

Hava Kalitesi ve Meteoroloji: Korelasyon, Trend ve Epizot Analizleri

Air Quality and Meteorology: Analysis of Correlations, Trends and Episodes

Atila MUTLU*

Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 10145, Balıkesir

• Geliş tarihi / Received: 13.05.2019 • Düzeltilerek geliş tarihi / Received in revised form: 17.07.2019 • Kabul tarihi / Accepted: 04.08.2019

Öz

Bu çalışmada, Güney Marmara bölgesinde bulunan Balıkesir şehir merkezine ait uzun yıllık hava kirleticilerinin yerel meteorolojik koşullar etkisinde değişimleri, trendleri ve epizotları incelenmiştir. Son beş yılı kapsayan dönemde, saatlik ölçülen PM₁₀ ve SO₂ seviyeleri ve saatlik sıcaklık (t), rüzgar hızı (ws), nem (rh) ve basınç (p) verileri analiz edilmiştir. Uzun yıllık ortalamalar göz önüne alındığında, şehir merkezinde ölçülen PM₁₀ konsantrasyonlarının ortalama değeri 47.33 µg/m³ ve SO₂ konsantrasyonlarının ortalaması ise 7.75 µg/m³ olarak tespit edilmiştir. Pearson ve Kendall's Tau korelasyon analizi sonuçlarına göre, PM₁₀ seviyelerinin değişimlerinde rüzgar hızı (ws) ve sıcaklık (t) parametrelerinin ters yönlü etkili olduğu, SO₂ seviyelerinin değişimlerinde en etkili parametrenin yine ters yönde sıcaklık (t) parametresi olduğu belirlenmiştir. Hava kirleticilerinin meteorolojik parametrelerin değişimlerine göre tahmin edilebilmesi için bir regresyon modeli oluşturmuştur. Tüm meteorolojik parametrelerin modele dahil edilmesi halinde, PM₁₀ seviyelerindeki değişimin ancak %16 oranında, benzer şekilde SO₂ seviye tahminleri ancak %24 oranında açıklanabilmektedir. Theil-Sen trend analiz sonuçlarına göre, uzun yıllık dönemde PM₁₀ ve SO₂ seviyelerinin artış eğilimi gösterdiği tespit edilmiştir. Kirlilik takvimlerine göre, PM₁₀ ve SO₂ seviyeleri için epizot günleri belirlenmiştir. Epizot gününe ait olağandışı durumların araştırılması sonucunda, il merkezinde en yüksek PM₁₀ konsantrasyonun ölçüldüğü epizot gününde Kuzey Afrika'dan kıtasal toz taşınımından gelen çöl tozlarının etkili olduğu sonucuna varılmıştır. SO₂ epizot günü için, Bulgaristan'ın ülkemiz sınırına yakın olan güney doğu bölgesinde bulunan termik santrallerden yapılan salınımların bölgesel kirletici taşınımlarında etkili olduğu ve ayrıca lokal olarak Balıkesir şehir merkezinde özellikle Aralık aylarında görülen şiddetli enverziyon oluşumlarının etkili olabileceği düşünülmektedir.

Anahtar kelimeler: Balıkesir, Kendall's Tau, Pearson, PM₁₀, SO₂, Theil-Sen, Trend analizi

Abstract

In this study, changes, trends and episodes of long-term air pollutants under local meteorological conditions were examined at Balıkesir's downtown in South Marmara region. In the last five years period, hourly measured PM₁₀ and SO₂ levels and hourly temperature (t), wind speed (ws), humidity (rh) and pressure (p) data were analyzed. Considering the long-term averages, the mean value of PM₁₀ concentrations measured in the downtown was 47.33 µg/m³ and the mean of the SO₂ concentrations was 7.75 µg/m³. According to the results of Pearson and Kendall Tau's correlation analysis, wind speed (ws) and temperature (t) parameters were found to be inversely effective in the changes of PM₁₀ levels, while the most effective parameter was the inverse temperature (t) parameter in the changes of SO₂ levels. A regression model was used to estimate air pollutants based on the changes of the overall meteorological parameters. If all meteorological parameters are included in the model, only 16% of the PM₁₀ levels can just be explained, and the SO₂ level estimates can only be explained by 24%. According to Theil-Sen trend analysis, PM₁₀ and SO₂ levels were in an increasing trend. According to pollution calendars, the episode days for PM₁₀ and SO₂ levels were determined for the study. As a result of investigating the unusual conditions of the episode day, it was concluded that desert dusts coming from the continental dust transport from North Africa were effective on the day of the episode where the highest PM₁₀ concentration was measured in the downtown area. For SO₂ episode day, it was determined that the releases from the coal-powered energy plants in the south-eastern region near Bulgaria's border with our country might be effective in the transport of regional SO₂ pollutants. In addition, it was thought that the formation of temperature inversions seen in Balıkesir's downtown especially in the months of December could be effective for the highest SO₂ levels.

Keywords: Balıkesir, Kendall's Tau, Pearson, PM₁₀, SO₂, Theil-Sen, Trend analysis

*Atilla MUTLU; amutlu@balikesir.edu.tr; Tel: (266) 612 11 94; orcid.org/0000-0002-0777-0863

1. Giriş

Dünya Sağlık Örgütü (WHO) 2006 yılında hava kalitesi ile ilgili yayınlamış olduğu risk değerlendirme raporunun giriş cümlesinde “temiz hava insan sağlığı ve refahı için en temel gereksinimdir” vurgusunu yaparak günümüzde temiz havanın insan ve ekosistemi oluşturan canlılar için önemini bir kez daha ortaya koymuştur (WHO,2006). Hava kirliliği günümüzde halen halk sağlığını tehdit eden en önemli çevresel risk etmenlerinin başında yer almaktadır (WHO, 2016).

Global olarak, başlıca antropojenik hava kirleticiler kent merkezlerinde yoğunlaşmıştır. Trafik, endüstri ve ısınma sistemleri kentsel hava kirliliğinin başlıca kaynaklarıdır. Meteoroloji, topografik yapı ve kent yerleşimleri hava kirleticilerinin dispersiyon, depolanma ve kimyasal dönüşüm süreçlerine etki eden önemli faktörlerdir. Çeşitli hava kirleticilerinin çevreye ve insan sağlığına olumsuz etkileri bilinmektedir. Her bir hava kirleticinin etki süresi, konsantrasyonu ve diğer karakteristiklerine bağlı olarak insan sağlığı üzerinde etkileri olmaktadır. İnsanlar üzerindeki klinik çalışmalarda ozon (O₃), kükürtdioksit (SO₂), partiküler madde (PM), azot oksitler (NO_x) gibi kirleticilerin ve polen gibi biyojenik antijenlerin solunum yolu hastalıklarını arttırdığı rapor edilmiştir (Helander vd., 1997; Monn vd., 1999; Moshhammer ve Neuberger, 2003; Martonen ve Schroeter, 2003; Borge vd., 2014). Pek çok epidemiolojik çalışmada özellikle astım gibi kronik solunum yolu hastalığına çevresel hava kirliliğinin olumsuz etkisi olduğu kabul edilmektedir (Alberini ve Krupnick, 1998; Williams vd., 2000). Havada bulunan partikül maddelerin (PM) insanlar üzerinde özellikle üst ve alt solunum yolları rahatsızlıklarında etkili olduğu bilinen bir gerçektir (WHO, 2006; Tecer, 2009; Samoli vd., 2013; Stafoggia vd., 2013).

Benzer çalışmalar, hava kirliliği seviyesi ile akciğer fonksiyonlarında düşüş, solunum yolu semptomlarında artış ve ölüm vakalarında artış arasında bir ilişkinin olduğunu göstermektedir (Wordley vd., 1997; Timonen vd., 2002). Yetişkin ve çocuklarda, solunum yolu şikayetleri veya astımda şiddetlenme sebebiyle hastaneye yatışlarda ve acil servislere başvurulardaki artışla hava kirliliği arasında ilişki olduğu bulunmuştur (Gomzi, 1999; Wong vd., 2000; Brunekreef ve Holgate, 2002).

Hava kirliliği kontrolü, insanlığın çevreye dolayısıyla atmosfere olan olumsuz etkilerinin

azaltılmasına veya en azından kontrol edilmesine karşı yapılmakta olan teknik (mühendislik) ve sosyal (eğitim) içerikli mücadelenin canlı bir örneğidir. Bu mücadelede dikkat çeken bazı kontrolsüz tekrarlanan zararlı, toksik maddelerin atmosfere salınımları, geçmişteki dönemlerde karşımıza ‘Epizot’ denilen kirlilik faciaları olarak adlandırılan trajik olaylara yol açmıştır. Bu trajedilerden bazıları; Bhopal gaz faciası, Meksika’daki Mexico City olayı; 1953, 1963 ve 1966 yıllarında yaşanan New York kenti epizotları ve 1950’li ve 1960’lı yıllarda yaşanan Meuse Valley ve Londra Şehrini mahfeden duman epizotları örnek verilebilir (Wang vd., 2004; Visscher, 2014).

Hava kirliliği, insan ve diğer canlılarla birlikte aynı zamanda yapılara zarar veren maddelerin atmosferde kalma sürelerinin (zaman) ve atmosferdeki miktarlarının (konsantrasyon) çevreye olan olumsuz etkileri olarak tanımlanabilir. Kirleticiler doğal kaynaklı veya insan kaynaklı olabilirler. Doğal kaynaklı kirleticiler, insan kaynaklı (antropojenik) kirleticilere oranla daha büyük konsantrasyonlarda havaya karışmalarına karşın sürekli değildirler (akut etki). İnsan kaynaklı kirleticiler ise, yüksek veya düşük konsantrasyonlarda fakat süreklidirler (kronik etki). Bu durumda, atmosferde bulunan kirleticiler göz önüne alındığında, atmosferin zamanla doğal kaynaklı kirleticileri zaman içerisinde kontrol edebildiği fakat antropojenik kirleticiler konsantrasyonlarını ise kendi iç mekanizmasında yeterince kontrol edemediği görülmektedir.

Bu çalışmada, Güney Marmara bölgesinde bulunan Balıkesir iline ait uzun yıllık hava kirleticilerinin (PM₁₀ ve SO₂) yine aynı zaman dilimine ait yerel meteorolojik koşullar altında değişimleri, olası trendleri ve epizotları incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Çalışma Alanı

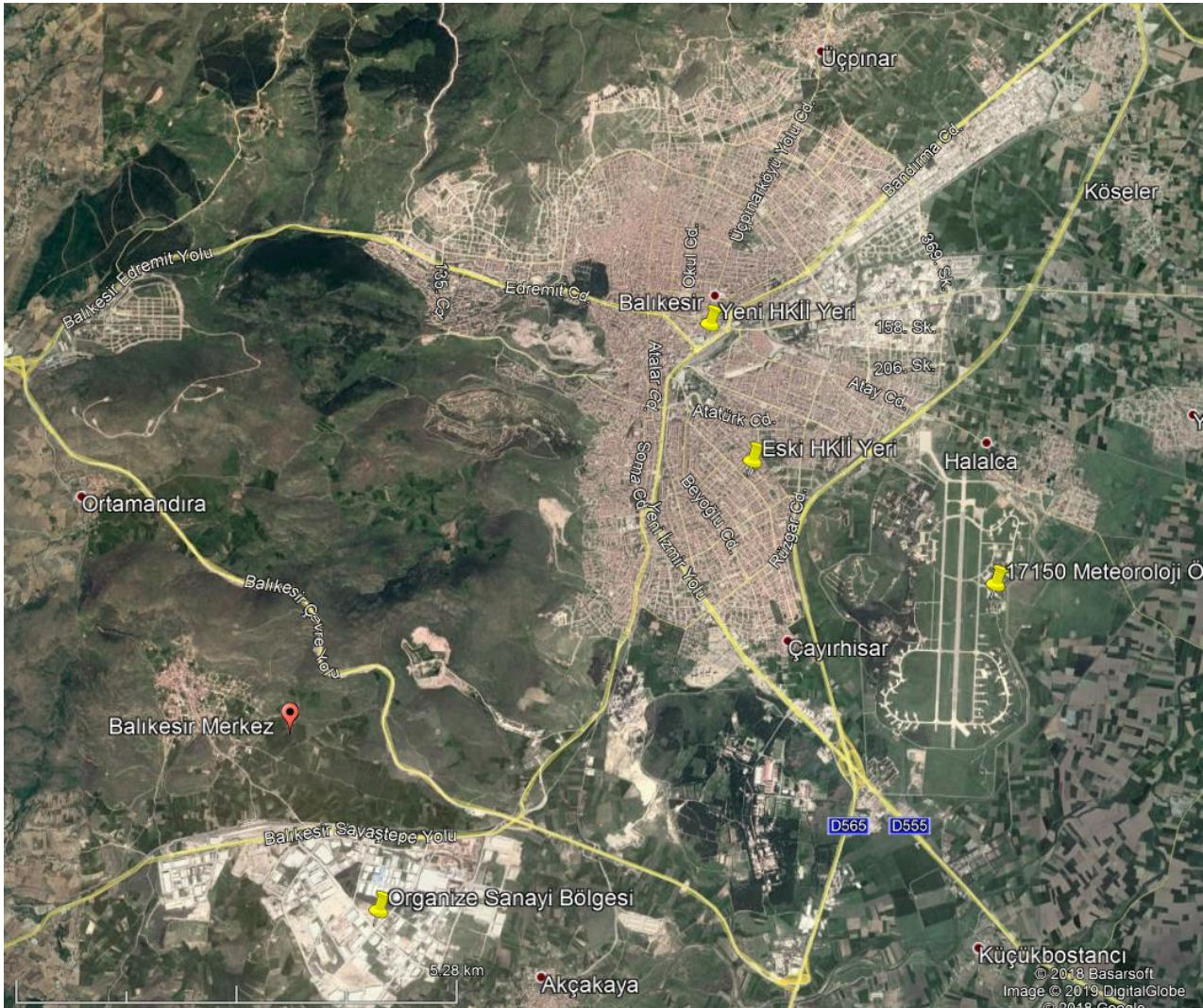
Balıkesir ili ülkemizin kuzey batı bölümünde ve Marmara Denizin güney kısmında, Güney Marmara, kalan bölgede bulunmaktadır. Balıkesir orta ölçekli bir şehirdir. Balıkesir nüfusu yaklaşık 1.2 milyon olup, nüfusun yaklaşık 1/3’ü şehir merkezinde yaşamaktadır (URL-1, 2017). Balıkesir şehri ülkenin belli başlı et ve süt ürünleri üretim merkezi olarak da bilinmektedir. Ayrıca şehrin Organize Sanayi Bölgesinde ve diğer kısımlarında elyaf üretim tesisi, çimento fabrikası,

ağaç işleme entegre tesisi, kağıt fabrikası, sofralık yağ üretim tesisi ve muhtelif ölçeklerde süt işleme tesisleri kurulmuş veya kurulma aşamasındadır.

Balıkesir şehrinin hem Marmara Denzinde ve hem de Ege Denzinde kıyıları mevcuttur. Şehrin karakteristik iklim özellikleri, kıyı bölgelerinde daha çok Akdeniz iklimi hüküm sürerken, iç kesimlerde ise Kara iklimi özellikleri görülmektedir. Balıkesir ilinde karakteristik olarak dört mevsim görülmektedir. Kıyı kesimlerinde kışlar ılık ve yağışlı geçerken, şehir merkezinin de yer aldığı iç kesimlerde kışlar daha soğuk ve yağışlı geçmektedir (Koçman, 1993; Tağıl, 2007). Ayrıca şehrin kendine has topoğrafik şekli itibariyle kısmen kuzey, kuzey-batı ve güney-batı kısımlarında dağlık yükseltilerin eteklerinde kurulu olması nedeniyle çanak şeklinde olup, şehir merkezinin bulunduğu bölgede kuzeyli yönlerde oluşan doğal koridorlar üzerinden hakim rüzgar yönlerinin oluştuğu

gözlenmektedir. Ayrıca, şehir merkezinin de bulunduğu iç kesimlerde, özellikle kış aylarında sıcaklık ve basınç farklılarından dolayı atmosferik inversiyon ve yoğun sis oluşumları nedeniyle kent merkezinde hava kirliliği epizotları görülmektedir (Tecer, 2013; Mutlu, 2018; Mutlu, 2019).

Şehir merkezine ait hava kalitesi değişimlerinin incelendiği bu çalışmada, şehir merkezinde İl Çevre Müdürlüğü sorumluluğunda olan bir adet konvansiyonel aktif Hava Kalitesi İzleme İstasyonu (HKİİ) bulunmaktadır. Bu istasyonun ilk yeri daha çok konut ve yaşam bölgesi olarak tabir edilen Bahçelievler Mahallesi konumlandırılırken, sonrasında yeni bir konum olarak şehrin merkezinde Toplu Taşıma Merkezi olarak tanımlanan bölgeye taşınmıştır. Eski ve yeni HKİİ konumları ve şehrin yerleşkesi Google Earth Digital Image ortamında Şekil 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. Balıkesir şehir merkezi görseli. (Google Earth Image ©2019)

2.1. Çalışmada Kullanılan Veriler

Çalışmada, başlıca hava kalitesi ve bölgesel meteorolojik veri setleri olmak üzere iki türlü veri tabanından yararlanılmıştır. Bu farklı veri tabanları aynı zaman dilimi aralığı olan “saatlik” ölçülen ve kaydedilen veriler olup son 5 yıllık bir süreyi kapsamaktadır. Çalışma bütününde ise her bir değişken için yaklaşık 43,800 veri üzerinde çalışılmıştır.

Son beş yılı kapsayan hava kalitesi verileri şehir merkezinde bulunan hava kalitesi izleme istasyonunun (HKİİ) eski ve yeni lokasyonlarından ölçülen, saatlik PM₁₀ ve SO₂ kirleticilerini içerirken, meteorolojik veriler ise bölgede bulunan hava üssündeki meteoroloji gözlem istasyonundan (#17150) yine saatlik olmak üzere sıcaklık (t), rüzgar hızı (ws), nem (rh) ve basınç (p) verilerini kapsamaktadır. Hem hava kalitesi ölçüm istasyonlarının yerleri, hem de meteoroloji istasyonunun yerleri Şekil 1’de sunulmuştur.

Hava kalitesi ve meteorolojik veriler, istatistiksel analizler için SPSS ve R ortamlarında değerlendirilmiş olup, elde edilen sonuçlar bir sonraki bölümde detaylı olarak açıklanmıştır.

3. Veri Analizinde Uygulanan Yöntemler

Yoğun nüfusu olan şehirlerde hava kalitesinin artırılabilmesi için öncelikle kirletici parametrelerin türü, miktarı ve kirletme süresi belirlenmelidir. Yani bölgenin emisyon envanteri oluşturulmalıdır. Hava kalitesinin artırılması için uygulanacak stratejinin belirlenmesinde düzenli olarak temsili ölçümlerin yapılması ve bu ölçüm sonuçlarının o bölgeye ait temsili meteorolojik koşullara göre yorumlanarak hava kalitesi trendlerinin ve epizotlarının oluşturulması gerekmektedir.

Bu çalışma kapsamında, şehir merkezine ait hava kalitesinin, uzun yıllık meteorolojik oluşumlar karşısında nasıl değişim gösterdiği incelemek için farklı amaçlarda bir dizi istatistiksel yöntemler kullanılmıştır.

İlk aşamada, geniş veri setini oluşturan hava kirleticileri (PM₁₀ ve SO₂) ve meteorolojik parametrelerine (sıcaklık-t, rüzgar hızı-ws, nem-rh ve basınç-p) ait genel tanımlayıcı istatistiksel parametreler (ortalamalar, %95 önem seviyesinde ortalama için güven aralıkları, min/max değerler) hesaplanmıştır. Ölçülen hava kirleticilerinin mevsimsel olarak nasıl değişim gösterdiği önemli bir konudur. Bu değişimler hava kalitesi

analizlerinin yapıldığı o bölgedeki karakteristik özelliklerin anlaşılması bakımından önem arz eder. Bu nedenle hava kirleticilerine ait varyans analizi testleri (ANOVA) yapılarak kirleticileri ait mevsimsel değişimler arasında fark olup olmadığı incelenmiştir.

Ölçülen her bir saatlik değişkenin birbirleriyle olan istatistiksel bağıntılarının incelendiği ikili (bivariate) korelasyon analizleri (Pearson Correlation Analysis ve Kendall’s Tau Analysis) yapılmıştır.

Veri setlerine ait birbirleriyle var olabilecek etkileşimlerin incelendiği korelasyon analizinden sonra, meteorolojik parametrelerin (sıcaklık-T, rüzgar hızı-WS, nem-RH ve basınç-P) değişimlerinde her bir hava kirleticisinin (PM₁₀ ve SO₂) değişimini ifade eden çoklu regresyon analizleri yapılarak, ölçülen bir dış ortam hava kirletici konsantrasyonuna ait uzun yıllık değişimlerinde, o kirleticinin var olduğu bölgedeki meteorolojik parametrelerin nasıl etkili olduğu sorusuna oluşturulan çoklu regresyon modelleri ile cevap verilmeye çalışılmıştır.

Veri setlerine ait regresyon analizlerinden elde edilen sonuçlar ışığında hava kalitesi çalışmalarında sıklıkla kullanılan önemli trend analizlerinden birisi olan Theil-Sen korelasyon analizlerini içeren parametrik olmayan korelasyon analizleri yapılarak hava kirleticilerine ait uzun yıllık değişimlerini gösteren tren analizi yapılmıştır (Tian ve Fernandez, 1999; Elbir vd., 2000; Yolsal, 2016).

Ayrıca R ortamında geliştirilen algoritma (Carslaw ve Ropkins, 2012; Carslaw, 2015) ile dış ortam PM₁₀ ve SO₂ kirleticilerinin günlük değişimleri 2014-2018 yıllarına ait takvimlerde gösterilmiş olup, hem yıl bütünündeki değişimler hem de yasal sınır değerlerini geçen günler için epizot günleri tespit edilmiş ve bu epizot günlerine ait yüksek kirletici seviyelerinin nedenleri incelenmiştir.

4. Bulgular ve Tartışma

4.1. Hava Kirleticilerine ve Meteorolojik Verilere Ait Genel İstatistikler

Çalışmada elde edilen geniş veri setini oluşturan hava kirleticileri (PM₁₀ ve SO₂) ve meteorolojik parametreler (sıcaklık, rüzgar hızı, nem ve basınç) ait genel tanımlayıcı istatistiksel parametreleri içeren, ortalamalar, %95 önem seviyesinde ortalama için güven aralıkları, min/max değerler Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. Hava Kirleticilerine ve Meteorolojik Parametrelere Ait Genel Tanımlayıcı İstatistikler

İstatiksel Parametreler	Tanımlayıcı	Hava Kalitesi Parametreleri		Meteorolojik Parametreler			
		PM ₁₀	SO ₂	t(°C)	ws (m/sn)	rh (%)	p (mbar)
Ortalama		47.33	7.75	16.2	1.83	66.35	977.39
Güven Aralığı*	Alt limit	46.95	7.65	16.1	1.81	66.33	976.96
	Üst limit	47.71	7.85	16.3	1.84	66.37	977.83
Değişim Aralığı	Minimum	1	1	-14.1	0.24	58.5	815.62
	Maksimum	576.3	146.9	41.6	7.3	74.2	1052.63
N		43824	43824	43824	43824	43824	43824

*%95 önem düzeyinde ortalamaya ait güven aralığı.

N: veri sayısı

Çalışmada, daha önceki bölümde belirtildiği üzere her bir parametre için saatlik ölçüm değeri alınmış ve son beş yılı kapsayan dönemi temsil etmesi amacıyla her bir ölçülen parametre için toplam 43824 adet veri yapılan analizlere dahil edilmiştir. Uzun yıllık ortalamalar göz önüne alındığında, şehir merkezinde ölçülen PM₁₀ konsantrasyonlarının ortalama değeri 47.33 µg/m³ ve istatistiksel olarak %95 önem düzeyinde PM₁₀ ortalamasının 46.95 ile 47.71 µg/m³ arasında olduğu tahmin edilmektedir. En yüksek 24 saatlik PM₁₀ seviyesi 576.3 µg/m³ olarak 1. Şubat.2015 günü saat 19 sularında ölçülmüştür. Ölçülen günlük maksimum değer hava kalitesi yasal sınırından yaklaşık 7 kat daha fazladır. (Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği, EK1-A geçiş dönemi kademeli azaltım olarak, 2015 yılı PM₁₀ için 24 saatlik limit değer, 90 µg/m³) (HKDYY, 2008).

Yine aynı şekilde, şehir içinde ölçülen uzun yıllık SO₂ konsantrasyonlarının ortalaması ise 7.75 µg/m³ olarak hesaplanmış ve istatistiksel olarak %95 önem düzeyinde SO₂ ortalamasının 7.65 ile 7.85 µg/m³ arasında olduğu tahmin edilmektedir. Çalışma periyodu kapsamında, en yüksek SO₂ konsantrasyonu 146.9 µg/m³ olarak 8.Aralık.2018 saat 21 sularında ölçülmüştür. Ölçülen maksimum günlük SO₂ değeri izin verilen yasal sınırların altında olduğu belirlenmiştir. (Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği, EK1-A geçiş dönemi kademeli azaltım olarak, 2018 yılı SO₂ için 24 saatlik limit değer ilgili, 380 µg/m³) (HKDYY, 2008).

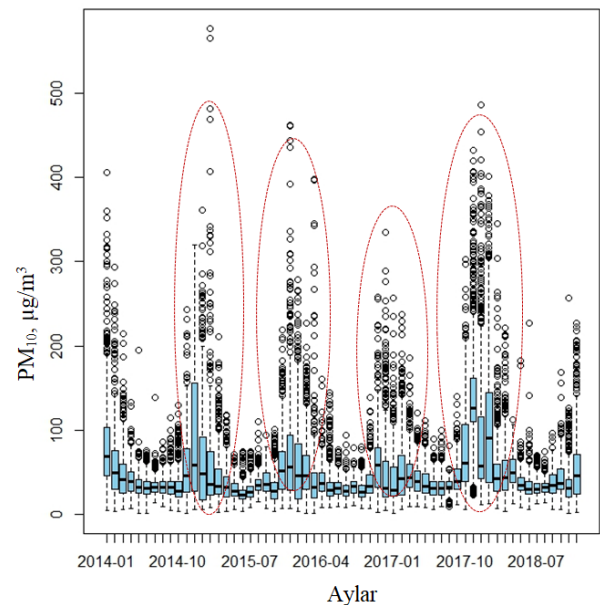
Hava kirleticilerinin en yüksek PM₁₀ seviyesi beklenildiği gibi kış aylarında ve gün sonlarına doğru görülmüş olup, şehir merkezinde akşam saatlerinde oluşan yoğun eve dönüşün oluşturduğu yoğun trafik faaliyetleri ve konut ısınmalarından doğan etkiler burada açıkça görülmektedir. Benzer durum SO₂ seviyesi için de geçerli olup, PM₁₀ seviyesinden farklı olarak gece saatlerinde en yüksek değere ulaşmasında en büyük etkenin özellikle şehrin bir bölümünde halen kullanılan

kömür yakmalı ısınma faaliyetlerinin sebep olduğu düşünülmektedir.

4.2. Hava Kirleticilerin Saatlik, Günlük ve Mevsimsel Dağılımları

Şehir merkezlerinde oluşan belli başlı hava kirleticilerin mevsimsel değişimlerinin incelenmesi ayrıca önem arz etmektedir. Özellikle ani sıcaklık ve basınç farklılıklarının görüldüğü ılıman mevsim geçişleri dönemlerinde, hava kirlenici seviyelerinin olumsuz meteorolojik koşullar ile birlikte artış göstermesi yoğun olarak şehir merkezlerinde yaşayan insanlar üzerinde olumsuz sağlık etkileri oluşturmaktadır.

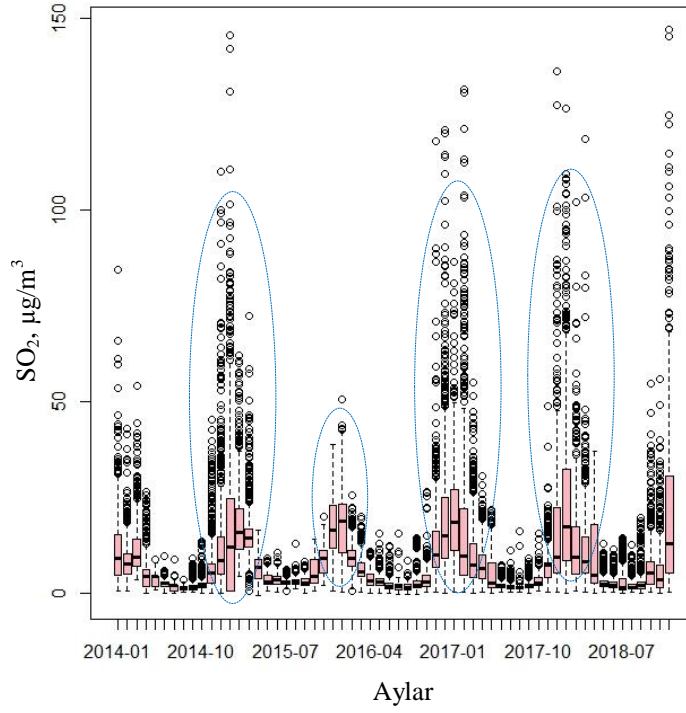
Bu nedenle bu bölümde, şehir merkezinde sürekli olarak ölçümleri yapılan PM₁₀ ve SO₂ kirleticilerine ait soğuk ve sıcak mevsimsel değişimler öncelikle Şekil 2 ve Şekil 3’de verilen kirleniciye ait 5 yıllık dönem içinde aylık kirlenici ortalamalarının dağılımlarını ifade eden box-plot grafiği üzerinde incelenmiştir.



Şekil 2. Uzun döneme ait aylık PM₁₀ değişimlerini gösteren box-plot grafiği.

Şekil 2’de verilen box-plot grafiğinde kırmızı oval şekiller içerisinde gösterilen alanlardaki seviye farklılıklarından da anlaşılacağı üzere, PM₁₀ kirleticisine ait aylık seviyeler sonbahar sonu ve kış aylarında artış göstermektedir. Soğuk (kış) mevsim, “Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği” kapsamında “1.Ekim-31.Mart” olarak belirtilmiştir (HKDYY, 2008). Grafikselleştirilenden daha fazlası olarak, PM₁₀

seviyelerinin soğuk ve sıcak mevsimlerde değişimlerini analiz etmek için bağımsız çift örnekleme t-testi kullanılmıştır. Test sonuçlarına göre, soğuk mevsimlerdeki PM₁₀ seviyeleri (ortalama: 59.9 µg/m³), sıcak mevsimlerde oluşan PM₁₀ seviyelerinden (34.8 µg/m³) matematiksel olarak fazla ve aynı zamanda aradaki bu fark %95 önem düzeyinde istatistiksel olarak da anlamlı olduğu tespit edilmiştir (p_{value}=0.00).



Şekil 3. Uzun döneme ait aylık SO₂ değişimlerini gösteren box-plot grafiği.

Benzer şekilde, Şekil 3’de verilen aylık ortalama SO₂ seviyelerinin de özellikle sonbahar sonu ve kış aylarında yüksek seviyelerde olduğu tespit edilmiştir. Isınma faaliyetlerinin artış gösterdiği soğuk aylarda şehir merkezinde her ne kadar son yıllarda doğal gaz ile çalışan ısınma sistemlerine geçilmiş olsa da şehir merkezinin bir bölümünün halen kömürle çalışan ısınma sistemlerine sahip olmasından dolayı soğuk aylarda SO₂ seviyelerinde artışlar görülmektedir. Mevsimler arasında fark olup, olmadığını analiz etmek için benzer şekilde, SO₂ seviyelerinin soğuk ve sıcak mevsimlerde değişimleri incelenmiştir. Yapılan bağımsız çift örnekleme t-testi sonuçlarına göre, soğuk mevsimlerdeki SO₂ seviyeleri (ortalama: 12.3 µg/m³), sıcak mevsimlerde oluşan SO₂ seviyelerinden (ortalama:3.2 µg/m³) daha fazla

olduğu ve aradaki farkın %95 önem düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı olduğu tespit edilmiştir (p_{value}=0.00). Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği, EK1-A geçiş dönemi kademeli azaltım olarak, 2018 yılı SO₂ için kış mevsimi limit değeri 20 µg/m³ olarak verilmiş olup il merkezinde kış mevsimlerinde oluşan SO₂ seviyeleri izin verilen limit değerlerin altında olduğu tespit edilmiştir (HKDYY, 2008).

Yıllar bazında kirlotici değişimleri incelendiğinde, kirlotici seviyelerine ait değişimlerde yıllar arasında fark olup olmadığını belirleyebilmek için varyans analizleri (ANOVA) yapılmıştır. Yıllara ait kirlotici değişimlerinin incelendiği ANOVA analizlerinin sonuçları Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2. Yıllara ait PM₁₀ ve SO₂ istatistikleri

	Yıllar	N	Ortalama	95% Ortalama için Güven Aralığı		Minimum	Maksimum
				Alt Limit	Üst Limit		
PM ₁₀	2014	8760	47.31	46.5	48.0	1.14	405.44
	2015	8760	43.37	42.5	44.1	3.00	576.31
	2016	8784	41.85	41.1	42.5	1.00	398.24
	2017	8760	56.55	55.5	57.6	2.10	485.94
	2018	8760	47.57	46.7	48.4	1.03	401.94
SO ₂	2014	8760	5.82	5.6	5.9	1.01	109.99
	2015	8760	8.76	8.5	8.9	1.00	145.54
	2016	8784	7.21	7.0	7.4	1.00	120.69
	2017	8760	8.01	7.7	8.2	1.03	136.14
	2018	8760	8.92	8.6	9.2	1.00	146.89

Geçmiş yıllara ait PM₁₀ ve SO₂ değişimlerinin analiz edildiği, 2014-2018 yılları arasında kirletici seviyelerinin değişimlerinin nasıl olduğu, bu kirleticilerin son beş yıllık zaman diliminde hangi yıllarda en yüksek kirletici seviyelerine ulaştığı veya hangi yıllarda en düşük kirletici seviyelerine sahip olduğunu analiz etmek için varyans analizi

(ANOVA) ve Post-Hoc çoklu karşılaştırma testleri uygulanmıştır.

Yapılan ANOVA testi sonucuna göre, hem PM₁₀ ve hem de SO₂ kirleticilerine ait yıllık ortalamalar birbirine eşit değildir, yıllar arasında farklılıklar vardır (PM₁₀ için p_{value}=0.00 ve SO₂ için p_{value}=0.00)

Tablo 3. Kirleticilerin yıl bazında kıyaslamalarını içeren Post-Hoc/LSD testi sonuçları

Kirletici	(I) Yıl	(J) Yıl	Ortalama Farkı (I-J)	Pvalues	Kirletici	(I) Yıl	(J) Yıl	Ortalama Farkı (I-J)	Pvalues	
PM ₁₀	2014	2015	3.93*	0.00	SO ₂	<u>2014</u>	2015	-2.94*	0.00	
		2016	5.45*	0.00			2016	-1.38*	0.00	
		2017	-9.24*	0.00			2017	-2.19*	0.00	
		2018	-0.26	0.659			2018	-3.09*	0.00	
	2015	2014	-3.93*	0.00			2015	2014	2.94*	0.00
		2016	1.51*	0.012				2016	1.55*	0.00
		2017	-13.18*	0.00				2017	0.75*	0.00
		2018	-4.20*	0.00				2018	-0.15	0.32
	<u>2016</u>	2014	-5.45*	0.00			2016	2014	1.38*	0.00
		2015	-1.51*	0.012				2015	-1.55*	0.00
		2017	-14.69*	0.00				2017	-0.80*	0.00
		2018	-5.72*	0.00				2018	-1.71*	0.00
	<u>2017</u>	2014	9.24*	0.00			2017	2014	2.19*	0.00
		2015	13.18*	0.00				2015	-0.75*	0.00
		2016	14.69*	0.00				2016	0.80*	0.00
		2018	8.97*	0.00				2018	-0.90*	0.00
	2018	2014	0.26	0.659			<u>2018</u>	2014	3.09*	0.00
		2015	4.20*	0.00				2015	0.15	0.32
		2016	5.72*	0.00				2016	1.71*	0.00
		2017	-8.97*	0.00				2017	0.90*	0.00

*Fark %95 önem düzeyinde istatistiksel olarak önemlidir

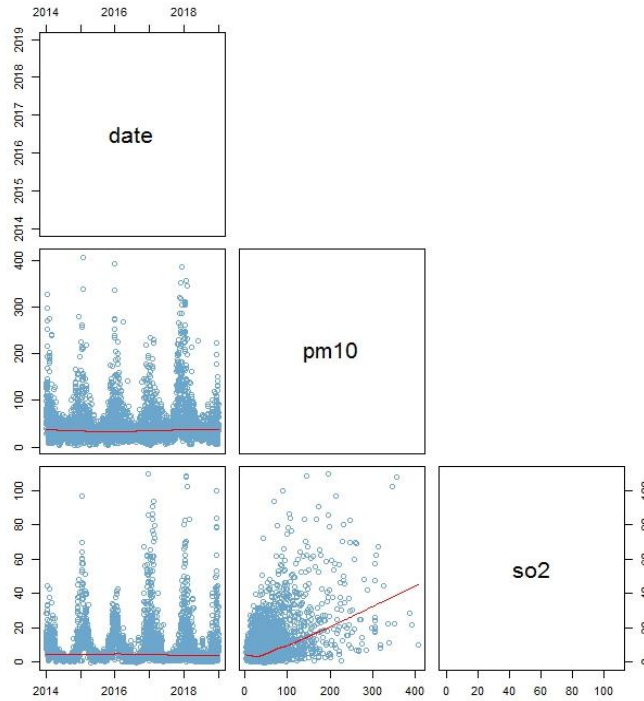
Tablo 3.'de sunulan, Post-Hoc çoklu kıyaslama testi için seçilen LSD (Least Squared Difference) yöntemine göre; PM_{10} seviyelerinde en yüksek yıllık ortalama 2017 yılında ölçülmüş olup, en düşük yıllık PM_{10} ortalaması ise 2016 yılında ölçülmüştür. Yine aynı şekilde, en yüksek yıllık SO_2 ortalaması 2018 yılında ve en düşük yıllık SO_2 ortalaması ise 2014 yılında ölçülmüştür. Her iki hava kirleticilerinin pik yaptığı yıllar veya en düşük seviyeye ulaştığı yıllar birbirinden farklıdır.

4.3. Hava Kirleticileri ile Meteorolojik Parametreler Arası Etkileşimler

Bölgesel meteorolojik koşullar, hava kirleticilerinin birincil ve ikincil oluşumlarında, taşınımında ve birikimlerinde önemli oynamaktadırlar (Radaideh, 2017). Yapılan birçok

araştırma, hava kalitesi ile meteorolojik parametreler arasında önemli bir ilişkinin olduğunu ortaya koymuşlardır. Özellikle rüzgar hızı ve yönü, sıcaklık ve oransal nemin hava kalitesi üzerinde önemli etkilere sahip olduğunu belirtmiştir. (Elminir, 2005; Beaver ve Palazoglu, 2009; Jacob ve Winner, 2009; Csavina vd., 2014; Zhang vd., 2015).

Çalışmamızda, öncelikle ele alınan iki emel hava kirleticileri olan PM_{10} ve SO_2 seviyelerinin birbiriyle olan ilişkileri grafiksel olarak R ortamında (Carslaw ve Ropkins, 2012) ve (Carslaw, 2015) tarafından geliştirilen "Openair" algoritması kullanılarak incelenmiştir. Hava kirleticileri arasındaki ilişkinin değişimi ile ilgili oluşturulan grafiksel görsel Şekil 4'de sunulmuştur.

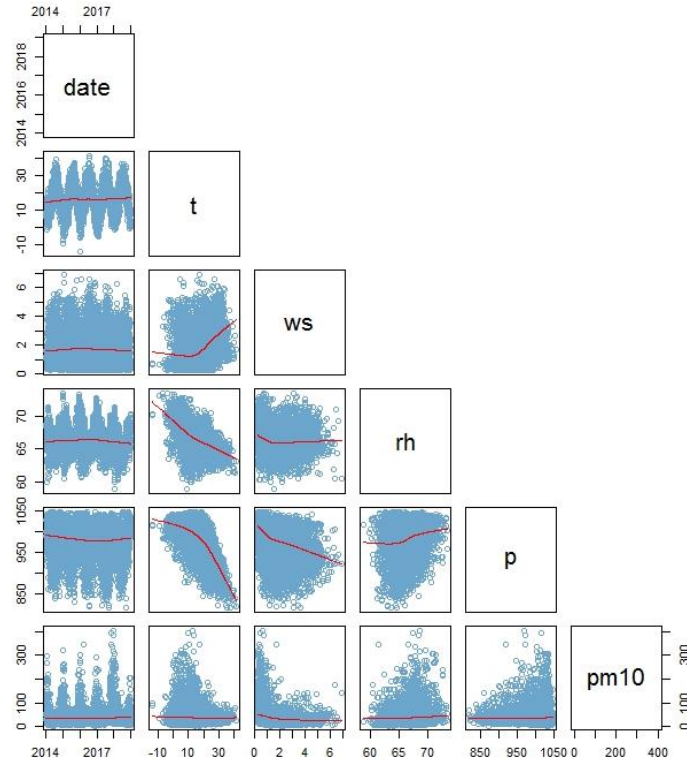


Şekil 4. PM_{10} ve SO_2 seviyelerinin zamansal ve bire-bir değişimi

Hava kirleticilerinin birbiriyle olan etkileşimlerini incelemek amacıyla oluşturulan grafiksel görselde (Şekil 4) PM_{10} ve SO_2 arasında pozitif yönde güçlü bir ilişkinin olduğu görülmektedir. Bir başka ifadeyle, PM_{10} seviyeleri artış eğiliminde olduğu zaman bu değişimle birlikte şehir merkezinde aynı zamanda SO_2 seviyelerinde de artış meydana gelmektedir. Özellikle soğuk mevsimlerde, PM_{10} ve SO_2 konsantrasyonlarının yüksek seviyelerde olması, Balıkesir bölgesi için

özellikle ısınmadan kaynaklı salınımlarda atmosferik PM_{10} ve SO_2 seviyelerinin birbiriyle etkileşimi açısından önemli bir sonuç ifade etmektedir.

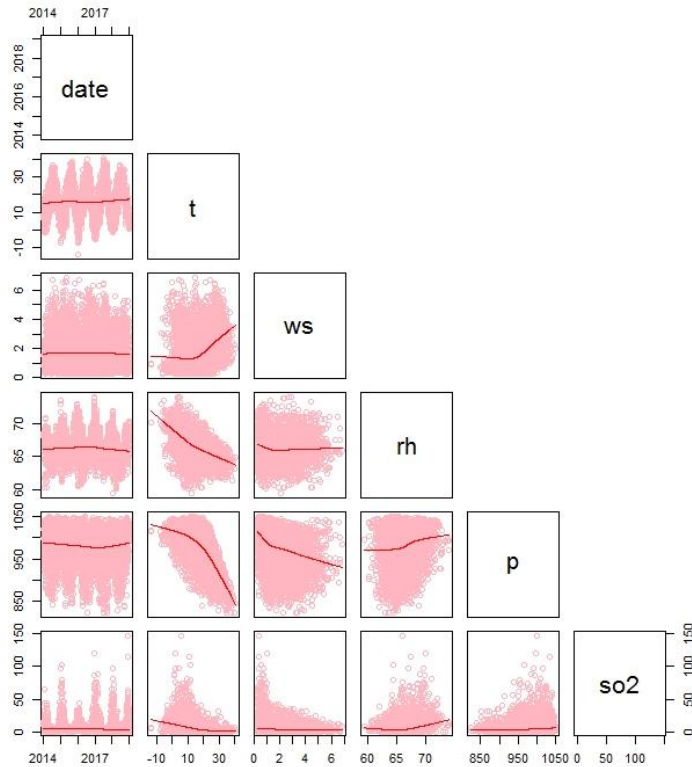
Yine R ortamında oluşturulan her bir kirleticiye ait meteorolojik parametreler karşında değişimlerini gösteren dağılımlar Şekil 5 ve Şekil 6'da sunulmuştur.



Şekil 5. PM₁₀ seviyelerinin meteorolojik parametrelerle değişimleri

Şehir merkezine ait son beş yıllık PM₁₀ seviyeleri ile yine aynı bölgede düzenli olarak ölçülen meteorolojik parametrelerin birbirleriyle olan değişimleri Şekil 5'de sunulmuştur. PM₁₀ seviyelerinin değişiminde etkili olan meteorolojik parametrelerden sıcaklık (t) ve rüzgar hızı (ws) ön plana çıkmaktadır. Sıcaklık ve rüzgar hızı PM₁₀

seviyelerinin değişiminde negatif yönde etki yaptığı bu çoklu karşılaştırmalı grafiklerden anlaşılabilir. Her bir meteorolojik parametrenin PM₁₀ seviyelerindeki değişimlere olan etki derecesinin daha net görülmek için korelasyon analizlerinin yapılması gerekmektedir.



Şekil 6. SO₂ seviyelerinin meteorolojik parametrelerle değişimleri

Benzer şekilde SO₂ seviyelerinin de yerel meteorolojik parametreler ile olan değişimleri Şekil 6'da çoklu olarak karşılaştırılmıştır. İlgili grafikte görülebileceği üzere, SO₂ seviyelerinde en önemli rol oynayan meteorolojik parametrelerin sıcaklık (t) ve sonrasında nem (rh) olduğu tespit edilmiştir. PM₁₀ seviye değişimlerinde olduğu gibi, SO₂ seviyelerinin meteorolojik parametreler karşısında değişimlerinin daha net belirleyebilmek için korelasyon analizlerinin yapılması gerekmektedir. Korelasyon analizlerine ait sonuçlar bir sonraki bölümde detaylı olarak ifade edilmiştir.

4.4. Hava Kirleticilerinin Meteorolojik Veriler İle Modellenmesi

PM₁₀ ve SO₂ hava kirleticilerinin değişimlerinde önemli rol oynayan meteorolojik parametrelerin, kirleticiler ile ilgili olası istatistiksel ilişkilerini incelemek amacıyla ilk olarak Pearson korelasyon analizleri yapılmıştır. Bu tür korelasyon analizleri çevresel ve hava kirliliği çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Çakır ve Abdullah, 2017; Yılmaz, 2017; Topal ve Hayaloğlu, 2017; Mutlu, 2019). Korelasyon analizi sonuçları Tablo 4'de sunulmuştur.

Tablo 4. Pearson korelasyon analizi sonuçları

Çoklu Korelasyon Matrisleri							
Pearson Korelasyon Katsayıları	PM ₁₀	PM ₁₀	t	ws	rh	p	
		PM ₁₀	1.000	-0.22	-0.34	0.20	0.11
		t	-0.22	1.000	0.28	-0.53	-0.66
		ws	-0.34	0.28	1.000	-0.09	-0.36
		rh	0.20	-0.53	-0.09	1.000	0.21
	p	0.11	-0.66	-0.36	0.21	1.000	
Pearson Korelasyon Katsayıları	SO ₂	SO ₂	t	ws	Rh	p	
		SO ₂	1.000	-0.41	-0.23	0.27	0.14
		t	-0.41	1.000	0.28	-0.53	-0.66
		ws	-0.23	0.28	1.000	-0.09	-0.36
		rh	0.27	-0.53	-0.09	1.000	0.21
	p	0.14	-0.66	-0.36	0.21	1.000	

Pearson korelasyon analizi sonuçlarına göre, Balıkesir şehir merkezinde PM₁₀ seviyelerinin değişimleri öncelikle rüzgar hızı (ws) ve sonrasında sıcaklık (t) parametreleri ile ilişkilendirilebilir. En yüksek korelasyon katsayıları rüzgar hızı ve sıcaklık olarak belirlenmiş olup, rüzgar hızı ve sıcaklık artması durumunda PM₁₀ seviyelerinde azalma yönünde bir eğilim göze çarpmaktadır.

Benzer durum, SO₂ seviyeleri incelendiğinde de görülmektedir. Şöyle ki, SO₂ seviyelerinin değişimlerinde en yüksek korelasyon katsayısı yine sıcaklık (t) parametresinde belirlenmiştir. Sıcaklık parametresinden sonra, nem (rh) ve yine rüzgar hızı (ws) önemli rol oynamaktadır. SO₂ seviyeleri sıcaklık ve rüzgar hızı artışı ile azalma eğiliminde olup, nemin artması ile artış eğiliminde olmaktadır.

Tablo 5. Kendall's Tau korelasyon analizi sonuçları

Çoklu Korelasyon Matrisleri							
Kendall's Tau Korelasyonu	PM ₁₀	Korelasyon Katsayıları	PM ₁₀	t	ws	rh	p
		p-values	.	0.00	0.00	0.00	0.00
		N	43824	43824	43824	43824	43824
Kendall's Tau Korelasyonu	SO ₂	Korelasyon Katsayıları	SO ₂	t	ws	rh	p
		p-values	.	0.00	0.00	0.00	0.00
		N	43824	43824	43824	43824	43824

**Fark %95 önem düzeyinde istatistiksel olarak önemlidir

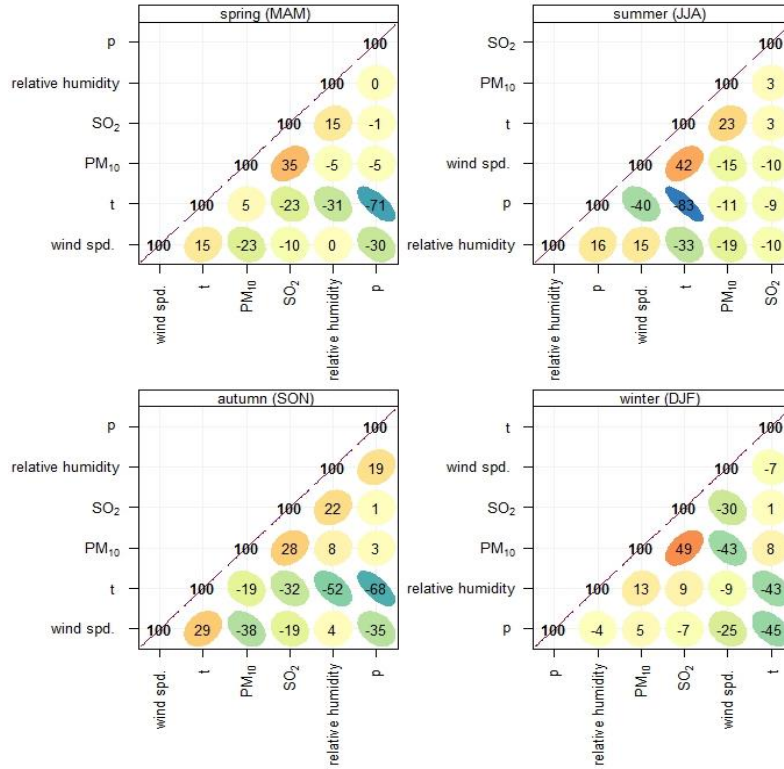
Çevresel analizlerde bağımsız ve normal dağılım gösteren geniş veri setlerinde yine çok kullanılan bir başka korelasyon analizi ise Kendall's Tau

analizidir (Cerro vd., 2015; Yolsal, 2016; Sanchez de la Campa vd., 2018). Korelasyon analiz sonuçları Tablo 5 'de sunulmuş olup, PM₁₀

seviyelerindeki değişimlerde rüzgar hızının (ws) en yüksek korelasyona, SO₂ seviyelerinde değişimler de ise sıcaklığın (t) en yüksek korelasyona sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Bu sonuçla, Pearson korelasyon analizine benzer olarak, Kendall's Tau korelasyon analiz sonuçlarına göre, rüzgar hızı ile PM₁₀ seviyelerinin değişimine ilişkin ters yönlü korelasyon ve yine sıcaklık ile SO₂ seviyelerinin

değişimi arasında ise yine beklenildiği gibi ters yönlü korelasyon olduğu sonuçlarına varılmıştır.

Analiz kapsamında, ayrıca tüm parametrelerin mevsimlere ait korelasyonları ayrı ayrı incelenmiş olup, mevsimsel korelasyon grafikleri R ortamında oluşturulmuştur. İlgili mevsimsel korelasyonların sonuçlarının verildiği görsel Şekil 7'de sunulmuştur.



Şekil 7. Mevsimlere ait korelasyon analizi sonuçları

Hava kirleticilerinin ve meteorolojik parametrelerin mevsimsel olarak birbirleriyle nasıl etkileşim halinde olduğunu görebilmek için Şekil 7'de verildiği üzere mevsimlere ait çoklu korelasyon grafikleri oluşturulmuştur.

Grafikten de görüleceği üzere, en yüksek korelasyon PM₁₀ ve SO₂ arasında 0.49 olarak pozitif eğilimli olarak kış mevsiminde tespit edilmiştir. En düşük korelasyon ise 0.03 olarak yaz mevsiminde görülmüştür. Yine daha önceki korelasyon analizlerine benzer olarak, PM₁₀ ile rüzgar hızı, ayrıca SO₂ ile sıcaklık arasında özellikle ılık mevsimlerde yani ilkbahar, sonbahar ve soğuk mevsim olan kış mevsimlerinde görülmüştür. Bu sonuçlar daha önce yapılan Pearson ve Kendall's Tau analizleri ile uyum sağlamaktadır.

Kirleticiler üzerinde her bir meteorolojik parametrenin ayrı ayrı korelasyonlarının

incelenmesinden sonra, tüm meteorolojik parametrelerin bütün olarak etkisinde hava kirleticileri seviyelerinin deterministik olarak modellenmesi için hava kirleticileri ve tüm meteorolojik parametrelerden oluşan bir regresyon modeli oluşturulmuştur.

Oluşturulan regresyon modelinde, PM₁₀ ve SO₂ parametreleri bağımlı değişkenler, tüm meteorolojik parametreler ise bağımsız değişkenler olarak tanımlanmıştır. Oluşturulan regresyon modelinde "stepwise" yöntemi kullanılarak, her bir bağımlı değişkeni açıklayabilmek için bağımsız değişkenler her bir adımda modele tek tek dahil edilerek, modelde gerekli olan tüm bağımsız verilerin etkisi araştırılmış ve en yüksek R² değerine sahip model, bağımlı değişkeni açıklayabilmede uygun model olarak seçilmiştir. PM₁₀ seviyelerinin tahmin edilmesinde kurulan regresyon model sonuçları Tablo 6'da sunulmuştur.

Tablo 6. PM₁₀ parametresi için oluşturulan regresyon modeli adımları

Model Adımları	Model Katsayıları		t istatistiği	p _{values}	R ²	
	β	Std. Error				
1	β_0	66.290	0.306	216.806	0.00	0.12
	β_1 (ws)	-10.374	0.135	-77.026	0.00	
2	β_0	-155.806	5.693	-27.368	0.00	0.15
	β_1 (ws)	-9.906	0.133	-74.513	0.00	
	β_2 (rh)	3.334	0.085	39.066	0.00	
3	β_0	-123.071	6.473	-19.012	0.00	0.15
	β_1 (ws)	-10.440	0.142	-73.495	0.00	
	β_2 (rh)	3.515	0.087	40.430	0.00	
	β_3 (p)	-0.045	0.004	-10.579	0.00	
4	β_0	36.960	9.847	3.754	0.00	0.16
	β_1 (ws)	-10.234	0.142	-72.254	0.00	
	β_2 (rh)	2.339	0.102	22.859	0.00	
	β_3 (p)	-0.118	0.005	-21.771	0.00	
	β_4 (t)	-0.687	0.032	-21.483	0.00	

PM₁₀ hava kirleticisi için oluşturulan regresyon modeline ait adımlar Tablo 6'da gösterilmiştir. Regresyon analizi adımlarında, modele önce rüzgar hızı (ws) bağımsız değişkeni eklenmiş ve uygun R², β_0 ve β_1 katsayıları hesaplanarak model oluşturulmuştur. Bu oluşturulan ilk adım model için R² değeri 0.12 olarak hesaplanmıştır. Bunun anlamı, oluşturulan modelde, PM₁₀ seviyesinin tahmin etmek için sadece rüzgar hızı bağımsız değişkeni kullanılırsa, bu tek parametre olan rüzgar hızı modele dahil edilerek, PM₁₀ seviyesini sadece %12 oranında açıklayabilir sonucuna

varılmaktadır. Modele tüm bağımsız değişkenler olan meteorolojik parametreler dahil edildiğinde (4.adım) ise, R² değeri 0.16 olarak hesaplanmış olup ayrıca sabit katsayı (β_0) ve her bir bağımsız değişkenlere ait katsayılar (β_1 , β_2 , β_3 ve β_4) hesaplanmıştır. Tüm meteorolojik parametrelerin kullanılması halinde, PM₁₀ seviyesi ancak %16 oranında tahmin edilebilir veya açıklanabilir sonucunda varılmaktadır. Benzer şekilde, SO₂ seviyelerinin tahmin edilmesinde kurulan regresyon model sonuçları Tablo 7'de sunulmuştur.

Tablo 7. SO₂ parametresi için oluşturulan regresyon modeli adımları

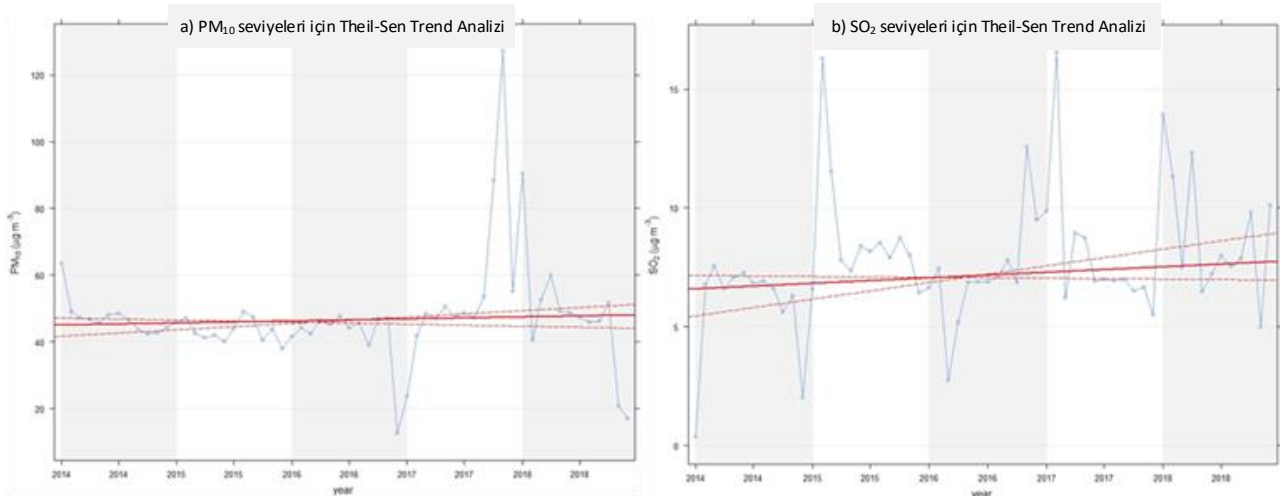
Model Adımları	Model Katsayıları		t istatistiği	p _{values}	R ²	
	β	Std. Error				
1	β_0	15.954	0.097	165.150	0.00	0.18
	β_1 (t)	-0.507	0.005	-96.585	0.00	
2	β_0	73.349	1.354	54.187	0.00	0.21
	β_1 (t)	-0.700	0.007	-101.961	0.00	
	β_2 (p)	-0.056	0.001	-42.505	0.00	
3	β_0	88.258	1.381	63.908	0.00	0.23
	β_1 (t)	-0.683	0.007	-101.019	0.00	
	β_2 (p)	-0.068	0.001	-51.711	0.00	
	β_3 (ws)	-1.415	0.035	-39.956	0.00	
4	β_0	78.352	2.463	31.813	0.00	0.24
	β_1 (t)	-0.662	0.008	-82.792	0.00	
	β_2 (p)	-0.067	0.001	-49.597	0.00	
	β_3 (ws)	-1.420	0.035	-40.076	0.00	
	B_4 (rh)	0.124	0.026	4.857	0.00	

Daha önce oluşturulan PM₁₀ regresyon modeline benzer olarak, bağımlı değişken olarak SO₂ seviyeleri kullanılmış olup, diğer bağımsız parametreler olan meteorolojik parametreler ise tek tek modele dahil edilmiştir. En yüksek R² değeri, PM₁₀ modelinde olduğu gibi, tüm bağımsız değişkenlerin modele dahil edildiği adım (4.adım) olan son modelde tespit edilmiştir. Model için hesaplanan R² değeri 0.24 olup, bu değer PM₁₀ modeli için hesaplanan R² değerinden nispeten daha yüksektir. Dolayısıyla, model sonucuna göre, tüm meteorolojik parametreler dahil edilerek SO₂ seviye tahminleri ancak %24 oranında açıklanabilmektedir.

4.5. Hava Kirleticilerine Ait Trend Analizleri

Trend analizleri son yıllarda geniş veri setleri içeren klimatolojik ve hidrolojik uygulamalarda

kullanılmaktadır (Guerreiro vd., 2014; Koudahe vd., 2017). Hava kirleticilerinin belirli bir bölge üzerinde zamanla değişimlerini incelemek için veri setlerinin doğasında var olan mevsimsellik değişimleri, kayıp veriler veya anormal değerler içermesi nedeniyle parametrik olmayan istatistiksel yöntemlerle trend analizleri yapılmaktadır (Carslaw, 2015; Yolsal, 2016; Okello vd., 2018). Çevresel çalışmalara ait monotonik eğilimli trend analizleri için en az beş yıllık ve aylık bazda veri setlerinin kullanılması tavsiye edilirken, trendlerin doğrusal eğimleri yani birim zamandaki değişimlerinin çoklu yıllar zaman dilimi içinde belirlenmesi için Theil-Sen trend tahmini yöntemi kullanılmıştır (Carslaw, 2015). Sen trend analizi sonuçları PM₁₀ ve SO₂ değişimleri için Şekil 8'de sunulmuştur.



Şekil 8. (a) PM₁₀ ve (b) SO₂ seviyelerinin değişimlerine ait beş yıllık trend grafiği

Theil-Sen trend analiz sonucunda, saatlik veriler üzerinde analiz edilmesini kolaylaştıran Carslaw Algoritması kullanılarak R ortamında elde edilen ve Şekil 8a'da sunulan grafiğe göre, kırmızı düz çizgiler son beş yıla ait PM₁₀ tahmin ortalamalarını, kesikli kırmızı çizgiler ise tahmin değerlerine ait %95 seviyede güven aralıklarını ifade etmektedir. Theil-Sen trend analizine göre, son beş yıllık zaman dilimi içerisinde PM₁₀ seviyeleri yıllık ortalama 45 -50 µg/m³ aralığında olacak şekilde artış eğilimi göstermektedir. Benzer şekilde, Theil-Sen trend analizi, çalışma alanında SO₂ seviyelerinin değişimleri için uygulanmış olup, trend analizi sonuçları Şekil 8b'de sunulmuştur. Theil-Sen trend analizi sonucunda göre, PM₁₀ trend artışına benzer şekilde, SO₂ seviyelerinin artış eğiliminde olduğu tespit edilmiştir. Söz konusu artış eğilimine göre,

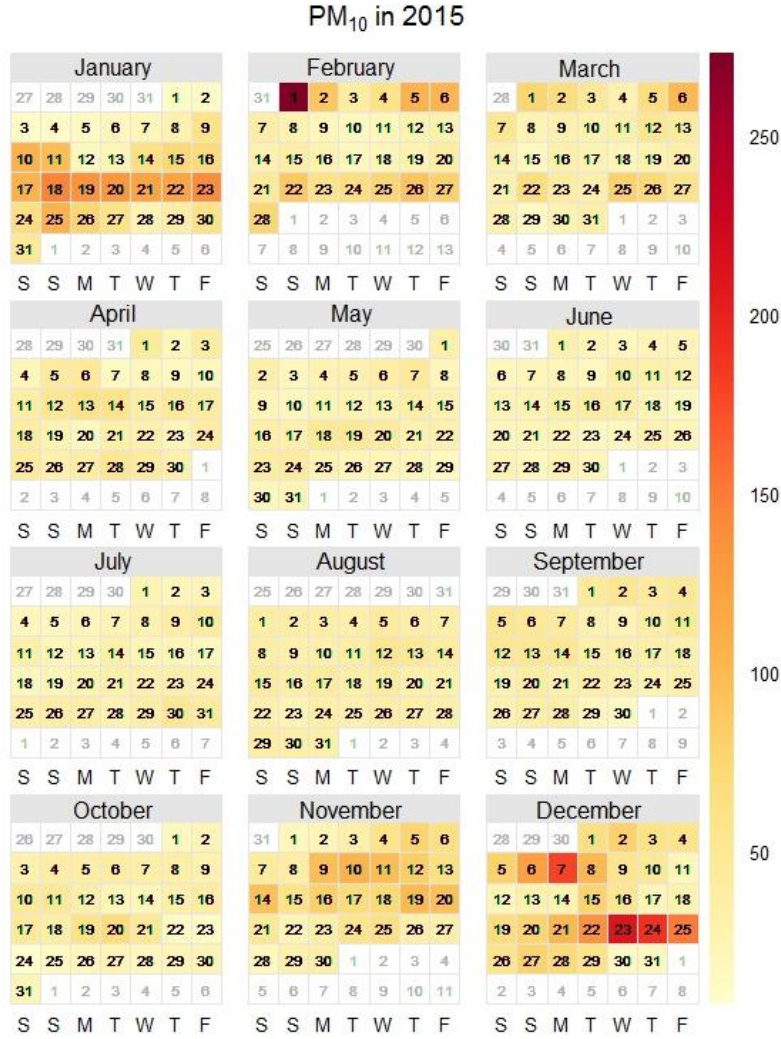
SO₂ seviyesi ortalama 8 µg/m³ üzerinde olduğu analiz sonuçlarına göre ifade edilebilir.

4.6. Şehir Merkezinde Hava Kirleticilerine Ait Epizotlar

Şehir merkezinde son beş yıllık zaman dilimi içerisinde en yüksek PM₁₀ konsantrasyonu 576.3 µg/m³ olarak 1. Şubat.2015 günü ölçülmüştür. En yüksek PM₁₀ seviyesinin ölçüldüğü yıl olan 2015 yılı için Carslaw Algoritması kullanılarak R ortamında oluşturulan kirlilik takviminde (Şekil 9) o yıla ait her bir takvim günü için ölçülen PM₁₀ seviyeleri belirtilmiş ve bu şekilde yıl içi günlük PM₁₀ dağılımları ve olası epizot günleri belirlenmesi için daha faydalı bir görsel oluşturulmuştur. Kirlilik takviminden de görüleceği üzere en yüksek PM₁₀ seviyesine sahip

gün 1. Şubat günü olarak tespit edilmiş olup, epizot günü için bu tarih seçilmiştir. En yüksek PM_{10} konsantrasyonun ölçüldüğü günün öncesinde veya sonrasında herhangi bir yüksek değer oluşmadığı da kirlilik takviminden

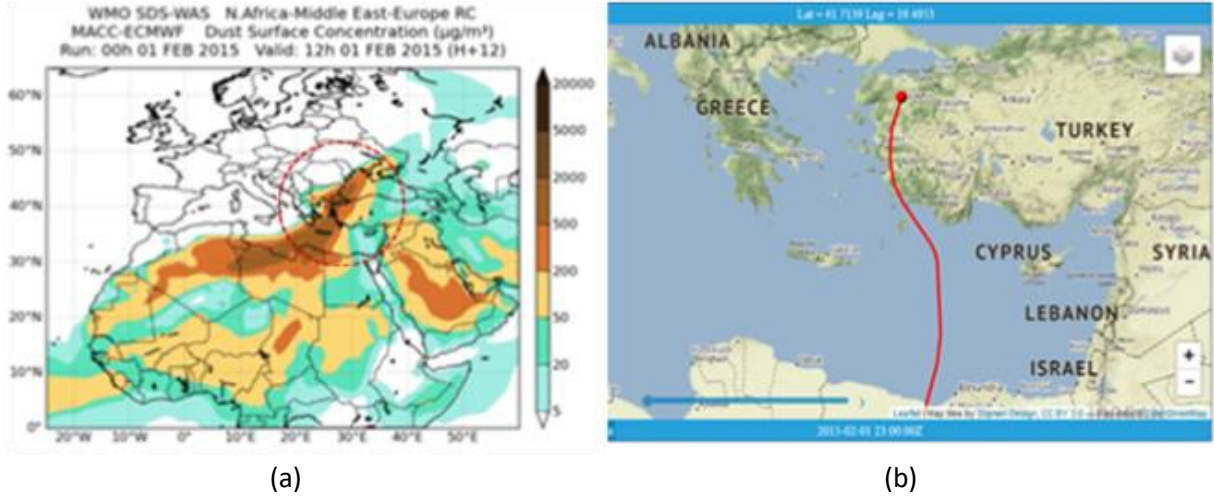
görülebilir. Sadece 1. Şubat gününü özel yapan ve PM_{10} konsantrasyonunun maksimum seviyeye çıkararak olağan dışı bir durumun incelenmesi gerekmektedir.



Şekil 9. 2015 yılı için PM_{10} seviyeleri için oluşturulan kirlilik takvimi

Epizot gününe ait olağan dışı durumun incelenmesinde, şehir merkezinin olduğu bölgede olası çevreden gelen toz taşınımı önem kazanmaktadır ve zaman zaman etkili olmaktadır. Dış bölgelerden hatta diğer ülke veya kıtalardan gelen toz yüklerinin araştırılmasında iki kaynak kullanılmıştır. Bu kaynaklardan ilki, Dünya Meteoroloji Örgütü'nün yönetiminde olan ve Barcelona Super Computing Center (BSCC) tarafından geliştirilen Global Toz Tahmini verileri incelenmiştir (URL-2, 2019). Epizot günü olan, 1.Şubat.2015 günü için veri tabanlarından Balıkesir merkez olmak üzere olası toz taşınımı incelenmiş ve söz konusu tarihte Doğu Avrupa ve Ortadoğu bölgesi için yapılan hem BSCC toz taşınımı modelinde Balıkesir ilinin de içinde bulunduğu bölgeye (Şekil 10.a'da kırmızı

çizgili daire içinde gösterilmiştir) Kuzey Afrika'dan yoğun olarak çöl tozlarının taşındığı sonucuna varılmıştır. Söz konusu taşınım, merkezi Amerika Birleşik Devletleri'nde bulunan National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) tarafından geliştirilen HYSPLIT hava taşınım modellerinde de tespit edilmiş olup ilgili model görseli Şekil 10.b'de sunulmuştur (URL-3, 2019). HYSPLIT modelinde ise yine Kuzey Afrika'dan başlayan ve Balıkesir ilinin de içinde bulunduğu ülkenin batı kısımlarını etkileyen hava kütlesi hareketinin olduğu açıkça görülmektedir. Sonuç olarak, il merkezinde en yüksek PM_{10} konsantrasyonunun ölçüldüğü epizot gününde Kuzey Afrika'dan kıtasal toz taşınımından gelen çöl tozlarının etkili olduğu sonucu çıkartılabilir.

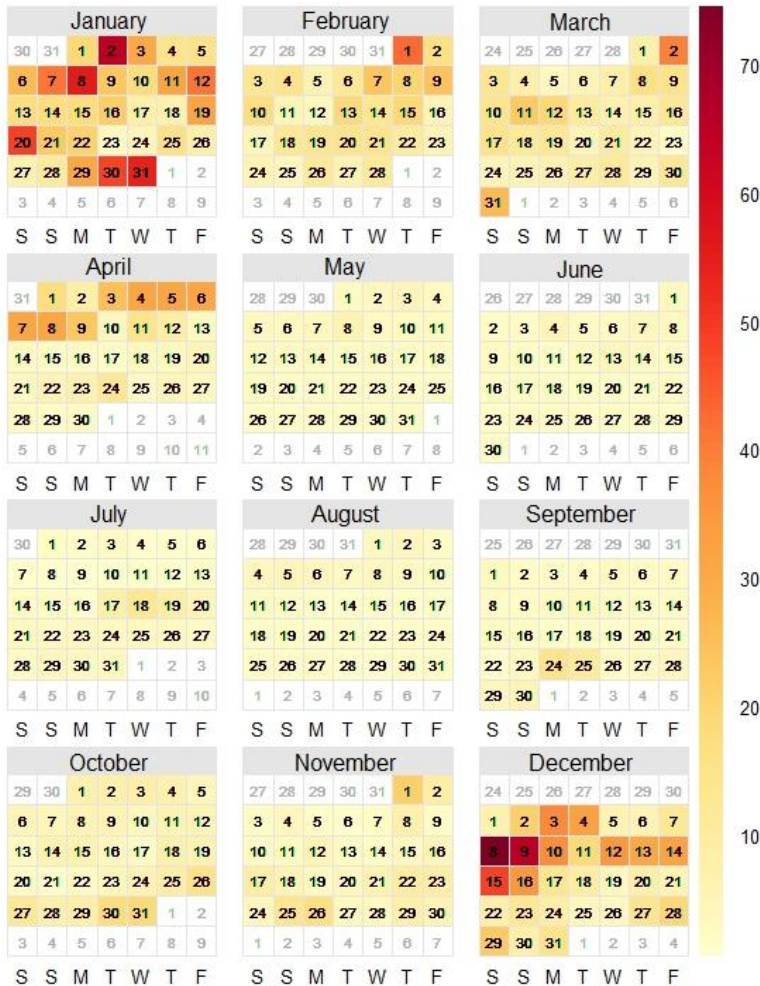


Şekil 10. (a) Barcelona Super Computing Center tarafından oluşturulan toz taşınım modeli, (b) NOAA HYSPLIT trajectory modeline göre hava kütlesi taşınım modeli

Yine aynı şekilde, şehir içinde ölçülen uzun yıllık SO_2 konsantrasyonları içinde en yüksek SO_2 konsantrasyonu $146.9 \mu g/m^3$ olarak 8.Aralık.2018 günü ölçülmüştür. Tipik olarak, daha önceki analizlerden de anlaşılacağı üzere, Şekil 11.'de sunulan 2018 yılına ait kirlilik takviminde de gösterildiği gibi, SO_2 konsantrasyonları yılın

ilk ayı ve son aylarındaki dönemi kapsayan kış mevsiminde en yüksek seviyelere ulaştığı açıkça görülebilmektedir. İlgili kirlilik takviminde 8.Aralık ve kısmen de 9.Aralık günlerinde en yüksek SO_2 seviyeleri ölçülmüş olup, epizot günü olarak 8. Aralık.2018 günü belirlenmiştir.

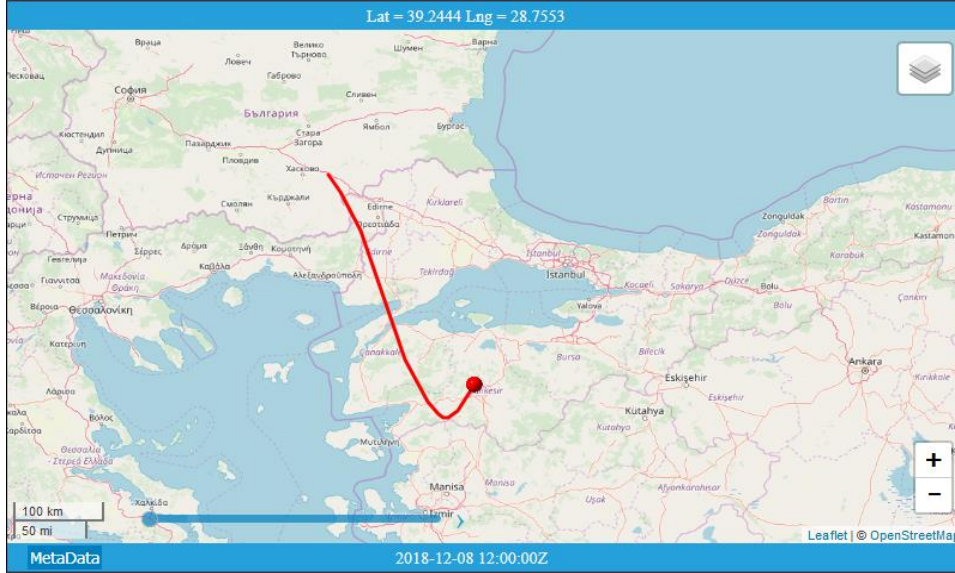
SO_2 in 2018



Şekil 11. 2018 yılı için SO_2 seviyeleri için oluşturulan kirlilik takvimi

Balıkesir şehir merkezinde son beş yıllık zaman diliminde diğer yıllarda maksimum seviye $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ seviyesini geçmediği görülmektedir. Şehir merkezine ait SO_2 epizot gününde bu anlık yükselişin sebebi iki yönlü düşünülebilir. İlk neden, o gün için oluşabilecek ani sıcaklık düşüşleridir. Epizot günü sıcaklık değeri 5°C

civarındadır. Dolayısıyla mevsim normalleri altında anormal bir soğuk hava etkisi olmamaktadır. Diğer neden ise, toz taşınımlarında olduğu gibi dış bölgelerden şehir merkezine doğru olabilecek hava kütlesi taşınımları olduğu düşünülmektedir.



Şekil 12. NOAA HYSPLIT trajectory modeline göre hava kütlesi taşınım modeli

Balıkesir şehir merkezine, epizot günü olan 8.Aralık günü oluşan hava kütleleri taşınımları NOAA HYSPLIT algoritması kullanılarak analiz edildiğinde, Şekil 12.'de gösterildiği gibi hava kütlesi taşınımlarının o günlerde Bulgaristan'ın güney doğu bölgesi üzerinden geldiği ve Bulgaristan'ın ülkemize sınırına yakın olan güney doğu bölgesinde Kovachevo şehrinde bulunan ve enerji üretim kapasiteleri 200-300 MW arasında değişen kömürle çalışan üç adet Maritsa Iztoq santralleri, yine yakın bölgede Obruchiste şehrinde bulunan 50 MW kapasiteli dört adet Brikel santrali ve Devin şehrinde bulunan 172 MW kapasiteli dört adet Deven santrali olmak üzere yaklaşık on bir adet termik santrallerden salınan SO_2 gazının etkisinde olabileceği tahmin edilmektedir. Ayrıca diğer önemli bir husus ise, Balıkesir şehir merkezi için geçmiş yıllara ait uzun dönemlik meteorolojik veriler incelendiğinde, bölgeye ait tipik enverzyon (atmosferik sıcaklık tersellenmesi) oluşumları özellikle Aralık aylarında en şiddetli seviyelerde olduğu tespit edilmiştir. SO_2 seviyesinin maksimum olduğu epizot günü incelemesinde lokal enverzyon etkisinin de olduğu düşünülmektedir ve ayrı bir çalışma kapsamında detaylı olarak incelenmesi gerekmektedir.

Kaynaklar

- Alberini, A. ve Krupnick, A., 1998. Air Quality and Episodes of Acute Respiratory Illness in Taiwan Cities: Evidence from Survey Data. *Journal of Urban Economics*, 44 (1), 68-92.
- Beaver, S. ve Palazoglu, A., 2009. Influence of synoptic and mesoscale meteorology on ozone pollution potential for San Joaquin Valley of California. *Atmospheric Environment*, 43, 1779-1788.
- Borge, R., Lumberras, J., Perez, J., de la Paz, D. ve Vedrenne, M., 2014. Emission inventories and modeling requirements for the development of air quality plans. Application to Madrid (Spain). *Science of the Total Environment*, 466, 809-819.
- Brunekreef, B. ve Holgate, S.T., 2002. Air pollution and health. *The Lancet*, 360 (9341), 1233-1242.
- Carslaw, D.C. ve Ropkins, K., 2012. Openair — an R package for air quality data analysis. *Environmental Modelling & Software*, 27 (28), 52-61.
- Carslaw, 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, UK. 287p.

- Cerro, J.C., Cerda, V. ve Pey, J., 2015. Trends of air pollution in the western Mediterranean Basin from a 13-year database: A research considering regional, suburban and urban environments in Mallorca (Balearic Islands). *Atmospheric Environment*, 103,138-146.
- Csavina, J., Field, J., Félix, O., Corral-Avitia, A.Y., Sáez A.E. ve Betterton, E.A., 2014. Effect of wind speed and relative humidity on atmospheric dust concentrations in semi-arid climates. *Science of the Total Environment*, 487, 82-90.
- Çakır, S. ve Abdullah, A.H., 2017. Hava kirletici konsantrasyonlarının meteorolojik parametrelere dayalı çoklu-lineer regresyonla analizi: Kuzey Kıbrıs Örneği, VII. Ulusal Hava Kirliliği ve Kontrolü Sempozyumu, 1-3 Kasım 2017, Antalya, s.17.
- Elbir, T., Müezzinoğlu, A. ve Bayram, A., 2000. Evaluation of some air pollution indicators in Turkey. *Environmental International*, 26, 5-10.
- Elminir, H.K., 2005. Dependence of urban air pollutants on meteorology. *Science of the Total Environment*, 350, 225-237.
- Gomzi, M., 1999. Indoor air and respiratory health in preadolescent children. *Atmospheric Environment*, 33 (24-25), 4081-4086.
- Guerreiro, C., Foltescu, V. ve De Leeuw, F., 2014. Air quality status and trends in Europe. *Atmospheric Environment*, 98, 376-384.
- Helander, M.L., Savolainen, J. ve Ahlholm, J., 1997. Effects of air pollution and other environmental factors on birch pollen allergens. *Allergy: European Journal of Allergy & Clinical Immunology*, 52(12), 1207-1214.
- HKDYY, 2008. Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği, Resmi Gazete Tarihi: 06.06.2008, Resmi Gazete Sayısı: 26898. Ankara.
- Jacob, D.J. ve Winner, D.A., 2009. Effect of climate change on air quality. *Atmospheric Environment*, 43, 51-63.
- Koçman, A., 1993. Türkiye İklimi, Ege Üniversitesi Yayınları, Yayın No:72, İzmir.
- Koudahe, K., Djaman, K., Bodian, A., Irmak, S., Sall, M., Diop, L., Balde, A.B. ve Rudnick, D., 2017. Trend analysis in rainfall, reference evapotranspiration and aridity index in southern senegal: adaptation to the vulnerability of rainfed rice cultivation to climate change. *Atmospheric and Climate Sciences*, 7 (4), 476-495.
- Martonen T.B. ve Schroeter, J.D., 2003. Risk assessment dosimetry model for inhaled particulate matter: I. Human subjects. *Toxicology Letters*, 138 (1-2), 119-132.
- Monn, C., Alean-Kirkpatrick, P., Künzli, N., Defila, C., Peeters, A., Ackermann-Liebrich, U., Leuenberger, F. ve SAPALDIA Team, 1999. Air pollution, climate and pollen comparisons in urban, rural and alpine regions in Switzerland (SAPALDIA study). *Atmospheric Environment*, 33 (15), 2411-2416.
- Moshhammer, H. ve Neuberger, M., 2003. The active surface of suspended particles as a predictor of lung function and pulmonary symptoms in Austrian school children. *Atmospheric Environment*, 37, 1737-1744.
- Mutlu, A., 2018. Sanayi kaynaklı karbonmonoksit salınımlarının AERMOD dağılım modeli ile incelenmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 23(2), 275-286. Doi: 10.17482/uumfd.398123.
- Mutlu, A., 2019. Balıkesir şehir merkezinde trafik kaynaklı hava kirliliği seviyelerinin analizi, *BAUN Fen Bil. Enst. Dergisi*, 21 (1), 152-168. Doi: 10.25092/baunfbed.532605.
- Okello, N.O., Camminga, S., Okello, T.W. ve Zunckel, Mark., 2018. Spatial and temporal trends of PM₁₀ and SO₂ in the Richards Bay area. *Clean Air Journal*, 28 (2), 80-89.
- Radaideh, J.A., 2017. Effect of meteorological variables on air pollutants variation in arid climates. *Journal of Environmental & Analytical Toxicology*, 7 (4), 1-12.
- Samoli, E., Stafoggia, M., Rodopoulou, S., Ostro, B., Declercq, C., Alessandrini, E., Díaz, J., Karanasiou, A., Kelessis, A., Le Tertre, A., Pandolfi, P., Randi, G., Scarinzi, C., Zauli-Sajani, S., Katsouyanni, K. ve Forastiere, F., 2013. Associations between fine and coarse particles and mortality in Mediterranean cities: results from the MED-particles project. *Environ. Health Perspect.*, 121, 8.
- Sanchez de la Campa, A.M., Sánchez-Rodas, D., Alsioufi, L., Alastuey, A., Querol, X., ve de la Rosa, J.D., 2018. Air quality trends in an industrialised area of SW Spain. *Journal of Cleaner Production*, 186, 465-474.
- Stafoggia, M., Samoli, E., Alessandrini, E., Cadum, E., Ostro, B., Berti, G., Faustini, A., Jacquemin, Linares C., Pascal, M., Randi, G., Ranzi, A., Stivanello, E. ve Forastiere, F., 2013. Short-term associations between fine and coarse particulate matter and hospitalizations in southern Europe: Results from the MED-

- particles project. *Environ. Health Perspect.*, 121, 9.
- Tağıl, Ş., 2007. Balıkesir’de hava kirliliğinin solunum yolu hastalıklarının mekânsal dağılışı üzerine etkisini anlamada jeo-istatistik teknikler, *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 5 (1), 37-56.
- Tecer, L.H., 2009. A factor analysis study: Air pollution, meteorology, and hospital admissions for respiratory diseases. *Toxicological & Environmental Chemistry*. 91 (7), 1399-1411.
- Tecer, L.H., 2013. Balıkesir’de hava kirliliğinin çocuk ve yetişkinlerde solunum hastalıklarına etkilerinin belirlenmesi üzerine bir alan çalışması. *Hava Kirliliği Araştırmaları Dergisi*, 2, 11–20.
- Tian, J. ve Fernandez, G., 1999. Seasonal trend analysis of monthly water quality data. University of Alberta School of Business Research Paper No. 2013-1203. URL <https://ssrn.com/abstract=2284439>. 02 Nisan 2019.
- Timonen, K.L., Pekkanen, J., Tiittanen, P. ve Salonen, R.O., 2002. Effects of air pollution on changes in lung function induced by exercise in children with chronic respiratory symptoms. *Occup. Environ. Med.*, 59, 129-134.
- Topal, M.H. ve Hayaloğlu, P., 2017. Farklı Gelişmişlik Düzeylerinde Kurumsal Kalitenin Çevre Performansı Üzerindeki Etkisi: Ampirik Bir Analiz. *Sosyoekonomi*, 25 (32), 189-212.
- URL-1, 2017. TÜİK, Yıllara göre bölge nüfusları. 2000-2017. URL-1, <http://www.tuik.gov.tr/UstMenu.do?metod=temelist>. 18 Şubat 2019.
- URL-2, 2019. Barcelona Super Computing Center, Global toz dağılımı merkezi. <https://sds-was.aemet.es/forecast-products/dust-forecasts>. URL, <https://sds-was.aemet.es/forecast-products/dust-forecasts>. 08 Nisan 2019.
- URL-3, 2019, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), HYSPLIT taşınım modellemesi. https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT_traj.php.
- URL, <https://www.ready.noaa.gov/READYtransp.php>. 02 Nisan 2019.
- Visscher, A., 2014. *Air Dispersion Modeling*, John Wiley & Sons Press. Hoboken, New Jersey. 634p.
- Wang, L.K., Pereria, N.C. ve Hung, Y.T., 2004. *Air Pollution Control Engineering*, Humana Press, Totowa, New Jersey. 505 p.
- WHO (World Health Organization), 2006. *Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Summary of Risk Assessment*. Geneva, Switzerland.
- WHO (World Health Organization), 2016. *Ambient Air Pollution: A Global Assessment of exposure and burden of disease*. Geneva, Switzerland.
- Williams, R., Creason, J., Zweidinger, R., Watts, R., Sheldon L. ve Shy, C., 2000. Indoor, outdoor, and personal exposure monitoring of particulate air pollution: the Baltimore elderly epidemiology-exposure pilot study. *Atmospheric Environment*, 34 (24), 4193-4204.
- Wong, G. W. K., Ko, F. W. S., Lau, T. S., Li, S. T., Hui, D., Pang, S. W., Leung, R., Fok, T. F. ve Lai, C.K.W., 2000. Temporal relationship between air pollution and hospital admissions for asthmatic children in Hong Kong. *Clinical and Experimental Allergy*, 31 (4), 565-569.
- Wordley, J., Walters, S. ve Ayres, J., 1997. Short term variations in hospital admissions and mortality and particulate air pollution. *Occupational & Environmental Medicine*, 54(2), 108-116.
- Yılmaz, A., 2017. The effects of climate parametres on air pollution parametres: bolu province sample. *Journal of Current Researches on Social Sciences*, 7, 413-436.
- Yolsal, H., 2016. Estimation of the air quality trends in Istanbul. *Marmara Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 38(1), 375-399.
- Zhang H., Wang Y., Hu J., Ying Q., ve Hu X.M., 2015. Relationships between meteorological parameters and criteria air pollutants in three megacities in China. *Environmental Research*, 140, 242-254.