

Ankara’da Partikül Madde (PM₁₀) ve Kükürt Dioksit (SO₂) Konsantrasyonlarının İklim Parametreleri İle Mekânsal-Zamansal Analizi

Olgu Aydın^{1*}, Nussaibah Begum Raja²

¹Ankara Üniversitesi, Dil ve Tarih-Coğrafya Fakültesi, Coğrafya Bölümü, 06100, Ankara, Türkiye.

²Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, GeoZentrum Nordbayern, 91054, Germany.

Özet

Türkiye’de hava kirliliği, özellikle büyük şehirlerde, nüfus artışı, plansız kentleşme, sanayi ve enerji tesislerindeki artış nedeniyle ciddi bir sorun haline gelmiştir. Partikül Madde (PM₁₀) ve Kükürt Dioksit (SO₂) konsantrasyonları, sanayi ve enerji üretimindeki yüksek emisyonlar sonucu hava kalitesini önemli ölçüde bozmaktadır. Hava kirliliği sorunuyla karşılaşan büyük şehirlerden biri olan Ankara, 2022 Türkiye Çevre Sorunları ve Öncelikleri Değerlendirme Raporu’nda hava kirliliğinin öncelikli sorunlar arasında ikinci sırada yer aldığı belirtilmiştir. Bu çalışmanın amacı, 2011–2014 yılları arasında Ankara’da PM₁₀ ve SO₂ konsantrasyonlarının, meteorolojik faktörlerin etkisi altında mekânsal-zamansal değişimlerini Kriging with External Drift (KED) yöntemi kullanarak incelemektir. 2011 yılında, PM₁₀ ve SO₂ konsantrasyon değerleri, diğer yıllara göre daha düşük seviyelerde olup, Dünya Sağlık Örgütü (World Health Organization, WHO) tarafından belirlenen yıllık konsantrasyon değerlerinin üzerinde kalmıştır. 2012 ve 2013 yıllarında, PM₁₀ ve SO₂ konsantrasyonlarında artış gözlemlenmiş ve şehrin farklı bölgelerinde değişkenlik göstermiştir. 2014 yılında, artan yağış ve sıcaklık değerleri ile birlikte, PM₁₀ ve SO₂ konsantrasyonlarında dikkat çekici bir azalma yaşanmıştır. PM₁₀ ve SO₂ konsantrasyonlarına ait tahmin modellerinin performansı değerlendirildiğinde, PM₁₀ modelinin %66, SO₂ modelinin %78 oranında açıklayıcı güce sahip olduğu görülmektedir. PM₁₀ ve SO₂ konsantrasyonlarının meteorolojik faktörler kullanılarak yapılan mekânsal-zamansal KED analizi, hava kirliliğinin değişimlerini anlamak ve mekânsal değişkenler arasındaki ilişkileri ile zaman içindeki etkileşimleri kavrayabilmek açısından önemlidir.

Anahtar Sözcükler

Hava Kirliliği, Partikül Madde (PM₁₀), Kükürt Dioksit (SO₂), Mekânsal-Zamansal Dağılım, Kriging with External Drift (KED)

Spatial-Temporal Analysis of Particulate Matter (PM₁₀) and Sulphur Dioxide (SO₂) Concentrations in Ankara Using Climate Parameters

Abstract

Air pollution in Turkey has become a significant issue, particularly in large cities, due to population growth, unplanned urbanization, and increases in industrial and energy facilities. Particulate Matter (PM₁₀) and Sulphur Dioxide (SO₂) concentrations significantly deteriorate air quality due to high emissions from industrial and energy production. Ankara, one of the major cities facing air pollution problems, is noted as having air pollution among the top issues in the 2022 Turkey Environmental Issues and Priorities Assessment Report. This study aims to investigate the spatial-temporal changes in PM₁₀ and SO₂ concentrations in Ankara from 2011 to 2014 under the influence of meteorological factors using the Kriging with External Drift (KED) method. In 2011, PM₁₀ and SO₂ concentration levels were lower compared to other years but remained above the annual concentration limits set by the World Health Organization (WHO). In 2012 and 2013, increases in PM₁₀ and SO₂ concentrations were observed, showing variability across different regions of the city. In 2014, a notable decrease in PM₁₀ and SO₂ concentrations was observed, coinciding with increased rainfall and temperature values. When evaluating the performance of the prediction models for PM₁₀ and SO₂ concentrations, it is found that the PM₁₀ model explains 66% and the SO₂ model explains 78% of the variance. The spatial-temporal KED analysis of PM₁₀ and SO₂ concentrations using meteorological factors is crucial for understanding the changes in air pollution and comprehending the relationships between spatial variables and their interactions over time.

Keywords

Air Pollution, Particulate Matter (PM₁₀), Sulphur Dioxide (SO₂), Spatio-Temporal Distribution, Kriging with External Drift (KED)

1. Giriş

Sanayileşme etkisi ve enerji kullanımının yaygınlaşması, hava kirliliği sorunlarının dünya genelinde ciddi bir şekilde ortaya çıkmasına neden olmuştur. Hava kirliliği, günümüzde sadece çevresel bir sorun olarak değil, aynı zamanda sosyal, ekonomik ve ekolojik sistemlerden kaynaklanan bir risk olarak değerlendirilmektedir (Feng vd., 2024).

Bu sebeple, hava kirliliği, kamu, hükümet ve bilim topluluğu için küresel bir endişe kaynağı haline gelmiştir (Fan vd., 2020). Dünya Sağlık Örgütü'ne (World Health Organization, WHO) göre, hava kirliliği her dakika dünya genelinde on üç kişinin yaşamını tehdit etmektedir (World Health Organization, 2021). Bu kritik durum, hava kalitesinin iyileştirilmesi için acil önlemler alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. WHO, 2010 yılında hava kalitesine ilişkin ilk yönergeleri yayımlayarak iç mekân hava kalitesi standartlarının oluşturulmasına yönelik bir adım atmıştır. 2014 yılında, hava kirliliği ile mücadele, Birleşmiş Milletler Çevre Asamblesi'nde (United Nations Environment Assembly, UNEA) bir karar olarak kabul edilmiştir. UNEA'nın 2016 yılında düzenlediği ikinci toplantısında, "Eylem Hava Kalitesi" ve "Pekin'de Hava Kirliliği Kontrol Süreci: 1998–2013" başlıklı iki önemli rapor sunulmuştur. İlk raporda, 1998–2015 dönemi küresel hava kalitesinin değerlendirilmesi ve hava kalitesinin on ölçütünü açıklamıştır. İkinci raporda, Pekin'de 1998–2013 yılları arasında hava kirliliğini kontrol etmek için uygulanan önlemler değerlendirilmiştir. 2017 yılında yapılan üçüncü UNEA toplantısında, hava kirliliği konusuna odaklanılmış ve acil çevresel sağlık sorunlarına küresel bir yanıt çağrısında bulunulmuştur. 2018'de, WHO, UNEA ve diğer ajanslar tarafından düzenlenen Küresel Hava Kirliliği ve Sağlık Konferansı'nda, 2030 yılına kadar hava kirliliğinden kaynaklanan ölümlerin üçte iki oranında azaltılması hedeflenmiştir. 2021 yılında UNEA tarafından yayımlanan "Hava Kirliliği Serisi: Hava Kalitesinin Düzenlenmesi" raporunda ise, 194 ülke ve Avrupa Birliği'nin hava kalitesi yasaları gözden geçirilmiş ve çeşitli yasal ve kurumsal çerçeveler incelenmiştir (Feng vd., 2024). Son birkaç on yılda, hava kalitesini iyileştirme yönünde ilerlemeler kaydedilmiş olsa da hava kirliliği insan sağlığı ve ekonomi üzerinde risk oluşturmaya devam etmektedir (Pinho-Gomes vd., 2023). Hava kirliliği, sadece insanların solunum ve kardiyovasküler gibi çeşitli hastalıklara neden olmakla kalmamış (Tran vd., 2023; Alahmad vd., 2023), aynı zamanda hava durumu ve iklimi de etkileyerek sel ve kuraklık gibi daha ekstrem hava olaylarına da yol açmıştır (Pei & Shiliang, 2016; Cenlin vd., 2024). Bu etkilerin azaltılması için daha kapsamlı stratejilere ve küresel iş birliğine ihtiyaç duyulmaktadır, çünkü hava kirliliğinin neden olduğu sorunlar, sadece bireysel sağlık değil, toplumsal ve çevresel sürdürülebilirlik açısından da büyük tehditler oluşturmaktadır (Feng vd., 2024).

Türkiye, 85 milyon 372 bin 377 kişilik nüfusu ile nüfus büyüklüğüne göre, 194 ülke arasında 18. sırada yer almakta ve dünya toplam nüfusunun %1.1'ini oluşturmaktadır (Türkiye İstatistik Kurumu, 2024a). Artan nüfus, trafik ve sanayinin giderek büyümesi, şehirlerde hava kalitesinin bozulmasına neden olmaktadır. Bu duruma paralel olarak, Türkiye'de hava kirliliği sorunları, özellikle büyük şehirlerde, nüfus artışıyla beraber aşırı ve plansız kentleşme, sanayi tesislerindeki ve enerji tesislerindeki artış, fosil yakıt kullanımındaki artış ile derinleşmektedir. Partikül Madde (PM₁₀) ve Kükürt Dioksit (SO₂) konsantrasyonları, özellikle sanayi ve enerji üretiminden kaynaklanan yüksek emisyonlarla önemli bir hava kirliliği kaynağı oluşturmakta ve hava kalitesini ciddi şekilde etkilemektedir. Türkiye'de, hava kirliliğinin insan sağlığı üzerindeki etkilerini araştıran 15 sağlık, çevre ve iklim örgütünün oluşturduğu Temiz Hava Hakkı Platformu (THHP) tarafından yayımlanan Kara Rapor 2022'ye göre, 2021 yılında Türkiye'de PM_{2.5} seviyeleri, WHO tarafından izin verilen yıllık kütle konsantrasyon değerinin (15 µg/m³) (World Health Organization, 2023) 4 katına çıkmıştır. Özellikle, Kahramanmaraş depreminden (06 Şubat 2023) etkilenen şehirlerde, büyük miktarda enkazın yol açtığı toz ve halkın ısınmak için açık alanda yaktığı ateşler nedeniyle, PM_{2.5} değeri 7.5 kat arttığı gözlemlenmiştir (Temiz Hava Hakkı Platformu, 2023). Ayrıca, bu bölgelerde asbest riskinin varlığı, hava kirliliğinin ciddi bir halk sağlığı sorunu olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Türkiye'de, PM_{2.5} kaynaklı ölüm riski, Hava Kirliliği Yükü–2021 Raporuna göre, trafik kazaları, uyuşturucu kullanımı veya cinayetler gibi diğer risk faktörlerinden çok daha yüksektir (Greenpeace, 2022). 2021 yılında, kirli havayı soluyan ilk beş il sırasıyla Iğdır, Ağrı, Şırnak ve Malatya, PM₁₀ değerleri açısından WHO'nun belirlediği yıllık eşik değerinin (15 µg/m³), 5-8 katına çıkmıştır (Temiz Hava Hakkı Platformu, 2023). Bu durumlar, hava kirliliğinin halk sağlığı üzerindeki ciddi etkilerini ve yerel seviyede belirginleşen sorunları gözler önüne sermektedir. Özellikle, Türkiye'de hava kirliliğinin sorun yarattığı büyük şehirlerden biri olan Ankara, 2022 yılı Türkiye Çevre Sorunları ve Öncelikleri Değerlendirme Raporu'nda hava kirliliğinin öncelikli sorunlar arasında ikinci sırada yer almaktadır (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2022). Bu rapora göre, Ankara'da hava kirliliğini artırıcı etkenler değerlendirildiğinde, iç mekân ısınma, karayolu trafiği, iklim parametreleri ve topografik yapı en temel sebepler arasında gösterilmektedir. Oral vd. (2015) Ankara merkez olmak üzere çevresinde yer alan 12 şehirde yapmış oldukları hava kirliliği dağılım kontrolü ve emisyon envanter dağılımı çalışmalarında, hava kirliliğine katkıda bulunan ana emisyon kaynaklarını tanımlamış ve bunların kirlilik üzerindeki etkilerini değerlendirmişlerdir. Bu çalışma, Ankara'nın iç mekân ısınma, trafik ve sanayi kaynaklı emisyonlar açısından en yüksek oranları verdiğini ortaya koymuştur. Ankara'da hava kirliliği seviyelerinin, şehir içinde çeşitli bölgelerde farklılık gösterdiği (Toros vd., 2018), trafik yoğunluğu, iç mekân ısınma kaynakları ve sanayi bölgeleri gibi faktörlerin kirlilik seviyelerini etkilediği yapılan çalışmalarla değerlendirilmiştir (Genc vd., 2010; Turgut & Temiz, 2015; Toros vd., 2018; Raja vd., 2018). Ayrıca, meteorolojik ve topografik faktörlerin de (Arslan & Dursun, 2024), Ankara'da hava kirliliğini artıran diğer etmenler arasında yer aldığı belirtilmiştir. Ankara'da, hava kirliliği konsantrasyonlarını meteorolojik faktörlerle ilişkilendirerek yapılmış çalışmalar, bu sorunun önemini açıkça göstermektedir (Sahin vd., 2001; Genc vd., 2010; Ulutas vd., 2021; Akbal & Ünlü, 2022). Son yıllarda, Ankara'daki atmosfer kirliliği ve halk sağlığı üzerindeki etkilerini konu alan çalışmalara da önem verilmiştir (Aydın, 2023; Koçak & Balcılar, 2024; Arslan vd., 2024).

Hava kirliliğinin dinamiklerini ortaya koymak ve etkili stratejiler geliştirmek için mekânsal-zamansal analizler önemli bir rol oynamaktadır. Hava kirliliğinin zaman içindeki değişimleri ve farklı mekânlardaki dağılımı, kirliliğin kaynaklarını ve etkilerini daha iyi anlamayı sağlar ve böylece etkili müdahale ve politika önerilerinin oluşturulmasına olanak tanımaktadır.

Literatürde, bu konuya yönelik yapılan çalışmaların sayısında da artış bulunmaktadır (Fan vd., 2020; Butenko & Topchuy, 2023; Rahim & Masseran, 2023; Rusmilli vd., 2023; Rahaman vd., 2024). Ankara’da, Turgut ve Temiz (2015) Sıhhiye istasyonuna ait geçmiş hava kirliliği verilerini (1 Ocak 2010 ile 31 Ekim 2014 tarihleri arasında) kullanarak, Box-Jenkins yöntemiyle gelecekteki PM₁₀ konsantrasyon değerlerinin, zaman içindeki değişimini incelemişlerdir. Ankara’nın en yüksek PM₁₀ değerlerine sahip Sıhhiye bölgesinde, hava kalitesinin iyi seviyelerde olmadığını, gelecekte de aynı şekilde kalacağını tahmin etmişlerdir. Yoğun trafik sorunu, Sıhhiye bölgesindeki hava kirliliğinin en temel nedenlerinden biri olarak gösterilmiştir. Raja vd. (2018) Ankara’da 2015 yılına ait 9 farklı istasyondan elde ettiği PM₁₀ konsantrasyonlarının, mekânsal-zamansal değişkenliğini ve dağılımını, Kriging with External Drift (KED) mekânsal-zamansal analiz yöntemi kullanarak incelemişlerdir. Ölçüm değerleri, kış, ilkbahar, yaz ve sonbahar olmak üzere dört mevsim boyunca 6 saatlik periyotlarla analiz edilmiştir. Çalışma sonuçları değerlendirildiğinde, özellikle kış aylarında, artan iç mekân ısınma faaliyetlerinin, PM₁₀ seviyelerini yükselttiğini belirtmişlerdir. Bunun yanı sıra, şehir merkezinde ve sanayi bölgelerinde daha yüksek PM₁₀ seviyeleri ölçülürken, kırsal bölgelerde bu seviyelerin daha düşük olduğunu belirlemişlerdir. Bozdağ vd. (2020) Ankara’da, 7 istasyondan elde edilen 2009–2017 yıllarına ait PM₁₀ konsantrasyonunu tahmin etmek için makine öğrenme algoritmalarından faydalanmışlardır. Çalışmada, en iyi performans, Yapay Sinir Ağ (ANN) algoritması ile elde edilmiştir. PM₁₀ değerlerinin mekânsal dağılımını, bölgenin arazi kullanım özellikleri (nüfus yoğunluğu, gelir değişimi, doğal gaz kullanımı, ulaşım ve sanayi yoğunluğu) ile birlikte değerlendirmişler ve hava kirliliğinin iyileştirilmesine yönelik mekânsal stratejilerin geliştirilmesine yönelik önerilerde bulunmuşlardır. Akbal ve Ünlü (2022), Ankara’da 2015–2020 yılları arasında günlük PM seviyelerini tahmin etmek ve PM seviyelerini etkileyen ana özellikleri belirlemek için, derin öğrenme yöntemlerini kullanmışlardır. PM seviyelerini etkileyen ana faktörler için geçmiş PM değerleri, diğer hava kirliliği bileşenleri, yüzey sıcaklığı ve rüzgâr hızı gibi önemli değişkenler belirlemişlerdir. Ayrıca, çalışmalarında halk sağlığını korumak amacıyla kullanılabilecek, bir erken uyarı sistemi geliştirmeyi de amaçlamışlardır. Geliştirdikleri modelde, PM₁₀ seviyeleri, WHO standartlarına göre yapılan sınıflandırmada %94 doğruluk oranına ulaşmıştır. Bu durum, modelin erken uyarı sistemleri için etkili bir sınıflandırma sonucu olduğunu göstermektedir. Seçilen ana faktörlerin, PM_{2.5} seviyelerini kontrol etmek ve azaltmak için önemli veri noktalarını olduğunu vurgulamışlardır. Bu çalışmalar, Ankara’daki hava kirliliği araştırmalarını kapsamlı ve bulgularını detaylı bir şekilde sunmakta, farklı yöntem ve yaklaşımlar kullanarak, hava kirliliği dinamiklerini anlamaya yönelik sonuçlar vermektedir.

Bu çalışmanın amacı, 2011–2014 yılları arasında Ankara’da PM₁₀ ve SO₂ konsantrasyonlarının, meteorolojik faktörlerin etkisi altında mekânsal-zamansal değişimlerini KED yöntemi kullanarak araştırmaktır. Çalışma, iki temel araştırma sorusuna odaklanmaktadır: (1) Belirtilen yıllar arasında PM₁₀ ve SO₂ konsantrasyon değerlerinde bir artış gözlemlenmiş midir? (2) Gözlenen bir artış varsa, Ankara şehrinin hangi bölgelerinde yoğunlaşmaktadır? Bu sorulara verilen cevaplar, hava kirliliği eğilimlerini ve yerel etkileri daha iyi anlamak ve etkili hava kalitesi yönetim stratejileri geliştirmek için kritik öneme sahiptir. Ayrıca, çalışmada kullanılan mekânsal-zamansal KED yönteminin, başarılı bir şekilde uygulanabilirliğini göstermeyi hedeflemektedir.

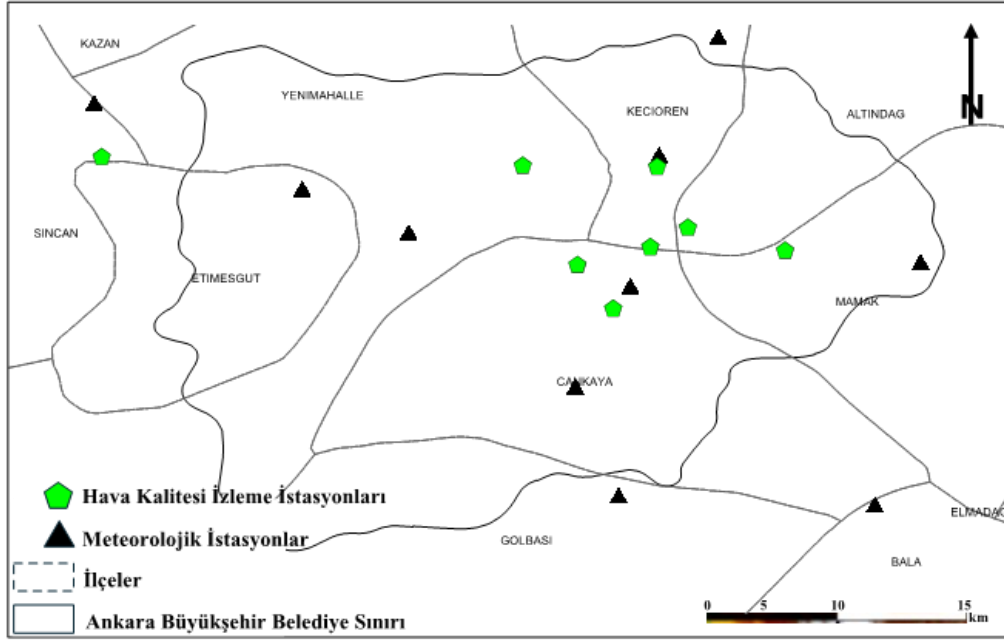
2. Materyal ve Yöntem

2.1. Çalışma Alanı ve Özellikleri

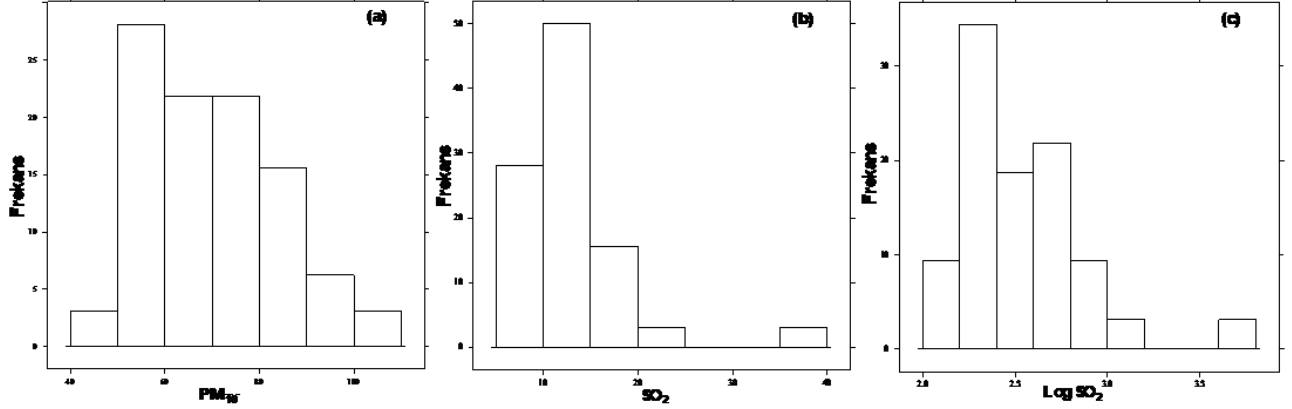
İç Anadolu Bölgesi’nin Yukarı Sakarya Bölümü’nde yer alan Ankara, adını aldığı Ankara Ovası’nın doğu kesiminde konumlanmaktadır. Bu ova, kuzeyde 1200-1500 metre yüksekliğindeki Mire-Karyağı Dağları, güneyde Haymana Platosu’nun devamı olan bir plato alanı, doğu ve güneydoğuda, 1800 metreye kadar yükselen Elmadağ gibi hâkim topografya unsurları ile çevrilidir (Erol, 1968) (Şekil 1). Bu topografik özellikler hem Ankara’nın iklim koşullarını hem de hava kirliliği dinamiklerini doğrudan etkilemektedir. Ankara’nın iklimi, tipik bir kıtasal iklim özellikleri gösterir; kışları nispeten kuru ve soğuk, yazları sıcak ve kuru geçmektedir. 1927–2023 yılları arası, yıllık ortalama toplam sıcaklık 12.0 °C’dir. Ortalama en yüksek sıcaklık, 30.5°C ile ağustos ayına, ortalama en düşük sıcaklık, -3.2 °C ile ocak ayına karşılık gelmektedir (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, t.y.). Aynı yıllar arası, aylık toplam yağış miktarı ortalaması, 392.4 mm’dir (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, t.y.). Özellikle, bahar döneminde sağanak yağışların olduğu görülmektedir. Bu yağışlar, Ankara’da termik etkiler sonucu oluşan, konveksiyonel yağışlar olarak bilinmektedir (Köse vd., 2024). Yaz aylarında, yağışlar az ve genellikle şiddetli yerel konvektif olaylarla ilişkilidir (Sahin vd., 2001). Şehirde güneşlenme süresi oldukça yüksektir. Aralık ve ocak en nemli aylardır; ağustos ise en kuru aydır. Yıl boyunca hâkim rüzgâr yönü, kuzey ve kuzeydoğudan eser; yıllık ortalama rüzgâr hızı, 2.3 m/sn’dir (Sahin vd., 2001; Raja vd., 2018).

Osmanlı İmparatorluğu’nun son dönemlerinde yaklaşık 30.000 kişinin yaşadığı ve günümüzde kentin merkezinde kalan kalenin içi ve çevresine yayılan Ankara, Cumhuriyet döneminde hızlı bir büyüme süreci geçirerek, 4 milyonu aşan nüfusu ile Türkiye’nin ikinci en büyük metropolü haline gelmiştir (Aydın & Özgür, 2009). Günümüzde, 2023 Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi Sonuçlarına göre, 5 milyon 803 bin 482 kişilik bir nüfusa sahiptir (Türkiye İstatistik Kurumu, 2024b). Ankara’daki nüfus artışına neden olan faktörler, il içinden ve başka illerden şehre gerçekleşen göçler (Özgür, 1995), doğal nüfus artış hızının yüksekliği ve kentin yakın çevresindeki kırsal yerleşmelerin ve bazı kasabaların zamanla kent tarafından yutulması (Aydın & Özgür, 2009) olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca, şehir gelişimi ve arazi kullanımı bakımından da büyük bir değişim ve dönüşüm yaşamıştır. Aydın ve Özgür (2009), 2005 yılında toplam yerleşim alanlarındaki değişimi, 1942 yılına kıyasla, 20 kat artış göstermiş olduğunu bulmuşlardır.

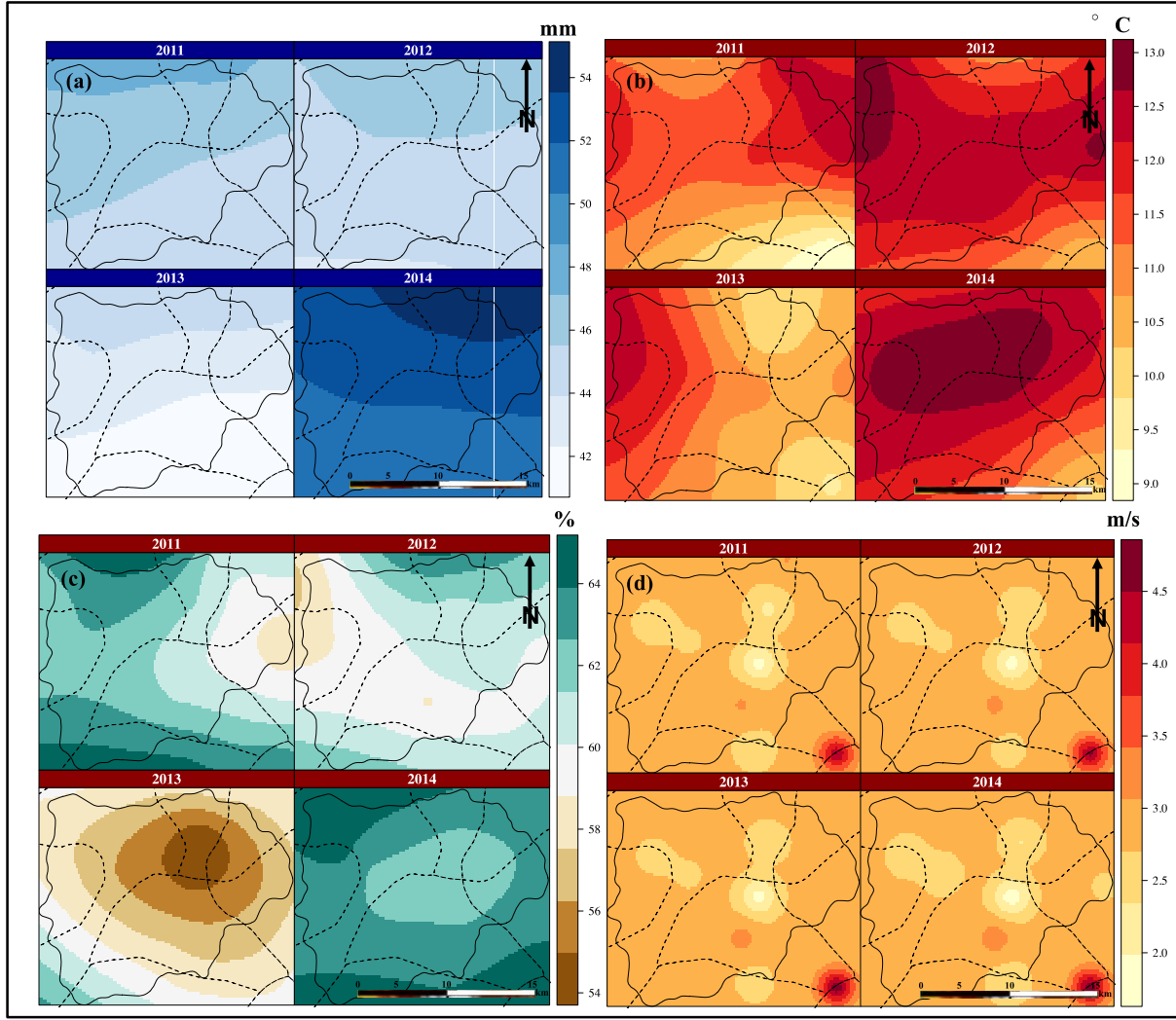
Yıllık ortalama sıcaklık değerleri 2014 yılında şehrin orta kesim ve çevresinde, 13 °C ile en yüksek seviyelere ulaşmıştır. 2013 yılında, şehrin batı bölümünde 11.5-12.5 °C değerlerinde değişiklikler bulunmaktadır. Yıllık ortalama nem oranı, farklı yıllarda değişen değer aralıklarıyla izlenmiştir; en kuru yıl 2013, en nemli yıl ise 2014 olmuştur. Yıllık ortalama rüzgâr hızı değeri, tüm yıllar için şehir genelinde benzer dağılım göstermiştir.



Şekil 2: Çalışma alanında, hava kalitesi izleme istasyonları ve meteoroloji istasyonlarının dağılımını gösteren harita



Şekil 3: a) PM_{10} konsantrasyonuna ait histogram grafiği, b) SO_2 konsantrasyonuna ait histogram grafiği, c) SO_2 konsantrasyonu, logaritmik dönüşüm uygulandıktan sonraki histogram grafiği



Şekil 4: (a) 2011–2014 yıllık ortalama yağış (mm) dağılışı; (b) 2011–2014 yıllık ortalama sıcaklık (°C) dağılışı; (c) 2011–2014 yıllık ortalama nem (%) dağılışı; (d) 2011–2014 yıllık ortalama rüzgâr hızı (m/s) dağılışı

2.3. Mekânsal-Zamansal Kriging with External Drift (KED) Analizi

Jeoistatistik, belirli bir coğrafi alanda yer alan ve belirli bir mekânsal düzen gösteren verilerin analizi, tahmini ve modellemesi işlemlerini gerçekleştiren mekânsal veri analizi yöntemleridir. Geoistatistiğin temel bileşenlerini, yarıvariogram ve Kriging analizleri oluşturmaktadır (Isaaks & Srivastava, 1989). Yarıvariogram, veriler arasındaki mekânsal ilişkileri ölçer ve varyansın mesafeye bağlı olarak nasıl değiştiğini gösterir. Kriging analizi, bilinen veri noktalarından yola çıkarak, bilinmeyen bölgelerdeki değerleri tahmin etmektir ve temeli bölgesel değişkenler teorisine dayanmaktadır. Kriging yönteminin temel eşitliği,

$$\hat{Z}(X_0) = \sum_{i=1}^N W_i Z(X_i) \quad (1)$$

şeklinde verilmektedir. $\hat{Z}(X_0)$, X_0 noktasına ilişkin Kriging değerini; $Z(X_i)$ değişkenlerin her bir X_i noktasında gözlenen değerleri; W_i , her bir $Z(X_i)$ 'ye karşılık gelen değerlerini; N , $\hat{Z}(X_0)$ 'ın Kriging tahmininde kullanılacak nokta sayısını ifade etmektedir. Kriging varyansı, bir mekânsal tahmin yönteminde, tahmin edilen değerlerin ne kadar güvenilir olduğunu gösteren bir ölçümdür. Tahminin belirsizliğini veya hata payını gösterir. Kriging varyans eşitliği,

$$\sigma_K^2 = 2 \sum_{i=1}^N W_i \gamma(X_0 - X_i) - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W_i W_j \gamma(X_i - X_j) \quad (2)$$

$$= \sum_{i=1}^N W_i \gamma(X_0 - X_i) + \lambda \quad (3)$$

şeklinde ifade edilir (Lichtenstern, 2013). Yüksek varyans değeri, tahminin belirsiz olduğunu, düşük varyans değeri, tahminin güvenilir olduğunu göstermektedir. Jeostatistik analiz yöntemlerine ait ayrıntılı açıklamalar, Aydın ve Çiçek (2015) ve Raja ve Aydın (2017) çalışmalarında verilmiştir.

Kriging yöntemleri (Ordinary Kriging (OK), Simple Kriging (SK), Universal Kriging (UK), Block Kriging (BK), Indicator Kriging (IK), Regression-Kriging (RK), Co-Kriging, KED vb. gibi) çalışmaya ve verilerin yapısına uygun olarak seçilir. Yardımcı değişkenler kullanılarak mekânsal-zamansal tahminler, RK, Co-Kriging veya KED yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilir. RK yöntemi, yardımcı değişkenler kullanarak regresyon analizi yapar ve bu regresyon modelinden elde edilen tahmin hatalarını SK yöntemi ile değerlendirir. SK, bu hataları kullanarak, genellikle sıfır olarak kabul edilen bilinen bir ortalama etrafında tahminler gerçekleştirir (Hengl vd., 2007). Co-Kriging, yardımcı değişkenin tüm grid noktalarında mevcut olmasını gerektirmediği için veri eksikliklerinin bulunduğu durumlarda daha esnek bir yaklaşım sunar. Bu yöntemde, bağımsız değişken ve yardımcı değişkenler için ayrı yarıvariogramlar hesaplanır ve bu değişkenler arasındaki ilişkileri modellemek için çapraz yarıvariogramlar kullanılır (Türkoğlu vd., 2016). Bu, çeşitli veri ilişkilerini modelleme yeteneği sağlar ancak daha karmaşık bir modelleme süreci gerektirir. Ayrıca, Co-Kriging tahminleri doğrudan yardımcı değişkene bağlıdır (Delbari vd., 2013). Hedef değişken ile yardımcı değişkenler arasındaki karmaşık ve doğrusal olmayan bağımlılıkları yeterince iyi yakalayamayabilir, bu da yanlış tahminlere yol açabilir (Beauchamp & Bessagnet, 2023). Buna karşılık, KED yöntemi, yardımcı değişkenin tüm grid noktalarında mevcut olmasını zorunlu kılar ve tek bir yarıvariogram kullanarak modellemeyi daha basit ve doğrudan hale getirir (Adhikary vd., 2017). KED yönteminde, yardımcı değişken yalnızca eğilim bilgisini sağlar (Delbari vd., 2013), bu da tahmin sonuçlarının doğruluğunu artırabilir. KED, belirgin bir trend olduğunda daha iyi tahmin sonuçları sunar ve veri eksikliklerine karşı daha yüksek hassasiyete sahiptir. KED ve RK yöntemleri, uygulanan hesaplama adımları bakımından farklılık gösterir. Ancak, aynı veri noktaları, yardımcı değişkenler, regresyon fonksiyonu ve regresyon uyum yöntemi kullanıldığında, her iki yöntem de aynı tahmin sonuçlarını ve tahmin varyanslarını vermektedir (Hengl vd., 2007). Çalışmalarda, özellikle hava kirlenici konsantrasyonlarını tahmin etmede KED yöntemi, üstün performans göstermiş, doğruluğu arttırmış ve hataları azaltmıştır (Pearce vd., 2009; Liang vd., 2017; Ramos vd., 2016; İdir vd., 2021). Bu sebeple, çalışmada mekânsal-zamansal KED yöntemi kullanılmıştır. Mekânsal-zamansal KED yöntemi, tahmin edilmek istenen değişken ile ilişkili olduğu düşünülen faktörleri kullanarak mekânsal-zamansal tahminlerde bulunmaktadır. Bu faktörler, daha hassas ve doğru tahminlerin yapılmasına olanak sağlar. KED yönteminin mekânsal-zamansal tahminlerdeki etkinliğini artırmak için mekânsal-zamansal yarıvariogramların kullanımı kritik bir rol oynamaktadır. Mekânsal-zamansal yarıvariogramlar, mekân ve zaman olmak üzere iki boyutta gösterilmektedir. Analizlerde, adım mesafesi (lag distance), eşik değeri veya tepe varyans (sill), zaman adım mesafesi (time lag distance) gibi belirli parametreler her bir model için ayrı ayrı belirlenmektedir. Bu parametrelerden, adım mesafesi, iki veri noktası arasındaki zaman farkını vermektedir. Mekânsal fonksiyon ile zamansal fonksiyonun birleştirilmesiyle kovaryans fonksiyonu elde edilmektedir. Böylece, mekânsal-zamansal modellemede değişkeni temsil eden 3D bir yarıvariogram oluşturularak, değişkenin hem mekânsal hem de zamansal davranışı incelenmektedir.

2011–2014 yılları arası PM₁₀ ve SO₂ konsantrasyonlarının mekânsal-zamansal değişimlerini modellemede, aynı dönem aralığı için yağış (mm), sıcaklık (°C), nem (%) ve rüzgâr hızı (m/s) gibi meteorolojik veriler, çalışmada yardımcı değişken olarak seçilmiştir. Goovaerts (1997), KED yöntemi kullanarak tahminler yapılırken, (i) Hedef değişken ile tahmin ediciler arasındaki ilişkinin doğrusal olması; (ii) Tahmin edicilerin değerleri, tüm birincil veri konumlarında X_i ve tahminlerin yapılacağı tüm yeni konumlarda X_0 değerlerinin biliniyor olması; (iii) İkincil değişkenin, KED'in değişkenliğini göz ardı etmek için, mekânda stabil bir şekilde değişmesi gibi temel şartların sağlanması gerektiğini belirtmiştir.

Mekânsal-zamansal KED analizde, $Z_{KED}(s_0, t_0)$, (s_0, t_0) noktasındaki hedef değişkenin tahmin edilen değerini temsil etmektedir. Yöntem, gözlemlenen veri noktalarını $Z(s_i, t_j)$ (burada $i = 1, \dots, n$ ve $j = 1, \dots, m$) kullanarak, lineer bir kombinasyon hesaplaması yapmaktadır. Mekânsal-zamansal KED formülü,

$$Z_{KED}(s_0, t_0) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \lambda_{ij} Z(s_i, t_j), \quad (4)$$

$$= Z^T \Lambda, \quad (5)$$

şeklinde verilmektedir. Bu eşitlikte, $Z = [(s_1, t_1), \dots, Z(s_n, t_m)]^T$, hedef değişken için gözlemlenen veriyi temsil etmektedir. $\Lambda = [\lambda_{11}, \dots, \lambda_{nm}]^T$, KED ağırlık vektörünü ifade eder. Optimal ağırlık vektörü tahmin hatası varyansını minimize etmek için, Lagrange çarpanları yöntemini kullanır ve bu süreçte tarafsızlık kısıtlamasını sağlar.

Bu yaklaşım, KED tahmincisi ile $Z(s, t) = \mu(s, t) + \varepsilon(s, t)$ eşitliğinde verilen Z hedef değişken formuna dayanmaktadır (Kongsanun vd., 2024). Bu eşitlikte, $\mu(s, t)$ mekânsal ve zamansal eğilimleri, $\varepsilon(s, t)$ tahmin edilen değişkenin sapmalarını temsil etmektedir. Mekânsal-zamansal KED yöntemi için,

$$\left[\frac{\Omega}{F^T} - \frac{F}{0_{L+1}} - \left[\frac{\Lambda}{N} \right] \right] = \left[\frac{\Omega_0}{F_0} \right] \quad (6)$$

eşitliği tanımlanmaktadır. Formülde, 0_{L+1} , $(L + 1) \times (L + 1)$ sıfır matrisini temsil eder. $N = [n_0, \dots, n_L]^T$, Lagrange çarpanlarının vektörüdür.

$$F = \begin{bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_m \end{bmatrix} \text{ ve} \quad (7)$$

F_j matrisi şu şekilde verilmiştir.

$$F_j = \begin{bmatrix} f_0(X(s_1, t_j)) & \cdots & f_L(X(s_1, t_j)) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_0(X(s_n, t_j)) & \cdots & f_L(X(s_n, t_j)) \end{bmatrix} \quad (8)$$

Burada $j = 1, \dots, m$ aralığındadır. Mekânsal-zamansal KED ağırlıklarının her gözlemlenmemiş veri noktası için yeniden hesaplanması gerekmektedir. Bu zorluğu aşmak için tüm gözlemlenmemiş noktalar için tek bir ağırlık matrisinin kullanılması önerilmektedir (Kongsanun vd., 2024). KED yöntemi, mekânsal-zamansal tahminlerde sıklıkla kullanılan güçlü bir yöntemdir, ancak bazı sınırları ve hata kaynakları bulunmaktadır. KED, hedef değişken ile yardımcı değişkenler arasında doğrusal bir ilişki varsayar. Ancak, gerçek dünyada bu doğrusal ilişki her zaman geçerli olmayabilir ve bu durum modelin doğruluğunu etkileyebilir. Ayrıca, gözlemlenen verilerin eksik, hatalı veya düşük kaliteli olması tahminlerin doğruluğunu azaltabilir. Model performansının olumsuz etkilenmemesi için yardımcı değişkenlerin mekânda stabil bir şekilde değişmesi beklenmektedir. Zamansal değişkenlik özellikle uzun süreli veya mevsimsel değişkenlik, model tahminlerinde hata kaynakları oluşturabilmektedir. Veri setinde mevcut aykırı değerler, model tahminlerini bozabilir. Bu sınırlamaları ve hata kaynakları göz önünde bulundurarak gerekli düzeltme ve iyileştirmeler yapıldığında, KED, etkili bir şekilde uygulanmakta ve doğru sonuçlar vermektedir.

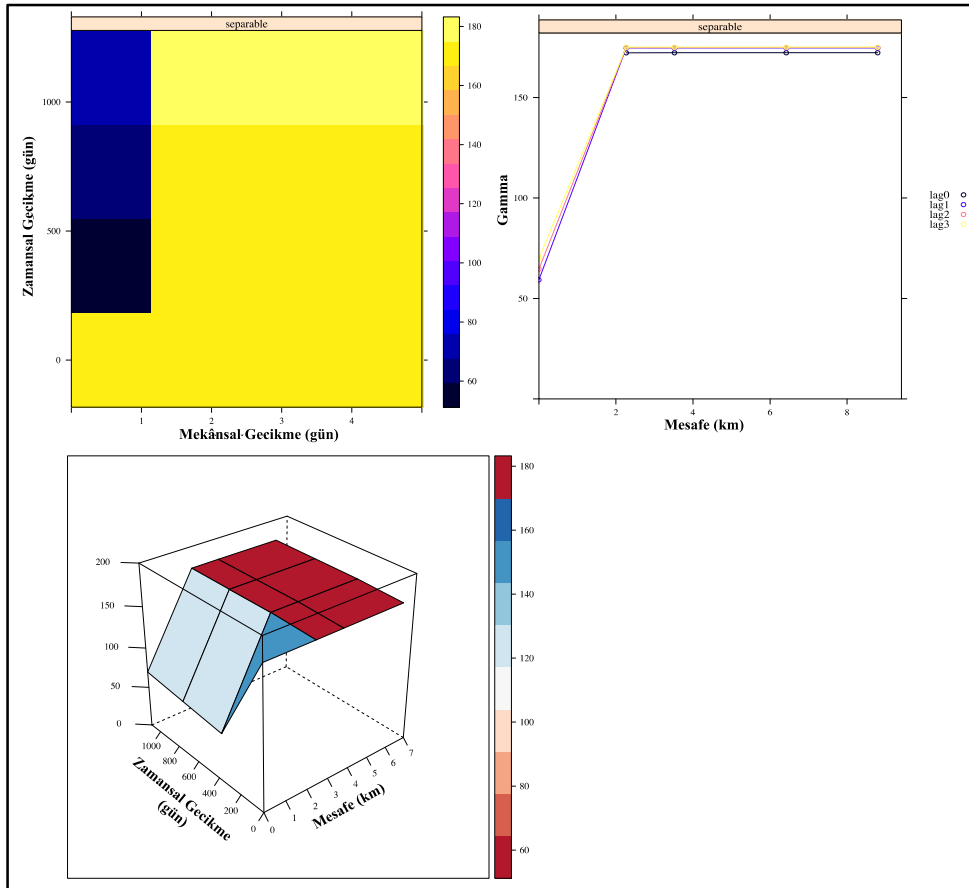
2.4. Performans Analizi

Coğrafi modelin doğruluğunu test etmek ve performansını değerlendirmek önemlidir. Bu amaçla, PM₁₀ ve SO₂ konsantrasyonlarına ait tahmin modellerinin doğruluk testleri, Çapraz Geçerlilik (One Leave Out) yöntemi kullanılarak değerlendirilmektedir. Çapraz Geçerlilik (One Leave Out) yöntemi, veri setindeki mevcut bilgileri kullanarak, tahmin edilen ve gerçek değerler arasındaki ilişkiyi ölçmektir (Isaaks & Srivastava, 1989). Yöntem, bir lokasyondaki değer, veri setinden geçici olarak çıkartılır ve geriye kalan diğer değerler kullanılarak çıkartılan bu lokasyon için tahmin yapılması mantığı ile çalışmaktadır (One Leave Out) (Aydin & Çiçek, 2015). Bu işlem aynı şekilde geride kalan tüm örnekler için tekrarlanır (Isaaks & Srivastava, 1989). Gözlemlenen ve tahmin edilen değerler arasındaki fark, hata olarak kaydedilir. Ayrıca, oluşturulan tahmin haritalarının değerlendirilmesinde, çeşitli performans ölçümlerinden yararlanılmaktadır. Bu çalışmada, PM₁₀ ve SO₂ konsantrasyonlarına ait tahmin modellerinin performans sonuçları, Belirleyicilik Katsayısı (Coefficient of Determination, R²), Kök Ortalama Kare Hata (Root Mean Square Error, RMSE), Ortalama Hata (Mean Error, ME) ve Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error, MAE) ölçümleri kullanılarak değerlendirilmiştir.

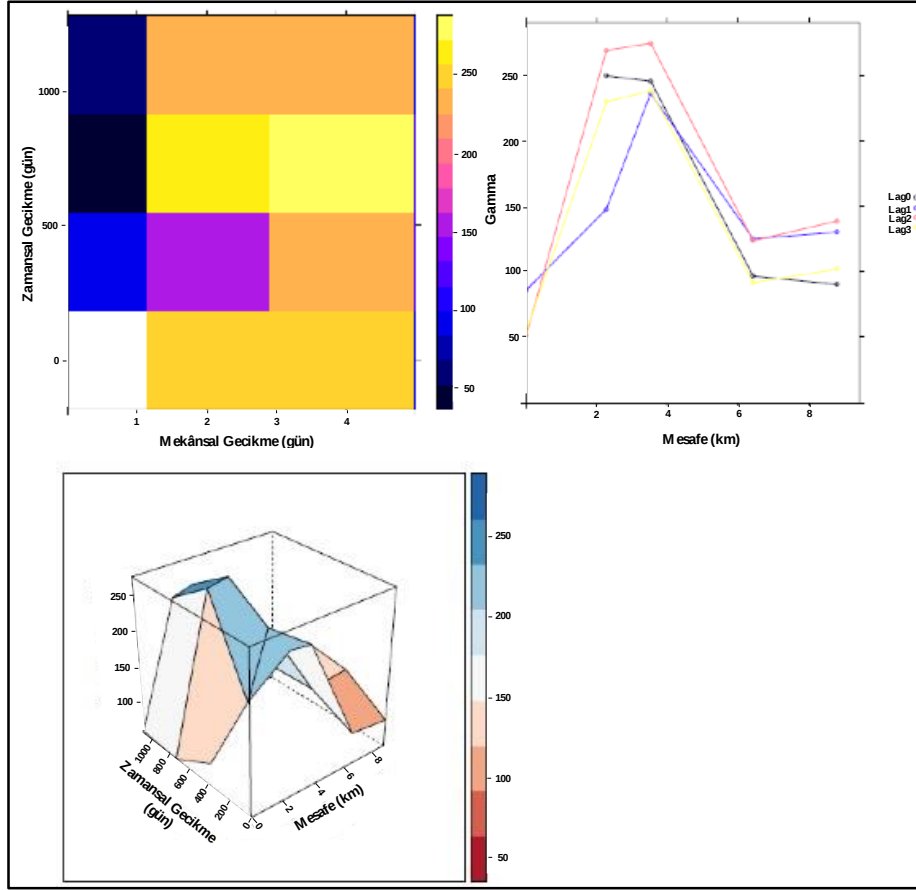
3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada, PM₁₀ ve SO₂ konsantrasyonlarının mekânsal-zamansal dağılımlarını daha iyi anlamak amacıyla, mekânsal-zamansal tahmin analizlerinde farklı yarıvariogram modelleri uygulanmıştır. PM₁₀ konsantrasyonunun mekânsal yarıvariogram grafiği Şekil 5'te verilmiştir. KED yöntemi, seçilen mekânsal-zamansal yarıvariogramların modeline bağlıdır. Yanlış model seçimi, tahminlerin doğruluğunu düşürebilir. Bu sebeple, incelenen değişkeni temsil edebilecek en iyi tahmin modeli elde edilene kadar değişik aralıklarda işlem gerçekleştirilmiştir. Adım mesafesi 2 km, eşik değeri veya tepe varyans değeri 180 ve uygulanan model "Spherical" olarak belirlenmiştir. Şekil 6, PM₁₀ konsantrasyonunun zamansal yarıvariogram grafiğini vermektedir. İncelenen değişkeni temsil edebilecek en iyi tahmin modeli elde edilene kadar değişik zaman aralıklarında işlem uygulanmış, zaman adım mesafesi 600 gün (yaklaşık 2 yıl), eşik değeri 180 ve kullanılan model "Exponential" olarak tayin edilmiştir.

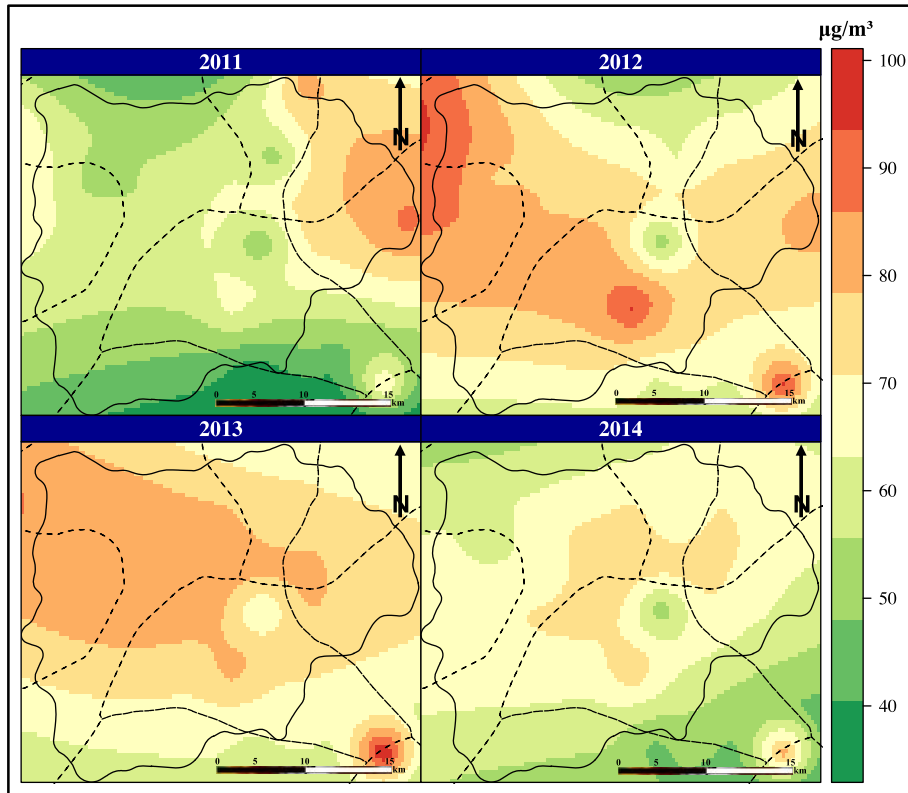
Yarıvარიogram analizinden elde edilen bağımlılık kuralına göre, çalışma alanındaki PM_{10} konsantrasyonu için örneklenmemiş konumlarda değişken tahminleri için, “*Separable with joint sill*” modeli kullanılmıştır. 2011–2014 yılları arası yıllık ortalama PM_{10} konsantrasyonuna ait mekânsal-zamansal tahmin modeli Şekil 7’de verilmektedir. 2011 yılı için PM_{10} değeri, WHO tarafından izin verilen yıllık ortalama konsantrasyon değeri ($15 \mu g/m^3$) (World Health Organization, 2023) göz önünde bulundurulduğunda, eşik değerinin üzerinde ve şehir genelinde $40-60 \mu g/m^3$ ’lük bir dağılım göstermektedir. 2012 yılı için, özellikle Çankaya ve Sincan ilçelerinin bulunduğu bölgelerde, yıllık ortalama konsantrasyon değerlerinin limitleri aştığı gözlemlenmiştir. 2013 yılı için, şehirde PM_{10} konsantrasyon değerleri genel olarak $70-80 \mu g/m^3$ civarlarındadır. 2014 yılına ait PM_{10} konsantrasyon değerleri incelendiğinde, limit değerlerinde bir azalma olduğu görülmektedir. Şehir merkezinde $70 \mu g/m^3$ civarında gözlenen değer, şehir merkezi çevresinde $60 \mu g/m^3$, şehrin güney ve kuzeybatı bölgelerinde $50 \mu g/m^3$ değerine düşmüştür. Şekil 8 ve 9, SO_2 konsantrasyonunun mekânsal-zamansal yarıvარიogram grafiklerini göstermektedir. Mekânsal yarıvარიogram grafiğine göre, adım mesafesi 2 km, eşik değeri 180 ve uygulanan model “*Spherical*”; zamansal yarıvარიogram grafiğinde ise, zaman adım mesafesi 400 gün (yaklaşık 1 yıl), eşik değeri 35 ve model “*Exponential*” olarak belirlenmiştir. Yarıvარიogram analizinden elde edilen bağımlılık kuralına göre, çalışma alanındaki SO_2 konsantrasyonu için örneklenmemiş konumlarda değişken tahminleri için, “*Separable with joint sill*” modeli uygulanmıştır. Şekil 10, 2011–2014 yılları arası yıllık ortalama SO_2 konsantrasyonuna ait mekânsal-zamansal tahmin modelini vermektedir. 2011 yılında SO_2 değerleri, WHO tarafından izin verilen konsantrasyon değeri ($40 \mu g/m^3$) (World Health Organization, 2023) dikkate alındığında, şehrin güney ve kuzeydoğu bölgelerinde bu limitin altında kalırken, şehrin orta ve kuzey bölgelerinde limit değere yakın değerlere ulaştığı gözlemlenmektedir. 2012 yılı için, özellikle Çankaya ve Sincan ilçelerin bulunduğu bölgelerde, eşik değerlerin oldukça üzerinde konsantrasyon değerleri gözlemlenmiştir. Şehrin kuzey bölümünde, konsantrasyonlar $60-70 \mu g/m^3$ arasında ölçülmüştür. 2013 ve 2014 yılları neredeyse şehrin tamamı için $60-80 \mu g/m^3$ arasında değişen konsantrasyon değerleri dikkat çekicidir.



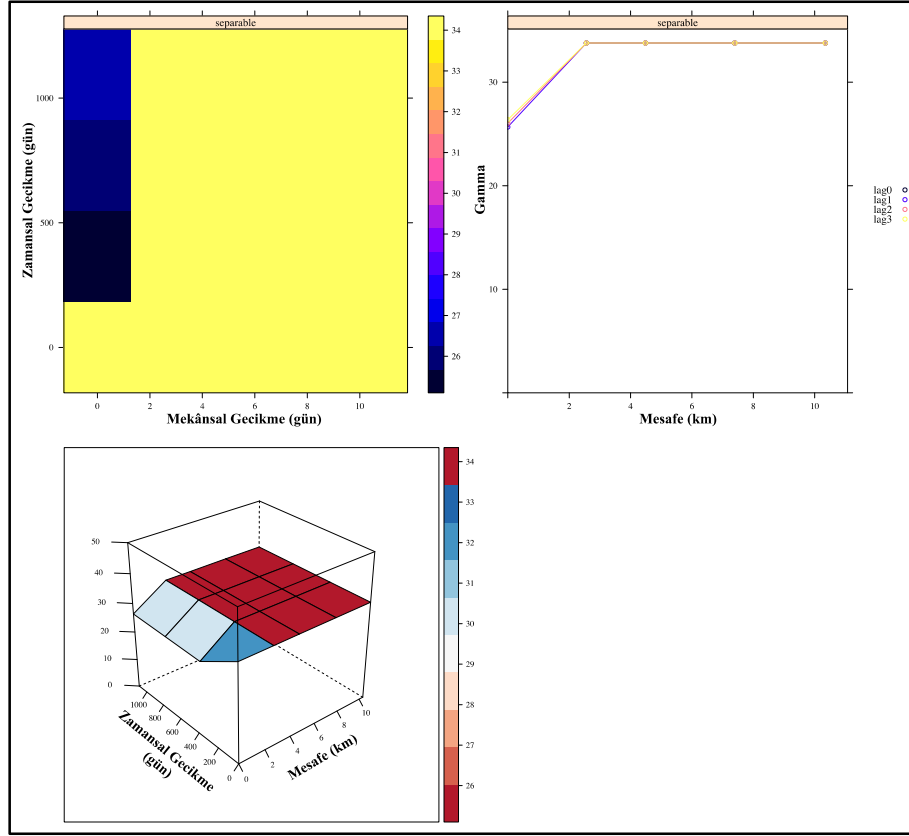
Şekil 5: PM_{10} konsantrasyonuna ait mekânsal yarıvარიogram grafiği



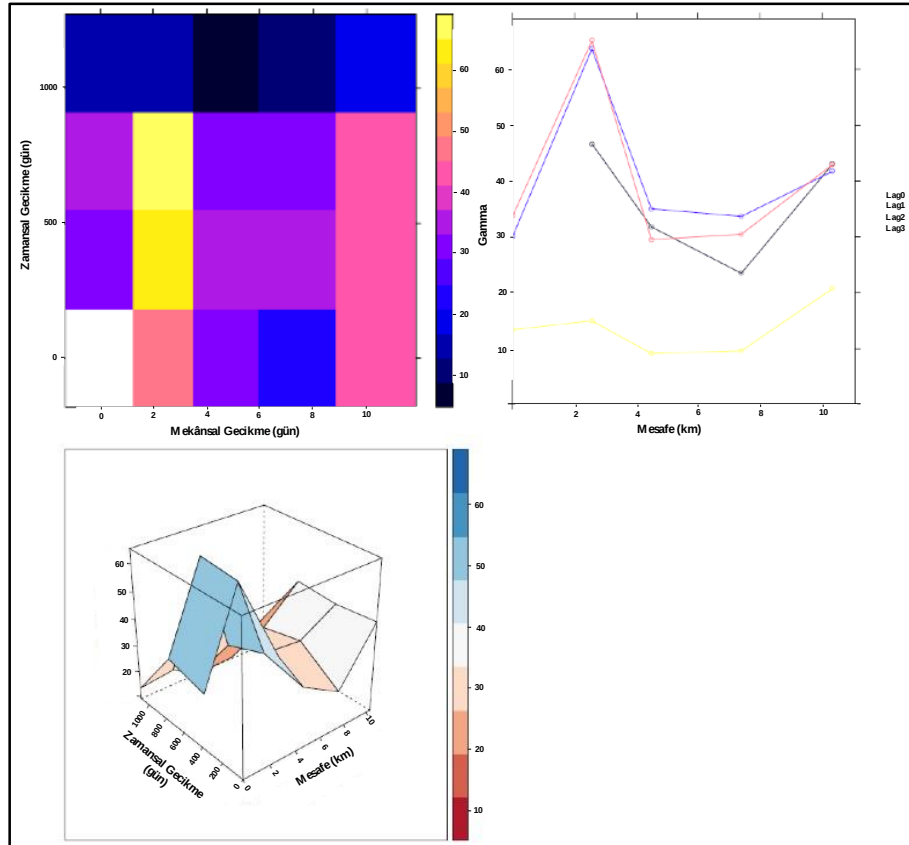
Şekil 6: PM_{10} konsantrasyonuna ait zamansal yarıvariogram grafiği



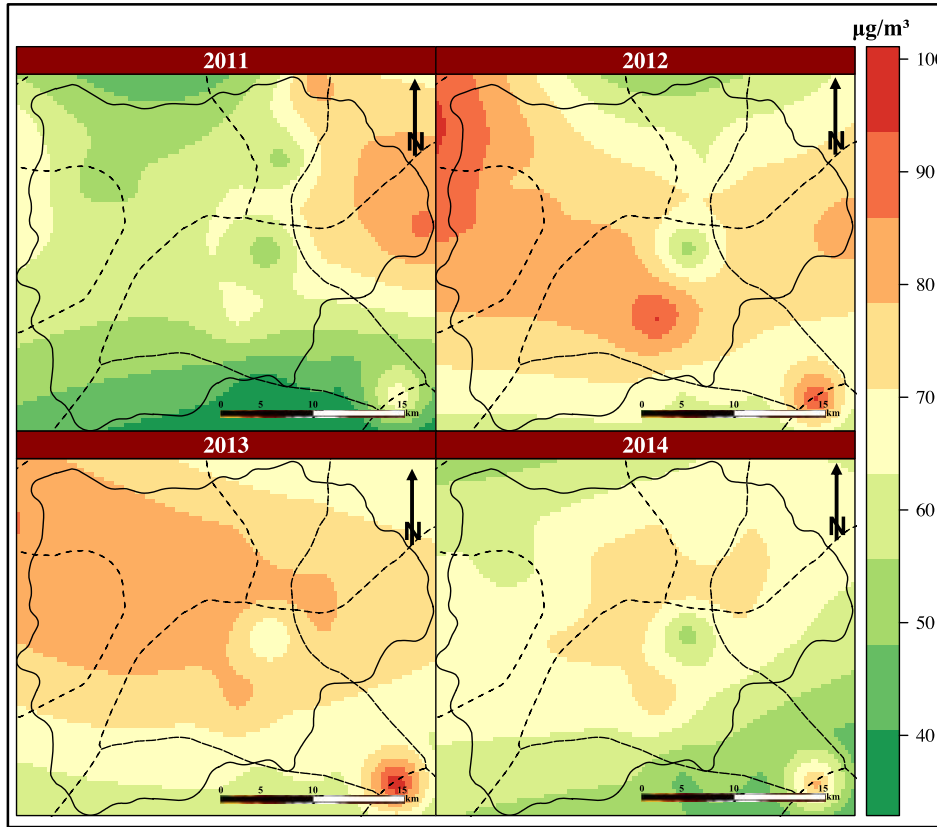
Şekil 7: 2011–2014 yılları arası yıllık ortalama PM_{10} konsantrasyonuna ait mekânsal-zamansal tahmin modeli



Şekil 8: SO_2 konsantrasyonuna ait mekânsal yarivariogram grafiği



Şekil 9: SO_2 konsantrasyonuna ait zamansal yarivariogram grafiği



Şekil 10: 2011–2014 yılları arası yıllık ortalama SO₂ konsantrasyonuna ait mekânsal-zamansal tahmin modeli

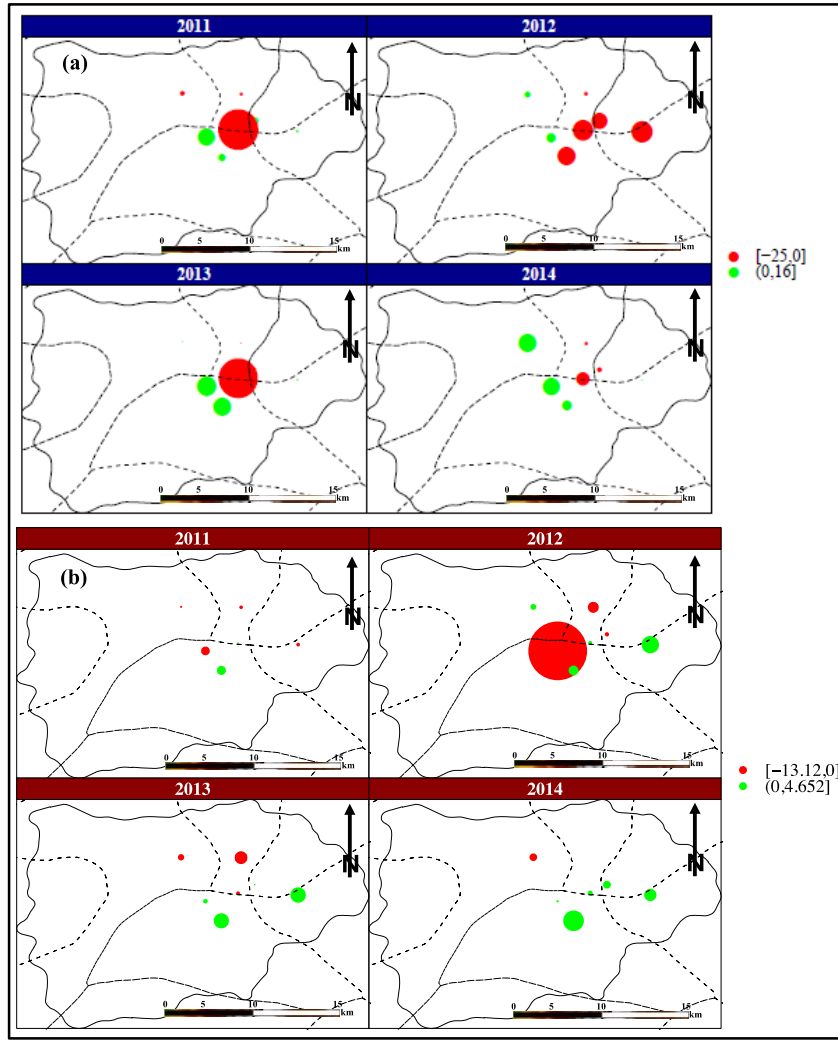
PM₁₀ ve SO₂ konsantrasyonuna ait mekânsal-zamansal tahmin modelleri, çalışmada kullanılan meteorolojik faktörler göz önünde bulundurularak değerlendirildiğinde, 2011 yılı yıllık ortalama yağış (44-48 mm), sıcaklık (10.5-11.5 °C) ve nem (58-64 %) değerleri diğer yıllara göre, şehir genelinde nispeten düşük değerlerde izlenmektedir (Şekil 4a). 2012 yılı için yağış 44-46 mm ile benzer sonuçlar verirken, sıcaklık şehrin merkez bölgelerinde 12.5 °C'den, kenar bölgelerine doğru 11.5 °C'ye kadar düşmüştür. Nem oranı, şehrin merkez bölgelerinde, %60 oranında gözlemlenirken, kuzeye doğru gittikçe nem oranında bir artış olmaktadır (Şekil 4b). 2013 yılı yıllık ortalama yağış değerleri, 2011 ve 2012 yılları ile karşılaştırıldığında 42-46 mm değeri ile daha düşük seviyelerde olduğu gözlemlenmektedir. Sıcaklık değerleri, şehrin batı ve kuzeybatı bölgeleri için 12.5 °C ile yüksek sıcaklık gösterirken, şehrin doğusuna doğru kademeli olarak azalarak, 10.5 °C'ye düşmüştür. Şehrin batı, güney ve kuzeybatı bölgeleri %56-60 nem oranıyla kademeli bir geçiş göstermiştir. Şehrin orta ve kuzey bölgeleri en düşük nem oranına sahiptir (Şekil 4c). 2014 yılı, yıllık ortalama yağış (48-54 mm), sıcaklık (13-11.5 °C), nem (% 62-64) değerlerine sahiptir (Şekil 4d). Şehir genelinde tüm yıllar için rüzgâr hızı yaklaşık 3 m/s'dir (Şekil 4a, b, c, d). Rüzgâr hızının neden olduğu durgun hava koşulları, kirleticilerin yayılmasını engelleyerek birikmelerine ve hava kalitesi sorunlarının ortaya çıkmasını sağlamaktadır (Yan vd., 2024). Bu durum, özellikle düşük rüzgâr hızına sahip bölgelerde, trafik, sanayi kaynaklı, iç mekân ısınma ve inşaat faaliyetlerinin, PM₁₀ ve SO₂ konsantrasyon değerlerinde artışa neden olabileceğini düşündürmektedir. Çalışmada kullanılan meteorolojik faktörler altında, PM₁₀ ve SO₂ konsantrasyon değerleri incelendiğinde, dikkat çekici bazı özellikler söz konusudur. 2011 yılı için, PM₁₀ konsantrasyon değerleri limit değerinin üzerinde çıkmış olmasına rağmen, diğer yıllarla karşılaştırıldığında, yaklaşık 30 µg/m³ kadar sınır değerinin altında bir değer göstermektedir. Ayrıca, SO₂ konsantrasyon değeri, aynı yılda şehrin orta ve kuzey bölgeleri dışında kalan alanlarda, limit değerine yakın gözlemlenmektedir. Yağış değerlerinin yıllık ortalama 2 mm kadar düştüğü, sıcaklık değerlerinin 1 °C arttığı 2012 yılında, şehrin orta, batı ve kuzeybatı bölgelerinde PM₁₀ konsantrasyon değerleri, sınır değeri yaklaşık 65 µg/m³ kadar aşmıştır. Aynı yılda, SO₂ konsantrasyon değerleri sınır değerlerin üzerinde çıkmıştır. PM₁₀ ve SO₂ konsantrasyon değerlerinin yüksek gözlemlendiği bölgeler, yağışın düştüğü, sıcaklığın yükseldiği, nem oranının % 60'a denk geldiği alanlara karşılık gelmektedir. Azalan yağış miktarları, kirleticilerin yıkanarak temizlenme sürecini engellemiş ve kirleticilerin atmosferde birikmesine, artan sıcaklıklar, havanın karışmasını etkileyerek kirleticilerin yoğunlaşmasını artırmış olabilmektedir. Sıcaklık yükseldiğinde, buharlaşma artarak nem oranını da yükseltir (Shaman & Kohn, 2009). Nem oranının %60 seviyelerinde kalması, partiküllerin havada asılı kalmasına ve havadaki su buharının kirleticilerle etkileşimine bağlı olarak PM₁₀ ve SO₂ konsantrasyon değerlerinin yükselmesiyle ilişkili olabileceği düşünülebilir. 2013 yılında PM₁₀ ve SO₂ konsantrasyon değerleri genel olarak 70-80 µg/m³ civarlarındadır. Şehirde yağış (mm), sıcaklık (°C) ve nem (%) değerlerinin düştüğü alanlarda, PM₁₀'un konsantrasyon değerleri yaklaşık 70 µg/m³'e karşılık gelmektedir.

Bu değer, sınır değerinin üzerinde gözlenmesine rağmen, sıcaklığın ve nem oranının yüksek olduğu şehrin orta, batı ve kuzeybatı bölgelerinde gözlemlenen PM_{10} ve SO_2 konsantrasyon değerlerinden $10 \mu g/m^3$ kadar aşağıda kalmaktadır. Bu durum, trafik yoğunluğunun, şehrin bu bölgelerinde daha yoğun olmasıyla açıklanabilir. 2014 yılı, diğer yıllara kıyasla, yıllık ortalama yağış (mm), sıcaklık ($^{\circ}C$), nem (%) değerlerinde yükselmenin, buna karşın, PM_{10} ve SO_2 konsantrasyon değerlerinde azalmanın görüldüğü bir yıl olmuştur. PM_{10} ve SO_2 konsantrasyon değerlerinin $>70 \mu g/m^3$ görüldüğü bölgeler, yoğun sanayi kullanımına karşılık gelen alanları oluşturmaktadır. Bozdağ vd. (2020)'de farklı algoritmalar kullanılarak gerçekleştirdikleri mekânsal dağılım tahmin haritalarında, PM_{10} konsantrasyonunu aynı bölgelerde yoğun olarak izlemişler ve bu bölgelerin sanayi faaliyetleri alanlarına karşılık geldiğini belirtmişlerdir. PM_{10} ve SO_2 konsantrasyon değerlerinin $>60 \mu g/m^3$ görüldüğü bölgeler, şehrin kuzeybatı ve neredeyse merkez ve çevresine karşılık gelen alanları göstermektedir. Özellikle, şehrin kuzeybatı bölümü, sanayi kullanımı etkisi söz konusu olan bir alan olsa da, kentleşmenin oldukça düşük olduğu bir bölgedir (Bozdağ vd., 2020). Ayrıca, sanayi kullanımının hava kirliliği üzerindeki etkisi, yoğun yerleşim alanlarının varlığında daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Bu durum, sanayi faaliyetlerinin etkilerinin, yerel hava kalitesi üzerindeki etkisinin kentleşme ile doğrudan ilişkili olarak daha belirgin hale gelebileceğini göstermektedir. 2014 yılında gözlemlenen yıllık ortalama yağış miktarındaki artış, havadaki kirleticileri temizleyerek, PM_{10} ve SO_2 'nin atmosferden uzaklaşmasına ve bu kirleticilerin konsantrasyonlarının azalmasına katkı sağlamış olabilir. Genc vd. (2010), şehirdeki birçok yerleşim yerinin doğalgaz ile ısıtılmasına rağmen, kömür yakımının düşük gelirli bölgelerde hala kullanılıyor olması, PM_{10} ve SO_2 konsantrasyon değerlerinin sınır değerler üzerinde çıkmasında etkileyici bir faktör olduğunu belirtmişlerdir. Bundan başka, İpek ve Uyanık (2022)'de çalışmalarında, PM_{10} miktarındaki azalışın, doğalgaz kullanımının artması ve kömür kullanım miktarındaki azalmadan kaynaklı olduğunu bulmuşlardır. Bu çalışmada, özellikle 2014 yılında, PM_{10} ve SO_2 konsantrasyon değerlerinin, şehrin güney ve kuzeybatı bölgelerinde bir düşüş eğiliminde olması, kömür yakımı oranında azalma ile ilişkilendirilebilir. Emisyon azaltımına yönelik düzenlemeler, sanayi faaliyetlerin kontrolü veya trafik düzenlemeleri gibi önlemler de PM_{10} ve SO_2 konsantrasyon değerlerinde önemli bir azalmaya yol açmış olabilir. Çalışmada kullanılan meteorolojik faktörlerin yanı sıra, diğer meteorolojik koşullar da hava kirliliği üzerindeki etkileri belirleyebilmektedir. Çalışmalar, hava kirliliğini karakterize etmek için, sıcaklık, rüzgâr hızı ve yönü, bağıl nem, bulut örtüsü, çiğ noktası sıcaklığı, deniz seviyesindeki basınç, yağış ve karışım katmanı yüksekliği vb. gibi önemli meteorolojik özelliklerin olduğunu ortaya koymuştur (Hooyberghs vd., 2005; Demuzere vd., 2009; Pearce vd., 2009). Ankara özelinde, Ulutaş vd. (2021) özellikle büyük şehirlerde, yüksek basınç uzun süre etkili olduğunda kirli, puslu ve sisli bir havanın oluşacağı ve bu durumun, kirletici seviyelerini arttıracaklarını belirtmişlerdir. Sahin vd. (2001) 850 hPa'da negatif rotasyon eğilimi, nispeten zayıf basınç gradyanları ve inversiyonlar, Ankara'daki hava kirliliği olaylarının oluşumuna işaret eden göstergeler olduğunu, kötü hava kirliliği olaylarının antiklinal koşullar ve sıcak hava adveksiyonu ile ilişkilendirildiğini vurgulamışlardır. Raja vd. (2018) Ankara'daki vadilerde ve dağların eğimli yamaçlarındaki yerel sirkülasyon ve sıcaklık varyasyonların, kirleticilerin dağılımı için önemli olduğunu belirtmişlerdir. Bu nedenle, PM_{10} ve SO_2 konsantrasyon değerlerinin tahmininde, Ankara genelinde önemli başka meteorolojik faktörlerin çalışmaya dâhil edilmesi çalışmayı büyük ölçüde geliştirebilir.

Ankara'daki hava kirliliğinin etkili bir şekilde anlaşılabilmesi için, bölgesel meteorolojik özelliklerinin yanı sıra, çeşitli emisyon kaynaklarından gelen verilerin de dikkate alınması gerekmektedir. Bu bağlamda, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (ÇŞB) ile Hollanda Hükümeti'nin Çevre ve Halk Sağlığı Ulusal Enstitüsü (National Institute for Public Health and the Environment, RIVM) arasındaki ikili iş birliği çerçevesinde yürütülen Kentlerde Hava Kalitesi Değerlendirme Sisteminin Geliştirilmesi Projesi (KENTAIR), 2011 yılında Ankara şehrindeki emisyon envanterlerini (sanayi faaliyetleri, trafik yoğunluğu, iç mekân ısınma) kapsamlı bir şekilde değerlendirmiştir (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2013). Türkiye'nin ikinci büyük sanayi merkezi olan Ankara'da yaklaşık 3.000 küçük ve orta ölçekli sanayi tesisi bulunmaktadır. Ankara Büyükşehir Belediyesi mücavir alanında, yüksek kirletici kapasitesine sahip yaklaşık 20 büyük ölçekli sanayi tesisi yer almakta olup, İvedik ve Ostim Organize Sanayi Bölgeleri ile Sincan bölgesindeki Ankara Sanayi Odası 1. Organize Sanayi Bölgesi de çeşitli sanayi tesislerini barındırmaktadır. Yapılan analizler sonucunda, Ankara'nın sanayi kaynaklı emisyon ölçümleri PM_{10} için 543 ton/yıl, SO_2 için 344 ton/yıl olarak belirlenmiştir. Sanayi tesislerinin hava kirliliğine etkisi, yanlış yer seçimi, yetersiz çevre koruma önlemleri ve uygun teknolojilerin kullanılmaması gibi faktörlerden kaynaklanmaktadır. Ankara'daki hızla artan nüfus ve araç sayısı, yetersiz toplu taşıma sistemleri ve çevreci ulaşım seçeneklerinin eksikliği, trafikten kaynaklanan emisyonların ciddi bir sorun olmasına neden olmaktadır. Proje kapsamında, dizel, benzinli ve Sıvılaştırılmış Petrol Gazı (Liquefied Petroleum Gas, LPG) araçlardan kaynaklanan emisyonlar hesaplanmıştır. Trafikten kaynaklı emisyon miktarları, PM_{10} için 1.893 ton/yıl, SO_2 için 21 ton/yıl olarak belirlenmiştir. Projede iç mekân ısınma kaynaklı emisyonlar, mücavir alanındaki tüm konutlar değerlendirilerek hesaplanmıştır. Projede kullanılan katı yakıt ve doğalgaz kullanımı verilerine göre, Ankara'daki konutların %75'i doğalgaz, %25'i kömür ve diğer ısınma türlerini kullanmaktadır. Yakıt türüne göre kirletici miktarları, ithal kömürde PM_{10} için 3.103 ton/yıl, SO_2 için 12.240 ton/yıl olarak ölçülmüştür. Yerli kömür için bu değerler, PM_{10} için 230 ton/yıl, SO_2 için 1.370 ton/yıl olarak tespit edilmiştir. Sonuçlar, ithal kömürün PM_{10} ve SO_2 emisyonlarına önemli bir katkıda bulunduğunu göstermektedir. İç mekân ısınma kaynaklı kirlilik, en yüksek emisyonu sahipken, bunu trafik yoğunluğu ve sanayi faaliyetleri takip etmektedir (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2013). Bu bulgular, Ankara'daki hava kirliliğinin ana kaynaklarının belirlenmesinin ve kirliliği azaltma stratejileri geliştirmenin gerekliliğini vurgulamaktadır.

Bu çalışmada, PM_{10} ve SO_2 konsantrasyonlarına ait tahmin haritalarının doğruluğu Çapraz Geçerlilik (One Leave Out) yöntemi kullanılarak test edilmiştir. PM_{10} için Çapraz Geçerlilik (One Leave Out) sonuçları değerlendirildiğinde, 2011–2013 yılları için düşük tahmin değerleri belirgin bir şekilde gözlemlenmiştir. 2011 ve 2013 yıllarına ait tahmin haritalarında düşük tahmin değerleri genellikle daha yüksek gözlemlenirken, 2012 yılında bu değerler nispeten daha düşük çıkmıştır. 2014 yılı için ise, düşük tahmin değerleri genel olarak daha düşüktür (Şekil 11a). Bu durum, tahmin edilen değerlerin, gözlemlenen değerlerden düşük olduğu anlamına gelmektedir. Ayrıca, 2011–2014 yılları için yüksek tahmin değerleri genellikle düşük olarak gözlemlenmektedir. Özellikle 2012 yılında yüksek tahmin değerleri en düşük seviyededir (Şekil 11a). Yüksek tahmin değerleri, tahmin edilen değerlerin gözlemlenen değerlerden daha yüksek olduğunu ifade etmektedir. SO_2 konsantrasyonu tahmin modelinin, Çapraz Geçerlilik (One Leave Out) sonuçlarına göre, 2011, 2013 ve 2014 yıllarında düşük tahmin değerleri düşük seviyelerde bulunurken, 2012 yılında düşük tahmin değeri daha yüksek çıkmıştır. Yüksek tahmin değerleri ise genel olarak tüm yıllar için düşük seviyelerde kalmıştır. Ancak, 2011 yılında hem yüksek hem de düşük tahmin değerleri, diğer yıllarla kıyaslandığında en düşük seviyelerde gözlemlenmiştir (Şekil 11b). KED yönteminde hava kalitesi izleme istasyonlarının yetersiz olması, mekânsal belirsizliklerin artmasına neden olabilir ve bu durum parametre tahminlerini ve mekânsal-zamansal haritalamayı etkileyerek yüksek tahmin veya düşük tahmin sonuçlarına yol açabilir (Van de Kasstele vd., 2009; Ramos vd., 2016; Idir vd., 2021). Şehir içindeki hava kalitesi izleme istasyonlarının orta bölgelerde yoğunlaşması, kenar bölgelerde seyrek olması, yüksek tahmin ve düşük tahmin değerlerini etkileyebilir. Ayrıca, şehrin orta bölgelerinde, çeşitli hava kirliliği kaynaklarının (sanayi faaliyetleri, trafik yoğunluğu) bulunması hem yüksek hem düşük tahmin değerlerinin ortaya çıkmasına neden olabilir. Bu bölgelerin farklı kullanım alanları ve yapıları (ticari, konut, yeşil alanlar vb. gibi) içermesi, hava kirliliği seviyelerinde değişkenliğe yol açabilir ve bu da tahmin değerlerinde yüksek ve düşük hata değerlerinin oluşmasına neden olabilir. PM_{10} ve SO_2 konsantrasyonlarına ait tahmin modellerinin performans sonuçları, Tablo 1’de gösterilmiştir. PM_{10} konsantrasyonuna ait tahmin modeli performans sonuçları incelendiğinde, R^2 değeri 0.662, $RMSE$ değeri, 8.459 olarak görülmektedir. R^2 değeri “0” ile “1” arasında değişir. R^2 değerine göre, çalışmada kullanılan meteorolojik parametreleri, PM_{10} konsantrasyonunun yarısından fazlasını açıklayabilme özelliği göstermiştir. $RMSE$ değeri, “0” değerine yakındır. PM_{10} gibi hava kirlleticileri ölçümleri, belirli bir zaman diliminde veya mekân üzerinde sürekli bir değişim gösterdiğinden, kabul edilebilir bir performans sonucu olarak değerlendirilmektedir. ME ve MAE değerleri, sırasıyla -1.068 ve 5.943 değerleri ile uygun sonuçlar göstermiştir. Bu negatif ME değerleri, tahmin edilen değerlerin, gözlemlenen değerlerden düşük tahmin yaptığını belirtmektedir. SO_2 konsantrasyonuna ait tahmin modelinin performans sonuçları incelendiğinde, R^2 değeri, modeli %78 oranında açıkladığı görülmektedir. $RMSE$, ME ve MAE değerleri, sırasıyla 2.943, 0.073 ve 1.798 değerleri ile “0” değerine oldukça yakın sonuçlarda çıkmıştır. Bu da SO_2 hava kirleticisi konsantrasyonuna ait tahmin modelinin başarılı olduğunu ifade etmektedir.

Bu çalışmada kullanılan mekânsal-zamansal KED yöntemi, Ankara şehri için sağladığı sonuçlarla etkili bir tahmin aracı olarak değerlendirilmiştir. Ankara şehrinde olduğu gibi diğer büyük şehirlerde de hava kirliliği, nüfus artışı, plansız kentleşme ve sanayi faaliyetlerinin artışı gibi nedenlerle giderek büyük bir sorun haline gelmektedir. Her şehir, kendine özgü mekânsal ve çevresel koşullara sahip olup, hava kirliliği kaynakları ve etkileri de bu farklılıkları yansıtmaktadır. Bu nedenle, mekânsal-zamansal KED yönteminin diğer büyük şehirlerde de etkili bir şekilde uygulanabileceği ve benzer hava kalitesi sorunlarını yönetme ve tahmin etme konusunda değerli bilgiler sağlayabileceği öngörülmektedir. Ancak, farklı şehirlerin özgün mekânsal düzenlemeleri, sanayi yapıları, trafik yoğunluğu ve iklim özellikleri gibi faktörler, yöntemin performansını etkileyebilir. Dolayısıyla, KED yönteminin diğer şehirlerdeki uygulanabilirliği, bu yerel koşulların detaylı bir şekilde analiz edilmesini ve uygun veri altılıklarının hazırlanmasını gerektirmektedir. Bu bağlamda, şehirlerin özelliklerine ve yerel koşullarına yönelik yapılan uyarlamalar, KED yönteminin etkili sonuçlar sunmasını destekleyebilir ve geniş bir uygulama yelpazesi sağlayabilir.



Şekil 11: (a) PM_{10} konsantrasyonu için Çapraz Geçerlilik (One Leave Out) yöntemiyle elde edilen hata haritası; (b) SO_2 konsantrasyonu için Çapraz Geçerlilik (One Leave Out) yöntemiyle elde edilen hata haritası
 Not: Hata tahmin haritasında yeşil renkler, tahmin edilen değerlerin gözlemlenen değerlerden düşük olduğunu (düşük tahmin); kırmızı renkler, tahmin edilen değerlerin gözlemlenen değerlerden yüksek olduğunu (yüksek tahmin) göstermektedir.

Tablo 1: PM_{10} ve SO_2 konsantrasyonlarına ait tahmin modellerinin performans sonuçları

Hava kirlleticiler	R^2	RMSE $\mu g/m^3$	ME	MAE
PM_{10}	0.662	8.459	-1.068	5.943
SO_2	0.782	2.984	0.073	1.798

4. Sonuç ve Öneriler

Hava kirliliğinin şehir içindeki farklı bölgelerdeki değişimlerini anlamak, mekânsal değişkenler arasındaki ilişkileri ve zaman içindeki etkileşimleri kavrayabilmek açısından önemlidir. Bu bağlamda, PM_{10} ve SO_2 konsantrasyonlarının meteorolojik faktörler kullanılarak yapılan mekânsal-zamansal KED analizi, hava kirliliğinin izlenmesinde, denetim altına tutulmasında ve gerekli tedbirlerin alınmasında büyük önem taşımaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalar, hava kalitesinin iyi olduğu bölgelerde mevcut durumun korunmasını, hava kalitesinin düşük olduğu bölgelerde iyileştirme sağlanmasını ve eşik değerlerine göre gelecekteki limit aşımalarının öngörülmesini hedefleyen stratejiler geliştirmiştir (Fan vd., 2020; Butenko & Topchir, 2023; Rahim & Masseran, 2023; Rusmilli vd., 2023; Rahaman vd., 2024; Kongsanun vd., 2024; Otto vd., 2024). Bu stratejiler, sürdürülebilir çevre yönetimi ve halk sağlığının korunması açısından kritik öneme sahiptir. Ayrıca, bazı çalışmalar, jeoistatistik yaklaşımlarının hava tahminlerinde yüksek performans sağladığını ve bu yöntemlerin mekânsal ve zamansal ilişkileri daha etkili bir şekilde modelleyerek daha doğru tahminler sunduğunu ortaya koymuştur (Rahim & Masseran, 2023; Rusmilli vd., 2023; Rahaman vd., 2024; Otto vd., 2024).

Bu bağlamda, çeşitli yöntemlerin etkinliğini değerlendirmek amacıyla yapılan örnek çalışmalar, KED yönteminin hava kirliliği tahminlerinde ne denli etkili olduğunu göstermek açısından önemli bir perspektif sunmaktadır. Örneğin, [Pearce vd. \(2009\)](#), Güney Peru'nun Cusco şehrinde PM_{2.5} konsantrasyonlarını incelemek amacıyla Regression Analysis (REG), OK ve KED yöntemlerini kullanmışlardır. KED yönteminin, sabah, öğleden sonra ve akşam saatlerinde elde edilen RMSE sonuçları diğer yöntemlerle kıyaslandığında daha hassas olduğunu bulmuşlardır. [Van de Kasstele vd. \(2009\)](#), Hollanda'da kırsal ve kentsel alanlar için NO_x konsantrasyonlarının dağılımını belirlemek için Bayesian ve KED yöntemleri kullanmışlardır. Çapraz Geçerlilik test sonuçları değerlendirildiğinde, KED yöntemi çok daha düşük ortalama hata değerleri verdiği sonucuna varmışlardır. [Eshraghi \(2013\)](#), Almanya, Hollanda, Belçika ve Lüksemburg'u kapsayan Batı Avrupa'da 2010 yılı PM₁₀ konsantrasyonunun tahmini için OK, UK, KED yöntemlerini kullanmıştır. KED yöntemi, RMSE, ME ve Hata Ortalama Kare Sapması (Mean Squared Deviation of Residuals, MSDR) açısından daha iyi sonuç verdiğini belirtmiştir. [Ignaccolo vd. \(2014\)](#), İtalya'nın Piemonte bölgesinde, Ekim 2005'ten Mart 2006'ya kadar günlük PM₁₀ konsantrasyonlarının mekânsal-zamansal değişimini RK ve KED yöntemleri kullanarak analiz etmişlerdir. KED yöntemi, eğrinin tamamının tahminini yapabilme yeteneğine sahip olup, kovaryantların doğrusal olmayan etkilerini doğrudan sağlayabildiğini vurgulamışlardır. Bu sonuçlar, KED yönteminin hava kirliliği tahminlerinde sağladığı performansı açıkça ortaya koymaktadır.

Bu çalışma, 2011–2014 yılları arasında Ankara'da PM₁₀ ve SO₂ konsantrasyonlarının, meteorolojik faktörlerin etkisi altında mekânsal-zamansal değişimlerini, KED yöntemi kullanarak kapsamlı bir şekilde değerlendirmiştir. Çalışmada, iki temel araştırma sorusuna cevap aranmıştır:

(1) *Belirtilen yıllar arasında PM₁₀ ve SO₂ konsantrasyon değerlerinde bir artış gözlemlenmiş midir?*

2011 yılında PM₁₀ konsantrasyon değerleri diğer yıllara kıyasla nispeten düşük, eşik değerinin üzerinde ve şehir genelinde 40-60 µg/m³ aralığında izlenmiştir. SO₂ konsantrasyon değerleri ise şehrin bazı bölgelerinde eşik değerine yakın değerlerde çıkmıştır. Bu yıl, şehirdeki hava kalitesinin nispeten daha iyi olduğunu göstermektedir. 2012 yılında, PM₁₀ ve SO₂ konsantrasyon değerlerinde artış gözlemlenmiştir. 2013 yılında, şehirde PM₁₀ ve SO₂ konsantrasyon değerleri genel olarak 70-80 µg/m³ aralığında yüksek seviyelerde bulunmuştur. Bu yıllar, hava kirliliğinde belirgin bir artış yaşandığını ve hava kalitesinin ciddi şekilde bozulduğunu ifade etmektedir. 2014 yılında ise, PM₁₀ ve SO₂ konsantrasyon değerlerinde bir azalma gözlemlenmiştir. Bu azalma, hava kirliliği kaynaklarına yönelik alınan önlemler veya doğal değişkenlikler sonucu meydana gelmiş olabilir. Gözlemlenen artış ve azalma trendleri, yıllık bazda hava kirliliği kaynaklarındaki değişiklikler ve iklimsel faktörlerin etkisiyle ilişkili olabilir. Özellikle belirli yıllarda gözlemlenen yüksek konsantrasyon seviyeleri, bu yıllarda hava kirliliği üreten aktivitelerdeki artışı yansıtabilir.

(2) *Gözlenen bir artış varsa, Ankara şehrinin hangi bölgelerinde yoğunlaşmaktadır?*

2011 yılında, PM₁₀ konsantrasyon değerleri şehrin genelinde 50-60 µg/m³ aralığında, Altındağ ve Mamak ilçelerinin bulunduğu doğu kesimlerinde 70-80 µg/m³ değerlerinde izlenmiştir. SO₂ konsantrasyon değerleri şehrin güney ve güneydoğu bölgelerinde eşik değere yakın değerlerdeyken (< 40 µg/m³), şehrin orta, kuzey ve kuzeydoğu bölgelerinde bu değerin üstünde kalmıştır. 2012 yılında, PM₁₀ ve SO₂ konsantrasyon değerleri kuzeybatı taraflarında 80-90 µg/m³, Keçiören ve Pursaklar ilçelerini içine alan şehrin kuzey taraflarında 60-70 µg/m³, Etimesgut ve Sincan ilçelerine karşılık gelen şehrin batı ve güneybatı kesimlerinde 70-80 µg/m³ olarak izlenmiştir. 2013 yılında, özellikle şehrin Sincan, Yenimahalle ilçelerinin bulunduğu şehrin batı ve kuzeybatı kesimlerinde, PM₁₀ konsantrasyon değeri yüksektir. Altındağ, Mamak ve Çankaya ilçelerinin bulunduğu bölgelerde PM₁₀ ve SO₂ konsantrasyon değerleri, >70 µg/m³ olarak bulunmuştur. 2014 yılında ise, PM₁₀ konsantrasyon değerleri şehrin kuzeybatı, güneydoğu ve güneybatı bölgelerinde 60 µg/m³, Sincan ilçesine karşılık gelen batı bölgesinde 70 µg/m³, şehir merkezi çevresinde <70 µg/m³ olarak dağılım göstermiştir. SO₂ konsantrasyon değerleri, önceki yıllara göre daha düşük olmakla birlikte, belirtilen eşik değerlerin üstündedir. Şehir merkezinde <70 µg/m³ civarında gözlenen değer, şehir merkezi çevresinde 60 µg/m³, şehrin güney ve kuzeybatı bölgelerinde 50 µg/m³ değerine düşmüştür. Şehir içindeki farklı bölgelerde hava kirliliği seviyelerindeki değişiklikler, yerel kaynaklardan (sanayi faaliyetleri, trafik yoğunluğu, iç mekân ısınma vb. gibi) veya bölgesel meteorolojik koşullardan kaynaklanabilir.

PM₁₀ ve SO₂ konsantrasyonlarının mekânsal-zamansal tahmin haritalarının performans sonuçları, mekânsal-zamansal KED yönteminin başarılı bir şekilde uygulanabilirliğini göstermiştir. PM₁₀ ve SO₂ konsantrasyonlarına ait tahmin modeli performans sonuçları incelendiğinde, R² değerlerinin modelleri sırasıyla %66 ve %78 oranlarında açıkladığı görülmektedir. Diğer taraftan, hata büyüklüğünü gösteren RMSE değerleri, PM₁₀ için 8.459 ve SO₂ için 2.984 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar, belirli bir zaman diliminde veya mekânda sürekli bir değişim gösteren hava kirlleticileri için kabul edilebilir bir performans düzeyi sunduğunu göstermektedir. PM₁₀ ve SO₂ konsantrasyonlarının ME ve MAE performans değerleri de uygun sonuçlar vermiştir. Sonuç olarak, yağış (mm), sıcaklık (°C), nem (%) ve rüzgâr hızı (m/s) gibi meteorolojik parametrelerin kullanıldığı KED yöntemi, PM₁₀ ve SO₂ konsantrasyonlarının mekânsal-zamansal değişimlerini modellemede başarılı olmuştur. Çalışmada kullanılan meteorolojik faktörlere ek olarak, Ankara özelinde diğer meteorolojik özelliklerin tahmin modeline dâhil edilmesi, daha hassas ve güvenilir hava kirliliği tahminleri oluşturmaya katkı sağlayabilir. PM₁₀ ve SO₂ konsantrasyon değerlerinin belirli bölgelerdeki değişimini sadece meteorolojik faktörler açısından değil, trafik yoğunluğu, iç mekân ısınma kaynakları ve sanayi bölgeleri gibi emisyon kaynakları açısından da incelemek, Ankara'da hava kirliliği yönetimi ve emisyon kontrolü için uzun vadeli eğilimlerin izlenmesine yardımcı olacaktır. Ayrıca, yerel yönetimlerin ve ilgili kurumların, bu tür mekânsal-zamansal analiz yöntemlerini kullanarak daha etkili ve hedeflenmiş müdahale stratejileri geliştirmeleri önemlidir.

Bu bağlamda, ÇŞB tarafından yayımlanan Ankara İli Temiz Hava Eylem Planı (THEP) (2020–2024) raporu, hava kalitesinin iyileştirilmesi için önerilen eylem planları ve stratejilerle bu performans sonuçlarını desteklemekte ve uygulamaya yönelik somut adımlar sunmaktadır. ÇŞB’nin bu raporunda, Ankara şehrinde ana kaynakların emisyonunun düşürülmesi için önerilen eylem planları ve sonraki on yıl için tahminler mevcut durum grafikler aracılığı ile incelenmiştir (ÇŞB, 2020). Raporda, sanayi faaliyetleri için gerçekleştirilmesi planlanan eylemlerin başında, sanayi alanlarının yer seçiminde, yerleşim alanlarının etkilenmeyeceği bölgelerin seçilmesine özen gösterilmesi yer almaktadır. İşyerlerinin uygun yakıt, baca ve filtre sistemleri denetlenecektir. Hava emisyonu konusunda Çevre İznine tabi olan ancak bu izne sahip olmayan işletmeler belirlenerek, gerekli izinlerin alınması sağlanacaktır. Siteler Sanayi Sitesi ve çevresindeki atölyelerde ısınma ve proses amaçlı yakılan ahşap ürünleri gibi atıkların denetimi yapılacaktır. Böylece, sanayi faaliyetleri için emisyon sınır değerlerinin daha sıkı hale getirilmesi ve denetim mekanizmalarının güçlendirilmesiyle, mevcut denetim sistemlerinin etkinliği arttırılacaktır. Ankara şehrinde, hava kirliliğine neden olan en önemli etkenlerden bir diğeri trafik yoğunluğudur. Raporda trafik yoğunluğu üzerine gerçekleştirilmesi planlanan eylemler arasında, bireysel araç kullanımını azaltarak toplu taşımanın teşvik edilmesi planlanmaktadır. Bu kapsamda, ulaşımın hızlandırılması, konforun sağlanması ve ücretlerin düşürülmesi hedeflenmektedir. Ayrıca, aktarmalı taşımanın yerine direkt taşımanın yaygınlaştırılması sağlanacaktır. Belediye ve özel halk otobüsleri, dolmuş ve taksilerde egzo emisyon kontrolleri artırılarak, eski ve kirlitici araçların kullanımı kısıtlanacaktır. Bunun yanında, toplu taşıma araçlarının kademeli olarak elektrikli araçlarla değiştirilmesi öngörülmektedir. Bisiklet yollarının oluşturulması ile güvenli bir şekilde bisiklet kullanımının sağlanması gerçekleştirilecektir. Bu raporda, iç mekân ısınma konusunda gerçekleştirilmesi planlanan eylemler arasında öncelikli olarak, şehir planlamasında hava sirkülasyonunu arttırmak amacıyla yeşil alanların ve ormanlık bölgelerin yaygınlaştırılması hedeflenmektedir. İmarsız alanlara yapı inşasının engellenmesi sağlanacaktır. Katı yakıt kullanımı yerine doğalgaz kullanımını teşvik eden kentsel dönüşüm projeleri ve yeni yerleşim planlarının uygulanması planlanmaktadır. İç mekân ısınmada kullanılan yakıt türleri arasında kömür kullanım oranının azaltılarak doğalgaz kullanımının yaygınlaşması teşvik edilecektir. Özellikle Siteler bölgesi ve kentsel dönüşüm alanlarında merkezi doğalgaz kullanımının zorunlu hale getirilmesi sağlanacaktır. Binalarda ısı yalıtımının yapılmasına yönelik uygulamalar desteklenecektir. Katı yakıtların izinli firmalar tarafından tedarik edilmesine özen gösterilecektir. Ayrıca, yakıtların düzenli olarak denetlenmesi ve standartlara uygunluklarının kontrol edilmesi hedeflenmektedir. ÇŞB, hava kalitesinin izlenmesi, ölçülmesi ve hava kirliliğinin önlenmesi için gerekli önlemler almakta ve kamuoyunun bilinçlendirilmesini sağlamaktadır. Bu kapsamda, hava kalitesi izleme istasyonlarından alınan veriler sürekli olarak takip edilmeli ve bu konuda gerekli koordinasyon sağlanmalıdır. Hava kalitesi sınır değerlerinin aşması durumunda, emisyon değerleri mevzuata uygun hale getirilinceye kadar belirlenen eylemlerin uygulanmasına özen gösterilmelidir. Böylece, hava kirliliği potansiyeli olan bölgelerin ve çevrelerinin kontrol altında tutulması sağlanmış olacaktır. Hava kirliliği yönetiminin başarısı, sadece bilimsel modelleme ve tahminlerle değil, aynı zamanda etkili politika geliştirme ve uygulama stratejileriyle de ilişkilidir. Bu nedenle, kısa ve uzun vadeli stratejiler geliştirilerek, hava kalitesinin sürekli olarak izlenmesi ve iyileştirilmesi sağlanmalıdır. Bu kapsamda, mekânsal-zamansal analiz yöntemlerinin etkin kullanımı, Ankara’daki hava kirliliğinin yönetimi ve kontrolü için önemli bir araç olarak değerlendirilmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, 18–21 Ekim 2017 tarihinde düzenlenen “*International Symposium on GIS Applications in Geography and Geosciences*”da bildiri olarak sunulmuştur.

Kaynaklar

- Adhikary, S. K., Muttil, N., & Yilmaz, A. G. (2017). Cokriging for enhanced spatial interpolation of rainfall in two Australian catchments. *Hydrological Process*, 31(12), 2129–2315. <https://doi.org/10.1002/hyp.11163>
- Akbal, Y., & Ünlü, K. D. (2022). A deep learning approach to model daily particular matter of Ankara: key features and forecasting. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19, 5911–5927. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03730-3>
- Alahmad, B., Khraishah, H., Althalji, K., MPhil, W. B., Al-Mulla, F., & Koutrakis, P. (2023). Connections between air pollution, climate change, and cardiovascular health. *Canadian Journal of Cardiology*, 39(9), 1182–1190. <https://doi.org/10.1016/j.cjca.2023.03.025>
- Arslan, H., Ağır, A., & Demir, G. (2024). Impacts of PM₁₀ exposure on hospitalization for acute bronchitis in Ankara, Türkiye. *Frontiers in Life Sciences and Related Technologies*, 5(1), 1–5. <https://doi.org/10.51753/flsrt.1322260>
- Arslan, M., & Dursun, D. (2024). Planlı gelişme alanlarının hava kirliliğine olası etkilerinin değerlendirilmesi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 10(1), 125–139. <http://doi.org/10.21324/dacd.1360742>
- Aydın, O., & Özgür, E. M. (2009). Ankara’nın kentsel gelişiminin uzaktan algılama ve coğrafi bilgi sistemleriyle ölçülmesi. *e-Journal of New World Sciences Academy Nature Sciences*, 4(4), 215–242.
- Aydın, O., & Çiçek, I. (2015). *Geostatistical interpolation of precipitation in Turkey*. Lambert Academic Publishing.
- Aydın, N. (2023). Investigating the Relationship between urban environment, air quality and childhood asthma: the case of Ankara. [Doctoral dissertation, Middle East Technical University]. OpenMETU. <https://open.metu.edu.tr/handle/11511/102564>
- Beauchamp, M., & Bessagnet, B. (2023). An iterative optimization scheme to accommodate inequality constraints in air quality geostatistical estimation of multivariate PM. *Heliyon*, 9, Article e17413. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17413>

- Bozdağ, A., Dokuz, Y., & Gökçek, Ö. B. (2020). Spatial prediction of PM₁₀ concentration using machine learning algorithms in Ankara, Turkey. *Environmental Pollution*, 263, Article 114635. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114635>
- Butenko, O., & Topchyy, A. (2023). Analysis of pollutants in air within the territory of Ukraine using geostatistical methods. *Radioelectronic and Computer Systems*, 3(107), 226–237. <http://doi.org/0.32620/reks.2023.3.18>
- Breeze Technologies. (2021). *The new 2021 WHO air quality guideline limits*. Breeze Tech. <https://www.breeze-technologies.de/blog/new-2021-who-air-quality-guideline-limits/>
- Cenlin, H., Rajesh, K., Wenfu, T., Gabriele, P., Yangyang, X., Yun, Q., & Guy, B. (2024). Air pollution interactions with weather and climate extremes: current knowledge, gaps, and future directions. *Current Pollution Reports*, 10(3), 430–442. <http://doi.org/10.1007/s40726-024-00296-9>
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2013). *Kentlerde hava kalitesi değerlendirme sisteminin geliştirilmesi projesi (KENTAIR), Ankara hava kalitesi değerlendirme raporu*. <https://webdosya.csb.gov.tr/db/cygm/editordosya/Ankara%20Kentair%20Raporu.pdf>
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2022). *Türkiye çevre sorunları ve öncelikleri değerlendirme raporu*. https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/turk-ye-cevre-sorunlari-ve-oncelikler-_2022_3_ver3.logoduzenlendi20230901135641.pdf
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (t.y.). *Ulusal hava kalite izleme ağı*. <https://sim.csb.gov.tr/Services/AirQuality>
- Delbari, M., Afrasiab, P., & Jahani, S. (2013). Spatial interpolation of monthly and annual rainfall in northeast of Iran. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 122(1), 103–113. <https://doi.org/10.1007/s00703-013-0273-5>
- Demuzere, M., Trigo, R. M., Vila-Guerau de Arellano, J., & van Lipzig, N. P. M. (2009). The impact of weather and atmospheric circulation on O₃ and PM₁₀ levels at a rural mid-latitude site. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, 2695–2714.
- Erol, O., (1968). The growth of Ankara city and the geomorphology of its site. *Colloque International de Géographie Appliquée*, 48, 231–245.
- Eshraghi, M. (2023). *Automatic modelling and mapping of Particulate Matter (PM₁₀)* [Master dissertation, University of Twente]. <https://purl.utwente.nl/essays/93966>
- Fan, H., Zhao, C., & Yang, Y. (2020). A comprehensive analysis of the spatio-temporal variation of urban air pollution in China during 2014–2018. *Atmospheric Environment*, 220, Article 117066. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117066>
- Feng, T., Sun, Y., Shi, Y., Ma, J., Feng, C., & Chen, Z. (2024). Air pollution control policies and impacts: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 191, Article 11407. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114071>
- Genc, D. D., Yesilyurt, C., & Tuncel, G. (2010). Air pollution forecasting in Ankara, Turkey using air pollution index and its relation to assimilative capacity of the atmosphere. *Environmental Monitoring and Assessment*, 166, 11–27. <http://doi.org/0.1007/s10661-009-0981-y>
- Goovaerts, P. (1997). *Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford University Press.
- Greenpeace. (2022, Ekim 13). *Türkiye’de Hava Kirliliği Yükü–2021 Raporu*. <https://www.greenpeace.org/turkey/raporlar/turkiyede-hava-kirliligi-yuku-2021/>
- Hengl, T., Heuvelink, G., & Rossiter, D. G. (2007). About regression-kriging: From equations to case studies. *Computers & Geosciences*, 33(10), 1301–1315. <http://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.05.001>
- Hooyberghs, J., Mensink, C., Dumont, G., Fierens, F., & Brasseur, O. (2005). A neural network forecast for Daily average PM₁₀ concentrations in Belgium. *Atmospheric Environment*, 39, 3279–3289. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.01.050>
- Idir, Y. M., Olivier, O., Judalet, V., Sagot, B., & Chatellier, P. (2021). Mapping urban air quality from mobile sensors using spatio-temporal geostatistics. *Sensors*, 21, Article 4717. <http://doi.org/10.3390/s21144717>
- Ignaccolo, R., Mateu, J., & Giraldo, R. (2014). Kriging with external drift for functional data for air quality monitoring. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 28, 1171–1186. <http://doi.org/10.1007/s00477-013-0806-y>
- Isaaks, E., & Srivastava, R. (1989). *An introduction to applied geostatistics*. Oxford University Press.
- İpek, Z., & Uyanık, İ. (2022). Sanayi kaynaklı noktasal emisyonların hava kalitesine katkısı: Kayseri İli örneği. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 8(2), 341–350. <http://doi.org/10.21324/dacd.1056806>
- Koçak, E., & Balçılar, İ. (2024). Spatio-temporal variation of particulate matter with health impact assessment and long-range transport case study: Ankara, Türkiye. *Science of the Total Environment*, 938, Article 173650. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173650>
- Kongsanun, C., Chutsagulprom, N., & Moonchai, S. (2024). Spatio-temporal dual kriging with adaptive coefficient drift function. *Mathematics*, 12, 400, 1–21. <http://doi.org/10.3390/math12030400>
- Köse, Y., Şahin, Ş., & Müftüoğlu, V. (2024). Ankara Çayı Havzası’nın kentsel planlama kapsamında taşkın duyarlılığı açısından değerlendirilmesi. *İdealkent*, 43(16), 512–543. <http://doi.org/10.31198/idealkent.1360600>
- Liang, F., Gao, M., Xiao, Q., Carmichael, G. R., Pan, X., & Liu, Y. (2017). Evaluation of a data fusion approach to estimate daily PM_{2.5} levels in North China. *Environmental Research*, 158, 54–60. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.06.001>
- Lichtenstern, A. (2013). *Kriging methods in spatial statistics* [Bachelor’s dissertation, Technische Universität München]. <https://www.semanticscholar.org/paper/Kriging-methods-in-spatial-statistics-Lichtenstern/129ba812abbcb734a973e51f102d60227d5e6f6e>
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (t.y.). *İllere ait mevsim normalleri (1991–2020)*. <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=ANKARA>
- Oral, H. V., Ulusoy, İ., Özalkan, E., & Toros, H. (2015, April 28–30). *Ankara ve çevre illerde hava kirliliği dağılımı ve emisyon envanterinin belirlenmesi* [Conference presentation]. VII. Atmospheric Science Symposium, İstanbul, Türkiye.
- Otto, P., Moro, A. F., Rodeschini, J., Shaboviq, Q., Ignaccolo, R., Golini, N., Cameletti, M., Maranzano, P., Finazzi, F., & Fassò, A. (2024). Spatiotemporal modelling of PM_{2.5} concentrations in Lombardy (Italy): a comparative study. *Environmental and Ecological Statistics*, 31, 245–272. <https://doi.org/10.1007/s10651-023-00589-0>
- Özgür, E.M. (1995). Türkiye’deki iç göçlerde Ankara İli’nin yeri. *Ankara Üniversitesi Türkiye Coğrafyası Araştırma ve Uygulama Merkezi Dergisi*, 4, 63–76.

- Pearce, J. L., Rathbun, S. L., Aguilar-Villalobos, M., & Naeher, L. P. (2009). Characterizing the spatiotemporal variability of PM_{2.5} in Cusco, Peru using kriging with external drift. *Atmospheric Environment*, 43, 2060–2069. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.10.060>
- Pebesma, E. J. (2004). Multivariable geostatistics in S: the gstat package. *Computer Geoscience*, 30(7), 683–691.
- Pebesma, E. (2012). Spacetime: spatio-temporal data in R. *Journal of Statistical Software*, 51(7), 1–30
- Pei, H., & Shiliang, W. (2016). Long-term changes in extreme air pollution meteorology and the implications for air quality. *Scientific Reports*, 6, Article 23792. <http://doi.org/10.1038/srep23792>
- Pinho-Gomes, A.-C., Roaf, E., Fuller, G., Fowler, D., Lewis, A., ApSimon, H., Noakes, C., Johnstone, P., & Holgate, S. (2023). Air pollution and climate change. *The LANCET Planetary Health*, 7(9), 7–8. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(23\)00189-4](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(23)00189-4)
- R Development Core Team. (2016). *The R project for statistical computing*. <https://www.r-project.org/>
- Raja, N. B., & Aydın, O. (2017). *New approaches to flash flood forecasting in the Mediterranean Region*. Lambert Academic Publishing.
- Raja, N. B., Aydın, O., Türkoğlu, N., & Çiçek, İ. (2018). Characterising the seasonal variations and spatial distribution of ambient PM₁₀ in urban Ankara, Turkey. *Environmental Processes*, 5(1), 349–362. <http://doi.org/10.1007/s40710-018-0305-8>
- Rahaman, S.N., Nelson, J., Ali, A.A.B., Shermin, N., Pricope, N. G., Kafy, A. A., Sabuj, M. S., & Toa, S. S. (in press). A multivariate geostatistical framework to assess the spatio-temporal dynamics of air pollution and land surface temperature in Bangladesh. *Earth Systems Environment*. <https://doi.org/10.1007/s41748-024-00418-9>
- Rahim, U. A., & Masseran, N. (2023). State-space time series analysis on air pollution data. *Environment and Ecology Research*, 11(1), 155–164. <http://doi.org/10.13189/eer.2023.110111>
- Ramos, Y., St-Onge, B., Blanchet, J.-P., & Smargiassi, A. (2016). Spatio-temporal models to estimate daily concentrations of fine particulate matter in Montreal: Kriging with external drift and inverse distance-weighted approaches. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 26, 405–414. <https://doi.org/10.1038/jes.2015.79>
- Rusmilli, S. H. A., Hamzah, F. M., Choy, L. K., Azizah, R., Sulistyorini, L., Yudhastuti, R., Diyanah, K. C., Adriyani, R., & Latif, M. T. (2023). Ground-level particulate matter (PM_{2.5}) concentration mapping in the central and south zones of Peninsular Malaysia using a geostatistical approach. *Sustainability*, 15(23), Article 1616. <https://doi.org/10.3390/su152316169>
- Ulutas, K., Abujayyab, S. K. M., & Abu Amr, S. (2021). Evaluation of the major air pollutants levels and its interactions with meteorological parameters in Ankara. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 9(4), 1284–1295. <http://doi.org/10.21923/jesd.939724>
- Sahin, M., Incecik, S., Topcu, S., & Yildirim, A. (2001). Analysis of atmospheric conditions during air pollution episodes in Ankara, Turkey. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 51(7), 972–982. <https://doi.org/10.1080/10473289.2001.10464334>
- Shaman, J., & Kohn, M. (2009). Absolute humidity modulates influenza survival, transmission, and seasonality. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(9), 3243–3248. <https://doi.org/10.1073/pnas.0806852106>
- Temiz Hava Hakkı Platformu. (2023, Mart). *Kara rapor 2022: hava kirliliği ve sağlık etkileri*. https://www.temizhavahakki.org/wp-content/uploads/2023/03/KaraRapor_v6.pdf
- Toros, H., Bağış, S., & Gemici, Z. (2018). Ankara’da hava kirliliği mekânsal dağılımının modellenmesi. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 1(1), 20–53.
- Tran, H. M., Tsai, F. J., Lee, Y. L., Chang, J. H., Chang, T. Y., Chung, K. F., Kuo, H. P., Lee, K. Y., Chuang, K. J., & Chuang, H. C. (2023). The impact of air pollution on respiratory diseases in an era of climate change: a review of the current evidence. *Science of the Total Environment*, 898, Article 166340. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166340>
- Turgut, D., & Temiz, İ. (2015). Ankara’daki hava kirliliği için zaman serileri analizi ve tahmin: box-jenkins yaklaşımı. *Alphanumeric Journal*, 3(2), 131–138. <http://doi.org/10.17093-aj.2015.3.2.5000148347-270497.pdf>
- Türkiye İstatistik Kurumu. (2024a, Temmuz 9). *Dünya nüfus günü, 2024*. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Dunya-Nufus-Gunu-2024-53680>
- Türkiye İstatistik Kurumu. (2024b, Şubat 6). *Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi Sonuçları, 2023*. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Adrese-Dayali-Nufus-Kayit-Sistemi-Sonuc-lari-2023-49684>
- Türkoğlu, N., Aydın, O., Duman, N., & Çiçek, İ. (2016). Türkiye’de yağışın farklı mekânsal enterpolasyon yöntemleriyle karşılaştırılması. *Journal of Human Science*, 13(3), 5636–5659. <http://doi.org/10.14687/jhs.v13i3.4173>
- Webster, R., & Oliver, M. A. (2007). *Geostatistics for environmental scientists*. Wiley.
- World Health Organization. (2021, October 21). *Air pollution causes 13 deaths per minute worldwide*. <https://www.who.int/multi-media/details/air-pollution-climate-change>
- World Health Organization. (2023, January 26). *World Health Organization (WHO) air quality guidelines (AQGs) and estimated reference levels (RLs)*. <https://www.eea.europa.eu/publications/status-of-air-quality-in-Europe-2022/europes-air-quality-status-2022/world-health-organization-who-air>
- Van de Kasstele, J., Stein, A., Dekkers, A. L. M., & Velders, G. J. M. (2009). External drift kriging of NOX concentrations with dispersion model output in a reduced air quality monitoring network. *Environmental and Ecological Statistics*, 16(3), 321–339. <http://doi.org/10.1007/s10651-007-0052-x>
- Yan, J., Chen, W. Y., Zhang, Z., Zhao, W., Liu, M., & Yin, S. (2024). Mitigating PM_{2.5} exposure with vegetation barrier and building designs in urban open-road environments based on numerical simulations. *Landscape and Urban Planning*, 241, 104918, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2023.104918>