

Isınma amaçlı doğal gaz kullanımının Erzurum İli hava kalitesine etkisinin SO₂ ve PM₁₀ parametreleri üzerinden istatistiksel bir değerlendirmesi

A statistical evaluation of the effect of natural gas usage for urban heating on the air quality of Erzurum City via SO₂ ve PM₁₀

Zeynep EREN^{1*}, Ferda YERDELEN TATOĞLU², Taha AKARSU¹

¹Çevre Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye.

zeren@atauni.edu.tr, tahakarsu@gmail.com

²Ekonometri Bölümü, İktisat Fakültesi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

yerdelen@istanbul.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 05.01.2021

Düzeltilme Tarihi/Revision: 29.11.2022

doi: 10.5505/pajes.2021.83548

Kabul Tarihi/Accepted: 28.12.2021

Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada Erzurum kent atmosferindeki hava kalitesinin değişimi; Erzurum'da hava kirliliğinin ilk kez görülmeye başlandığı 1978-1979 kış döneminden başlayarak 2018-2019 dönemine kadar kükürt dioksit (SO₂) ve çapı 10 mikrondan küçük partikül madde (PM₁₀) parametreleri kriter olarak alınmış; kent atmosferindeki nispi nem, ortalama sıcaklık, yağış, rüzgâr yönü ve hızı gibi meteorolojik parametreler de göz önünde bulundurularak istatistiksel olarak incelenmiştir. Bu amaçla görünürde ilişkisiz regresyon modellerinden (SUR) yararlanılmıştır. Erzurum kent atmosferinde hava kalitesinin değişimini etkileyecek en önemli faktör 2005 yılında kentsel ısınma amacıyla kullanılmaya başlanan doğal gaz olduğu için bu modellerden elde edilen sonuçların doğal gaz kullanımı ile ilişkisi belirlenmiştir. 2005 yılının ve varsa diğer yılların etkilerinin bir başka ifade ile yapısal kırılma tarihlerinin belirlenmesi amacıyla testler uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar doğal gazın kentte yaygınlaşmaya başlamasından sonraki yıl olan 2006 yılının PM₁₀ modelinde yaklaşık %75 korelasyon ve 2009 yılının ise SO₂ modelinde %72 korelasyon ile yüksek düzeyde anlamlı önemli bir yapısal kırılma olduğunu göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Kentsel hava kalitesi, Doğal Gaz, Erzurum, Hava Kirliliği, SO₂, PM₁₀.

Abstract

In this study, the alteration of air quality in the Erzurum urban atmosphere starting from the winter period of 1978-1979, when air pollution began to appear in Erzurum for the first time, until the 2018-2019 period was statistically analyzed by choosing as the criteria parameters sulfur dioxide (SO₂) and particulate matter of less than 10 microns in diameter (PM₁₀) and taking into account meteorological parameters such as the relative humidity, average temperature, precipitation, wind direction and speed. Seemingly Unrelated Regression (SUR) models have been used for this purpose. Since the most important factor that will affect the change of air quality in the Erzurum urban atmosphere is natural gas, which was started to be used for urban heating in 2005, the relationship between the results obtained from these models and the use of natural gas was determined. In order to determine the effects of 2005 and other years, if any, tests were firstly applied for determining the structural break dates. The results obtained showed that there was a highly significant structural break with a correlation of approximately 75% in the PM₁₀ model of 2006, the year after the natural gas became widespread in the city, while it was 2009 for the SO₂ model with a correlation of 72%.

Keywords: Urban air quality, Natural Gas, Erzurum, Air pollution, SO₂, PM₁₀.

1 Giriş

Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ) tüm dünyada artan nüfus ve fosil yakıt tüketiminden kaynaklı her 10 kişiden dokuzunun güvenli olmayan kirli hava soluduğunu ve hava kirliliğinin her yıl dünya çapında yedi milyon insanı öldürdüğünü tahmin etmektedir. En önemli on sağlık tehdidi arasında ilk sırayı alan hava kirliliğinin ayrıca beş yaşın altındaki çocuklarda her on ölümden birinin sebebi olduğu; tüm dünyada felç, kalp hastalığı, akciğer kanseri ve astım dahil çeşitli kronik ve akut solunum yolu hastalıklarına yol açtığı belirtilmektedir [1]. Hava kalitesi seviyeleri hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkelerin büyük bir kısmında yasal mevzuat sınırlarını aşarken, düşük ve orta gelirli ülkeler hava kirliliğinden en yüksek seviyede etkilenmektedir [2]. Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü (OECD) 2050 yılında dış ortam hava kirliliğinin dünya çapında çevreyle ilgili ölümlerin en büyük nedeni olacağını tahmin etmektedir [3]. DSÖ ise 2005 yılında yayınladığı Hava Kalitesi Rehberinde, PM₁₀ kirliliğinin 70 µg/m³'den 20 µg/m³'e düşürülmesi ile hava kirliliğine bağlı

ölümlerin yaklaşık %15 oranında azaltılabileceğini ortaya koymuştur [3].

Ülkemizde 1950'li yıllardan sonra hızla artan kentleşme ve sanayileşme faaliyetleri özellikle büyük şehirlerde hava kirliliği probleminin ortaya çıkmasına sebep olmuş; 1970-1980'li yıllarda bazı büyük şehirlerimizde evsel ısınma kaynaklı hava kirliliğinin halk sağlığını tehdit eden boyutlara ulaştığı belirtilmiştir. Bu dönemlerde hava kirliliği rekor seviyelere ulaşmış; örneğin 1979 yılında Erzurum kent atmosferinde günlük kükürt dioksit konsantrasyonu 1,275 µg/m³'e kadar yükselmiştir. Büyükşehirlerde yaşanan bu hava kirliliği probleminde düşük ısı değer ve yüksek kirleticilik oranına sahip asfaltit, linyit ve fuel-oil gibi yakıtların kullanımının yaygınlaşmasının etkin olduğu görülmüştür [4],[5]. Bu nedenle büyük şehirlerden başlamak üzere hava kirliliğini önlemek için kentsel ısınmada doğal gaz kullanımı, yakıt iyileştirilmesi, yakma tekniklerinin geliştirilmesi gibi önlemler alınmaya başlanmıştır. Alınan çeşitli önlemler hava kirleticilerin emisyon değerlerini azaltmaya yardımcı olsa da hem ulusal hem de DSÖ

*Yazışılan yazar/Corresponding author

standartlarını sağlamaya yetmemiş ve sürdürülebilir bir iyileşme sağlayamamıştır. 2000'li yılların başlarında ülkemizin birçok ilinde hava kirliliği hala önemli bir problem olarak varlığını sürdürmüştür [2],[3]. 2018 yılında ülkemizde ulusal sınır değerlere göre 81 ilin yarısından fazlasının kirli havaya sahip olduğu ve ölçüm yapılan 163 istasyonun %96.3'ünde yıllık PM₁₀ ortalamasının DSÖ standartlarının üzerinde olduğu ifade edilmektedir [6]. 2019 yılında yayınlanan Türkiye Çevre Durum Raporunda hava kirliliğinin ülkemizin en önemli sorunu olduğu ve ülkemizin havasının Avrupa Birliği'ne (AB) göre en az %33.4 daha kirli olduğu belirtilmiştir [7]. Tüm dünyadaki hava kalitesi izleme istasyonlarından elde edilen sonuçların yayımlandığı raporlar, Türkiye'nin 2019 yılında ortalama PM_{2.5} (çapı 2.5 µm'ye eşit ve daha küçük olan partikül madde) konsantrasyonunun 20.6 µg/m³ olduğunu göstermektedir. Bu raporlarda 2019 yılında Erzurum Lalapaşa ölçüm istasyonu yıllık ortalama 53.8 µg/m³ PM_{2.5} konsantrasyonu ile Avrupa'nın en kirli şehri olarak listelenmiştir [8], [9]. DSÖ'nün PM_{2.5} için belirlediği yıllık ortalama değer 5 µg/m³ ve PM₁₀ için ise 15 µg/m³'tür [3].

Ülkemizde hava kalitesinin iyileştirilmesi ve çevrenin korunması amacıyla 2013 yılında Çevre Şehircilik Bakanlığı tarafından yayınlanan AB Çevre Entegre Uyum Stratejisi raporu kapsamında "Ülkemizdeki Büyükşehirlerde Hava Kalitesinin İyileştirilmesi ve Farkındalığın Arttırılması (Kentair)" projesi yürütülmüştür. Proje sonucunda; Erzurum'da 2011 yılındaki SO₂ emisyonlarının %92.3'ünün ve PM₁₀ emisyonlarının ise %75'inin ısınmadan kaynaklandığı belirtilmiştir. Bu nedenle kentte hava kirliliğinin azaltılması için öncelikli olarak ısınma amaçlı doğalgaz kullanımının yaygınlaştırılması, doğalgaz kullanıcılarına yönelik olarak hizmetlerin daha çağdaş ve kolay ulaşılabılır hale getirilmesi, ısı yalıtımı ve enerji verimliliğinin sağlanması, ulaşım master planının tamamlanması, rüzgâr koridorlarının belirlenmesi ve şehirleşmenin bu doğrultuda yapılması, kent merkezinde yer alan gecekondu bölgelerinin ıslah edilmesi, küçük sanayi tesislerin uygun yer seçimi yapılmış Organize Sanayi Bölgelerine taşınması, yeşil alanların arttırılması, imar planlarındaki hava kirliliğini azaltıcı tedbirlerin uygulanmaya koyulması ve kentteki yapılaşmanın hakim rüzgârları engellemeyecek şekilde sağlanması gibi bir dizi öneri sunulmuştur. Bu öneriler içerisinde yer alan ısınma amaçlı doğalgaz kullanımının yaygınlaştırılması, Erzurum gibi ısınma için en az 6 aya ihtiyaç duyan ve kentteki hava kirletici emisyonlarının %75'ten fazlasının ısınmadan kaynaklandığı soğuk iklim kentlerinde büyük önem taşımaktadır [10].

Doğalgaz, sera gazı olan karbon dioksit hariç birçok kirletici açısından sifıra yakın emisyonu sahip olduğu için kömür ve petrole göre temiz bir yakıt olarak değerlendirilmektedir. Doğalgaz ve diğer fosil yakıtların sebep olduğu kirletici emisyonlarının karşılaştırılması Tablo 1'de verilmiştir [11]. Tablo 1'den görüldüğü üzere doğalgazın evsel amaçlı kullanımında özellikle PM ve SO_x emisyonları sifıra yakındır. Ayrıca kömür, petrol gibi fosil yakıtlar hava kirletici emisyonların yanında yüksek CO₂ emisyonlarına da sebep oldukları için hava kirliliğini azaltmaya yönelik politikalar hem insan sağlığını koruyacak hem de iklim değişikliğinin etkilerinin azaltılmasına katkıda bulunacaktır. Doğalgaz, kömür, odun ve petrol gibi diğer fosil yakıt türlerine göre en az CO₂ emisyonuna sahip olduğu için de avantajlı konumdadır [12]. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu Doğalgaz konum piyasası 2018 yılı sektör raporuna göre Türkiye'nin doğalgaz talebinin %99.2'si ithalatta karşılanmaktadır. Ülkemizde 2018 yılında

yaklaşık 50.8 milyar m³ doğalgaz tüketilmiş ve bunun sadece %0.78'i ülke içi üretim ile karşılanmıştır [13].

Tablo 1. Doğalgaz ve diğer fosil yakıtların emisyon faktörlerinin karşılaştırılması [14].

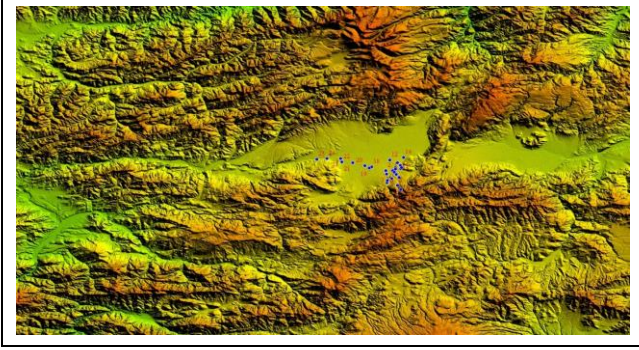
Table 1. Comparison of the emissions from natural gas and other fossil fuels.

Emisyon Kaynağı		Emisyon Faktörü		
Kirletici Türü	Birimi	Doğalgaz	Kömür	Diğer Yakıtlar
NO _x	g/GJ	57	110	68
CO	g/GJ	31	4600	46
CO ₂	g/GJ	53.07	95.35	71.30
NM VOC	g/GJ	10.5	484	15.5
SO _x	g/GJ	0.5	900	140
TSP	g/GJ	0.5	444	6
NH ₃	g/GJ	0	0.3	0
PM ₁₀	g/GJ	0.5	404	3.7
PM _{2.5}	g/GJ	0.5	398	3.7
Pb	mg/GJ	0.984	130	15.5
Cd	mg/GJ	0.515	1.5	1.5
Hg	mg/GJ	0.234	5.1	0.03
As	mg/GJ	0.0937	2.5	0.9
Cr	mg/GJ	0.656	11.2	15.5
Cu	mg/GJ	0.398	22.3	7.9
Ni	mg/GJ	0.984	12.7	240
Se	mg/GJ	0.0112	1	0
Zn	mg/GJ	13.6	220	8.5

Doğalgazın ülkemizde ısınma amaçlı olarak kentlerde kullanımının yaygınlaşması ile kentlerin hava kalitesinde önemli iyileşmeler kaydedilmiş ve bu durumu ortaya koyan çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Erzurum İli'nde kentsel ısınmada doğalgaz kullanımı öncesi ve sonrası dönemlerde hava kirliliğinin değerlendirildiği bir çalışmada 2002-2003 kış döneminde SO₂ parametresi ortalama 229 µg/m³ olarak belirlenirken; doğalgazın kentte yaygınlaşması ile 2014 yılı sonunda bu değer 40 µg/m³'ün altına düşmüştür [15]. Karabük'deki hava kirliliğinin doğalgaz ile değişiminin incelendiği başka bir çalışmada ise kentte ısınma amaçlı doğalgaz kullanımının yaygınlaşması ile 2011-2012 kış döneminde SO₂ standartların altında 18 µg/m³ olarak ölçülmüştür. Doğalgaz kullanımı öncesi ise bu miktar 76 µg/m³ olarak kaydedilmiştir. Benzer şekilde PM₁₀ miktarı doğalgaz kullanım öncesi dönemde 166 µg/m³ iken; doğalgaz kullanımının yaygınlaşması ile 59 µg/m³'e düşmüştür [16]. Benzer şekilde Denizli'de kentsel ısınmada doğalgaz kullanımına geçiş ile hava kirliliğini temsil eden SO₂ ve PM₁₀ parametrelerinin değişiminin incelendiği bir çalışmada ise; 2007 yılı itibarıyla doğalgazın kullanılmaya başlanmasıyla diğer fosil yakıtların kullanımının azaldığı ve SO₂'nin 2007-2008 kış sezonunda bir önceki sezona göre %56, PM₁₀'ün ise %37 azaldığı belirtilmiştir [17].

Erzurum'da 1980'li yıllar itibarı ile hızla artan şehirleşme faaliyetleri kentte sağlıklı bir planlama yaklaşımından uzak ve kendiliğinden gelişen bir yapı sergilenmesine neden olmuştur. Kentin aldığı göçlerle 1984'ten 2000'e kadar konut artış hızının %74 civarında olduğu belirtilmiştir. Bu yoğun artış çarpık yapılaşmayı meydana getirmiş; Yenişehir, Dadaşkent, Şükrüpaşa ve Yıldızkent gibi semtlerin kentsel planlamalarında hava kalitesi, ekolojik sistem ve iklim verilerinin göz ardı edilerek imara açılmasına sebep olmuştur [18],[19]. Kentsel planlamalarda dikkate alınmayan bu faktörlerin yanında kent inersiyon oluşturuca topoğrafik yapısı (Şekil 1) ve artan konut sayısına paralel olarak yakıt miktarının artması nedeniyle geçmiş yıllarda zaten büyük bir problem olan hava kirliliği

katlanarak artmış ve günümüzde sağlıksız bir kent yapısının meydana gelmesine neden olmuştur. Çünkü Erzurum ilinde uzun geçen kış dönemlerinde geçmişten beri ısınma amaçlı olarak tercih edilen birincil fosil yakıt türü kömürdür. Kömürün hava kirliliği problemi yaratması ile kentte sıvı petrol yakıtı da kullanılmaya başlanmış ancak yakıt kalitesinin yeterince sağlanamaması, hızlı kentleşme ile gelişen yeni kent alanlarında kalitesiz veya kaçak yakıt kullanımının engellenememesi gibi nedenlerle hava kirliliği probleminin önüne geçilememiştir [19].



Şekil 1. Erzurum ili topoğrafik haritası [21].

Figure 1. The topographic map of Erzurum city [21].

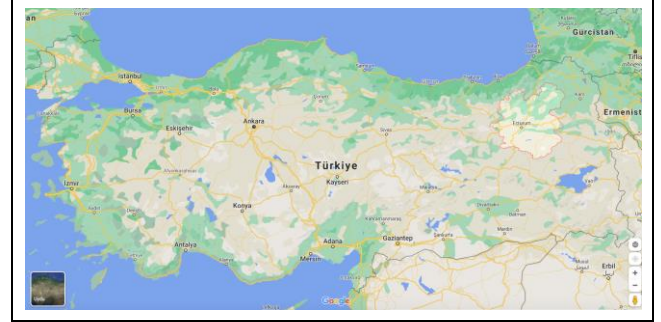
Bu nedenle Doğu Anadolu bölgesinin en soğuk illerinden biri olan Erzurum'da hava kirliliği probleminin ortadan kaldırılması ve kentsel hava kalitesinin iyileştirilmesi amacıyla 2004 yılında doğal gaz altyapı çalışmaları başlatılmış, hızla merkez ilçelerin tüm sokakları doğal gaz kullanılabilir altyapıya hazır hale getirilmiştir. Erzurum'da doğal gazın ısınma amacıyla kentte kullanılmasından önceki dönemlerde hava kirliliğinin değerlendirildiği ve sebeplerinin araştırıldığı [18],[22]-[24] ve doğal gaz sonrasında da hava kalitesinin iyileşmesinin tespitine yönelik literatürde çalışmalar bulunmasına rağmen [19],[25] doğal gaz öncesi ve sonrası dönemlerdeki hava kalitesinin uzun dönem değişiminin istatistiksel yöntemlerle incelendiği bir çalışma bulunmamaktadır. Bu bilgiler ışığında bu çalışmada Erzurum kent merkezindeki hava kalitesinin değişimi; Erzurum'da hava kirliliğinin ilk kez görülmeye başlandığı 1978-1979 kış döneminden başlayarak 2018-2019 dönemine kadar olan SO₂ ve PM₁₀ parametreleri ile aynı dönemlerdeki meteorolojik parametreler (nispi nem, ortalama sıcaklık, yağış, rüzgâr yönü ve hızı) kullanılarak görünürde ilişkisiz regresyon modelleri yardımıyla incelenecek ve 2005 yılında doğal gazın kentsel ısınma amacıyla şehir merkezinde kullanılmaya başlanmasının bu değişimdeki rolü belirlenecektir.

2 Materyal ve yöntem

2.1 Çalışma alanı

Türkiye topraklarının %3.2'sini kaplayan Erzurum İli Doğu Anadolu Bölgesi'nin kuzeydoğu kesiminde 39° 10'-40° 57' Kuzey enlemleri ile 40° 15' - 42° 35' Doğu boylamları arasında yer almaktadır. Erzurum ana çizgileriyle faylarla parçalanmış etrafı dağlarla kuşatılan tektonik kökenli bir havza içinde yer almaktadır. Havzanın önemli bir bölümünü ovalar (Erzurum ovası, Aşkale ovası, Pasinler ovası ve Hınıs ovası) oluşturmaktadır. Bu ovaların en önemlisi yaklaşık 825 km² yüzölçüme sahip olan ve güneydoğu kısmında kent merkezinin kurulduğu Erzurum ovasıdır. Dağların yükseklikleri ise 3,000 m'den (Palandöken 3,176 m) fazladır. 2019 yılı Adrese

Dayalı Nüfus Kayıt Sistemine (ADNKS) göre Türkiye'nin en büyük 29. Kenti olan Erzurum, büyükşehir olduktan sonra 2008 yılında 5747 sayılı kanun ile Palandöken, Aziziye ve Yakutiye olmak üzere 3 merkez ilçeye ayrılmıştır. Ortalama yükseltinin 2,000 m'yi bulduğu Erzurum kenti bu özelliği ile kuzey ılıman kuşakta yer alan soğuk kuşak kentleri arasında en yüksek rakımda kurulmuş olan en büyük kenttir. Şekil 2'de Erzurum'un coğrafi konumunu gösteren harita yer almaktadır [21],[26].



Şekil 2. Erzurum İli'nin coğrafi konumu.

Figure 2. The geographical location of Erzurum city.

2.2 Erzurum İli kent nüfusu

Erzurum'da hava kalitesini olumsuz etkileyen faktörlerin en önemlisi hızlı nüfus artışı ve buna bağlı olarak meydana gelen kentleşme faaliyetleridir. Kent merkezindeki nüfus gelişimine bakıldığında 1980-2000 yılları arasındaki dönemde yıllık nüfus artışı binde 39.8 gibi yüksek bir değere ulaşarak aynı dönem binde 18.3 olan Türkiye ortalamasının üzerine çıkmıştır. Ancak 2007 ve 2008 yıllarında, geçmiş dönemlere nazaran kent nüfusunda zaman zaman düşüş meydana gelmiş ve bu yıllardan sonra Erzurum göç veren il konumuna düşmüştür [27]. 1980 yılında 190,241 olan kent merkezi nüfusunun, 1985 yılında 246,053, 2000 yılında 361,235 ve 2008 yılında ise 359,752 kişi olduğu bildirilmiştir [28]. 2019 yılı Erzurum kent nüfusu 422,832 kişidir [20]. Erzurum İli'ne ait konut, bina sayısı gibi veriler çalışmanın kapsadığı dönem için temin edilemediğinden nüfus ve kentleşme verileri modele dahil edilmemiştir.

2.2.1 Erzurum İli yakıt tüketim verileri

Kentte 2016-2019 yılları arasında kullanılan ithal kömür miktarı verileri Erzurum Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğünden; yerli kömür verileri ise Palandöken ve Yakutiye Belediye Başkanlıklarından temin edilmiş olup Tablo 2'de verilmiştir. Kentin diğer Merkez ilçesi olan Aziziye ilçesinde kullanılan yerli kömür miktarı bilgilerine ulaşılamamıştır. Tablo 2'de ayrıca 2013 yılında Erzurum İlinde kullanılan ithal ve yerli kömür verileri de yer almaktadır. Bu veri ise 2013 yılında Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından yayınlanan Kentair projesine ait rapordan alınmıştır [10].

Tablo 2. Erzurum ili ithal ve yerli kömür tüketim verileri.

Table 2. The imported and domestic coal consumption data in Erzurum.

Yıllar	İthal Kömür (Ton)	Yerli Kömür (Ton)
2013*	104,094	27,000
2016	75,148.09	6,550
2017	93,894.93	6,649
2018	67,145.65	5,180
2019	63,536.42	4,080

Bu çalışma kapsamında resmî kurumlardan temin edilen ve Kentair Raporundaki 2013 yılına ait kömür tüketim verileri

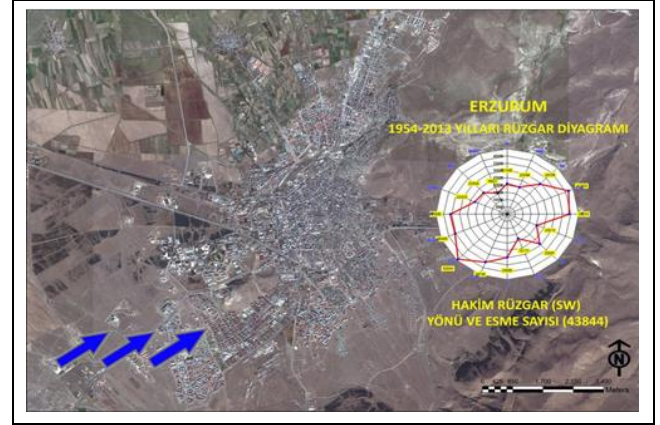
karşılaştırıldığında; 2019 yılında kentte kullanılan toplam ithal kömür miktarının 2013 yılına göre yaklaşık %40 oranında arttığı ve yerli kömür miktarının ise yaklaşık %85 oranında azaldığı görülmektedir. Kentte kullanılan kömür verileri ile ilgili sınırlı veri mevcut olup farklı kaynaklarda farklı verilere rastlamak da mümkündür. Bu nedenle model çalışmalarına dahil edilmemiştir. Örneğin; İl Çevre Durum Raporunda Tablo 2’de verilen aksine 2018 yılında kentte 23,500 ton yerli kömür kullanıldığı belirtilmektedir [29].

Doğal gazın Erzurum’da kullanılmaya başlandığı ilk yıl olan 2005 yılından 2019 yılına kadar olan doğal gaz abone sayısı, kullanıcı sayısı ve tüketim miktarı verileri Palen Enerji Doğal Gaz Dağıtım ve Endüstri A.Ş.’den alınmıştır. Bu veriler Erzurum’daki üç Merkez ilçeyi (Palandöken, Aziziye, Yakutiye) kapsamaktadır. Bu verilere göre 2005 yılında kentte doğal gaz kullanıcı sözleşmesi sayısı 1,373 iken 2019 yılında bu sayı 117,040’a yükselmiştir. 2005 yılında kentte kullanılan doğal gaz miktarı yaklaşık 1.79 milyon sm³ iken, 2019 yılında bu değer yaklaşık 1.5 milyar sm³e ulaşmıştır. Ancak tek başına doğal gaz abone sayısı bilgileri kentleşme verileri olmadan eksik kalacağı için model çalışmalarına dahil edilmemiştir.

2.3 Meteorolojik veriler

Erzurum topoğrafik yapısı ve denizden uzaklığı nedeniyle sert karasal iklim ve dağ ikliminin etkisi altındadır. Türkiye’nin sıcaklık ortalaması en düşük illerinden biri olan Erzurum’da kışlar uzun ve kar yağışlı, yazlar ise kısa ve sıcaktır. Kış mevsiminde Doğu Avrupa ve Balkanlar üzerinden gelen Sibiryaya Yüksek Basıncı koşulları Erzurum depresyonunda hafif rüzgârlı, durgun, nemli fakat yağışsız bir hava ve kuvvetli yer radyasyonu ile gerçekleşen kuru soğukları meydana getirmekte ve kısa sürede uzaklaşma imkânı bulamadığı için kış aylarında sıkça inversiyon olayı yaşanmasına sebep olmaktadır [21]. Erzurum kent merkezi topoğrafik yapısı nedeni ile

çukurda kaldığı için düşük rüzgâr hızı ortalamalarına sahiptir. Yıllık rüzgâr hızı ortalaması 2.7 m/sn olan şehirde en önemli hakim rüzgâr yönü Batı-Güney-Batı (WSW); diğer hakim rüzgâr yönü ise Doğu-Kuzey-Doğu (ENE) yönelimlidir. Hâkim rüzgâr yönü Şekil 3’te gösterilmiştir. Hava kalitesine etkileri bakımından değerlendirildiğinde özellikle yakma faaliyetlerinin yoğun olduğu kış aylarında yüksek basınç etkilerinden dolayı rüzgâr hızının çok düşük olması kirli havanın şehir atmosferinde uzun süreler hapsedilmesine yol açmaktadır [21].



Şekil 3. Erzurum’da hâkim rüzgâr yönlerini gösteren rüzgâr yönü haritası [21].

Figure 3. The wind direction map of Erzurum City [21].

Bu çalışmada kullanılacak olan 1979-2019 yılları arasındaki kentin ortalama nispi nem, rüzgâr yönü ve hızı, sıcaklık ve yağış gibi 2019 meteorolojik veriler, Meteoroloji Genel Müdürlüğü’nden alınarak Tablo 3’te belirtilmiştir.

Tablo 3. Erzurum İli’nin 1979 -2019 yıllarına ait ortalama meteorolojik verileri (Enlem: 39.9529; Boylam: 41.1897; Yükseklik: 1758 m).

Table 3. The meteorological mean data between 1979-2019 years for Erzurum city (Lat: 39.9529; Longitude: 41.1897; Height: 1758 m).

Parametre	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Yıllık
Ortalama Sıcaklık (°C)	-9.8	-8.6	-2.1	5.5	10.4	14.8	19.1	19.4	14.3	7.8	0.2	-6.6	5.4
Toplam Yağış Ort. (mm=kg/m ²)	18.5	22.3	31.9	55.9	71.5	40.0	23.9	17.0	19.3	51.3	31.3	21.3	404.2
Nispi Nem (%)	79.3	79.4	75.3	67.8	65.6	60.4	53.9	50.5	52.9	66.6	74.9	80.5	67.3
Rüzgâr Hızı (m/sn)	1.9	2.2	2.7	3.2	3.1	2.9	3.4	3.2	2.7	2.5	2.2	1.9	2.7
Kar Yağışlı Gün Sayısı	8.8	8.9	8.7	3.5	0.37	0.02	0	0	0	0.85	3.8	8.3	43.3
Yağmurlu Gün Sayısı	0.4	0.85	5.4	15.1	19.4	12.4	7.9	7.4	6.4	10.8	6.6	2.2	94.7
Güneşlenme Süresi (saat)	3.1	4.0	5.0	6.0	7.6	10.0	10.9	10.5	8.8	6.4	4.3	2.6	6.6
Bulutluluk Miktarı	4.4	4.5	4.2	4.3	3.9	2.6	1.9	1.8	1.7	3.0	3.6	4.4	3.4
En Yüksek Sıc. Ort.	-3.9	-2.5	3.5	11.9	17.3	22.6	27.5	28.1	23.5	15.7	6.8	-1.1	12.5
En Düşük Sıc. Ort.	-15.2	-14.2	-7.4	-0.4	3.6	6.4	10.3	10.2	4.9	0.7	-5.4	-11.7	-1.5
Karla Örtülü Gün Sayısı	27.3	26.4	18.5	3	1.2	0	0	0	0	2.6	8.4	22	109.6

Bu verilere göre; ilde en sıcak ay 19.4 °C ortalama sıcaklık ile Ağustos ayı olurken, en soğuk ay ise -9.8 °C ortalama sıcaklık ile Ocak ayıdır ve yıllık ortalama sıcaklık 5.4 °C'dir. Temmuz ayı ortalama rüzgâr hızlarının en yüksek olduğu ay olurken (3.4 m/sn.) yakma faaliyetlerinin yoğun olduğu Aralık, Ocak gibi kış aylarında rüzgâr hızı 1.9 m/sn.'ye düşmektedir. Kentte yıllık ortalama yağış miktarı 404.2 mm olurken, Aralık-Ocak-Şubat gibi ısınmanın yoğun olduğu kış aylarındaki yağışın toplam yağış içindeki ortalama payı düşük olduğu için bu aylardaki yağışların hava kalitesi üzerinde önemli bir etkisinin olmamasına yol açmaktadır. Yıllık karla örtülü gün sayısı ortalaması 109.6 olurken, önceki yıllarda yapılan çalışmalarda yıllık ortalama donlu gün sayısının da 179 gün olduğu belirtilmiştir [30].

2.4 Erzurum İli hava kirliliği verileri

Erzurum'da hava kirliliği ölçümü ilk kez 1979 yılında Atatürk Üniversitesi Çevre Sorunları Araştırma Merkezi tarafından kent merkezinde altı istasyonda (Yakutiye, Hıfzıssıhha, 12 Mart, Üniversite, Aziziye, Gar) SO₂ ölçümü ile başlamıştır. 1984 yılında bu istasyonlardan partikül madde ölçümlerinin de alınmaya başlanması ile 1984-2008 yılları arasında Atatürk Üniversitesi Çevre Sorunları Araştırma Merkezi kentte tek ölçüm merkezi olarak hizmet vermiştir [31]. 2009 yılından sonra ise Erzurum Halk Sağlığı Müdürlüğü bahçesinde (Hıfzıssıhha-Merkez istasyonu) tek noktadan SO₂ ve PM₁₀ online sistemle ölçülmeye başlanmıştır [10]. 2015 yılında Erzurum Temiz Hava Merkezinin kurulması ile Hıfzıssıhha-Merkez istasyonuna ek olarak Taşhan, Palandöken, Aziziye ve Pasinler istasyonları oluşturulmuştur. Bu istasyonlarda SO₂ ve PM₁₀'a ek olarak PM_{2.5}, NO, NO₂, NO_x, O₃, CO, Benzen, Toluene, Etilbenzen, Ksilen parametreleri de ölçülerek Çevre ve Şehircilik Bakanlığının Sürekli İzleme Merkezi aracılığı ile kamuoyu ile paylaşılmaktadır. Kentteki sabit ve hareketli tüm ölçüm noktaları Şekil 1'de mavi olarak gösterilmiştir. Bu çalışmada ise; 1984-2008 yılları için Atatürk Üniversitesi Çevre Sorunları Araştırma Merkezi kayıtlarında yer alan ve 2009-2019 yılları için de Çevre ve Şehircilik Bakanlığının Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı web sitesinde (sim.csb.gov.tr) yayınlanan yıllık ortalama SO₂ ve PM₁₀ verilerden yararlanılmıştır. Tablo 4'te bu verilerin tamamı gösterilmekle beraber her iki parametrenin birlikte ve kesintisiz ölçüldüğu 1984-2019 yılları arasındaki ölçüm sonuçları hava kalitesini değerlendirmek için kriter kirleticiler olarak model çalışmalarında kullanılmıştır.

2.5 Metot

Bu çalışmada Erzurum'daki hava kirliliği 1984-2019 yılları arasında SO₂ ve PM₁₀ parametreleri üzerinden meteorolojik veriler de kullanılarak incelenecek ve kentte doğal gazın 2005 yılında kullanılmaya başlanması ile hava kalitesinde elde edilen değişim istatistiksel olarak ortaya koyulmaya çalışılacaktır. Her iki modelin bağımlı değişkenleri olan SO₂ ve PM₁₀ değişkenleri sıcaklık göstergeleri olduğundan ve aynı şoklardan etkileneceği düşüncesi ile her iki modelin bir sistem olarak görünürde ilişkisiz regresyon modelleri ile tahmini denenecektir. Ortak değişkenleri bulunmayan ve birbirinden bağımsız görünen denklemlerin hata terimlerinin birbirleri ile ilişkili olduğu durumda bu denklem sistemlerine görünürde ilişkisiz regresyon modelleri denilmektedir (Denklem 1).

$$\begin{aligned} Y_t &= \beta_1 + \beta_2 L_t + u_t \\ X_t &= \alpha_1 + \alpha_2 K_t + v_t \end{aligned} \quad (1)$$

(1) ile verilen denklem sisteminde Y ve X bağımlı, L ve K bağımsız değişkenler iken α_1 ve β_1 ilgili oldukları modellerin sabit α_2 ve β_2 ise eğim parametreleridir. Bu denklem sisteminde ortak değişken yoktur, fakat hata terimleri olan u_t ile v_t 'nin birbiri ile korelasyonlu olduğu varsayılmaktadır. Eğer bahsedilen korelasyon yoksa her iki denklem birbirinden bağımsız olarak en küçük kareler yöntemi ile tahmin edilebilecektir. Görünürde ilişkisiz regresyon modelleri genelleştirilmiş en küçük kareler yöntemi kullanılarak tahmin edilmektedir. Tahminin ilk aşamasında denklem sisteminin her iki modeli en küçük kareler yöntemi ile tahmin edilmekte ve kalıntılar elde edilmektedir. Denklem 2'de yer alan varyans kovaryans matrisi,

$$\Omega = \begin{bmatrix} \sigma_u^2 & \sigma_{uv} \\ \sigma_{uv} & \sigma_v^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

tahmin edildikten sonra genelleştirilmiş en küçük kareler tahmini yapılmaktadır (Denklem 3):

$$\hat{\beta} = (X' \Omega^{-1} X)^{-1} (X' \Omega^{-1} Y) \quad (3)$$

Denklemlerin görünürde ilişkisiz regresyon olup olmadığına hata terimleri arasındaki korelasyonunun anlamlılığını sınavan Breusch Pagan LM (1980) testi sonucu karar verilmektedir. LM test istatistiği [33] ise Denklem 4'te gösterilmiştir:

$$\lambda_{LM} = T \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \hat{\rho}_{ij}^2 \quad (4)$$

Bu eşitlikte $\hat{\rho}_{ij}^2$: i, j kalıntıları arasındaki korelasyon katsayısıdır ve Denklem 5'teki gibi hesaplanmaktadır:

$$\hat{\rho}_{ij} = \hat{\rho}_{ji} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \hat{u}_i \hat{v}_j}{\left(\sum_{i=1}^N \hat{u}_i^2 \right)^{1/2} \left(\sum_{j=1}^N \hat{v}_j^2 \right)^{1/2}} \quad (5)$$

LM test istatistiği, M denklem sayısı olmak üzere M-1 serbestlik derecesi ile χ^2 dağılmaktadır. Hesaplanan değer tablo değerinden büyükse $H_0: \rho_{ij}=0$ şeklindeki temel hipotez reddedilmekte ve hata terimlerinin birbiri ile korelasyonlu olduğu anlaşıldığından görünürde ilişkisiz regresyona ilişkin tahmin yöntemlerinin kullanılması gerektiği sonucuna ulaşılmaktadır [34].

Bununla beraber ister en küçük karelerle tahmin edilsin ister görünürde ilişkisiz regresyon kullanılsın kullanılan modellere yapısal kırılmalar etki ediyorsa bunların dikkate alınmaması sapmalı parametre tahminlerine sebep olmaktadır. Yapısal kırılmaları ortaya çıkarmak için literatürde çok fazla yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden bazıları kırılma tarihlerini içsel olarak bazıları ise dışsal olarak belirlemektedir. Yapısal kırılma tarihlerinden tam olarak emin olunamadığı ve sistem tarafından (içsel olarak) belirlenmesinin uygun olduğu durumlarda en çok kullanılan testlerden birisi Bai ve Perron'un (1998, 2003) çoklu kırılmalara da izin veren yapısal kırılma testidir [32]. Bu teste göre veri aralığındaki tüm mümkün kırılma tarihleri denenerek en uygun tarih F testi yardımıyla belirlenmektedir.

Tablo 4. 1979-2019 yılları arası Erzurum kent atmosferine ait ortalama SO₂ ve PM₁₀ ölçüm sonuçları.

Table 4. SO₂ ve PM₁₀ mean values between 1979-2019 in Erzurum City atmosphere.

Dönem	YIL	Kirlilik Parametresi	
		SO ₂ (µg/m ³ yıl)	PM ₁₀ (µg/m ³ yıl)
Doğal Gaz Öncesi Dönem	1979	437	-
	1980	341	-
	1981	-	-
	1982	617	-
	1983	328	-
	1984	148	179
	1985	229	158
	1986	366	166
	1987	402	264
	1988	234	146
	1989	287	165
	1990	423.19	219.10
	1991	440.66	244.74
	1992	363.54	250.84
	1993	434.71	301.17
	1994	279.54	208.72
	1995	173.21	109.15
	1996	128.76	71.80
	1997	162.67	97.51
	1998	127.54	111.72
1999	127.54	109.30	
2000	136.96	113.29	
2001	151.34	138.69	
2002	154.13	157.80	
2003	182.32	109.10	
2004	179.47	122.74	
Doğal Gaz Sonrası Dönem	2005	150.08	106.78
	2006	111.34	59.76
	2007	99.65	44.28
	2008	114.98	42.08
	2009	15.34	65.80
	2010	12.73	62.80
	2011	13.75	59.50
	2012	12.53	57.02
	2013	9.35	33.07
	2014	12.95	30.19
	2015	13.00	38.77
	2016	14.77	55.49
	2017	13.49	56.95
	2018	10.97	46.09
	2019	10.58	54.59

3 Bulgular ve tartışma

Erzurum ilindeki hava kalitesi değişimini incelemek için; hava kirliliği göstergeleri olarak SO₂ ve PM₁₀ parametreleri kullanılmış; modellere 2005 öncesi ve sonrası farkını ifade etmek üzere kullanılan kukla değişkenin (doğal gaz) yanı sıra

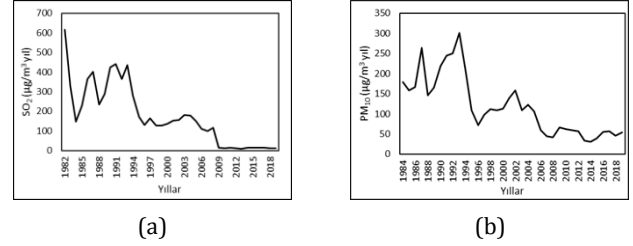
hava sıcaklığı, nem, rüzgâr hızı ve yağış miktarı gibi kontrol değişkenler eklenmiştir. Hava kirletici parametreler ve diğer değişkenlere (meteorolojik veriler) ait veriler 1984 yılından itibaren kesintisiz olarak ölçülmekte olduğundan analiz tüm veriler kullanılarak 1984-2019 dönemi için yapılmıştır. Tablo 5'te değişkenlere ait özet istatistikler yer almaktadır.

Buna göre; SO₂ için 1984-2019 yılları arası ortalama değer 159.64 iken minimum 9.35 µg/m³ ve maksimum 440.66 µg/m³ değerlerini almıştır. PM₁₀'in ise aynı dönemlerde ortalama değeri 118.25 µg/m³ iken minimum 30.19 µg/m³ ve maksimum 301.17 µg/m³ olarak hesaplanmıştır. Erzurum ili için aynı dönemde meteorolojik veriler analiz edildiğinde ise sıcaklığın 5.26 °C ortalama değerine sahip olduğu, minimum ortalamasının 2.35 °C ve maksimum ortalamasının ise 7.87 °C; ortalama yağışın 33.47 mm ve minimum yağış ortalamasının 21.15 mm ve maksimum yağış ortalamasının 49.44 mm olduğu; rüzgâr hızı ortalamasının 2.66 m/sn, minimum rüzgâr hızının 0.63 m/sn ve maksimum rüzgâr hızının 3.38 m/sn olduğu ve son olarak nem ortalamasının %67.39, minimum nem değerinin %62.01 ve maksimum nem değerinin %74.92 olduğu belirlenmiştir. Tablo 6'da SO₂ ile meteorolojik değişkenler arasındaki ilişkiyi özetleyen korelasyon matrisi yer almaktadır.

Tablo 6'ya göre SO₂ ile sıcaklık ve rüzgâr hızı arasında negatif yönde sırasıyla %53 ve %45 korelasyon vardır. SO₂ ile nem ve yağış miktarı arasındaki korelasyonlar ise istatistiksel olarak anlamlı değildir. Hava sıcaklığı arttıkça ısınma ihtiyacı azalacağından kömür tüketimi de azalmakta böylelikle SO₂ konsantrasyonu düşmektedir. Rüzgâr hızı da atmosferde kirleticilerin seyreltilmesi için önemli bir faktör olduğundan artan rüzgâr hızı SO₂ konsantrasyonunun azaltılmasına %45 oranında etki etmektedir. 1994-1998 yıllarını kapsayan ve SO₂ ölçüm sonuçları üzerinden hava kirliliğinin modellendiği bir çalışmada da benzer olarak özellikle Aralık ve Ocak aylarında yüksek SO₂ konsantrasyonlarının ölçüldüğünü ve bu aylarda yaşanan düşük sıcaklık ve düşük rüzgâr hızının bu sonuçlarda etkili olduğu belirtilmiştir [22]. Tablo 7'de ise PM₁₀ ile meteorolojik değişkenler arasındaki ilişkiyi özetleyen korelasyon matrisi yer almaktadır.

Benzer şekilde PM₁₀ ile sıcaklık ve rüzgâr hızı arasında negatif yönde sırasıyla %52 ve %48 korelasyon olduğu belirlenmiştir.

PM₁₀ ile nem ve yağış miktarı arasındaki korelasyonlar ise istatistiksel olarak anlamlı değildir. Sıcaklık arttıkça fosil yakıt kullanımını azalacağı için PM₁₀ konsantrasyonları da azalmakta ve artan rüzgâr hızı ile rüzgâr-SO₂ ilişkisine benzer bir düşüş göstermektedir. 2005 Şubat-2006 Şubat yılları arasında Erzurum'daki hava kirliliğinin incelendiği bir çalışmada özellikle PM_{2.5} konsantrasyonlarının rüzgâr hızı ile %50 oranında seyreltildiği belirtilmiştir; az rüzgârlı günlerde ortalama 16 µg/m³ olan PM_{2.5} konsantrasyonunun rüzgârlı günlerde ortalama 8 µg/m³'e düştüğü ifade edilmiştir [24]. Şekil 4(a) ve Şekil 4(b)'de ise 1984-2019 yılları arasında PM₁₀ ve SO₂ konsantrasyonlarının grafiksel olarak değişimi gösterilmiştir.



Şekil 4. 1984-2019 yılları arasında (a): SO₂ ve (b): PM₁₀ konsantrasyonlarının değişimi.

Figure 4. The concentrations change of (a): SO₂ and (b): PM₁₀ between 1984-2019.

Şekil 4'e göre SO₂'de 1993 yılından sonra ciddi bir azalma görülmüş, 1995-2005 yılları arasında stabil kaldıktan sonra 2005 yılından itibaren özellikle 2009 sonrası bir azalma daha görülmüştür. PM₁₀ ise yine 1993 yılından sonra ciddi bir şekilde azalmış, 1995-2005 yılları arasında zaman zaman yükselme eğilimi gösterdikten sonra 2005'ten sonra bir azalma daha görülmüştür.

Tablo 5. Betimsel istatistikler.

Table 5. Descriptive statistics.

Değişkenler (Variables)	Ölçü Birimi	Ortalama	Standart Sapma	Minimum	Maksimum
SO ₂	µg/m ³	159.64	137.16	9.35	440.66
PM ₁₀	µg/m ³	118.25	73.33	30.19	301.17
Sıcaklık	°C	5.27	1.11	2.35	7.87
Yağış	mm	33.47	6.48	21.15	49.44
Rüzgâr hızı	m/sn.	2.66	0.45	0.63	3.38
Nem	%	67.39	3.13	62.01	74.92

Tablo 6. SO₂ Korelasyon matrisi.

Table 6. SO₂ Correlation matrix.

	SO ₂	Sıcaklık	Nem	Yağış	Rüzgâr hızı
SO ₂	1				
Sıcaklık	-0.5342*	1			
Nem	0.1094	-0.3711**	1		
Yağış	-0.0443	0.1773	0.096	1	
Rüzgâr hızı	-0.4502*	0.3944**	-0.077	-0.2188	1

*: %1 ve **: %5 hata payında anlamlılığı temsil etmektedir.

Tablo 7. PM₁₀ Korelasyon matrisi.

Table 7. PM₁₀ Correlation matrix.

	PM ₁₀	Sıcaklık	Nem	Yağış	Rüzgâr hızı
PM ₁₀	1				
Sıcaklık	-0.5212*	1			
Nem	-0.0308	-0.3711**	1		
Yağış	0.0173	0.1773	0.096	1	
Rüzgâr hızı	-0.4830*	0.3944**	-0.077	-0.2188	1

*: %1 ve **: %5 hata payında anlamlılığı temsil etmektedir.

Bu azalmalar çeşitli faktörlere bağlanabilir ancak öncelikle bu parametrelerin ölçüm yönteminin değiştiğini belirtmek gereklidir.

1978 yılından itibaren Atatürk Üniversitesi Çevre Sorunları Araştırma Merkezi tarafından 6 farklı noktada manuel ölçüm ile belirlenen SO₂ ve PM₁₀ parametreleri; 2005-2007 yılları arasında Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı kapsamında ülkemizin tüm illerinde otomatik ölçüm istasyonlarının oluşturulmasıyla; Eurum Halk Sağlığı Müdürlüğü bahçesinde de (Hifzıssıhha-Merkez istasyonu) tek noktadan SO₂ ve PM₁₀ otomatik sistemle ölçülmeye başlanmıştır [35].

Erzurum kent atmosferinde ilk olarak 1978-1979 kış döneminde yoğun olarak görülmeye başlanan hava kirliliğinin sebebinin kentte önceki yıllarda ısınma amaçlı kullanılan kaliteli ve kirlenmiş özelliği az olan kok kömürlerinin sanayiye tahsis edilmesi ve ısınma amaçlı kullanımının sınırlandırılması yerine yüksek kirlenmiş içeriğine sahip asfaltit ve düşük kaliteli linyit kullanıldığı belirtilmiştir. Bu dönemlerde kentte hava kirliliği çok yüksek seviyelere ulaşmış; Aralık 1979'da kentte farklı istasyonlarda günlük 1,275 µg/m³, 1,246 µg/m³ ve 1,089 µg/m³ kükürt dioksit konsantrasyonları ölçülmüştür. Bu dönemde hızla artan hava kirliliğinin önlenmesi için acil önlemler alınmış ve kömürlü kalorifer tesislerinin büyük bir bölümü fuel-oile dönüştürülmüştür. Katı yakıtlara göre kirlenmiş özelliği daha düşük olan sıvı yakıtların kullanılması, yakma tekniklerinin geliştirilmesi vb. gibi önlemler kentte hava kalitesinin kısmen iyileşmesini sağlamış ve bunun bir sonucu olarak 1983-1984 kış dönemlerinde hava kirliliği %60 oranında azaltılmıştır [6]. Daha sonraki dönemlerde hem nüfus artışı ve kentleşme faaliyetleri hem de ısınma maliyetlerinin artmasına bağlı olarak yeniden düşük kaliteli yakıtların kullanılmaya başlanması kentte hava kirliliğini tekrar önemli bir sorun haline getirmiş ve yeniden yüksek kirlilik konsantrasyonları ölçülmeye başlanmıştır. Geçmiş yıllarda yapılmış çalışmalar 1985-1989 yılları arasında kaloriferli binalarda kullanılan fuel-oilin 9,600-10,200 kcal/kg ısı değerlere sahip olduğunu ancak 5 No.lu fuel-oilin %2.5 ve 6 No.lu fuel-oilin ise %3.5 kükürt içeriğine sahip olduğunu göstermiştir [36]. Bu tarihlerde kentte ısınma amaçlı kullanılan fuel-oil nedeniyle atmosfere önemli miktarda kükürt dioksit ve hidrokarbon bileşikler salınmıştır.

1984 yılından sonra kentte yeniden yükselme eğilimi gösteren hava kirliliği, alınan sıkı tedbirler, yakıt kalitesinin iyileştirilmesi ve uygun yakma teknikleri için eğitimlerin yaygınlaştırılması ile 1993 yılından sonra önemli ölçüde azaltılmıştır. Sezen ve Yılmaz [37] tarafından yapılan bir çalışmada 1990-91 kış sezonunda kente tahsis edilen kok kömürü miktarının toplam yakıtlar içindeki oranı %28; 1994-95 kış sezonunda ise %43 olarak belirtilmiş ve hava kalitesinde 1994-95 kış sezonunda önceki yıllara göre yaklaşık %30'luk bir iyileşme sağlandığı ifade edilmiştir. Atatürk Üniversitesi Çevre Sorunları Araştırma Merkezinin 1997 yılı Ocak ayında yayımladığı bültende de benzer olarak son yıllarda ithal kömür kullanıldığı, düşük kaliteli linyit kömürünün yasaklandığı ve bu nedenle bu dönemlerde hava kirliliğinde azalma olduğu belirtilmiştir [31]. 1995 yılından sonra 2000'li yıllara kadar yeniden artma eğilimi gösteren hava kirliliğinin ise artan kentleşme faaliyetlerinden kaynaklandığı tahmin edilmektedir. Literatürde bu dönemde ucuz olduğu için kirlenmiş özelliği yüksek yerli linyit kömürü ve 6 No.lu kalorifer yakıtının yeni kentleşme alanlarında daha fazla kullanım alanı bulduğu belirtilmiştir [37]. Bu nedenle kentte 1993 yılından sonra hava

kirliliğinde genel bir azalma eğilimi görülse de 2000'li yıllarda yeniden artış eğilimi gösterdiği ve DSÖ ile AB standartlarının hala sağlanamadığı ifade edilmiştir [23, 38]. 1995 yılından sonraki dönemler hava kirliliğinin yeniden artışının bir diğer sebebi olarak da iklim koşulları gösterilmektedir. Yapılan çalışmalar, 1996 ve 1997 kış dönemlerinin daha soğuk ve rüzgâr hızının daha düşük olduğunu bu nedenle fazla yakıt tüketiminin hava kirliliğine katkıda bulunduğunu göstermiştir [39]. Kentte uzun yıllar devam eden bu hava kirliliği problemi kalıcı olarak çözmek amacıyla, 2005 yılında doğal gaz için altyapı çalışmaları başlatılmış; önce kent merkezinde ve daha sonra ilçelerde yaygınlaşarak devam edilmiştir. Palen Doğal Gaz verilerine göre 2020 yılı itibari ile kentte doğal gaz altyapı çalışmaları %90 seviyelerine ulaşmıştır. 2005 yılından sonra SO₂ ve PM₁₀ konsantrasyonlarında önemli azalmalar meydana gelmiştir (Şekil 4).

Hem Şekil 4'ün değerlendirilmesi hem de Tablo 5'teki betimsel istatistiklerin incelenmesi sonucu SO₂ değişkeninin geometrik seri özelliği göstermesi sebebiyle heterojenliğin kontrol edilebilmesi amacıyla SO₂ değişkeni logaritması alınarak modele dahil edilmiştir, diğer değişkenler ise doğrusal olarak alınmıştır. Tablo 8'de Bai-Perron'un yapısal kırılma testleri yer almaktadır.

Tablo 8. Yapısal kırılma için F testleri.

Table 8. F Test for structural break.

	Kırılma Sayısı	Kırılma Tarihi	F test	Kritik Değer
PM ₁₀	1	1995	78.67	8.58
	2	2006	24.93	10.13
	3	1990	17.92	11.14
	4	-	2.75	11.83
SO ₂	1	2009	315.67	8.58
	2	1995	87.13	10.13
	3	-	0.98	11.14

Tablo 8'e göre PM₁₀ modelinde sırasıyla 1995, 2006 ve 1990 yıllarında; SO₂ modelinde ise 2009 ve 1995 dönemlerinde yapısal kırılmalar meydana gelmiştir. Bu kırılma tarihleri Şekil 4'te verilen grafiklerle uyumaktadır. Belirlenen kırılma tarihleri için kukla değişkenler oluşturulmuştur. Örneğin 1995 yılındaki kırılmayı ifade etmek üzere oluşturulan ve D₁₉₉₅ ismi verilen kukla değişken, 1995 öncesi için 0, 1995 yılı ve sonrası için 1 değerini alacak şekilde oluşturulmuştur. Benzer şekilde D₁₉₉₀, D₂₀₀₆ ve D₂₀₀₉ değişkenleri de oluşturulmuştur. Oluşturulan bu değişkenlerle bağımlı değişkenlerin korelasyonları hesaplanmıştır. Korelasyon sonuçları ise Tablo 9'da yer almaktadır.

Tablo 9. Korelasyon katsayıları.

Table 9. Correlation coefficients.

	PM ₁₀	SO ₂
D ₂₀₀₉	-	-0.7208*
D ₁₉₉₅	-0.8356*	-0.8256*
D ₂₀₀₆	-0.7479*	-
D ₁₉₉₀	-0.3799**	-

Tablo 9'daki korelasyonlara göre tüm kırılma tarihleri için oluşturulan kukla değişkenler %99 güven düzeyinde anlamlı, sadece PM₁₀ için 1990 yılı kukla değişkeni %95 güven düzeyinde anlamlıdır. SO₂ ve PM₁₀ ile kukla değişkenler arasındaki tüm korelasyonlar %70'in üzerinde olmasına rağmen 1990 yılı kukla değişkeni ile PM₁₀ arasındaki korelasyon katsayısı %38'dir. Dolayısıyla 1990 yılının PM₁₀ üzerindeki etkisinin daha az olacağı öngörülmektedir. Yukarıda açıklanan durumlara paralel olarak kentte yerli kömür

kullanımın yasaklandığı yıl olan 1995 yılı SO₂ ve PM₁₀ için en önemli kırılmaların yaşandığı yıl olup korelasyonlar %83.56 ile %82.56 seviyeleri ile yüksek düzeyde anlamlıdır. Doğal gazın kentte yaygınlaşmaya başlamasından sonra; 2006 yılı PM₁₀ için %74.79 korelasyon ile yüksek düzeyde anlamlıdır. 2009 yılı ise SO₂ için %72.08 korelasyon ile yüksek düzeyde anlamlı olup 2009 yılında SO₂ konsantrasyonunda önemli bir kırılma meydana gelmiştir. SO₂ ve PM₁₀ konsantrasyonlarında meydana gelen bu kırılmalar kentte doğal gaz kullanımının artışı ile ilişkilendirilebilir. Nitekim Palen Enerji'den elde edilen verilere göre doğal gazın kentte ilk kullanıldığı yıllarda kullanım oranı %10'larda iken sonraki yıllarda bu oran hızla artarak %55-60'a kadar yükselmiştir. Ancak doğal gazın en yüksek kullanıma sahip olduğu zamanlarda bile kentte %40-45 oranında kömür kullanılmaya devam etmiştir. Dolayısı ile hava kirliliğinde tam bir iyileşme sağlanamamıştır. 2012-2017 yıllarını kapsayan bir çalışmada kentte geçmiş yıllara nazaran hava kirliliğinde önemli bir azalma meydana gelmesine rağmen hava kirliliği parametrelerinin zaman zaman DSÖ standartlarını aştığını göstermiştir. Kentte hala önemli oranda kömür kullanılması, motorlu taşıtlar ve kentin gelir seviyesi düşük yerleşim alanlarında ısınma amaçlı olarak diğer kalitesiz yakıtlar kullanılmasıyla özellikle partikül madde konsantrasyonlarının standartların altına düşmemesinin sebebi olarak gösterilmiştir [25]. Doğal gaz birim fiyatlarının ilgili yıllarda sürekli artış göstermesinin de bu durum üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Literatürdeki diğer çalışmalarda da SO₂'nin tamamen yakıtın kükürt içeriğinden kaynaklanan bir kirlenici olduğu için doğal gazın kullanılmaya başlanması ile kontrol altına alınabildiği, fakat partikül maddenin, kent atmosferinde yanma kaynakları dışında da meydana geldiği için kontrol altına alınamadığı belirtilmiştir [19].

Tablo 6, 7 ve 9'daki korelasyonlar incelenerek anlamlı değişkenlerle modeller kurulmuştur. Her iki modelde de nem ve yağış miktarı bağımlı değişkenlerle anlamlı korelasyona sahip olmadığı için, rüzgâr hızı ise her ne kadar korelasyonlu anlamlı olsa da diğer bir bağımsız değişken olan sıcaklık değişkeni ile de korelasyonlu nedeniyle modellerde çoklu doğrusal bağlantıya sebep olduğundan modellerde yer alamamıştır. Dolayısıyla hem PM₁₀ hem de SO₂ modelinde sadece sıcaklık değişkeni anlamlı bulunmuştur. Kukla değişkenlerden ise her iki modelde 1995 yılı, ilaveten PM₁₀ modelinde 2006 ve SO₂ modelinde 2009 yıllarının etkileri anlamlıdır. Böylece SO₂ ve PM₁₀'un bağımlı değişken olduğu modeller Denklem (6)'daki gibi belirlenmiştir:

$$\begin{aligned} PM_t &= \beta_1 + \beta_2 Sıcaklık_t + \beta_3 D_{1995} + \beta_4 D_{2006} + u_t \\ lnSO_{2,t} &= \alpha_1 + \alpha_2 Sıcaklık_t + \alpha_3 D_{1995} + \alpha_4 D_{2009} + v_t \end{aligned} \quad (6)$$

Anlamlı değişkenlerle oluşturulan bu modellerin benzer şoklardan etkilenebileceği düşüncesi ile u ve v hata terimleri arasındaki korelasyonu sınamak için Breusch Pagan LM testi yapılmıştır. Breusch Pagan LM testi sonuçları Tablo 10'un en altında yer almaktadır, sonuçlara göre 2 modelin hata terimleri arasında korelasyon olmadığını ifade eden H₀ hipotezi reddedildiğinden iki denklemin birbirinden bağımsız düşünülmeceği söylenebilmektedir. SO₂ ve PM₁₀ modellerinden elde edilen hata terimleri arasındaki korelasyon yaklaşık %53'tür. Böylece modeller ayrı ayrı en küçük karelerle tahmin edilmektense bu iki denklemlili sistem görünürde ilişkisiz regresyon ile tahmin edilmiştir ve sonuçlar Tablo 10'da verilmiştir.

Tablo 10. Görünürde ilişkisiz regresyon sonuçları.

Table 10. Results of seemingly unrelated regression.

	PM ₁₀	lnSO ₂
Sıcaklık	-12.80*	-0.09**
D ₁₉₉₅	-97.99*	-0.78*
D ₂₀₀₆	-42.36*	-
D ₂₀₀₉	-	-2.31*
Sabit	270.13*	6.17*
F	54.03*	414.62*
R ²	0.85	0.97
Breusch Pagan LM Testi (Korelasyon katsayısı)	10.08*	(0.5273)

Tahmin sonuçlarına göre, F testi modellerin anlamlı olduğunu göstermekte, R² değerleri ise PM₁₀ modelinde %85 ve SO₂ modelinde %97'dir. Sıcaklık, 1995 ve 2006 yılındaki yapısal kırılmaları ifade eden kukla değişkenler beraberce PM₁₀'daki değişkenliğin %85'ini açıklamaktadır. Dolayısı ile sıcaklığın artması, 1995 yılında sert önlemler alınarak yerli kömürlerin yasaklanması ve doğal gaz kullanımının ısınma amaçlı yaygınlaşmasının PM₁₀ azalmasının üzerindeki etkisi %85'tir. Benzer şekilde sıcaklık, 1995 ve 2009 yılı kukla değişkenleri SO₂'deki değişkenliğin %97'sini açıklamaktadır. R²'nin değerlerinin 1'e bu kadar yakın çıkması sıcaklığın yanısıra kırılma tahminlerinin uygun olarak belirlendiğinin, kurulan modellerin başarısını göstermektedir. Sonuç olarak Erzurum'daki hava kirliliği 1984-2019 yılları arasındaki SO₂ ve PM₁₀ konsantrasyonları üzerinden değerlendirildiğinde önemli ölçüde sıcaklık ve SO₂ için 1995 ve 2009 yılları; PM₁₀ için ise 1995 ve 2006 yıllarındaki durumlarla açıklanabilmektedir. Diğer değişkenlerin etkisi sabitken ortalama sıcaklıktaki her 1 °C'lik artış PM₁₀'u 12.8 µg/m³gün ve SO₂'yi de 9 µg/m³gün azaltmaktadır. Hava sıcaklığı arttıkça ısınma amaçlı yakıt kullanım miktarı azalacağı için SO₂ ve PM₁₀ miktarlarında azalma elde edilmesi normaldir. İthal kömür kullanımına geçilen ve yerli, kalitesiz kömürlerin kullanımının yasaklandığı yıl olan 1995 yılı sonrası öncesine göre PM₁₀ yaklaşık 98 µg/m³gün azalmıştır. Benzer şekilde doğal gazın yaygınlaştığı yıl olan 2006 yılı sonrası öncesine göre PM₁₀ 42.4 µg/m³gün azalmıştır.

Tablo 10'dan 1995 yılında alınan önlemlerin SO₂'yi 1995 öncesi döneme göre %54 oranında azalttığı hesaplanmıştır. Benzer bir hesaplama 2009 yılında SO₂'nin önceki döneme göre azalma oranı %90 seviyesinde hesaplanmıştır. SO₂ konsantrasyonunun 2009 yılındaki kırılması; Atatürk Üniversitesi kampüs yerleşkesinde ısınma amaçlı olarak kullanılan 4 No.lu kalorifer yakıtı yerine 2008 yılında tamamlanan altyapı çalışmaları ile tamamen doğal gaz kullanımına başlanması ile de ilişkilendirilebilir. Bilindiği gibi sıvı bir yakıt olan ve kükürt içeriği maksimum %1.5 olan 4 No.lu fuel-oilin en büyük kirlenici emisyonu SO₂'dir ve partikül madde emisyonları SO₂'ye göre oldukça düşüktür [35]. Bu nedenle kampüste kullanılan sıvı yakıtın doğal gaz ile yer değiştirmesi PM₁₀ konsantrasyonlarının azalmasına çok büyük etki yapmamasına rağmen SO₂ konsantrasyonlarının azalmasında etkili olduğu düşünülmektedir. Çünkü Atatürk Üniversitesinde kullanılan doğal gaz miktarı toplam kent tüketiminin yaklaşık %15'ine karşılık gelmektedir. Dolayısı ile üniversite kampüsü kentin hava kalitesini etkileyebilecek bir kaynak potansiyeline sahiptir [30],[40]. Ayrıca WSW yönünden esen hakim rüzgârların kirlenici kent merkezine taşıdığı göz önünde bulundurulursa bu güzergahta bulunan üniversite kampüs yerleşkesindeki hava kirliliğinin kentin hava kalitesine olumlu yada olumsuz etki yapması muhtemel görünmektedir.

[37]. Bu nedenle kent merkezinde 2009 yılında SO₂ konsantrasyonunda meydana gelen kırılmanın üzerinde kent merkezine oldukça yakın olan Atatürk Üniversitesi kampüs yerleşkesinin ısınma biçiminin değişmesinin etkili olduğunu belirtmek yanlış bir ifade olmayacaktır.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada Erzurum ili hava kalitesinin değişimi, kentte hava kirletici parametrelerin ilk kez ölçüldüğü dönemler olan 1978-1979 yıllarından 2018-2019 yıllarına kadar meteorolojik parametreler göz önünde bulundurularak istatistiksel olarak incelenmiştir. Bu amaçla görünürde ilişkisiz regresyon modellerinden yararlanılmıştır. Kentte hava kalitesini iyileştiren ana etmen olan ısınma amaçlı doğal gaz kullanım miktarları başta olmak üzere kentleşme, yakıt türü ve miktarları gibi faktörlerin sonuçlar üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Model sonuçlarına göre;

- SO₂ ile sıcaklık ve rüzgâr hızı arasında negatif yönde sırasıyla %53 ve %45; PM₁₀ ile sıcaklık ve rüzgâr hızı arasında ise negatif yönde sırasıyla %52 ve %48 korelasyon olduğu belirlenmiştir,
- SO₂ ve PM₁₀ ile nem ve yağış miktarları arasındaki korelasyonlar istatistiki olarak anlamlı değildir,
- Korelasyon matrisi yardımıyla, çeşitli denemeler ve çoklu doğrusal bağlantı sonuçları sonucunda hem PM₁₀ hem de SO₂ modelinde sadece sıcaklık değişkeni anlamlı bulunmuştur,
- 2006 ve 1995 yıllarında PM₁₀ modelinde; 2009 ve 1995 yıllarında ise SO₂ modelinde anlamlı yapısal kırılmalar meydana gelmiştir. 1995 yılında kentte yerli ve kalitesiz kömürlerin ısınma amaçlı kullanımının sert önlemler alınarak yasaklanması ile bu ortak yapısal kırılmanın gerçekleştiği tahmin edilmiştir. 1995 yılı SO₂ ve PM₁₀ için en önemli kırılmaların yaşandığı yıl olup korelasyonları yaklaşık %84 ile %83 seviyeleri ile yüksek düzeyde anlamlıdır,
- Doğal gazın kentte yaygınlaşmaya başlamasından sonra 2006 yılındaki kırılmanın PM₁₀ ile yaklaşık %75 ve 2009 yılındaki kırılmanın da SO₂ ile %72 güçlü korelasyonlu bulunmaktadır,
- Tahmin edilen model sonuçlarına göre sıcaklığın artması, sert önlemler alınarak yerli kömürlerin yasaklanması (1995) ve ısınma amaçlı doğal gaz kullanımının yaygınlaşmasının (2006) PM₁₀'daki değişkenliğin %85'ini açıklamaktadır,
- Benzer şekilde sıcaklığın artması, sert önlemler alınarak yerli kömürlerin yasaklanması (1995) ve 2009 yılının SO₂'deki azalmanın üzerindeki etkisi %97'dir. 2009 yılında SO₂'de meydana gelen kırılmanın temel nedenleri arasında kentte doğal gaz kullanımının yaygınlaşması, ölçüm yöntemlerinin değişmesi ve Atatürk Üniversitesi kampüs yerleşkesinin ısınma şeklinin sıvı yakıttan doğal gaza dönüştürülmesi olabileceği tahmin edilmektedir,
- SO₂ ve PM₁₀ konsantrasyonlarında meydana gelen azalmalarda genel olarak kirleticilik özelliği yüksek yerli kömür kullanımının kontrol altında tutulması ve kirleticilik özelliği az yüksek kaliteli kömür kullanımının artırılmasının da önemli rol oynadığı görülmektedir,

- Nitekim ithal kömür kullanımına geçilen ve yerli, kalitesiz kömürlerin kullanımının yasaklandığı yıl olan 1995 yılı sonrası öncesine göre PM₁₀ yaklaşık 98 µg/m³gün azalmıştır. Benzer şekilde SO₂ de 1995 sonrasında %54 oranında azalmıştır,
- Doğal gazın ısınma amaçlı kullanımının yaygınlaşması ile PM₁₀ konsantrasyonu doğal gaz öncesi döneme göre 42.4 µg/m³gün azalmıştır. SO₂ konsantrasyonları ise 2009 yılından sonra %90 azalma göstermiştir.

5 Conclusions

In this study, the alteration in the air quality of Erzurum City from the years of 1978-1979, when the air pollutant parameters were measured for the first time in the city, until the years of 2018-2019 was statistically analyzed using the SO₂ and PM₁₀ parameters taking into account the meteorological parameters. Seemingly Unrelated Regression (SUR) models have been used for this purpose. The effects of factors such as urbanization, fuel type and amounts, especially the amount of natural gas usage for heating, which is the main factor improving air quality in the city, on the results were evaluated. According to the model results;

- It was determined that there is a negative correlation between SO₂ and temperature and wind speed as 53% and 45% respectively; and 52% and 48% between PM₁₀ and temperature and wind speed, respectively,
- Correlations between SO₂ and, PM₁₀ and humidity and precipitation amounts are not statistically significant,
- Only the temperature variable was found to be significant in both PM₁₀ and SO₂ models with the help of the correlation matrix, as a result of various experiments and the multicollinearity test,
- In the years of 2006 and 1995 in the PM₁₀ model, and 2009 and 1995 in the SO₂ model, significant structural breaks were obtained. It was estimated that this common structural break occurred in 1995 when the use of domestic and poor-quality coal for heating purposes was banned by taking drastic measures in the city. 1995 is the year in which the most important structural breaks occurred for SO₂ and PM₁₀, and the correlation coefficients are highly significant with the levels of approximately 84% to 83%, respectively,
- After the natural gas has become widespread in the city, it has a strong correlation of approximately 75% between PM₁₀ and 2006, and that of 72% between and SO₂ and 2009,
- According to estimated regression model results, the increase in air temperature, the restriction of domestic coal by taking drastic measures (1995) and widespread use of natural gas for heating (2006) explain 85% of the variability on PM₁₀ reduction,
- Similarly, the increase in air temperature, the restriction of domestic coal by taking drastic measures (1995) and 2009 have the effect of 97% on the decrease in SO₂. It is estimated that the main reasons for the breakdown in SO₂ in 2009 may be the widespread use of natural gas in the city, the change in measurement methods, and the shifting of the heating system of the Atatürk University campus from liquid fuel to natural gas,

- It is observed that the restriction of the use of highly polluting domestic coal and the increased usage of low-polluting high-quality coal play an important role in the reduction in SO₂ and PM₁₀ concentrations as well. As a matter of fact, the PM₁₀ decreased by approximately 98 µg/m³ daily after the year 1995 when imported coal was started to use and domestic, poor quality coal was prohibited. Similar to this result, SO₂ decreased by 54% after 1995,
- PM₁₀ concentration decreased by 42.4 µg/m³ daily compared to the period before natural gas usage. SO₂ concentrations decreased by 90% after 2009.

6 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Zeynep EREN fikrin oluşması, tasarımın yapılması, literatür taraması ve sonuçların değerlendirilmesi başlıklarında; Ferda YERDELEN TATOĞLU elde edilen sonuçların istatistiksel olarak modellenmesi ve değerlendirilmesinde ve Taha AKARSU ise kullanılan verilerin temin edilmesi, yazım denetimi ve içerik açısından makalenin kontrol edilmesi başlıklarında katkı sunmuşlardır.

7 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

8 Kaynaklar

- [1] WHO. "Ambient (outdoor) air quality and health". (<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/en/>) (7.11.2020).
- [2] Çevre Mühendisleri Odası. "Hava Kirliliği Raporu-2018". https://www.cmo.org.tr/resimler/ekler/9d62b3a2bb620a4_ek.pdf (2.10.2020).
HEAL. "Air Pollution and Health in Turkey Facts, Figures and Recommendations". https://www.env-health.org/IMG/pdf/150220_factsheet_air_and_health_turkey_en_final.pdf (12.09.2020).
- [3] WHO. "WHO global air quality guidelines". <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/345329/9789240034228-eng.pdf> (11.10.2021).
- [4] Kırımhan S. *Hava Kirliliği ve Kontrolü*. 1. Baskı. Ankara, Türkiye, Turhan Kitabevi, 2006.
- [5] Temiz Hava Hakkı Platformu (THHP). "Hava Kirliliği ve Sağlık Etkileri: Kara Rapor". <https://www.temizhavahakki.com/wp-content/uploads/2019/08/Hava-Kirliliği-ve-Sağlık-Etkileri-Kara-Rapor-2019.pdf> (11.10.2020).
- [6] Çevre Mühendisleri Odası. "Hava Kirliliği Raporu-2019". https://www.cmo.org.tr/genel/bizden_detay.php?kod=101334&tipi=78&sube=0 (02.10.2020).
- [7] IQAir. "World Air Quality Report-Region & City PM_{2.5} Ranking". <https://www.iqair.com/newsroom/IQAir-AirVisual-2018-World-Air-Quality-Report-Reveals-Worlds-Most-Polluted-Cities> (11.10.2020).
- [8] IQAir Air Visual. "World Air Quality Report-Region & City PM_{2.5} Ranking". <https://www.iqair.com/world-most-polluted-cities/world-air-quality-report-2019-en.pdf> (11.10.2020).
- [9] T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. "kentlerde hava kalitesi değerlendirme sisteminin geliştirilmesi projesi-Kentair hava kalitesi değerlendirme raporu". Erzurum, Türkiye, 83, 2013.
- [10] Apaydın D. Kayseri İli için Alansal Kaynaklı Emisyon Envanteri. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye, 2014.
- [11] UNDP. "Human Development Report-IPCC 2006 klavuzuna göre seragazi emisyon envanteri hesaplama yöntemleri". Ankara, Türkiye, 83, 2011.
- [12] T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. "Doğal gaz piyasası 2018 yılı sektör raporu". Ankara, Türkiye, 154, 2018.
- [13] US Energy Information Administration. "Carbon Dioxide Emissions Coefficients". https://www.eia.gov/environment/emissions/co2_vol_mass.php (3.11.2020).
- [14] Çetin M, Demirci OK. "Erzincan'da doğal gaz kullanımının hava kalitesine etkisi". *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9(1), 8-18, 2016.
- [15] Yıldız A, Çay Y, Özer F. "Karabük ilindeki hava kirliliğinin doğal gaz kullanımı ile değişimi". *Tarih Kültür ve Sanat Araştırmaları Dergisi*, 1(4), 497-506, 2012.
- [16] Yazıcı H, Yusuf Ç, Sekmen Y. "Hava kirliliğinin doğal gaz kullanımı ile değişimi, denizli örneği". *Selçuk-Teknik Dergisi*, 9(3), 205-215, 2010.
- [17] Sezen I, Yılmaz S. "Erzurum kenti hava kirliliği sorununun çözümünde peyzaj mimarlığı açısından alınması gereken önlemler". *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 34(3), 279-286, 2003.
- [18] Turalioğlu FS. "Şehirleşme ve doğalgaz kullanımının erzurum hava kalitesine etkisi". *İğdir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 1(2), 41-45, 2011.
- [19] Türkiye İstatistik Kurumu. "Adrese Dayalı Nüfus Kayıt İstatistikleri-2019". <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=Nufus-Demografi-109> (21.12.2020).
- [20] Dursun D, Yılmaz S, Yılmaz H, Irmak MA, Demir M, Yavaş M. "Hava kirliliğinde ekolojik koridor senaryoları: Erzurum Kenti". Atatürk Üniversitesi Yayınları, Erzurum, Türkiye, 136, 2015.
- [21] Yıldırım Y, Demircioğlu N, Kobya B, Bayramoğlu M. "A mathematical modeling of sulphur dioxide pollution in Erzurum City". *Environmental Pollution*, 118(3), 411-417, 2002.
- [22] Turalioğlu FS, Bayraktar H. "Assessment of regional air pollution distribution by point cumulative semivariogram method at Erzurum urban center, Turkey". *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 19(1), 41-47, 2005.
- [23] Hanefi B, Turalioğlu FS, Gürdal T. "Average mass concentrations of TSP, PM₁₀ and PM_{2.5} in Erzurum urban atmosphere". *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 24(1), 57-65, 2008.
- [24] Koşan Z, Kavuncuoğlu D, Çalhıkoğlu EO, Yerli EB. "Evaluation of air pollution by PM₁₀ and SO₂ levels in Erzurum province, Turkey: Descriptive study". *Journal of Surgery and Medicine*, 2(3), 265-268, 2018.
- [25] Bayram H. "Erzurum İlindeki Jeotermal Sahaların Doğal Ortam Özellikleri ve Termal Su Kaynakları". Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye, 2015.

- [26] Kopar İ, Zengin M. "Coğrafi faktörlere bağlı olarak Erzurum kentinde hava kalitesinin zamansal ve mekânsal değişiminin belirlenmesi". *Türk Coğrafya Dergisi*, 53, 51-69, 2009.
- [27] Yaşar G, Kayserili A. "Cumhuriyet döneminde 1927-2008 Erzurum İlinin kır-Şehir nüfus değişimi". *Doğu Coğrafya Dergisi*, 15(24), 1-17, 2010.
- [28] T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. "Erzurum İli 2019 Yılı Çevre Durumu Raporu". Erzurum, Türkiye, 103, 2019.
- [29] Akarsu T. Erzurum'da Doğal Gaz Kullanımının Hava Kalitesine Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye, 2021.
- [30] Bai J, Perron P. "Estimating and testing linear models with multiple structural changes". *Econometrica*, 66, 47-78, 1998.
- [31] Zellner A. "An efficient method of estimating seemingly unrelated regressions and tests for aggregation bias". *Journal of the American statistical Association*, 57(298), 348-368, 1962.
- [32] Breusch TS, Pagan AR. "The Lagrange multiplier test and its applications to model specification in econometrics". *The Review of Economic Studies*, 47(1), 239-253, 1980.
- [33] Yerdelen Tatoğlu F. *Ekonometri-Stata Uygulamalı*, 1. Baskı. İstanbul, Türkiye, Beta, 2020.
- [34] Sümer GÇ. "Hava kirliliği kontrolü: türkiye'de hava kirliliğini önlemeye yönelik yasal düzenlemelerin ve örgütlenmelerin incelenmesi". *Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi*, 13, 37-56, 2014.
- [35] Topçu N. "Fosil yakıtların erzurum hava kirliliğine katkısı". *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 24(2), 76-85, 1993.
- [36] Sezen İÖ, Yılmaz S. "Erzurum kent merkezinde 1994-2004 yılları arasındaki hava kirliliği durumu". *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 37(2), 217-224, 2011.
- [37] Turalioğlu FS, Nuhöğlu A, Bayraktar H. "Impacts of some meteorological parameters on SO2 and TSP concentrations in Erzurum, Turkey". *Chemosphere*, 59(11), 1633-1642, 2005.
- [38] Torun P. "Türiyede doğalgaz piyasalarında fiyat belirleme sürecini etkileyen faktörler". *Sakarya İktisat Dergisi*, 6(2), 41-51, 2017.