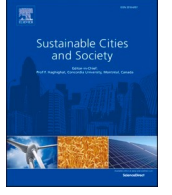




Sürdürülebilir Şehirler ve Toplum

dergi ana sayfası www.elsevier.com/locate/scs

Şehirler iklim nötrlüğü ve hava kalitesi çabalarını sinerji haline getirmeye hazır mı?

G. Ulpiani ^{a,*}, E. Pisoni ^(aa), a), J. Bastos F. Monforti-Ferrario, N. Vettors ^{b)}^a Avrupa Komisyonu, Ortak Araştırma Merkezi (JRC), Ispra, İtalya^b Avrupa Komisyonu, Ortak Araştırma Merkezi (JRC), Brüksel, Belçika

ARTICLE INFO

Anahtar kelimeler:

Hava kalitesi
PM_{2.5}
İklim nötrlüğü
Sera gazı emisyonları Kentsel
politika
Ortak faydalar

ABSTRACT

Bu çalışma, İklim-Nötr ve Akıllı Şehirler Misyonu kapsamında uygun bulunan ve dolayısıyla 2030 yılına kadar net sıfır sera gazı (GHG) emisyonu hedefleyen 362 (çoğunlukla Avrupa) şehirde iklim değişikliğinin azaltılması ile hava kalitesi girişimlerinin uyumunu araştırmaktadır. Fiziksel özellikler, politika çerçeveleri ve yerel yönetim eylemleri dikkate alınarak ortam hava kalitesi, özellikle PM_{2.5} konsantrasyon seviyeleri ve sera gazı emisyonları incelenmektedir. Araştırma, kuzey şehirlerinin daha iyi hava koşulları sergilediği ve sera gazı emisyonları ile hava kirliliğine katkıda bulunan sektörler arasında güçlü bir korelasyon olduğu, hava kalitesinde kuzeyden güneye bir geçiş olduğunu ortaya koymaktadır. Şehirlerin stratejilerine sektörler arası planlar hakimdir ve hava kalitesinin iklim azaltımının ortak faydası olarak değerlendirilmesi yaygın bir uygulamadır; bu da şehirlerin tipik olarak ilgili politika alanları üzerinde uyguladıkları siyasi otorite tarafından desteklenen iklim ve hava kalitesi hedeflerine yönelik sinerjik yaklaşımlar için potansiyel olduğunu göstermektedir. Makine öğrenimi analizi (XGBoost), ulusal bağlamı, nüfus yoğunluğunu ve iklim sınıfını PM_{2.5} seviyelerinin önemli belirleyicileri olarak vurgularken, politika değişkenleri de şehir yönetiminde proaktif sağlık ve adalet önlemlerinin iyileştirilmiş hava kalitesiyle ilişkili olabileceğini göstermektedir. Çalışma, iklim değişikliği ve hava kalitesi sorunlarını etkili bir şekilde ele almak için kentsel politika yapımında ortak fayda yaklaşımını savunmakta ve sonuçları optimize etmek ve ödünleşimleri azaltmak için disiplinler arası araştırma ve yönetim ihtiyacını vurgulamaktadır.

1. Giriş

Küresel toplum iklim değişikliği ve buna bağlı etkilerle acil mücadele ihtiyacıyla boğuşurken, şehirler iklim değişikliği ve diğer çevresel etkilerin azaltılması için etkili stratejilerin uygulanmasında giderek daha fazla odak noktası olarak kabul edilmektedir (IPCC, 2022). Şehirler, yüksek enerji ve kaynak gereksinimleri ile ilişkili olan insan nüfusunu ve ekonomik faaliyetleri yoğunlaştırmaktadır. Çekirdek kentsel alanların 2015 yılında kapsam 1 küresel insan kaynaklı sera gazı (GHG) emisyonlarının yaklaşık üçte birine doğrudan katkıda tahmin edilirken (Crippa vd., 2021), şehirlere atfedilebilen tüketime dayalı GHG emisyonları son yıllarda artış eğilimi göstermiş ve 2020 yılında yaklaşık %70'lik bir kotaya ulaşmıştır (IPCC, 2022). Şehirler aynı zamanda, potansiyel olarak yüksek nüfus maruziyeti nedeniyle önemli halk sağlığı etkilerine sahip olabilen ortam hava kirliliği ile de ilişkilidir (Brauer, 2024; Sang vd., 2022; Yu vd., 2024). Avrupa'da, son yıllarda gözlemlenen genel iyileşmelere rağmen, kentsel alanlarda ince partikül madde ve nitrojen oksitler (sırasıyla PM_{2.5} ve NO_x) gibi kritik hava kirlleticilerinin konsantrasyonları genellikle kabul edilenlerden daha yüksektir.

sağlık için güvenli. 2021 yılında, Avrupa genelindeki kentsel nüfusun %97'si, Dünya Sağlık Örgütü tarafından belirlenen sağlık temelli kılavuz seviyenin üzerinde PM_{2.5} konsantrasyonlarına maruz kalmıştır (EEA, 2023). Benzer şekilde, mevcut sera gazı emisyon azaltım hızı, küresel sıcaklıkları üzerinde anlaşmaya varılan ısınma eşikleri dahilinde tutmak ve yakın vadede iklim istikrarını sağlamak için çok yavaştır (Rogelj vd., 2023; Ulpiani vd., 2023) ve şehirlerin iklim açısından nötr bir duruma ulaşmak için mevcut azaltım başarılarına kıyasla en az dört kat daha fazla çaba göstermesi gerekmektedir (). Ancak, çoğu yerel yönetim için, iklim değişikliği ve hava kalitesi gündeminde ilerlemek, departmanlar ve yönetim düzeyleri arasında gerekli çok düzeyli koordinasyonu oluşturmaya çalışırken (Shtjefni vd., 2024), siyasi, ekonomik, sosyal, düzenleyici riskler gibi karmaşık bir dokuda gezinmeyi gerektirmektedir (Ulpiani ve Vettors, 2023).

İklim değişikliği ve hava kirliliğinin sosyal ve ekonomik yansımaları çok yönlüdür. Hava kirliliğinin küresel sosyal maliyetinin yılda en az 3 trilyon dolar olduğu tahmin edilirken, 1 milyar doların üzerinde maliyeti olduğu tahmin edilen hava ve iklim felaketlerinin ve sıklığı giderek artmaktadır (Erickson, 2017). İyi tarafından bakacak olursak

* Sorumlu yazar: Avrupa Komisyonu, Ortak Araştırma Merkezi, Direktörlük C - Enerji, Ulaşım ve İklim, Birim 2 - Enerji Verimliliği ve Yenilenebilir Enerji, Via Fermi 2749, 21027 Ispra (VA), İTALYA.

E-posta adresi: Giulia.ULPIANI@ec.europa.eu (G. Ulpiani).

<https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.106059>

Alındı 16 Temmuz 2024; Gözden geçirilmiş haliyle alındı 8 Kasım 2024; Kabul edildi 9 Aralık 2024

Çevrimiçi olarak 12 Aralık 2024'te kullanılabilir

2210-6707/© 2024 Yazar(lar). Elsevier Ltd. tarafından yayınlanmıştır. Bu makale CC BY lisansı altında açık erişimli bir makaledir (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

sera gazı azaltımının küresel hava kalitesi eş faydaları 0,4, 1,1 ve 2030, 2050 ve 2100'e kadar yılda 1,5 milyon ölüm (PM_{2,5} emisyon azaltımı nedeniyle) önlenmiştir (West vd., 2013).

Son bilimsel araştırmalar, sera gazı emisyonları ve ortam hava kirliliğiyle birlikte mücadele etmenin potansiyel faydalarını vurgulamıştır (Pisoni ., 2023; Vandyck vd, 2020). Entegre stratejiler, sera gazı emisyonlarının azaltılması, halk sağlığının iyileştirilmesi ve kentsel yaşanabilirliğin artırılması gibi birçok fayda sağlayabilir (Monforti-Ferrario vd., 2018., 2024; Peduzzi vd, 2020). Hava kalitesi ve sera gazı azaltma önlemlerinin entegre edilmesinin faydaları şehir düzeyinde de gözlemlenmektedir. Örneğin, Seul Metropolitan Alanı için yapılan bir senaryo analizinde (Chae & Park, 2011), sera gazı emisyonları ve hava kirliliğini ele alan entegre önlemlerle NO_x, PM₁₀ ve CO₂ emisyonlarında, ayrı ayrı önlemlere kıyasla %41-90 daha fazla azalma sağlanabileceği tahmin edilmiştir (Chae & Park, 2011) ve bunun yanı sıra önemli maliyet ve sağlık faydaları da elde edilmiştir. İklim değişikliği ve hava kalitesi politikalarını değerlendirmek için entegre bir model olan GAINS'e (Sera Gazı - Hava Kirliliği Etkileşimleri ve Sinerjileri) dayalı analizlerden de cesaret verici sonuçlar ortaya çıkmıştır. Örneğin, Woo ve diğerleri (2024) GAINS'i Kore ortamına uyarlamış ve üç alternatif senaryoyu test etmiştir

-Her Zamanki Gibi İş (BAU), Hava Kalitesi (AQ) ve Maksimum Yapılabilirlik Azaltma (MFR, en son emisyon azaltma teknolojilerini içeren) - sera gazı azaltma politikalarından kaynaklanan faaliyet seviyelerindeki değişikliklerin hava kalitesi üzerindeki etkilerini doğrulamak için (Woo ., 2024). AQ senaryosu, BAU'daki %25 NO_x artışına kıyasla 2030 yılına kadar NO_x'i %21 ve SO₂'yi %20 azaltabilirken, MFR daha yüksek maliyetle daha da fazla azaltım . Pekin için yapılan bir senaryo analizinde, GAINS-City modeli, hava kalitesi önlemlerinin uygulanmasının yıllık hava kirlileti emisyonlarını (NO_x ve PM_{2,5}) %37-55, SO₂'yi %39-48 ve CO₂ emisyonlarını %5-22 oranında azaltabileceğini ve hava kalitesi politikalarının sera gazı azaltımları üzerinde önemli yan faydaları olduğunu göstermiştir (F. Liu ., 2013). Bulgular, daha fazla azaltım elde etmek için teknolojik iyileştirmelere ve daha iddialı birleşik kentsel ve bölgesel önlemlere duyulan ihtiyacı vurgulamıştır. Yerel ölçekte hava kalitesi ve sera gazı azaltımının ortak faydalarını gösteren benzer uygulamalar Kaliforniya (Fournier vd.2022.,), Pekin (Liu vd, 2024b) ve Avrupa, Kanada, Afrika ve Hindistan'da bulunan 8 büyük şehir için geliştirilmiştir (Boyd vd., 2022).

Avrupa'da, birleşik bir yaklaşıma yönelik ek bir baskı

Hava kalitesi ve iklim azaltımı, 2030 yılına kadar hem sera gazı emisyonlarının hem de hava kirliliğinin neden olduğu erken ölümlerin %55 oranında azaltılmasını hedefleyen AB Yeşil Anlaşması tarafından belirlenen eş zamanlı iddialı hedeflerden kaynaklanmaktadır (Avrupa Komisyonu, 2021). Bu bağlamda, Barselona, Madrid, Milano veya Paris gibi büyük Avrupa şehirleri sinerjik bir yaklaşım benimseyerek hava kalitesini iklim eylem planlarına entegre etmenin yolunu açmıştır (Avrupa Komisyonu, 2024).

Entegre eylemin faydalarına ilişkin artan kanıtlara rağmen, bu iki çevre sorunu (iklim değişikliği ve ortam hava kirliliği) genellikle hala ayrı ayrı ele alınmakta, farklı birimler, paydaş grupları ve bilimsel topluluklar tarafından ve farklı politika çerçeveleri dahilinde ele alınmaktadır (Maione vd., 2016). Şehirler, sadece sera gazı emisyonlarının azaltılması değil, aynı zamanda hava kalitesinin iyileştirilmesi için tasarlanıp uygulandığında bir politika ile elde ek faydalar konusunda farkındalıktan yoksun olabilir. Şehirler ayrıca durumu ilerletecek, özel durumlarını ayrıntılı olarak ölçecek ve analiz edecek veya eylemlerinin olumlu etkilerini en üst düzeye çıkaracak araç ve kaynaklardan yoksun olabilir, dolayısıyla sera gazı azaltımını teşvik ederken halk sağlığını iyileştirme fırsatlarını potansiyel olarak gözden kaçırabilir (Roggero vd., 2023). Diğer taraftan, şehirler, düşük verimlilik derecesine ve kirlilik emisyon kontrolüne sahip ev aletlerinde büyükölte yakımının artırılması gibi hava kalitesi için potansiyel olarak zararlı sera gazı azaltma eylemlerini uygulama eğiliminde olabilir (Zauli-Sajani vd., 2024).

Bu makale, özellikle AB'nin iddialı 100 İklim Nötr ve Akıllı Şehir Misyonu (bundan sonra Şehirler Misyonu olarak anılacaktır) bağlamında, şehirlerde iklim değişikliğinin azaltılması ve hava kalitesi çabalarının uyumlaştırılmasının önemini ve mevcut alanı Kent Misyonu, 100+ kenti iklim değişikliğine duyarlı hale getirmeyi amaçlamaktadır.

azaltım liderleri, 2030 gibi erken bir tarihte net sıfır emisyon gibi öncü bir hedef belirleyerek. Misyon şehirleri, iklim değişikliğine uyumu (yani iklim değişikliğinin etkilerine karşı daha fazla dayanıklılık) katalize etmek ve ortam hava kalitesini ve halk sağlığını iyileştirmek için fırsatlar sunarken, iklim nötrlüğüne ulaşmayı amaçlayan dönüştürücü eylemlerden oluşan bir portföy olan bir İklim Nötrlüğü Eylem Planı geliştirmekle görevlendirilmiştir. Şehirlerin Misyonu ilgilerini ifade ettikleri anketi analiz ederek ve hava kirliliği tahminleriyle birleştirerek aşağıdaki araştırma sorularını ele alıyoruz:

- Şehirler iklim-nötr bir gelecek için planlama yaparken hava kalitesi konularını ne kadar dikkate alıyor?
- Müdahale için hedeflenen sektörler arasında uyum var mı ve sera gazı emisyonlarını azaltmak için tasarlanan dönüştürücü bir strateji hava kirliliği seviyelerini de önemli ölçüde etkileyebilir mi?
- Şehirler hem iklim hem de hava kalitesi hedeflerine yönelik sinerjik bir yaklaşımı teşvik eden kapsamlı, çok sektörlü stratejiler geliştiriyor mu?
- Şehirler sera gazı azaltım tedbirlerinin hava kalitesi üzerindeki etkisini değerlendirmek ve izlemek için çerçeveler veya mekanizmalar oluşturdu mu?
- Şehirler, iklim eylemi ve hava kalitesi girişimlerinin kesişimini etkin bir şekilde yönetme yetkisine ne ölçüde sahiptir?
- Hava kalitesi ne ölçüde doğal koşullara bağlıdır ve politika bu etkilere aracılık etmede nasıl bir rol oynayabilir?

Bu soruların ele alınması, Yöntemler bölümünde açıklandığı üzere, önemli bir şehir örneklemini ve standartlaştırılmış prosedürler aracılığıyla belirli bilgilerin toplanmasını gerektirmektedir. Sonuçlar, hava kalitesinin iklim değişikliğinin azaltılmasıyla bütünleştirilmesi için halihazırda var olan fırsat alanını ortaya çıkarmakta ve daha hedefli ve etkili düzenleyici çerçevelere rehberlik edecek kilit kaldıraçlar ve ön diktatörler hakkında fikir vermektedir.

2. Yöntemler

Kentsel hava kalitesi ve sera gazı emisyonları arasındaki potansiyel bağlantıları birleşik bir fiziksel ve politika odaklı perspektiften araştırmak için, bu çalışma 3 ana veri setinin kombinasyonuna ve aşağıda açıklandığı gibi belirli tanımlayıcı ve çıkarımsal istatistiksel analizlere dayanmaktadır.

2.1. Veri Setleri

Cities Mission veri seti, 362 uygun şehrin iklim değişikliği azaltım eylemlerinde geçmişleri, bugünleri ve gelecekleri hakkında 374 soruya verdikleri cevaplardan oluşmakta olup, sera gazı emisyon envanterleri, yönetim, ortaklıklar, finansman ve risk beklentisi ile ilgili özel modüllerle zenginleştirilmiştir. Anket, 2030 yılına kadar iklim-nötr olma hedefine sahip şehirler tarafından sunulan Misyon için bir İlgi Beyanı (Eulpani ve Vetter's(2023) OI) işlevi görmüştür ve in Ek Materyallerinde bulunabilir. Toplamda 35 ülke kapsama alınmış olup, 13 ülke> 10 şehir tarafından temsil edilmektedir. İklim eyleminde farklı olgunluk ve entegrasyon dereceleri olarak ortaya çıkabilecek çok sayıda yönetim düzenlemesi dahil edilmiştir. Yaklaşık 10 bin nüfuslu şehirlerin yanı sıra 15 milyon nüfusa kadar olan büyük şehirler de kapsama alınmıştır. Kıyı şehirlerinin büyük bir yüzdesi (%19) yer almaktadır ve iklim açısından Ko⁺ppen-Geiger sınıflandırmasının (Peel vd., 2007) beş ana sınıfı da (A, B, C, D ve E) temsil edilmektedir. Veriler homojen bir şekilde ve aynı iklim hedefi (yani 2030'a kadar iklim nötrlüğü) bağlamında elde edilmiştir, bu da hedef açısından karşılaştırılabilirlik sağlamaktadır. Veri kalitesi, Avrupa Komisyonu Ortak Araştırma Merkezi tarafından gerçekleştirilen kontrol prosedürlerinden geçmiştir. Ankette yer alan ve doğrudan ya da dolaylı olarak hava kalitesiyle ilgili olan toplam 60+ sorusu bu analiz için bilgi sağlamaktadır. EOİ anketinde hava kalitesinden bahsedildiğini, ancak diğer çevre konularına kıyasla özel bir vurgu yapılmadığını fark etmek önemlidir. Bu nedenle, burada analiz edilen cevaplar "önyargısız" olarak kabul edilebilir ve bu da Cities Mission veri setini analiz için uygun bir araç haline getirmektedir

uygun şehirlerin ilgi ve farkındalık derecesi. Burada incelenen EOI soruları zorunlu olmadığından ve önceki sorulara verilen cevaplara bağlı olabileceğinden, sonuçlarda her zaman katılımcı şehirlerin sayısı belirtilmiştir. Ayrıca, çoktan seçmeli sorular için toplam giriş sayısı ("n") kaydedilmekte ve tüm grafik gösterimlerde gösterilmektedir. Veri seti ve bu çalışmada kullanılmak üzere verilerin işlenmesi hakkında daha fazla bilgi Ek Materyalde bulunabilir (Ek Not 1 ve Tablo S2). Şehirlerin iklim nötrlüğü ve hava kalitesini birlikte hedeflemeye hazır olup olmadıklarını araştırmak için benzeri görülmemiş fırsatlar sunarken, bazı sınırlamalar Cities Mission veri setini etkilemektedir:

- Mevcut politikalar, tedbirler veya izleme düzeneklerine ilişkin verilerin sistematik olarak kaydedilmesinden değil, şehirler tarafından doldurulan açık bir anketten türetilmiştir. Bu durum, örneğin bir planın varlığının, planın etkinliği fikir vermeyeceği anlamına gelmektedir.
- Veri seti coğrafi olarak dengesizdir (örneğin, tüm ülkeler eşit şekilde temsil edilmemektedir).
- Sera gazı emisyonlarına ve hava kalitesine odaklanma eşit değildir, çünkü Şehirler Misyonu genellikle hava kalitesinin iklim azaltma eylemlerine dahil edilip edilmediğine bakar, tersine değil.
- Emisyon azaltımı ve hava kalitesi arasındaki belirli bağlantıları gözden kaçırmaktadır. Son zamanlarda yapılan çalışmalar, yeşil dijital finansın, yeşil teknoloji inovasyonu, endüstriyel yapının iyileştirilmesi ve gelişmiş finansal denetim ile daha da güçlendirilen kirlilik ve karbon azaltma hedeflerinin bir arada takip edilmesi üzerindeki olumlu etkisinin altını çizmektedir (He .2023., Li , 2024, ; vdYin vd2024;). Dijital teknolojik inovasyonun oynadığı olumlu rol Zhu ve diğerleri (2024) . tarafından daha da vurgulanırken, ekonomik hızlanma ve doğrudan yabancı yatırım Xu ve diğerleri (2024) tarafından ilave olumlu itici faktörler olarak vurgulanmaktadır. Bu sektörler arası boyutlar, tüm şehirleri kapsayan ilgili verilerin eksikliği nedeniyle analiz edilememiştir.

Hava kirleticileri veri seti, Copernicus Atmospheric Service'ten (CAMS) elde edildiği şekliyle, her şehir için 2019 yılı yıllık ortalama konsantrasyonlarını ($PM_{2.5}$, PM_{10} ve NO_2 için) içermektedir. Veri kaynağı olarak, doğrulanmış verilerin asimilasyonu da dahil olmak üzere 9 son teknoloji hava kalitesi modeliyle gerçekleştirilen simülasyonların ortancası olarak hesaplanan Ensemble CAMS reanaliz ürününü kullanıyoruz (CAMS, 2023). Hava kirliliği verileri 10 km uzamsal çözünürlüğe sahip olduğundan, ortalama kentsel konsantrasyonları yansıtmak için şehir poligonlarında uzamsal olarak ortalaması alınmıştır.

Son olarak, $PM_{2.5}$ konsantrasyonlarına sektörel katkılara veri seti $PM_{(2.5)}$ Atlası'ndan (Zauli-Sajani vd., 2024) türetilmiştir. $PM_{2.5}$ Atlası'nda, kaynak katkıları SHERPA hava kalitesi modeli (Pisoni vd., 2019) kullanılarak ve kaba kuvvet yaklaşımı (Thunis vd., 2019) uygulanarak, farklı sektörler için emisyonların azaltılmasının etkilerini bir kerede simüle ederek hesaplanmaktadır. Bu yaklaşımın sağlamlığı, Khomenko ve diğerlerinin (2023) çalışmasında alternatif modellerin sonuçlarıyla karşılaştırmalı analiz yoluyla gösterilmiştir. İki hava kalitesi veri seti hakkında daha fazla bilgi Ek Materyalde bulunabilir (Tablo S1).

2.2. İstatistiksel analizler

Araştırmamız, ilgili politika tedbirleri ve yönetim hükümlerini incelemeyi önce 362 şehirdeki hava kirleticisi konsantrasyonları ve sera gazı emisyonlarının değerlendirilmesiyle başlamaktadır. Veri dağılımı ilk olarak sıralamalar, kutu grafikleri veya yağmur bulutu grafikleri şeklinde tanımlayıcı istatistikler kullanılarak analiz edilmektedir. Ardından, şehirlerin hangi doğal, sosyo-ekonomik veya politika ile ilgili özelliklerinin hava kalitesi seviyeleri ile en güçlü şekilde ilişkili olduğunu ortaya çıkarmak için ($PM_{2.5}$ konsantrasyonlarını bir vekil olarak kullanarak), gradyan artırma yöntemine dayalı bir regresyon modeli oluşturduk. Bu makine öğrenimi tekniğinin tahmine dayalı modellemeye çok sayıda uygulaması vardır (Pisoni ., 2022.vdMa , 2020) ve hava kalitesinin tahmininde etkili olduğu kanıtlanmıştır (vdVan ., 2023;). Modeli 'XGBoost' algoritmasını kullanarak R'de oluşturuyor ve doğruluyoruz (Chen

& Guestrin, 2016). Model eksik değerleri (NaN'ler) işleyemediğinden, analiz, dikkate alınan fiziksel ve politika değişkenleri genelinde eksiksiz bir veri setine sahip olduğumuz 261 şehir üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sera gazı emisyon verilerinin mevcudiyeti ana kısıtlamadır. XGBoost, bağımsız değişkenler arasındaki ortak bağımlılığı hesaba katabilir ve model yapısı ve parametreleriyle ilgili katı varsayımlar gerektirmez. Yorumlamayı kolaylaştırmak için kategorik girdileri özel mantıklara göre sıraladık: ülkeler kuzeybatıdan güneydoğuya doğru sıralandı ve iklim sınıfları Köppen-Geiger sınıflandırmasına göre soğuk ve nemli olandan sıcak ve kuru olana doğru düzenlendi. Ayrıca, 5 tCO₂e'den yüksek kişi başı emisyon değerleri, modeldeki aykırı değerlere sahte uyumları önlemek için 5'te sabit tutulmuştur (dolayısıyla 5 değeri ≥ 5 anlamına gelmektedir).

Model eğitimi ve doğrulamasından sonra, etkileşimleri dikkate alarak her bir model değişkeninin önemini hesaplamak ve etkinin yönünün görselleştirilmesine izin vermek için SHAP (SHapley Additive exPlanations) değerlerinin genişletilmiş inter-pretatif yeteneklerini kullanıyoruz. 'Shapforxgboost' paketini benimsiyoruz (Liu & Just, 2020).

XGBoost algoritmaları, hava kalitesi seviyeleri ile neyin ilişkili dair araştırmayı derinleştirmektedir. Analiz yalnızca $PM_{2.5}$ yıllık ortalama konsantrasyonlarına, yani halk sağlığı açısından referans bir ortam havası kirleticisine, çeşitli solunum ve kardiyovasküler hastalıklara (EEA, 2022; Yue vd., 2024) odaklanmaktadır. Modele 39'u politika ile ilgili olmak üzere toplam 46 girdi değişkeni girilmiştir. Bunlar, Ek Materyalde (Tablo S1 ve S2) tam olarak açıklanan ek şehir özellikleriyle (örneğin ülke, iklim) birlikte İlgi Beyanından çıkarılan 60+ sorusuna karşılık gelmektedir.

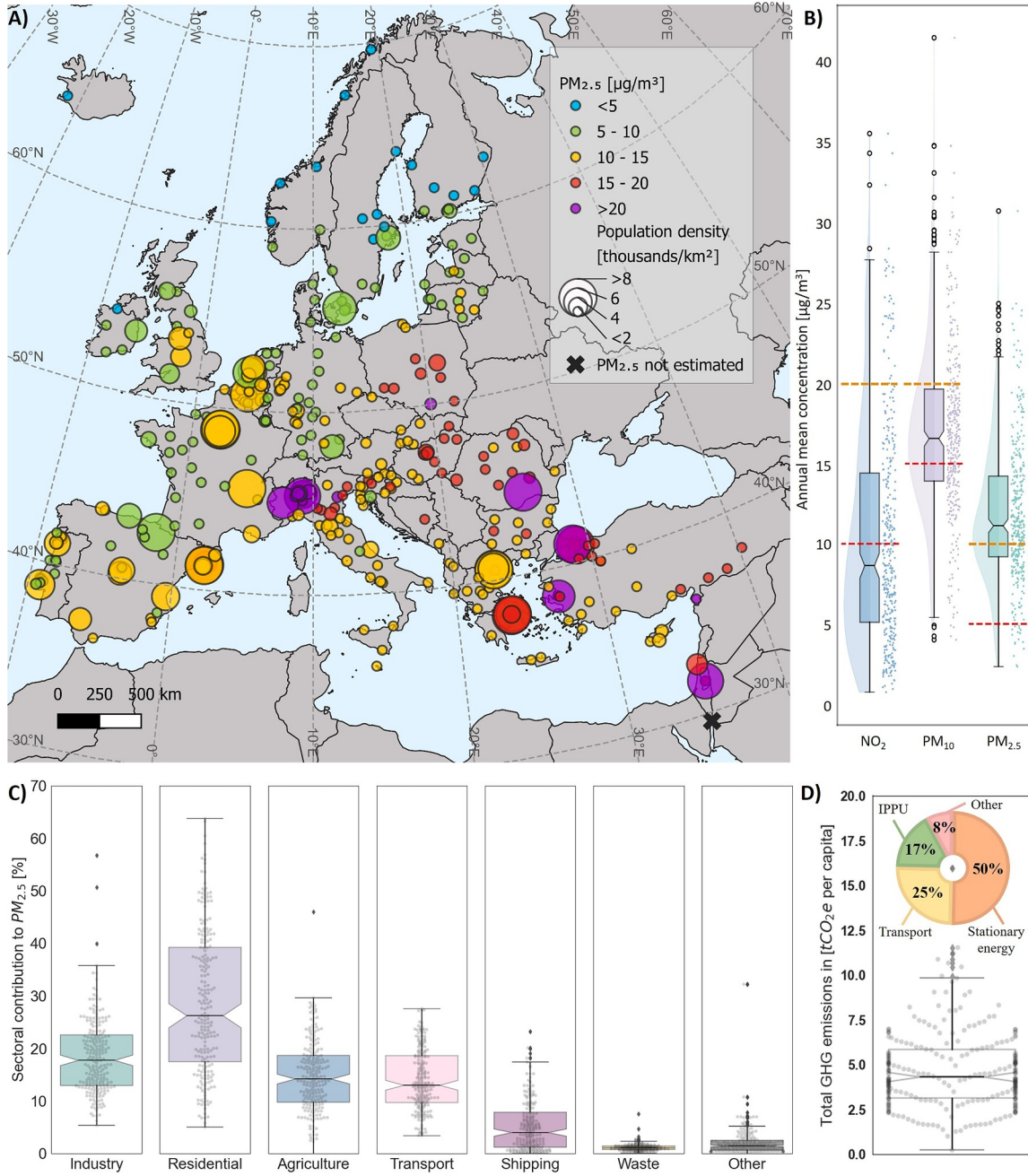
3. Sonuçlar

Bu bölüm, hava kirleticileri ve sera gazı emisyonlarına odaklanan bir analizle başlamakta, EOI anketinin incelenmesine geçmekte, ortak faydaları ve belediye yetkilerini tartışmakta ve SHAP konseptini kullanarak değişkenler arasındaki potansiyel karşılıklı ilişkilerin araştırılmasıyla tamamlanmaktadır.

3.1. Hava kirliliği ve sera gazı emisyonları

Şekil 1, 362 şehir için hava kirliliği göstergeleri ve sera gazı emisyonlarının temel özelliklerini özetlemektedir. Harita (Şekil 1A) şehirlerin mekansal dağılımını, nüfus yoğunluğunu ve hava kalitesini göstermektedir. Renk kodu, $PM_{2.5}$ yıllık ortalama konsantrasyonları açısından farklı hava kalitesi seviyelerine sahip şehirleri ayırt etmek için kullanılırken, işaretleyici boyutu nüfus yoğunluğu ile artmaktadır. Dikkat çekici bir şekilde, $PM_{2.5}$ konsantrasyon seviyeleri kuzeyden güneye doğru tabakalaşmakta, çok düşük $PM_{(2.5)}$ konsantrasyonları ($< 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) Kuzey Avrupa'nın ayrıcalığı olmakta ve en yüksek $PM_{(2.5)}$ konsantrasyonları ($> 20 \mu\text{g}/\text{m}^3$) Güneydoğu bölgelerinde yoğunlaşmaktadır. Belirli bir değişkenlikle birlikte, yoğun nüfuslu alanlar da daha yüksek kirlilik seviyeleriyle ilişkilidir.

Şekil 1B'deki yağmur bulutu grafikleri $PM_{2.5}$, PM_{10} ve $NO_{(2)}$ yıllık ortalama konsantrasyonlarının dağılımını göstermektedir. Dağılım grafiği yıl boyunca her bir şehrin medyan değerini temsil ederken, keman ve kutu grafiği sırasıyla yoğunluk tahminini ve özet istatistikleri göstermektedir. Her bir kirleticisi için Dünya Sağlık Örgütü (WHO) hava kalitesi kılavuz eşiği referans olarak kırmızı noktalı çizgi ($PM_{2.5}$ için $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{10} için $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ve $NO_{(2)}$ için $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) olarak gösterilmiştir (WHO, 2024). Benzer şekilde, turuncu noktalı çizgi, yakında yayınlanacak olan Revize Ortam Hava Kalitesi Direktifi'nde (Avrupa Komisyonu, 2022) önerilen eşiği temsil etmektedir. İstatistiksel değişkenlik açısından i) $NO_{(2)}$ 'nin neredeyse $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ile en geniş çeyrekler arası aralığı sergilediği ve medyanı DSÖ eşiğinin altında olan tek kirleticisi olduğu; ii) $PM_{(10)}$ 'ın en yüksek uç noktalara ulaştığı (birçok durumda eşiğin iki katı $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 'a aştığı), ancak 25. yüzdelik diliminin eşiğin altında kaldığı; ve iii) $PM_{(2.5)}$ 'in 25. yüzdelik diliminin DSÖ eşiğinin neredeyse iki katı olduğu ve uygun şehirlerin büyük çoğunluğunda potansiyel kötü hava kalitesine işaret ettiği görülmektedir. Gerçekten de, CAMS'a göre sadece 17 şehir DSÖ eşiğinin altında görünmektedir



Şekil 1. İklim-Nötr ve Akıllı 100 Şehir Misyonuna ilgi gösteren 362 şehirdeki hava kirliliği ve sera gazı emisyonları. A) Şehirlerin haritası ve nüfus yoğunlukları ile yıllık ortalama PM_{2.5} konsantrasyonlarının göstergesi (16 şehir gizlilik nedeniyle gösterilmemiştir); B) Hava kirlenici konsantrasyon dağılımının yağmur bulutu grafikleri; C) Farklı sektörlerin toplam PM_{2.5} konsantrasyonlarına yüzde katkısı; D) Kişi başına düşen sera gazı emisyonlarının kutu grafiği ve sektörel katkıların pasta grafiği.

veri: Norveç, İsveç ve Finlandiya'da 5, İzlanda'da 1 ve İrlanda'da 1. PM_(2.5)'in sektörel dağılımı **Şekil 1C**'de gösterilmektedir. Konut sektörü açık ara en büyük katkı sağlayıcıdır ve medyan değeri neredeyse %30'dur. Toplam PM_(2.5)'in %'si, %40 ile 75. persentil ve yaklaşık ile maksimum. Bu aynı zamanda en geniş çeyrekler arası aralığa sahip sektördür ('nin üzerinde, diğer sektörlerin iki katından fazla). İkinci en büyük katkı sağlayıcı, yaklaşık %20'lik medyan ile sanayi sektörüdür ve onu her ikisi de yaklaşık %15 ile tarım ve taşımacılık takip etmektedir. Nakliye ara sıra önemli bir role sahip olabilir; ancak atık ve diğer sektörlerle birlikte tipik olarak küçük bir göreceli katkıya sahiptir. Bu, kimyasal taşıma modeli (CTM) simülasyonları ve azaltılmış karmaşık CTM veya adjoint CTM gibi diğer yaklaşımlar dahil olmak üzere emisyon azaltma etki yöntemlerine dayalı farklı modellerden elde edilen kanıtlarla uyumludur.

duyarlılık yöntemleri (Khomenko., 2023).

İlginç bir şekilde, sera gazı emisyonları (CO₂), CH₄), N₂O ve F-gazları) açısından da benzer bir dağılım gözlenmektedir. Bu durum, kişi başına düşen toplam sera gazı emisyonlarının kutu grafiğine sektörel dağılımı gösteren bir pasta grafiğin eşlik ettiği **Şekil 1D**'de görselleştirilmiştir. Örneğin bu katkıların şehirler arasındaki değişkenliği hakkında daha fazla bilgi için (Ulpiani vd., 2023.)'e bakınız. Farklı sektörel yapıya/sınıflandırmaya sahip iki veri kaynağının kullanılması nedeniyle, sektör adları ortam havası kirlenici ve sera gazı rakamları arasında uyumsuzdur. Sera gazı muhasebesinde, stationary enerji sektörü binaları (endüstriyel binalar dahil), ekipmanı ve tesisleri temsil eder ve tipik olarak konut emisyonları tarafından domine edilir ve IPPU sektörü (Endüstriyel Süreçler ve Ürün Kullanımı) endüstriyel süreçleri ve ürün kullanımını temsil eder. Spesifik emisyonlar

kaynaklar aynı sektör içinde bile farklılık gösterebilir, yüksek emisyonlu sektörlerde cesur bir karbonsuzlaştırma eylemi benimseyerek, Misyon şehirlerine iklim azaltımı ve hava kalitesini birlikte hedefleme fırsatı sunulduğu ve hem Paris Anlaşması hedeflerine hem de Hava Kalitesi hedeflerine ulaşıldığı sezgiseldir.

3.2. Eylem planları

Şehirlerin iklim değişikliği veya hava kalitesi eylem politikalarını uygulayabilmeleri için en önemli araç eylem planlarının tasarlanması ve onaylanmasıdır. Şekil 2, EOI anketinde uygun şehirler tarafından beyan edilen tüm planların dağılımını göstermektedir. Davet, iklim azaltımı ile ilgili en fazla 5 planın açıklanması yönündeydi. Şehirler, bir seçenekler listesinden (Şekil 2'deki x eksen etiketleri) plan türünü seçebilmektedir. SECAP/ SEAP seçeneği, Küresel Belediye Başkanları Sözleşmesi girişimindeki şehirlerin ve belediyelerin enerji verimliliğini artırmaya, sera gazı emisyonlarını azaltmaya, iklim değişikliğine uyum sağlamaya ve enerji yoksulluğunu ele almaya yönelik eylemlerini ana hatlarıyla belirlemek için geliştirdikleri ve uyguladıkları Sürdürülebilir Enerji (ve İklim) Eylem Planlarını göstermektedir (Melica vd., 2022). Benzer şekilde, Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Planları (SUMP'ler) kentsel alanlarda ulaşımın sürdürülebilir, verimli olmasını ve vatandaşların ihtiyaçlarını karşılamasını sağlamak için tasarlanmış entegre stratejik planlardır; Sürdürülebilir Kalkınma Eylem Planları (SuD'ler) ise çevresel bütünlük, ekonomik refah ve sosyal eşitliği dengelemeye odaklanan uzun vadeli sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmak için kapsamlı stratejilerdir. SECAPs/- SEAPs, SUMPs ve SuDs, Avrupa Komisyonu girişimleri ve politikaları belirli kılavuz ilkelere göre geliştirilen özel planlardır. Şehirlerin seçebileceği eylem planı türlerinden biri de "Hava kalitesi planı"dır. Bu özel veri setine dahil edilmeleri, şehrin iklim azaltımı ve hava kalitesi politikaları arasındaki etkileşimin önemini farkında olduğunu göstermektedir. Soldaki çubuk grafik, planların çeşitliliği hakkında fikir vermektedir (türler - en fazla - 5 boyunca yalnızca bir kez sayılmıştır). Buna karşılık, sağdaki çubuk grafik şehirler tarafından verilen tüm cevapları ve kümülatif olarak tüm eylem planlarını hesaba katmaktadır. Bu ikinci

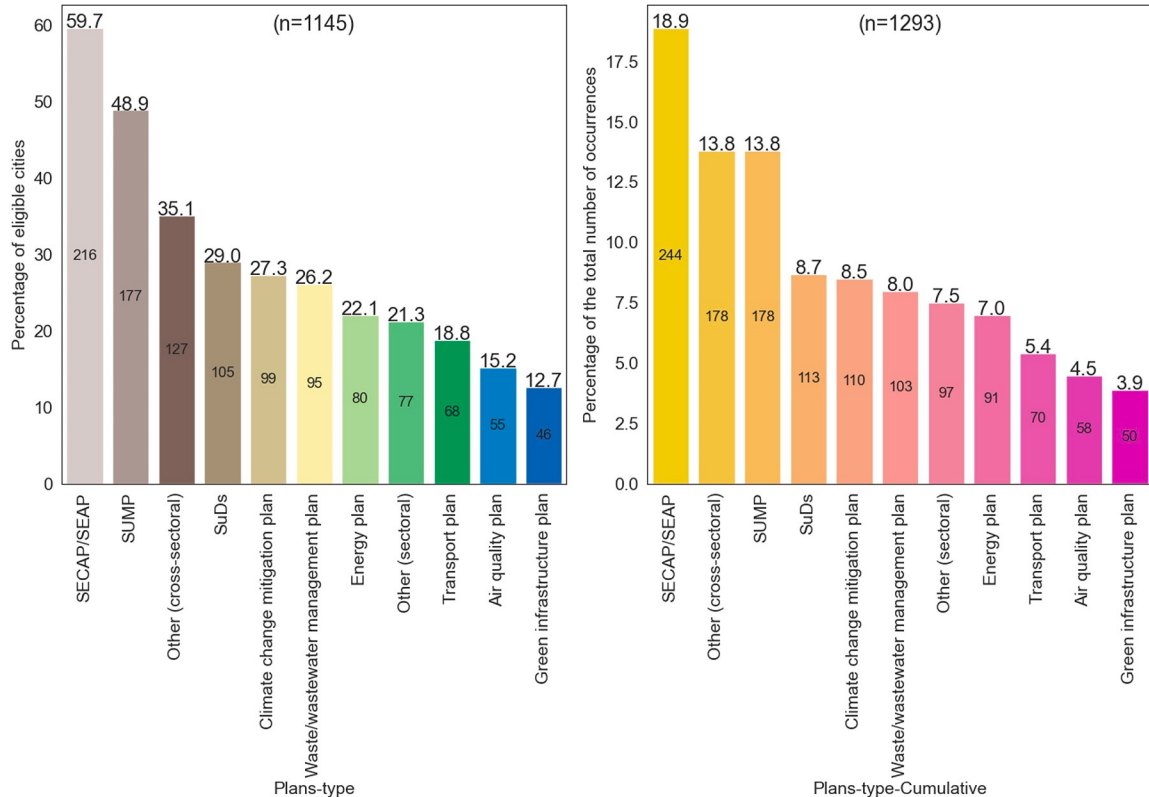
Bu nedenle görselleştirme, belirli plan türlerinin diğerlerine göre popülerliği hakkında bilgi verir.

Beklendiği üzere, sera gazı emisyonlarının azaltılmasını farklı perspektiflerden ele alan sektörler arası planlar (SECAP'lar/SEAP'lar, SuD'ler, iklim değişikliği azaltım planları ve diğer sektörler arası planlar), uygun şehirler tarafından beyan edilen plan türleri arenasına hakimdir; SUMP'lar ise şehirlerin neredeyse yarısı tarafından seçilen tek sektörel plandır. Bununla birlikte, katılımcıların kayda değer bir kısmı (%15) sera gazı emisyon azaltımıyla ilgili 5 plan seçimine hava kalitesi planlarını da dahil etmiştir. Bu da 55 şehrin (10'u Almanya'da olmak üzere) halihazırda emisyon azaltma hedeflerinin de altını çizen hava kalitesi eylem planları tasarladığını göstermektedir. Bu, çevresel zorluklara yönelik silo yaklaşımından yönelik cesaret verici bir sinyaldir. Bununla birlikte, burada incelenen şehirler grubu potansiyel olarak iklim eyleminde Avrupa'nın öncü şehirlerini temsil ettiğinden, yani iklim krizini ele alma konusunda uzun süredir kararlı olan ve çok dar bir zaman diliminde (2030'a kadar) mümkün olan en yüksek hırsı (iklim nötrlüğü) ifade eden şehirler olduğundan, kapsama yüzdesi düşük kabul edilebilir.

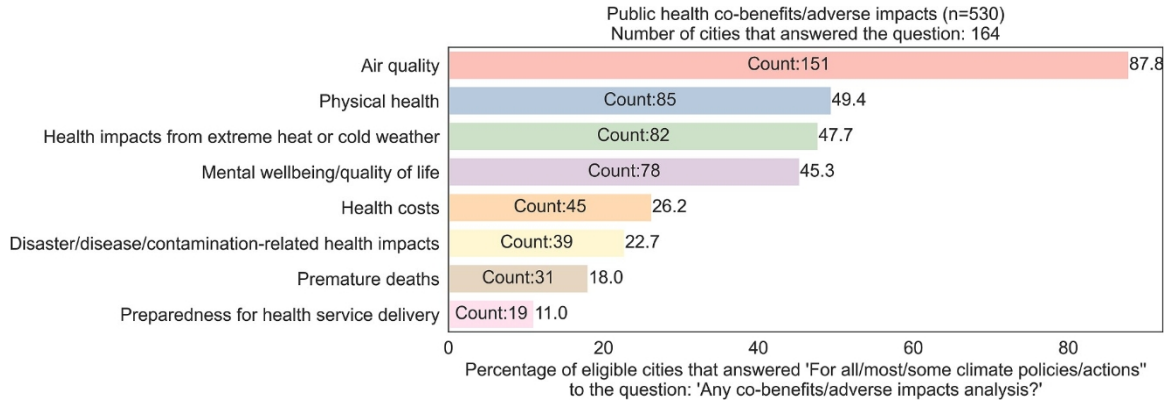
3.3. Ortak faydalar ve yetkiler

Şehirlerin EOI anketinde hava kalitesi ve iklim değişikliği azaltımı arasındaki ilişkiye dair farkındalıklarını göstermelerinin bir başka yolu da ortak faydalar bölümüdür. Şehirlere, yerel ölçekli iklim azaltım politikaları/eylemleri tarafından üretilen olası yan faydaları/yan etkileri 4 ana kategoride (eko- nomik, sosyal, halk sağlığı ve çevresel etkiler) değerlendirip değerlendirmedikleri ve/veya bunun tersini yapıp yapmadıkları sorulmuştur. Toplamda 172 şehir, ortak fayda/yan etki değerlendirmesine belli bir düzeyde aşına olduğunu belirtmiştir.

Şekil 3, şehirlerin halk sağlığı kategorisinde seçebilecekleri farklı seçeneklerin sıralamasını göstermektedir. 172 şehrin %95'inin sunulan seçenekler arasında halk sağlığı ve refahı ile ilgili en az bir hususu tanımlayabildiğini ve hava kalitesinin açık ara en sık belirtilen husus olduğunu göstermektedir (neredeyse %90). Hava kalitesinin tanımlanması



Şekil 2. Planlardaki tematik dağılım Planlar arasında tematik dağılım - çeşitlilik ve en sık görülen türler. Ankete katılan şehir sayısı: 329.



Şekil 3. İklim eyleminde uygun şehirler tarafından değerlendirilen en yaygın halk sağlığı yan faydalarının veya olumsuz etkilerinin sıralaması.

İklim azaltımı için en popüler ortak fayda olarak kalite, son literatürle uyumludur (Karlsson vd., 2020; Roggero vd., 2023). Diğer tüm seçenekler (fiziksel sağlık, aşırı sıcak veya soğuk havanın sağlık üzerindeki etkileri ve zihinsel refah/yaşam kalitesi dahil) şehirlerin yarısından azı tarafından seçilmiştir. Diğer 3 kategoride (ekonomik, sosyal ve çevresel etkiler) bile, "istihdam yaratma", "hareketlilik ve erişim" ve "yeşil alan kapsamı ve kalitesi" gibi seçeneklerle (her sıralamada en yüksek seçimler), pay %90'a kadar ulaşamamıştır.

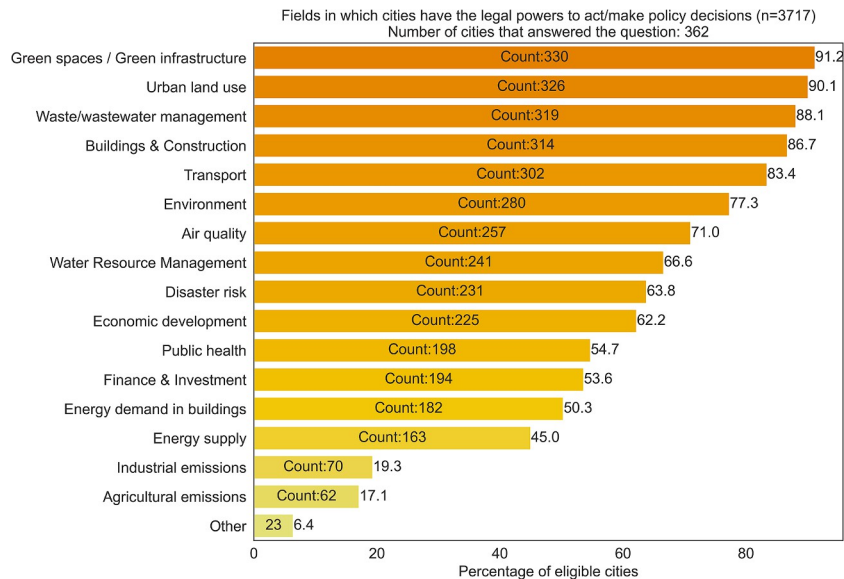
%. Bu durum, şehirlerin sıklıkla hava kalitesini iklim eylemleriyle birlikte izlediğini veya ele aldığını gösterebilir. Bu mutlaka entegre eylemi yansıtmaya da, kanıta dayalı ikili bir yaklaşım için zemin hazırlayabilir.

Bir başka olumlu gösterge de, yerel yönetimlerin çoğunluğunun hava kalitesi alanında harekete geçmek veya politika kararları almak için yasal yetkilere sahip olduklarını kabul etmeleridir. Bu durum, EOI anketinde şehirler tarafından belirtilen çeşitli eylem alanlarının yerel düzeyde en çok kontrol edilenden en az etkilene doğru sıralandığı Şekil 4'te gösterilmektedir. Uygun şehirlerin neredeyse tamamı (353) bir cevap vermiş ve %80'inden fazlası bu konuda harekete geçmek/karar vermek için yasal yetkileri olduğunu beyan etmiştir: 'Yeşil alanlar / Yeşil altyapı', 'Kentsel arazi kullanımı', 'Atık/atık su yönetimi', 'Binalar ve İnşaat' ve 'Yaşam'. İlginç bir şekilde, bunlar hava kirliliği ve sera gazı emisyonlarına en önemli katkıda bulunan unsurlar arasında yer almakta olup, daha hızlı ve daha cesur eylemlere öncelik verilebilir. >Uygun şehirlerin %50'si ayrıca 'Çevre', 'Hava kalitesi' (%71), 'Su Kaynakları Yönetimi', 'Afet riski', 'Ekonomik kalkınma' konularını da belirtmiştir,

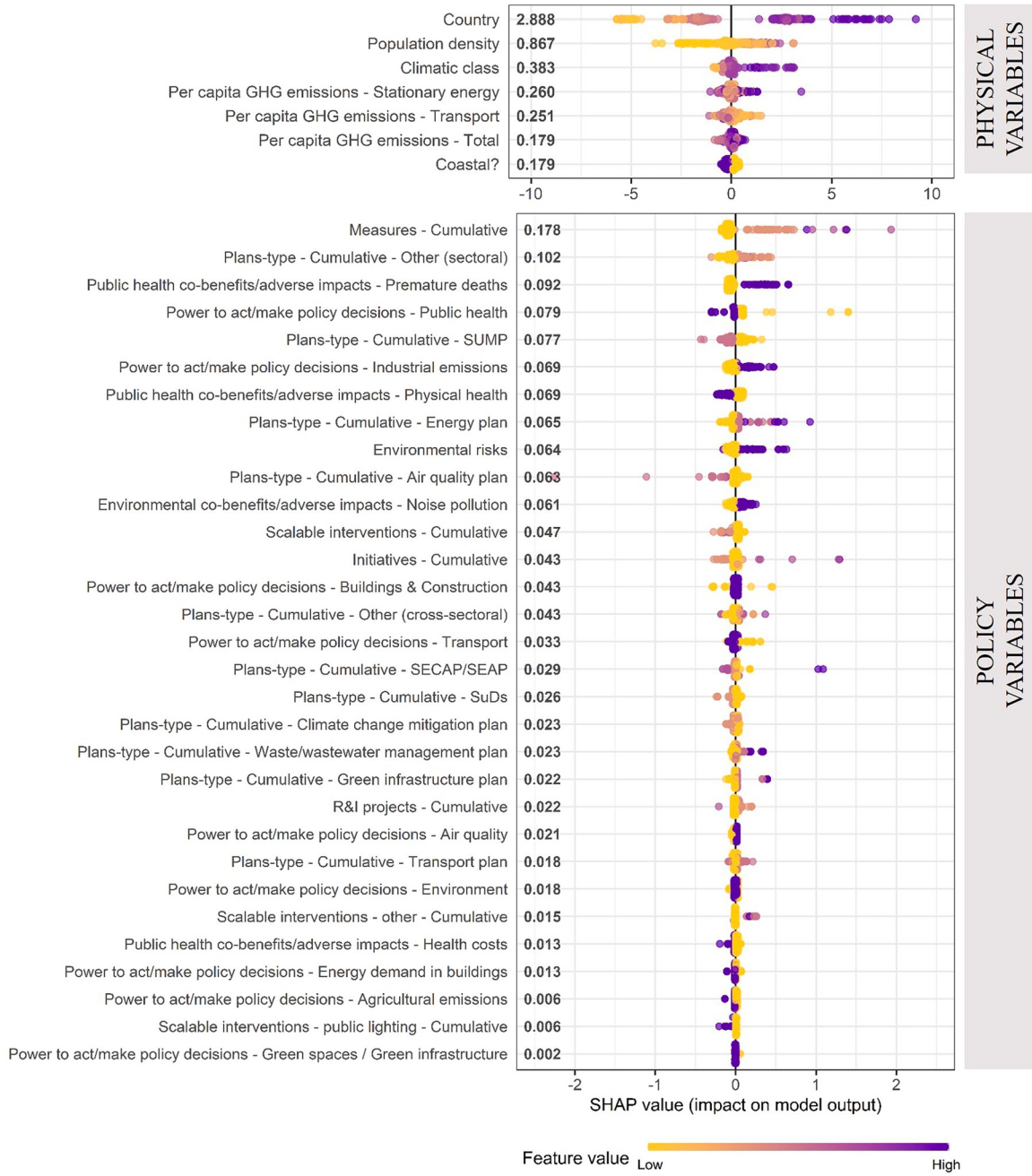
ve 'Kamu sağlığı' seçeneklerini işaretlemiştir ki bu da ortak fayda planlaması için cesaret verici bir göstergedir. <Şehirlerin %20'sinin 'Endüstriyel emisyonlar' ve 'Tarımsal emisyonlar' seçeneklerini işaretlemesi, IPPU ve AFOLU'nun (Tarım, Ormancılık ve Diğer Arazi Kullanımı) iklim nötrlüğüne geçişi hızlandırmak için bazı ara adımlar ve artan kapasite gerektirebileceğini düşündürmektedir. Katılımcıların çoğu (%52), tüm olası kombinasyonlar arasında oldukça homojen bir yüzde dağılımıyla () 11 ila 14 seçeneği işaretlemiştir. Bu durum, ortalama olarak, şehirlerin 8 veya 9 alanda harekete geçme ve karar verme güçlerini kabul ettiklerini göstermektedir ki bu da bütüncül/entegre yaklaşımların benimsenmesi açısından iyiye işaret.

3.4. Karşılıklı ilişkiler

Şekil 5'teki özet grafik, XGBoost aracılığıyla elde edildiği üzere, uygun şehirlerdeki PM_{2.5} konsantrasyonları için en ilgili tahmin edicileri göstermektedir. Özet grafiğindeki her nokta, değişken başına her şehrin SHAP değerini, yani özelliğin modelin çıktısına katkısını temsil eden bir önem ölçütünü temsil eder. Çakışan noktalar, dağılım hakkında bir fikir edinmek için y eksenine yönünde titreştirilir. Pozitif ve negatif SHAP değerleri, bir değişkenin tahmin edilen PM_{2.5} seviyelerinde sırasıyla artış ve azalışa katkıda bulunduğunu gösterir. Sıralamayı gerçekleştirmek için kullanılan y eksenindeki sayılar, global "özellik önemini", yani değişken başına ortalama mutlak SHAP değerini temsil . Daha büyük bir değer, özelliğin daha güçlü bir etkiye sahip olduğu anlamına gelir. Son olarak, renk değişkenin düşük (sarı) ile yüksek (mor) arasındaki değerini temsil etmektedir.



Şekil 4 Uygun şehirlerin üzerinde hareket etme veya politika kararları alma yetkisine sahip olduğu en yaygın alanların sıralaması.



Şekil 5. XGBoost modeli tarafından döndürülen 261 uygun şehirdeki $PM_{2.5}$ yıllık konsantrasyon seviyeleri için en önemli tahmin edicilerin sıralaması, fiziksel ve politika değişkenleri arasında bölünmüştür.

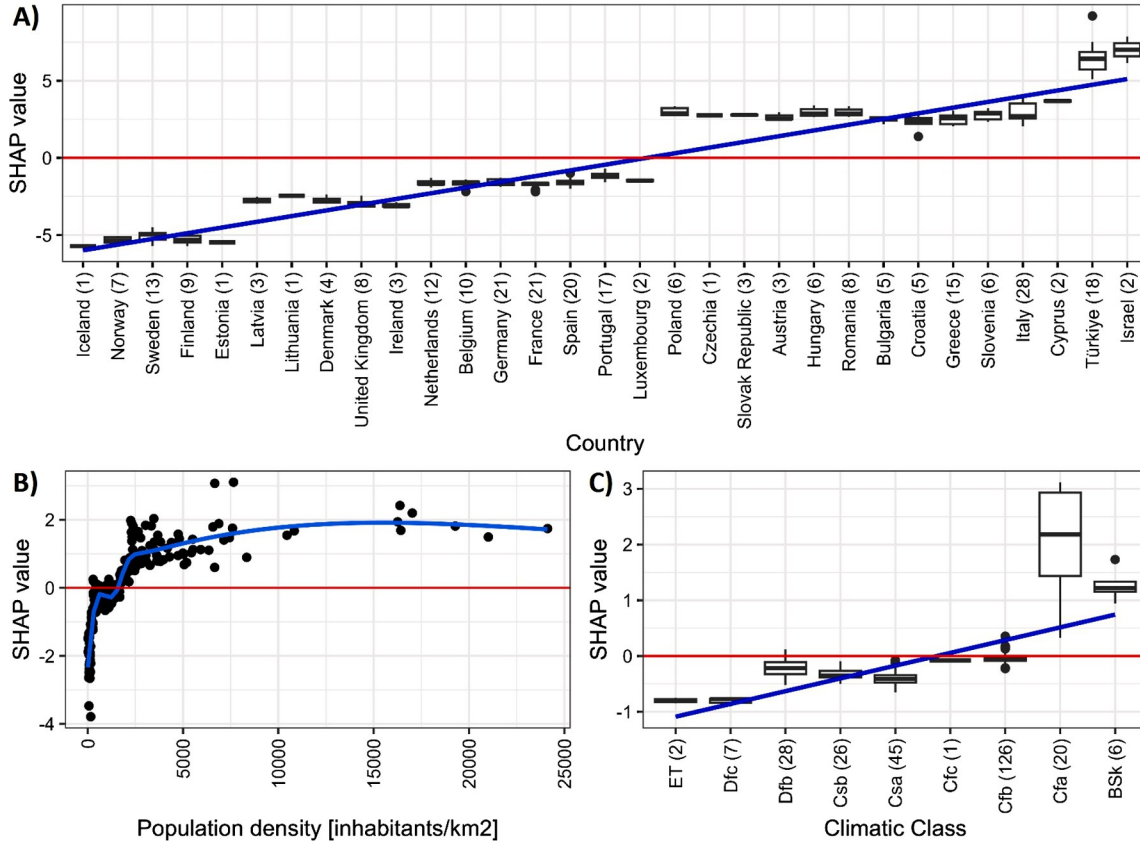
Ülkeler Kuzey-Batı'dan Güney-Doğu'ya doğru sıralanmış ve buna göre küçük ve yüksek değerler atanmıştır. Benzer şekilde, alt uçta soğuk nemli ve üst uçta sıcak kuru iklimler olmak üzere farklı iklim sınıflarına artan bir değer ölçeği atfedilmiştir. Sürekli sayısal değişkenler için, değerleri sarı ve mor arasındaki farklı tonlarda yansıtılır. İkili değişkenler için (örneğin tüm kukla değişkenler) sarı noktalar sıfırları (yani belirli bir özelliğin yokluğu) ve mor noktalar birleri (yani belirli bir özelliğin varlığı) temsil eder.

Okunabilirlik ve yorumlama kolaylığı açısından, **Şekil 5**'te yalnızca global önemi sıfırdan büyük olan değişkenleri tuttuğumuzu belirtmek önemlidir. Ayrıca, bir değişkenin (örneğin "Tedbirler") hem kümülatif olmayan hem de kümülatif sayım özelliği göstermesi durumunda, yalnızca daha yüksek öneme sahip olan formu koruduk. Son olarak, grafik "fiziksel" ve "politika" değişkenlerini birbirinden ayıran iki farklı bloğa bölünmüştür. X eksenini iki blok arasında farklı ölçeklendirilmiştir.

politika değişkenleri arasındaki örüntüleri de açıkça göstermek için fiziksel değişkenlerin daha yüksek açıklayıcı gücü. Değişkenlerin iki gruba ayrılmasının "doğal" olarak gerçekleştiğini ve en düşük açıklayıcı güce sahip fiziksel değişkenin en yüksek açıklayıcı güce sahip politika değişkeninin hemen üzerinde yer aldığını fark etmek ilginçtir. Bu tablo, nüfus yoğunluğu gibi kentsel özelliklerin yanı sıra coğrafi ve iklimsel unsurların da önemli rol oynadığı bir sorun olarak hava kirliliğine ilişkin genel görüşle tutarlıdır.

Fiziksel değişkenlere ilişkin analiz (**Şekil 5**'teki üst blok) şunu ortaya koymaktadır:

- $PM_{2.5}$ konsantrasyonları, **Şekil 6A**'daki bağımlılık grafiğinde yakından analiz edildiği üzere, en güçlü şekilde ulusal bağlamla ilişkilidir. Kuzeybatıdan güneydoğu ülkelerine doğru gidildikçe, muhtemelen iklim ve yönetim özelliklerinin bir kombinasyonu nedeniyle kirlilik seviyeleri artma eğilimindedir. Özellikle, Lüksemburg'da veya



Şekil 6. Aşağıdaki değişkenler için SHAP Bağımlılık grafikleri: A) ülke, B) nüfus yoğunluğu ve C) iklim sınıfı.

kuzeybatı daha düşük kirlilik seviyeleri ile ilişkilendirilirken (SHAP= 0 çizgisinin altında), diğer tüm ülkeler için tahmin üzerinde önemli bir pozitif etki gözlenmektedir. İlginç bir şekilde, SHAP değerlerinin 5 ülke grubuna göre katmanlaştığı görülmektedir: 1. grup 5 ülkeyi (İzlanda, Norveç, İsveç, Finlandiya ve Estonya) içermekte ve sıklıkla -5'in altında SHAP değeri ile hava kirliliği ile olumsuz etkiler göstermektedir, 2. grup (Letonya'dan İrlanda'ya) kabaca -2,5'te, 3. grup (Hollanda'dan Lüksemburg'a) yaklaşık -2'de, 4. grup (Polonya'dan Kıbrıs'a) 2,5'te (ülkeler arası daha büyük değişkenlikle) ve 5. grup kiye ve İsrail) 6'nın üzerinde SHAP ile en yüksek seviyeye ulaşmaktadır.

- İkinci en etkili değişken nüfus yoğunluğudur. Şekil '6B'de açıkça görüldüğü gibi, SHAP değeri logaritmik bir fonksiyon izleyerek nüfus yoğunluğuyla birlikte artmakta, böylece düşük yoğunluk seviyelerinde nüfus yoğunluğundaki her artış için çok keskin bir şekilde artmakta ve daha sonra düzleşmektedir. Eğri yaklaşık 2000 kişi/km²'de SHAP= 0 çizgisini kesmekte ve 2500 kişi/km²'nin ötesinde aniden düzleşmektedir. İlginç bir şekilde, Kennedy ve diğerlerinin (2011) çalışmasında kara taşımacılığının kaynaklanan kişi başına sera gazı emisyonları için de benzer bir model gözlenmektedir.
- Şekil 5'. te görünen üçüncü açıklayıcı değişken iklim sınıfıdır. Köppen-Geiger sınıfları soğuk nemli den sıcak kuruya doğru sıralandığından, Şekil 6C'deki bağımlılık grafiği de aynı mantığa uymaktadır, dolayısıyla i) ana sınıf E'den (kutup) B'ye (kuruya), ii) her sınıf içinde alt sınıf "kurak mevsim yok "tan f) "kurak yaz "a (s) ve iii) her alt sınıf içinde sıra soğuktan (c) sıcak yaz (a) doğrudur. Bu durumda, SHAP değerinin iklim sınıfıyla orantılı olarak daha fazla artmasıyla birlikte üstel bir eğilim gözlemlenebilir. Özellikle, üç ana seviye ayırt edilebilir: -0.8 civarında SHAP ile negatif etki (ET ve Dfc sınıfları), -0.5 ile 0 arasında SHAP ile hafif negatif etki (Dfb, Csb, Csa, Cfc ve Cfb sınıfları) ve iki sınıf için 1'in üzerinde SHAP ile oldukça pozitif bir etki (Cfa)

ve BSk). Bu durum, PM_{2.5} seviyelerinin, emisyon modellerine ve diğer iklimsel ve meteorolojik hususlara da bağlı olsa bile, iklim daha sıcak ve kuru hale geldikçe bir dereceye kadar artma eğiliminde olduğunu göstermektedir (AÇA, 2023). Ayrıca, Cfb en kalabalık ancak SHAP değerlerinin çeyrekler arası aralığı çok dardır. Buna karşılık, sadece 20 şehri temsil eden Cfa sınıfı için değişkenlik tüm sınıflar arasında açık ara en yüksektir.

- Sıralamada yer alan aşağıdaki öngörücüler sera gazı emisyonları ile ilgilidir. Özellikle, sabit enerji sektöründe veya tüm sektörlerde daha yüksek kişi başı emisyonlar, belirli bir değişkenlik gözlemlense de, daha yüksek kirlilik seviyeleriyle ilişkilendirilirken; ulaşım sektöründeki daha düşük kişi başı sera gazı emisyonları, düşük ve yüksek değişken değerler arasında keskin bir ayrım açıkça ayırt edilemese de, tahmini (artan PM_{2.5} konsantrasyon seviyeleri) artırıyor gibi görünmektedir. Bu gözlem mantığa aykırı görünebilir, ancak ulaşım sektöründe daha düşük sera gazı emisyonlarına sahip şehirlerde sürdürülebilir ulaşım seçeneklerinin uygulanmasına daha az vurgu yapıldığını ve bunun da potansiyel olarak daha düşük hava kalitesi seviyelerine neden olduğunu gösterebilir.
- Sıralamadaki yedinci değişken (ve politika dışı değişkenler arasında sonuncu) şehrin kıyı olup olmadığıdır, yani kıyı şeridinin 10 km içinde yer almaktadır (Ulpiani vd., 2024). Değişken ikilidir (0 veya 1) ve hava kalitesiyle ilişkisi de böyledir: tüm kıyı şehirlerine negatif bir SHAP değeri (yani daha iyi hava) atanırken, iç kesimlerdeki şehirler sistematik olarak pozitif bir SHAP değeri sergilemektedir. Bu ilişki, kıyı bölgelerinin genellikle iç bölgelere göre daha güçlü ve daha sık rüzgarla ilişkili olmasıyla bağlantılıdır (Lv vd., 2021).

Politika değişkenleri üzerine yapılan analiz (Şekil 5'teki alt blok), fiziksel değişkenlere kıyasla göreceli ağırlıkları ve farklı politika boyutları arasındaki ağırlık değişkenliği hakkında fikir vermektedir. Şöyle bir durum gözlemlenmektedir:

- Politika değişkenlerinin açıklayıcı gücü fiziksel değişkenlere kıyasla nispeten daha düşüktür. Bunlar özünde farklı özelliklerdir ve haklı olarak farklı anlam eşiklerine sahip olabilirler. Belirli bir politikanın yürürlükte olmasının etkililiği gerektirmediği düşüncesinin ötesinde, politika unsurları, siyasi döngüler kadar kısa ömürlü olabileceğinden, fiziksel olgulardan daha az kalıcı olma eğilimindedir.
- İlginç bir şekilde, daha yüksek kirlilik, iklim ve hava kalitesi eylemlerine daha fazla katılımla ilişkilidir (burada her iki hususla ilgili daha fazla sayıda tedbir ve "diğer" sektörel planlar - kümülatif sayı). Dolayısıyla, hava kalitesine yönelik daha fazla müdahaleden bahseden şehirler, hava kalitesini bir öncelik olarak görüyor olabilir ve bu tür zorlukların üstesinden gelmek için, yani reaktif bir şekilde, daha fazla tedbir tasarlayıp uygulayabilirler.
- Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Planları (SUMP'ler) PM_{2.5} tahmininde enerji veya diğer planlardan önemlidir. Bu durum, ulaşım sektöründe faaliyet göstermenin sera gazı emisyonlarını ve hava kirlleticilerini azaltma gibi ikili bir zorlukta umut vaat ettiği ve aynı zamanda tipik bir şehir ölçeği önlemi olduğu fikrini güçlendirmektedir. Ayrıca analiz, SUMP'ların çok belirgin olmasa da hava kalitesi üzerinde fayda sağlamanın bir yolu olarak algılandığını göstermektedir. Bu durum, ulaşım sektörü PM_{2.5} kaynağı olarak önem sırasına göre dördüncü sektör olsa ve sera gazı emisyonlarının ortalama %25'ini oluşturmasa bile gözlemlenmektedir (bkz. [Şekil 1C](#)).
- Hava kirliliğinin daha yüksek olduğu kentler erken ölümler konusunda daha fazla endişe duyma eğilimindedir. Tersine, halk sağlığı konusunda harekete geçme veya politika kararları alma gücüne sahip olan ya da politikalarının fiziksel sağlık üzerindeki etkilerini takip eden şehirler daha iyi hava kalitesine sahip olma eğilimindedir. Daha kirliliği erken ölümlerden daha kolay etkilenebilir ve belirli bir kontrolü sürdürmek ve/veya vatandaşlarını korumak için zaman içindeki eğilimleri izlemek zorunda kalabilir. Öte yandan, sektörüyle daha doğrudan ilgilenen şehirler geçmişte proaktif bir duruş sergilemiş ve daha sıkı düzenlemeler veya politikalar uygulamış olabilir. Ayrıca, özellikle hava kalitesinin daha düşük olduğu bölgelerde ikamet eden hassas nüfusları etkileyen, kirliliğe maruz kalma ile bağlantılı sağlık eşitsizliklerini ele alıyor olabilirler ([Della Valle ., 2023](#)). Bu yorumu doğrulamak için, erken ölümlerle ilgilenen şehirler grubunun i) yoksul/hassas nüfuslar için güvenlik/koruma veya ii) sosyal içme, eşitlik ve adalet (kategori altında listelenen ortak faydalar) açısından da daha ilgili olup olmadığını belirlemek amacıyla Cities Mission veri seti üzerinde ek bir analiz yapılmıştır. Nitekim Ki-kare testi oldukça anlamlı bir istatistiksel korelasyon ortaya koymaktadır ($p < 0.001$, bkz. Ek Not 2).
- Şehirlerin endüstriyel emisyonlar üzerinde güç sahibi olması, hava kalitesinin raporlanması veya gürültü kirliliğinin takibi daha yüksek kirlilik seviyeleri ile ilişkilendirilmektedir. Bu şehirler muhtemelen önemli kirlenme kaynakları (sanayi ve trafik) ev sahipliği yapmaktadır.

Diğer tüm korelasyonlar çok sınırlı bir tahmin gücü ile karakterize edilir ve/veya düşük ve yüksek değişken değerleri arasında net bir eğilim göstermez. Özellikle, [Şekil 1C](#)'ye göre bu sektör hava kirliliğinin en önemli üçüncü kaynağı olmasına rağmen, tarımla ilgili politikaların çok düşük bir sıralamada yer alması ilginçtir. Tarım, muhtemelen kentsel olmayan boyutu nedeniyle ve muhtemelen tarım emisyonlarının kentsel ortam hava kirliliğine çoğunlukla ikincil nitrat PM oluşumu yoluyla dolaylı bir şekilde katkıda bulunması, genellikle kentsel kirliliğe önemli bir katkı olarak algılanmamaktadır ([Clappier vd., 2021](#)).

4. Tartışma ve Sonuçlar

Sonuçlarımız, Avrupa şehirlerindeki hava kalitesi ve sera gazı emisyonları arasındaki etkileşimin karmaşıklığını ve bunlarla mücadele etmeye yönelik eylemler arasındaki potansiyel bağlantıları vurgulamaktadır. Beklendiği gibi, hava kirliliği konsantrasyonları, ulusal hava kalitesi ve sera gazı emisyonları gibi fiziksel değişkenlerden önemli ölçüde etkilenmektedir.

bağlam, nüfus yoğunluğu, iklim, sera gazı emisyonları ve kıyıya yakınlık. Bu değişkenlerin etkisinin göreceli sıralaması, yaklaşımımızın genel güvenilirliğini desteklemekte ve Avrupa genelinde hava kirliliğinin coğrafyasına ilişkin bazı köklü bulguları doğrulamaktadır ([EEA, 2023](#)). Bununla birlikte, son literatürün çoğunun, özellikle iklim azaltımı ve hava kirliliği birlikte görüldüğünde politika unsurlarının önemini vurguladığı belirtilmektedir. Örneğin, [Liu ve diğerlerinin \(2024a\) çalışmasında](#), çevre düzenlemeleri, emisyonlar ve kirliliğin azaltılması arasındaki sinerjiyi teşvik eden en etkili faktör olarak ortaya çıkmış ve fiziksel değişkenleri geride bırakmıştır.

Araştırmamız bu son akımı takip etmekte ve politika oluşturma, sera gazı emisyonları ve hava kalitesi arasındaki potansiyel olarak önemli bağlantıları sorgulamaktadır. Analizden aşağıdaki yorum ortaya çıkmaktadır. Şehirler şunlar olabilir:

- Ortam hava kalitesini artırma veya koruma konusunda proaktif olan (örneğin, hava kirlenme emisyonları azaltma, halk sağlığını iyileştirme ve çevre sorunlarına sosyal açıdan daha adil bir yaklaşımı teşvik etme konusunda aktif olarak çalışan) ve bu nedenle daha yüksek hava kalitesiyle ilişkili olan. Bu şehirler, iklim azaltım eylemlerinde önleyici bir strateji geliştirmeye devam etmek için iyi bir konumdadır; ve
- yüksek halk sağlığı ve ekonomik yüklerle ilişkilendirilebilecek mevcut hava kirliliği sorunlarına reaktif olan ve iklim ve hava kalitesi önlemlerine en fazla katılım gösterme eğiliminde olan şehirler. Hava kirliliği sorunlarını henüz çözmemiş olan (ve muhtemelen hava kalitesi standartlarına uyması gereken) bu şehirler, hava kalitesini birlikte hedeflemek için gelecekteki iklim azaltma politikaları ve eylemlerinden yararlanma şansına sahiptir.

Cities Mission analizinden elde edilen sonuçlar, şehirlerin özellikle enerji ve ulaşım sektörlerine yönelik politika eylemlerinin potansiyel olarak en önemli etkilere yol açabileceğine inandığını göstermektedir. Mevcut literatür de bu görüşü desteklemektedir. Hanaoka & Masui tarafından yapılan bir çalışma, yenilenebilir enerjilerin yaygın olarak benimsenmesi, ulaşım, konut ve ticari sektörlerde alt düzeyde elektrifikasyon, ulaşım da biyoyakıt kullanımının artırılması ve karbon giderme teknolojilerinin yaygınlaştırılmasını içeren stratejilerin hem sera gazı emisyonlarını hem de hava kirlenme emisyonlarını etkili bir şekilde azaltabileceğini öne sürmektedir ([Hanaoka & Masui, 2020](#)). Elektrifikasyonun rolü [Fournier ve diğerleri \(2022\)](#) tarafından da vurgulanmaktadır. Yazarlar, yerel hava kalitesi faydalarının öncelikle gaz tüketimindeki azalma miktarı tarafından belirlendiğini, oysa ortam hava kalitesi üzerindeki etkilerin yük profillerindeki değişikliklerin zamanlamasına bağlı olduğunu belirtmektedir. Farklı küresel bağlamlarda yapılan çeşitli çalışmalar, transport ve endüstriyel faaliyetlerin neden olduğu çevresel bozulmanın ele alınmasında politika müdahalelerinin kritik rolünün altını çizmektedir ([Slovic vd., 2016](#)). Bu politikalar genellikle yerel ihtiyaçlara öncelik vermekte, farkındalık kampanyalarını savunmakta ve eğitim programları gibi sosyal boyutları entegre etmektedir. Ulaşım sektöründeki kilit stratejiler arasında toplu taşıma ve bisiklet gibi aktif modların teşvik edilmesi, yol altyapısının iyileştirilmesi ve elektrikli araçlar gibi daha temiz araç teknolojilerinin benimsenmesi yer almaktadır ([Wu ., 2024](#)). Enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji üretimine ilişkin tedbirlerin uygulanması, iklim faydalarının yanı sıra hava kalitesi üzerinde de önemli etkilere sahip olabilir. Bu [Buonocore ., 2016](#) stratejiler PM_{2.5} ve diğer kritik kirlenme emisyonlarının azaltılabilir. Bunun da ötesinde, kentsel yeşil (örneğin parklar, ormanlar ve yeşil çatılar) net sıfır sera gazı ve hava kirliliğine sahip şehirlere geçişte ve faydaların adil ve eşit bir şekilde önemli bir rol oynayabilir ([Wolch vd., 2014](#)). Bu bağlamda, analizimiz (bkz. [Şekil 4](#)) yeşil alanların/altyapının ve kentsel arazi kullanımının kentlerin en yaygın olarak harekete geçme gücüne sahip olduğu alan olduğunu göstermektedir.

Genel olarak sonuçlar, ortak faydaya sahip sektörlerin yaklaşımının en belgelenmiş ve faydalı olduğu, hem sera gazı emisyonlarına hem de PM_{2.5} seviyelerine en büyük katkıyı sağladığı; dolayısıyla hava kalitesi faydasını en üst düzeye iklim nötrlüğü planları geliştirmek için geniş bir fırsat alanı olduğu görülmektedir. İlginç bir şekilde, analizimiz aynı zamanda şehirlerin algıları arasında bazı uyumsuzluklara dair kanıtlar da sunmaktadır.

sektörel planlar dahilinde önceliklendirme) ve kaynak paylaşımı sonuçlarını etkilemektedir, ancak bu genel olarak tutarlı bir resim bağlamında gerçekleşmektedir. Özellikle, ulaşım sektörünün hava kalitesi üzerindeki etkisinin bir dereceye kadar fazla tahmin edildiği ve bunun simetrik olarak tarımın rolünün potansiyel olarak hafife alınmasıyla birleştiği görülmektedir.

Analiz ayrıca, şehirlerin çift hedefli bir yaklaşımı teşvik etmek için herhangi bir adım atmadan hava kalitesini iklim azaltımının potansiyel bir eş faydası olarak kabul ettikleri gerçeğini de ortaya koymaktadır. Aslında, ankete katılan şehirlerin neredeyse tamamında, yerel ölçekli iklim azaltım politikalarının/eylemlerinin atmosferik kirlilik üzerinde yarattığı olası eş faydaları/olumsuz etkileri ve/veya tam tersini değerlendirmek için girişimlerde bulunulmuştur. Bu doğrultuda, O'Regan & Nyhan tarafından yakın zamanda yapılan bir meta inceleme, hem sera gazı emisyonu hem de hava kirliliği azaltma hedeflerine yönelik ilerlemeyi bilgilendirebilecek ve izleyebilecek son teknoloji izleme ve modelleme araçlarını vurgulamaktadır. Bu araçlar arasında emisyon envanterleri, hava kalitesi izleme ve modelleme metodolojilerinin yanı sıra sağlık etki değerlendirme araçları ve sokak düzeyinde yeşil alan ölçümü de yer almaktadır (O'Regan & Nyhan, 2023) ve bunların tümü Misyon şehirlerinin İklim Nötrlüğü Eylem Planlarına entegre etmeleri için teşvik edilmektedir.

İklim azaltım çözümleri hava kirliliği açısından hem sinerjik hem de antagonistik olabileceğinden, etkili izleme, potansiyel yük kaymalarını ve dönüşimleri (yani, bir yönü ele almaya yönelik eylemler istemeden diğerini daha da kötüleştirdiğinde) tespit etmek için de çok önemlidir. Von Schneidmesser tarafından 2015 yılında gerçekleştirilen kapsamlı bir inceleme, hava kalitesi ve iklim değişikliği arasındaki sayısız bağlantının bir özeti sunmakta ve her iki konuyu da ele almayı amaçlayan politika çabalarının birbirleriyle olan bağlantılarını dikkate alması gerektiğini vurgulamaktadır (von Schneidmesser vd., 2015). Potansiyel faydalar ve dönüşimler müdahalenin bağlamına, türüne ve konumuna göre değişebilir. Bu nedenle, bağlama özgü değerlendirmeler, ölçümler ve senaryo analizleri, iyileştirme fırsatlarını belirlemek, faydaları en üst düzeye çıkarmak ve değiş tokuşları göz ardı etmekten kaçınmak için önemlidir (X. Chen vd., 2023). Genel olarak, CH₄'ü hedef alan tedbirler hem iklim hem de O₃ hava kalitesi için fayda sağlayabilir ve siyah ve organik karbonun azaltılması önemli hava kalitesi ve halk sağlığı faydaları sunar ve potansiyel olarak yakın vadeli radyatif zorlamayı azaltır (Fiore vd., 2015). Bu durumda, özellikle iklim azaltımı odun bazlı biyokütle yakımı da dahil olmak üzere biyoyakıtlara dayandığında (Cohen vd., 2021; Tomlin, 2021) ve sülfat azaltımı durumunda (Fiore vd., 2015,) dönüşimler dikkatle dengelenmelidir. İddialı iklim azaltma hedefleri bağlamında, katı biyokütlenin ısı ve elektrik üretimi için kullanılması, biyo-bazlı yakıtlar için yaygın olarak kabul edilen "karbon nötrlüğü" hipotezi nedeniyle özellikle cazip olabilir. Bununla birlikte, biyokütle kullanımının hava kalitesine istenmeyen zararlardan kaçınmak için uygun teknolojiler aracılığıyla ele alınması gerekmektedir (Monforti-Ferrario & Belis, 2018). Şehirler Misyonu analizi, şehirlerin, belirli tedbirlerin etkisinin farklı sektörler ve hedeflere göre kontrol edildiği çok sektörlü eylem planlarına aşına olduğunu ortaya koymaktadır. Bu, potansiyel yayılmaların dengelenmesi açısından olumlu bir sinyaldir. Bununla birlikte, sera gazı ve ortam havası kirleticisi emisyonları ile bölgesel ve küresel iklimler arasındaki etkileşimlere dair anlayışımızı artırmak için daha fazla disiplinler arası araştırmaya ihtiyaç vardır (Baklanov vd., 2016).

Bu çalışma, Cities Mission veri setinin benzersizliğinden faydalanmaktadır, Bu da hava kalitesi-iklim azaltma bağlantısını hibrit bir fiziksel ve politika perspektifinden inceleme imkanı sunmaktadır. Buna ek olarak, CAMS reanalizinden ve son teknoloji modelleme sonuçlarından elde edilen verilerin dahil edilmesi, kentsel düzeyde arka plandaki hava kalitesinin net ve kapsamlı bir resmiyi sunmaktadır. Son olarak, gelişmiş makine öğrenimi tekniklerinin genişletilmiş yorumlama yetenekleriyle birlikte kullanılması, her bir farklı özelliğin (girdinin) çıktısı etkilemedeki önemini şeffaf bir şekilde değerlendirmeyi mümkün kılmaktadır. Öte yandan, sonuçların sağlamlığı, Cities Mission veri setinin kendi kendine bildirilen doğası, coğrafi dengesizliği, sera gazı emisyonlarına karşı hava kalitesi eşit olmayan odaklanma ve sektörler arası veri eksikliği ile sınırlıdır. Ayrıca, bazı önemli fiziksel değişkenler dikkate alınmamıştır (örneğin meteorolojik değişkenler, ekonomik ölçütler). Gelecekteki araştırmalar

daha kapsamlı bir anlayış sağlamak için daha geniş bir girdi değişkenleri kümesi içerebilir ve yatay alanları ve daha sektöre özgü nüansları keşfedebilir.

Sonuç olarak bu araştırma, sera gazı emisyonları ile hava kirliticilerinin azaltılması arasında politika oluşturmada ortak fayda yaklaşımı için fırsat alanının belirlenmesine yardımcı olmaktadır. Giderek daha sıkı hale gelen sera gazı azaltım hedeflerine uyma telaşında, hava kirliliği kontrolünün de kilit bir hedef olarak kalması çok önemlidir. Sera gazı ve ortamdaki hava kirleticisi emisyon kaynaklarının örtüşmesi, küresel ısınmayı sınırlandırmak ve hava kalitesini aynı anda iyileştirmek için politika önlemleri için kapsam yaratmaktadır. Bu entegrasyon, şehirlerin iddialı iklim nötrlüğü hedeflerine ulaşırken aynı zamanda halk sağlığını ve çevreyi korumaları için umut verici bir yol sunmaktadır. Ancak, bağlam ve politika etkinliğindeki çeşitlilik ile kentsel sistemlerin ve bunların çevresel etkilerinin karmaşıklığı, özel karar verme yaklaşımları gerektirmektedir. Etkili kanıta dayalı politika oluşturma ve uygulama, sonuçları optimize etmek için bağlama özgü değerlendirme ve ayarlama gerektirir ve hem sera gazı emisyon azaltımlarının hem de artan hava kalitesinin (ve bunun sonucunda halk sağlığı faydalarının) adil bir şekilde dağıtılmasını sağlar. Son olarak, tüm iklim azaltım stratejilerinin hava kalitesini iyileştirmediği unutulmamalıdır. Bu bağlantılar hakkında daha sağlam ve nicel bir bilimsel anlayış geliştirmek, istenmeyen etkilerin azaltılmasına yardımcı olabilir.

Veri beyanı

Çalışmada analiz edilen veri seti, gizlilik nedeniyle kamuya açık değildir.

CRediT yazarlık katkı beyanı

G. Ulpiani: Yazım - inceleme ve düzenleme, Yazım - orijinal taslak, Görselleştirme, Metodoloji, Araştırma, Biçimsel analiz, Veri , Kavramsallaştırma. **E. Pisoni:** Yazım - gözden geçirme ve düzenleme, Yazım - orijinal taslak, Görselleştirme, Metodoloji, Araştırma, Biçimsel analiz. **J. Bastos:** Yazım - gözden geçirme ve düzenleme, Metodoloji, Resmi analiz. **F. Monforti-Ferrario:** Yazım - gözden geçirme ve düzenleme, Süpervizyon. **N. Vetter:** Yazım - inceleme ve düzenleme, Süpervizyon.

Rekabetçi çıkar beyanı

Yazarlar, bu makalede rapor edilen çalışmayı etkileyebilecek bilinen herhangi bir rakip finansal çıkarları veya kişisel ilişkileri olmadığını beyan etmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma 2021-2022 Horizon Europe Misyonları Çalışma Programı (10 Mayıs 2022 tarihli C(2022)2975 sayılı Avrupa Komisyonu Kararı) kapsamında finanse edilmiştir. Burada ifade edilen görüşler tamamen çalışma sahiplerine aittir ve hiçbir koşulda Avrupa Komisyonu'nun resmi görüşü olarak kabul edilemez.

Tamamlayıcı materyaller

Bu makale ile ilişkili ek materyaller çevrimiçi versiyonda doi:10.1016/j.scs.2024.106059 adresinde bulunabilir.

Veri kullanılabilirliği

Kullanılan veriler gizlidir.

Referanslar

Baklanov, A., Molina, L. T., & Gauss, M. (2016). Megakentler, hava kalitesi ve iklim. *Atmospheric Environment*, 126, 235-249. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.11.059>

- Boyd, D., Pathak, M., van Diemen, R., & Skea, J. (2022). İklim değişikliğine uyumun azaltım eş faydaları: Sekiz şehir üzerine bir vaka çalışması analizi. *Sürdürülebilir Şehirler ve Toplum*, 77, Makale 103563. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103563>
- Brauer, M., Roth, G. A., Aravkin, A. Y., Zheng, P., Abate K. H., Abate, Y. H., Abbafati, C., Abbasgholizadeh, R., Abbasi, M. A., & Abbasian, M. (2024). Küresel yük ve 204 ülke ve 811 alt ulusal 88 risk faktörü için kanıt gücükonumdaki , 1990-2021: Küresel Hastalık Yükü Çalışması için sistematik bir analiz. 2021 *Lancet*, 403(10440), 2162-2203.
- Buonocore, J. J., Luckow, P., Norris, G., Spengler, J. D., Biewald, B., Fisher, J., & Levy, J. I. (2016). Farklı enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji seçeneklerinin sağlık ve iklim açısından faydaları. *Nature Climate Change*, 6(1), 100-105. <https://doi.org/10.1038/nclimate2771>
- CAMS. (2023). *ENSEMBLE yeniden analizlerinin 2013-2020 dönemi çok yıllık değerlendirme raporu*. https://atmosphere.copernicus.eu/sites/default/files/custom-uploads/EQC-regional/VRA/CAMS2_40b_2021ISC1_D40.5.3.2_202304_VRA2013-2020_evalu.pdf.
- Chae, Y., & Park, J. (2011). Seul Metropolitan Bölgesi'nde hava kalitesi yönetimi ve sera gazı azaltımına yönelik entegre çevresel stratejilerin maliyet ve faydalarının ölçülmesi. *Energy policy*, 39(9), 5296-5308. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.05.034>
- Chen, T., & Guestrin, C. (2016). Xgboost: Ölçeklenebilir bir ağaç güçlendirme sistemi 22. ACM SIGKDD Uluslararası Bilgi Keşfi ve Veri Konferansı Bildirileri/Madencilik ; 2016: 785-794. *ACM, New York, NY*.
- Chen, X., Di, Q., Jia, W., & Hou, Z. (2023). Üç Çin kentsel yığılmasında yüksek kaliteli ekonomik kalkınma ile birlikte kirlilik ve karbon emisyonu azaltımlarının mekansal korelasyon ağı. *Sürdürülebilir Şehirler ve Toplum*, 94, Makale 104552. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104552>
- Clappier, A., Thunis, P., Beekmann, M., Putaud, J. P., & de Meij, A. (2021). SO_x, NO_x ve NH₃ emisyon azaltımlarının Avrupa genelinde PM_{2.5} konsantrasyonları üzerindeki etkisi: Gelecekteki önlemlerin geliştirilmesi için ipuçları. *Environment International*, 156, Article 106699. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106699>
- Cohen, B., Cowie, A., Babiker, M., Leip, A., & Smith, P. (2021). İklim değişikliği azaltım eylemlerinin ve Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerinin ortak faydaları ve değiş *Sustainable Production and Consumption*, 26, 805-813. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.12.034>
- Crippa, M., Guizzardi, D., Pisoni, E., Solazzo, E., GuionAMuntean M., Florczyk, ., A., Schiavina, M., Melchiorri, M., & Hutfilter, A. F. (2021). küresel antropojenik Kentsel alanlarda emisyonlar: Kalıplar, eğilimler ve zorluklar. *Environmental Research Letters*, 16(7), 74033.
- Della Valle, N., Ulpiani, G., & Vetter, N (2023). İklim nötr olacak şehirler arasında iklim adaleti farkındalığının değerlendirilmesi. *Humanities and Social Sciences Communications*, 10(1), 440. <https://doi.org/10.1057/s41599-023-01953-y>
- AÇA. (2022). *ETC HE Raporu 2022/10: Hava Kirliliğinin Sağlık Riski roducts/etc -he-products/etc -he-reports/etc -he-report-2022-10-health-risk-asstDeğerlendirilmesi ve Yeni WHO Kılavuzlarının Etkisi*. <https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc -he/p ssment-of-air-pollution-and-the-impact-of-the-new-who-guidelines>.
- AÇA. (2023). *Avrupa'nın hava kalitesi durumu 2023*. <https://www.eea.europa.eu/publications/europes-air-quality-status-2023>.
- Erickson, L. E. (2017). Sera gazı emisyonlarının azaltılması ve hava kalitesinin iyileştirilmesi: İki küresel zorluk. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 36(4), 982-988.
- Avrupa Komisyonu. (2021). *Sıfır Kirlilik Eylem Planı*. https://environment.ec.europa.eu/strategy/zero-pollution-action-plan_en.
- Avrupa Komisyonu. (2022). *COM/2022/542 final. Avrupa için ortam hava kalitesi ve daha temiz havaya ilişkin bir Avrupa Parlamentosu ve Konsey direktifi (kayıp) (yeniden düzenleme)*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2022%3A542%3AFIN>.
- Avrupa Komisyonu. (2024). *MyCovenant, Avrupa Belediye Başkanları Sözleşmesi Topluğunun özel alanı*. <https://mycovenant.eumayors.eu/site/landing>.
- Fiore, A. M., Naik, V., & Leibensperger, E. M. (2015). Hava kalitesi ve iklim bağlantıları. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 65(6), 645-685.
- Fournier, E. D., Federico, F., Cudd, R., Pincetl, S., Ricklefs, A., Costa, M., Jerrett, M., & Garcia-Gonzales, D. (2022). Kaliforniya'daki dezavantajlı bir toplulukta farklı konut binası elektrifikasyon yollarından kaynaklanan net sera gazı emisyonları ve hava kalitesi sonuçları. *Sürdürülebilir Şehirler ve Toplum*, 86, Makale 104128. doi.org/10.1016/j.scs.2022.104128
- Hanaoka, T., & Masui, T. (2020). Asya'da 2 ° C hedefi seviyesine yönelik hava önlemleri ve düşük karbon önlemleri kombinasyonlarının sinerjilerini ve ödünleşimlerini dikkate alarak etkili kısa ömürlü iklim kirlenici azaltım senaryolarının araştırılması. *Environmental Pollution*, 261, Article 113650. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113650>
- He, N., Zeng, S., & Jin, G. (2023). Karbon azaltımı ve kirlilik azaltımı arasında sinerji elde edilmesi: Yeşil finans önemli mi? *Journal of Environmental Management*, 342, Makale 118356. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118356>
- IPCC. (2022). *Politika Yapıcılar için Özet içinde: İklim Değişikliği 2022: İklim Değişikliğinin Azaltılması. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli Altıncı Değerlendirme Raporuna Çalışma Grubu III'ün Katkısı*. <https://doi.org/10.1017/9781009157926.001>
- Karlsson, M., Alfredsson, E., & Westling, N. (2020). İklim politikası eş faydaları: Bir inceleme. *Climate Policy*, 20(3), 292-316.
- Kennedy, C., Steinberger, J., Gasson, B., Hansen, Y., Hillman, T., Havra' nek, M., Pataki, D., Phdungsilp, A., Ramaswami, A., & Mendez, G. V. (2011). Küresel şehirlerden kaynaklanan sera gazı emisyonları. *Environmental Science & Technology*, 45(8), 3816-3817. <https://doi.org/10.1021/es200849z>
- Khomenko, S., Pisoni, E., Thunis, P., Bessagnet, B., Cirach, M., Jungman, T., Barboza, E. P., Khreis, H., Mueller, N., Tonne, C., de Hoogh, K., Hoek, G., Chowdhury, S., Lelieveld, J., & Nieuwenhuijsen, M. (2023). Mekansal ve sektörel Avrupa şehirlerinde emisyonların ortam hava kirliliğine ve ölüm oranlarına spesifik katkıları: Bir sağlık etki değerlendirmesi. *The Lancet Public Health*, 8(7), e546-e558. [https://doi.org/10.1016/S2468-2667\(23\)00106-8](https://doi.org/10.1016/S2468-2667(23)00106-8)
- Li, Z., Yuan, B., Wang, Y., Qian, J., & Wu, H. (2024). Dijital finansın kirlilik ve karbonun sinerjik yönetimi üzerindeki rolü: Çin şehirlerinin kanıtları. *Sürdürülebilir Şehirler ve Toplum*, 115, Makale 105812. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105812>
- Liu, F., Klimont, Z., Zhang, Q., Cofala, J., Zhao, L., Huo, H., Nguyen, B., Scho' pp, W., Sander, R., Zheng, B., Hong, C., He, K., Amann, M., & Heyes, C. (2013). Çin şehirlerinde hava kirlenitçilerin ve sera gazlarının azaltılmasının entegre edilmesi: Pekin için GAINS-City modelinin geliştirilmesi. *Journal of Cleaner Production*, 58, 25-33. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.03.024>
- Liu, K., Ren, G., Dong, S., & Xue, Y. (2024a). Çin şehirlerinde kirliliğin azaltılması ve karbon azaltımı arasındaki sinerji ve bunu etkileyen faktörler. *Sustainable Cities and Society*, 106, Article 105348. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105348>
- Liu, L.-J., Liang, Q.-M., & Wei, L. (2024b). Karbon azaltımı, PM_{2.5} azaltımı ve geçim kaynaklarının iyileştirilmesinin bütünleştirilmesi: Pekin'de denge dışı dinamik bir kentsel analiz. *Sustainable Cities and Society*, 101, Article 105180. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105180>
- Liu, Y., & Just, A. (2020). SHAPforxgboost: SHAP Plots for "XGBoost. *R paketi sürümü 0.1.0*. <https://github.com/liuyanguo/SHAPforxgboost/>.
- Lv, M., Li, Z., Jiang, Q., Chen, T., Wang, Y., Hu, A., Cribb, M., & Cai, A. (2021). Yangtze nehri deltasındaki tipik kıyı ve iç şehirlerde yüzey PM_{2.5}, O₃ ve NO₂'nin zıt eğilimleri ve bunların meteorolojik parametrelerle ilişkileri. *Uluslararası Çevre Araştırmaları ve Halk Sağlığı Dergisi*, 18(23). <https://doi.org/10.3390/ijerph182312471>
- Ma, J., Ding, Y., Cheng, J. C. P., Jiang, F., Tan, Y., Gan, V. J. L., & Wan, Z. (2020). Büyük veri ve makine öğrenimi teknikleri kullanılarak ulusal ölçekte hava kalitesinin yüksek etki faktörlerinin belirlenmesi. *Temiz Üretim Dergisi*, 244, Makale 118955. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118955>
- Maione, M., Fowler, D., Monks, P. S., Reis, S., Rudich, Y., Williams, M. L., & Fuzzi, S. (2016). Hava kalitesi ve iklim değişikliği: Avrupa için yeni kazan-kazan politikaları tasarlamak. *Environmental Science & Policy*, 65, 48-57. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.03.011>
- Melica, G., Treville, A., Franco De Los Rios, C., Baldi, M., Monforti-Ferrario, F., Palermo, V., Ulpiani, G., Ortega Hortelano, A., Lo Vullo, E., Marinho Ferreira Barbosa, P., & Bertoldi, P. (2022). *Belediye Başkanları Sözleşmesi: 2021 değerlendirilmesi*. Avrupa Birliği Yayınlar Ofisi. <https://doi.org/10.2760/58412>
- Monforti-Ferrario, F., & Belis, C. (2018). Konut sektöründe biyokütlenin sürdürülebilir kullanımı. *Avrupa Komisyonu*. <https://doi.org/10.2760/908058>
- Monforti-Ferrario, F., Crippa, M., & Pisoni, E. (2024). farklı hızlarının ele alınması. *Dünya genelinde iklim ve hava kalitesi yanna emisyonlarının İscience*, (1), 27.
- Monforti-Ferrario, F., Kona, A., Peduzzi, E., Pernigotti, D., & Pisoni, E. (2018). Covenant of Mayors girişimini imzalayan büyük şehirlerde enerji tasarrufu önlemlerinin hava kalitesi üzerindeki etkisi. *Environment International*, 118, 222-234. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.06.001>
- O'Regan, A. C., & Nyhan, M. M. (2023). Sürdürülebilir ve net sıfır şehirlere doğru: Kentsel alanlarda hava kalitesinin iyileştirilmesi için emisyon azaltma stratejilerinin optimize edilmesine çevresel modelleme ve izleme araçlarının gözden geçirilmesi. *Environmental Research*, 231, Article 116242. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116242>
- Peduzzi, E., Baldi, M. G., Pisoni, E., Kona, A., Bertoldi, ., & Monforti-Ferrario, F. (2020). Bir iklim değişikliği girişiminin hava kirlenici emisyonları üzerindeki etkileri: Belediye Başkanları Sözleşmesi'nden İlgörüler. *Environment International*, 145, Article 106029. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106029>
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). güncellenmiş dünya haritası. Ko' ppen-Geiger iklim sınıflandırmasının *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 4(2), 439-473.
- Pisoni, E., Christidis, P., & Navajas Cawood, E. (2022). Aktif hareketlilik motorlu ulaşımına karşı mı? Kullanıcı tercihleri ve toplum için faydalar. *Science of The Total Environment*, 806, Article 150627. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150627>
- Pisoni, E., Thunis, P., & Clappier, A. (2019). Hava kalitesi politikası senaryolarının değerlendirilmesi için EMEP MSC-W modeline dayanan SHERPA kaynak-reseptör ilişkilerinin uygulanması. *Atmosferik Çevre: X*, 4, Makale 100047. <https://doi.org/10.1016/j.aeoa.2019.100047>
- Pisoni, E., Thunis, P., De Meij, A., Wilson, J., Bessagnet, ., Crippa, M., Guizzardi, D., Belis, C. A., & Van Dingenen, R. (2023). AB iklim azaltma politikalarının hava kalitesi faydalarının iki farklı PM_{2.5} ile ilgili sağlık etkisi metodolojisi kullanılarak modellenmesi. *Environment International*, 172, Makale 107760. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.107760>
- Rogelj, J., Fransen, T., den Elzen, M. G. J., Lamboll, R. D., Schumer, C., Kuramochi, T., Hans, F., Mooldijk, S., & Portugal-Pereira, J. (2023). Net sıfır güvenilirlik açığı iklim hedeflerindeki dünyayı yüksek risk altında bırakıyor. *Science (New York, NY)*, 380(6649), 1014-1016.
- Roggero, M., Gotgfelf, A., & Eisenack, K. (2023). bir gerekçe ortak faydalar ve ortak faydalarKentsel iklim eylemi için olarak bir faktör olarak : de hava kalitesi ve emisyon azaltımlarının ilişkilendirilmesiMoskova, Paris ve Montreal'. *Climatic Change*, 176(12), 179.
- Sang, S., Chu, C., Zhang, T., Chen, H., & Yang, X. (2022). küresel hastalık yüküOrtamdaki ince partikül maddeye atfedilebilecek , 204 ülke ve bölge, 1990-2019: Küresel Hastalık Yükü Çalışması 2019'un sistematik bir analizi. *Ekotoksikoloji ve Çevre Güvenliği*, 238, Madde 113588.
- Shtjefni, D., Ulpiani, G., Vetter, N., Koukoulis, G., & Bertoldi, P. (2024). Kentsel düzeyde iklim nötr geçişlerin yönetilmesi: Bir Avrupa perspektifi. *Cities (Londra, İngiltere)*, 148, Makale 104883. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.104883>
- Slovic, A. D., de Oliveira, M. A., Biehl, J., & Ribeiro, H. (2016). Kentsel politikalar hava kalitesini nasıl iyileştirebilir ve küresel iklim değişikliğini azaltmaya nasıl yardımcı olabilir? Sistematik bir haritalama

- derleme. *Journal of Urban Health*, 93(1), 73-95. <https://doi.org/10.1007/s11524-015-0007-8>
- Thunis, P., Clappier, A., Tarrason, L., Cuvelier, C., Monteiro, A., Pisoni, E., Wesseling, J., Belis, C. A., Pirovano, G., Janssen, S., Guerreiro, C., & Peduzzi, E. (2019). Hava kalitesi planlamasını desteklemek için kaynak paylaşımı: Mevcut yaklaşımların güçlü ve zayıf yönleri. *Environment International*, 130, Article 104825. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.05.019>
- Tomlin, A. S. (2021). Enerji kaynağı olarak biyokütle kullanımının hava kalitesi ve iklim üzerindeki etkileri: Bir inceleme. *Energy & Fuels*, 35(18), 14213-14240. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c01523>
- Ulpiani, G., Treville, A., Bertoldi, P., Veters, N., Barbosa, P., Feyen, L., Naumann, G., & Santamouris, M. (2024). Şehirler kentsel aşırı ısınmaya karşı harekete geçiyor mu? 7.500'den fazla yerel iklim eyleminden elde edilen bilgiler. *One Earth*, 7(5), 848-866. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.04.010>
- Ulpiani, G., & Veters, N. (2023). Avrupa'da iklim nötrlüğüne geçişle ilgili riskler üzerine: Bir şehir perspektifi. *Yenilenebilir ve Sürdürülebilir Enerji İncelemeleri*, (113448), 183. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113448>
- Ulpiani, G., Veters, N., Melica, G., & Bertoldi, P. (2023). İklim-nötr şehirlerin ilk kohortuna doğru: Beklenen etki, mevcut boşluklar ve kanıta dayalı sıfır emisyonlu kentsel gelecekler oluşturmak için atılacak sonraki adımlar. *Sürdürülebilir Şehirler ve Toplum*, (104572), 95. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104572>
- Van, N. H., Van Thanh, P., Tran, D. N., & Tran, D.-T. (2023). Hafif makine öğrenimi kullanarak yeni bir hava kalitesi tahmin modeli. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(3), 2983-2994. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04185-w>
- Vandyck, T., Keramidas, K., Tchung-Ming, S., Weitzel, M., & Van Dingenen, R. (2020). Sektörler ve bölgeler arasında iklim politikasının hava kalitesi eş faydalarının ölçülmesi. *Climatic Change*, 163(3), 1501-1517. <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02685-7> von Schneidmesser, E., Monks, P. S., Allan, J. D., Bruhwiler, L., Forster, P., Fowler, D., Lauer, A., Morgan, W. T., Paasonen, P., Righi, M., Sindelarova, K., & Sutton, M. A. (2015). Kimya ve hava kalitesi ile iklim değişikliği arasındaki bağlantılar. *Chemical Reviews*, 115(10), 3856-3897. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00089>
- West, J. J., Smith, S. J., Silva, R. A., Naik, V., Zhang, Y., Adelman, Z., Fry, M. M., Anenberg, S., Horowitz, L. W., & Lamarque, J.-F. (2013). Gelecekteki hava kalitesi ve insan sağlığı için küresel sera gazı emisyonlarını azaltmanın ortak faydaları. *Nature Climate Change*, 3(10), 885-889. <https://doi.org/10.1038/nclimate2009>
- WHO. (2024). *Ortam (dış ortam) hava kirliliği*. [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health).
- Wolch, J. R., Byrne, J., & Newell, J. P. (2014). Kentsel yeşil alan, halk sağlığı ve çevresel adalet: Şehirleri 'yeterince yeşil' yapmanın zorluğu. *Landscape and Urban Planning*, 125, 234-244. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.01.017>
- Woo, J.-H., Kim, Y., Choi, K.-C., Lee, Y.-M., Jang, Y., Kim, J., Klimont, Z., Kim, D.-G., Lee, J.-B., Jin, H., Hu, H., & Ahn, Y.-H. (2024). Kore için bir sera gazı - hava kirliliği etkileşimleri ve sinerjileri modelinin geliştirilmesi (GAINS-Korea). *Scientific Reports*, 14(1), 3372. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-53632-w>
- Wu, X., Harrison, R. M., Chen, M., Wang, T., Lyu, R., Peng, S., Liu, R., Chen, Y., Fang, Y. R., & Yang, P. (2024). Pekin ulaşımı için iklim/hava kalitesi sinerjilerinin ve maliyet etkinliğinin değerlendirilmesi: Sürdürülebilir kalkınmaya ilişkin içgörüler. *Sustainable Cities and Society*, 104, Article 105296. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105296>
- Xu, Y., Liu, Z., Walker, T. R., Adams, M., & Dong, H. (2024). Çin'deki Yangtze Nehri Deltası bölgesinde karbondioksit emisyonu ve kirlilik azaltımı üzerindeki sinerjinin mekansal-zamansal örüntüleri ve yayılma etkileri. *Sürdürülebilir Şehirler ve Toplum*, 107, Makale 105419. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105419>
- Yin, Q., Huang, Y., Ding, C., & Jing, X. (2024). Sürdürülebilir kalkınmaya doğru: Yeşil dijital finans, Çin'de kirliliği ve karbon emisyonlarını azaltmak için bir hızlandırıcı olabilir mi? *Sürdürülebilir Şehirler ve Toplum*, 114, Makale 105722. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105722>
- Yu, W., Xu, R., Ye, T., Abramson, M. J., Morawska, L., Jalaludin, B., Johnston, F. H., Henderson, S. B., Knibbs, L. D., & Morgan, G. G. (2024). küresel ölüm tahminleri. *İnce partikül maddeye (PM2.5) kısa süreli maruz kalma ile ilişkili yükü Lancet Planetary Health*, 8(3), e146-e155.
- Yue, H., He, C., Huang, Q., Zhang, D., Shi, P., Moallemi, E. A., Xu, F., Yang, Y., Qi, X., Ma, Q., & Bryan, B. A. (2024). SDG3.9 kapsamında PM2.5 kaynaklı küresel ölümlerin önemli ölçüde azaltılması için daha iyi hava kirliliği kontrolü ve sağlık hizmetleri gerekmektedir. *Nature Communications*, 15(1), 2729. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-46969-3>
- Zauli-Sajani, S., Thunis, P., Pisoni, E., Bessagnet, B., Monforti-Ferrario, F., De Meij, A., Pekar, F., & Vignati, E. (2024). Biyokütle yakımının azaltılması, Avrupa şehirlerinde PM2.5 maruziyetini azaltmanın anahtarıdır. *Scientific Reports*, 14(1), 10210. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-60946-2>
- Zhu, Y., Xu, Y., & Yin, S. (2024). Dijital teknoloji inovasyonu, kirliliği ve karbon emisyonlarını azaltmak için nasıl sinerji yaratır? *Sustainable Cities and Society*, 105932. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105932>