

Yapay Zekâ Tabanlı Yöntemlerle Hava Kirliliği Araştırmalarının Gelişimi ve Gelecek Perspektifleri: Bibliyometrik Bir İnceleme

Olgu Aydın^{1*}, Hatice Kılar²

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

²Sakarya Üniversitesi, İnsan ve Toplum Bilimleri Fakültesi, Coğrafya Bölümü, 54187, Sakarya.

Özet

Kentleşme, enerji tüketimi, sanayileşme ve nüfus artışıyla birlikte hava kirliliği ve hava kalitesindeki düşüş, halk sağlığı ve çevre üzerinde ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Kirlleticilerin tespiti ve kontrolü, günümüzün öncelikli sorunlarından biri haline gelmiş ve bu bağlamda yapay zekâ tabanlı yöntemlerin hava kirliliği araştırmalarında artan önemi dikkat çekmiştir. Bu çalışma, 2004–2024 yılları arasında yapay zekâ tabanlı yöntemlerin kullanıldığı hava kirliliği araştırmalarındaki öncelikli temaların gelişimini ve gelecekteki araştırmalara yön verebilecek alanları kapsamlı bir şekilde incelemiştir. Bibliyometrik analiz ve atıf analizi yöntemleri kullanılarak yapılan bu araştırma, literatürün sistematik bir değerlendirmesini sunmuş ve hava kirliliği ile ilgili yapay zekâ uygulamalarının zamanla üstel bir artış gösterdiğini ortaya koymuştur. Araştırma sonuçları, 2014 sonrası dönemde yapay zekâ tabanlı yöntemlerin literatürde bir paradigma değişimi yaratarak hava kirliliği tahminleri ve modellemelerinde merkezi bir rol üstlendiğini göstermektedir. Aynı zamanda, disiplinler arası iş birliği eğilimlerinin güçlenmekte olduğunu ve yapay zekâ tabanlı yöntemlerin yalnızca yenilikçi bir çözüm sunmakla kalmayıp, aynı zamanda literatürdeki evrimi şekillendiren bir dönüşüm sağladığını ortaya koymaktadır. Bu analiz, alanın mevcut durumunu anlamak ve gelecekteki araştırma yönelimlerini belirlemek için değerli bir bilgi kaynağı sunmakta, yapay zekâ tabanlı yöntemlerin hava kirliliği çalışmalarında daha geniş ve etkili bir şekilde kullanılabileceğini güçlü bir şekilde desteklemektedir.

Anahtar Sözcükler

Hava Kirliliği, Hava Kalitesi, Yapay Zekâ, Bibliyometrik Analiz

Development and Future Perspectives of Air Pollution Research Using Artificial Intelligence-Based Methods: A Bibliometric Review

Abstract

Urbanization, energy consumption, industrialization, and population growth, along with air pollution and the decline in air quality, pose a serious threat to public health and the environment. The detection and management of pollutants have become urgent global concerns, underscoring the growing significance of artificial intelligence (AI)-based methods in air pollution research. This study presents a thorough review of the evolution of key themes in AI-driven air pollution research from 2004 to 2024, highlighting areas for future investigation. Through bibliometric and citation analyses, the study systematically examines the literature, revealing an exponential growth in AI applications in air pollution research over time. The findings indicate that after 2014, AI-based methods have led to a paradigm shift, playing a critical role in air pollution forecasting and modeling. At the same time, the study reveals that interdisciplinary collaboration trends are strengthening and that AI-based approaches not only offer innovative solutions but also serve as a transformative force shaping the evolution of the literature. This analysis provides valuable insights into the current state of air pollution research and presents guidance for future directions, emphasizing the need for broader and more effective integration of AI techniques in this area.

Keywords

Air Pollution, Air Quality, Artificial Intelligence, Bibliometric Analysis

1. Giriş

Hava kirliliği, artan nüfus, trafik yoğunluğu, sanayileşme ve enerji kullanımının yaygınlaşmasıyla birlikte küresel bir sorun haline gelmiştir. İnsanlık, yüksek teknoloji ve akıllı sistemlere giderek daha fazla bağımlı hale geldiği hızlı bir gelişim çağını yaşarken, bu ilerleme enerji ve diğer kaynaklara olan talebi artırarak karbon emisyonları, ince partikül maddeler (PM_{2.5} ve PM₁₀), sera gazları ve kimyasal kirleticiler gibi çevresel sorunlara yol açmaktadır (Chen vd., 2024). Bu durum, yalnızca çevresel problemlerle sınırlı kalmayıp, aynı zamanda sosyal, ekonomik ve ekolojik sistemler üzerinde ciddi riskler oluşturmaktadır (Feng vd., 2024). Dünya Sağlık Örgütü'ne (World Health Organization, WHO) göre, hava kirliliği her dakika dünya genelinde on üç kişinin hayatını tehdit etmektedir (World Health Organization, 2021a).

WHO'nun COP26 İklim Değişikliği ve Sağlık Özel Raporu'nda (COP26 Climate Change and Health Special Report), dünya nüfusunun %90'ından fazlasının büyük ölçüde fosil yakıtların yakılmasından kaynaklanan sağlıksız hava soluduğu belirtilmiştir. Bu raporda, hava kirliliği ilk kez bir ölüm nedeni olarak tanımlanmış ve 2021 yılında WHO tarafından, "*Temiz Hava Soluyalım*" girişimini başlatmıştır (World Health Organization, 2021b). Hava kirliliği, yalnızca çevre sağlığı açısından değil, aynı zamanda halk sağlığı üzerinde yarattığı etkiler nedeniyle, dünya genelinde araştırmaların ve politika geliştirme süreçlerinin öncelikli konularından biri haline gelmiştir (Fan vd., 2020). Bu bağlamda, çeşitli ülkeler hava kirliliğiyle mücadele amacıyla kapsamlı yasal düzenlemeler ve stratejiler geliştirmiştir. Örneğin, Amerika Birleşik Devletleri'nde Temiz Hava Yasası 1990 yılında önemli değişikliklerle güçlendirilmiş; Çin'de ise 2000 yılında Çin Halk Cumhuriyeti Hava Kirliliği Önleme ve Kontrol Yasası yürürlüğe girmiştir (Chen vd., 2024). Avrupa Komisyonu'nun 2008/50/EC Direktifi (European Union, 2021), 250.000'den fazla nüfusa sahip şehirlerde hava kalitesinin ölçüm ve/veya modelleme yoluyla izlenmesini zorunlu kılmıştır. Norveç, Avrupa Ekonomik Alanı (European Economic Area, EEA) üyesi olarak, bu düzenlemeleri ulusal yasalarına entegre etmiştir (Hamer vd., 2020). Bu kapsamlı stratejiler, hava kalitesi standartlarının ve emisyon limitlerinin belirlenmesi, temiz enerji ve üretim teknolojilerinin teşvik edilmesi, endüstriyel ve ulaşım kaynaklı emisyonların kontrol altına alınması ve atmosferik çevre kalitesinin izlenmesi ve denetiminin güçlendirilmesi gibi temel unsurları içermektedir. Böylece, hava kirliliğiyle mücadelede etkili bir yönetim sistemi oluşturulması hedeflenmektedir.

Son yıllarda, veri erişilebilirliğindeki gelişmeler ve tahmin yöntemlerindeki ilerlemeler, hava kirliliği araştırmalarında giderek artan bir ilgi odağı haline gelmiştir. Chen vd. (2024), 2018 yılından bu yana hava kirliliği kontrolüne yönelik akademik çalışmalarda önemli bir artış olduğunu ve bu alandaki akademik katılımın sürekli olarak büyüdüğünü vurgulamıştır. Özellikle yapay zekâ tabanlı yöntemlerin (yapay zekâ (AI), makine öğrenimi (ML) ve derin öğrenme (DL)) kullanımındaki artış, geleneksel yöntemlerin yerini daha hızlı ve ekonomik çözümler sunan akıllı sistemlere bıraktığını göstermektedir. Awasthi vd. (2024), bu dönüşümü eski bir bisikletten yüksek teknoloji ürünü bir elektrikli bisiklete geçişe benzetmiş ve yeni yöntemlerin hava kirliliğinin izlenmesini daha etkin hale getirdiğini belirtmiştir. Bu bağlamda, Rautela vd. (2024) Hindistan'da hava kirliliğiyle mücadelede AI ve ML teknolojilerinin entegrasyonunu PM_{2.5} tahmininde kullanarak yüksek doğruluk sağladıklarını ve bu teknolojilerin hava kirliliği yönetiminde önemli bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymuşlardır. Menares vd. (2021), Şili'nin Santiago şehrinde PM_{2.5} seviyelerini tahmin etmek için DL tabanlı sinir ağları kullanmıştır. Çalışmada, 10 yıllık hava kirliliği ve meteorolojik verilerden faydalanılarak, Uzun Kısa Süreli Bellek (Long Short-Term Memory, LSTM) modeli ve Derin İleri Beslemeli Sinir Ağı (Deep Feedforward Neural Network, DFFNN) ile kritik kirlilik olaylarının tahmininde önemli başarılar elde edilmiştir. Özellikle LSTM modeli, sinoptik ölçekte kirlilik desenlerini yakalayarak, mevcut deterministik modellerden daha yüksek bir doğruluk oranı göstermiştir. Benzer şekilde, Ramadan vd. (2024), krom kaplama endüstrisi için gerçek zamanlı bir hava kirliliği izleme ve tahmin sistemi geliştirmiştir. Bu sistem, Nesnelerin İnterneti (Internet of Things, IoT) sensörleri ve AI tabanlı yaklaşımlar kullanarak geniş bir yelpazedeki hava kirleticilerini algılamakta ve LSTM ile Rastgele Orman (Random Forest, RF) modelleri aracılığıyla yüksek doğruluk oranıyla kirlilik seviyelerini tahmin etmektedir. Bu yenilikçi sistem, endüstriyel ortamlarda hava kalitesini artırmak ve dinamik müdahale imkânı sağlamak açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır. Li ve Sun (2021), ML yöntemlerinin Çin'deki şehir düzeyinde karbon dioksit (Carbon Dioxide, CO₂) emisyonlarının tahmininde etkili bir çözüm sunduğunu ortaya koymuştur. Çalışmada, endüstriyel kirlilik göstergeleri gibi kritik değişkenler belirlenmiş ve bu yöntemler veri yetersizliği olan bölgelerde yüksek doğruluk oranlarıyla karbon (Carbon, C) emisyonlarını tahmin etmede başarılı bulunmuştur.

Clarivate Analitik Bilim Ağı (Clarivate Analytics Web of Science, WOS) veritabanında yapılan taramalar, AI, ML ve DL yöntemlerinin hava kirliliği çalışmalarında geniş bir uygulama alanı bulduğunu ve bu alandaki akademik yayın sayısında önemli bir artış yaşandığını göstermektedir. Bununla birlikte, bu yöntemlerin sistematik analizine yönelik kapsamlı değerlendirmelerin sınırlı olduğu dikkat çekmektedir. Literatürde bu açığı gidermeye yönelik çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiş olup, son yıllarda bu alandaki akademik ilginin arttığı görülmektedir (Masood & Ahmad, 2021; Mehmood vd., 2022; Guo vd., 2022; Li vd., 2023; Ansari & Quaff, 2024; Hau, 2024; Houdou vd., 2024). Masood & Ahmad (2021), AI tabanlı yöntemlerin hava kirliliği tahmini üzerindeki artan önemini vurgulayarak, bu tekniklerin hava kirliliği seviyelerini belirlemede ve modelleme süreçlerinde yüksek doğruluk sunduğunu ortaya koymuştur. Çalışmalarında, hava kirliliği tahmininde yaygın olarak kullanılan AI yaklaşımlarını sistematik bir çerçevede ele alarak, farklı yöntemlerin başarı oranlarını değerlendirmişlerdir. Ayrıca, AI modellerinin güçlü genelleme yetenekleri ve hata toleransları sayesinde, geleneksel tahmin yöntemlerine kıyasla daha güvenilir sonuçlar ürettiğini belirtmişlerdir. Benzer şekilde, Mehmood vd. (2022), AI ve ML tabanlı yöntemlerin hava kirliliği tahmininde nasıl evrildiğini inceleyerek, literatürdeki büyüme eğilimlerini analiz etmişlerdir. Çalışmalarında, en çok kullanılan ML modellerini, araştırma iş birliklerini ve bölgesel dağılımı belirleyerek, hava kirliliği tahmininde yapay zekâ tekniklerinin küresel ölçekte nasıl benimsendiğini ortaya koymuşlardır. Li vd. (2023), ML uygulamalarının hava kirliliği araştırmalarındaki mevcut durumunu değerlendirmek ve bu alandaki araştırma eğilimlerini belirlemek amacıyla kapsamlı bir bibliyometrik analiz gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında, ML tabanlı modellerin hava kirliliği tahmininde nasıl kullanıldığını inceleyerek, öne çıkan araştırma konularını, iş birliklerini ve gelecekteki araştırma alanlarını belirlemeyi hedeflemişlerdir. Ansari ve Quaff (2024), ML'nin hava kirliliği tahminindeki kullanımını, mevcut durumunu ve Hindistan'daki gelişim potansiyelini değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Çalışma, bibliyometrik analiz yöntemleriyle bu alandaki araştırma eğilimlerini, önde gelen akademik kaynakları ve en çok atıf alan çalışmaları inceleyerek, ML'nin hava kalitesi tahminindeki rolünü ve

gelecekteki araştırma alanlarını belirlemeye odaklanmaktadır. [Hau \(2024\)](#), AI ve hava kirliliği üzerine yapılan araştırmaların akademik eğilimlerini değerlendirmek amacıyla 2012–2022 yılları arasındaki çalışmaları bibliyometrik bir analizle incelemiştir. Çalışma, yayımlanan makalelerin sayısındaki artış, atıf eğilimleri, önde gelen ülkeler, araştırma kurumları, finansman sağlayıcılar ve en çok atıf alan çalışmaları ele alarak, AI'nin hava kirliliği araştırmalarındaki rolünü ve gelecekteki araştırma alanlarını belirlemeyi hedeflemektedir. [Guo vd. \(2022\)](#) de benzer şekilde, AI'nin hava kirliliği araştırmalarındaki mevcut durumunu ve gelişim eğilimlerini analiz etmek amacıyla kapsamlı bir bibliyometrik çalışma gerçekleştirmişlerdir. WOS veri tabanından elde edilen yayınları inceleyerek, ülkeler, kurumlar, yazarlar, anahtar kelimeler ve atıf yapılan referanslar açısından AI'nin hava kirliliği alanındaki rolünü değerlendirmişlerdir. Çalışma, AI'nin hava kirletici konsantrasyonu tahmininde, çevresel izleme süreçlerinde ve düşük maliyetli hava kalitesi sensörlerinin kullanımında nasıl bir etki yarattığını ortaya koyarak, bu alandaki araştırma dinamiklerini ve iş birliği ağlarını güçlendirmeye yönelik öneriler sunmayı amaçlamaktadır. [Houdou vd. \(2024\)](#), ML yöntemlerinin hava kirliliği tahminindeki kullanımını sistematik bir şekilde incelemeyi amaçlamışlardır. Çalışma, 2011–2023 yılları arasında yayımlanan araştırmaları değerlendirerek, hava kirliliği tahmini için kullanılan ML modellerini belirlemeyi ve bu modellerin doğruluğunu ve etkinliğini analiz etmeyi hedeflemiştir. Bunun yanı sıra, hava kirliliği ile ilgili farklı konulara odaklanan çeşitli bibliyometrik çalışmalar da literatürde yer almaktadır. Örneğin, hava kirliliği ile ilgili mekânsal-zamansal dağılım analizleri ([da Silva Filho vd., 2020](#)), ince partiküler maddeye kronik maruziyet ile kanser riski arasındaki ilişkiler ([Luo vd., 2022](#)), atmosferik kirlilik kaynakları ([Li vd., 2017a](#)), trafik kaynaklı hava kirliliği ([Lin, 2024](#)), iç mekân hava kalitesi ([Nazli vd., 2024](#)) ve iç mekân hava kalitesini etkileyen faktörler ([Türk, 2022](#)) üzerine yapılan çalışmalar bu alandaki önemli referanslar arasındadır. Bu çalışmalar, yapay zekâ tabanlı yöntemlerin hava kirliliği tahmini üzerindeki etkisini farklı açılardan ele almaktadır. Ancak mevcut araştırmaların büyük bir kısmı yalnızca belirli modelleme tekniklerine ve tahmin süreçlerine odaklanmaktadır. Buna karşın, bu çalışmada yapay zekâ tabanlı hava kirliliği araştırmalarının bilimsel gelişimi, akademik iş birlikleri ve araştırma trendleri bibliyometrik bir çerçevede sistematik olarak analiz edilmektedir. Çalışma, alanın evrimini disiplinler arası etkileşimler, atıf ilişkileri ve akademik üretkenlik bağlamında değerlendirerek, AI, ML ve DL yöntemlerinin hava kirliliği tahminindeki konumunu daha geniş bir perspektiften ortaya koymaktadır. Böylece, yalnızca model doğruluğu ve tahmin performansına değil, aynı zamanda yapay zekâ tabanlı tekniklerin uzun vadeli bilimsel gelişimine ve akademik iş birliklerine etkisine de odaklanarak bu alandaki araştırma boşluklarını belirlemeye katkı sağlamaktadır. Bu çerçevede, bibliyometrik analiz, bilimsel alanların gelişimini ve araştırma eğilimlerini anlamada güçlü bir yöntem olarak öne çıkmakta olup, bu çalışma da bu yöntemi kullanarak yapay zekâ tabanlı hava kirliliği tahmin modellerinin bilimsel literatürdeki konumunu kapsamlı bir şekilde değerlendirmektedir. Bu yöntem, yayınlanmış araştırmaları tanımlamak, değerlendirmek ve izlemek için nicel yöntemler sunarak entelektüel yapılar, sosyal ağlar ve konuya olan ilgi alanlarının keşfedilmesine katkıda bulunmaktadır ([Zupic & Čater, 2015](#); [Koseoglu vd., 2016](#)). Ayrıca, araştırma alanının genel bir görünümünü elde etmek, önemli araştırma boşluklarını belirlemek, gelecekteki araştırma sorularını vurgulamak ve yeni fikirler önermek için değerli bir araçtır ([Donthu vd., 2021](#); [Marvi & Foroudi, 2023](#)). Bir makalenin araştırma alanına katkısı, zaman içinde biriken atıf sayısı ile değerlendirilebilir. Daha yüksek atıf alan çalışmalar, alan üzerinde daha büyük bir etki yaratmakta ve bilimsel bilginin çözülmesi, haritalanması ve önemli makalelerin evrimsel gelişimlerinin analiz edilmesinde önemli bilgiler sunmaktadır ([Marvi & Foroudi, 2023](#)). Bu bağlamda yürütülen araştırma, yapay zekâ tabanlı hava kirliliği tahmin modellerinin akademik etkisini ve literatürdeki konumunu derinlemesine inceleyerek, gelecekteki araştırmalara yön verecek bilimsel bir temel oluşturmayı hedeflemektedir.

Bu çalışma, yapay zekâ tabanlı yöntemlerin hava kirliliği araştırmalarındaki yükselişini bibliyometrik analiz çerçevesinde ele alarak, bu alandaki mevcut eğilimleri, araştırma boşluklarını ve gelecekteki yönelimleri sistematik bir şekilde değerlendirmesi açısından özgündür. Literatürdeki temel gelişmeleri ve bilimsel katkıları nesnel bir bakış açısıyla analiz eden bu makale, bibliyometrik analiz ve atıf inceleme yöntemlerini bir araya getirerek, hava kirliliği ve yapay zekâ kesişimindeki çalışmaların bilimsel haritasını çıkarmakta ve gelecekteki araştırmalar için yol gösterici bir çerçeve çizmektedir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Veri Toplama Süreci

Bu çalışma, dünya çapında kapsamlı bir içerik sunan WOS (<http://www.webofknowledge.com>) veri tabanı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. WOS, dergiler, bildiriler, kitaplar ve veri derlemelerini kapsayan seçkin bir atıf indeksidir ([Birkle vd., 2020](#)). İlk olarak Garfield tarafından 1964 yılında Bilimsel Atıf İndeksi (Science Citation Index, SCI) adıyla geliştirilen bu sistem, günümüzde WOS'un temelini oluşturmuştur. WOS, bugün itibarıyla bilimsel çalışmaların keşfi, analizi ve atıf araması için en önemli platformlardan biri olarak kabul edilmektedir ([Li vd., 2018](#)). İçeriğinde yaklaşık 34.000 dergi barındıran bu veri tabanı, bilimsel araştırmaların dengeli ve titiz bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanımaktadır ([Birkle vd., 2020](#)).

Pek çok alanda olduğu gibi, hava kirliliği üzerine yapılan çalışmalarda da yapay zekâ tabanlı yöntemlerin kullanımı geçmişe dayansa da, 2000'li yıllardan itibaren belirgin bir artış göstermiştir. Bu alandaki öncü çalışmalardan biri, [Song ve Hopke \(1996\)](#)'nin "*Solving the chemical mass balance problem using an artificial neural network*" başlıklı

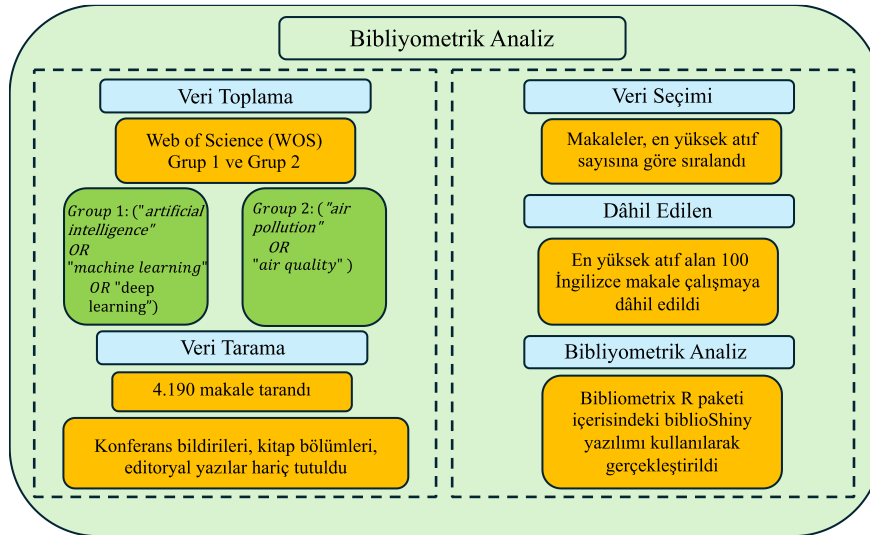
çalışmasıdır. Söz konusu çalışmada, aerosol kaynak belirleme problemlerinin çözümü için ilk kez Geri Yayılımlı Yapay Sinir Ağı (Backpropagation Artificial Neural Network, BP-ANN) yöntemi kullanılmış ve bu yöntemin geleneksel istatistik tekniklere kıyasla yüksek gürültülü verilerde (%5-15) daha etkili sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Bu metodolojik atılımı takiben, yapay zekâ tabanlı uygulamaların hava kirliliği araştırmalarında giderek yaygınlaştığı gözlemlenmiş olup, çalışma kapsamı, 2004–2024 yılları arasındaki literatürü içerecek şekilde belirlenmiştir. Veri toplama süreci, 8 Ocak 2025 tarihinde Web of Science (WOS) veri tabanında, iki gruptan oluşan anahtar kelimeler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan sorgulama sonucunda, belirtilen yıllar arasında yayımlanmış toplam 4.190 İngilizce makale tespit edilmiştir. 2025 yılına ait yayınların atıf alma süreci henüz tamamlanmadığı ve yılın büyük bir bölümü değerlendirme dışında kaldığı için, bu yıla ait veriler analiz kapsamına dâhil edilmemiştir. Konferans bildirileri, kitap bölümleri, editoryal mektuplar çalışma kapsamı dışında tutulmuştur. Çalışmada belirlenen anahtar kelimeler aşağıda verilmiştir.

Group 1: ("artificial intelligence" OR "machine learning" OR "deep learning")

AND

Group 2: ("air pollution" OR "air quality")

Makale seçimi sürecinde, makaleler aldıkları atıf sayısına göre büyükten küçüğe doğru sıralanmıştır. Araştırmaya, toplamda en yüksek atıf alan 100 makale dâhil edilmiştir. Tarama sürecinde belirlenen makaleler, çalışmanın amacına uygunluk açısından detaylı bir şekilde incelenmiştir. Özet ve/veya başlık bilgisi yeterli olmayan durumlarda, ilgili makalelerin tam metinlerine erişilerek kontrolü sağlanmıştır. Makale seçim sürecine ilişkin detaylı bilgi ve akış diyagramı Şekil 1'de sunulmaktadır.

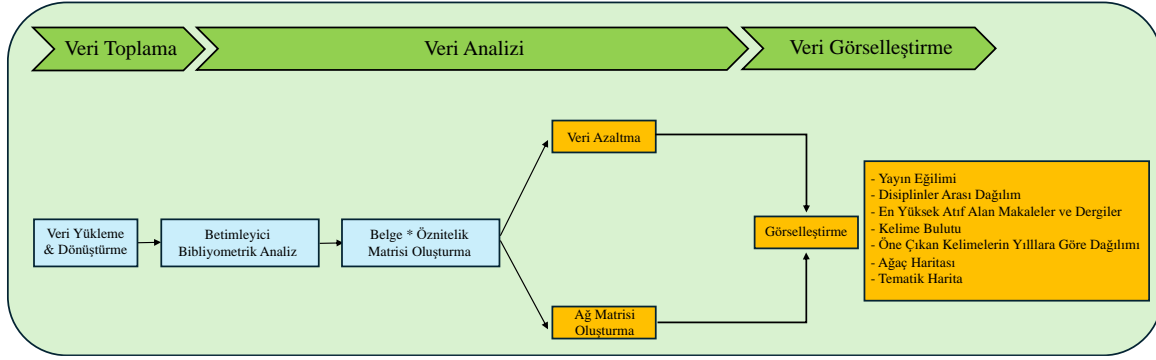


Şekil 1: Makalelerin tarama sürecine ait akış diyagramı

2.2. Veri Analizi Süreci

Bu çalışmada, en yüksek atıf alan makaleler belirlenerek ilgili veriler sisteme yüklenmiştir. Yayın yaşı ile atıf performansı arasındaki ilişki ve atıf sayısı ile atıf yoğunluğu arasındaki bağlantı, Pearson korelasyon analizi ile değerlendirilmiştir. Pearson korelasyon analizi, iki değişken arasındaki doğrusal ilişkinin yönünü ve gücünü belirlemek için kullanılan bir istatistiksel yöntem olup, bu çalışmada değişkenler arasındaki ilişkiyi ölçmek amacıyla uygulanmıştır. Analizlerin gerçekleştirilmesi için belirlenen dönem, 2004–2013 ve 2014–2024 olmak üzere iki farklı zaman dilimine ayrılmıştır. Her bir zaman dilimi için atıf sayıları ve atıf yoğunlukları incelenmiş, yapay zekâ tabanlı yöntemlerin hava kirliliği araştırmalarındaki bilimsel etkisi ve bu etkinin zaman içerisindeki değişimi analiz edilmiştir. Bu kapsamda, zaman dilimi analiziyle elde edilen veriler, literatürün bilimsel etkisinin farklı dönemlerde nasıl değiştiğini anlamak ve araştırma dinamiklerini ortaya koymak için detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir.

Bibliyometrik analizler, RStudio programı kullanılarak, Bibliometrix R paketi (<http://www.bibliometrix.org>) içerisindeki biblioShiny yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir (Aria & Cuccurulla, 2017). Açık kaynak kodlu ve R programlama dili ile geliştirilmiş olan bu paket, analiz süreçlerinde kullanılmış ve Aria ve Cuccurulla (2017) tarafından önerilen yönergeler temel alınarak uygulanmıştır. Bibliyometrik iş akış şemasına ait iş akış diyagramı Şekil 2'de verilmiştir. Bu yöntem, yapay zekâ tabanlı yöntemlerin hava kirliliği araştırmalarındaki etkisini detaylı bir şekilde incelemek için önemli bir araç sağlamıştır.



Şekil 2: Bibliyometrik iş akış şeması (Aria & Cuccurullo (2017)'den uyarlanmıştır)

3. Bulgular ve Tartışma

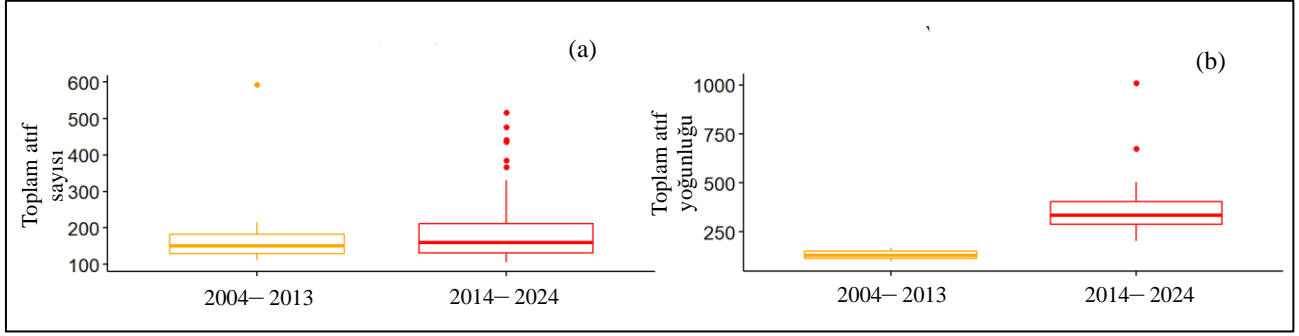
3.1. Yüksek Atıf Alan Yayınların Atıf Dinamikleri, Bilimsel İlişkileri ve Zaman Dilimlerine Göre Toplam Atıf Sayısı ve Atıf Yoğunluğundaki Eğilimleri

Bu çalışmanın temel amacı, hava kirliliği araştırmalarında yapay zekâ tabanlı yöntemlerin etkisini ve bu alandaki literatürün evrimini derinlemesine analiz etmektir. Hava kirliliği, hem çevresel hem de insan sağlığı açısından önemli bir sorun olmakla birlikte, bu sorunun anlaşılması ve çözümüne yönelik yenilikçi yaklaşımlar gerektirmektedir. Yapay zekâ tabanlı yöntemler, büyük veri setlerinin analizini kolaylaştırarak hava kirliliği çalışmalarına yeni bir boyut kazandırmıştır. Ancak, bu alandaki yöntemlerin nasıl evrildiği, hangi alanlarda yoğunlaştığı ve gelecekte hangi yönlere odaklanılması gerektiği konuları detaylı incelemeyi gerektirmektedir. Bu doğrultuda, çalışma kapsamında gerçekleştirilen bibliyometrik analiz ve atıf analizi, iki ana hedefe hizmet etmektedir. İlk olarak, literatürde öne çıkan önemli bilimsel makaleleri ve bu makalelerin sunduğu katkıları belirlemek; ikinci olarak ise, yapay zekâ tabanlı yöntemlerin hava kirliliği araştırmalarındaki gelişimini anlamak ve bu yöntemlerin bilimsel etkisini ölçmektir. Çalışmada, 2004–2013 ve 2014–2024 dönemlerini kapsayan iki ayrı zaman dilimi incelenmiş ve bu dönemlerde literatürün dinamikleri sayısal olarak karşılaştırılmıştır.

2004–2013 ve 2014–2024 dönemlerine ait toplam atıf sayısı Tablo 1’de verilmiştir. Elde edilen verilere göre, 2004–2013 döneminde makale başına ortalama atıf sayısı 196.8 iken, bu sayı 2014–2024 döneminde 191.4’e düşmüştür. Ancak toplam atıf sayısı, 2004–2013 döneminde 1,968, 2014–2024 döneminde ise 17,223 olarak hesaplanmıştır. Bu artış, 2014–2024 döneminde daha fazla sayıda makale yayımlanmasının etkisini göstermektedir. Şekil 3a, dönemler arasındaki toplam atıf sayısı dağılımını vermektedir. 2004–2013 döneminde atıflar 100–200 aralığında yoğunlaşmış, atıf dağılımı oldukça homojen bir yapı sergilemiştir. Bu dönemde yalnızca bir aykırı değer (~600 atıf) gözlenmiştir. Buna karşın, 2014–2024 döneminde atıf dağılımı daha geniş bir varyans göstermiş ve özellikle 500 üzerindeki aykırı değerler dikkat çekmiştir. Bu bulgular, yapay zekâ tabanlı çalışmaların hava kirliliği alanında artan etkisini ortaya koymaktadır. Atıf yoğunluğu açısından yapılan analizler, 2014–2024 döneminde önemli bir değişime işaret etmektedir (Tablo 1). 2004–2013 döneminde atıf yoğunluğu ortalama 131.88 iken, bu değer 2014–2024 döneminde 379.1’e yükselmiştir. Ayrıca, 2014–2024 dönemindeki atıf yoğunluğu dağılımında çok daha geniş bir varyans gözlenmiştir. Şekil 3b, dönemler arasındaki atıf yoğunluğunun karşılaştırmasını göstermektedir. 2004–2013 döneminde atıf yoğunluğu yaklaşık 250 civarında sabit bir dağılım sergilemiştir. Buna karşın, 2014–2024 döneminde atıf yoğunluğu belirgin şekilde artmış (~500) ve daha geniş bir varyans kaydedilmiştir. Bu dönemdeki aykırı değerler (~750 ve ~1000), belirli çalışmaların çok yüksek bir bilimsel etki yarattığını işaret etmektedir. Bu bulgular, yapay zekâ tabanlı yöntemlerin yalnızca daha fazla ilgi görmekle kalmadığını, aynı zamanda literatüre derin etkiler bıraktığını ortaya koymaktadır. Özellikle 2014–2024 döneminde hem atıf sayısı hem de atıf yoğunluğunda gözlemlenen artış, yapay zekâ tabanlı hava kirliliği araştırmalarının bilimsel katkısını ve önemini vurgulamaktadır.

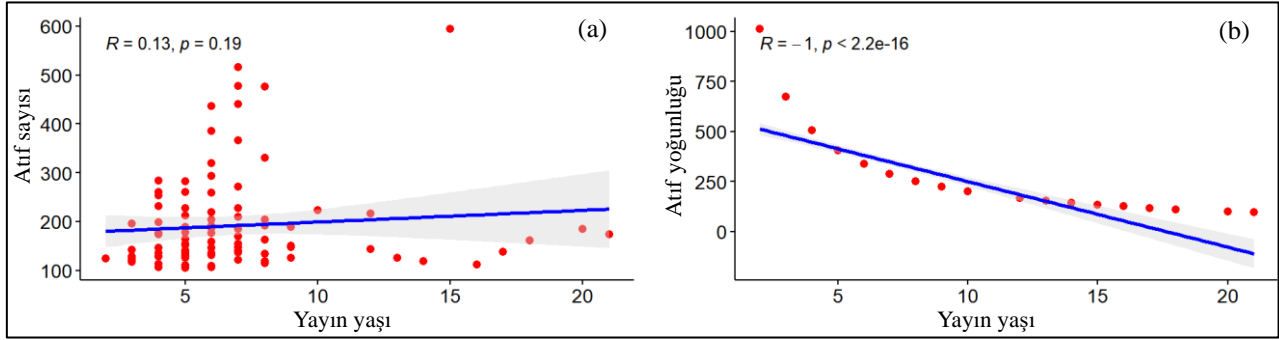
Tablo 1: 2004–2013 ve 2014–2024 dönemlerine ait toplam atıf sayısı ve atıf yoğunluğu istatistikleri

Metrikler	2004–2013 (n = 10)	2014–2024 (n = 90)
Atıf sayısı (Ortalama)	196.8	191.4
En az-En çok	112–594	105–516
Toplam	1,968	17,223
Atıf yoğunluğu (Ortalama)	131.88	379.1
En az-En çok	95.43–167.75	201.5–1011.5
Toplam	1,318.77	34,114.93



Şekil 3: 2004–2013 ve 2014–2024 dönemlerine göre toplam atıf sayısı ve atıf yoğunluğu karşılaştırması: a) makalelerin toplam atıf sayısı dağılımı, b) makalelerin toplam atıf yoğunluğu dağılımı

Yayın yaşı ile atıf sayısı arasındaki ilişki analiz edildiğinde, zayıf bir pozitif korelasyon ($R = 0.13, p = 0.19$) tespit edilmiştir (Şekil 4a). Eski yayınlar genellikle daha fazla atıf potansiyeline sahipken, bu etkinin zamanla kaybolduğu gözlemlenmiştir. Bunun yanında, yayın yaşı ile atıf yoğunluğu arasındaki ilişki güçlü bir negatif korelasyon ($R = -1, p < 2.2e - 16$) göstermiştir (Şekil 4b). Yayın yaşı arttıkça atıf yoğunluğu düzenli olarak azalmış, yeni yayınlar (0–5 yaş aralığında) 500–1000 arasında yüksek atıf yoğunluğuna sahipken, daha eski yayınlar (15–20 yaş aralığında) neredeyse sıfıra düşmüştür. Bu bulgu, literatürdeki yeni çalışmaların bilimsel toplulukta daha fazla yankı uyandırdığını ve yenilikçi yaklaşımların önemini vurgulamaktadır.

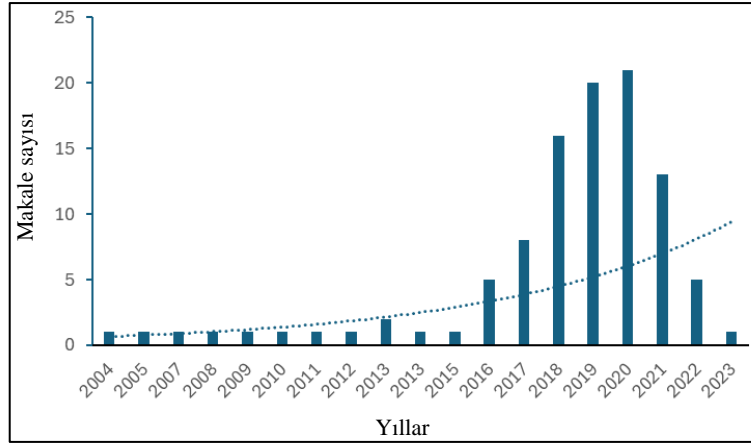


Şekil 4: Yayın yaşı ve atıf performansı ile ilgili atıf sayısı ve atıf yoğunluğu ilişkileri grafiği: a) Yayın yaşı ile atıf sayısı arasındaki ilişki, b) Yayın yaşı ile atıf yoğunluğu arasındaki ilişki

3.2. Hava Kirliliği Araştırmalarındaki Akademik Yayın Eğilimleri

Şekil 5, 2004–2024 yılları arasında yapay zekâ tabanlı yöntemlere dayalı olarak hava kirliliği üzerine yapılan ve en yüksek atıf alan makalelerin yıllara göre eğilimini göstermektedir. Grafik, bu alandaki araştırmalarda zaman içinde belirgin bir artış yaşandığını yansıtmaktadır. 2004–2010 döneminde yıllık makale sayısı 0 ile 2 arasında değişmiştir. Bu durum, hava kirliliği konusundaki çalışmaların oldukça sınırlı olduğuna işaret etmektedir. Bu dönem, konuyla ilgili farkındalığın ve bilimsel ilginin düşük olduğu bir başlangıç evresi olarak değerlendirilebilir. 2011–2016 döneminde makale sayısında kademeli bir artış gözlemlenmiş, yıllık makale sayısı 1 ile 5 arasında seyretmiştir. Araştırma sayısındaki bu artış, hava kirliliğiyle ilgili problemlerin daha geniş bir bilimsel topluluk tarafından ele alınmaya başlandığını ve teknolojik gelişmelerin bu araştırmalara destek verdiğini göstermektedir. Bunun yanında, 2017–2020 yılları arasında dikkat çekici bir artış yaşanmıştır. 2017 yılında 7 olan makale sayısı, 2018’de 15’e, 2019’da 20’ye ve 2020’de zirve noktası olan 21’e ulaşmıştır. Bu dönem, hava kirliliğiyle ilgili araştırmaların yoğun bir şekilde gerçekleştirildiği ve bu alanda yayımlanan makale sayısının hızlı bir şekilde arttığı bir dönemi temsil etmektedir. Söz konusu artışın, büyük ölçüde yapay zekâ tabanlı yöntemlerin hava kirliliği araştırmalarına entegrasyonu ve çevresel problemlerin küresel düzeyde daha fazla önem kazanmasıyla yakından ilişkili olduğu düşünülmektedir. 2020 yılındaki zirve sonrasında, 2021–2023 yılları arasında makale sayısında sırasıyla 13, 6 ve 1 olarak bir azalma eğilimi yaşanmıştır. Bu durum, en çok atıf alan yayın sayısının güncel makalelerde yeterli sayıya ulaşamamasından kaynaklanmaktadır. Ancak bu dönemde de hava kirliliği konusundaki araştırmaların devam ettiği ve belirli bir düzeyde devamlılık gösterdiği gözlemlenmektedir. Grafikte 2024 yılına ait veriler yer almamaktadır. Bibliyometrik analizlerde, yayınların atıf alma süreçlerinin zamana yayıldığı ve bu nedenle ilgili yıl içerisinde yayımlanan çalışmaların henüz yeterli düzeyde atıf almadığı dikkate alınmalıdır. Akademik çıktıların görünürlük kazanarak etki yaratması zaman aldığından, bu döneme ait verilerin kapsamlı değerlendirilebilmesi için belirli bir süre geçmesi gerekmektedir. Bulgular, hava kirliliği konusundaki bilimsel çalışmaların yıllar içinde önemli bir evrim geçirdiğini ve özellikle 2017–2020 yılları arasında yıllık makale sayısı 3 katından fazla artarak büyük bir artış yaşandığını

göstermektedir. Bu eğilim, hava kirliliği sorunlarının bilimsel topluluk tarafından giderek daha fazla ele alındığını ve bu alandaki çalışmaların önem kazandığını ortaya koymaktadır. Yapay zekâ tabanlı yöntemlerin ve büyük veri analiz araçlarının, söz konusu artışta önemli bir rol oynadığı söylenebilir. Ayrıca, çevresel problemler ve iklim değişikliği konularına yönelik küresel farkındalığın artması, hava kirliliği üzerine yapılan araştırmaların hızlanmasında etkili bir faktör olarak değerlendirilebilir.



Şekil 5: 2004–2024 yılları arasında yapay zekâ tabanlı yöntemlere dayalı hava kirliliği araştırmalarında en çok atıf alan makale sayısındaki eğilim

3.3. Hava Kirliliği Araştırmalarının Disiplinler Arası Dağılımı

Hava kirliliği ile ilgili yapılan bilimsel çalışmaların disiplinler arası yapısını anlamak amacıyla, WOS kategorilerine göre makale dağılımı analizi gerçekleştirilmiştir. Tablo 2, WOS veritabanında yer alan en çok makale içeren ilk 10 alanı göstermektedir. “Çevre Bilimleri (Environmental Sciences)” kategorisi incelenen toplam makalelerin %60’ını oluşturarak en yüksek paya sahiptir. Bu durum, hava kirliliği konusunun çevre bilimleri perspektifinden yoğun bir şekilde ele alındığını ve bu disiplinin çalışmalara önemli bir temel oluşturduğunu ifade etmektedir. Bu kategoriyi, sırasıyla %17 ile “Çevre Mühendisliği (Engineering Environmental)” ve %16 ile “Elektrik Elektronik Mühendisliği (Engineering Electrical Electronic)” takip etmektedir. Bu oranlar, hava kirliliği sorunlarının çözümünde mühendislik disiplinlerinin önemini vurgulamaktadır. Özellikle çevresel sorunların mühendislik çözümleriyle ele alındığını ve teknolojik yaklaşımların (örneğin, sensörler, elektrikli cihazlar) katkı sağladığını göstermektedir. %16’lık bir oranla 4. sırada yer alan “Meteoroloji ve Atmosfer Bilimleri (Meteorology Atmospheric Sciences)”, hava kirliliği ile atmosferik süreçlerin analizi açısından kritik bir rol oynamaktadır. Bu kategori, hava kirliliği ile atmosferik süreçlerin analizinin sıkça ele alındığını ifade etmektedir. Özellikle hava kirliliği ile iklim değişikliği arasındaki ilişkiyi ele alan çalışmaları da kapsamaktadır. “Bilgisayar Bilimleri Yapay Zekâ (Computer Science Artificial Intelligence)” ve “Bilgisayar Bilimleri Bilgi Sistemleri (Computer Science Information Systems)” kategorileri ise, yapay zekâ ve bilgi sistemlerinin hava kirliliği araştırmalarında giderek daha fazla kullanıldığını ortaya koymaktadır. Bu teknolojiler, özellikle hava kirliliği tahmini ve modellemesinde önemli katkılar sağlamaktadır. Ayrıca, %9 oranında katkı sağlayan “Yeşil ve Sürdürülebilir Bilim ve Teknoloji (Green Sustainable Science Technology)” kategorisi, hava kirliliği araştırmalarında sürdürülebilir teknolojilere olan ilginin arttığını ve çevre dostu çözümlerin önem kazandığını göstermektedir.

Tablo 2: Hava kirliliği araştırmalarında WOS kategorilerine göre makale dağılımı

WOS Kategorileri	Makale Sayısı	% (100 Makale İçinde)
Çevre Bilimleri (Environmental Sciences)	60	60
Çevre Mühendisliği (Engineering Environmental)	17	17
Elektrik Elektronik Mühendisliği (Engineering Electrical Electronic)	16	16
Meteoroloji ve Atmosfer Bilimleri (Meteorology Atmospheric Sciences)	16	16
Bilgisayar Bilimleri Yapay Zekâ (Computer Science Artificial Intelligence)	12	12
Yeşil ve Sürdürülebilir Bilim ve Teknoloji (Green Sustainable Science Technology)	9	9
Bilgisayar Bilimleri Bilgi Sistemleri (Computer Science Information Systems)	8	8
Halk Sağlığı, Çevre ve İş Sağlığı (Public Environmental Occupational Health)	7	7
Telekomünikasyon (Telecommunications)	5	5
Disiplinlerarası Mühendislik (Engineering Multidisciplinary)	4	4

%7'lik oranla yer alan “*Halk Sağlığı, Çevre ve İş Sağlığı (Public Environmental Occupational Health)*” kategorisi ise, hava kirliliğinin insan sağlığı üzerindeki etkilerine dair artan bir farkındalığı yansıtmaktadır. Bu kategori, hava kirliliği ile çeşitli hastalıklar arasındaki ilişkiye yönelik önemli araştırmaların yapıldığını ortaya koymaktadır. Sonuçlar, hava kirliliği araştırmalarının disiplinler arası bir yaklaşımla ele alındığını ve özellikle çevre bilimleri, mühendislik ve yapay zekâ gibi alanların bu çalışmaların temelini oluşturduğunu açıkça sunmaktadır.

3.4. Hava Kirliliği Araştırmalarında Öne Çıkan Makalelerin Değerlendirilmesi

Bir makalenin aldığı atıf sayısı, o çalışmanın araştırma alanındaki önemini ve diğer disiplinlere olan potansiyel etkisini değerlendirmede önemli bir ölçüt olarak kabul edilmektedir (Vidal vd., 2022). Hava kirliliği araştırmalarında en çok atıf alan çalışmaların incelenmesi, alanın gelişiminde belirleyici rol oynayan araştırmaların tespit edilmesine ve bu çalışmaların odaklandığı temel konuların anlaşılmasına olanak sağlamaktadır. Tablo 3, yapay zekâ tabanlı yöntemlerle hava kirliliği üzerine yapılan ve en fazla atıf alan çalışmaları özetleyerek kullanılan yöntemlerin etkinliğini ve disiplinler arası katkıların alana sunduğu önemi ortaya koymaktadır. Schneider vd. (2010) çalışması, küresel kentsel alanların haritalanmasını MODIS uydu verileri kullanarak gerçekleştiren önemli bir araştırmadır. Çalışma, iklim, bitki örtüsü ve kentsel topolojiye dayalı tabakalaşma yöntemini kullanarak, bir yıllık MODIS gözlemlerinden elde edilen zamansal ve spektral bilgileri değerlendirmiş ve Ensemble Karar Ağacı (Ensemble Decision Tree, EDT) algoritmasıyla sınıflandırma yapmıştır. Bu yöntem, kentsel ve yapılaşmış alanlarla diğer arazi türleri arasındaki karışıklığı minimize etmiş ve %93 doğruluk oranı sağlamıştır. Çalışma, kentleşmenin çevresel etkileri ile hava kirliliği gibi kritik sorunların anlaşılmasına olanak tanımakta ve literatürde 594 atıf alarak bu alandaki araştırmalara temel bir katkı sunmaktadır. Morawska vd. (2018), düşük maliyetli hava kalitesi sensörlerinin hava kirliliği izleme ve maruziyet değerlendirme süreçlerindeki önemini vurgulamaktadır. Bu sensörler, standart/referans cihazlara kıyasla çok daha düşük maliyetle geniş katılımı ve hava kalitesi bilgisine erişimi mümkün kılarak hava kirliliği izleme süreçlerinde devrim yaratmıştır. Çalışma, bu sensörlerin farklı kullanım alanlarında (sabit dış ortam, mobil dış ortam, kapalı alanlar, kişisel izleme) belirli koşullar altında uygun olabileceğini göstermiştir. Çalışma, 516 atıf alarak literatürde bu alanda önemli bir referans haline gelmiştir. Bu çalışmalar, Tablo 2'deki verilere göre, toplam makalelerin %60'ını kapsayan “*Çevre Bilimleri*” kategorisinin, hava kirliliği araştırmalarında ana odak alanını temsil ettiğini göstermektedir. Huang ve Kuo (2018) çalışmasında, PM_{2.5} konsantrasyonunu tahmin etmek için Evrimsel Sinir Ağı (Convolutional Neural Network, CNN) ve LSTM modellerini birleştiren bir DL modeli (Air Pollution Network, APNet) geliştirmişlerdir. Bu model, akıllı şehirlerde hava kirliliği tahmini ve kontrolü için etkin bir çözüm sunmakta ve literatürde 477 atıf bu alandaki önemini ortaya koymaktadır. Li vd. (2017), hava kirliliği konsantrasyonu tahmini için LSTM tabanlı bir model geliştirmişlerdir. Pekin'deki 12 izleme istasyonundan elde edilen PM_{2.5} verileriyle test edilen model, bir saatlik tahminde %11.93 Ortalama Mutlak Yüzdese Hata (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) değeri ile başarılı sonuçlar elde etmiştir. Çalışma, 476 atıf alarak literatürde önemli bir yere sahip olmuştur. Chen vd. (2018), Çin genelindeki PM_{2.5} seviyelerini tahmin etmek için Uzaktan Algılama (Remote Sensing, RS) verilerini ve ML yöntemlerini bir araya getiren bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışma, 2005–2016 yılları arasındaki günlük PM_{2.5} konsantrasyonlarını yaklaşık 10 km çözünürlükte tahmin ederek, büyük veri analiz araçlarının hava kalitesi tahmini üzerindeki etkisini vurgulamış ve literatürde 441 atıf almıştır. Di vd. (2019), PM_{2.5} konsantrasyonlarını yüksek mekânsal (1 km×1 km) ve zamansal çözünürlükte tahmin eden bir model sunmuş ve literatürde 437 atıf almıştır. Çalışmada, uydu verileri (aerosol optik derinlik), meteorolojik değişkenler (sıcaklık, rüzgar hızı, nem), arazi kullanım bilgileri ve kimyasal taşıma modeli tahminleri gibi veri kaynakları entegre edilmiştir. Sinir Ağı (Neural Network), RF ve Gradyan Artırma (Gradient Boosting) algoritmalarını birleştiren bir model kullanılmıştır. Bu model, PM_{2.5}'in sağlık üzerindeki etkilerini anlamak ve hava kirliliği yönetiminde kullanılmak üzere kapsamlı ve yüksek doğrulukta bir tahmin aracı sunarak disiplinler arası veri entegrasyonunun önemini vurgulamaktadır. Qi vd. (2019), Grafik Konvolüsyonel Sinir Ağları (Graph Convolutional Neural Networks, GCNN) ve LSTM tabanlı hibrit bir modelle PM_{2.5} konsantrasyonlarının mekânsal ve zamansal değişimlerini tahmin etmiş ve 386 atıf almıştır. Çalışmada, farklı istasyonlardan elde edilen veriler graf sinyalleri olarak tanımlanmış ve model, 72 saatlik tahminlerde geri çağırma oranı (%68.45), yanlış alarm oranı (%4.65) ve R² (0.72) değerleriyle üstün bir performans sergilemiştir. Bu çalışma, hava kirliliği tahmininde yapay zekâ tekniklerinin uygulanabilirliğini göstermektedir. Zimmerman vd. (2018), düşük maliyetli hava kalitesi sensörlerinin performansını iyileştirmek için daha güvenilir ölçümler sağlamak amacıyla RF algoritmasını kullanmışlardır. RF ile kalibre edilen sensörler, düşük maliyetli izleme ağlarının veri kalitesini artırmış ve kişisel maruziyet ölçümlerinde Çevre Koruma Ajansı (Environmental Protection Agency, EPA) standartlarını karşılayarak geniş bir uygulama potansiyeli sunmuştur. Çalışma, 366 atıf alarak literatürde bu alandaki önemli katkısını göstermiştir. Bu çalışmalar, hava kirliliği modellemesinde AI, ML, RS ve DL'nin önemini ortaya koymaktadır. Ayrıca, “*Çevre Mühendisliği, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Bilgisayar Bilimleri Yapay Zekâ ve Bilgisayar Bilimleri Bilgi Sistemleri*” kategorilerinin yapay zekâ ve bilgi sistemlerinin hava kirliliği tahmini ve modellemesinde giderek artan önemine işaret etmektedir. Yüksek atıf alan bu makaleler, literatürdeki yönelimlerin anlaşılması ve gelecekteki araştırma alanlarının belirlenmesi için değerli bir temel sunmaktadır. Ayrıca, bu makaleler hava kirliliği araştırmalarında teknolojik yeniliklerin ve disiplinler arası yaklaşımların bilimsel topluluk tarafından giderek daha fazla benimsendiğini göstermektedir.

Tablo 3: Hava kirliliği araştırmalarında en yüksek atıf alan makaleler ve dergiler

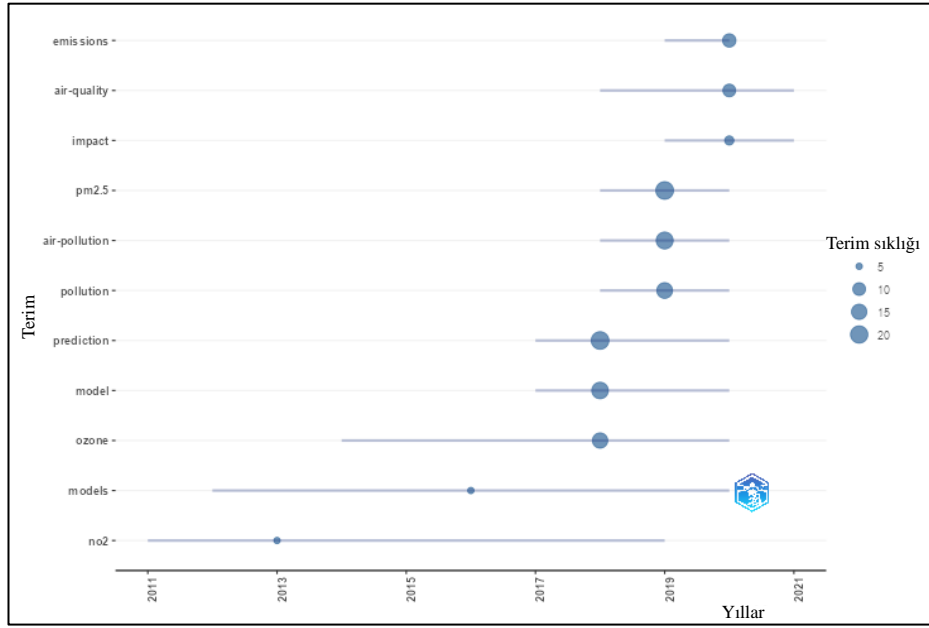
Yazarlar/Referanslar	Makale Başlığı	Dergi Başlığı	Atıf Sayısı
(Schneider vd., 2010)	Mapping global urban areas using MODIS 500-m data: New methods and datasets based on “urban ecoregions”	Remote Sensing of Environment	594
(Morawska vd., 2018)	Applications of low-cost sensing technologies for air quality monitoring and exposure assessment: How far have they gone?	Environment International	516
(Huang & Kuo, 2018)	A deep CNN-LSTM model for particulate matter (PM _{2.5}) forecasting in smart cities	Sensors	477
(Li vd., 2017b)	Long short-term memory neural network for air pollutant concentration predictions: Method development and evaluation	Environmental Pollution	476
(Chen vd., 2018)	A machine learning method to estimate PM _{2.5} concentrations across China with remote sensing, meteorological and land use information	Science of the Total Environment	441
(Di vd., 2019)	An ensemble-based model of PM _{2.5} concentration across the contiguous United States with high spatiotemporal resolution	Environment International	437
(Qi vd., 2019)	A hybrid model for spatiotemporal forecasting of PM _{2.5} based on graph convolutional neural network and long short-term memory	Science of the Total Environment	386
(Zimmerman vd., 2018)	A machine learning calibration model using random forests to improve sensor performance for lower-cost air quality monitoring	Atmospheric Measurement Techniques	366
(Joharestani vd., 2019)	PM _{2.5} prediction based on random forest, XGBoost, and deep learning using multisource remote sensing data	Atmosphere	319
(Li vd., 2017c)	Estimating ground-level PM _{2.5} by fusing satellite and station observations: A geo-intelligent deep learning approach	Geophysical Research Letters	330

3.5. Hava Kirliliği Araştırmalarında Literatürde Öne Çıkan Anahtar Kelimeler

Anahtar kelimeler, belgelerin başlıkları ve referans listelerinde sıkça kullanılan terimlere dayanarak bir bilgisayar algoritması tarafından türetilen indeks terimleridir (Yildirim vd., 2022). Bu terimler, bibliyometrik analizlerde belgelerin içeriklerini daha derinlemesine anlamak ve analiz etmek için önemli bir araç olarak kullanılmaktadır (Zhang vd., 2015). Şekil 6, hava kirliliği üzerine yapılan bibliyometrik analizde, literatürde öne çıkan anahtar kelimelerin görselleştirilmesini sağlayan bir kelime bulutu grafiğini vermektedir. Kelime bulutu, bu alanda yapılan çalışmaların yoğunlaştığı konuları ve kullanılan yöntemleri metrik sıklıklarına göre farklı boyutlarda sunarak okuyuculara bir çerçeve çizmektedir. Şekilde en büyük boyutta yer alan kavramlar, literatürde en sık vurgulanan anahtar kelimelerdir (Mehmood vd., 2022). Bu çalışmada, “deep learning” ve “machine learning” yöntemlerinin hava kirliliği modelleme ve tahmininde daha fazla kullanıldığını göstermektedir. Bu yöntemler, büyük veri analizlerini kolaylaştırarak hava kirliliği araştırmalarında önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca, “air pollution” ve “air quality” çalışmalarının ana odak noktalarını temsil etmektedir. “PM_{2.5}” ve “particulate matter” hava kirliliği araştırmalarında en sık incelenen kirletici türlerinden biridir. PM_{2.5}’in insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle, bu terimlere literatürde sıkça karşılaşılmaktadır. Örneğin, Polezer vd. (2018), PM_{2.5} konsantrasyonlarının, sıcaklık ve bağıl nem gibi çevresel faktörlerle birlikte insan sağlığı üzerindeki etkisini değerlendirmek için ANN yöntemini kullanmışlardır. Benzer şekilde, Rakholia vd. (2022) Vietnam’ın Ho Chi Minh Şehri’nde (HCMC) PM_{2.5} konsantrasyonlarının zamansal özelliklerini analiz ederek, hava kirliliğinin sağlığa zararlı etkilerini azaltmak ve vatandaşları uyarmak amacıyla yapay zekâ tabanlı birden çok adımlı PM_{2.5} tahmin modelleri geliştirmişlerdir. Ayrıca, Chen vd. (2024), halk sağlığını korumak ve çevresel yönetimi desteklemek amacıyla, PM_{2.5}

Tekrarlayan Sinir Ağı (Recurrent Neural Network, RNN) ve LSTM modellerinin performansını araştırmıştır. Benzer şekilde, Mandal vd. (2024), azalan kentsel hava kalitesinin sosyoekonomik istikrar, halk sağlığı ve ekosistemler üzerindeki olumsuz etkilerini ele alarak, çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağlamak amacıyla, O₃ ve öncül kirleticisi azot dioksit (NO₂) eşzamanlı tahmini için Birleşik Spektral-Uzaysal Grafik Sinir Ağı (Unified Spectro-Spatial Graph Neural Network, USS-GNN) modelini geliştirmiştir. Uluocak vd. (2024), 2015–2022 yılları arasında İstanbul ve Ankara'dan elde edilen günlük NO₂ zaman serisi verilerini kullanarak, Türkiye'de hava kirliliğinin tahmini ve kontrolüne yönelik daha etkili modeller geliştirmek amacıyla, bir gün öncesinden NO₂ konsantrasyonunu tahmin etmek için hibrit modeller önermiştir. Literatürde, O₃ ve NO₂ gibi kirleticilerin tahminine yönelik çok sayıda çalışma bulunmaktadır ve bu çalışmaların ortak sonuçları, yapay zekâ tabanlı yöntemlerin başarılı bir şekilde kullanılabilmesini göstermektedir.

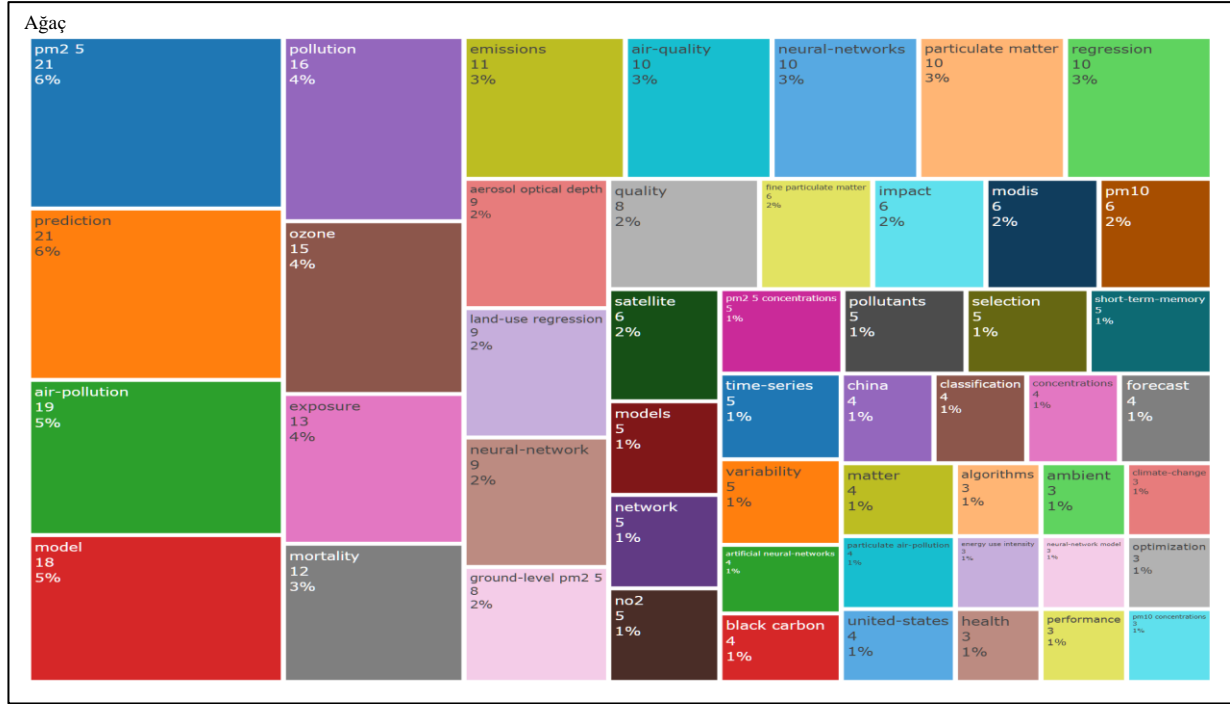
Bu sonuçlar, hava kirliliği araştırmalarının zaman içinde teknolojik yenilikler ve çevresel farkındalıkla birlikte nasıl geliştiğini yansıtmaktadır. Özellikle, yapay zekâ tabanlı yöntemlerin literatürde daha fazla yer bulması, bu alandaki araştırma eğilimlerinin gelecekte de disiplinler arası bir yaklaşımla devam edeceğini işaret etmektedir. Şekil 5, literatürdeki bu dönüşümü ve araştırmaların yönelimlerini anlamak için değerli bir araçtır.



Şekil 7: Hava kirliliği araştırmalarında öne çıkan terimlerin yıllara göre sıklık dağılımı (şekil Rstudio programı, Bibliometrix R-paketi (<http://www.bibliometrix.org>) içinde bibliShiny yazılımı kullanılarak üretilmiştir)

3.7. Hava Kirliliği Araştırmalarında Ağaç Haritası Analizi İle Tematik Odaklarının İncelenmesi

Ağaç haritası analizi, verileri hiyerarşik bir yapı içinde görselleştirerek kategoriler arasındaki ilişkileri ve ağırlıkları net bir şekilde sunan bir veri görselleştirme yöntemidir. Özellikle bibliyometrik analizlerde, bir alandaki temaların veya kavramların önem sıralamasını ve bunların yüzdeleri dağılımını görselleştirmek için sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yöntem, her bir kategoriye veya anahtar kelimeye dikdörtgenler içinde temsil eder ve dikdörtgenlerin büyüklükleri, ilgili kavramın veri setindeki frekansına veya önemine göre değişir. Şekil 8, hava kirliliği araştırmalarında kullanılan yapay zekâ tabanlı yöntemler ve araştırma konularını görselleştiren bir ağaç haritası analizi sunmaktadır. Kelime bulutu ve trend konu analizi bulgularını tamamlayıcı bir nitelik taşımakta olup, çalışmalardaki temel anahtar kelimelerin önem sırasını ve yüzdesel dağılımını detaylandırmaktadır. Buna göre, “PM_{2.5}” (%6), “prediction” (%6), “air pollution” (%5), “model” (%5) ve “pollution” (%4) gibi anahtar kelimelerin sıklıkla kullanılan terimler arasında yer aldığı açıkça gözlemlenmektedir. Bu bulgu, kelime bulutu analizinde de öne çıkan “deep learning” ve “machine learning” gibi yöntemlerin, özellikle PM_{2.5} tahmininde yaygın bir şekilde kullanıldığını desteklemektedir. Ayrıca, “neural networks” (%3), “particulate matter” (%3), ve “regression” (%3) gibi terimler, hava kirliliği modelleme çalışmalarında önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Bu durum, trend konu analizinde de görüldüğü üzere, yapay zekâ tabanlı yöntemlerin hava kirliliği araştırmalarına nasıl katkı sağladığını ortaya koymaktadır. “Emissions” (%3), “ozone” (%4), ve “exposure” (%4) gibi terimler ise, hava kirliliği kaynakları ve etkilerinin daha geniş bir çerçevede ele alındığını ve bu kapsamda sürdürülebilirlik ve insan sağlığı gibi disiplinler arası konuların da incelendiğini belirtmektedir. Örneğin, “ozone” ve “mortality” (%3) gibi terimler, hava kirliliğinin sağlık üzerindeki etkileriyle ilgili önemli bir araştırma alanına işaret etmektedir.



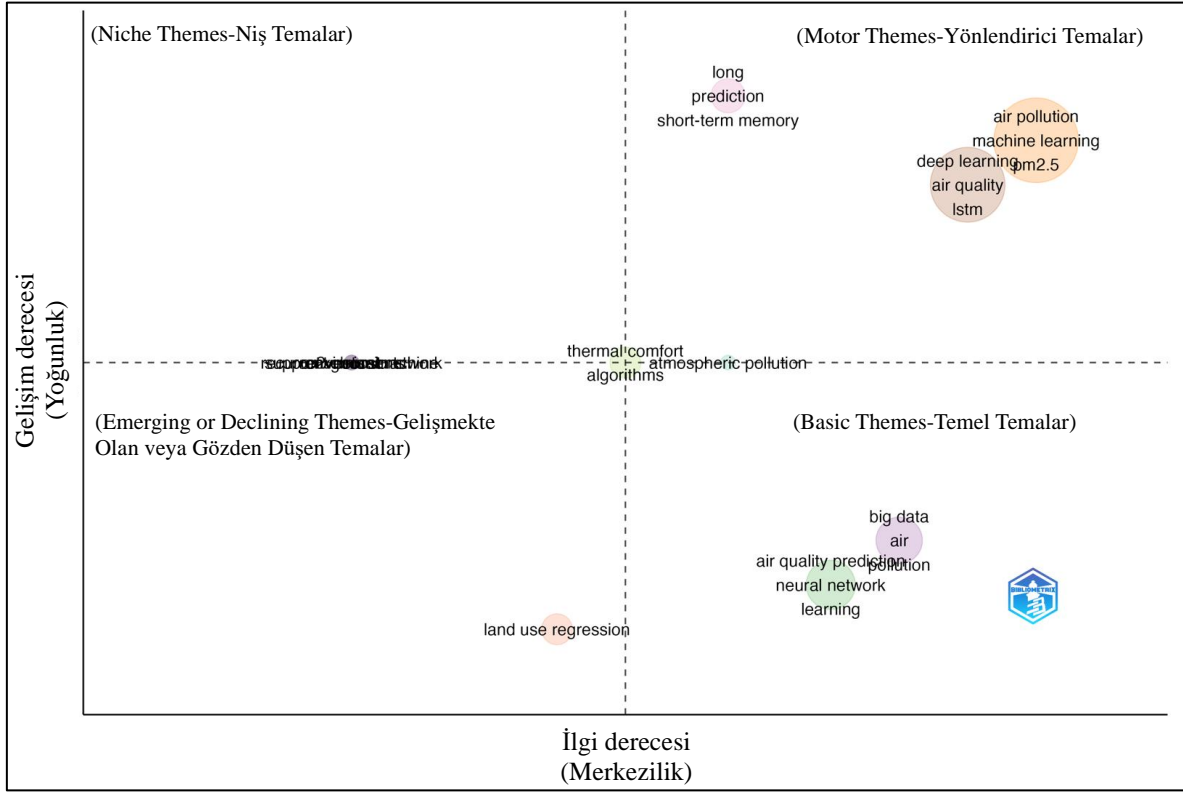
Şekil 8: Hava kirliliği araştırmalarında ağaç haritası analizi ile tematik anahtar kelimelerin yüzdesel dağılımı (şekil Rstudio programı, Bibliometrix R-paketi (<http://www.bibliometrix.org>) içinde bibliShiny yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir)

3.8. Hava Kirliliği Araştırmalarında Tematik Konuların Görselleştirilmesi ve Sınıflandırılması

Hava kirliliği araştırmalarında, yapay zekâ tabanlı yöntemlerin etkisi ve bu yöntemlerle ilişkili araştırma temalarının belirlenmesi, alandaki mevcut eğilimlerin ve gelecekteki odak alanlarının anlaşılması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, tematik haritalar, araştırma konularını görselleştirerek, ilişkili temalar arasındaki merkezilik ve etki düzeylerini değerlendirmek için etkili bir araçtır. Haritalardaki X eksenini, bir temanın merkeziliğini (ilgi derecesi), Y eksenini ise yoğunluk (gelişim derecesi) ile temanın literatürdeki gelişimini ölçmektedir (Yıldırım vd., 2022). Tematik haritalar, belirli bir konu veya temanın detaylarını ve dağılımını ortaya koyarak, araştırma alanındaki kritik noktaların anlaşılmasını sağlamaktadır.

Şekil 9, hava kirliliği üzerine yapılan çalışmalarda tematik haritalar kullanılarak belirlenen araştırma odaklarını göstermektedir. Harita, literatürde öne çıkan temaları dört farklı çeyreğe ayırarak analiz etmiştir. Sağ üst çeyrekte yer alan "air pollution", "PM_{2.5}", "machine learning" ve "deep learning" gibi anahtar kelimeler, yüksek merkezilik ve yüksek yoğunluk düzeyine sahiptir. Bu durum, bu kavramların literatürdeki merkezi rolünü ve alandaki yönlendirici etkilerini vurgulamaktadır. Yapay zekâ tabanlı yöntemlerin, hava kirliliği modelleme ve tahmin çalışmalarında giderek artan bir şekilde benimsendiğini doğrulamaktadır. Sağ alt çeyrekte "air quality prediction", "neural network", "big data" ve "learning" gibi anahtar kelimeler bulunmaktadır. Bu grup, yüksek merkezilik, düşük yoğunluk düzeyine sahip olup, literatürde temel yapıyı oluşturan ve birçok çalışma ile ilişkili olan kavramları temsil etmektedir. Ancak, yoğunluklarının daha düşük olması, bu konuların daha fazla derinleştirilmesi gerektiğini ifade etmektedir. Sol alt çeyrekte "land use regression" gibi konular yer alırken, bu temaların düşük merkezilik ve düşük yoğunluk düzeyine sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, bu temaların literatürde sınırlı sayıda çalışıldığını ancak belirli niş alanlarda veya yeni gelişen çalışmalarda önemli olabileceğini göstermektedir. Bu tür konular, yenilikçi yaklaşımlar ile tekrar ele alındığında potansiyel kazanabilir. Son olarak, sol üst çeyrekte "long prediction" ve "short-term memory" gibi temalar yer almaktadır. Literatürde düşük merkezilik ve yüksek yoğunluk düzeyine sahip olan bu temaların daha az çalışıldığı, ancak bu alanların araştırma alanındaki önemini koruduğu gözlemlenmiştir. Bu temalar, belirli uzmanlık alanlarına hitap etmekte ve daha dar bir çerçevede kullanıma sahiptir. Bundan başka, haritanın orta bölgelerinde yer alan "thermal comfort", "algorithms" ve "atmospheric pollution" gibi ara temalar, temel ve ileri araştırma konuları arasında bir köprü işlevi görebileceğini işaret etmektedir.

Sonuç olarak, bu tematik harita, hava kirliliği üzerine yapılan araştırmalarda mevcut eğilimlerin net bir haritasını sunarken, gelecekteki çalışmalara yön vermek için kapsamlı bir çerçeve sağlamaktadır. Motor temalar, mevcut bilgi birikimini derinleştirme ve uygulamalara yönlendirme açısından kritik öneme sahiptir. Aynı zamanda, temel ve niş temaların daha ayrıntılı incelenmesi hem literatürdeki boşlukların doldurulması hem de yenilikçi çalışmaların teşvik edilmesi açısından büyük fırsatlar sunmaktadır. Araştırmacıların, düşük merkezilik düzeyine sahip alanlara odaklanarak yeni yaklaşımlar geliştirmesi, alandaki bilimsel ilerlemeyi destekleyecektir.



Şekil 9: Hava kirliliği araştırmalarında tematik konuların görselleştirilmesi (şekil Rstudio programı, Bibliometrix R-paketi (<http://www.bibliometrix.org>) içinde bibliShiny yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sağ Üst Çeyrek: Araştırma alanında merkezi bir rol oynar ve genellikle bilimsel gelişmeleri yönlendiren temel konuları temsil eder. Sağ Alt Çeyrek: Araştırma alanının temel yapı taşlarını oluşturur ve diğer çalışmalar için bir başlangıç noktası niteliindedir. Sol Alt Çeyrek: Yeni gelişmekte olan potansiyel alanlardır ya da literatürde önemini kaybetmiş konuları temsil eder. Sol Üst Çeyrek: Uzmanlaşmış konulara hitap eder. Belirli bir alanda derinlemesine çalışılmıştır, ancak genel araştırma alanı ile bağlantıları sınırlıdır)

4. Sonuç

Bu çalışma, hava kirliliği araştırmalarında yapay zekâ tabanlı yöntemlerin etkisi ve bu yöntemlerle ilişkili araştırma temalarının analizi açısından önemli bulgular sunmaktadır. Çalışmada özellikle 2014 sonrası dönemde yapay zekâ tabanlı yöntemlerin hava kirliliği çalışmalarında giderek artan bir öneme sahip olduğu görülmüştür. Benzer şekilde, Masood ve Ahmad (2021) yapay zekâ tabanlı yöntemlerin hava kirliliği tahmininde geniş bir uygulama alanı bulunduğunu ve bu yöntemlerin hava kirliliği araştırmalarında bir paradigma değişimi yarattığını vurgulamışlardır. Özellikle, ANN'nin hem gaz hem de partikül kirleticileri kabul edilebilir doğruluk seviyelerinde ve birkaç saatten birkaç güne kadar değişen zaman ölçeklerinde başarıyla tahmin ettiği belirlenmiştir. Bu bulgular, yapay zekâ tabanlı yaklaşımların hava kirliliği tahminindeki etkinliğini ve bu yöntemlerin literatürdeki artan önemini güçlü bir şekilde desteklemektedir.

Çalışma atıf yoğunluğu ve atıf sayıları bakımından değerlendirildiğinde, 2014–2024 dönemi, 2004–2013 dönemine kıyasla hem daha geniş bir dağılım hem de daha yüksek değerler sergilemiştir. Bu durum, bu dönemde yapılan çalışmaların daha fazla dikkat çektiğini ve bilimsel alandaki etkilerinin arttığını ortaya koymaktadır. 2004–2024 yılları arasındaki iki dönemin karşılaştırmalı analizi, ilgili alanda önemli bir artış yaşandığını belirginleştirmiştir. 2004–2013 döneminde atıf yoğunluğunun sabit ve sınırlı bir düzeyde kalmasına karşın, 2014–2024 döneminde atıf yoğunluğu ve toplam atıf sayısında belirgin bir artış gözlenmiştir. Özellikle, 2014 sonrası yayımlanan çalışmaların literatürde daha yüksek bir bilimsel etki yarattığı tespit edilmiştir. Bu durum, yapay zekâ tabanlı yöntemlerin bu dönemde daha yaygın bir şekilde benimsenmesiyle ilişkilendirilmiştir.

Yayın yaşı ile atıf yoğunluğu arasındaki negatif korelasyon bulunmaktadır. Bu da yayın yaşı arttıkça atıf yoğunluğunun belirgin şekilde azaldığını ifade eder. Özellikle, 0–5 yaş aralığındaki yeni yayınların yüksek atıf yoğunluğuna sahip olması, bu alandaki teknolojik yeniliklerin ve disiplinler arası yaklaşımların bilimsel topluluk tarafından hızla kabul gördüğünü göstermektedir. 2014–2024 dönemindeki atıf yoğunluğu analizinde gözlemlenen aykırı değerler, yapay zekâ tabanlı yöntemlerin kullanıldığı çalışmaların diğerlerinden çok daha yüksek bilimsel etki yarattığını ortaya koymaktadır. Çalışmalar, hava kirliliği araştırmalarında literatüre önemli katkılar sunarak temel yapı taşları haline gelmiştir.

Bibliyometrik analiz sonuçlarında, genellikle araştırmacı ağlarının oluşturulması, ülke ve kurum bazlı iş birliği haritaları, yazar ve kurumların üretkenlik analizleri, atıf ağlarının detaylı yapısal analizi ve belirli alt alanlarda derinlemesine tematik incelemeler gibi çıktılar yer alır. Ancak bu çalışmada, bu tür analizlere odaklanılmamış, bunun yerine özellikle yapay zekâ tabanlı yöntemlere dayalı araştırmalardaki atıf eğilimleri, WOS kategorilerine göre makale dağılımı, en çok atıf alan makaleler ve dergiler, literatürde öne çıkan anahtar kelimeler, tematik konular ve zaman içindeki eğilimleri gibi alanlar üzerinde durulmuştur. Ayrıca, ağaç haritası analiziyle tematik odakların incelenmesi, tematik konuların görselleştirilmesi ve sınıflandırılması gibi görselleştirme teknikleri kullanılarak elde edilen veriler değerlendirilmiştir. Bu bulgular, yapay zekâ tabanlı yöntemlerin yalnızca yenilikçi yaklaşımlar olmadığını, aynı zamanda hava kirliliği araştırmalarında derin etkiler yaratarak literatürde önemli bir dönüşüm sağladığı vurgulanmaktadır.

Akademik yayın eğilimleri incelendiğinde, 2004–2024 yılları arasında belirgin bir artış kaydedilmiştir. Özellikle, 2017–2020 dönemi bu alandaki çalışmaların en yoğun şekilde gerçekleştirildiği ve makale sayısının zirveye ulaştığı bir dönemdir. Villacura vd. (2024), hava kirliliği çalışmalarında yayımlanan makalelerin 1980'lerden 2010'lara kadar 28 kat büyüdüğünü belirtmiştir. Benzer şekilde, bu çalışmada da 2014 sonrası dönemde yapay zekâ tabanlı yöntemlerle yapılan araştırmalarda dikkat çekici bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, yapay zekâ tabanlı yöntemlerin hava kirliliği çalışmalarına entegrasyonu ve çevresel sorunların küresel düzeyde daha fazla önem kazanmasının bir sonucu olarak değerlendirilmektedir. Son yıllarda makale sayısında küçük bir düşüş gözlemlense de, bu alana olan ilgi ve çalışmalar belirli bir seviyede devam etmektedir. Genel olarak bu eğilim, yapay zekâ tabanlı yöntemlerin hava kirliliği araştırmalarında inovatif çözümler sunduğunu ve disiplinler arası yaklaşımların bu alandaki önemini artırdığını göstermektedir.

WOS kategorilerine göre yapılan analizler, bu çalışmaların büyük ölçüde çevre bilimleri (%60), mühendislik (%17 çevre, %16 elektrik-elektronik), meteoroloji ve atmosfer bilimleri (%16) gibi disiplinlere dayandığını işaret etmektedir. Ayrıca, yapay zekâ (%12) ve bilgi sistemleri (%8) kategorilerinin, hava kirliliği tahmini ve modellemesi için giderek daha fazla benimsendiği gözlemlenmiştir. Özellikle, en yüksek atıf alan yayınlar incelendiğinde "deep learning" ve "machine learning" yöntemleriyle yapılan çalışmaların PM_{2.5} ve diğer hava kirliliği unsurlarına yönelik tahminlerde öne çıktığı görülmektedir. Li vd. (2023) çalışmalarında PM_{2.5}'in en çok ilgi çeken kirlenici olduğunu ve 2017 yılından itibaren ML yöntemleriyle yapılan uygulamalarda belirgin bir artış yaşandığını belirtmişlerdir.

Araştırma bulgularına göre, literatürde öne çıkan temalar ve anahtar kelimeler değerlendirildiğinde, "deep learning" ve "machine learning" gibi teknolojilerin, hava kirliliği tahmini ve modellemesinde etkili bir şekilde kullanıldığı tespit edilmiştir. ML yöntemi hava kirliliği araştırmalarında uygulanması, olgunlaşma aşamasına ulaşarak özellikle kirlenicilerin kimyasal özelliklerinin analizi, kısa vadeli kirlilik tahminleri, kirlenici tespit süreçlerinin iyileştirilmesi ve emisyon azaltımına yönelik tasarım optimizasyonu gibi alanlarda önemli bir odak noktası haline gelmiştir (Li vd., 2023). Masood ve Ahmad (2021), DL yöntemlerinin hava kirliliği tahmininde daha doğru uzun vadeli ve ani yoğun kirlilik tahminler sağladığını ve bu yöntemlerin önemli avantajlar sunduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca, gelecekte bu tekniklerin doğrusal olmayan karmaşık tahmin problemlerine geniş bir yelpazede uygulanabileceği, optimizasyon algoritmalarındaki ilerlemeler ve model tasarımındaki iyileştirmelerle performanslarının daha da artırılacağı belirtilmiştir. "PM_{2.5}" ve "particulate matter" gibi anahtar kavramların sıkça çalışıldığı ve bu kavramların insan sağlığı üzerindeki etkilerinin araştırmalara yön verdiği görülmüştür. Kelime bulutunda öne çıkan bir diğer anahtar kavram ise "China" olmuştur. Li vd. (2023) çalışmalarında da belirtildiği üzere, hava kirliliği araştırmalarında öne çıkan araştırma grupları ağırlıklı olarak Çin ve Amerika Birleşik Devletleri'nde yer almakta olup, bu iki ülke tüm yayınların %50'sinden fazlasını üretmiştir. Bu bulgu, mevcut çalışmanın sonuçlarını destekler niteliktedir.

Tematik harita analizinden elde edilen bulgular, hava kirliliği ile ilgili çalışmaların yapay zekâ tabanlı yöntemlerle önemli ölçüde ilerlediğini ve bu yöntemlerin hava kalitesi modelleme ve tahmin süreçlerinde giderek daha yaygın hale geldiğini göstermektedir. Özellikle "air pollution", "PM_{2.5}", "machine learning" ve "deep learning" gibi motor temalar, literatürde merkezi bir role sahip olup, gelecekteki çalışmaların temel yönlendiricisi konumundadır. Bununla birlikte, "air quality prediction", "neural network" ve "big data" gibi temel temaların yoğunluk açısından daha fazla derinleştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Bu konular, literatürde geniş bir uygulama alanı sunmakta ve araştırmacılara önemli bir başlangıç noktası sağlamaktadır. Düşük merkezilik ve düşük yoğunluk ile karakterize edilen "land use regression" gibi temaların, literatürde sınırlı bir yer bulmasına rağmen niş alanlar ve yenilikçi yaklaşımlarla değerlendirildiğinde büyük bir potansiyel taşıdığı görülmektedir. Bu bağlamda, tematik harita, hava kirliliği araştırmalarında mevcut eğilimleri ve boşlukları ortaya koyarak, gelecekteki çalışmalar için hem derinleşme hem de yenilikçi yaklaşımlar geliştirme açısından kritik bir yol haritası sunmaktadır.

Hava kirliliği, çevresel ve halk sağlığı açısından küresel bir sorun olmaya devam ederken, bu alanda yapay zekâ tabanlı yöntemlerin sağladığı yenilikçi çözümler giderek daha fazla ön plana çıkmaktadır. Bu yöntemler, hava kirliliği araştırmaları için gerekli bir araç haline gelmiş, etkili uygulamaları geniş çapta ilgi çekmiş ve aynı zamanda literatürdeki evrimi şekillendiren bir paradigma değişimi yarattığını göstermiştir.

Literatür analizi, yapay zekâ tabanlı yöntemlerin yalnızca zaman serisi tahmini ve kirlenici konsantrasyonları modellemesi gibi mevcut uygulamalarda değil, aynı zamanda gelecekteki disiplinler arası çalışmalarda da büyük bir potansiyel taşıdığını ortaya koymaktadır. Benzer şekilde, Masood ve Ahmad (2021), yapay zekâ tabanlı yöntemlerin gelecekte hava kirliliği tahmin sistemlerinin geliştirilmesinde önemli bir rol oynayacağını belirtmişlerdir. Bu doğrultuda, Mehmood vd. (2022), optimizasyon algoritmalarındaki ilerlemeler ve model tasarımındaki gelişmelerin, yapay zekâ tabanlı hava kirliliği tahmin modellerinin performansını daha hassas hale getireceğini vurgulamışlardır. Gelişen

modelleme yaklaşımlarının, hava kalitesinin daha doğru tahmin edilmesine olanak sağlayarak karar vericilerin ve politika yapıcıların daha etkili çevresel önlemler almasına katkı sunacağı öngörülmektedir. Ayrıca, farklı hava koşulları (açık hava, yağmur, kar) ve ışık koşulları (gün ışığı, alacakaranlık, karanlık) altında başarılı sonuçlar verebilen hava kalitesi görüntü tanıma sistemlerinin geliştirilmesi, halkın hava kirliliği ile ilgili zamanında önlem almasına yardımcı olacak önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir. Buna ek olarak, Guo vd. (2022), hava kirletici konsantrasyonlarının tahmininde yapay zekâ tabanlı yaklaşımların giderek daha fazla benimsenmekte olduğunu vurgulamışlardır. Özellikle, çevre bilimi yöntemleriyle yapay zekâ tekniklerinin entegrasyonu, düşük maliyetli hava kalitesi sensörlerinin kullanımı, iç mekân hava kalitesi izleme sistemleri ve termal konfor analizleri, günümüzde bu alandaki en önemli araştırma odakları arasında yer almaktadır. Bu bulgular, hava kirliliği tahmininde veri odaklı modellemelerin etkisini artırırken, disiplinler arası iş birliklerinin ve yenilikçi teknolojilerin önemini bir kez daha ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışma, yapay zekâ tabanlı yöntemlerin hava kirliliği tahmini üzerindeki etkisini değerlendirerek, literatürde sunulan bulguları destekler nitelikte bir çerçeveye sunmaktadır. Yapay zekâ tekniklerinin hava kirliliği tahmininde giderek daha yaygın bir şekilde benimsendiği görülmektedir. Çalışma, bu tekniklerin hava kalitesi yönetiminde daha bilinçli kararlar alınmasına katkı sağladığını ve çevresel sürdürülebilirlik çabalarına önemli bir destek sunduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, hava kirliliği tahmin modellerinin geliştirilmesi, ilgili paydaşlara daha etkin ve uygulanabilir çözümler sunarak, çevresel planlamada veri odaklı stratejilerin benimsenmesini teşvik etmektedir. Bu bağlamda, çalışma hem bilimsel topluluk hem de politika yapıcılar için referans niteliği taşımakta ve hava kirliliği tahminine yönelik yapay zekâ tabanlı yaklaşımların önemini vurgulamaktadır.

Teşekkür

Verilerin analiz edilmesi ve anlamlı sonuçların elde edilmesinde güçlü istatistiksel ve grafiksel yetenekleriyle katkı sağlayan Bibliometrix R paketi (<http://www.bibliometrix.org>) içerisindeki bibliShiny yazılımı geliştiricilerine, ayrıca araştırmanın temelini oluşturan kapsamlı bibliyometrik verileri sağlayan Clarivate Analytics Web of Science, WOS veritabanına teşekkür edilmektedir.

Kaynaklar

- Ansari, A., & Quaff, A. R. (2024). Bibliometric analysis of Indian research trends in air quality forecasting research using machine learning from 2007–2023 using Scopus database. *Environmental Research and Technology*, 7(3), 356–377. <https://doi.org/10.35208/ert.1434390>
- Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). Bibliometrix: an R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959–975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- Awasthi, A., Pattanayak, K. C., Tiwari, P. R., Panda, S. K., Gautam, S., Choudhury, T., & Sar, A. (2024). Air quality monitoring (AQM) and prediction. In A. Awasthi, K. C. Pattanayak, G. Dhiman, & P. R. Tiwari (Eds.), *Artificial intelligence for air quality monitoring and prediction* (Vol. 1, pp. 1–23). CRC Press.
- Birkle, C., Pendlebury, D., Schnell, J., & Adams, J. (2020). Web of science as a data source for research on scientific and scholarly activity. *Quantitative Science Studies*, 1, Article 3550, 1–14. https://doi.org/10.1162/qss_a_00018
- Chen, G., Li, S., Knibbs, L. D., Hamm, N. A. S., Cao, W., Li, T., Guo, J., Ren, H., Abramson, M. J., & Guo, Y. (2018). A machine learning method to estimate PM_{2.5} concentrations across China with remote sensing, meteorological and land use information. *Science of the Total Environment*, 636, 52–60. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.251>
- Chen, J., Chen, Q., Hu, L., Yang, T., Yi, C., & Zhou, Y. (2024). Unveiling trends and hotspots in air pollution control: a bibliometric analysis. *Atmosphere*, 15, Article 630. <https://doi.org/10.3390/atmos15060630>
- da Silva Filho, A. M., da Silva, I. J., Queila, K., Brito, D., Sobrinho, T. G., & Chaves, L. H. G. (2020). Air pollution: bibliometric analysis and space-temporal distribution of specialized scientific production. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 7(10), 331–341. <https://dx.doi.org/10.22161/ijaers.710.38>
- Di, Q., Amini, H., Shi, L., Kloog, I., Silvern, R., Kelly, J., Sabath, M. B., Choirat, C., Koutrakis, P., Lyapustin, A., Wang, Y., Mickley, L. J., & Schwartz, J. (2019). An ensemble-based model of PM_{2.5} concentration across the contiguous United States with high spatiotemporal resolution. *Environment International*, 130, Article 104909. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.104909>
- Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: an overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 133, 285–296. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070>
- European Union. (2021). *Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe*. Official Journal of the European Union. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:152:0001:0044:en:PDF>
- 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 114071. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114071>
- Guo, Q., Ren, M., Wu, S., Sun, Y., Wang, J., Wang, Q., Ma, Y., Song, X., & Chen, Y. (2022). Applications of artificial intelligence in the field of air pollution: a bibliometric analysis. *Frontiers in Public Health*, 10, Article 933665. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.933665>

- Hamer, P. D., Walker, S-E., Sausa Santos, G., Vogt, M., Vo Thanh, D., Lopez Aparicio, S., Schneider, P., Ramacher, M. O. P., & Karl, M. (2020). The urban dispersion model EPISODE v10.0–Part 1: an eulerian and sub-grid-scale air quality model and its application in Nordic winter conditions. *Geoscientific Model Development*, *13*, 4323–4353. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-4323-2020>
- Hau, Y. S. (2024). Artificial intelligence and air pollution: a bibliometric analysis from 2012 to 2022. *International Journal of Advanced Smart Convergence*, *13*(1), 48–56. <https://dx.doi.org/10.7236/IJASC.2024.13.1.48>
- Houdou, A., Badisy, I. E., Khomsi, K., Abdala, S. A., Abdulla, F., Najmi, H., Obtel, M., Belyamani, L., Ibrahim, A., & Khalis, M. (2024). Interpretable machine learning approaches for forecasting and predicting air pollution: a systematic review. *Aerosol and Air Quality Research*, *24*(1), Article 230151. <https://doi.org/10.4209/aaqr.230151>
- Huang, C., & Kuo, P. (2018). A deep CNN-LSTM model for particulate matter (PM_{2.5}) forecasting in smart cities. *Sensors*, *18*, Article 2220. <https://doi.org/10.3390/s18072220>
- Joharestani, M. Z., Cao, C., Ni, X., Bashir, B., & Talebiesfandarani, S. (2019). PM_{2.5} prediction based on random forest, XGBoost, and deep learning using multisource remote sensing data. *Atmosphere*, *10*, Article 373. <http://doi.org/10.3390/atmos10070373>
- Koseoglu, M. A., Rahimi, R., Okumus, F., & Liu, J. (2016). Bibliometric studies in tourism. *Annals of Tourism Research*, *61*, 180–198. <https://doi.org/10.1016/j.annals.2016.10.006>
- Li, Y., Wang, Y., Rui, X., Li, Y., Li, Y., Wang, H., Zuo, J., & Tong, Y. (2017a). Sources of atmospheric pollution: a bibliometric analysis. *Scientometrics*, *112*, 1015–1045. <https://doi.org/10.1007/s11192-017-2421-z>
- Li, X., Peng, L., Yao, X., Cui, S., Hu, Y., You, C., & Chi, T. (2017b). Long short-term memory neural network for air pollutant concentration predictions: method development and evaluation. *Environmental Pollution*, *231*, 997–1004. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.114>
- Li, T., Shen, H., Yuan, Q., Zhang, X. X., & Zhang, L. (2017c). Estimating ground-level PM_{2.5} by fusing satellite and station observations: a geo-intelligent deep learning approach. *Geophysical Research Letters*, *44*(23), 985–993. <https://doi.org/10.1002/2017GL075710>
- Li, K., Rollins, J., & Yan, E. (2018). Web of science use in published research and review papers 1997–2017: a selective, dynamic, cross-domain, content-based analysis. *Scientometrics*, *115*, 1–20. <https://doi.org/10.1007/s11192-017-2622-5>
- Li, Y., & Sun, Y. (2021). Modeling and predicting city-level CO₂ emissions using open access data and machine learning. *Environmental Science and Pollution Research*, *28*(15), 19260–19271. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12294-7>
- Li, Y., Sha, Z., Tang, A., Goulding, K., & Liu, X. (2023). The application of machine learning to air pollution research: a bibliometric analysis. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *257*, Article 114911. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114911>
- Lin, H. (2024). Bibliometric analysis of traffic-related air pollution: using citeSpace to explore the knowledge structure and trends. *Environmental Research Communications*, *6*, Article 022002. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ad2a92>
- Luo, X., Yang, Q., Zheng, D., Tian, H., Chen, L., Wu, J., Ji, Z., Chen, Y., & Li, Z. (2022). A bibliometric and visualization analysis on the association between chronic exposure to fine particulate matter and cancer risk. *Frontiers in Public Health*, *10*, Article 1039078. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.1039078>
- Mandal, S., Boppani, S., Dasari, V., & Thakur, M. (2024). A bivariate simultaneous pollutant forecasting approach by unified spectro-spatial graph neural network (USSGNN) and its application in prediction of O₃ and NO₂ for New Delhi, India. *Sustainable Cities and Society*, *114*, Article 105741. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105741>
- Marrakchi, N., Bergam, A., Fakhouri, H., & Khomsi, K. (2024). Air quality predicting using lstm recurrent neural network in Tangier: a comparative analysis detecting ozone concentration peaks. *Palestine Journal of Mathematics*, *13*(1), 209–221.
- Marvi, R., & Foroudi, M. M. (2023). Bibliometric analysis. In P. Foroudi & C. Dennis (Eds.), *Researching and analysing business: research methods in practice* (Vol. 3, pp. 43–54), Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003107774-4>
- Masood, A., & Ahmad, K. (2021). A review on emerging artificial intelligence (AI) techniques for air pollution forecasting: fundamentals, application and performance. *Journal of Cleaner Production*, *322*, Article 129072. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129072>
- Mehmood, K., Bao, Y., Saifullah, C. W., Khan, M. A., Siddique, N., Abrar, M. M., Soban, A., Fahad, S., & Naidu, R. (2022). Predicting the quality of air with machine learning approaches: current research priorities and future perspectives. *Journal of Cleaner Production*, *379*, Article 134656. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134656>
- Menares, C., Perez, P., Parraguez, S., & Fleming, Z. L. (2021). Forecasting PM_{2.5} levels in Santiago de Chile using deep learning neural networks. *Urban Climate*, *38*, Article 100906. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100906>
- Morawska, L., Thai, P. K., Liu, X., Asumadu-Sakyi, A., Ayoko, G., Bartonova, A., Bedini, A., Chai, F., Christensen, B., Dunbabin, M., Gao, J., Hagler, G. S. W., Jayaratne, R., Kumar, P., Lau, A. K. H., Louie, P. K. K., Mazaheri, M., Ning, Z., Motta, N., Mullins, B., Rahman, Md M., Ristovski, Z., Shafiei, M., Tjondronegoro, D., Westerdahl, D., & Williams, R. (2018). Applications of low-cost sensing technologies for air quality monitoring and exposure assessment: how far have they gone?. *Environment International*, *116*, 286–299. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.04.018>
- Nazli, S. N., Vilcins, D., Sly, P. D., Razak, A. A., Sabri, N., & Ibrahim, T. N. B. T. (2024). Indoor air quality: bibliometric analysis of the published literature between 2018 and 2023. *Environmental Quality Management*, *34*, Article e22297. <https://doi.org/10.1002/tqem.22297>
- Polezer, G., Tadano, Y. S., Siqueira, H. V., Godoi, A. F. L., Yamamoto, C. I., de André, P. A., Pauliquevis, T., Andrade, M. F., Oliveira, A., Saldiva, P. H. N., Taylor, P. E., & Godoi, R. H. M. (2018). Assessing the impact of PM_{2.5} on respiratory disease using artificial neural networks. *Environmental Pollution*, *235*, 394–403. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.12.111>
- Qi, Y., Li, Q., Karimian, H., & Liu, D. (2019). A hybrid model for spatiotemporal forecasting of PM_{2.5} based on graph convolutional neural network and long short-term memory. *Science of the Total Environment*, *664*, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.333>
- Rakholia, R., Le, Q., Vu, K., Ho, B. Q., & Carbajo, R. S. (2022). AI-based air quality PM_{2.5} forecasting models for developing countries: a case study of Ho Chi Minh City, Vietnam. *Urban Climate*, *46*, Article 101315. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101315>
- Ramadan, M. N. A., Ali, M. A. H., Khoo, S. Y., Alkhedher, M., & Alherbawi, M. (2024). Real-time IoT-powered AI system for monitoring and forecasting of air pollution in industrial environment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *283*, Article 116856. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116856>

- Rautela, K. S., & Goyal, M. K. (2024). Transforming air pollution management in India with AI and machine learning technologies. *Scientific Report*, *14*, Article 20412. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71269-7>
- Schneider, A., Friedl, M. A., & Potere, D. (2010). Mapping global urban areas using MODIS 500-m data: new methods and datasets based on 'urban ecoregions'. *Remote Sensing of Environment*, *114*(8), 1733–1746. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.03.003>
- Song, X. H., & Hopke, P. K. (1996). Solving the chemical mass balance problem using an artificial neural network. *Environmental Science & Technology*, *30*, 531–535. <https://doi.org/10.1021/es950281o>
- Türk, B. (2022). Important factors affecting the quality of indoor air and a bibliometric analysis. *Sakarya University Journal of Science*, *26*(3), 608–619. <https://doi.org/10.16984/sofenbilder.996443>
- Uluocak, I., Pinar, E., & Bilgili, M. (2024). Atmospheric NO₂ concentration prediction with statistical and hybrid deep learning methods. *Environmental and Ecological Statistics*, *32*(1), 89–118. <https://doi.org/10.1007/s10651-024-00637-3>
- Vidal, M. S., Menon, R., Yu, G. F. B., & Amosco, M. D. (2022). Environmental toxicants and preterm birth: a bibliometric analysis of research trends and output. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *19*(5), Article 2493. <https://doi.org/10.3390/ijerph19052493>
- Villacura, L., Sánchez, L. F., Catalán, F., Toro A, R., & Leiva, G. M. A. (2024). An overview of air pollution research in Chile: bibliometric analysis and scoping review, challenger and future directions. *Heliyon*, *10*(3), Article e25431. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25431>
- World Health Organization. (2021a). *Air pollution causes 13 deaths per minute worldwide*. <https://www.who.int/multi-media/details/air-pollution-climate-change>
- World Health Organization. (2021b). *COP26 special report on climate change and health*. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240036727>
- Yildirim, G., Rahman, A., & Singh, V. P. (2022). A bibliometric analysis of drought indices, risk, and forecast as components of drought early warning systems. *Water*, *14*(2), Article 253. <https://doi.org/10.3390/w14020253>
- Zhang, J., Yu, Q., Zheng, F., Long, C., Lu, Z., & Duan, Z. (2015). Comparing keywords plus of WOS and author keywords: a case study of patient adherence research. *Journal of the Association for Information Science and Technology*. *67*(4), 967–972. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/asi.23437>
- Zimmerman, N., Presto, A. A., Kumar, S. P. N., Gu, J., Haurlyliuk, A., Robinson, E. S., Robinson, A. L., & Subramanian, R. (2018). A machine learning calibration model using random forests to improve sensor performance for lower-cost air quality monitoring. *Atmospheric Measurement Techniques*, *11*, 291–313. <https://doi.org/10.5194/amt-11-291-2018>
- Zupic, I., & Čater, T. (2015). Bibliometric methods in management and organization. *Organizational Research Methods*, *18*(3), 429–472. <https://doi.org/10.1177/1094428114562629>