

TÜRKİYE'DEKİ SO₂ YER ÖLÇÜMLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ VE SO₂ KİRLİLİĞİNİN ZAMANSAL VE MEKANSAL DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ

Merih Balay KARA¹, Burçak KAYNAK TEZEL^{1(*)}

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 34469

ÖZET

Bu çalışmada Türkiye genelindeki kükürtdioksit (SO₂) yer ölçümleri analiz edilerek kirliliğin mekansal, ölçümlerinin saatlik, aylık ve mevsimlik analizleri incelenerek zamansal olarak değişimi değerlendirilmiştir. R programı kullanılarak veriler kalitelerine göre ayrılmış, ardından istatistiksel olarak analiz edilmiş ve sonuçlar yorumlanmıştır. Buna göre, istasyonların %30'u yıllık SO₂ sınır değerini aşmış ve 2013-17 arasında bu sayıda azalma gözlenmemiştir. SO₂ kış dönemi konsantrasyonları hesaplandığında Edirne-Keşan (2015, 681.83 µg/m³), Çan (2013, 271.57 µg/m³) ve Manisa-Soma (2015, 130.41 µg/m³) istasyonları en kirli istasyonlardır. 2016 yılı Nisan ayında İzmit Körfezi'nde yüksek kirlilik ölçümleri gözlemlenmiş, nedeninin yakınında bulunan rafineri tesisi olduğu düşünülmüştür. Çalışma ile SO₂ kirliliğinin kaynakları gemi trafiği, liman işletmeleri, evsel ısınma ve enerji üretiminde yerli kömür kullanımı olarak belirlenmiş, enversiyon ve rüzgarla taşınımın bazı istasyonlarda kirliliği arttırdığı anlaşılmıştır.

ANAHTAR SÖZCÜKLER

Isı haritası, kümeleme analizi, SO₂, R, veri madenciliği, hava kirliliği

ABSTRACT

In this research, the change in ground measurements of sulfur dioxide (SO₂) of Turkey was assessed in terms of location and time that includes hourly, monthly and seasonal analyses. R program was used to categorize data according to their quality, then the data were statistically analyzed and the results were discussed. Winter season limit of SO₂ was exceeded by 30% of stations and the number of the exceeded stations has not been decreased during 2013-17. Edirne-Keşan (2015, 681.83 µg/m³), Çan (2013, 271.57 µg/m³) and Manisa-Soma (2015, 130.41 µg/m³) stations were the most polluted stations. Tüpraş oil refinery was interpreted as the cause of unusual pollution, which was observed in Gulf of İzmit on April 2017. By this study, SO₂ pollution sources including shipping, port operation, local coal usage in energy production and residential heating were determined, and it was understood that inversion and wind have effects on pollution at some of the stations.

KEYWORDS

Heatmap, clustering, SO₂, R, data mining, air pollution

(*) burcak.kaynak@itu.edu.tr

1. GİRİŞ

Atmosferde bulunan kükürt dioksit (SO_2) varlığının başlıca nedenleri evsel ısınmada, ulaşımda ve endüstriyel tesislerde kükürt içeren yakıt kullanımı ve volkanik patlamalardır. Aynı zamanda atmosferdeki SO_2 varlığı asit yağmurlarına da yol açabilir (Cavkaytar vd., 2013). Havada yüksek konsantrasyonda SO_2 bulunması diğer sülfür oksitlerin (SO_x) oluşmasına da yol açabilir. Oluşan SO_x , atmosferdeki diğer gazlarla tepkimeye girerek partikül madde (PM) kirliliğini arttırmaktadır (EPA, 2016).

Kış aylarında ısınma amacıyla kömür kullanımı başta SO_2 , PM ve karbonmonoksit (CO) olmak üzere çeşitli kirleticilerin çevreye yayılmasına neden olmaktadır. Çanakkale ili için yapılan bir çalışmada kömürden doğal gaz kullanımına geçişin ısınma kaynaklı SO_2 konsantrasyonlarında önemli ölçüde düşüş sağladığı gözlenmiştir (Menteşe ve Can Yarımtepe, 2012). 2014 yılında IPCC 3. Çalışma Grubu'nun raporuna göre ulaşım nedeniyle metan (CH_4), uçucu organik maddeler (VOC), azot oksitler (NO_x), SO_2 , CO ve emici olmayan aerosoller atmosfere salınmaktadır (Kwak vd., 2016). Bununla birlikte ulaşımdaki yeni teknolojik gelişmeler ve yakıt kalitelerindeki artış, SO_2 salınımının düşmesinde önemli rol oynamaktadır (Soret vd., 2011). Termik santrallerde ise SO_2 salınımı kullanılan arıtmanın verimine bağlıdır. 2006 yılında yapılan bir çalışmaya göre termik santralin etrafındaki tarım arazileri ve yerleşim alanları SO_2 salınımı nedeniyle olumsuz etkilenmiş ve bölgedeki üç temel tarımsal ürünlerdeki kaybın ekonomik değeri ortalama 744 606\$ olarak hesaplanmıştır (Büke ve Köne, 2009).

SO_2 konsantrasyonunun belirlenen limit değerlerini aşması insan ve çevre sağlığı açısından oldukça tehlikelidir. SO_2 insanlarda burun ve boğazda tahriş, öksürme, nefes darlığı, solunumda hırıltı ve göğüste baskıya neden olmaktadır (Kwak vd., 2016). Hava kirliliğinin astım üzerine etkileri hakkındaki bir çalışmada SO_2 'nin $30 \mu g/m^3$ 'ten daha yüksek olduğu durumlarda astım tanısı ile kirletici konsantrasyonu arasında bağlantı bulunmuştur (Cavkaytar vd., 2013).

Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından 2005-2007 yılları arasında hava kirliliğinin ölçülerek takip edilmesi amacıyla oluşturulmuştur (Eskişehir ÇŞİM, 2014). Türkiye'nin her ilinde kurulan gözlem istasyonları ile başta SO_2 ve PM_{10} olmak üzere bir çok kirletici parametre ölçülmekte ve internetten veriler temin edilebilmektedir. Marmara Temiz Hava Merkezi ise 2008 yılında AB projesi kapsamında kurulmuş olan ilk bölgesel temiz hava merkezi olup, 11 ili kapsamaktadır (Olgun, 2015).

Bu çalışmada Türkiye genelinde mevcut hava kalite gözlem istasyonlarından elde edilen SO_2 verileri kullanılarak yıllar içindeki değişimleri yorumlanmış ve istatistiksel analiz gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler, literatürde verilen belirli ölçütlere göre temizlenerek düşük kalitedeki veriler çıkarılmıştır. R programı, verilerin ayıklanmasında, istatistiksel olarak analiz edilmesinde ve görselleştirilmesinde kullanılmıştır. Oluşturulan grafiklerle SO_2 kirliliğinin değişimi zamansal ve mekansal olarak yorumlanmıştır.

2. MATERYAL VE METHOD

2.1. Yer verileri

Türkiye genelinde gerçekleştirilen SO₂ ölçümleri 2005-2017 yılları için Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın UHKİA internet sitesinden saatlik olarak temin edilmiştir. UHKİA'nın SO₂ ölçümünü yapılan toplamda 157 istasyonu bulunmaktadır. Yanı sıra 2013-2017 yılları arası gerçekleştirilen SO₂ ölçümleri de MTHM'den temin edilmiştir. MTHM, Mart 2013 tarihinden itibaren ölçüm yapmaya başladığından saatlik ölçümler dört yılı (01.03.2013 - 01.03.2017) kapsamakta ve toplamda 31 istasyon bulunmaktadır.

2.2. Veri analizi

Verilerin kalite kontrolü ve değerlendirilmesi için istatistiksel analizde yaygın olarak kullanılan R programı kullanılmıştır. R hızlı sonuç verdiği ve openair gibi hava kalitesi ölçümleri analizi için özel kütüphanelere sahip olduğundan seçilmiştir. Bu şekilde veri analizi ve sunumu gerçekleştirilmiştir. Verilerin sağlıklı değerlendirilmesinde öncelikle verilerdeki hatalı ölçümlerin ayıklanması gerekmektedir. MTHM'den alınan verilerin kalite kontrolü gerçekleştirilmiş veriler olup, UHKİA'dan alınan veriler ise ham verilerdir. Bu nedenle UHKİA verileri çalışmamız kapsamında kalite kontrolünden geçirildikten sonra kullanılmıştır.

Ölçümlerinin analizi sırasında eksik verilerin olması analizi olumsuz etkileyen ana faktördür. UHKİA istasyonlarında 2005-2012 ile 2013-2017 yılları arasındaki ölçümlerdeki eksik veriler yüzde olarak hesaplanmıştır. Buna göre 2013 yılından itibaren çoğu istasyondaki eksik veri oranı azalmış ve gözlem ağına yeni eklenen istasyonlar olmuştur. Bu sebeple veri analizi mümkün olduğunca çok sayıda veri kullanılarak ve MTHM verileri ile uyumlu olması açısından UHKİA istasyonlarının 2013-2017 yılları arasındaki ölçümleri değerlendirilmiştir. MTHM ölçümlerinde ise eksik veri miktarı daha azdır.

UHKİA ölçümlerinin kalite kontrolü için ulusal bir metodoloji bulunmadığından uluslararası örnekler baz alınarak veri kontrolü gerçekleştirilmiştir. Verilerin değerlendirilmesinde Indiana Çevre Yönetimi Dairesi'nin yayınladığı kalite kontrolü el kitabı kullanılmıştır (IDEM, 2015). Buna göre aşağıdaki adımlar R programı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Verilerin kullanılabilmesi için; 1) Gün içerisinde saatlik verilerin %75'inin bulunuyor olması, 2) Ardışık saatlik ölçümlerin arasındaki farkın 150 ppb (393 µg/m³)'den büyük olmaması gerekmektedir. Veri setindeki 7000 µg/m³'ten büyük ve -5 µg/m³'ten küçük ölçülen değerler de dış ortam SO₂ konsantrasyonlarını yansıtmadığı için veri setinden çıkarılmıştır. Yanı sıra beş saat boyunca sıfırdan yüksek ve sabit süregelen ölçümlerin cihazda bir problemi işaret edebileceği ve bu verilerin incelenmesi gerektiği önerilmektedir. Bu metodoloji ile UHKİA veri seti güncellenmiş, MTHM verileri ile beraber R programında farklı paketler kullanılarak istatistiksel yöntemler uygulanmış ve görselleştirilmiştir.

R programı özünde büyük verilerin istatistiksel olarak incelenmesi amacıyla kullanılmakta olup dünya genelinde kullanıcı kitlesine sahiptir. R kütüphanesi, paket adını verdikleri farklı kod gruplarından oluşmaktadır. Örneğin kümeleme analizi (dendrogram) için cluster paketinin, ısı haritası (heatmap.2) için de ggplot2 paketinin yüklenmesi ve bu paketlerin kütüphane olarak kullanılması gerekmektedir. Açık kaynaklı bir program olan R'a herkes paket yükleyebildiğinden aynı işlevde birçok fonksiyon farklı paketlerde bulunmaktadır.

3. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

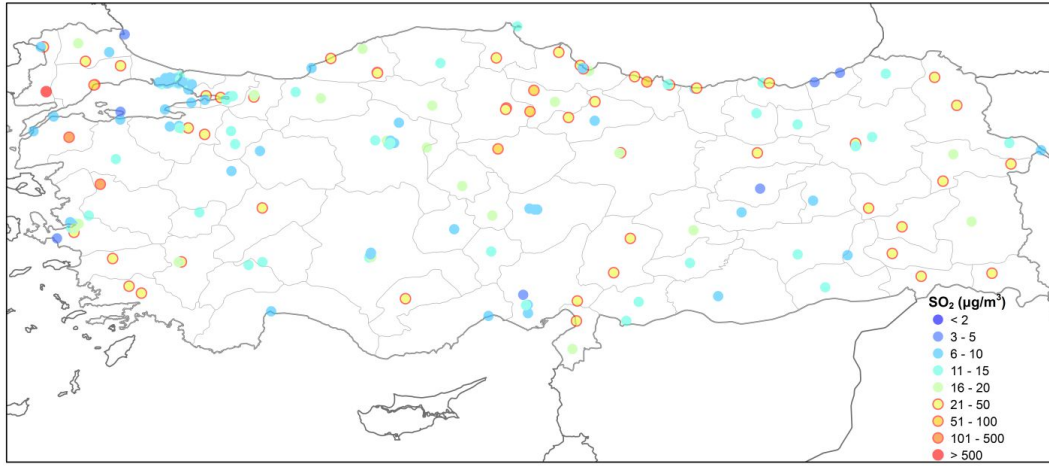
UHKİA ve MTHM istasyonlarının 2013-2017 yılları arası SO₂ ortalaması hesaplanmıştır. Değerlendirme için yıllık SO₂ limit değeri olan 20 µg/m³ esas alınmıştır (ÇŞB, 2008). Dört yılın ortalamasında UHKİA istasyonları için Amasya-Suluova, Şırnak, Manisa-Soma, Hakkari ve Ordu-Fatsa ile MTHM istasyonları arasında Edirne-Keşan, Çanakkale-Çan ve Tekirdağ-Merkez en kirli istasyonlardır. Bununla birlikte UHKİA ve MTHM istasyonlarının yıllık ve kış dönemi SO₂ konsantrasyonlarından yıllık limit değeri geçen istasyon sayısı incelendiğinde dört yıl boyunca MTHM ve UHKİA için istasyonların sırasıyla yaklaşık %19'u ve %14'ü limit değeri aşmıştır. MTHM'den Çan, Keşan ve İzmit, UHKİA'dan Ağrı-Doğubeyazıt, Afyon, Amasya-Suluova, Hakkari, Manisa-Soma ve Şırnak istasyonları öne çıkmaktadır. Kış döneminde tüm istasyonların yaklaşık %33'ü limit değeri aşmıştır. Afyon, Amasya-Suluova, Denizli-Bayramyeri, Hakkari, Manisa-Soma, Ordu-Fatsa, Şırnak, Tekirdağ, Çan-MTHM, Keşan-MTHM ve Tekirdağ Merkez-MTHM istasyonlarında SO₂ kirliliği yüksektir. Hesaplanan tüm ortalamalarda 2013 yılından 2017 yılına bir düşüş gözlenmemiş, aksine bazı istasyonlarda artış görülmüştür. Tüm istasyonlar arasından kış dönemi boyunca en yüksek SO₂ konsantrasyonları ölçen istasyonlar Tablo 1'de gösterilmiştir. Tüm istasyonların 2015 yılı kış dönemi ortalaması ise Şekil 1'deki Türkiye haritası üzerinde renklendirilmiştir.

Tablo 1. Ölçülen en yüksek kış dönemi SO₂ ortalamaları (µg/m³)

İstasyonlar	10/2013-03/2014 ²⁰¹³	10/2014-03/2015 ²⁰¹⁴	10/2015-03/2016 ²⁰¹⁵
Edirne-Keşan	575.25	472.23	681.83
Çan	271.57	155.34	133.94
Hakkari	77.51	46.65	47.57
Manisa-Soma	56.89	123.1	130.41
Amasya-Suluova	64.57	64.57	90.33
Tekirdağ-Merkez	78.53	76.03	76.58

Amasya-Suluova, Tekirdağ-Merkez ve Manisa-Soma'da farklı endüstrilerin yanında kömür ocaklarının bulunması ve çıkarılan kömürlerin evsel ısınmada kullanılması SO₂ konsantrasyonunun yüksek olmasının nedeni olabilir. Bunun yanında Amasya-Suluova ilçesinin çanak şeklindeki yapısı nedeniyle oluşan enversiyon kirliliğin dağılmasını engellemektedir (Amasya ÇŞİM, 2016). Tekirdağ-Merkez istasyonunda ise, sanayi tesislerinin şehir merkezine yakın olması, doğal gaz geçişin yavaş olması ve yerli kömür kullanılması SO₂ kirliliğini arttırmaktadır (Tekirdağ ÇŞİM, 2017).

Türkiye'nin batısında görülen yüksek konsantrasyonlar Edirne-Keşan, Çanakkale-Çan ve Manisa-Soma istasyonlarıdır (Şekil 1). Buradan hareketle ülkemizdeki termik santrallerin ve kömür ocaklarının veya kömür kullanımının olduğu yerlerin rahatlıkla seçilebildiği yorumu yapılabilir. Yanı sıra, Ege'nin güney kıyıları, Orta ve Doğu Karadeniz ile Doğu Anadolu Bölgesi'nde de limit değerini aştığı görülmektedir. Karadeniz Bölgesi'de görülen kirliliğin ısınma ile sanayide yerli kömürün kullanımı ve fiziki özelliklerden dolayı kirliliğin dağılamaması ile oluştuğu düşünülmektedir. Doğu Anadolu'daki kirliliğin ısınmada yerli kömür kullanımı ve fiziki nedenlerden dolayı görüldüğü düşünülmektedir. Ayrıca Irak'ta bulunan petrol rafinerilerinden gelen hava kirliliğinin de bölgeyi etkilediği düşünülmektedir.

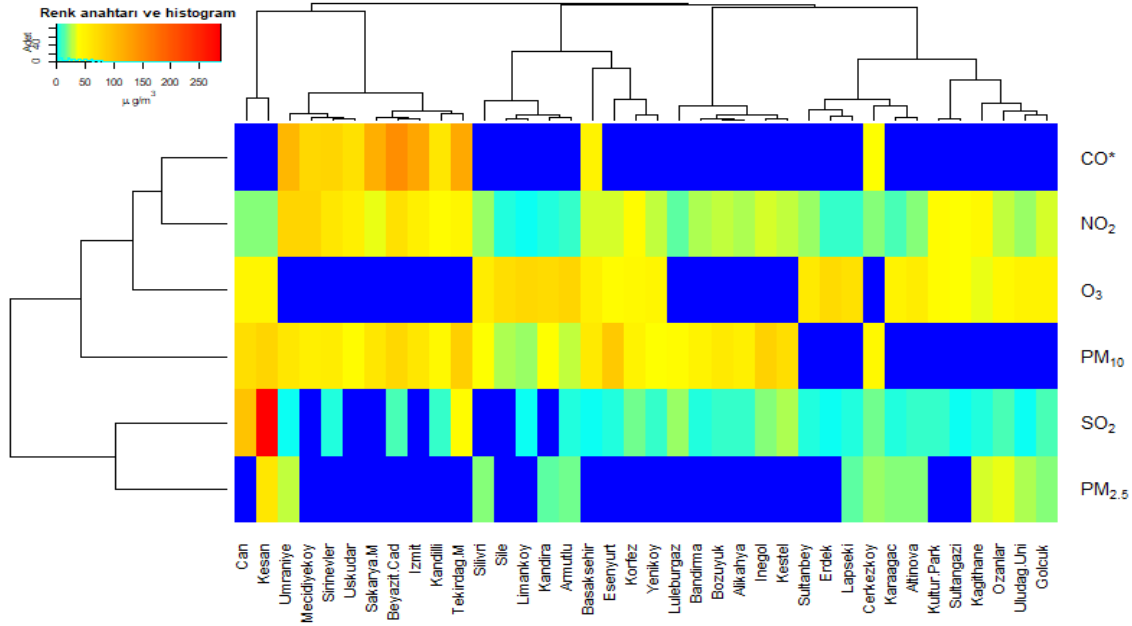


Şekil 1. Mevcut gözlem istasyonları 2015 yılı kış dönemi ortalama SO_2 konsantrasyonları

Çalışma kapsamında tüm istasyonlar değerlendirilmiş olup, çok sayıda istasyon olduğu için yalnızca MTHM istasyonları görsel olarak yansıtılmıştır. MTHM istasyonlarının ve ölçülen kirleticilerin güncel durumlarının incelenmesi için dört yıllık ortalamaları (2013-17) hesaplanmıştır. İstasyon ve kirletici bazında kümeleme analizi ve ısı haritası Şekil 2’de görülmektedir. Kirleticilerin kümelenmesinde 3 öbek öne çıkmaktadır. Bunlar SO_2 - $PM_{2.5}$, CO - NO_2 - O_3 ve PM_{10} gruplarıdır. PM_{10} kirleticisi CO , NO_2 ve O_3 ile aynı kümede yer almasına rağmen onlardan farklı özellikler göstermektedir. Kirleticilerin benzer veya farklı özellikler göstermesi o kirleticilere neden olan kaynakların bulunmasında yardımcı olmaktadır.

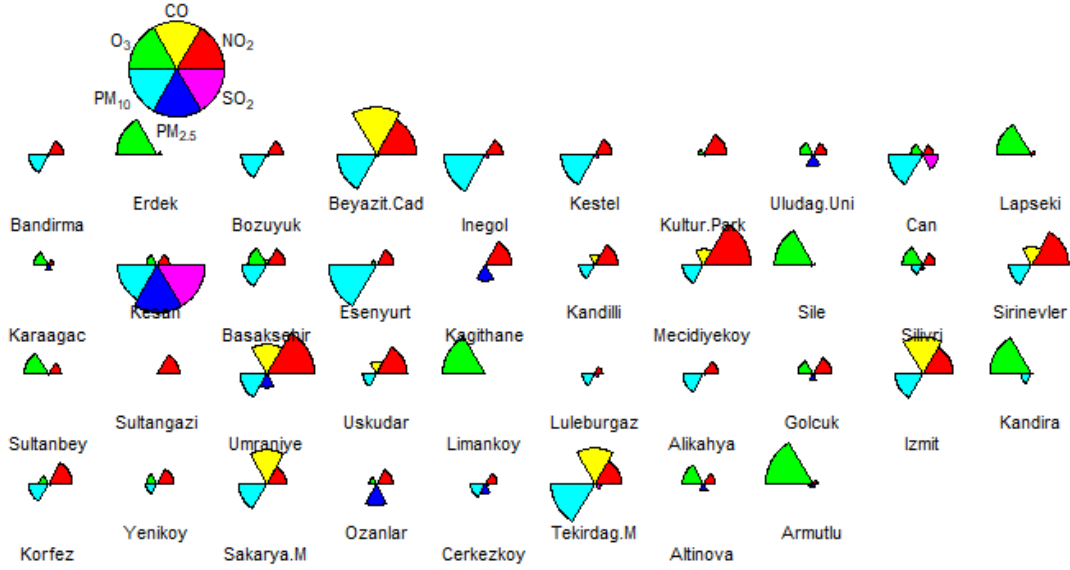
İstasyonlar, kümeleme analizinde dört ana gruba ayrılmıştır. Edirne-Keşan ve Çanakkale-Çan istasyonlarındaki SO_2 ölçümleri en yüksek iki ölçüm olup bu sebepten bir arada kümelmiştir. İki ilçede de kömür ocaklarının bulunması ve kömürün kullanılmasının buna neden olduğu düşünülmektedir (MTA, 2017). Sultangazi ve Kültürpark yerleşim ağırlıklı bölgeler olduklarından dolayı kümeleme analizinde aynı özellikleri göstermişlerdir. Kağıthane istasyonu ise Sultangazi ve Kültürpark’a benzer özellikler göstermiştir. Kağıthane yerleşim yeri olmasına karşın imarlaşmanın ve ulaşımın hala geliştiği bir ilçedir. Önemli otoyolların varlığı trafik kaynaklı kirliliğe neden olmuş ve bu nedenle de bu iki istasyondan farklı kirletici değerleri gözlenmiştir. Marmara Bölgesi’nde kıyılarda bulunan ve genellikle tatil bölgeleri olan Şile, Limanköy, Kandıra ve Armutlu istasyonları da kendi aralarında benzer özellikler göstermiştir. Silivri istasyonu ise bu istasyonlarla aynı yerde ancak farklı olarak sınıflandırılmıştır. Bunun nedeninin otoyol kaynaklı kirlilik olabileceği düşünülmektedir.

İstasyonlarda öne çıkan kirleticiler, dört yıllık kirletici ortalamalarından yola çıkılarak hazırlanmış ve Şekil 3’deki yıldız analizinde gösterilmiştir. Keşan’da PM_{10} , $PM_{2.5}$ ve SO_2 kirleticilerinin öne çıkması yanma kaynaklı hava kirliliğine işaret etmektedir. İlçede kömür ve taş ocaklarının bulunması, bu madenlerin çıkarılması sırasında toz oluşumu, kömürün civarda kullanılmasıyla oluşan emisyon ve şehirde enversiyon olayının olması bu kirliliği açıklamaktadır (Özşahin vd., 2016). Ayrıca Bulgaristan’da Türkiye sınırına yakın bulunan termik santrallerden taşınan kirliliğin de Keşan’ı etkileyebileceği SO_2 uydu verileriyle yapılan bir çalışmada gözlenmiştir (Fıratlı, 2016).



Şekil 2. MTHM istasyonlarının kirletici ve istasyon bazında dört yıllık ortalamaları

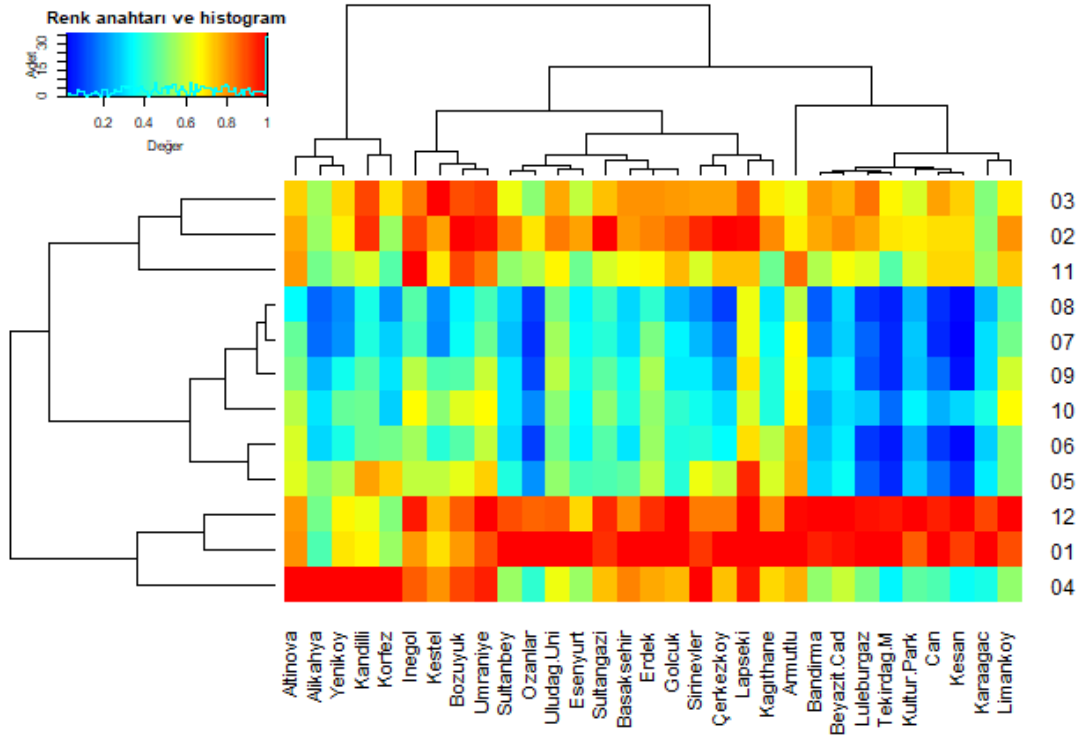
Üsküdar istasyonunda NO₂ öne çıkmış, PM₁₀ ve CO ise geri planda kalmıştır. Buna göre ölçüm istasyonunun bulunduğu bölgede NO₂ kirleticisinden dolayı trafik kaynaklı hava kirliliğinin yoğun olduğu anlaşılmaktadır. İstanbul-Mecidiyeköy, İstanbul-Şirinevler, İzmit, Tekirdağ-Merkez, Sakarya-Merkez ve Bursa-Beyazıt Caddesi istasyonlarında da Üsküdar istasyonu ile aynı kirleticiler ön plana çıkmıştır. Bu istasyonlar da yerleşim bölgelerinde yer almakta ve trafik kaynaklarından etkilenmektedir. Ancak nüfus ve trafik yoğunluğu her zaman doğru orantılı olmayabilir. Örneğin Bolu Dağı Tüneli'ndeki trafiğin sebebi civardaki nüfus değil, tünelin stratejik konumudur.



Şekil 3. MTHM yer gözlem istasyonları dört yıllık ortalama kirletici ölçümleri (Büyüklikler her kirletici için istasyonların görece kıyaslamasını içermektedir.)

Balıkesir-Erdek, Çanakkale-Lapseki, İstanbul-Şile, Kırklareli-Limanköy, Kocaeli-Kandıra ve Bursa-Armutlu istasyonlarında O₃ kirleticisi neredeyse tek kirletici olarak öne çıkmıştır. Öncelikle istasyonlar deniz kenarında olup çoğu ormanlık alanlara yakın bölgelerdedir. Bu sebeple gemi emisyonlarının ve ormanlık bölgelerden gelen uçucu organikler ile birleşmesinin istasyonlarda O₃ kirliliğine neden olabileceği düşünülmektedir.

MTHM SO₂ ölçümlerinin dört yıl için hazırlanmış aylık ortalamaları ısı haritası ve kümeleme analizi olarak gösterilmektedir (Şekil 4). Renklendirme için ölçümler istasyonların kendi aylık ortalamalarındaki en yüksek ölçüme göre normalize edilmiştir. İstasyonlar üç ana öbeğe ayrılmıştır. Altınova, Alikahya, Yeniköy, Kandilli ve Körfez istasyonları beraber kümelenebilirlerdir. Bu istasyonların özellikleri Marmara Denizi'nde kıyılarda yer almalarıdır. Bu nedenle boğazlardaki ve İzmit Körfezi'ndeki gemi emisyonları ve şehirler arası otoyollar bu istasyonlardaki kirliliğin ana nedeni olabilir. Kümeleme analizinde aylar üç ana gruba ayrılmıştır. Aralık, ocak ve nisan ile kasım, şubat ve mart ayları birlikte düşünüldüğünde SO₂ kış dönemini belirtmektedir. Bu sebeple kış döneminde gözlenen SO₂ kirliliği diğer aylara göre oldukça ayırt edicidir. Yanı sıra istasyonlardaki konsantrasyon değişimleri incelendiğinde Limanköy, Armutlu, Lapseki, Ümraniye, Bozüyük, İnegöl ve Altınova istasyonlarında SO₂ kirliliğinin tüm aylarda devam ettiği görülmüştür. Bozüyük, İnegöl ve Ümraniye istasyonlarındaki kirletici kaynaklarının sanayi ve meteoroloji kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Deniz kıyısındaki istasyonlarda ise ulusal ve uluslararası deniz taşımacılığının kirliliğin kaynağı olduğu düşünülmektedir. Bununla birlikte Türkiye'de gemilerde kullanılan yakıtların S içeriğine konulan limitler transit geçen veya iki saatten az demirleyen gemilere uygulanmamaktadır. Bu tip gemilere yakıtta belirli bir kısıtın bulunmaması ve Türkiye'nin SECA bölgesi olmaması, gemilerde kullanılan S içeriğinin denizlerimizde takip edilememesine yol açmaktadır (Durmaz, 2015).

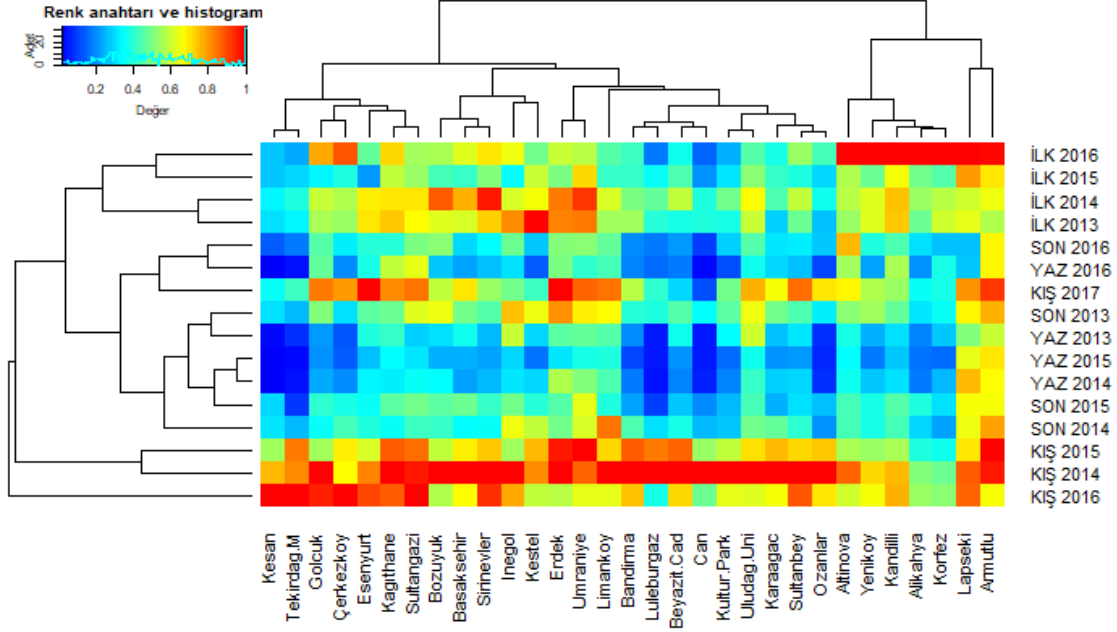


Şekil 4. MTHM SO₂ ölçümlerinin aylık ortalamaları ve istasyonlar bazında karşılaştırılması

Nisan ayı ortalamalarında görülen yüksek konsantrasyon, ölçümler incelendiğinde İzmit Körfezi'nde bulunan istasyonlarda görülmüştür. Bu istasyonlardan Körfez istasyonunun yakınında rafineri tesisi bulunması, bu kısa süren yüksek kirliliğin nedeni olarak düşünülmüştür. Ayrıca Yeniköy istasyonu yakınlarında liman işletmelerini ve tersaneleri içeren bir sanayi bölgesinin olması, bu istasyonda gözlenen yüksek değerleri açıkladığı düşünülmüştür.

MTHM istasyonlarının yıllara göre mevsimlik SO₂ konsantrasyonları hesaplanmış, her istasyon kendi maksimum değerine göre normalize edilmiştir (Şekil 5). Mevsimlerin dört ana gruba ayrıldığı görülmüştür. Buna göre, 2016 kış mevsiminde diğer mevsimlere göre oldukça yüksek kirlilik gözlenmiştir. Ayrıca mevsim kümeleri ilkbahar, kış ve sonbahar-yaz şeklindedir. İlkbahar mevsimlerinde görülen nispeten yüksek ölçümler, kış mevsiminin devamı olarak yorumlanmıştır. Kümelemede 2016 sonbahar, 2016 yaz ve 2017 kış mevsimleri bir arada gruplanmıştır. İstasyonlar arasındaki kümelemede üç ana grup oluşmaktadır. Lapseki ve Armutlu istasyonlarındaki SO₂ değerleri neredeyse tüm mevsimlerde orta ve yüksek değerlerde ölçülmüştür. İki istasyon da kırsal tipli olmalarına rağmen Lapseki'nin Çanakkale Boğazı'nda bulunması ve Armutlu'da da deniz otobüsü limanı olması nedeniyle aktif olarak deniz trafiğine maruz kalmaktadırlar. Altınova, Yeniköy, Kandilli, Alikahya, Körfez, Lapseki ve Armutlu istasyonlarındaki en yüksek değerler 2016 yılının ilkbahar mevsiminde görülmüştür. Şekil 4'te de bahsedildiği gibi istasyonların yakınlarında kısa dönemdeki sanayi faaliyetlerinin veya kirliliğin bu süreçte rüzgarla taşınmasının ilkbahar mevsimindeki yüksek konsantrasyonlara neden olduğu düşünülmektedir. Tekirdağ Merkez, Gölçük, Kağıthane, Sultangazi, Erdek, Ümraniye ve Limanköy istasyonlarında ilkbahar mevsimlerinin SO₂ konsantrasyonu diğer istasyonlara göre daha yüksektir. Erdek ve Limanköy istasyon tiplerinin kırsal olması deniz

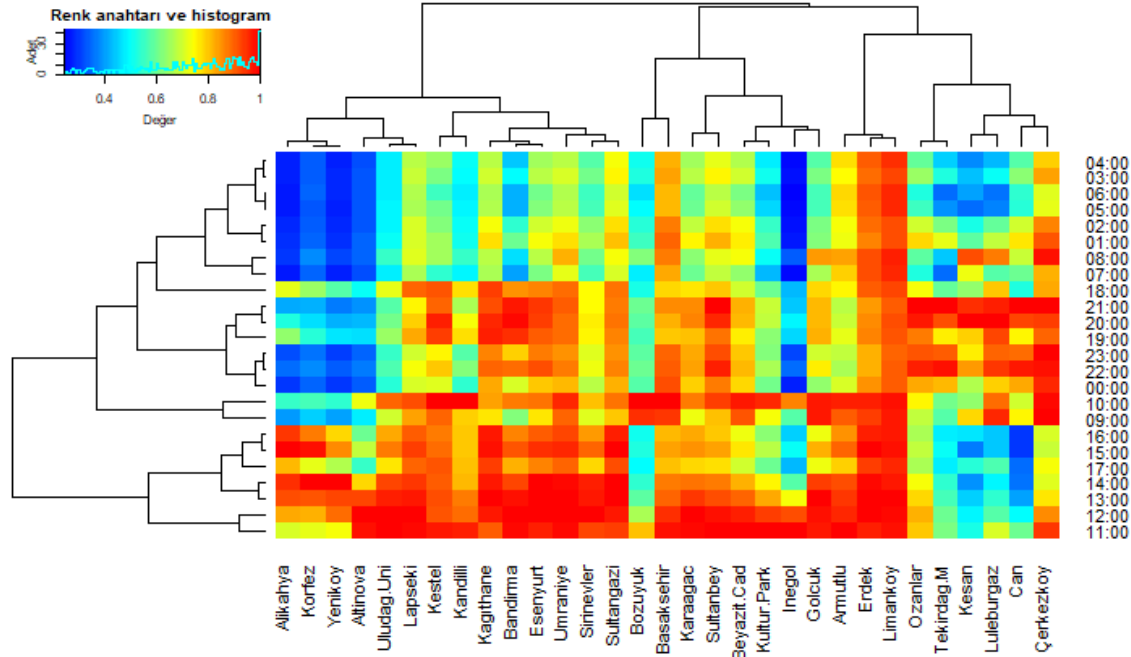
ulaşımı veya yerel kömür kullanımının kirlilikte etkili olduğunu düşündürmüştür. Diğer istasyonların kentsel tipte olmaları sanayi ve evsel ısınma etkisiyle oluşan kirliliği akla getirmektedir. Yanı sıra kış ve ilkbaharın aksine yaz mevsimlerinde SO₂ konsantrasyonlarının daha düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 5. MTHM istasyonlarının mevsimsel SO₂ ortalamaları ve istasyon bazında karşılaştırılması

Son olarak SO₂'nin gün içerisinde hangi saatlerde ne kadar oluştuğunun ve meteorolojik etkilerin gözlenmesi amacıyla saatlik ölçüm yapılan MTHM istasyonlarının her saat için 4 yıllık ortalamaları hesaplanmıştır. Gün içinde oluşan SO₂ kirliliğinin kaynaklarının yorumlanması ve kirlilik yükünün fazla olduğu saatlerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Saatlerin kümeleme analizi incelendiğinde üç ana grup olarak 11:00-17:00, 09:00-10:00 ve 18:00-00:00 saatleri görülmektedir (Şekil 6). Buna göre her grupta trafik kaynaklı kirliliğin görüldüğü düşünülmektedir. Evsel ısınma kaynaklı kirliliğin 18:00-00:00 saatlerinde etkin olduğu düşünülmüştür. Diğer iki zaman aralığındaki farklılıkların gerek diğer kaynaklar gerekse meteorolojik etkenler sebebiyle kümelenmiş olabilir. İstasyonların kümelenmesinde ise dört ana küme oluşmaktadır. Çerkezköy, Çan, Lüleburgaz, Keşan, Tekirdağ Merkez ve Ozanlar istasyonlarında 19:00-00:00 saatlerinde ölçülen SO₂ değerleri yüksektir. Kirliliğin gözlemlendiği saatler dikkate alındığında evsel ısınma kaynaklı kirlilik olduğu düşünülmektedir. Kestel, Kandilli, Kağıthane, Bandırma, Esenyurt, Ümraniye, Şirinevler ve Sultangazi istasyonlarında 09:00-00:00 saatleri arasında yüksek, 01:00-07:00 saatlerinde ise görece daha düşük SO₂ konsantrasyonları ölçülmüştür. İstasyonlar genel olarak yarı-kırsal ve kentsel tipte olduklarından sanayi ve ısınma kaynakları kirliliğin nedenleri olarak akla gelmektedir. Yanı sıra, Alikahya, Körfez, Yeniköy, Altınova ve Uludağ Üniversitesi istasyonlarında kirlilik çoğunlukla 10:00-17:00 arasında görülmüştür. Aynı zamanda bu istasyonlarda gece ve sabaha karşı kirliliğin düşük gözlenmesi SO₂'nin bölgeden uzaklaştığını düşündürmüştür. Armutlu, Erdek ve Limanköy istasyonları aynı grupta yer alsalar da, Erdek ve Limanköy istasyonlarında günün her saatinde

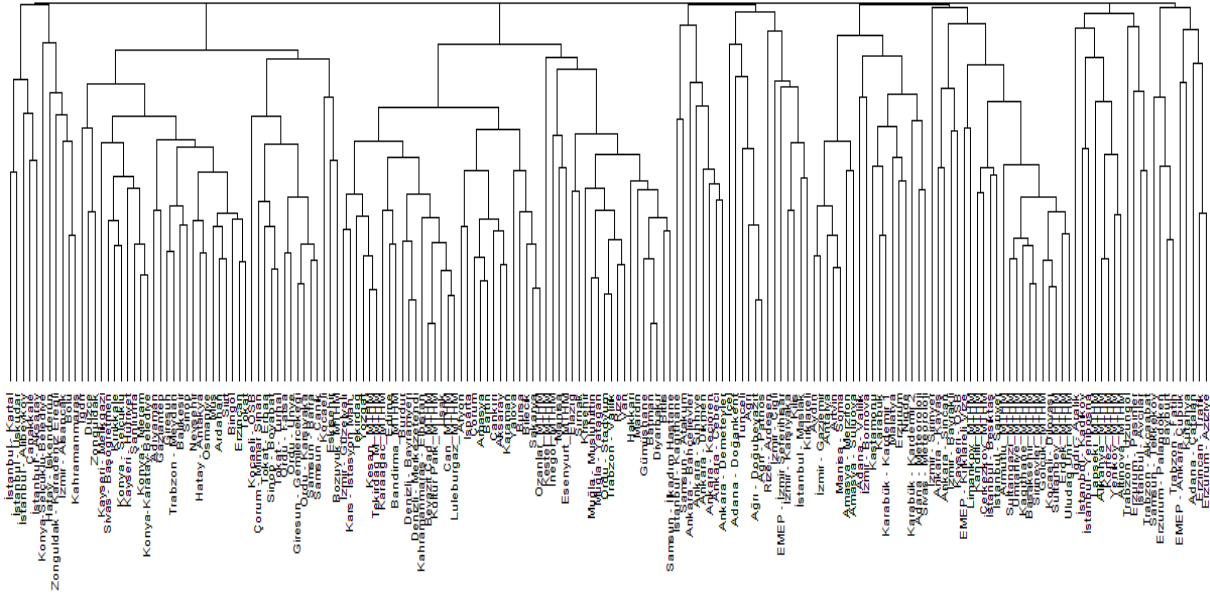
kirlilik gözlenmiştir. Bu istasyonlardaki kirliliğin yerel kömürlerin kullanımı ve deniz trafiğinin etkileri olabileceğinden Şekil 5’te de bahsedilmiştir. Ayrıca Limanköy konum olarak Karadeniz kıyısında Bulgaristan’a yakın bulunmaktadır. Bulgaristan’da sınıra yakın bulunan termik santrallerde oluşan SO₂’nin rüzgarla taşınımı da kirlletici kaynak olarak düşünülebilir. Çerkezköy, Limanköy, Erdek ve Başakşehir gibi kirliliğin her saatte gözleendiği istasyonlarda enversiyon varlığı da akla gelmektedir.



Şekil 6. MTHM istasyonlarının saatlik ortalamalarının istasyon bazında karşılaştırılması

UHKİA ve MTHM istasyonlarının günlük SO₂ ortalamalarına göre istasyonların karşılaştırılması için Şekil 7’deki kümeleme analizi oluşturulmuştur. Kümeleme analizi ile kirlletici kaynakların bölgesel olarak değişimi ve istasyonların birbirlerine olan benzerlikleri incelenebilmektedir. Dendrogram altı ana gruba ayrılmıştır. Kartal, Üsküdar, Alibeyköy ve Aksaray istasyonları iskelelere yakınlıkları, trafiğin yoğun olması ve nüfusun yoğun olması nedeniyle birlikte kümelenebilirlerdir. Konya-Selçuklu Belediye istasyonunun yakınlarında çimento fabrikası, Hatay-İskenderun istasyonu yakınlarında İskenderun liman işletmesi, Zonguldak-Karadeniz Ereğli istasyonu yakınlarında demir çelik fabrikası, İzmir-Alsancak istasyonu yakınlarında şehir içi ve ülkeler arası ulaşımın sağlandığı iskeleler, Bolu istasyonu yakınlarında ise otoyol bulunmaktadır. Kahramanmaraş istasyonu ise ildeki enversiyon oluşumu nedeniyle yüksek kirlilik kaydetmektedir. Bu istasyonlarda konumları gereği çoğunlukla sanayi ve ulaşım kaynakları nedeniyle SO₂ kirliliği ölçülmektedir. Yukarıda bahsedilen on istasyon bir kümenin iki alt grubunu oluşturmaktadır. Ancak farklı kirlletici kaynakları, istasyonların birbirlerinden farklı ölçüm değerleri göstermesine neden olduğu düşünülmektedir. Yanı sıra Kestel-MTHM, Kocaeli, Eskişehir ve Bozüyük-MTHM, İçel, Iğdır-Aralık ve Trabzon-Uzungöller istasyonları buldukları gruplarda tek olarak sınıflandırılan istasyonlardır. Kestel-MTHM istasyonu çimento fabrikasına yakın olduğundan fabrikanın emisyonlarından etkilendiği düşünülmüştür. Kocaeli

istasyonunda yakınındaki şehirler arası otoyolun ve Kocaeli’de bulunan bir çok sanayi tesisinin neden olduğu SO₂ kirliliğinin de ölçüldüğü düşünülmektedir (Akyürek vd., 2013). Eskişehir ve Bozüyük’teki hava kirliliği hakkındaki araştırmalarda sanayide ve evlerde yakıt olarak kalitesiz kömürün kullanılmasının, hava kirliliğini ciddi boyutlara getirdiğinden bahsedilmiştir (Çiçek, 2003; Oruç vd., 2012). Bu sebeple Eskişehir ve Bozüyük-MTHM istasyonlarında yerleşim yerlerine yakın olan sanayi tesislerinin ve evsel ısınmanın SO₂ kirliliğine neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 7. Mevcut gözlem istasyonları günlük ortalama SO₂ ölçümleri kümüleme analizi

İçel istasyonunda, Mersin Limanı’ndaki yoğun deniz trafiğinin ve ilin coğrafi özelliklerinin SO₂ kirliliğini arttırdığı tahmin edilmektedir (TMMOB, 2009). Aynı zamanda ikliminden dolayı ısınma ihtiyacının kısa sürmesi nedeniyle il merkezinde ısınma amacıyla elektrik kullanımı yaygın, doğal gaz kullanımı ise azdır (KENTAIR, 2013). Ancak coğrafi yapıdan dolayı ısınma amacıyla kömür ve odun kullanımının istasyondaki SO₂ konsantrasyonunu etkilediği düşünülebilir (KENTAIR, 2013). Iğdır-Aralık istasyonunda ise doğalgaza geçişin yeni başlaması, ilin konumundan dolayı enversiyonun hava kalitesine olumsuz etkisi ve kalorifer kazanlarının tecrübesiz kişilerce yakılması SO₂ kirliliğinin yüksek olmasının nedenidir (Iğdır ÇŞİM, 2017). Trabzon-Uzungöller istasyonunda ise yapılaşmanın artması nedeniyle evsel ısınma kaynaklı kirliliğin ana kirletici olduğu düşünülmektedir.

4. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Bu çalışmada yaklaşık on iki yıllık SO₂ ölçümleri değerlendirilmesi planlanmasına rağmen eksik ölçümler nedeniyle zaman aralığı dört yıla indirilmiştir. Aynı zamanda eksik ölçümlerin varlığı istatistik analizini de olumsuz yönde etkilemiştir. Bu sebeple istasyon ölçümlerinin daha sık kontrol edilmesi ve eksik ölçümlerin belirli bir limitin altında kalmasına dikkat edilmesi gelecekte yapılacak çalışmaların sağlıklı olması açısından önemlidir. İstatistik analizini etkileyen bir diğer unsur da ölçümlerin kalite kontrolleridir. MTHM’den gelen ölçümler kontrolden

geçirilmiş, UHKİA ölçümleri çalışma kapsamında kalite kontrolden geçirilmiştir. Hava kalitesi ölçümleri kalite kontrolünde yayınlanmış bir standardın olmaması veri değerlendirmesinde belirsizliğe neden olmuştur. Bu konuda kullanılan standartların yayınlanması kullanıcılara fayda sağlayarak, hem ölçümlerin doğru değerlendirilmesine, hem de bu alandaki çalışmalarda doğru değerlendirme yapılmasına imkan verecektir.

İstasyonlarda yıllık ve kış dönemi SO₂ konsantrasyonları hesaplandığında birçok istasyonun gözlem süresince 20 µg/m³ sınır değerini aştığı görülmektedir. Bu durum ülkemizde hala SO₂ kirliliğinin olduğunu ve limit değerlerin süregelen yıllarda aşıldığı anlaşılmaktadır. Kirliliğin yoğun olarak gözlemlendiği istasyonlardan yola çıkılarak düşük kaliteli kömür yerine doğalgazın evsel ısınmada kullanılması, kömürle çalışan termik santrallerde SO₂ arıtımının uygulanması ve deniz taşımacılığında kullanılan yakıtların daha sıkı takip edilmesi önerilmektedir. Yanı sıra SO₂ kirliliğinin çevreye verdiği zararın maddi boyutunun da incelenmesi bu kirleticinin etkilerinin daha somut olarak öne çıkarılması için fayda sağlayacaktır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma 114Y159 nolu proje kapsamında TÜBİTAK tarafından desteklenmektedir.

KAYNAKLAR

- ÇŞB, 2008. Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği, Resmi Gazete, No. 26898, sf. 1-35.
- TMMOB Mersin ÇMO İl Temsilciliği, 2009. Mersin çevre durum raporu. http://www.cmo.org.tr/resimler/ekler/f0ba8295435bee5_ek.pdf, Erişim tarihi: 22 Eylül 2017
- KENTAIR, 2013. Kentlerde Hava Kalitesi Değerlendirme Sisteminin Geliştirilmesi Projesi, Mersin, No. G2G11/TR/6/2, sf. 6, 28, 33.
- European Environmental Agency, 2013. Sulphur Dioxide (SO₂): annual mean concentrations in Europe <http://www.eea.europa.eu/themes/air/interactive/so2#tab-based-on-data>, Erişim tarihi: 11 Eylül 2017
- Eskişehir Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü, 2014. Mobil Hava Kalitesi İzleme Sisteminin Kurulması ve Kirlilik İzleme Mekanizmalarının Optimizasyonu Projesi. www.csb.gov.tr/db/eskisehir/webicerik/webicerik972.pptx, Erişim tarihi: 29 Ağustos 2017
- Indiana Department of Environmental Management, 2015. Ambient Data Reduction and Audit Procedures. https://www.in.gov/idem/airquality/files/qa_manual_chap_12.pdf, Erişim tarihi: 14 Şubat 2017

- T.C. Kocaeli Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü, 2015. Kocaeli ili 2014 yılı il çevre durum raporu. http://www.csb.gov.tr/db/ced/editordosya/Kocaeli_icdr2014.pdf, Erişim tarihi: 22 Eylül 2017
- T.C. Amasya Valiliği Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü, 2016. Amasya ili 2015 yılı çevre durum raporu. <https://www.csb.gov.tr/db/amasya/haberler/haberler64693.pdf>, Erişim tarihi: 24 Eylül 2017
- Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2016. Kömür arama araştırmaları. <http://www.mta.gov.tr/v3.0/arasirmalar/komur-arama-arastirmalari>, Erişim tarihi: 23 Eylül 2017
- Environmental Protection Agency, 2016. Sulfur Dioxide (SO₂) Pollution. <https://www.epa.gov/so2-pollution/sulfur-dioxide-basics#what>, Erişim tarihi: 28 Ağustos 2017
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2016. Ulusal hava kalitesi izleme ağı hava kalitesi indeksi. <http://www.havaizleme.gov.tr/Default.ltr.aspx>, Erişim tarihi: 20 Eylül 2017
- T.C. Iğdır Valiliği Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü, 2017. Iğdır ili 2016 yılı çevre durum raporu <http://www.csb.gov.tr/db/ced/editordosya/IGDIR2016CEVREDURUMRAPORU.pdf>, Erişim tarihi: 22 Eylül 2017
- Environmental Protection Agency, 2017. Ozone pollution. <https://www.epa.gov/ozone-pollution>, Erişim tarihi: 19 Eylül 2017
- T.C. Tekirdağ Valiliği Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü, 2017. Tekirdağ ili 2016 yılı çevre durum raporu. <http://www.csb.gov.tr/db/ced/editordosya/TEKIRDAGILCEVREDURUMRAPORU2016-NIHALI.pdf>, Erişim tarihi: 24 Eylül 2017
- Ahmadi, M., John, K., 2015. Statistical evaluation of the impact of shale gas activities on ozone pollution in North Texas. *Science of Total Environment* 536, 457-467.
- Akyürek, Ö., Arslan, O., Karademir, A., 2013. SO₂ ve PM₁₀ Hava Kirliliği Parametrelerinin CBS ile Konumsal Analizi: Kocaeli Örneği. *TMMOB Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi*, 11-13 Kasım 2013, Ankara, Türkiye.
- Büke, T., Köne, A. Ç., 2011. Yatağan Termik Santralı Çevresindeki Radyasyon ve SO₂ Kaynaklı Risklerin Değerlendirilmesi. *Türkiye 11. Enerji Kongresi*, 21-23 Ekim 2009, İzmir, Türkiye.
- Cavkaytar, Ö., Soyer, Ö. U., Şekerel, B. E., 2013. Türkiye’de Hava Kirliliğinden Kaynaklanan Sağlık Sorunları. *Hava Kirliliği Araştırmaları Dergisi* 2, 105-111.

- Çiçek, A., 2003. Bozüyük yöresinde yayılış gösteren *Pinus nigra* Arn. ibrelerinde kükürt birikiminin incelenmesi. *Yanma ve Hava Kirliliği Kontrolü VI. Ulusal Sempozyumu*, 10-12 Eylül 2003, İzmir, Türkiye.
- Durmaz, M., 2015. *Bir Feribottan Yayılan Egzoz Emisyonlarının Deneysel ve Teorik Olarak İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Fıratlı, E., 2016. *Determination of Large-Scale SO₂ Point Sources in Turkey Using Satellite Retrievals*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Kwak HJ., K., J., Lee, S., Joh, CH., 2016. Identifying the correlation between rainfall, traffic flow performance and air pollution concentration in Seoul using a path analysis. *World Conference on Transport Research*, 10-15 Temmuz 2016, Şanghay, Çin.
- Mentеше, S., Can Yarımtepe, C., 2012. Çanakkale İli Hava Kalitesinin Kirlilik Türlerine Göre Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi. *Hava Kirliliği Araştırmaları Dergisi 1*, 66-74.
- Miranda, A., Silveira, C., Ferreira J., Monteiro, A., Lopes, D., Relvas, H., Borrego, C., Roebeling, P., 2014. Current air quality plans in Europe designed to support air quality management policies. *Atmospheric Pollution Research 6*, 434-443.
- Olgun, S., 2015. Ülkemizde Hava Kalitesi İzleme Çalışmaları. <http://ekolojikanaliz.com/guncel-haberler/ulkeizde-hava-kalitesi-izleme-calismalari>, Erişim tarihi: 29 Ağustos 2017
- Oruç, N., Ataman, E., Kırkgöz, H., 2012. Eskişehir’de hava kirliliği ve doğal gazın tarihçesi:
 - genel değerlendirme. *Tarih Kültür ve Sanat Araştırmaları Dergisi*, 1 (4), 161-170.
 - Özşahin, E., Eroğlu, İ., Pektezel H., 2016. Keşan’da (edirne) hava kirliliği. *Selçuk Ün. Sos. Bil. Ens. Der.*, 36, 83-100.
- Soret, A., Jimenez–Guerrero, P., Baldasano, J. M., 2011. Comprehensive air quality planning for the Barcelona Metropolitan Area through traffic management. *Atmospheric Pollution Research 2*, 255-266.