µg/m³ pik değerlerin Batı Avrupa'dan ve özellikle Bulgaristan üzerinden etkili olan yörüngelerinin ülkenin kuzey batı bölgelerini etkileyen hava hareketlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Daha önce yapılan benzer bir çalışmada, Bulgaristan'ın güney doğu bölgesinde bulunan ve farklı kapasitelerdeki kömürle çalışan santrallerin olması bu bölgelerden oluşabilecek yüksek konsantrasyonlarda partikül madde taşınımına neden olabileceği düşünülmektedir (Mutlu, 2019). Yine Şekil 9'da sunulan model sonuçlarından, (c) 11.12.2017 tarihinde şehir merkezinde ölçülen 175,91 µg/m³ pik değer Kuzey Afrika'dan ve Batı Avrupa'dan gelen taşınım hareketlerinden kaynaklandığı öngörülmektedir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, Güney Marmara bölgesi içerisinde bulunan Balıkesir şehrinde hava kirletici parametrelerinden olan PM₁₀ ve SO₂ kirleticilerinin meteorolojik koşullar etkisinde oluşumlarının incelenmesi hedeflenmiştir. Balıkesir iline ait yıllık ortalama PM₁₀ konsantrasyonları incelendiğinde şehirde genel olarak PM₁₀ seviyelerinin mevsimsel geçiş dönemleri dışında çok yüksek seviyelere ulaşmadığı görülmektedir. En yüksek değerler Bandırma Merkez ve Balıkesir Merkez İstasyonlarında gözlemlenmiştir. Balıkesir Merkez İstasyonlarında ölçülen yıllık ortalama PM₁₀ değerleri, çalışma dönemini kapsayan yıllar itibariyle sonbahar sonları ve kış mevsimlerinde sınır değerlerin üzerinde olduğu gözlemlenmiştir. Balıkesir il merkezinde ölçülen yıllık ortalama SO₂ değerleri, çalışma dönemlerini içeren yıllar itibariyle sınır değeri olan 20 µg/m³'ün altında olduğu gözlemlenmiştir.

Hava kirleticileri (PM₁₀ ve SO₂) ve meteorolojik parametreler (sıcaklık, rüzgar hızı, nem, basınç ve karışım yüksekliği (sabah – öğlen)) arasındaki ilişkinin belirlenmesi amacıyla yapılan analizlerde, hava kirleticilerinin (PM₁₀ ve SO₂), 2017-2019 yılları arasında 3 yıllık verilerin zamansal değişimlerini ifade eden aylık ortalamalardan oluşturulan box-plot grafiklerine göre, özellikle sonbaharın sonlarında ve kış aylarında artış yönünde pik seviyeler yaptığı tespit edilmiştir. Post-Hoc çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre PM₁₀ için hesaplanan en yüksek yıllık ortalama 2017 yılında 56,30 µg/m³ olarak kaydedilmiştir. En düşük değer ise 2019 yılında 33,72 µg/m³ olduğu tespit edilmiştir. SO₂ için hesaplanan en yüksek yıllık ortalama 2018 yılında 8,74 µg/m³ olarak kaydedilmiştir. En düşük değer ise 2019 yılında 7,84 µg/m³ olduğu tespit edilmiştir.

Hava kirleticileri (PM₁₀ ve SO₂) ve meteorolojik parametrelerin arasında çoklu korelasyon analizleri yapılmıştır. Balıkesir il merkezinde PM₁₀ seviyelerindeki değişimler iki parametre ile ilişkilendirilebilir, en yüksek korelasyon katsayısına sahip olan rüzgar hızı (ws) ile PM₁₀ arasında eksi yönde %45 oranında negatif bir korelasyon olduğu tespit edilmiştir. İkinci en yüksek korelasyon katsayısı sıcaklık (t) ile PM₁₀ arasında eksi yönde %34 oranında negatif bir korelasyon olduğu tespit edilmiştir. Balıkesir il merkezinde SO₂ seviyelerindeki değişimler iki parametre ile ilişkilendirilebilir, en yüksek korelasyon katsayısına sahip olan sıcaklık (t) ile SO₂ arasında eksi yönde %54 oranında negatif bir korelasyon tespit edilmiştir, ikinci en yüksek korelasyon katsayısı karışım yüksekliği (sabah) ile SO₂ arasında eksi yönde %49 oranında negatif bir korelasyon tespit edilmiştir.

Epizot analizi sadece PM₁₀ seviyeleri için yapılmıştır. Şehir merkezinde, PM₁₀ seviyelerinin birbirini takip eden ve 100 µg/m³'ten büyük olan günlük seviyeler dikkate alınarak 2017-2019 yılları arasında toplam 4 farklı dönemden oluşan epizot dönemleri tespit edilmiştir. Korelasyon analizi sonuçlarına göre birinci dönemdeki PM₁₀ değerleri ile karışım yüksekliği (öğlen) değerleri ile aralarında pozitif yönde r=0,58 değerinde korelasyon tespit edilmiştir. Diğer epizot dönemlerinde ise istatistiksel olarak önemli düzeyde korelasyon saptanmamıştır.

Ayrıca epizot günleri için yapılan HYSPLIT taşınım modelleri oluşturulmuştur. Mekansal taşınım analizleri sonucuna göre, kent merkezine özellikle Kuzey Afrika çöllerinden ve Doğu Avrupa'nın endüstriyel alanları, özellikle Bulgaristan'ın güneydoğu kısmında bulunan kömürle çalışan termik santraller bölgesi üzerinden kirletici taşınımının etkili olduğu düşünülmektedir.

Balıkesir il merkezinde hava kalitesinin iyileştirilmesi amacı ile alınması gerekli tedbirler önem arz etmektedir. *Öncelikle*, daha çok alanda hava kalitesinin tespiti amacıyla hava kalitesi izleme istasyon sayısı artırılmalıdır. *Şehir* merkezine ait uzun yıllık meteorolojik verilerin ve kış aylarında görülen sıcaklık terselmesi (enverziyon) olaylarının sürekli ve düzenli olarak gerçek zamanlı olarak ölçülen hava kirleticilerinin değişimlerine olan etkilerinin belirlenmesi önem arz etmektedir. Hava kirliliği ile mücadelede en etkili yöntem temiz yakıt kullanmaktır. Bu nedenle, temiz yakıt olarak en geçerli alternatif olan doğalgaz kullanımını yaygınlaştırmak, ayrıca kaliteli kömür temini ve denetimlerinin de düzenli olarak yapılması gerekmektedir. Geçmiş yıllarda olduğu gibi, temiz ve yenilebilir enerji üretimi için Balıkesir iline yapılacak yatırımların devamlılığı sağlanmalıdır. Sanayi tesislerinin düzenli denetimi önem arz etmektedir ve denetimler aksatılmadan yapılmalıdır. *Ülkemizin* nüfus ve ulaşım açısından en yoğun şehirleri olan İstanbul, İzmir ve Bursa illerini birbirine bağlayan karayolu ağları ortasında bulunan Balıkesir il merkezinde trafikten ve diğer kirletici kaynaklarından oluşan hava kirliliği envartelerin de hazırlanması önem arz etmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma kapsamında Balıkesir Şehir merkezindeki Hava kirliliğine yol açan PM₁₀ ve SO₂ konsantrasyonlarının meteorolojik parametreler etkisi altında oluşumları incelenmiştir. Çalışmalarımızı tamamlayabilmemiz adına veri temini konusunda bize yardımcı olan Edremit Meteoroloji Müdürlüğü yetkililerine ve Balıkesir Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü yetkililerine teşekkür ederiz.

Yazar Katkıları

İhsan Çıldır: Veri toplamış, analizini yapmıştır ve makaleyi yazmıştır.

Atilla Mutlu: Analizi planlamış ve tasarlamıştır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar çıkar çatışması bildirmemişlerdir.

Kaynaklar

- Akyürek, Ö., Arslan, O. ve Karademir, A. (2013). *SO₂ ve PM₁₀ hava kirliliği parametrelerinin CSB ile konumsal analizi: Kocaeli örneği, TMMOB Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi, Ankara. Erişim adresi: http://www.hkmo.org.tr/resimler/ekler/a0e44a6888e7216_ek.pdf*
- Balıkesir Çevre ve Şehircilik Müdürlüğü. (2020). *Balıkesir ili temiz hava eylem planı THEP (2020-2024), Balıkesir Çevre ve Şehircilik Müdürlüğü, Balıkesir. Erişim adresi: https://webdosya.csb.gov.tr/db/balikesir/menu/thep-son-26_20200310014921.pdf*
- Başar, P., Okyay, P., Ergin F., Coşan, S. ve Yıldız, A. (2005). Aydın ili kent merkezinde hava kirliliği 1997-2004, *ADÜ Tıp Fakültesi Dergisi*, 6(3), 11-15. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/673203>
- Canpolat, E., Dinç, Y., Usun, Ç. F. ve Geçen, R. (2020). 25.09.2014 Tarihinde Erzincan İliçalarında (Hatay) meydana gelen sel ve taşkın oluşumunda coğrafi faktörlerin değerlendirilmesi, *Coğrafya Dergisi*, 41, 129-146. <https://doi.org/10.26650/JGEOG2020-0048>
- Carlsaw, D. C. ve Ropkins, K. (2012). Openair — an R package for air quality data analysis, *Environmental Modelling & Software*, 27, 52-61. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.09.008>
- Carlsaw, D. C. (2015). *The open-air manual — open-source tools for analyzing air pollution data. Manual for version 1.1-4, King's College London, United Kingdom. Erişim adresi: https://technodocbox.com/C_and_CPP/68023243-The-openair-manual-open-source-tools-for-analysing-air-pollution-data.html*
- Çıldır, İ. (2021). Balıkesir’de hava kirliliği seviyelerinin meteorolojik parametrelere bağlı olarak solunum yolu hastalıkları üzerindeki etkilerinin incelenmesi (Yüksek Lisans tezi). Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, Türkiye. Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>

- Durmuş, O. (2016). 24 Ağustos 2015 tarihinde Hopa’da ani taşkına neden olan aşırı yağış hadisesinin meteorolojik analizi ve bulut dinamik yapılarının incelenmesi (Yüksek Lisans tezi). İTÜ, İstanbul, Türkiye. Erişim adresi: <https://polen.itu.edu.tr/bitstream/11527/15943/1/10133951.pdf>
- Google Earth. (2021). Google earth pro. Sürüm 7.3. Google Inc.A.B.D.
- HKDYY. (2008). Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği. Erişim adresi: <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=12188&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>
- İbrahimova, İ. (2013). *Bakü hava kirlenmesinde SO₂’nin rolü ve meteorolojik olaylarla ilişkisinin araştırılması (Yüksek Lisans tezi). Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye. Erişim adresi: https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=iTkOhwevEenJZ3onUvs52tTkxIxUnuqBeabTZWp6TvQ0GI1WLqF-ganS9WmCBIgOt*
- IBM-SPSS (2016) *Statistics for Windows, Version 20.0. Armonk, NY: IBM Corp. Erişim adresi: https://www.ibm.com/support/pages/how-cite-ibm-spss-statistics-or-earlier-versions-spss*
- Menteşe S. (2011). *Zonguldak’ta hava kirliliği (PM₁₀ & SO₂) ve solunum yolu hastalıkları ilişkisi (Yüksek Lisans tezi). Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, Türkiye. Erişim adresi: http://dspace.balikesir.edu.tr/xmlui/bitstream/handle/20.500.12462/2620/Serpil_Mente%c5%9fe.pdf?sequence=1&isAllowed=y*
- Mutlu, A. (2019). Hava kalitesi ve meteoroloji: Korelasyon, trend ve epizot analizleri, *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9(4), 724-741. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.563848>
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). (2021). *HYSPLIT Description, (01 April 2021). Erişim Adresi: https://www.arl.noaa.gov/hysplit/hysplit/*
- Oğuz, K., Oğuz, E. ve Çamalan, G. (2021). İzmir-Tırazlı Orman Yangınının Uydu ve Model Verileri ile Analizi, *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 4(1), 1-12. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1275815>
- Orhun, Z. (2013). *Türkiye coğrafi bölgelerinde örnek şehirlerde ölçülen PM₁₀ değerlerinin değişiminin incelenmesi (Yüksek Lisans tezi). İTÜ, İstanbul, Türkiye. Erişim adresi: https://polen.itu.edu.tr/bitstream/11527/8911/1/13828.pdf*
- Saygın, H. (2019). Karaman’da 2012-2018 yılları arasında hava kirliliği parametrelerinin kardiyovasküler ve solunum nedenli acil servis başvuruları ve hastane yatışları ile ilişkisi (Yüksek Lisans tezi). Kırklareli Üniversitesi, Kırklareli, Türkiye. Erişim adresi: <http://acikerisim.kirklareli.edu.tr:8080/xmlui/bitstream/handle/20.500.11857/1198/HASAN%20SAYGIN.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Tağıl, Ş. (2007). Balıkesir’de hava kirliliğinin solunum yolu hastalıklarının mekânsal dağılışı üzerine etkisini anlamada Jeo-İstatistik teknikler, *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 5(1), 37-56. https://doi.org/10.1501/Cogbil_0000000070
- Tecer, L. H. (2013). Balıkesir’de hava kirliliğinin çocuk ve yetişkinlerde solunum hastalıklarına etkilerinin belirlenmesi üzerine bir alan çalışması, *Hava Kirliliği Araştırma Dergisi*, 2, 11-20. Erişim adresi: <http://hkadtmk.org/hkad/makaleler/cilt2/sayi1/HKAD-13-002.pdf>
- Tuncel, G. (2013). Türkiye’de hava kirliliği çalışmaları-1, *Hava Kirliliği Araştırma Dergisi*, 2, 103-104. Erişim adresi: <http://hkadtmk.org/hkad/makaleler/cilt2/sayi4/HKAD-13-014.pdf>
- TÜİK. (2020). İllere göre il/ilçe merkezi, belde/köy nüfusu ve yıllık nüfus artış hızı. Türkiye İstatistik Kurumu. Erişim adresi: <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=Nufus-ve-Demografi-109>
- Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği. (2008). Erişim adresi: <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=12188&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>
- WHO (World Health Organization). (2016). *Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease, Geneva, Switzerland. Erişim adresi: https://apps.who.int/iris/handle/10665/250141*
- WHO (World Health Organization). (2018). *Burden of disease from Ambient Air Pollution for 2016, Geneva, Switzerland. Erişim adresi: https://www.who.int/airpollution/data/AAP_BoD_results_May2018_final.pdf*