

BREATHE: THE SOURCE OF LIFE

“AIR QUALITY MODELLING APPLICATIONS”

İRde ÇETİNTÜRK GÜRTEPE - Fatih TURAN
Fatma VARANK

Daire Başkanı, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı
Mail: : irde.gurtepe@csb.gov.tr

 ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8484-9858>

Genel Müdür, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı
Mail: : fatih.turan@csb.gov.tr

 ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-8117-0729>

Bakan Yardımcısı, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı

 ORCID: <https://orcid.org/1.0009-0009-2062-106X>

ABSTRACT

The quality of our breath, the most basic source of life, is critical to our well-being. Therefore, air quality management is one of the most fundamental environmental strategies. Because of its transboundary, transportable, and dynamic nature, air quality management requires global cooperation. Türkiye was among the first to join the UN Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (LRTAP), which was developed in this regard.

At the national level, air was the first environmental theme for which legislation was issued based on the Environmental Law. The Air Emission Management portal was created to improve air quality through transparent, common database sharing. Its motto is "You cannot manage what you do not know." The Ministry runs air quality models on its servers to produce maps with kilometer resolution, showing the temporal and spatial distribution of air quality. After developing the scenarios, the most effective ones for improving air quality are identified and turned into policies.

On the other hand, the battle against pollution is bolstered by pinpointing and controlling sources of short-lived air pollutants in densely populated urban areas. The Ministry of Environment, Urbanization, and Climate Change developed the NEFES (New Emission Forecast & Evaluation System) software, which allows for the precise measurement of pollution sources and air quality values on digital twins of cities with meter precision.

With the modelling applications developed to determine air quality levels with high resolution, information is obtained about places where measurement data is not available and the source of pollution can be detected and measures are defined by different scenario studies.

In this article, general information is given on air quality, transboundary air pollution and international obligations, national legislation prepared for the control of air pollution and air quality modelling applications, especially NEFES software are introduced.

Keywords: Air Quality, Air Quality Modelling, Spatial and Temporal Emission Distribution, Transboundary Air Pollution

Makale Atıf Bilgisi:

Gürtepe, İ. Ç. - Turan, F. - Varank, F. (2024). "Yaşamın Kaynağı Nefes: Hava Kalitesi Yönetiminde Dijitalleşme". *Çevre, Şehir ve İklim Dergisi*, Yıl: 3, Çölleşme, Erozyon ve İklim Değişikliği Özel Sayısı, s. (1-19)

Makale Türü: Araştırma
Geliş Tarihi: 02.09.2024
Kabul Tarihi: 28.10.2024
Yayın Tarihi: 08.11.2024
Yayın Sezonu: Kasım 2024

YAŞAMIN KAYNAĞI NEFES: HAVA KALİTESİ YÖNETİMİNDE DİJİTALLEŞME

İrde ÇETİNTÜRK GÜRTEPE - Fatih TURAN - Fatma VARANK

ÖZ

Yaşamın temel kaynağı nefesin kalitesi sağlığımız için çok önemlidir. Bu nedenle hava kalitesi yönetimi en temel çevre politikalarının arasında yer almaktadır. Sınır tanımayan, taşınan ve dinamik yapısı nedeniyle hava kalitesi yönetiminde küresel işbirliklerine ihtiyaç duyulmaktadır. Ülkemiz, bu itibarla geliştirilen BM Uzun Menzilli Sınıraşan Hava Kirliliği (LRTAP) Sözleşmesi ilk imzacı ülkeleri arasında yer almıştır.

Ulusal düzeyde hava, Çevre Kanununa dayanılarak mevzuat düzenlenen ilk çevre teması olmuştur. Hava kalitesinin iyileştirilmesi bağlamında geliştirilen mevzuatın yanı sıra, "Bilmediğinizi yönetemezsiniz" yaklaşımı ile şeffaf ve ortak bir veri tabanı olarak Hava Emisyon Yönetim portalı geliştirilmiş, tüm hava kirleticilerinin zamansal ve mekânsal dağılımları ile hava kalitesi modellerinin Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı sunucularında çalışarak kilometre çözünürlüğünde hava kalitesi haritaları üretilmektedir. Oluşturulan senaryolar ile hava kalitesini iyileştirmede en etkin olanlar belirlenerek politika haline gelmektedir.

Diğer yandan kısa ömürlü hava kirleticilerinin şehirlerde yüksek çözünürlüklü kaynaklarının tespiti ve yönetimi, kirlilikle mücadeleyi daha etkin kılmaktadır. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığınca geliştirilen NEFES (New Emission Forecast&Evaluation System) yazılımı ile şehirlerin dijital ikizleri üzerinde metre hassasiyetinde hava kalitesi değerleri ve kirletici kaynakları tespit edebilmektedir. 81 ilimizin merkez ve tüm ilçeleri için tamamlanan çalışmalar ile emisyon azaltım politikaları belirlenmekte ve yol haritaları hazırlanmaktadır.

Hava kalitesinin yüksek çözünürlüklü tespit edilebilmesine yönelik geliştirilen bu uygulamalar ile ölçüm verilerinin olmadığı yerler hakkında bilgi sahibi olunmakta, senaryo çalışmaları ile kirliliğin kaynağı ve alınması gereken önlemler belirlenmektedir.

Bu makalede, hava kalitesi, sınır ötesi hava kirliliği ve uluslararası yükümlülükler, hava kirliliğinin kontrolüne yönelik hazırlanan ulusal mevzuat hakkında genel bilgiler verilmekte, hava kalitesi modelleme uygulamaları ile NEFES yazılımı tanıtılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Hava Kalitesi, Hava Kalitesi Modeli, Zamansal ve Mekansal Emisyon Dağılımı, Sınır Ötesi Hava Kirliliği

1. Giriş

Hayat kalitemizi etkileyen vazgeçilemez unsurların başında soluduğumuz hava gelmektedir. Yetişkin bir insan günde binlerce litre hava solumaktadır. Bunun içindir ki hava, hayatın vazgeçilmez bir parçasıdır. Dünya Sağlık Örgütü verileri (WHO,2018) ve dört yılda bir yenilenen Küresel Hastalık Yüğü (Cohen vd., 2017; Ebrahimi vd., 2021) çalışmalarına göre her yıl milyonlarca insan hava kirliliği ile ilişkilendirilebilecek rahatsızlıklar sebebiyle hayatına erken veda etmektedir. Hava kirliliği diğer kirlilik türleri gibi anlık ve görünür etki göstermemektedir. Soluma ile alınan kirleticiler zamanla eşik miktarları aşarak vücudumuzda görünür ve kalıcı hasar bırakmaktadır. Bu sebeple Birleşmiş Milletler İnsan Hakları Yüksek Komiserliği tarafından hava kirliliği "sessiz katil" olarak nitelendirilmektedir (BM-UNHR,2018).

Nüfus artışı, şehirlerin büyümesi ve her geçen gün artan yaşam konforu talebimiz beraberinde ısıtma, soğutma, aydınlatma gibi alanlardaki enerji ihtiyaç artışı da doğurmaktadır. Daha fazla enerji arzı ise daha fazla yakıt tüketimi ve dolayısıyla da hava kirliliği anlamına gelmektedir. Bu durumda, hava kirliliği yönetilmesi gereken en öncelikli çevre temalarından biri haline gelmektedir.

Hava kirleticileri, gazlar ve partiküller olarak iki sınıfa ayrılmakta, atmosfere doğrudan veya ikincil yollarla salınmaktadır. Atmosferdeki yaşam döngülerine göre yarılanma ömürleri kısa/reaktif (yer seviyesi ozonu, metan, siyah karbon) veya reaksiyonlara karşı dirençli olarak (karbondioksit) gruplanabilmektedir. Kısa ömürlü kirleticiler, karbondioksite nazaran daha yüksek atmosfer ve okyanus ısıtma potansiyeline sahiptir(CCAC,2018).

Hava kirliliği ve iklim değişikliğinin oldukça yakın ilişkisi bulunmaktadır. Hava kirleticilerinin, özellikle partiküllerin iklim değişikliğine etkileri bulunmaktadır (Arfin, 2023). Hava kirleticileri dolaylı sera gazları olarak nitelendirilmekte olup reaktif yapısı ile atmosferde sera gazlarının ikincil oluşuma katkı sağlamaktadır. Tek atmosfer gerçeğinden bakıldığında başta karbondioksit olmak üzere sera gazları ile aynı kaynaklardan salınmaktadır. Diğer yandan iklim değişikliğinin de hava kirliliği artışında, özellikle partikül madde konsantrasyonları ve ozon maruziyeti üzerinde etkisi olduğu gösterilmiştir (Tagaris vd.,2009).

Sanayi devriminde kaynakların korunması gözetilmeksizin üretmek ve sadece üretmek yaklaşımının sonucu olan yoğun hava kirliliği, yükselen tepkilere bağlı olarak da hava yönetimi alanındaki ilk yazılı yasal düzenlemelerin hayata geçirilmesi sağlanmıştır. Bu itibarla ilk olarak 1926 yılında çıkarılan Duman Azaltma Yasasına rağmen 4 Aralık 1952'de binlerce kişinin ölümüne yol açan "Büyük Londra Dumanı" olarak adlandırılan hava kirliliği krizi sonrasında 1956 yılında Temiz Hava Kanunu (Clean Air Act) çıkarılmıştır. Avrupa Birliği'nin de temiz hava yasalarının altlığını oluşturan bu düzenleme, bölgesel bazda çevre alanındaki ilk yasal düzenleme örneği olmuştur. (Rodríguez,2014)

Sınır konulamayan ve dinamik yapısı içerisinde dağlar, denizler, binalar ve yollar arasında sürekli hareket halinde bulunan hava, bu yapısıyla yönetilmesi zor çevre konularından biri haline gelmektedir. Sanayi, ulaşım ve ısınma gibi temel alanlarda dünya genelinde artan yoğun fosil yakıt kullanımı, arıtma teknolojilerinin de yetersizliği ve rüzgâr gibi meteorolojik faktörlerle oluştuğu bölgeden binlerce kilometre uzaklıklara taşınan hava kirliliği bu yönüyle küresel önem kazanmış ve 1979 yılında imzalanan BM Uzun Menzilli Sınırışan Hava Kirliliği (CLRTAP) Sözleşmesi ile küresel bağlamda da çevre alanında mevzuat hazırlanan ilk tema olmuştur.

Hava kalitesi yönetiminde bilimsel verilerin ve bu doğrultuda politika geliştirilmesinde karar destek araçlarının kullanımı gelenekselleşmiştir. (Hordijk vd., 1991; Gough vd., 1998; Tuinstra vd., 1999; Castells ve Ravetz , 2001; Eckley vd., 2002; Sundqvist vd., 2002; Lidskog ve Sundqvist, 2004). Söz konusu bilimsel çalışmalar özellikle CLRTAP sözleşmesi çatısında hazırlanan kirlenici temelli azaltım protokollerine dayanak oluşturmuştur.

Politika belirleme sürecinde disiplinler arası yaklaşım gerekmektedir. Hava kalitesi yönetiminde özellikle ekonomi, toprak, ekoloji, meteoroloji bilimsel disiplinleri etkin katkı sağlamaktadır. (Farrel vd., 2001) Hava kirliliğinin en bilinen etkilerinden asidifikasyon ve ötrofikasyon diğer ekosistemleri yakından ilgilendirmektedir.

Hava kalitesinde meydana gelen değişimler yerel, bölgesel, ulusal ve küresel olarak etki gösterebilmektedir. Günümüzde, özellikle nüfus artışının baskısıyla yaşadığımız gezegende hava kirliliğinin yaşandığı dönemlerden daha fazla söz edilir olmaktadır. Nüfusun ihtiyaç duyduğu gıda ve yaşam gereksinimlerinin sağlanması için gerekli hammadde talebi, endüstriyel faaliyetler ile birlikte tedarik zinciri hareketliliğini artırmıştır. Böylece ulaşım ağları üzerinde ve kara/deniz/hava ulaşım modlarında yoğunlaşma yaşanmaktadır. Aynı zamanda kırsal bölgelerden kentsel alanlara doğru, yaşam alışkanlıklarının değişimi ile birlikte artan nüfus göç hareketliliğini de beraberinde getirmektedir. Nüfusun kentsel alanlarda yoğunlaşması ise barınma ihtiyacına bağlı olarak ısınma faaliyetlerinin dağınık şekilde değil, belli merkezlerde yoğunlaşmış oluşuyla sonuçlanmaktadır.

Dış ortam havası, meteorolojik koşullar, topoğrafya, şehirleşme profilleri, ulaşım ağı yayılımı, endüstriyel faaliyetlerin dağılımı gibi çeşitli faktörlerden etkilenmektedir.

Ülkemizde ve dünyada 19. yüzyılın sonları ve 20. yüzyılın başlarında dış ortam havasının nelerden etkilendiği, bu etkilerin nasıl sonuçlar gösterdiği, nüfusun bu etkiye maruz kalma durumu ve sonuçların nasıl değiştirilebileceği üzerinde hem akademik hem saha çalışmalarında büyük oranda artış yaşanmıştır.

Bu doğrultuda sabit hava kalitesi ölçümleri çoğunlukla ilk adım olarak tercih edilmiştir. Hava kirleticilerinin dış ortam havasında tespitine dayanan bu yaklaşımla insan sağlığı ve çevrenin korunması için belirlenmiş sınır değerler ölçüm sonuçları ile kıyaslanmaktadır. Hava kalitesi indeks hesaplamalarıyla kamuoyu tarafından kolaylıkla anlaşılabilir şekilde hava kalitesinin iyi, orta, hassas gibi sınıflandırmaları yapılmaktadır.

Oldukça yüksek kurulum ve işletme maliyeti bulunan sabit hava kalitesi ölçümleri son yıllarda artan hızla gösterge ölçümleri ve modelleme uygulamaları ile desteklenmektedir. Hava kalitesi modelleme uygulamaları yüksek mekânsal temsiliyeti, hassasiyet analizleri ile kirlilik kaynaklarının etkisini belirleyebilme, farklı senaryoların etkisini temsil edebilme gibi özellikleri ile ön plana çıkmıştır. Özellikle tüm kaynakların etkisini içeren "eularian" yaklaşımı ile atmosferik reaksiyonlar ve taşınımlar da dikkate alınarak solunan hava kalitesinin mümkün olan en temsil edici düzeyde hesaplanması hedeflenmektedir. Uluslararası standartlara göre veri doğrulaması yapılan modelleme uygulamaları hava kalitesi yönetiminde önemli bir araç olarak kullanılmaktadır.

2. Hava Kalitesi Yönetiminde Yasal Düzenlemeler

Hava kalitesi yönetimi başlığı da benzer şekilde ülkemizde iç mevzuatta yerini ilk bulan konulardan biri olma özelliği taşımaktadır. Anayasa'da tanımlanan "sağlıklı ve dengeli çevrede yaşam hakkı", 2872 Sayılı Çevre Kanunu ile birlikte daha geniş önlem ve hükümler ile düzenlenmiştir. Kalkınma planları içerisinde çevre sorunları ve bunların önlenmesi için gerekli düzenlemelere atıflar yapılmıştır. İç mevzuatta yerini bulan "hava kalitesinin korunması" öngörüsü ile yayımlanan ilk yönetmelik, hava kirliliğine neden olan kaynaklardan sanayi faaliyetlerine ağırlık vererek hazırlanmıştır. Takiben hem küresel ölçekte hem de ülkemizde gelişen koşullarla birlikte uluslararası çevre sözleşme ve protokollerine taraf olunmasıyla hava kalitesine ilişkin idari ve teknik altyapının hızlıca geliştirilmesine ilişkin süreç hareketlilik kazanmıştır. Bu çerçevede; hem ulusal ölçekte hava kirliliğinin önlenmesi hem de uluslararası ölçekte hava kirliliği taşınımının etki ve sonuçlarının takip edilmesi amacıyla hava kalitesinin izlenmesi, değerlendirilmesi ve yönetimine esas teşkilat yapısı ve idari düzenlemeler hayata geçirilmiştir.

2.1. Hava Kalitesi Yönetiminde Uluslararası İşbirliği

Hava kirliliğinin sınır aşan yapısı nedeniyle bölgesel işbirliği gerektiğine inanılarak 1979 yılında Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomik Komisyonu "Uzun Menzilli Sınır Aşan Hava Kirliliği Sözleşmesi-CLRTAP imzalanmıştır.

Sözleşmenin ana organları; icra organı, EMEP izleme organı, etkiler çalışma grubu, strateji ve gözden geçirme çalışma grubu, uygulama komitesinden oluşmaktadır. CLRTAP çatısı altında ayrıca bilimsel görev güçleri ve konu merkezleri görev yapmaktadır. Bu organlar vesilesiyle her yıl hava kirliliğinin çevresel etkileri, atmosferik dağılım, ülkeler arası taşınımı, emisyon kontrol teknolojileri, ekonomik değerlendirme metodolojileri üzerinde çalışmalar yürütülmektedir. Ayrıca ülkelerin emisyon envanteri, emisyon dağılımları ve hava kalitesi ölçüm istasyonlarının verisine ilişkin resmi raporlamalarından veri tabanı oluşturulmakta ve hava kalitesi ve entegre etki değerlendirme modellerinde kullanılmaktadır.

Sözleşmenin politika hazırlama sürecinde bilimsel çalışmalar aktif kullanılmakta ve protokol metinlerine altlık teşkil etmektedir. (Gough vd., 1998; Grunfeld, 1999; Tuinstra vd., 1999; Backstrand, 2001; Castells and Ravetz, 2001; Eckley, 2002; Sundqvist vd., 2002; Farrell and Keating, 2005; VanDeveer, 2005).

CLRTAP altında tematik olarak hava kirleticilerini azaltmayı hedefleyen 8 protokol bulunmaktadır:

- EMEP - "Avrupa'da Hava Kirleticilerinin Uzun Menzilli Taşınımının İzlenmesi ve Değerlendirilmesi İçin İşbirliği Programının Uzun Dönemli Finansmanı Protokolü"
- 1999 Asidifikasyon, Ötrofikasyon ve Yer Seviyesi Ozonu ile Mücadele Protokolü (Gothenburg Protokolü)
- Kalıcı Organik Kirleticiler (POPs) Protokolü
- Ağır Metaller Protokolü
- Kükürt Emisyonlarında Azaltım Protokolü
- Uçucu Organik Bileşik Emisyonlarının ya da Onların sınır aşan Birikimlerinin Kontrolü Protokolü
- Azot Oksit Emisyonlarının ya da Onların sınır aşan Birikimlerinin Kontrolü Protokolü
- Kükürtdioksit Emisyonlarının ya da Onların sınır aşan Birikimlerinin En Az %30 Oranında Azaltımı Kontrolü Protokolü

Türkiye, sözleşmeyi ilk imzalayan ülkeler arasında yer almaktadır. Sözleşme çatısı altında yer alan; emisyon verisinin toplanması, hava ve yağış kalitesinin ölçülmesi ve atmosferik dağılım modellemesinin gerçekleştirilmesi bileşenlerini içeren "Avrupa'da Hava Kirleticilerinin Uzun Menzilli Taşınımının İzlenmesi ve Değerlendirilmesi İçin İşbirliği Programının Uzun Dönemli Finansmanı Protokolü-EMEP" ise ülkemiz tarafından 1985 yılında onaylanmıştır. Özellikle Gothenburg protokolü başta olmak üzere diğer protokollere taraf olunmasının değerlendirilmesine yönelik teknik hazırlıklar sürdürülmektedir.

CLRTAP sözleşmesinin başta kükürtdioksit emisyonları gelmek üzere temel hava kirleticileri üzerinde azaltımında başarısı ortaya konulmuştur. (Tuinstara vd., 2016) Diğer yandan; yıldan yıla enerji tüketimi artmaya devam etmekte, amonyak ve uçucu organik emisyonları ile mücadele devam etmektedir. Hava kirliliğini azaltmayı hedefleyen başka bölgesel ve küresel işbirlikleri de bulunmaktadır.

2011 yılında Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) ve Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO) sadece karbondioksite yönelik azaltım önlemlerine odaklanmak yerine kısa ömürlü kirleticilerle de mücadelenin küresel ısınmadaki artışı durdurmaya yönelik çalışmaları hızlandıracağı ortaya konmuştur. Elde edilecek sonuçlar hem hava kirliliği hem de iklim değişikliği için "kazan- kazan" ilkesini temsil edecektir. (UNEP, 2011)

İklim ve temiz hava eylemlerini bağlayarak kısa dönemde çoklu fayda elde etmeyi amaçlayan Temiz Hava ve İklim Değişikliği Koalisyonu (Clean Air & Climate Change Coalition-CCAC) 2012 yılında kurulmuş olup, sekreteryası UNEP tarafından yürütülmektedir. 2012, Doha-Katar Yüksek Düzeyli Bakanlar Meclisi, 2013 Tarım İnisyatifi kurulması ve Meksika Çalışma Grubu Toplantısı, 2013 Oslo-Norveç Dünya Bankası ve Dünya Sağlık Örgütü'nün katılması, 2014 BM Çevre Meclisi hava kalitesi karar tasarısı , 2015 Fransa-Paris beş yıllık stratejik planın bakanlar düzeyinde kabulü, 2016 Washington-ABD Küresel Methane Forumu, 2016 Montreal Protokolünde Kigali Değişikliği, BreatheLife Kampanyası Ekvator 2016, Fransa-Paris Küresel Metan Değerlendirme Rapor Lansmanı 2021 CCAC tarafından yürütülmüş başlıca çalışmalar olarak sıralanabilir.

2.2. Ulusal Çalışmalar

Avrupa Birliği aday ülke pozisyonumuza bağlı şekilde ilerletilen çevre faslı çerçevesinde, ulusal hava kalitesi mevzuatı da belirli başlıklarda hız kazanarak revize edilmekte ve ülke profilimizi yansıtacak şekilde düzenlenmektedir. Ulusal mevzuatta mevcut düzenlemelere aşağıdaki listede yer verilmektedir:

- Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği
- Sanayiden Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği
- Isınmadan Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği
- Egzoz Gazı Emisyonu Kontrolü Yönetmeliği
- Bazı Akaryakıt Türlerindeki Kükürt Oranının Azaltılmasına İlişkin Yönetmelik
- Benzin ve Naftanın Depolanması ve Dağıtılmasından Kaynaklanan Uçucu Organik Bileşik Emisyonlarının Kontrolü Yönetmeliği
- Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Genelgesi
- İthal Katı Yakıtlar Genelgesi
- Hava Kirliliğinin Kontrolüne Yönelik Uygulamalar

Yukarıda listelenen yasal düzenlemeler ile birlikte Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından; temiz hava, ulusal emisyon tavanları, endüstriyel emisyonlar, büyük yakma tesisleri, uçucu organik emisyonlar direktiflerinin gerektirdiği geçiş süreciyle ve Avrupa Yeşil Mutabakatı ile birlikte hızlanan "Net Sıfır Emisyon" stratejileri için yol haritalarının çıkarılması amacıyla hem ulusal hem de uluslararası projeler sürdürülmüş ve sürdürülmeye devam etmektedir.

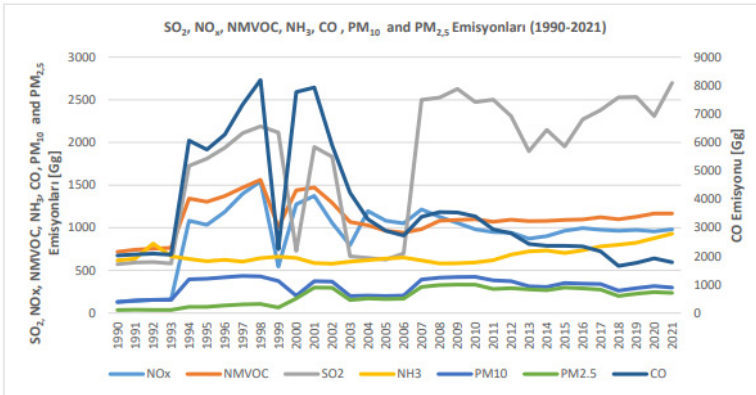
Hava kalitesinin kaynaklarının ve değişiminin nedenlerinin arasında ilişki kurabilmek için hava emisyonlarının belirli şekilde sayısal bilgilerinin elektronik ortamda kaydedilmesi, belirli formatlara uygun olarak arşivlenmesi, güncellenmesi, bu şekilde oluşturulan emisyon envanterinin bilimsel hesaplamalara dayalı belirli kuralları taşıyor olması gerekmektedir.

Ulusal Hava Kirleticileri Emisyon Envanteri yıllık olarak Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından hesaplanarak CLRTAP sekretaryasına düzenli olarak raporlanmaktadır. Raporlamalar, BM Avrupa Ekonomi Komisyonu-AEK Sekretaryası, sözleşmenin Emisyon Envanteri ve Projeksiyonları Merkezi web sitesinde (CEIP,2024), Avrupa Çevre Ajansı Merkezi Veritabanı ile birlikte TÜİK Resmi İstatistik Programı dahilinde, Ulusal Veri Yayınlama Takvimi çerçevesinde yayınlanmakta ve duyurulmaktadır.

Ulusal Hava Kirleticileri Emisyon Envanteri; Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi yükümlülüklerimiz gereğince hazırlanan sera gazı emisyon envanterinin "dolaylı sera gazları" başlığında doğrudan kullanılmaktadır.

Hava kirleticileri emisyon envanteri raporlanması 2013 yılında "En İyi Geliştirilmiş Envanter Raporlaması" ve 2015 yılında "Önemli Envanter Raporu İyileştirmeleri" başlıklarında iki kez ödüle layık görülmüştür.

Ulusal Hava Kirleticileri Emisyon Envanteri Bilgilendirici Raporu ise emisyon envanterine esas kabulleri, aktivite verisi, emisyon faktörleri ile hava kirleticilerinin sektörlere ve yıllara göre toplam bilgisini içermektedir. (IIR,2021) Şekil-1'de Ulusal hava kirleticileri emisyon toplamalarının zaman serisi yer almaktadır.



Şekil 1-Hava kirleticileri emisyon toplamaları 1990-2021

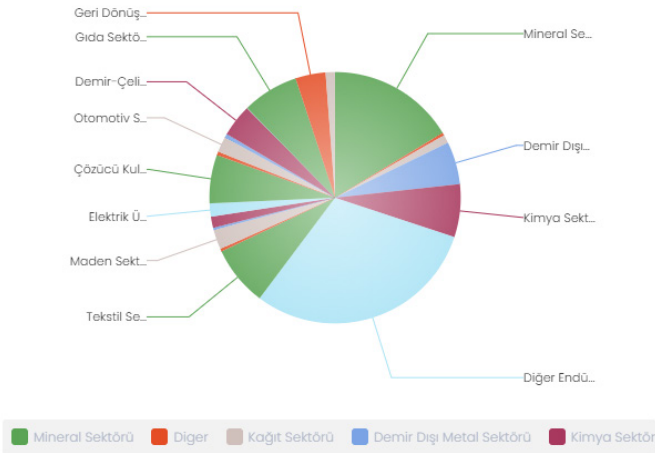
Hava kalitesi yönetimi, yukarıda anılan uluslararası işbirlikleri çerçevesinde Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları ile uyumlu şekilde, 12. Kalkınma Planı (2024-2028), Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Stratejik Planı (2024-2028) ve beraberinde sektörel stratejik plan ve programlar ile yürütülmektedir.

3. Hava Kalitesi Yönetiminde Kullanılan Modelleme Uygulamaları

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, emisyon envanterinin devamlılığını sağlamayı ve hesaplardaki belirsizliği mümkün olan en asgari düzeye indirmeyi hedeflemektedir. Bu doğrultuda “yukarıdan-aşağıya” yaklaşımına ilave olarak “aşağıdan-yukarı” yaklaşımı ile daha yüksek seviyede aktivite verisi toplanması gerekmektedir. Bu amaçla; temel hava kirliliği kaynakları olan sanayi, evsel ısınma ve ulaşım emisyonları için, hesaplama, emisyon dağılımı, modelleme ve senaryo analizi yapabilen coğrafi bilgi sistemleri tabanlı “Hava Emisyon Yönetim – HEY Portalı” yazılımı geliştirilmiştir (Gürtepe vd, 2014).

HEY Portalı, temel olarak noktasal kaynaklar, alansal kaynaklar, hareketli kaynaklar, katı yakıt, emisyon hesaplama, emisyon dağılımı, meteoroloji ve hava kalitesi modüllerinden oluşmakta olup kullanıcı yönetimi, harita işlemleri, raporlama, yönetici paneli gibi birçok ilave alt modülleri de bulunmaktadır.

Noktasal kaynaklar modülünde çevre izni bulunan sanayi tesislerinin hava emisyon ölçüm raporlarının sayısallaştırılması gerçekleştirilmekte olup, günümüz itibarıyla veri tabanında kayıtlı yaklaşık 12.000 sanayi tesisinin sektörel dağılımı Şekil-2’de yer almaktadır. Ayrıca sanayi tesislerinin toplam emisyon yüzdesine katkısı, emisyon seviyelerinin kümülatif değerlendirilmesi, sektör/il/ülke sıralaması gibi bilgiler sunulmaktadır.

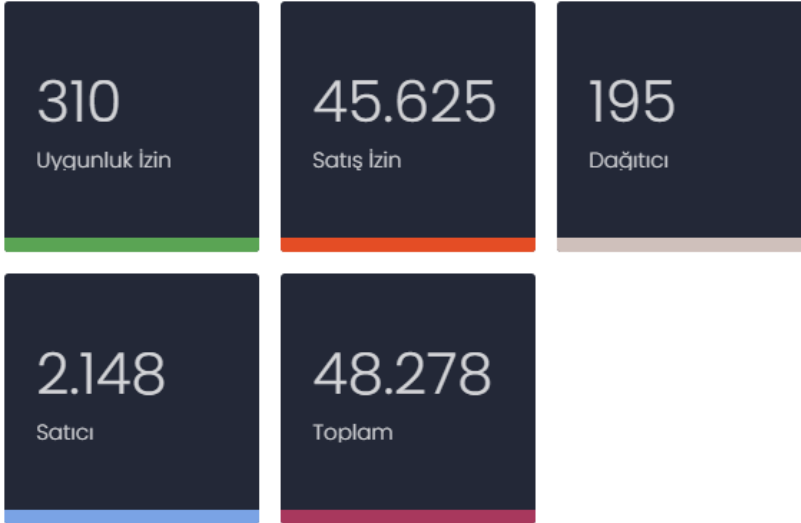


Şekil 2-HEY Portalı noktasal kaynakların sektörel dağılımı

Ayrıca noktasal kaynaklar özelinde emisyon hesaplarının yapılabilirdiği bir modül geliştirilmiş ve başlıca sektörler için ulusal emisyon faktörleri kütüphanesi oluşturulmuştur. (Özdemir, 2021)

Alansal kaynak modülünde başlıca evsel ısınma, organize sanayi bölgeleri, atık depolama alanları ele alınmış olup EMEP/AÇA ortak hesaplama rehberinde yer alan emisyon faktörleri kullanılmıştır. Evsel ısınma için yakıt tipi ve yakıt kullanım miktarının önemi kuşkusuz oldukça büyüktür. Aktivite verisi bağlamında doğalgaz için ülkemiz ilgili kuruluşlarının veri altyapısı ilgili verinin temini için yeterlidir. Ancak katı yakıt miktarlarının tespiti için ithalatçı/üretici-dağıtıcı ve satıcılar üçgeninde sunulan yazılı ortamdaki veriler elektronik ortamda kaydedilemez ise bilgiye dönüşmemektedir. Bu kapsamda, katı yakıtın yaşam döngüsünün takibini sağlamak üzere HEY Portalı içerisinde katı yakıt modülü geliştirilmiştir. Isınmadan Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği kapsamında gerekli olan katı yakıt satış, dağıtım ve izin belgelendirme süreçlerinin tümünün; resmi evrak akışı dahil, elektronik ortama taşınarak otomasyonu sağlanmıştır. Böylece bürokrasinin azaltılması, kâğıt kullanımının ortadan kaldırılması, evrak kayıt ve izin belgelerinin düzenlenmesi sürecinde ise işgücü ve zaman tasarrufu sağlanmıştır.

HEY Portalı ile günümüzde 4800'den fazla aktif kullanıcı, evsel ısınma emisyonlarına katkısı bulunan katı yakıt stok sürecinin takibini elektronik ortamda gerçekleştirmektedir. Şekil 3'te Katı Yakıt Modülü aracılığıyla elektronik işlem şeklinde kaydedilen belge sayıları belirtilmektedir.



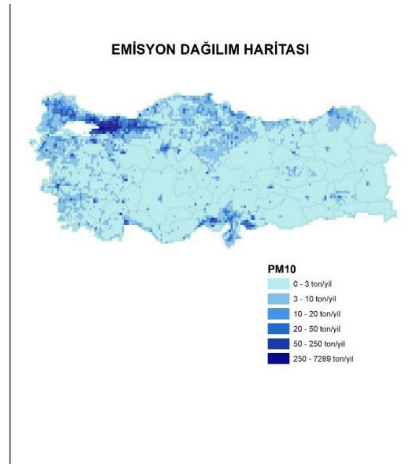
Şekil 3 - HEY Portalı Katı Yakıt Modülü belge sayıları

Emisyon envanterinde ana kaynaklardan bir diğeri olan karayolu ulaştırma emisyonları için EMEP/AÇA ortak rehberinde atfedilen hesaplama yazılımı COPERT-5 (Calculations of Emissions from Road Transport-Karayolu Ulaşımı Emisyon Hesaplama) kullanılmaktadır. COPERT ticari bir ürün olup, belirli bir formatta araç tipleri, araç sayıları, yıllık kat edilen km, toplam kat edilen km, yıllık ortalama sıcaklık, hız limitleri gibi çok detaylı bir aktivite veri seti ile çalışmaktadır. Bu yazılım aracının da HEY Portalına entegre şekilde kullanımı ve emisyon sonuçlarının da envanter raporlama şablonuna kaydedilmesi sağlanmaktadır.

Diğeri ulaşım kaynaklarından denizcilik ve havacılık emisyonları için Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığınca paylaşılan aktivite verisine uygun detayda hesaplama yazılım üzerinden gerçekleştirilmektedir.

HEY Portalı; 1990/t-2 zaman serisi için ilgili emisyon hesaplama sayfalarının otomatik hazırlanmasını sağlamıştır. Raporlama şablonuna uygun şekilde emisyon envanteri dosyaları, portal üzerinden elde edilmektedir.

Tamamlanan emisyon envanterinde kirleticilerin yıllık kütleli debileri sektör/alt sektör toplamları olarak yer almakta olup verinin hava kalitesi modeline saatlik veri olarak gönderilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, yıllık kütleli debiler sırasıyla mekânsal dağılım ve zamansal dağılım işlemine tabi tutulmaktadır. Bu amaçla, her sektör için özel bir gridleme algoritması geliştirilmiş olup, mümkün olan en uygun ve erişilebilir proksilerin kullanımı sağlanmıştır. Emisyon dağılım haritası temsili örneği Şekil 3'de yer almaktadır. Kullanılan başlıca proksiler noktasal kaynaklar için sanayi tesisleri, evsel ısınma için yerleşim alanları, karayolu ağı, organize sanayi bölgelerinin koordinatları olarak sıralanabilir.



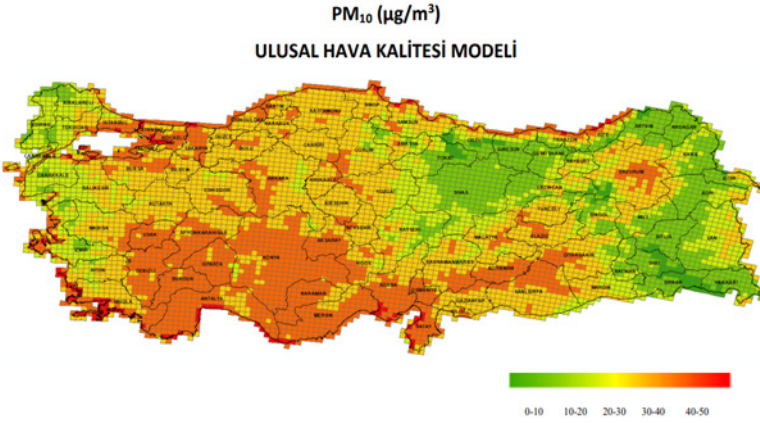
Şekil 3-HEY Portalı Ulusal PM Emisyonları Dağılım Haritası temsili örneği; (ton/yıl)

Emisyon dağılım işlemi tamamlanan veri seti hava kalitesi modellemesine girdi olarak kullanılmaktadır.

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı hava kalitesi modelleme uygulamalarında kullanılmak üzere 2 adet 100 çekirdekli çift işlemcili sunucuyu veri merkezinde kurulu ve işlevsel hale getirmiştir. Modelleri takip etmek üzere kurulan dört kişilik operasyonel ekip aktif olarak çalışmaktadır. HEY portalının modelleme modülü, Bakanlık sunucularında kurulu bulunan modelleri kuyruk yapısı ile tetikleyebilmekte ve sonucu analiz edebilmektedir.

Modelleme uygulamaları olarak açık kaynak kodlu WRF (Weather Research Forecast) – CMAQ (Community Multiscale Air Quality Modelling) ikilisi tercih edilmiştir. Zamansal ve mekânsal dağılımı tamamlanan emisyon verileri CMAQ hava kalitesi modelinin girdisi olarak kullanılmaktadır. WRF modelleri aynı domain için veri üretmekte olup CMAQ modelini meteorolojik veriyle desteklemektedir. Modelleme çalışmalarının sonucunda saatlik/günlük/aylık/yıllık zamansal çözünürlükte ulusal ve bölgesel hava kalitesi haritaları elde edilmektedir. HEY portalı ile km çözünürlükte üretilen emisyon dağılım ve stratejik hava kalitesi haritaları ulusal düzeyde politikaların hava kalitesi üzerine etkisini yorumlamak için yeterli ve faydalı olmaktadır. 2018-2023 yılları için 36, 12 ve 4 km çözünürlüğünde üretilen hava kalitesi modelleme çıktıları veri merkezi arşivinde saklanmaktadır. Tarihsel veri seti, hem trend eğilimlerini yorumlamada hem de hava kirliliği episodlarının belirlenmesinde faydalı olmaktadır.

Şekil 4'te 12 km model çalıştırılma alanı için elde edilen temsili hava kalitesi haritası örneği yer almaktadır.



Şekil 4- HEY Portalı Temsili Hava Kalitesi Haritası (PM₁₀, µg/m³)

Akademik çalışma ve makalelerde yer verilen kapsamda, hava kirlenici emisyonlarının emisyon envanterine bağlı modelleme çıktıları, hava kalitesi

ölçüm istasyonlarının sonuçları ile karşılaştırılmaktadır. HEY Portalı üzerinden elde edilen hava kalitesi haritaları, Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı hava kalitesi ölçüm sonuçları ile karşılaştırılarak doğrulanmaktadır (ITU, 2021).

Şehir ölçeğinde ise km çözünürlüğünde haritalar hava kalitesi yönetimde yetersiz kalmaktadır. Yer seviyesinde hava kirliliğinin metre seviyesinde ciddi değişiklikler gösterebildiği bilinmektedir. Bu amaçla hava kalitesi haritalarının çözünürlüğünü arttıran yöntemler araştırılmış, hava kalitesi haritaları ile birlikte, 3 boyutlu bina verisi, arazi kullanım verisi, topoğrafya gibi şehirlere ait detayların kullanılacağı yeni bir dijital uygulama hazırlıklarına başlanılmıştır.

Hava kirliliği özellikle rüzgâr, hava durumundaki değişimler, yağmur ve sıcaklık gibi meteorolojik koşullara göre de önemli değişiklikler gösterebilmektedir. Aynı koşullarda aynı kirlilik emisyonu olan bir nokta ve etrafında farklı meteorolojik şartlarda farklı kirlilik değerleri ölçülebilmektedir. Bu nedenle şehirlerin 3 Boyutlu yapısının hava kalitesine etkisini tespit etmeye yönelik bilimsel araştırmalar hız kazanmıştır (Zhang, 2022, Huang 2022, Zhang 2024).

Tüm bu varsayımlar ve bilgiler ışığında ihtiyacı karşılayabilecek bir hava kirliliği analizi çözümü 3 Boyutlu Ortamda Hava Kalitesi Değerlerinin Tespiti Projesi ile ortaya konulmuştur. (TURKSAT, 2021)

Hava kalitesi tespitinde geliştirilen yaklaşım ile;

- Yüksek çözünürlükte mekansal ve zamansal dağılım yapılabilecek,
- Bilimsel temelli, güvenilir bir model ile meteorolojik koşullara göre kirlilik dağılımı hesaplanabilecek

ve sonucunda üretilecek analizler ve veriler ışığında ülke çapında karar vericilere veya yerel yöneticilere;

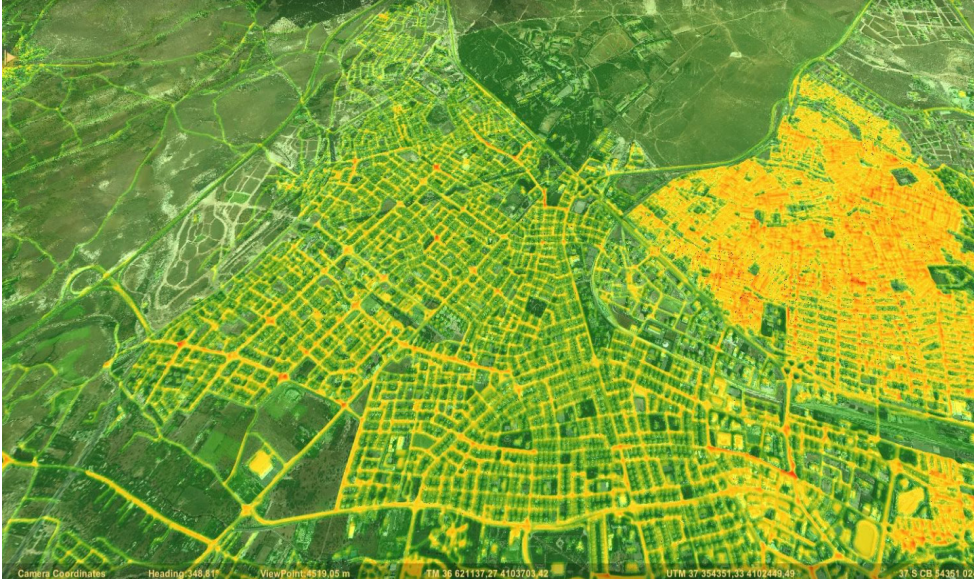
- Toplam nüfusun ne kadar oranda kirliliğe maruz kaldığının gösterilmesi,
- Sağlık ve kentsel planlama ile ilgili çalışmaların daha gerçekçi yapılabilmesi,
- Hava kalitesinin iyileştirilmesine yönelik daha etkin tedbirler alınabilmesi, gibi pek çok faydayı da sağlamış olacaktır.

Bu bakış açısıyla, şehirlerin bina yapısının hava kalitesine etkisi konusunda araştırmalar henüz yeni hız kazanmış iken Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı yerli ve milli NEFES (New Emission Forecast & Evaluation System) yazılımını hayata geçirerek uygulamaya almıştır (NEFES, 2021).

5 metreye kadar kısa mesafeleri dahi modelleyebilen 3 boyutlu NEFES yazılımıyla hava kirliliğine neden olan noktalar ve kirlilik kaynağı tespit edilebilmektedir. Geliştirilen yerli ve milli yazılım NEFES ile stratejik hava kalitesi haritaları, 3 boyutlu bina modeli, kent atlası, topoğrafya, trafik yoğunluğu, arazi kullanımı, kavşaklar, binaların yakıt tipi gibi çok sayıda etmen ve 100.000'den fazla veri ele alınarak 3 boyutlu ortamda hava kalitesi değerleri 81 ilin merkezi

ve tüm ilçeleri için ortaya konulmaktadır. Şehirlerimizde politikalar için uygulama sürecinin bu yöntemle etkinleştirilmesi planlanmıştır. Yazılıma işlenen tüm verileri anlık algılama ve çıktı üretme yeteneğine sahip 3 boyutlu yazılım, dünyada bu alandaki ilk örneklerden olma niteliği taşımaktadır.

NEFES yazılım algoritması hibrit yaklaşım ile arazi kullanımı regresyon modelleme yaklaşımı ile çözümüleme yapmakta ve alanında ilk olarak nitelendirilebilecek birçok hesaplama algoritması içermektedir. Örneğin; literatürde bilgisayar işlem gücünü azaltmak amacıyla ihmal edilen topoğrafya dikkate alınmıştır. 3 boyut özelliğinden yararlanılarak binaların hacmi ve ısınma kaynaklı emisyon ilişkisi, saatlik olarak binalardaki hareketlilik ve bundan kaynaklı araç emisyonları algoritmaya ilave edilmiştir. Trafik veri seti ve eczane, okul, restoran vb. ilgi noktalarının lokasyon bilgisi kullanılarak yerel sıcak noktalar tespit edilerek emisyon algoritmasına eklenmiştir. Ayrıca yol eğiminin yakıt tüketimini/emisyonu artırıcı, trafik sinyalizasyon ışıklarının dur kalk nedeniyle emisyon artırıcı, yolun kullanım amacının, yolda mevcut kasisler/ yaya geçitleri ve yolun lokasyonun etkisi çözümlenmiştir. Farklı çözünürlük, farklı yapı ve farklı tipteki veriler raster veritabanına kaydedilmiş ve inovatif bir yaklaşımla çok dallı bir ağaç yapısında parametreler hiyerarşik olarak organize edilmiştir. Hiyerarşik parametre ağacında ağırlıklama yapılarak NEFES yazılım algoritması geliştirilmiştir.



Şekil 6- NEFES Yazılımı Temsili 3B Harita Görself

NEFES yazılımıyla evsel ısınma, sanayi, ulaşımaya bağı hava kirliliğı kaynakları ve hava kalitesi değerlerine etkileri tespit edilip, kaynağa özgü önlemler geliştirilebilmektedir.

Meteorolojinin hava kalitesi üzerinde etkisi bilindiğinden bu konuda hassas davranılarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği modeli algoritmaya eklenmiştir. Proje (Türksat, 2021) kapsamında yapılan literatür taramasında rüzgâr dağılım modellerini şehir ölçeğinde hesaplayan bir çalışmaya rastlanılmamış olup NEFES yazılımı bu yönüyle de öncülük etmiştir. Güvenilir bir modelleme algoritması ile hızlı çözümleme yapan NEFES yazılımının rüzgâr algoritması grafik kartında çalışan hızlı akışkanlar dinamiği araştırmalarını dayanak almıştır. (Harris, 2005)

5 ilde pilot olarak başlatılan çalışma sırasıyla 25,37 ve 59 il için devam etmiş 2024 yılı itibariyle 81 ilin merkez ve tüm ilçeleri için tamamlanmıştır.

3B haritalar, çevrimiçi toplantılar serisi ile illerde yerel yönetimler ve taşra teşkilatı ile paylaşılmaktadır. Böylece istişare sürecinin politikaların uygulanması aşamasında etkinleştirilmesi amaçlanmaktadır. Şekil 6'da İstanbul ili için hazırlanmış 3B haritadan temsili bir örnek yer almaktadır.

4 . Sonuç ve Öneriler

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığının etkin hava kalitesi yönetiminde ortaya koymuş olduğu dijital uygulamalar alanında örnek teşkil eder niteliktedir. Hesaplamalarda belirsizliği azaltarak maksimum kalitede veri elde etmeyi hedefleyen yazılımlarda tüm hava kirliliği kaynakları ele alınmıştır.

Dijital dönüşüm çağı ile eş zamanlı geliştirilen uygulamalar hava kalitesi yönetimini karar destek sistemi kullanımını üst seviyeye taşımıştır.

Kamu kaynağı ve alt yapısı ile sürdürülebilir ve devamlı gelişmeyi hedef alan bu yönetsel yaklaşımın şehirlerimizin hava kalitesini iyileştirmesinde faydası olacağı aşikârdır.

Belirlenen sıcak noktalar için geliştirilen azaltım önlemlerinin hayata geçirilmesi ile emisyon azaltımı sağlanarak hem hava kalitesi iyileşecek hem de ülkemiz net sıfır hedefine katkı sağlanacaktır.

Hava kalitesi yönetiminde dijital dönüşüm çıktılarının yeşil dönüşüm hedefi doğrultusunda ilgili kurumlar ile paylaşılması kaynakların etkin ve verimli kullanımı açısından önem arz etmektedir.

Ortak ve şeffaf veri tabanı oluşturma ilkesiyle yola çıkan Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığının ulaştığı noktada tüm vatandaşlara buldukları yerin hava kalitesine ilişkin veri sağlayabilir konuma gelmiştir.

Gelişmeye devam eden bilgi teknolojilerinden yararlanmaya devam edilmesi özellikle uydu verisinin çalışmalarda kullanımı ve makine öğrenmesi, yapay sinir ağları gibi tekniklerin dâhil edilmesi önerilmektedir.

Çalışmaya konu modellerin geliştirilmesine katkı sunan İstanbul Teknik Üniversitesi ve TÜRKSAT proje ekibi ile Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı yöneticilerime ve ekip arkadaşlarıma teşekkür ediyorum.

Kaynakça

WHO, 2018. Ambient air pollution: health impacts. Retrieved May 10, (2020), from <http://www.who.int/airpollution/ambient/health-impacts/en/>.

Cohen, A.J., Brauer, M., Burnett, R., Anderson, H.R., Frostad, J., Estep, K., Balakrishnan, K., Brunekreef, B., Dandona, L., Dandona, R., Feigin, V., Freedman, G., Hubbell, B., Jobling, A., Kan, H., et al., (2017). Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015. *Lancet*. 389, 1907–1918. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)30505-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)30505-6).

Ebrahimi, H., Aryan, Z., Saeedi Moghaddam, S., Bisignano, C., Rezaei, S., Pishgar, F., Force, L.M., Abolhassani, H., Abu-Gharbieh, E., Advani, S.M., Ahmad, S., Alahdab, F., Alipour, V., Aljunid, S.M., Amini, S., et al., (2021). Global, regional, and national burden of respiratory tract cancers and associated risk factors from 1990 to 2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *Lancet Respir. Med.* 9, 1030–1049. [https://doi.org/10.1016/S2213-2600\(21\)00164-8](https://doi.org/10.1016/S2213-2600(21)00164-8).

<https://www.ohchr.org/en/press-releases/2019/03/air-pollution-silent-killer-claims-7-million-lives-each-year>

CCAC SNAP, Guidance for national planning to reduce short-lived climate pollutants. Climate and Clean Air Coalition Supporting National Action & Planning on Short-Lived Climate Pollutant Mitigation Initiative report. (<https://www.ccacoalition.org/resources/guidance-document-national-planning-reducing-short-lived-climate-pollutants-snap>), (2018)

T. Arfin, A.M. Pillai, N. Mathew, et al., *Environ. Sci. Pollut. Res.* 30 (2023). 125347–125369, <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29652-w>.

E. Tagaris, et al. The potential impact of climate change on air pollution-related human health effects *Environmental Science & Technology*, 43 (13) (2009), pp. 4979-4988.

Great Smog of London YR Rodriguez, Arizona Department of Environmental Quality, Phoenix, AZ, USA 2014 Elsevier.

Hordijk, L., (1991). Use of the RAINS model in acid rain negotiations in Europe. *Environmental Science & Technology* 25, 596–603.

Gough, C., Castells, N., Funtowicz, S., (1998). Integrated assessment: an emerging methodology for complex issues. *Environmental Modelling and Assessment* 3, 19–29.

Tuinstra, W., Hordijk, L., Amann, M., (1999). Using computer models in international negotiations/the case of acidification in Europe. *Environment* 41, 33–42.

Castells, N., Ravetz, J., (2001). Science and policy in international environmental agreements: lessons from the European experience on transboundary air pollution. *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics* 1, 405–425.

Eckley, N., (2001). Designing effective assessments: the role of participation, science and governance, and focus. *Environmental Issue Report* 26, EEA Copenhagen.

Sundqvist, G., Letell, M., Lidskog, R., (2002). Science and policy in air pollution abatement strategies. *Environmental Science & Policy* 5, 147–156.

Lidskog, R., Sundqvist, G., (2004). From consensus to credibility: policy relevant science in late modernity, innovation: the European. *Journal of Social Science Research* 17, 205–226.

Farrell, A.E., VanDeveer, S.D., Jager, J., (2001). Environmental assessments: four underappreciated elements of design. *Global Environmental Change* 11, 311–333.

Grünfeld, H., (1999). Creating Favourable Conditions for International Environmental Change Through Knowledge and Negotiation. Lessons from the Rhine Action Program and the Second Sulphur Protocol, Implications for Climate Change. Delft University Press, The Netherlands.

Backstrand, K., (2001). What can nature withstand? Science, politics and discourses in transboundary air pollution diplomacy. *Lund Political Studies* 116, Department of Political Science, Lund University.

Farrell, A.E., Keating, T.J., (2005). Dissent and trust in multilateral assessments'. In: Farrell, A.E., Jaeger, J. (Eds.), *Assessments of Regional and Global Environmental Risks: Designing Processes for the Effective Use of Science in Decision Making*. RFF Press, Washington, DC.

VanDeveer, S., (2005). European politics with a scientific face. Framing, asymmetrical participation, and capacity in LRTAP. In: Farrell, A.E., Jaeger, J. (Eds.), *Assessments of Regional and Global Environmental Risks: Designing Processes for the Effective Use of Science in Decision making*. RFF Press, Washington, DC

Tuinstra, W. (2006). Moving boundaries in transboundary air pollution co-production of science and policy under the convention on long range transboundary air pollution *Global Environmental Change* 16 349–363.

Gürtepe, İ.Ç., Köksal, C.E. (2014). Ulusal hava kirleticileri emisyon envanteri. *Hava Kirliliği Araştırmaları Dergisi*, 3: 22-28.

- H. Özdemir, İ. Gürtepe. (2021). Noktasal Kaynaklar İçin Ulusal Hava Kirliliği Emisyon Faktörleri ve Envanterinin Belirlenmesi: Metal Sektörü İçin Örnek Bir Çalışma, *Adv. Eng. Pure Sci.* 33(3): 337-346 <https://doi.org/10.7240/jeps.537152>
- Zhang, A., (2022). *Sustainable Cities and Society* 78. 103649 Exploring the effects of 3D urban form on urban air quality: Evidence from fifteen megacities in China
- UNEP Integrated Assessment of Black Carbon and Tropospheric Ozone
- İstanbul Teknik Üniversitesi-Hava Emisyon Yönetim Portalının Geliştirilmesi Proje Sonuç Raporu, 2021
- TÜRKSAT- 3 Boyutlu Ortamda Hava Kalitesinin Tespiti Projesi Sonuç Raporu, 2021
- Zhang, J. (2024). *Building and Environment* 248. 111032, Comparing multiple machine learning models to investigate the relationship between urban morphology and PM2.5 based on mobile monitoring,
- Huang, C. (2022). *Building and Environment* 219. 109173 Effect of urban morphology on air pollution distribution in high-density urban blocks based on mobile monitoring and machine learning.
- NEFES, 2021 <https://www.aa.com.tr/tr/gundem/hava-kirliliginin-seviyesi-25-ilde-yerli-ve-milli-3-boyutlu-yazilim-nefesle-olculuyor/2447822>
- Harris, M. J. (2005). Fast fluid dynamics simulation on the GPU. *SIGGRAPH Courses*, 220(10.1145), 1198555-1198790.
- IIR, (2021). https://webdosya.csb.gov.tr/db/cygm/menu/turkey-s-irr-2021_tr_20211101034946.pdf