



İç ortam hava kirliliği: Kaynaklar, maruziyet yolları, sağlık etkileri ve sürdürülebilir yaklaşımlar

Indoor air pollution: Sources, exposure pathways, health effects, and sustainable approaches

Zehra Bozkurt^{1,*}

¹ Düzce Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 81620, Düzce Türkiye

Öz

İç ortam hava kirliliği, insan sağlığı üzerinde önemli etkiler oluşturabilen küresel bir çevre ve halk sağlığı sorunudur. İnsanların günlük yaşamlarının büyük bölümünü kapalı ortamlarda geçirmesi, kirleticilere maruziyetin önemini artırmaktadır. Bu derleme çalışmasının amacı, iç ortam hava kirliliğinin başlıca kaynaklarını, kirleticiler türlerini, maruziyet yollarını ve sağlık etkilerini kapsamlı biçimde değerlendirmektir. Çalışmada partikül maddeler (PM_{2.5} ve PM₁₀), uçucu organik bileşikler (UOB), kalıcı organik kirleticiler (KOK) ve biyolojik kirleticilere odaklanılmıştır. Literatür incelemesi, iç ortam hava kirleticilerinin hem iç ortam hem de dış ortam kökenli olabildiğini göstermektedir. Yemek pişirme, ısıtma sistemleri, yapı malzemeleri, temizlik ürünleri ve sigara dumanı başlıca iç ortam kaynaklarını oluştururken; trafik ve endüstriyel emisyonlar infiltrasyon yoluyla iç ortamlara taşınabilen dış ortam kaynaklarıdır. Yetersiz havalandırma ve bina özellikleri, iç ortamlarda dış ortamdan gelen kirleticiler birikimini artırarak maruziyet düzeylerini yükseltebilmektedir. Çok sayıda çalışma, iç ortam kirleticilerine maruziyetin solunum yolu hastalıkları, kardiyovasküler etkiler, alerjik reaksiyonlar ve diğer kronik sağlık sorunları ile ilişkili olduğunu göstermektedir. Sürdürülebilir bina tasarımı, düşük emisyonlu malzemeler, etkili havalandırma sistemleri ve akıllı bina teknolojileri, iç ortam hava kalitesinin iyileştirilmesinde önemli stratejiler sunmaktadır. Bu nedenle, disiplinler arası yaklaşımlar ve uzun dönemli çalışmalar büyük önem taşımaktadır.

Anahtar kelimeler: İç ortam hava kalitesi, Sürdürülebilirlik, Partikül madde, Uçucu organik bileşikler, Sağlık etkileri

1 Giriş

Günümüzde iç ortam hava kirliliği, çevresel maruziyetin ve halk sağlığı risklerinin temel belirleyicilerinden biri olarak kabul edilmektedir. Kentsel ortamlarda bireylerin zamanlarının yaklaşık %80-90'ını kapalı ortamlarda (konutlar, eğitim kurumları, ofisler vb.) geçirmesi, iç ortam hava kalitesinin (İHK) sağlık üzerindeki etkilerini dış ortam hava kirliliği ile karşılaştırılabilir, hatta bazı durumlarda daha kritik bir düzeye taşımaktadır [1-3]. İç ortamlar; yetersiz havalandırma, yapı malzemelerinden kaynaklanan

Abstract

Indoor air pollution is a global environmental and public health issue that can have significant impacts on human health. The fact that individuals spend the majority of their daily lives in indoor environments increases the importance of exposure to indoor pollutants. The aim of this review is to comprehensively evaluate the major sources, types of pollutants, exposure pathways, and associated health effects of indoor air pollution. The study focuses on particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), volatile organic compounds (VOCs), persistent organic pollutants (POPs), and biological contaminants. The literature indicates that indoor air pollutants can originate from both indoor and outdoor sources. While indoor activities—such as cooking, heating, the use of building materials, cleaning agents, and tobacco smoke—constitute primary sources, outdoor emissions from traffic and industry can infiltrate indoor environments. Furthermore, inadequate ventilation and specific structural characteristics can enhance the accumulation of these pollutants, thereby increasing exposure levels. A substantial body of research demonstrates that exposure to indoor air pollutants is associated with respiratory diseases, cardiovascular dysfunction, allergic reactions, and other chronic health conditions. Sustainable building design, low-emission materials, advanced ventilation systems, and smart building technologies provide important strategies for improving indoor air quality. Therefore, interdisciplinary approaches and long-term studies are of critical importance.

Keywords: Indoor air quality, Sustainability, Particulate matter, Volatile organic compounds, Health effects

emisyonlar ve antropojenik faaliyetler sonucunda çeşitli kirleticilerin birikimi için uygun bir ortam oluşturmaktadır. Bu kirleticilerin sinerjik etkileri, solunum yolu ve kardiyovasküler hastalıklara kadar uzanan geniş bir yelpazede morbidite riskini artırmaktadır [4].

İç ortam hava kirliliği; partikül maddeler (PM_{2.5} ve PM₁₀), polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH), uçucu organik bileşikler (UOB), karbon monoksit (CO), azot dioksit (NO₂), ozon (O₃), formaldehit ve çeşitli potansiyel toksik elementleri (PTE) içeren heterojen ve karmaşık bir

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: zehrabozkurt@duzce.edu.tr (Z. Bozkurt)

Geliş / Received: 22.04.2026 Kabul / Accepted: 22.07.2026 Yayınlanma / Published: 30.07.2026

doi: 10.28948/ngumuh.1936319

kimyasal kompozisyona sahiptir [5]. Bu kirleticilerin iç ortamdaki varlığı; yapı malzemelerinden kaynaklanan emisyonlar, temizlik ürünlerinin kullanımı, tütün dumanı, biyokütle yakımı, pişirme faaliyetleri ve elektronik cihazlar gibi çeşitli iç ortam kaynaklarına dayanmaktadır. Bununla birlikte, özellikle yüksek kentleşmenin gözlemlendiği bölgelerde, trafik emisyonları ve endüstriyel faaliyetlerden kaynaklanan dış ortam kirleticilerinin binalara sızması (infiltrasyon), İHK'yi belirleyen temel faktörlerden biridir. Dış ortamdan iç ortama kirletici taşınımı; binaların hava değişim oranları, havalandırma sistemlerinin etkinliği ve çevresel morfoloji gibi parametrelerle doğrudan ilişkilidir ve bu durum, iç ortamların dış ortam kirleticileri için bir birikim ortamı haline gelmesine neden olmaktadır [4, 6, 7].

Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ), iç ortam hava kirliliğini küresel sağlık riskleri arasında önemli bir faktör olarak tanımlamaktadır. Özellikle düşük ve orta gelirli ülkelerde katı yakıtların (odun, kömür, biyokütle) pişirme ve ısınma amacıyla kullanılması, iç ortam hava kirliliğinin başlıca nedenlerinden biridir [8]. Bu yakıtların eksik yanması sonucu iç ortam havasına salınan ince partikül maddeler (PM_{2.5}) ve gaz fazındaki toksik bileşenler, kronik obstrüktif akciğer hastalığı (KOAH), kardiyovasküler hastalıklar ve akciğer kanseri gibi ciddi sağlık sorunlarına neden olarak morbidite ve mortalitenin artmasına yol açmaktadır [9, 10]. Buna karşılık, gelişmiş ülkelerde kirlilik profili farklılaşmakta, modern yapı malzemeleri, sentetik iç mekan donanımları ve enerji verimliliği nedeniyle düşük hava değişim oranlarına sahip binalar, iç ortam kaynaklı kirleticilerin (UOB, formaldehit vb.) birikmesine ve "Hasta Bina Sendromu" gibi olguların ortaya çıkmasına zemin hazırlamaktadır [11]. Dolayısıyla, İHK yönetimi, sosyo-ekonomik gelişmişlik düzeyinden bağımsız olarak küresel bir çevre sağlığı önceliği olmayı sürdürmektedir. Bu nedenle, İHK'nın iyileştirilmesi yalnızca sağlıklı yaşam ortamlarının oluşturulması açısından değil, aynı zamanda sürdürülebilir şehir planlamasının da önemli bir bileşeni olarak değerlendirilmektedir [12, 13]. İç ortam hava kirliliğinin küresel bir çevre sorunu olarak ele alınmasının bir diğer nedeni ise iklim değişikliği ve enerji verimliliği politikaları ile olan yakın ilişkisidir. Enerji tasarrufu amacıyla geliştirilen yüksek yalıtımlı binalar, hava değişim oranlarını azaltarak iç ortam kirleticilerinin birikmesine yol açabilmektedir. Ayrıca, sürdürülebilir bina tasarımı, enerji verimliliği ile İHK'nın birlikte ele alınmasını gerektirmektedir [14, 15]. Günümüzde sürdürülebilir mimari yaklaşımlar, düşük emisyonlu yapı malzemelerinin kullanımı, doğal ve mekanik havalandırma sistemleri ile gelişmiş filtrasyon tekniklerinin entegrasyonu yoluyla İHK'yi iyileştirmeyi hedeflemektedir [16–20].

Sonuç olarak, iç ortam hava kirliliği hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkelerde önemli bir çevre sorunu olarak varlığını sürdürmektedir. İç ortamlarda biriken kirleticilerin insan sağlığı üzerindeki etkileri dikkate alındığında, İHK'nın izlenmesi ve iyileştirilmesine yönelik stratejilerin geliştirilmesi, sürdürülebilir ve sağlıklı yaşam alanlarının oluşturulması açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu nedenle, iç ortam hava kalitesini farklı boyutlarıyla ele alan ve mevcut bilgileri bütüncül bir yaklaşımla sentezleyen

derleme çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Mevcut derleme çalışmaları çoğunlukla İHK'nın belirli bileşenlerine odaklanırken, kirletici kaynakları, kirletici türleri, maruziyet yolları, sağlık etkileri, sürdürülebilir yaşam alanları, iyileştirme stratejileri ve gelecekteki araştırma gereksinimlerinin tek bir çerçevede birlikte değerlendirilmesi, konunun bütüncül olarak anlaşılmasına katkı sağlamaktadır. Bu durum, İHK'nın yalnızca bir çevresel maruziyet sorunu olarak değil, aynı zamanda sürdürülebilir yapılaşma, halk sağlığı ve çevre mühendisliği uygulamalarıyla ilişkili çok boyutlu bir konu olarak ele alınmasını gerektirmektedir.

2 Çalışma metodolojisi

2.1 Amaç ve kapsam

Bu derleme çalışması, iç ortam hava kirliliğine ilişkin güncel bilgileri kapsamlı bir literatür araştırması çerçevesinde bütüncül olarak değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Çalışmanın kapsamı; iç ortam hava kirliliğinin başlıca kaynaklarının ve kirletici türlerinin tanımlanmasını, insan maruziyet yolları ile sağlık etkilerinin değerlendirilmesini, İHK'nın sürdürülebilir yaşam alanlarıyla ilişkisinin incelenmesini ve uygulanabilir iyileştirme stratejilerinin ele alınmasını içermektedir. Ayrıca, literatürde yer alan derleme çalışmalarının kronolojik gelişimi incelenmiş, mevcut araştırma boşlukları belirlenmiş ve gelecekteki çalışmalar için öncelikli araştırma alanları tartışılmıştır. Bu kapsamlı değerlendirme ile İHK'ya ilişkin farklı konu başlıklarının tek bir derleme kapsamında bütüncül olarak sentezlenmesi ve daha sağlıklı, sürdürülebilir yaşam ortamlarının geliştirilmesine yönelik araştırma ve uygulamalara bilimsel bir çerçeve sunulması hedeflenmiştir.

2.2 Literatür araştırma yöntemleri

Değerlendirmeye, hakemli dergilerde yayımlanmış, tam metnine erişilebilen ve iç ortam hava kirliliğinin kaynakları, kirletici türleri, maruziyet, sağlık etkileri, sürdürülebilirlik ve iyileştirme stratejilerine odaklanan çalışmalar dahil edilmiştir. Çalışma kapsamı dışında kalan veya yeterli bilimsel içerik sunmayan yayınlar değerlendirme dışı bırakılmıştır. Literatür taraması, çevre bilimleri, halk sağlığı ve İHK alanlarında akademik yayımlar içeren uluslararası veri tabanlarında gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, Web of Science, Scopus, ScienceDirect ve PubMed veri tabanları kullanarak ilgili bilimsel çalışmalar incelenmiştir. Tarama sürecinde özellikle son yıllarda yayımlanan çalışmaların değerlendirilmesine öncelik verilmiş olmakla birlikte, iç ortam hava kirliliği araştırmalarında temel referans olarak kabul edilen önceki çalışmalar da incelenmiştir. Böylece konuya ilişkin hem güncel araştırmalar hem de literatürde önemli yere sahip klasik çalışmalar birlikte değerlendirilmiştir.

2.3 Anahtar kelimeler ve arama terimleri

Literatür taraması sürecinde, iç ortam hava kirliliği ve İHK ile ilgili çalışmaları belirlemek amacıyla çeşitli anahtar kelimeler kullanılmıştır. Arama stratejisinde aşağıdaki anahtar kelimeler ve bunların farklı kombinasyonları

kullanılmıştır: *indoor air pollution; indoor air quality; indoor particulate matter; indoor volatile organic compounds; exposure assessment; sustainable housing*. Bu anahtar kelimeler kullanılarak gerçekleştirilen taramalar sonucunda, iç ortam hava kirliliği, kirleticiler, maruziyet değerlendirme ve sağlık etkilerine odaklanan çok sayıda bilimsel çalışma belirlenmiş ve değerlendirmeye alınmıştır.

3 İç ortam hava kirliliği

3.1 İç ortam hava kirliliği kaynakları

İç ortam hava kirliliği, içsel ve dışsal faktörlerin etkileşimi sonucunda oluşan heterojen bir kirlenim kompozisyonuna sahiptir. İç ortam kaynakları kapsamında yapı malzemeleri, evsel ürünler, yanma süreçleri, pişirme, temizlik ve tütün kullanımı gibi insan faaliyetleri ve biyolojik ajanlar temel rol oynamaktadır. Özellikle boyalar, yapıştırıcılar, izolasyon materyalleri ve preslenmiş ahşap ürünleri gibi yapı bileşenleri, formaldehit ve UOB'lerin uzun süreli pasif emisyon kaynakları olarak tanımlanmaktadır [4, 21]. Bununla birlikte, temizlik ajanları ve kişisel bakım ürünleri, iç ortama çok sayıda organik bileşik salarak kimyasal bileşen çeşitliliğini artırmaktadır. Ayrıca bazı UOB'ler, iç ortamda ozon gibi oksidanlarla reaksiyona girerek ikincil kirlenimlerin oluşmasına yol açabilmektedir. Bu süreçler sonucunda oluşan ikincil organik aerosoller (İOA), İHK'yı daha da olumsuz etkileyebilmektedir [6]. Yanma kaynaklı faaliyetler, İHK'yı belirleyen en kritik unsurlardan biridir. Pişirme faaliyetleri, katı yakıt kullanımı ve tütün dumanı; partikül madde (PM), CO, azot oksitler (NO_x) ve PAH'lar gibi toksikolojik açıdan önemli kirlenimlerin başlıca kaynaklarıdır [5, 6, 22]. Gelişmekte olan bölgelerde biyokütle yakıtlarının ısınma ve pişirme amacıyla kullanımı yüksek maruziyet riskleri oluştururken; gelişmiş kentsel alanlarda dahi modern pişirme yöntemlerinin iç ortam PM konsantrasyonlarını dış ortam seviyelerinin üzerine çıkarabildiği gözlemlenmiştir [7]. Araştırmalar, yemek hazırlama sırasında iç ortam partikül madde konsantrasyonlarının kısa süreli olarak dış ortam seviyelerini aşabildiğini göstermektedir. Bu durum, özellikle yetersiz havalandırma koşullarında daha belirgin hale gelmektedir. Kullanılan yakıt türü, pişirme yöntemi ve mutfak havalandırma sistemlerinin etkinliği, kirlenim oluşum düzeyini önemli ölçüde etkilemektedir. Isıtma sistemleri de iç ortam hava kirliliğinin önemli kaynakları arasında yer almakta; katı yakıt, kömür, odun veya gaz kullanılan sistemler CO, NO_x ve PM oluşumuna neden olabilmektedir. Özellikle eksik yanma koşullarında bu kirlenimlerin oluşumu önemli bir sağlık riski oluşturmaktadır [4, 9]. Çevresel tütün dumanı da, iç ortam hava kirliliğinin önemli kaynaklarından biridir. Tütün dumanı, binlerce kimyasal bileşik içermekte olup bunların önemli bir kısmı toksik ve kanserojen özellik göstermektedir. Bu karışım; PM, CO, benzen, formaldehit ve çeşitli ağır metalleri içermektedir [1]. Biyolojik kirlenim de iç ortam hava kirliliğinde önemli bir rol oynamaktadır. Bakteriler, mantarlar ve ev tozu akarları gibi mikroorganizmalar, özellikle yüksek nem ve yetersiz havalandırma koşullarında hızla çoğalabilmektedir. Bu biyolojik etkenler alerjik reaksiyonlar, astım atakları ve diğer

solunum yolu hastalıkları üzerinde önemli etkilere sahiptir [23–25].

İç ortam kaynaklarının yanı sıra, dış ortam kirlenimcileri de mekanik ve doğal havalandırma ile bina kabuğundaki mikro çatlaklar aracılığıyla gerçekleşen infiltrasyon süreçleri sonucu iç ortama taşınmaktadır. Özellikle trafik yoğunluğu ve endüstriyel faaliyetlerin baskın olduğu kentsel alanlarda, dış ortam hava kalitesi iç ortamdaki kirlilik profilinin temel belirleyicilerinden biri haline gelmektedir [6, 7, 26]. Bu nedenle iç ortamlar çoğu zaman hem iç hem de dış kaynaklardan gelen kirlenimcilerin oluşturduğu karmaşık bir karışım içermektedir.

Sonuç olarak, iç ortam hava kirliliği birden fazla kaynağın ve sürecin etkileşimi sonucu ortaya çıkan karmaşık bir olgu olup, bu durum kirliliğin yönetimini ve azaltılmasını daha da zorlaştırmaktadır.

3.2 İç ortam maruziyeti

İnsanların iç ortam hava kirlenimcilerine maruziyeti başlıca solunum, yutma ve deri teması yolları ile gerçekleşmektedir. Gaz kirlenimciler ve havada asılı partiküller için solunum genellikle baskın maruziyet yolu olarak kabul edilmektedir. Bununla birlikte, iç ortam tozu ile ilişkili metaller gibi bazı kirlenimciler için özellikle çocuklarda yutma önemli bir maruziyet yolu olabilmektedir. Bunun temel nedeni, çocuklarda sık görülen el-ağız davranışı ve zemin yüzeyleri ile yakın temasın daha fazla olmasıdır [27, 28]. Bu maruziyet mekanizmaları, iç ortam kirlenimci kaynakları, çevresel koşullar ve insan davranış örüntüleri arasındaki karmaşık etkileşimleri ortaya koymaktadır.

İç ortam kirlenimci konsantrasyonları; bina tasarımı, havalandırma sistemleri, kullanım yoğunluğu, iç ortam aktiviteleri ve dış ortam hava kirlenimcilerinin iç ortama sızması gibi birçok faktörden etkilenebilmektedir. Yetersiz havalandırma ve sınırlı hava değişimi, iç ortam kirlenimcilerinin birikmesine neden olarak insan maruziyet düzeylerini artırabilmektedir. Buna karşılık, etkin havalandırma sistemleri ve kaynak kontrol stratejileri kirlenimci konsantrasyonlarını önemli ölçüde azaltarak İHK'yı iyileştirebilmektedir [17, 29].

3.3 Sağlık etkileri

İç ortam hava kirlenimcilerine maruz kalma çok çeşitli olumsuz sağlık etkileri ile ilişkilendirilmiştir. Epidemiyolojik çalışmalar, düşük İHK'nın solunum yolu hastalıkları, kardiyovasküler rahatsızlıklar, alerjik reaksiyonlar, bazı kanser türleri ve bilişsel performansın bozulması ile ilişkili olabileceğini göstermektedir [30]. Çocuklar, yaşlılar ve önceden var olan sağlık sorunlarına sahip bireyler gibi hassas nüfus grupları iç ortam hava kirliliğinin sağlık etkilerine karşı özellikle daha duyarlıdır [4, 30, 31]. Solunum yolu hastalıkları iç ortam hava kirliliği ile ilişkilendirilen en yaygın sağlık etkilerinden biridir. İç ortamlarda PM ve NO₂ maruziyetinin astım, KOAH ve diğer solunum yolu hastalıklarının görülme sıklığını artırdığı gösterilmiştir [1]. Kardiyovasküler sağlık etkileri de iç ortam hava kirliliği maruziyeti ile ilişkilendirilmiştir. Çalışmalar, ince partiküllerin ve gaz kirlenimcilerin oksidatif stres ve sistemik inflamasyonu tetikleyebildiğini ve bunun sonucunda hipertansiyon, kalp hastalıkları ve inme riskinin

artabileceğini göstermektedir [32, 33]. Ayrıca, formaldehit, benzen ve bazı PAH'lar gibi genotoksik bileşenler, Uluslararası Kanser Araştırmaları Ajansı (IARC) tarafından karsinojen olarak sınıflandırılmakta ve uzun süreli maruziyetlerde kanser gelişme riskini artırabilmektedir [1, 4, 6].

Fiziksel sağlık etkilerinin yanı sıra iç ortam hava kirliliğinin bilişsel fonksiyon ve verimlilik üzerinde de etkili olduğu gösterilmiştir. Araştırmalar, iç ortamlarda artan karbondioksit (CO₂) ve UOB konsantrasyonlarının karar verme performansını ve bilişsel yetenekleri olumsuz etkileyebileceğini ortaya koymuştur [12]. Bu bulgular, İHK'nın sağlık etkilerinin ötesinde öğrenme çıktıları ve iş yeri verimliliği gibi daha geniş toplumsal etkiler doğurabileceğini göstermektedir.

Tablo 1, İHK'yı etkileyen başlıca kirletici gruplarını, bu kirleticilerin temel kaynaklarını ve insan sağlığı üzerindeki

potansiyel etkilerini özetlemektedir. Tablo 2'de ise başlıca iç ortam hava kirleticileri için DSÖ tarafından yayımlanmış sağlık temelli kılavuz değerler verilmiştir. İç ortamlardaki kirleticiler genel olarak partikül maddeler, UOB, kalıcı organik kirleticiler, inorganik kirleticiler ve biyolojik kirleticiler olmak üzere beş ana kategoride değerlendirilmektedir. Özellikle PM_{2.5} ve UOB'ler gibi kirleticilerin solunum yolu hastalıkları, kardiyovasküler etkiler ve çeşitli irritatif semptomlarla ilişkili olduğu çok sayıda epidemiyolojik çalışmada ortaya konmuştur [21, 32]. İnce partikül maddeler ve gaz kirleticiler, solunum sisteminin derin bölgelerine kadar ulaşabilmekte ve kan dolaşımına girerek sistemik sağlık etkilerine yol açabilmektedir [34, 35]. Bu nedenle iç ortam kirletici kaynaklarının belirlenmesi ve kontrol edilmesi, İHK'nın iyileştirilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Tablo 1 İç ortam hava kirleticileri, başlıca kaynakları ve sağlık etkileri

Kirletici Türü	Başlıca Kaynaklar	Örnek Kirleticiler	Olası Sağlık Etkileri	Referanslar
Partikül Madde	Yemek pişirme, sigara dumanı, ısıtma sistemleri, mum/tütsü kullanımı	PM _{2.5} , PM ₁₀ , ultra ince partiküller (UIP)	Solunum yolu hastalıkları, kardiyovasküler hastalıklar, inflamasyon, astım alevlenmesi	[4, 32]
Uçucu Organik Bileşikler	Boyalar, vernikler, temizlik ürünleri, kozmetik ürünler, yapı malzemeleri, mobilyalar, sigara dumanı	Benzen, toluen, etilbenzen, ksilen izomerleri, terpenler, formaldehit ve diğer karbonil bileşikleri	Göz ve solunum yolu irritasyonu, baş ağrısı, nörolojik etkiler, bazı bileşiklerde kanser riski	[21, 36]
Kalıcı organik kirleticiler	PAH: biyokütle yakımı, sigara dumanı, pişirme, ısıtma sistemleri PCB: eski elektrikli ekipmanlar, yapı malzemeleri, dolgu macunları, boya/kaplama ürünleri, iç ortam tozu	PAH, PCB	Endokrin bozucu, kanserojenik ve mutajenik etki	[1, 4, 6]
İnorganik Kirleticiler	Yakıtların yanması, motorlu araçlar, sigara dumanı, metal yüzeyler, elektronik cihazlar	CO, CO ₂ , NO ₂ , SO ₂ , O ₃ , PTE'ler	Solunum yolu irritasyonu, solunum yolu ve kardiyovasküler hastalıklar, bazı metaller için kanserojenik etki	[4,5, 27]
Biyolojik Kirleticiler	Nemli ortamlar, yetersiz havalandırma, evcil hayvanlar, toz	Küf sporları, bakteriler, polenler, ev tozu akarları	Alerjik reaksiyonlar, astım, solunum yolu enfeksiyonları	[26, 37]
İkincil Kirleticiler	İç ortam kimyasal reaksiyonları	İkincil organik aerosol, formaldehit, UIP, oksidasyon ürünleri	Solunum yolu irritasyonu, partikül maruziyetinin artması	[6]

Tablo 2 Başlıca iç ortam hava kirleticileri için uluslararası sağlık temelli kılavuz değerler

Kirletici	Kılavuz değer	Ortalama süresi	Başlıca sağlık etkileri	Kaynak
PM _{2.5}	5 µg/m ³ 15 µg/m ³	Yıllık 24 saat	Kardiyovasküler ve solunum sistemi hastalıkları, erken mortalite riski Astım alevlenmesi ve solunum yolu semptomları	[38]
PM ₁₀	15 µg/m ³ 45 µg/m ³	Yıllık 24 saat	Solunum fonksiyonlarında azalma, Solunum yolu irritasyonu	[38]
NO ₂	10 µg/m ³ 25 µg/m ³	Yıllık 24 saat	Astım gelişimi ve kronik solunum sistemi etkileri, Solunum yolu inflamasyonu	[38]
SO ₂	40 µg/m ³	24 saat	Bronkokonstriksiyon ve solunum yolu irritasyonu	[38]
CO	4 mg/m ³	24 saat	Hipoksi, baş ağrısı ve baş dönmesi	[38]
O ₃	100 µg/m ³	Günlük maksimum 8 saatlik ortalama	Solunum fonksiyonlarında azalma	[38]
Formaldehit	0,1 mg/m ³ (100 µg/m ³)	30 dakika	Göz, burun ve boğaz irritasyonu	[34]
Benzen	Sağlık açısından güvenli eşik değer belirlenmemiştir	-	Kanserojen; maruziyet mümkün olduğunca düşük tutulmalıdır	[34]
Radon	100 Bq/m ³ (referans seviyesi)	Uzun dönem	Akciğer kanseri riski	[39]

3.4 İç ortam hava kalitesi ve sürdürülebilirlik

Son yıllarda İHK ile sürdürülebilir bina tasarımı arasındaki ilişki, halk sağlığı ve çevresel sürdürülebilirlik açısından giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Sürdürülebilir binalar, enerji verimliliği, doğal kaynakların korunması ve çevresel etkilerin minimize edilmesi yoluyla kullanıcı refahının artırılmasını amaçlamaktadır. Bununla birlikte, enerji verimliliği odaklı modern bina tasarımları genellikle yüksek yalıtım ve gelişmiş hava sızdırmazlık tekniklerini içermektedir. Bu yapısal özellikler, enerji kayıplarını azaltsa da doğal havalandırma oranlarının düşmesine ve iç ortamda UOB'ler, radon ve partikül maddeler gibi kirleticilerin birikmesine yol açabilmektedir [16, 31, 40]. Dolayısıyla, sürdürülebilir tasarım stratejilerinin, enerji tasarrufu ile sağlıklı hava değişimi arasındaki hassas dengeyi optimize etmesi kritik bir zorunluluktur [12, 41]. Bu sorunu çözmek amacıyla geliştirilen modern sürdürülebilir bina stratejileri, enerji verimliliği, kaynak tasarrufu ve sağlıklı iç ortam koşullarının sağlanmasını birlikte ele alan bütüncül bir yaklaşım sunmaktadır. Yüksek performanslı havalandırma sistemleri, düşük emisyonlu yapı malzemeleri ve gelişmiş hava filtrasyon teknolojileri hem çevresel sürdürülebilirliği hem de sağlıklı iç ortam koşullarını sağlamak amacıyla yeşil bina tasarımlarında giderek daha fazla kullanılmaktadır [13, 42, 43]. LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) ve BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) gibi uluslararası sertifikasyon sistemleri, sürdürülebilirlik performans göstergelerine İHK kriterlerini de entegre ederek binaların

sürdürülebilirlik performansının değerlendirilmesine yönelik kapsamlı bir çerçeve sunmaktadır [44, 45].

Mimari tasarım kararları ve bina işletme uygulamaları, iç ortam sürdürülebilirliğinin sağlanmasında belirleyici rol oynamaktadır. Örneğin, doğal havalandırmanın uygun şekilde tasarlanması, yeterli hava değişim hızının sağlanması ve İHK'nın iyileştirilmesinde temel bir pasif strateji olarak öne çıkmaktadır [46, 47]. Bununla birlikte, düşük emisyonlu yapı malzemelerinin seçimi, kirletici konsantrasyonlarını kaynağında kontrol altına alarak iç ortamın kimyasal yükünü azaltabilmektedir [4, 21]. Ayrıca, gerçek zamanlı izleme sistemleri ile kullanıcı farkındalığı programlarını içeren bütünsel iç ortam hava yönetimi stratejileri, yaşam alanlarının uzun vadeli sağlık ve konfor odaklı sürdürülebilirliğine önemli katkılar sağlamaktadır [44, 48].

Yapı malzemeleri, iç ortamın kimyasal bileşiminin en önemli belirleyicilerinden biridir. Boya, vernik, yapıştırıcı ve preslenmiş ahşap ürünler gibi geleneksel yapı malzemeleri çeşitli UOB'lerin iç ortamlara salınmasına neden olabilmektedir. Bu emisyonlar özellikle yeni inşa edilmiş veya yakın zamanda yenilenen binalarda iç ortam UOB konsantrasyonlarının artmasına yol açmaktadır. Düşük emisyonlu yapı malzemelerinin tercih edilmesi, kirleticilerin kaynağında kontrolünü sağlayarak iç ortamdaki kimyasal yükü önemli ölçüde azaltabilmektedir. Literatür, sürdürülebilir malzemelerin kullanıldığı iç ortamlarda toplam uçucu organik bileşik (TUOB) konsantrasyonlarının, standart yapılar oranla daha düşük olduğunu doğrulamaktadır [21, 49, 50].

Havalandırma sistemleri, İHK'nın iyileştirilmesinde en önemli mühendislik çözümlerinden biridir. Etkili havalandırma, iç ortamlarda biriken kirleticilerin

uzaklaştırılmasını sağlayarak kirlетici konsantrasyonlarını azaltmaktadır. Özellikle mekanik havalandırma sistemleri ve yüksek verimli filtreleme teknolojileri, partikül madde ve gaz kirlетicilerin kontrolünde önemli rol oynamaktadır [4, 51]. Buna karşılık, yetersiz havalandırma koşullarının kirlетici birikimine ve buna bağlı sağlık sorunlarına yol açabileceği birçok çalışmada gösterilmiştir. Özellikle okullar ve ofislerde gerçekleştirilen araştırmalar, havalandırma oranlarının iç ortam sakinlerinin genel sağlık durumları ve bilişsel performansları ile ilişkili olduğunu ortaya koymuştur [42, 52, 53]. Bu nedenle, sürdürülebilir bina tasarımında yeterli hava değişim oranlarının sağlanması kritik öneme sahiptir.

Son yıllarda akıllı bina teknolojileri İHK'nın izlenmesi ve yönetilmesinde önemli bir araç haline gelmiştir. Sensör tabanlı izleme sistemleri sayesinde CO₂, PM, sıcaklık, bağıl nem ve çeşitli gaz kirlетicilerin konsantrasyonları gerçek zamanlı olarak ölçülebilmektedir. Bu sistemler havalandırma ve iklimlendirme sistemleri ile entegre edilerek İHK'nın otomatik olarak optimize edilmesine olanak sağlamaktadır [48, 54]. Akıllı bina sistemleri, enerji verimliliği ile İHK arasındaki geleneksel çelişkiyi dengelemekte kritik bir rol oynamaktadır [55]. Öyle ki, talep kontrollü havalandırma sistemleri sensörler aracılığıyla bina içindeki kullanıcı yoğunluğunu, CO₂ seviyelerini ve diğer kirlетici konsantrasyonlarını gerçek zamanlı olarak izleyerek hava değişim oranını otomatik olarak ayarlayabilmektedir [56, 57]. Literatürde bu dinamik yaklaşımın sabit havalandırma sistemlerine kıyasla enerji tüketimini yaklaşık %50'ye kadar azaltırken, İHK'yı önerilen sınır değerler içerisinde tutarak kullanıcı sağlığını ve konforunu iyileştirdiği belirtilmektedir [54, 58].

Sonuç olarak, sürdürülebilir yaşam alanlarının oluşturulması için enerji verimliliği, yapı malzemesi seçimi, havalandırma sistemleri ve akıllı bina teknolojilerinin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu bütüncül yaklaşım, hem çevresel sürdürülebilirliğin sağlanmasına hem de sağlıklı iç ortam koşullarının oluşturulmasına katkı sağlamaktadır. Ayrıca, İHK'nın sürdürülebilir bina tasarımına entegre edilmesi, sağlıklı yaşam ve çalışma ortamlarının oluşturulması açısından büyük önem taşımaktadır. Kentsel nüfus artmaya ve insanlar zamanlarının daha büyük bir bölümünü iç ortamlarda geçirmeye devam ettikçe, İHK'nın iyileştirilmesi sürdürülebilir kentleşmenin temel önceliklerinden biri olmaya devam edecektir.

4 Literatür bulgularının sentezi

İç ortam kirlетicilerinin düzeyleri, literatürde hem kirlетici türüne hem de incelenen mikroçevreye bağlı olarak önemli farklılıklar göstermektedir. Konutlar, okullar, ofisler ve endüstriyel yapılar gibi farklı iç ortam tiplerinde gerçekleştirilen çalışmalar, kirlетici konsantrasyonlarının yalnızca dış ortam koşullarıyla değil, aynı zamanda iç ortama özgü dinamiklerle de şekillendiğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle, iç ortamlar kirlетici dağılımı açısından heterojen sistemler olarak kabul edilmekte ve kirlетici birikimi ile dağılımı zamansal ve mekansal olarak değişkenlik göstermektedir.

Tablo 3, İHK alanındaki bilgi birikiminin tarihsel gelişimini ortaya koymak amacıyla, farklı yıllarda yayımlanan ve İHK'yı genel kapsamda değerlendiren temsil edici derleme çalışmalarının seçilmiş örneklerini ve temel bulgularını özetlemektedir. Çalışmalar, farklı iç ortam türlerini, başlıca kirlетici gruplarını, sağlık etkilerini ve araştırma eğilimlerini temsil edecek şekilde seçilmiş ve araştırma odaklarının zaman içerisindeki değişimini göstermek amacıyla kronolojik olarak sunulmuştur. **Tablo 3**'ün amacı sistematik bir literatür taraması sunmak değil, İHK araştırmalarının tarihsel gelişimini temsil edici derleme çalışmaları üzerinden özetlemektir. Literatür genel olarak değerlendirildiğinde, İHK araştırmalarının özellikle son yirmi yılda önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Bu çalışmaların büyük bölümü konutlar, okullar ve ofisler gibi insanların uzun süre zaman geçirdiği kapalı ortamlarda gerçekleştirilmektedir. İncelenen çalışmalar, iç ortam kirlетicilerinin önemli bir kısmının bina içi faaliyetlerden kaynaklandığını, ancak dış ortam hava kirliliğinin de iç ortamlara infiltrasyon yoluyla önemli katkı sağlayabildiğini ortaya koymaktadır [6, 7]. Ayrıca son yıllarda yapılan çalışmalar, İHK'nın yalnızca sağlık açısından değil, aynı zamanda bilişsel performans ve üretkenlik üzerinde de önemli etkileri olabileceğini ortaya koymaktadır [12]. Bu bulgular, İHK'nın sürdürülebilir bina tasarımı ve çevresel sağlık politikaları açısından kritik bir araştırma alanı olduğunu göstermektedir.

Tablo 3 incelendiğinde, erken dönem çalışmalar (1998–2005), ağırlıklı olarak UOB'ler, formaldehit, CO, NO_x ve PM gibi temel kirlетicilere odaklanmıştır [1, 24, 59]. Bu çalışmalar, özellikle yapı malzemeleri ve yetersiz havalandırmanın İHK üzerindeki belirleyici rolünü vurgulamış ve “hasta bina sendromu (HBS)” ile ilişkili sağlık etkilerini ortaya koymuştur [36, 58]. 2005 sonrası dönemde kirlетici kapsamı genişlemiş ve biyoaerosoller, alerjenler ve radon gibi bileşenler de değerlendirilmiştir. Bu süreçte iç ortamın yalnızca kimyasal değil, aynı zamanda biyolojik kirlетiciler açısından da önemli bir maruziyet ortamı olduğu gösterilmiştir [6, 61]. Ayrıca formaldehit gibi bazı kirlетicilerin iç ortamlarda dış ortama göre daha yüksek konsantrasyonlara ulaşabildiği ve önemli sağlık riskleri oluşturabileceği belirtilmiştir [21]. 2010'lu yıllarda yapılan çalışmalar, daha kapsamlı ve sistematik analizler içermekte olup PM_{2.5}, PM₁₀, ÜİP'ler, yarı uçucu organik bileşikler (YUOB) ve toksik organik bileşikler (PAH, PCB, ftalatlar) gibi spesifik kirlетicilere odaklanmıştır [7, 30, 32]. Bu dönemde özellikle uzun süreli maruziyetin solunum ve kardiyovasküler hastalıklar üzerindeki etkileri güçlü şekilde vurgulanmıştır [9]. Ayrıca dış ortam kirlетicilerinin iç ortamlara taşınımı (infiltrasyon) önemli bir araştırma konusu haline gelmiş ve iç ortam konsantrasyonlarının büyük ölçüde dış ortam kaynaklarından etkilendiği gösterilmiştir [62]. Son yıllardaki çalışmalar (2020 ve sonrası) daha bütüncül bir yaklaşım benimsemekte ve iç ortam hava kirliliğini kaynak–taşınım–dönüşüm–maruziyet çerçevesinde ele almaktadır. Bu kapsamda, iç ortam kirlетicilerinin hem iç hem de dış kaynaklı olduğu ve kimyasal dönüşümler sonucu ikincil kirlетicilerin (örn. O₃ ve İOA'lar) oluştuğu belirtilmektedir [4, 63, 64].

Tablo 3. İç ortam hava kirliliği çalışmalarının literatür özeti

Yıl	Ortam	İncelenen Kirleticiler	Temel Bulgular	Referans
1998	Konutlar	UOB	Yapı malzemelerinin uzun süreli UOB emisyonlarının başlıca kaynağı olduğu ve HBS ile ilişkili olduğu gösterilmiştir.	[59]
1999	İç ortamlar	PM, CO, CO ₂ , NO ₂ , SO ₂ , Asbestos, Radon, ETS, UOB ve biyolojik kirleticiler	İç ortam hava kirliliğinin çok sayıda kirleticiyi kapsayan küresel bir halk sağlığı sorunu olduğu vurgulanmıştır.	[1]
2003	Okullar	CO ₂ , UOB, formaldehit ve bioaerosol	Yetersiz havalandırmanın CO ₂ , UOB ve bioaerosol birikimini artırarak astım ve HBS belirtileriyle ilişkili olduğu bildirilmiştir.	[24]
2007	İç ortamlar	UOB	İç ortam UOB'lerinin gideriminde fotokatalitik oksidasyon teknolojileri ve iç ortam kimyasının önemi değerlendirilmiştir.	[36]
2008	Konut, okul ve ofis	PM, O ₃ , CO, NO ₂ , SO ₂ , UOB, ETS ve biyolojik kirleticiler	Gaz, partikül ve biyolojik kirleticilerin birlikte bulunduğu iç ortamlarda uzun süreli maruziyetin solunum sağlığı açısından önemli risk oluşturduğu gösterilmiştir.	[60]
2009	İç ortamlar	CO, NO _x , SO ₂ , O ₃ , radon; formaldehit, aldehitler, UOB'ler (benzen vb.); YUOB'ler (fılatlar, bromlu alev geciktiriciler, pestisitler, PCB'ler); partiküller ve İOA'lar	Yapı malzemeleri, tüketici ürünleri ve yetersiz havalandırmanın kirlitici birikimini artırdığı; iç ortamlarda yeni kimyasalların yaygınlaştığı ve bu durumun olumsuz sağlık etkilerinin artmasına neden olduğu vurgulanmıştır.	[6]
2010	Konut ve çeşitli binalar	Formaldehit başta olmak üzere karbonil bileşikler	Formaldehitin iç ortamlarda dış ortama göre daha yüksek düzeylerde bulunduğu ve kanserojen özellik taşıdığı belirtilmiştir.	[21]
2010	Konutlar	PM, NO ₂ ve alerjenler	PM, NO ₂ ve alerjen maruziyetinin çocuklarda astım şiddetini artırdığı gösterilmiştir.	[61]
2010	İç ve dış ortamlar	PM _{2.5} , PM ₁₀ , Uip'ler; ayrıca O ₃ , NO _x , CO, SO ₂ ve UOB	İnce partikül maruziyetinin kardiyovasküler hastalıklarla güçlü ilişki gösterdiği bildirilmiştir.	[32]
2013	Konutlar ve yaşlı bakım evleri	ETS (çevresel tütün dumanı), PM ₁₀ , PM _{2.5} , NO ₂ , CO, SO ₂ , UOB'ler (formaldehit vb.), biyokütle yanma ürünleri, alerjenler (akar, küf), mikroorganizmalar	İç ortam kirleticilerinin özellikle yaşlı bireylerde KOAH, astım ve solunum yolu hastalıkları riskini artırdığı gösterilmiştir.	[30]
2013	İç ortamlar	PM, O ₃ , CO, CO ₂ , NO ₂ , UOB/YUOB, radon ve ETS	Dış ortam kirleticilerinin infiltrasyonu ile iklim koşullarının iç ortam hava kalitesini önemli ölçüde etkilediği değerlendirilmiştir.	[7]
2014	Konutlar	PM, CO, SO ₂ , biyokütle yanmasına bağlı organik kirleticiler	Biyokütle yakıt kullanımının CO, PM ve SO ₂ maruziyetini artırdığı, davranış değişikliklerinin ise sınırlı iyileşme sağladığı belirtilmiştir.	[69]
2014	Konutlar	PM _{2.5} , CO, yanma kaynaklı kirleticiler	Evsel katı yakıt kullanımının önemli bir küresel hastalık yüküne neden olduğu vurgulanmıştır.	[9]
2015	İç ortamlar	Biyoaerosoller	Biyoaerosollerin örnekleme, analiz ve kontrol yöntemleri kapsamlı biçimde özetlenmiştir.	[70]
2016	Ofisler	CO ₂ , UOB	Daha iyi iç ortam hava kalitesinin bilişsel performansı olumlu yönde etkilediği gösterilmiştir.	[12]
2018	İç ve dış ortamlar	Biyoaerosoller	Biyoaerosollerin iç ortamlarda önemli bir maruziyet kaynağı olduğu ve enfeksiyon ile solunum hastalıkları açısından risk oluşturduğu bildirilmiştir.	[26]
2018	İç ortamlar	PM ₁₀ , PM _{2.5} , TUOB, CO ₂ , CO, SO ₂ , NO ₂ , O ₃ , ağır metaller, radon ve biyoaerosoller	İç ortam hava kirliliğinin hem dış ortamdan sızan kirleticiler hem de iç ortam kaynakları nedeniyle GCC ülkelerinde önemli bir sağlık riski oluşturduğu ve maruziyetin oldukça yüksek olduğu vurgulanmıştır.	[62]
2018	Spor salonları	CO ₂ , CO, NO ₂ ve PM, UOB'ler, SO ₂ , O ₃ , BTX, formaldehit, bakteriler, mantarlar ve radon	Spor salonlarında fiziksel aktivite sırasında kirlitici maruziyetinin arttığı ve sağlık riski oluşturabileceği belirtilmiştir.	[71]
2019	Araç iç ortamları	UOB (BTEX, formaldehit, asetaldehit), CO ₂ , CO, PM _{2.5} , PM ₁₀ ve Uip'ler, mikrobiyal kirleticiler, BFR/OPFR, plastikleştiriciler ve NOx	Araç içi ortamlarının çeşitli kimyasal ve partikül kirleticiler açısından önemli bir maruziyet ortamı olduğu gösterilmiştir.	[72]
2020	Konutlar	PM _{2.5} , PM ₁₀ , NO ₂ , UOB'ler (BTEX, formaldehit), radon, ETS (çevresel tütün dumanı)	İç ortam kirlitici maruziyetinin sosyoekonomik düzey ve yaşam alışkanlıklarına göre değiştiği bildirilmiştir.	[63]
2020	Konutlar	PM, NO ₂ , UOB (özellikle BTEX ve formaldehit), PAH, CO ve diğer gaz kirleticiler	Sigara, pişirme faaliyetleri ve gazlı cihazların iç ortam kirleticilerinin başlıca kaynakları olduğu; çocuklarda astım ve solunum yolu hastalıklarıyla ilişkili bulunduğu gösterilmiştir.	[4]
2021	Konutlar, dış ortam	PM (TSP, PM ₁₀ , PM _{2.5}), CO, NO ₂ , SO ₂ , O ₃ , UOB'ler (özellikle BTEX), PAH'lar, pestisitler, PCB'ler, Pb ve iyonik türler	Birçok çalışmada PM ve organik kirleticilerin WHO kılavuz değerlerini aştığı rapor edilmiştir.	[64]
2021	İç ortamlar	PM _{2.5} , PM ₁₀ , UOB, HCHO, CO, CO ₂ , NO ₂ , SO ₂ , O ₃ , Radon	İç ortam hava kalitesinin bina tipi, kullanıcı faaliyetleri ve dış ortam kaynaklarının ortak etkisiyle şekillendiği gösterilmiştir.	[23]
2023	Konut, okul ve ofis	CO ₂ , PM _{2.5} , PM ₁₀ , NO ₂ , CO, Formaldehit ve Radon	Farklı ülkelerde uygulanan iç ortam hava kalitesi limit değerleri karşılaştırılarak önemli farklılıklar ortaya konmuştur.	[2]
2023	Konut, okul ve ofis	YUOB	YUOB maruziyetinin kanser, astım ve alerjik hastalıklarla ilişkili olduğu değerlendirilmiştir.	[65]
2023	Konut, okul ve ofis	Formaldehit	Formaldehit maruziyetinin solunum sistemi ve genel sağlık üzerindeki etkileri sistematik olarak özetlenmiştir.	[64]
2023	Metro (istasyon, platform, tren içi)	PM _{2.5} , PM ₁₀ , CO, CO ₂ , NO ₂ , UOB, bakteri, mantar, Fe, Mn, Cr, Ni, Cu	Metro ortamlarında PM _{2.5} ve PM ₁₀ 'un baskın kirleticiler olduğu, yapay zekâ destekli tahmin ve havalandırma yönetiminin etkili olduğu gösterilmiştir.	[73]
2024	İç ortamlar	NO _x , O ₃ , CO, CO ₂ , UOB, YUOB, HONO, PM, serbest radikaller (-OH vb.), amonyak, ikincil kirleticiler (formaldehit gibi)	İç ortam hava kirleticilerinin kimyasal dönüşümlerle sürekli değiştiği ve standartlaştırılmış uzun dönem ölçümlere ihtiyaç duyulduğu vurgulanmıştır.	[67]
2025	İç ortamlar	UOB	UOB'lerin kaynakları, ölçüm yöntemleri ve sağlık etkileri güncel çalışmalar ışığında değerlendirilmiş; uzun süreli maruziyetin önemli bir risk oluşturduğu belirtilmiştir.	[68]
2025	Konut, okul ve ofis	CO, NO ₂ , SO ₂ , O ₃	Emisyon kontrol politikalarıyla CO, SO ₂ ve NO ₂ azalırken, fotokimyasal süreçler nedeniyle O ₃ düzeylerinin artabileceği bildirilmiştir.	[29]

Bunun yanı sıra İHK'nın bölgesel, sosyoekonomik ve davranışsal faktörlere bağlı olarak değiştiği de ortaya konmuştur [23]. En güncel çalışmalar ise iç ortam hava kirliliğinin karmaşık yapısını daha ileri düzeyde incelemekte ve özellikle YUOB'ler, UOB'ler ve çoklu kirletici etkileşimleri üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu çalışmalar, iç ortamlarda bulunan YUOB'lerin (özellikle PAH ve ftalatlar) kanser, astım ve alerji gibi sağlık etkileriyle ilişkili olabileceğini vurgulamaktadır [65]. Ayrıca formaldehitin sağlık etkileri de sistematik derlemelerde kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir [66]. Bir başka derleme çalışmasında, İHK standartlarının ülkeler arasında farklılık gösterdiği ve bu durumun maruziyet değerlendirmelerini etkilediği belirtilmiştir [2]. Bunun yanı sıra, iç ortam hava kirliliğinin dinamik bir sistem olduğu ve pişirme, temizlik, yapı malzemeleri, bireysel aktiviteler ve havalandırma koşullarına bağlı olarak sürekli değiştiği de çalışmalarda belirtilmiştir [67]. UOB'lerin çoğu durumda iç ortamlarda dış ortama göre daha yüksek konsantrasyonlarda bulunduğu ve uzun süreli maruziyetin ciddi sağlık riskleri oluşturduğu ortaya konmuştur [68]. Ayrıca emisyon kontrol politikalarına rağmen bazı kirleticiler azalırken, fotokimyasal reaksiyonlar ve dış ortam taşınımı nedeniyle O₃ gibi kirleticilerin artabileceği belirtilmiştir [29].

Genel olarak değerlendirildiğinde, literatür, iç ortam hava kirliliğinin zamanla basit bir kirletici seti olarak değerlendirilmesi yerine, çok sayıda kimyasal ve biyolojik bileşenin etkileştiği karmaşık bir maruziyet sistemi olarak ele alınması gerektiğini göstermektedir. Günümüzde özellikle YUOB/UOB'ler, ince partiküller ve ikincil kirleticiler insan sağlığı açısından en kritik bileşenler olarak öne çıkmakta ve bu durum uzun dönemli, çok lokasyonlu ve standartlaştırılmış ölçüm çalışmalarına olan ihtiyacı açıkça ortaya koymaktadır [67, 68]. Sonuç olarak, literatürde rapor edilen bulgular iç ortam kirleticilerinin yüksek derecede değişken, çok kaynaklı ve dinamik bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Bu durum, İHK'nın değerlendirilmesinde tekil ölçümler yerine, çok parametrelili ölçümlerin ve bütüncül yaklaşımların benimsenmesini gerekli kılmaktadır. Ayrıca, farklı kirletici gruplarının birlikte değerlendirildiği çalışmaların, maruziyet ve sağlık risklerinin daha doğru değerlendirilmesine katkı sağlayacağı öngörülmektedir.

5 İç ortam hava kalitesi iyileştirme stratejileri

İç ortam hava kalitesinin iyileştirilmesi, halk sağlığının korunması, iş gücü verimliliğinin artırılması ve sürdürülebilir yaşam ortamlarının oluşturulması açısından stratejik öneme sahiptir [13]. İHK yönetimine yönelik müdahaleler genellikle bütüncül bir hiyerarşi izlemektedir; bu hiyerarşinin temelini kirletici kaynaklarının kontrol altına alınması (ikame veya eliminasyon) oluştururken, bunu etkin havalandırma stratejileri ve gelişmiş hava filtrasyon teknolojilerinin entegrasyonu takip etmektedir [50, 74]. Literatürde, teknolojik çözümlerin yanı sıra kamu farkındalığı ve kullanıcı eğitimi de kapsayan çok yönlü yaklaşımların eş zamanlı uygulanmasının, tekil müdahalelere kıyasla iç ortam kirletici konsantrasyonlarını daha etkili biçimde azalttığı ve maruziyet risklerini önemli

ölçüde düşürdüğü vurgulanmaktadır [4–6]. Tablo 4'te İHK'nın iyileştirilmesine yönelik başlıca stratejiler ile bu stratejilerin literatürde bildirilen etkileri özetlenmiştir.

Tablo 4. İç ortam hava kalitesinin iyileştirilmesine yönelik başlıca stratejiler

İyileştirme stratejisi	Literatürde bildirilen etki	Referans
Kaynak kontrolü	Kirletici emisyonlarının kaynağında azaltılmasını hedefler.	[34, 75]
Havalandırma sistemlerinin optimizasyonu	Kirleticilerin seyrelmesini sağlar; etkinliği bina özellikleri ve hava değişim oranına bağlıdır.	[34, 75]
Merkezi mekanik havalandırmada	PM konsantrasyonlarında etkin oranlarda azalma sağlar.	[76]
Taşınabilir hava temizleyiciler	PM konsantrasyonlarında etkin oranlarda azalma sağlar.	[77]
Aktif karbon filtreleri	Gaz fazındaki kirleticilerin (özellikle VOC'lerin) gideriminde etkilidir.	[78]
Toplumsal farkındalık ve politika önlemleri	Hava kalitesinin sürdürülebilir şekilde iyileştirilmesinde tamamlayıcı araçlar olarak değerlendirilmektedir.	[34, 75]

5.1 Kaynak kontrolü

Kirletici kaynaklarının kontrolü, İHK'nın iyileştirilmesinde en etkili, ekonomik ve sürdürülebilir yöntem olarak kabul edilmektedir. Bu proaktif yaklaşım, kirleticilerin oluşumunu veya ortama salınmasını kaynağında önlemeyi hedefleyerek, havalandırma sistemleri üzerindeki yükü minimize etmektedir. Örneğin, düşük emisyonlu ve sağlığa duyarlı yapı malzemelerinin (düşük UOB içerikli boyalar, yapıştırıcılar vb.) kullanımı, temizlik ürünlerinin toksikolojik profillerine göre dikkatli seçilmesi ve iç mekanlarda tütün dumanı gibi yanma kaynaklı emisyonların sınırlandırılması, kirletici seviyelerini önemli ölçüde azaltmaktadır [21, 60, 79]. Literatürde, kaynak kontrolünün ihmal edildiği senaryolarda yalnızca havalandırma artışının yeterli olmadığı, dolayısıyla sağlıklı bina tasarımında "kaynak eliminasyonu" stratejisinin birincil temel yaklaşım olarak kurgulanması gerektiği vurgulanmaktadır [80].

5.2 Havalandırma sistemlerinin optimizasyonu

Havalandırma sistemlerinin optimizasyonu, iç ortam kirleticilerinin seyreltilmesi ve ortamdaki uzaklaştırılmasında kritik bir rol oynamaktadır. Doğal ve mekanik havalandırma stratejileri, iç ortamlarda biriken kirleticilerin dış atmosfere taşınmasını sağlayarak konsantrasyon seviyelerini düşürmektedir. Özellikle mekanik havalandırma sistemleri; kontrol edilebilir hava değişim oranları ve gelişmiş filtrasyon kapasiteleri sayesinde, ince partikül maddeler (PM_{2.5}) ve gaz fazındaki kirleticilerin (CO₂, UOB) kontrolünde doğal havalandırmaya kıyasla daha stabil ve öngörülebilir bir performans sergilemektedir [41, 56]. Literatür, enerji verimli

bina tasarımlarında yeterli havalandırma oranlarının sürdürülmesinin, yalnızca hava kalitesini iyileştirmekle kalmayıp aynı zamanda HBS semptomlarını da anlamlı derecede azalttığını göstermektedir. Araştırmalar, yetersiz havalandırma koşullarının iç ortam kaynaklı kirleticilerin (özellikle CO₂, UOB ve biyolojik aerosoller) yeterince seyreltilmemesine ve iç ortamda yüksek konsantrasyonlarda birikmesine yol açtığını göstermektedir [81]. Özellikle ofisler ve eğitim binaları gibi yüksek kullanıcı yoğunluğuna sahip mikro ortamlarda yürütülen çalışmalar, havalandırma oranlarındaki artışın İHK'yı doğrudan iyileştirdiğini kanıtlamaktadır. Daha yüksek havalandırma oranlarının, yalnızca daha düşük kirlenme seviyeleriyle değil; aynı zamanda HBS semptomlarında azalma, daha düşük devamsızlık oranları ve kullanıcıların bilişsel performansında anlamlı iyileşmeler ile güçlü bir pozitif korelasyon sergilediği belirlenmiştir [12, 82]. Bununla birlikte, havalandırma sistemlerinin etkinliği; bina tipi, hava değişim oranı, kullanıcı yoğunluğu, kirlenme kaynakları ve dış ortam hava kalitesine bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle, optimum performans için havalandırma stratejilerinin bina kullanım özelliklerine göre tasarlanması önerilmektedir [34, 75].

5.3 Hava filtrasyon teknolojileri

Hava filtrasyon teknolojileri, iç ortamlardaki partikül maddelerin ve belirli gaz fazındaki kirlenmelerin uzaklaştırılmasında kritik bir mühendislik çözümü sunmaktadır. Özellikle yüksek verimli partikül hava filtreleri (HEPA), 0,3 µm boyutundaki partikülleri en az %99,97 verimle tutabilme kapasiteleri sayesinde, iç ortamlardaki PM_{2.5} ve UOB'lerin konsantrasyonlarının azaltılmasında en etkili yöntemlerden biri olarak kabul edilmektedir [53]. Güncel sistemler, derleme ve meta-analiz çalışmaları, taşınabilir hava temizleyicilerin ince partikül madde (PM_{2.5}) konsantrasyonlarını önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Cheek ve ark. (2021), taşınabilir hava temizleyicilerin kullanıldığı çalışmalarda PM_{2.5} konsantrasyonlarında evlerde %22,6 ile %92,0 arasında değişen azalmalar bildirildiğini, okul ortamlarında ise yaklaşık %49 oranında azaltım rapor edildiğini belirtmiştir. Benzer şekilde, Ebrahimifakhar ve ark. (2024) tarafından gerçekleştirilen ve 148 saha çalışmasını kapsayan meta-analizde, taşınabilir hava temizleyicilerin PM_{2.5} konsantrasyonlarını ortalama %49 oranında azalttığı gösterilmiştir [77, 78]. Ayrıca, merkezi mekanik havalandırma sistemlerinde yüksek verimli filtrelerin (örn. MERV 13–15 ve üzeri) kullanılması, partikül maddelerin uzaklaştırılmasını önemli ölçüde artırmaktadır. Düşük verimli filtrelerle karşılaştırıldığında, yüksek verimli HVAC filtrasyonunun iç ortam PM_{2.5} konsantrasyonunu yaklaşık %31–39 oranında azaltabildiği bildirilmiştir [76]. Bunun yanı sıra, UOB'lerin giderilmesinde aktif karbon adsorpsiyonu ve fotokatalitik oksidasyon gibi ileri teknolojiler entegre bir çözüm sunabilmektedir [36, 83]. Ancak, filtrasyon sistemlerinin gerçek zamanlı etkinliği; bina özellikleri, cihazın temiz hava dağıtım oranı, filtre ömrü/bakım periyotları ve iç ortam hava akış dinamikleri gibi değişkenlere bağlıdır [53, 82].

5.4 Toplumsal farkındalık ve politika önlemleri

İç ortam hava kalitesinin iyileştirilmesi yalnızca teknik çözümlerle değil, aynı zamanda toplumsal farkındalık ve politika önlemleri ile de desteklenmelidir. Halkın iç ortam hava kirliliğinin sağlık üzerindeki etkileri konusunda bilinçlendirilmesi, bireysel davranış değişikliklerini teşvik edebilir ve kirlenme kaynaklarının azaltılmasına katkı sağlayabilir. Örneğin kapalı alanlarda tütün kullanımının sınırlandırılması ve düşük emisyonlu tüketici ürünlerinin tercih edilmesi bireysel düzeyde uygulanabilecek önemli önlemler arasında yer almaktadır [9, 84]. Bunun yanı sıra ulusal ve uluslararası kuruluşlar tarafından geliştirilen İHK rehberleri ve standartları politika düzeyinde önemli bir rol oynamaktadır. Dünya Sağlık Örgütü tarafından yayımlanan İHK kılavuzları, kirlenme konsantrasyonlarının kontrol edilmesi için bilimsel temelli öneriler sunmaktadır [34, 39]. Bu tür politika araçları İHK'nın iyileştirilmesine yönelik stratejilerin uygulanmasını desteklemektedir. Modern bina yönetmeliklerinde İHK standartlarının enerji verimliliğiyle eş düzeyde zorunlu tutulması, sürdürülebilir yaşam alanlarının oluşturulmasında belirleyici bir rol oynayacaktır [4]. Ayrıca, kirlenme kaynaklarının kontrolü, yeterli havalandırma ve uygun hava temizleme ve filtrasyon uygulamalarının birlikte kullanılmasını teşvik eden ulusal ve uluslararası standartlar ile bina yönetmelikleri, İHK'nın sürdürülebilir şekilde iyileştirilmesinde tamamlayıcı araçlar olarak değerlendirilmektedir [34, 75].

6 Araştırma boşlukları ve gelecek perspektifleri

İç ortam hava kirliliği üzerine yapılan çalışmalar son yıllarda önemli ölçüde artmış olmasına rağmen, bu alanda hala önemli bilgi boşlukları bulunmaktadır. Özellikle, farklı kimyasal türlerin sinerjik etkileri, düşük dozlu uzun dönemli maruziyetin kronik sağlık etkileri ve sürdürülebilir bina tasarım parametrelerinin İHK ile olan uzun vadeli dinamik ilişkileri hakkında daha kapsamlı ve bütüncül araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır [4, 5]. Bu boşlukların doldurulması, hem binaların enerji performansını hem de kullanıcı sağlığını koruyan politika ve standartların geliştirilmesi açısından stratejik öneme sahiptir [79].

6.1 Çoklu kirlenme maruziyeti

Geleneksel iç ortam hava kirliliği araştırmalarının çoğu, metodolojik kolaylıklar nedeniyle genellikle tek bir kirlenme türüne odaklanmaktadır. Ancak gerçek iç ortam koşullarında bireyler, çok sayıda kimyasal ve biyolojik kirlenmenin bir arada bulunduğu karmaşık bir maruziyet ortamına eş zamanlı olarak maruz kalmaktadır [85]. Partikül maddeler, UOB'ler, yanma kaynaklı kirlenmeler (PAH, NO_x, CO) ve biyolojik ajanlar aynı mikro ortamda birlikte bulunmakta; bu kirlenmelerin sinerjik veya antagonist etkileri, bireysel bileşenlerin toplamından daha karmaşık ve şiddetli sağlık sonuçları doğurabilmektedir [6, 86]. Mevcut literatürdeki araştırma boşluğunun giderilmesi amacıyla, gelecekteki çalışmaların çoklu kirlenme maruziyetini ve bunların bütünsel toksikolojik etkilerini değerlendiren "ekspozom" tabanlı veya entegre yaklaşımlar geliştirmesi stratejik bir gerekliliktir [5, 87].

6.2 Uzun dönem sağlık etkileri

İç ortam hava kirliliğine bağlı akut sağlık etkileri literatürde ayrıntılı olarak incelenmiş olmasına rağmen, düşük düzeyli ancak kronik maruziyetin uzun dönemli etkilerine ilişkin bilgiler halen sınırlıdır. Son yıllarda yapılan epidemiyolojik çalışmalar, iç ortam kirleticilerinin yalnızca solunum sistemini etkilemediğini, aynı zamanda sistemik inflamasyon yoluyla uzun dönemde ciddi sağlık riskleri oluşturabileceğini göstermektedir [88]. Özellikle, kronik maruziyetin kardiyovasküler hastalıklar, nörodejeneratif etkiler ve metabolik bozukluklar (örneğin diyabet ve insülin direnci) üzerindeki potansiyel patofizyolojik mekanizmalarının daha ayrıntılı araştırılması gerekmektedir [32, 89]. Bu bağlamda, İHK'nın iyileştirilmesi yalnızca kullanıcı konforunun artırılması açısından değil, aynı zamanda toplum genelinde kronik hastalık yükünün azaltılmasına katkı sağlayabilecek önemli bir halk sağlığı müdahalesi olarak değerlendirilmelidir [4].

6.3 İç ortam/dış ortam etkileşimleri

İç ortam hava kalitesi, yalnızca bina içi kaynakların ve faaliyetlerin bir sonucu olmayıp, aynı zamanda dış ortam hava kirliliğinden de önemli ölçüde etkilenmektedir. Trafik emisyonları, endüstriyel faaliyetler ve bölgesel hava kirliliği olayları, infiltrasyon ve havalandırma yoluyla iç ortama taşınabilmektedir. Ancak dış ortamdan kaynaklanan kirleticilerin iç ortama taşınma verimliliği; bina kabuğunun geçirgenliği, havalandırma sistemlerinin filtrasyon kapasitesi ve meteorolojik faktörler gibi pek çok değişkenin etkileşimi altındadır [7, 90, 91]. Literatürde "I/O (Indoor/Outdoor) Oranı" olarak tanımlanan bu ilişki, binaların yalnızca enerji verimli değil, aynı zamanda dış ortam kaynaklı kirleticilere karşı koruyucu bir bariyer oluşturacak şekilde tasarlanmasının önemini ortaya koymaktadır [92].

6.4 İç ortam kimyasal süreçler

Son yıllarda iç ortam kimyası alanında yapılan araştırmalar, iç ortamların yalnızca kirleticilerin biriktiği pasif alanlar olmadığını, aksine yeni kirletici türlerinin olduğu aktif reaktörler olduğunu göstermektedir [93]. Dış ortamdan sızan veya iç ortam kaynaklı UOB'lerin, O₃ ve hidroksil radikalleri ($\cdot$ OH) gibi güçlü oksidanlarla reaksiyona girmesi, İHK'yı dinamik bir şekilde değiştirmektedir. Bu oksidasyon süreçleri sonucunda oluşan İOA'lar ve UiP'ler, primer kirleticilerden daha reaktif ve toksik olabilen yeni kimyasal türlerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır [6, 94, 95]. Bu durum, sürdürülebilir binalarda hava kalitesi yönetiminin yalnızca emisyon kontrolüyle değil, aynı zamanda bu karmaşık iç ortam kimyasal süreçlerinin de yönetilmesiyle mümkün olabileceğini göstermektedir [96].

Geleneksel kirleticilerin yanı sıra nanomalzemeler, ileri teknoloji ürünü yapı malzemeleri ve modern tüketici ürünlerinden kaynaklanan "yeni nesil kirleticiler" araştırmacıların dikkatini giderek daha fazla çekmektedir [97]. Özellikle nanoteknoloji tabanlı kaplamalar ve katkı maddeleri, aşınma veya kimyasal bozunma yoluyla iç ortama serbest nano-partiküller salılabilmekte ve bu durumun

toksikolojik etkileri henüz tam olarak aydınlatılamamaktadır [98]. Ayrıca, yeni nesil polimerik malzemelerden yayılan alev geciktiriciler ve plastikleştiriciler gibi YUOB'lerin, iç ortam tozları ve yüzeylerle olan etkileşimi, maruziyet riskini artırmaktadır [80]. Bu nedenle, iç ortamlarda gerçekleşen karmaşık kimyasal reaksiyonların ve yeni nesil kirleticilerin oluşum, dönüşüm ve maruziyet özelliklerinin daha ayrıntılı olarak araştırılması, sürdürülebilir ve sağlıklı bina standartlarının geliştirilmesi açısından stratejik önem taşımaktadır [99].

6.5 Sürdürülebilir binalar

Sürdürülebilir bina tasarımı ile İHK arasındaki etkileşim, yapı bilimleri ve bina mühendisliği alanlarında gelecekte daha ayrıntılı olarak ele alınması gereken öncelikli araştırma konularından biridir. Modern enerji verimli binalar, ısı kayıplarını minimize etmek amacıyla genellikle yüksek yalıtım standartlarına ve aşırı hava sızdırmazlık (airtightness) seviyelerine sahip olacak şekilde inşa edilmektedir. Ancak bu yapısal özellikler, doğal sızıntı yoluyla gerçekleşen hava değişim oranlarının kritik düzeyde azalmasına ve dolayısıyla kirleticilerin iç ortamlarda yüksek seviyelerde birikmesine yol açabilmektedir [16]. Bu nedenle, operasyonel enerji tüketimini azaltırken iç ortamın sağlıklı ve konforlu kalmasını sağlayan "optimal denge noktalarının" belirlenmesi, sürdürülebilir bina tasarımının temel mühendislik hedeflerinden biri haline gelmelidir [56].

6.6 Akıllı izleme sistemleri

Yeni nesil sensör teknolojileri ve akıllı bina otomasyon sistemleri, İHK'nın gerçek zamanlı ve yüksek çözünürlükte izlenmesine olanak sağlamaktadır [100]. Bu ileri sistemler; partikül madde, UOB'ler ve spesifik gaz kirleticileri (CO₂, NO₂) sürekli olarak ölçebilmekte ve elde edilen verilerle havalandırma sistemlerini dinamik olarak optimize edebilmektedir [12, 48]. Bununla birlikte, bu teknolojilerin geniş ölçekli bina uygulamalarında; düşük maliyetli sensörlerin uzun dönem ölçüm doğruluğunun korunması (kalibrasyon kayması), büyük veri yönetimi ve sensör ağlarının enerji tüketimi gibi teknik sorunlar halen önemli araştırma alanlarıdır. Bu sınırlamaların giderilmesine yönelik daha kapsamlı çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu zorlukların aşılması, binaların hem enerji verimli hem de proaktif bir şekilde sağlıklı kalmasını sağlayan "akıllı İHK yönetimi" stratejilerinin temelini oluşturacaktır.

7 Sonuçlar

İç ortam hava kirliliği, maruziyet süresinin yüksekliği nedeniyle günümüz toplumlarında çevresel sağlık açısından kritik bir risk faktörü olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışma kapsamında elde edilen bulgular, İHK'nın yalnızca kirletici varlığı ile değil; bina özellikleri, havalandırma etkinliği ve kullanıcı davranışlarının etkileşimi ile şekillenen dinamik bir sistem olduğunu ortaya koymaktadır. Literatürde son yıllarda önemli ilerlemeler kaydedilmiş olmasına rağmen, İHK alanında halen doldurulması gereken önemli araştırma boşlukları bulunmaktadır.

Küresel Veri Eşitsizliği: Mevcut çalışmaların büyük çoğunluğu yüksek gelirli ülkelerde yürütülmüştür; düşük ve orta gelirli ülkelerdeki yüksek maruziyet koşulları ve yerel

yakıt kullanımından kaynaklanan kirleticiler hakkında veriye dayalı stratejilere ihtiyaç duyulmaktadır.

Kronik Maruziyet ve Patofizyoloji: Mevcut literatürün odağı genellikle akut etkiler üzerindedir. Düşük dozlu, uzun dönemli (onlarca yıl) maruziyetin kardiyovasküler, nörodejeneratif etkileri ve metabolik bozukluklar üzerindeki potansiyel patofizyolojik mekanizmalarının aydınlatılması gerekmektedir.

Kokteyl Etkisi (Çoklu Maruziyet): Gerçek yaşam koşullarında bireyler aynı anda çok sayıda kimyasal ve biyolojik kirleticilere maruz kalmaktadır. Gelecekteki araştırmaların, "ekspozom" kavramı çerçevesinde çoklu kirleticilerle etkileşimlerini ve sinerjik toksisiteyi modellemesi gerekmektedir.

Akıllı İzleme Sistemleri ve Dijital İkiz Yaklaşımı: IoT tabanlı sensör ağları ve makine öğrenmesi algoritmalarının bina yönetim sistemlerine entegrasyonu, İHK yönetiminde "proaktif ve kişiselleştirilmiş" bir dönemi şekillendirecektir.

Sonuç olarak, iç ortam hava kirliliği disiplinler arası bir araştırma alanı olup çevre mühendisliği, halk sağlığı, mimarlık ve şehir planlama gibi birçok alanın birlikte çalışmasını gerektirmektedir. Gelecekte yapılacak çalışmaların çoklu kirleticilerle maruziyetini, uzun dönemli sağlık etkilerini ve sürdürülebilir bina teknolojilerinin İHK üzerindeki etkilerini bütüncül bir yaklaşımla ele alması gerekmektedir. Bu doğrultuda elde edilecek bilimsel veriler, insan sağlığını koruyan, enerji verimli ve sürdürülebilir yaşam alanlarının geliştirilmesine önemli katkılar sağlayacaktır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %6

Yazım sürecinde üretken yapay zekâ (YZ) ve YZ destekli teknolojilerin kullanımına ilişkin beyan

Bu çalışmanın hazırlanması sırasında yazar, dil ve okunabilirliği iyileştirmek için ChatGPT (OpenAI) aracını kullanmıştır. Bu aracı kullandıktan sonra, yazar içeriği gerektiği gibi gözden geçirmiş ve düzenlemiş olup, yayın içeriğinden tamamen sorumludur.

Kaynaklar

- [1] A. P. Jones, "Indoor air quality and health," *Atmospheric Environment*, 33 (28), 4535-4564, 1999. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00272-1](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00272-1)
- [2] S. Dimitroulopoulou, M. R. Dudzińska, L. Gunnarsen, L. Hägerhed, H. Maula, R. Singh, ... and U. Haverinen-Shaughnessy, "Indoor air quality guidelines from across the world: An appraisal considering energy saving, health, productivity, and comfort," *Environment International*, 178, 108127, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108127>
- [3] M. H. Yuan, S. Kang and K. S. Cho, "A review of phyto- and microbial-remediation of indoor volatile organic compounds," *Chemosphere*, 359, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142120>
- [4] S. Vardoulakis, E. Giagloglou, S. Steinle, A. Davis, A. Sleenwenhoek, K. S. Galea, ... and J. Crawford,

- "Indoor exposure to selected air pollutants in the home environment: A systematic review," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(23), 2020. <https://doi.org/10.3390/ijerph17238972>
- [5] V. V. Tran, D. Park and Y. C. Lee, "Indoor air pollution, related human diseases, and recent trends in the control and improvement of indoor air quality," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(8), 2927, 2020. <https://doi.org/10.3390/ijerph17082927>
- [6] C. J. Weschler, "Changes in indoor pollutants since the 1950s," *Atmospheric Environment*, 43 (1), 153-169, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.044>
- [7] W. W. Nazaroff, "Exploring the consequences of climate change for indoor air quality," *Environmental Research Letters*, 8(1), 015022, 2013. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/015022>
- [8] P. S. Lai, N. L. Lam, B. Gallery, A. G. Lee, H. Adair-Rohani, D. Alexander, ... and O. B. Ozoh, "Household air pollution interventions to improve health in low-and middle-income countries: an official American thoracic society research statement," *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 909-927, 2024. <https://doi.org/10.1164/rccm.202402-0398ST>
- [9] K. R. Smith, N. Bruce, K. Balakrishnan, H. Adair-Rohani, J. Balmes, Z. Chafe, ... and E. Rehfuess, "Millions dead: how do we know and what does it mean? Methods used in the comparative risk assessment of household air pollution," *Annual review of public health*, 35, 185-206, 2014. <https://doi.org/10.1146/annurev-publhealth-032013-182356>
- [10] R. Fuller, P. J. Landrigan, K. Balakrishnan, G. Bathan, S. Bose-O'Reilly, M. Brauer, ... and M. Zhong, "Pollution and health: A progress update," *The Lancet Planetary Health*, 6(6), e535-e547, 2022. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(22\)00090-0](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(22)00090-0)
- [11] Y. Song, S. Wu and Y. Y. Yan, "Control strategies for indoor environment quality and energy efficiency—a review," *International journal of Low-Carbon Technologies*, 10(3), 305-312, 2015. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctt051>
- [12] J. G. Allen, P. MacNaughton, U. Satish, S. Santanam, J. Vallarino and J. D. Spengler, "Associations of cognitive function scores with carbon dioxide, ventilation, and volatile organic compound exposures in office workers: A controlled exposure study of green and conventional office environments," *Environmental Health Perspectives*, 124(6), 805-812, 2016. <https://doi.org/10.1289/ehp.1510037>
- [13] J. G. Allen and J. D. Macomber, *Healthy buildings: How indoor spaces drive performance and productivity*, Harvard University Press, 2020.
- [14] I. Hamilton, J. Milner, Z. Chalabi, P. Das, B. Jones, C. Shrubsole, ... and P. Wilkinson, "Health effects of home energy efficiency interventions in England: a modelling study," *BMJ Open*, 5(4), e007298, 2015. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2014-007298>
- [15] G. McGill, L. O. Oyedele, K. McAllister and M. Qin, "Effective indoor air quality for energy-efficient

- homes: A comparison of UK rating systems,” *Architectural Science Review*, 59(2), 159-173, 2016. <https://doi.org/10.1080/00038628.2015.1078222>
- [16] M. Ortiz, L. Itard and P. M. Bluyssen, “Indoor environmental quality related risk factors with energy-efficient retrofitting of housing: A literature review,” *Energy and Buildings*, 221, 110102, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110102>
- [17] C. Jung, G. El Samanoudy, N. Alqassimi and M. Sherzad, “Assessing the impact of ventilation systems on indoor air quality: a mock-up experiment in Dubai,” *Frontiers in Built Environment*, 9, 1286053, 2023. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2023.1286053>
- [18] A. Jarrahi, A. Aflaki, M. Khakpour and M. Esfandiari, “Enhancing indoor air quality: Harnessing architectural elements, natural ventilation and passive design strategies for effective pollution reduction—A comprehensive review,” *Science of the Total Environment*, 954, 176631, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176631>
- [19] W. C. Lee and Y. I. Kim, “Sustainable natural ventilation strategies for acceptable indoor air quality: An experimental and simulated study in a small office during the winter season,” *Sustainability*, 17(11), 2025. <https://doi.org/10.3390/su17114961>
- [20] T. Pekdoğan, “Evaluating the impact of building materials on indoor air quality: A critical analysis,” *Sakarya University Journal of Science*, 28(4), 824–843, 2024. <https://doi.org/10.16984/saufenbilder.1457545>
- [21] T. Salthammer, S. Mentese and R. Marutzky, “Formaldehyde in the indoor environment,” *Chemical Reviews*, 110(4), 2536-2572, 2010. <https://doi.org/10.1021/cr800399g>
- [22] J. R. Balmes, “Household air pollution from domestic combustion of solid fuels and health,” *The Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 143(6), 1979-1987, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jaci.2019.04.016>
- [23] J. M. Daisey, W. J. Angell and M. G. Apte, “Indoor air quality, ventilation and health symptoms in schools: an analysis of existing information,” *Indoor Air*, 13(1), 2003. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0668.2003.00153.x>
- [24] W. W. Nazaroff, “Indoor bioaerosol dynamics,” *Indoor Air*, 26, 61-78, 2016. <https://doi.org/10.1111/ina.12174>
- [25] C. Humbal, S. Gautam and U. Trivedi, “A review on recent progress in observations, and health effects of bioaerosols,” *Environment International*, 189-193, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.05.053>
- [26] M. Mannan and S. G. Al-Ghamdi, “Indoor air quality in buildings: a comprehensive review on the factors influencing air pollution in residential and commercial structure,” *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(6), 3276, 2021. <https://doi.org/10.3390/ijerph18063276>
- [27] S. Y. Tan, S. M. Praveena, E. Z. Abidin and M. S. Cheema, “A review of heavy metals in indoor dust and its human health-risk implications,” *Reviews on Environmental Health*, 31 (4), 447-456, 2016. <https://doi.org/10.1515/reveh-2016-0026>
- [28] S. E. Hashemi, M. Fazlzadeh, E. Ahmadi, ... and H. Arfaeina “Occurrence, potential sources, in vitro bioaccessibility and health risk assessment of heavy metal in indoor dust from different microenvironment of Bushehr, Iran,” *Environmental Geochemistry and Health*, 42, 3641–3658, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00598-z>
- [29] J. Sun, C. Chen, Z. Gao, X. Yang, K. Niu, C. Yan, ... and Z. Zhao, “Indoor concentrations and exposure levels of CO, SO₂, NO₂, and O₃ in Chinese residences, schools, and offices (2000–2021): A systematic review,” *Journal of Hazardous Materials*, 494, 138452, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.138452>
- [30] M. Bentayeb, M. Simoni, D. Norback, S. Baldacci, S. Maio, G. Viegi and I. Annesi-Maesano, “Indoor air pollution and respiratory health in the elderly,” *Journal of Environmental Science and Health*, 1783-1789, 2013. <https://doi.org/10.1080/10934529.2013.826052>
- [31] M. Haghlesan, “How does indoor environmental quality affect public health in sustainable urban,” *Research Journal of Chemical and Environmental Sciences*, 1(1), 37-41, 2013. <https://aelsindia.com/rjcesvol112013/6.pdf>
- [32] R. D. Brook, S. Rajagopalan, C. A. Pope III, J. R. Brook, A. Bhatnagar, A. V. Diez-Roux, ... and J. D. Kaufman, “Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: an update to the scientific statement from the American Heart Association,” *Circulation*, 121(21), 2331-2378, 2010. <https://doi.org/10.1161/CIR.0b013e3181d8bec1>
- [33] A. C. Nardocci, T. Nogueira, K. de Almeida Piai, T. A. Cavendish and P. Kumar, “Indoor environment exposure and children's health,” *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 32, 100449, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2023.100449>
- [34] World Health Organization, *WHO guidelines for indoor air quality: Selected pollutants*, WHO Press, 2010.
- [35] D. E. Schraufnagel, “The health effects of ultrafine particles,” *Experimental & molecular medicine*, 311-317, 2020. <https://doi.org/10.1038/s12276-020-0403-3>
- [36] S. Wang, H. M. Ang and M. O. Tade, “Volatile organic compounds in indoor environment and photocatalytic oxidation: State of the art,” *Environment international*, 33(5), 694-705, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2007.02.011>
- [37] A. Stamatelopoulou, I. Pyrri, D. N. Asimakopoulos and T. Maggos, “Indoor air quality and dustborne biocontaminants in bedrooms of toddlers in Athens, Greece,” *Building and Environment*, 173, 106756, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106756>
- [38] World Health Organization, *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*, World Health Organization, 2021.
- [39] World Health Organization (WHO). *WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective*. Geneva: World Health Organization, 2009.

- [40] C. Rizo-Maestre, J. M. Flores-Moreno, A. Nebot Sanz and V. Echarri-Iribarren, "Intelligent ventilation and indoor air quality: State of the art review" (2017–2025), *Buildings*, 16(1), 2025. <https://doi.org/10.3390/buildings16010065>
- [41] P. Wargocki, "The effects of ventilation in homes on health," *International Journal of Ventilation*, 12(2), 101–118, 2013. <https://doi.org/10.1080/14733315.2013.11684005>
- [42] A. Steinemann, P. Wargocki and B. Rismanchi, "Ten questions concerning green buildings and indoor air quality," *Building and Environment*, 351-358, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.010>
- [43] E. Giama, "Review on ventilation systems for building applications in terms of energy efficiency and environmental impact assessment," *Energies*, 15, 98, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15010098>
- [44] M. Shan and B. G. Hwang, "Green building rating systems: Global reviews of practices and research efforts," *Sustainable Cities and Society*, 39, 172-180, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.02.034>
- [45] I. Mujan, A. S. Anđelković, V. Munćan, M. Kljajić and D. Ružić, "Influence of indoor environmental quality on human health and productivity-A review," *Journal of Cleaner Production*, 217, 646-657, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.307>
- [46] S. Omrani, V. Garcia-Hansen, B. Capra and R. Drogemuller, "Natural ventilation in multi-storey buildings: Design process and review of evaluation tools," *Building and environment*, 116, 182-194, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.02.012>
- [47] A. Roetzel, A. Tsangrassoulis, U. Dietrich and S. Busching, "A review of occupant control on natural ventilation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(3), 1001-1013, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.11.005>
- [48] I. L. Niza, A. M. Bueno and E. E. Broday, "Indoor environmental quality (IEQ) and sustainable development goals (SDGs): Technological advances, impacts and challenges in the management of healthy and sustainable environments," *Urban Science*, 7, 96, 2023. <https://doi.org/10.3390/urbansci7030096>
- [49] E. Uhde and T. Salthammer, "Impact of reaction products from building materials and furnishings on indoor air quality—a review of recent advances in indoor chemistry," *Atmospheric Environment*, 41 (15), 3111-3128, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.05.082>
- [50] I. Senitkova, "Impact of indoor surface material on perceived air quality," *Materials Science and Engineering: C*, 36, 1-6, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2013.11.032>
- [51] P. Wargocki and D. P. Wyon, "Providing better thermal and air quality conditions in school classrooms would be cost-effective," *Building and Environment*, 581-589, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.10.007>
- [52] L. Morawska, J. W. Tang, W. Bahnfleth, P. M. Bluyssen, A. Boerstra, G. Buonanno, ... and M. Yao, "How can airborne transmission of COVID-19 indoors be minimised?," *Environment International*, 142, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105832>
- [53] T. M. Mata, A. A. Martins, C. S. C. Calheiros, F. Villanueva, N. P. Alonso-Cuevilla, M. F. Gabriel and G. V. Silva, "Indoor air quality: A review of cleaning technologies," *Environments*, 9(9), 118, 2022. <https://doi.org/10.3390/environments9090118>
- [54] W. J. Fisk and A. T. De Almeida, "Sensor-based demand-controlled ventilation: a review," *Energy and buildings*, 29(1), 35-45, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(98\)00029-2](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(98)00029-2)
- [55] B. Merema, M. Delwati, M. Sourbron and H. Breesch, "Demand controlled ventilation (DCV) in school and office buildings: Lessons learnt from case studies," *Energy and Buildings*, 172, 349-360, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.04.065>
- [56] G. Guyot, M. H. Sherman and I. S. Walker, "Smart ventilation energy and indoor air quality performance in residential buildings: A review," *Energy and Buildings*, 165, 416-430, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.12.051>
- [57] H. Qasim Flayyih, J. Waleed and A. M Ibrahim, "IoT-based AI methods for indoor air quality monitoring systems: A systematic review," *International Journal of Computing and Digital Systems*, 16 (1), 813-826, 2024. <http://dx.doi.org/10.12785/ijcds/160159>
- [58] Z. A. Ismail, "Machine learning applications for a better demand-controlled ventilation system experience in buildings: a review," *Open House International*, 49 (3), 444-467, 2024. <https://doi.org/10.1108/OHI-03-2023-0065>
- [59] C. Yu and D. Crump, "A review of the emission of VOCs from polymeric materials used in buildings," *Building and Environment*, 33 (6), 357-374, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(97\)00055-3](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(97)00055-3)
- [60] J. A. Bernstein, N. Alexis, H. Bacchus, I. L. Bernstein, P. Fritz, E. Horner, ... and S. M. Tarlo, "The health effects of nonindustrial indoor air pollution," *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 121 (3), 585–591, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jaci.2007.10.045>
- [61] P. N. Breyse, G. B. Diette, E. C. Matsui, A. M. Butz, N. N. Hansel and M. C. McCormack, "Indoor air pollution and asthma in children," *Proceedings of the American Thoracic Society*, 7 (2), 102–106, 2010. <https://doi.org/10.1513/pats.200908-083RM>
- [62] P. Amoatey, H. Omidvarborna, M. S. Baawain and A. Al-Mamun, "Indoor air pollution and exposure assessment of the Gulf Cooperation Council countries: A critical review," *Environment International*, 121, 491–506, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.09.043>
- [63] L. Ferguson, J. Taylor, D. Davies, C. Shrubsole, P. Symonds and S. Dimitroulopoulou, "Exposure to indoor air pollution across socio-economic groups in high-income countries: A scoping review of the literature and a modelling methodology," *Environment International*, 143, 105748, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105748>

- [64] K. E. Agbo, C. Walgraeve, J. I. Eze, P. E. Ugwoke, P. O. Ukoha and H. Van Langenhove, "A review on ambient and indoor air pollution status in Africa," *Atmospheric Pollution Research*, 12 (2), 243–260, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.11.006>
- [65] Y. Ataei, Y. Sun, W. Liu, A. S. Ellie, H. Dong and U. M. Ahmad, "Health effects of exposure to indoor semi-volatile organic compounds in chinese building environment: A systematic review," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20 (1), 2023. <https://doi.org/10.3390/ijerph20010678>
- [66] N. Liu, L. Fang, W. Liu, K. Kan, Z. Zhao, F. Deng, ... and Y. Zhang, "Health effects of exposure to indoor formaldehyde in civil buildings: A systematic review and meta-analysis on the literature in the past 40 years," *Building and Environment*, 233, 110080, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110080>
- [67] N. Carslaw, G. Bekö, S. Langer, C. Schoemaecker, V. G. Mihucz, M. Dudzinska, ... and D. Shaw, "A new framework for indoor air chemistry measurements: Towards a better understanding of indoor air pollution," *Indoor Environments*, 1 (1), 100001, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.indenv.2023.100001>
- [68] T. Horvat, G. Pehnc and I. Jakovljević, "Volatile organic compounds in indoor air: Sampling, determination, sources, health risk, and regulatory insights," *Toxics*, 13(5), 344, 2025. <https://doi.org/10.3390/toxics13050344>
- [69] B. R. Barnes, "Behavioural change, indoor air pollution and child respiratory health in developing countries: A review," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 11 (5), 4607–4618, 2014. <https://doi.org/10.3390/ijerph110504607>
- [70] B. Ghosh, H. Lal and A. Srivastava, "Review of bioaerosols in indoor environment with special reference to sampling, analysis and control mechanisms," *Environment International*, 85, 254–272, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.09.018>
- [71] A. Andrade and F. H. Dominski, "Indoor air quality of environments used for physical exercise and sports practice: Systematic review," *Journal of Environmental Management*, 206, 577–586, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.11.001>
- [72] N. Zulauf, J. Dröge, J. Klingelhöfer, D. Braun, G. M. Oremek and D. A. Groneberg, "Indoor air pollution in cars: An update on novel insights," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(13), 2441, 2019. <https://doi.org/10.3390/ijerph16132441>
- [73] J. Wang, C. Yoo and H. Liu, "An overview of artificial intelligence in subway indoor air quality prediction and control," *Process Safety and Environmental Protection*, 178, 652–662, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.08.055>
- [74] C. K. Chau, W. K. Hui and M. S. Tse, "Evaluation of health benefits for improving indoor air quality in workplace," *Environment international*, 33, 186–198, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2006.09.007>
- [75] E. Cheek, V. Guercio, C. Shrubsole & S. Dimitroulopoulou, "Portable air purification: Review of impacts on indoor air quality and health," *Science of the Total Environment*, 766, 142585, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142585>
- [76] ASHRAE. *ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2022. Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*, 2022.
- [77] E. R. Jones, J. G. Cedeño Laurent, A. S. Young, P. MacNaughton, B. A. Coull, J. D. Spengler & J. G. Allen, "The effects of ventilation and filtration on indoor PM_{2.5} in office buildings in four countries," *Building and Environment*, 200, 107975, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107975>
- [78] A. Ebrahimifakhar, M. Poursadegh, Y. Hu, D. P. Yuill, & Y. Luo, "A systematic review and meta-analysis of field studies of portable air cleaners: Performance, user behavior, and by-product emissions," *Science of the Total Environment*, 912, 168786, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168786>
- [79] J. M. Logue, T. E. McKone, M. H. Sherman and B. C. Singer, "Hazard assessment of chemical air contaminants measured in residences," *Indoor Air*, 21, 92–109, 2011. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2010.00683.x>
- [80] C. J. Weschler and W. W. Nazaroff, "Semivolatile organic compounds in indoor environments," *Atmospheric Environment*, 42 (40), 9018–9040, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.052>
- [81] J. Sundell, H. Levin, W. W. Nazaroff, W. S. Cain, W. J. Fisk, D. T. Grimsrud, ... and C. J. Weschler, "Ventilation rates and health: multidisciplinary review of the scientific literature," *Indoor Air*, 191–204, 2011. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2010.00703.x>
- [82] W. J. Fisk, D. Black and G. Brunner, "Changing ventilation rates in US offices: Implications for health, work performance, energy, and associated economics," *Building and Environment*, 47, 368–372, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.07.001>
- [83] Y. Huang, S. S. H. Ho, Y. Lu, N. Niu, L. Xu, J. Cao and S. Lee, "Removal of Indoor Volatile Organic Compounds via Photocatalytic Oxidation: A Short Review and Prospect," *Molecules*, 21 (1), 56, 2016. <https://doi.org/10.3390/molecules21010056>
- [84] B. D. Ostro, H. Tran and J. I. Levy, "The health benefits of reduced tropospheric ozone in California," *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56 (7), 1007–1021, 2006. <https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464511>
- [85] F. Dominici, R. D. Peng, C. D. Barr and M. L. Bell, "Protecting human health from air pollution: shifting from a single-pollutant to a multipollutant approach," *Epidemiology*, 21 (2), 187–194, 2010. <https://doi.org/10.1097/EDE.0b013e3181cc86e8>
- [86] C. Billonnet, D. Sherrill and I. Annesi-Maesano, "Estimating the health effects of exposure to multi-pollutant mixture," *Annals of Epidemiology*, 22 (2), 126–141, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.annepidem.2011.11.004>

- [87] C. P. Wild, "The exposome: from concept to utility," *International Journal of Epidemiology*, 41 (1), 24-32, 2012. <https://doi.org/10.1093/ije/dyr236>
- [88] G. D. Thurston, H. Kipen, I. Annesi-Maesano, J. Balmes, R. D. Brook, K. Cromar, ... and B. Brunekreef, "A joint ERS/ATS policy statement: what constitutes an adverse health effect of air pollution? An analytical framework," *European Respiratory Journal*, 49 (1), 2017. <https://doi.org/10.1183/13993003.00419-2016>
- [89] P. J. Landrigan, R. Fuller, N. J. Acosta, O. Adeyi, R. Arnold, A. B. Baldé, ... and M. Zhong, "The Lancet Commission on pollution and health," *The lancet*, 462-512, 2018. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(17\)32345-0](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(17)32345-0)
- [90] C. Chen and B. Zhao, "Review of relationship between indoor and outdoor particles: I/O ratio, infiltration factor and penetration factor," *Atmospheric environment*, 45 (2), 275-288, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.09.048>
- [91] D. Y. Leung, "Outdoor-indoor air pollution in urban environment: challenges and opportunity," *Frontiers in Environmental Science*, 2, 69, 2015. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2014.00069>
- [92] S. Stamp, E. Burman, L. Chatzidiakou, E. Cooper, Y. Wang and D. Mumovic, "A critical evaluation of the dynamic nature of indoor-outdoor air quality ratios," *Atmospheric Environment*, 273, 118955, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.118955>
- [93] C. J. Weschler and N. Carslaw, "Indoor chemistry," *Environmental Science & Technology*, 52 (5), 2419-2428, 2018. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b06387>
- [94] B. K. Coleman, M. M. Lunden, H. Destailats and W. W. Nazaroff, "Secondary organic aerosol from ozone-initiated reactions with terpene-rich household products," *Atmospheric Environment*, 8234-8245, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.031>
- [95] Y. Li, X. Jian, Y. Guo, F. Deng, J. J. Zhang, Y. Li and F. Feng, "Indoor ozone and ozone reaction products: An Emerging Health Threat," *Environmental Pollution*, 389, 127416, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.127416>
- [96] J. P. Abbatt and C. Wang, "The atmospheric chemistry of indoor environments," *Environmental Science: Processes & Impacts*, 22 (1), 25-48, 2020. <https://doi.org/10.1039/c9em00386j>
- [97] M. R. Wiesner, G. V. Lowry, P. Alvarez, D. Dionysiou and P. Biswas, "Assessing the risks of manufactured nanomaterials," *Environmental Science & Technology*, 40 (14), 4336-4345, 2006. <https://doi.org/10.1021/es062726m>
- [98] Y. Nazarenko, H. Zhen, T. Han, P. J. Lioy and G. Mainelis, "Potential for inhalation exposure to engineered nanoparticles from nanotechnology-based cosmetic powders," *Environmental health perspectives*, 120 (6), 885-892, 2012. <https://doi.org/10.1289/ehp.1104350>
- [99] J. Zang, B. Luo, G. He, C. Yue and Y. Yan, "The mini review of Sustainable building and Emerging contaminants," *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 47, 100648, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2025.100648>
- [100] J. Saini, M. Dutta and G. Marques, "Indoor Air Quality Monitoring Systems Based on Internet of Things: A Systematic Review," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17 (14), 4942, 2020. <https://doi.org/10.3390/ijerph17144942>

