



Derleme Makalesi

Megaşehirlerde Hava Kalitesi ve İstanbul Örneği

Selahattin İNCECİK¹✉, Ulaş İM²

¹İstanbul Teknik Üniversitesi, Meteoroloji Mühendisliği Bölümü, Maslak 34469 İstanbul

²Avrupa Komisyonu, Çevre ve Sürdürülebilirlik Enstitüsü, Hava ve İklim Birimi, Ispra, İtalya

Sunuluş tarihi: 27 Mayıs 2013, Kabul edilme tarihi: 5 Kasım 2013

ÖZET

Bu çalışmada hava kalitesi bakımından dünyanın en sorunlu dört megaşehrin (Beijing, Jakarta, Kahire ve Delhi) kirlenmiş atmosferi emisyon kaynakları, iklim, nüfus vb. özellikler bakımından incelenmiştir. Bunun yanı sıra Türkiye'nin megaşehri İstanbul'un tarihsel hava kirliliği geçmişi ve günümüzdeki durumu değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Megasehir, Hava Kalitesi, Beijing, Jakarta, Kahire, Delhi, İstanbul.

© Tüm yayın hakları Hava Kirlenmesi Araştırmaları ve Denetimi Türk Millî Komitesi'ne aittir.

1. Giriş

1.1. Avrupa ve Dünyada Hava Kalitesi

Avrupa Çevre Ajansının 2010 raporuna göre Avrupa'nın pek çok yerinde partikül madde (PM) ve ozonun (O₃) dış atmosfer değerleri için ciddi sorunlar devam etmekte, azot dioksit (NO₂) seviyeleri ise kritik değerleri taşımaktadır. Avrupa şehirlerinin üçte birinde PM konsantrasyonları AB sınırlarını aşmakta, şehir nüfusunun %21'i günlük hava kalitesi sınır değerlerinin (50 µg m⁻³) üzerindeki PM seviyelerine maruz kalmaktadır. PM günümüzde insan sağlığına zarar veren en önemli kirlenmelerden biridir. Zira PM solunum sistemlerinin en duyarlı bölgelerine nüfuz edebilmektedir. Partikül madde, PM₁₀ (çapı 10 µm'den küçük olan PM) ve PM_{2.5} (çapı 2.5 µm'den küçük olan PM) olarak ölçülmektedir. PM₁₀ kaynakları duman ve toz şeklinde sanayi tesislerinden; zirai emisyonlardan ve yollardan oluşmaktadır. Buna doğal olarak da polenler eklenebilir. PM_{2.5} ise uçucu organik bileşikler (VOC), ağır metaller, trafik ve orman yangınları ile bağlantılıdır. PM_{2.5} sağlık etkileri bakımından PM₁₀'a göre daha tehlikelidir. Partiküller küçüldükçe akciğerlere erişmesi daha kolay olmaktadır. Küçük çaplı partiküller kapalı ortamlara girebilmekte ve bu ortamlarda etkili olabilmektedir. Bu partiküller kalp ve solunum yollarında sorunlara yol açabilmekte ve ölüm oranlarında artışlara neden olabilmektedir. Dünyada PM_{2.5} kirliliği nedeniyle yılda 500 000 den fazla insanın yaşamını kaybettiği tahmin edilmektedir (Nel, 2005; Wang vd., 2013).

Hava kirliliği konsantrasyonları özellikle bazı Asya şehirlerinde Dünya Sağlık Örgütü'nün emniyet seviyelerini çok fazla

aşmaktadır. Kalkınma ve Ekonomik İşbirliği Örgütü (OECD) (2012) tarafından yapılan projeksiyona göre PM nedeniyle erken ölümler 2050 yılına kadar iki kattan fazla artarak yılda 3,6 milyona ulaşacaktır. Bu ölümlerin en çok yaşanacağı ülkeler ise Çin ve Hindistan'dır.

Ozon ise ikincil bir kirlenici olarak solunum yolları ile ilgili sağlık sorunlarına yol açabilmekte, tarım ürünlerine ve bitki örtüsüne de zarar vermektedir. Ozon, azot oksitler (NO_x), VOC, metan (CH₄) ve karbon monoksit (CO) gibi öncül kirlenicilerin belirli meteorolojik şartlar altındaki tepkimelelerinden oluşur. Avrupa'da şehir nüfusunun %97'si WHO 2011 kriterleri üzerinde ozon konsantrasyonuna maruz kalmaktadır. Bu nüfusun %17'si de AB sınır değerleri üzerinde ozon derişimleri ile karşı karşıyadır. NO₂ ise otrifikasyon ve asidifikasyonun önemli bir sonucu olarak biyoçeşitliliğe olumsuz etkide bulunmaktadır. NO₂ ayrıca PM ve ozon formasyonuna da katkı yapmaktadır. 2010 yılında Avrupa kıtasında yaşayanların %7'si AB sınır değerleri üzerinde NO₂ ile karşı karşıyadır. Avrupa Çevre Ajansı, otrifikasyon için kritik yük aşımalarının İsveç, güney İngiltere ve İrlanda başta olmak üzere kıta Avrupasının pek çok bölgesini kapsadığını ortaya koymaktadır. Bunun yanı sıra azot oksitlerin ulusal emisyon tavan değerleri pek çok Avrupa ülkesinde AB mevzuatı ile düzenlenen sınırları aşmaktadır.

Avrupa'da bunlar yaşanırken dünyanın diğer bölgelerinde dış hava kirliliği dünya nüfusunun büyük bir bölümünde önemli sağlık sorunlarına yol açmaktadır. Zira büyük şehirlerde ve sanayi bölgelerinde meydana gelen hava kirliliği hem çevre

✉Selahattin Incecik

Tel:(212) 285 31 43, Faks: (212) 285 31 29

E-posta: incecik@itu.edu.tr

hava kalitesinin bozulmasına hem de iklim değişimi üzerine etki yapmaktadır. Şehirlerde hava kalitesinin bozulması özellikle nüfusu 10 milyonu aşan ve mega şehir diye tanımlanan şehirlerin en önemli problemi haline gelmiştir (Butler vd., 2008; Butler ve Lawrence, 2009). Bu sorun gelişmiş ve gelişmekte olan megaşehirlerde farklı bir görünüm içerisindedir. Kalkınmakta olan ülkelerin megaşehirlerinde kırsal bölgelerden şehirlere olan göç bu şehirlerde oluşan yüksek emisyonları besleyen bir güç olmuştur (Mage vd., 1996). Bu şehirlerde artan araç sayısı, kullanılan eski teknoloji ve bakımsız araçların yol açtığı emisyonlar hava kalitesinin bozulmasında temel faktörlerdendir. Buna şehirlerde ısıtma mevsimindeki emisyonlar ve sanayi emisyonları eklendiğinde gelişmekte olan ülkelerin megaşehir emisyonlarının durumu ortaya çıkmaktadır.

Günümüzde şehirlerde yaşayan nüfus %50'yi aşmıştır. Oysa 1800'lü yıllarda şehirlerde yaşayan insanların oranı sadece %3 idi. The Principal Agglomerations of the World (2012)'e göre dünyada nüfusu 10 milyonu aşan 28 megaşehir bulunmaktadır (Şekil 1). İstanbul bu listede 20. sırada bulunmaktadır. Ancak dünyadaki 28 megaşehrin 20'sinde çevre hava kalitesi konsantrasyonları ciddi sağlık etkilerinin olduğu seviyeler olarak bildirilmektedir. Bunlar içerisinde özellikle Beijing, Kahire, Jakarta, Bangkok, Los Angeles, Meksico City, Moskova ve Sao Paulo çok ciddi hava kalitesi sorunları ile karşı karşıyadır (Incek ve İm, 2012). Nüfus, trafik ve sanayinin giderek büyümesi bu mega şehirlerde hava kalitesinin bozulmasına yol açan en önemli gelişmedir.

Asya şehirlerinde hava kirliliği ise son yıllarda ciddi bir şekilde artış göstermekte, insan sağlığına verdiği zararlar büyükmektedir. Clean Air Asia'ya göre 16 Asya ülkesinin 300 kadar şehrinde ölçülen özellikle partikül maddenin insan sağlığı bakımından anahtar kirlenici olduğu belirlenmiş, 284 şehirde PM seviyeleri Dünya Sağlık Örgütü'nün tavsiye ettiği sınırların üzerinde bulunmuştur. Bu sınırların altında kalan 16 şehrin Japonya'da bulunması da bir gerçektir. Bu şehirlerin %70'inin Çin, Hindistan ve Bangladeş'te yer aldığı görülmektedir. Son 20 yılda, gelişmekte olan bu Asya ülkelerinde şehirlerde yaşayan insan nüfus bir milyarı aşmıştır. Bu durum bu ülkelerde yaşanan hava kirliliğini arttıran bir gelişmedir. Dünya Sağlık Örgütü 2008'de yayımladığı çalışmasında dünya ölçeğinde dış ortam hava kirliliğinin her yıl 1,3 milyon prematüre ölüme yol açtığı ve bunun 800 000 kadarının Asya kıtasında meydana geldiğini göstermiştir (WHO, 2008).

Benzer şekilde OECD de ciddi önlemler alınmadığı takdirde 2050 yılına kadar hava kirliliğinin premature ölümlere yol açan en önemli çevre olayı olarak açıklanmıştır (OECD, 2012). Aynı rapor hava kalitesinde iyileştirme yapılmadığı takdirde 2050'li yıllarda tüm dünyada 3,6 milyon insanın bu erken ölümlere maruz kalacağını ve bunun en büyük kısmının da Çin ve Hindistan'da yaşanacağını açıklamıştır.

Amerikan Lung Association tarafından yayınlanan Air 2012 raporuna göre ABD'de hava kalitesi iyileştirilmesine rağmen yaklaşık 127 milyon insanın – ülke nüfusunun %41'i – hâlâ soluk aldıkları havada tehlikeli seviyelerde kirlenimler bulunmaktadır. Bu sağlıksız hava ABD'de milyonlarca insanın yaşamını tehdit etmektedir. Bu rapora göre ozon ve partikül kirliliği seviyeleri ABD şehirlerinde halk sağlığı için artan bir oranda tehlike oluştururken, özellikle partikül kirliliği hem kısa hem de uzun vadede ciddi sorunlar yaratmaktadır (ALA, 2012).

1.2. Amaç

Bu makalenin amacı nüfus yoğunluğu, sanayi, trafik ve doğal kirlenimler bakımından dünyanın hava kalitesi bakımından en sorunlu dört megaşehrinin (Beijing, Jakarta, Kahire ve Delhi) kirlenmiş atmosferini anlamak üzere bu şehirlerdeki emisyon kaynakları, iklim, nüfus vb. özellikler çerçevesinde incelemek ve bunun yanısıra Türkiye'nin megaşehri İstanbul'un tarihsel hava kirliliği geçmişini sunmak ve episod nitelikli olaylara yol açan spesifik meteorolojik şartları değerlendirmektir.

2. Dört Megaşehirden Hava Kirliliği

Bu bölümünde dünyanın hava kalitesi bakımından en sorunlu dört şehri olan Beijing, Kahire, Jakarta ve Delhi çeşitli yönleri ile incelenmiştir. Megaşehir İstanbul'da hava kalitesinin tarihsel geçmişi ve bugünü ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmiştir.

2.1. Beijing, Çin

Çin'in başkenti olan Beijing, 19 milyonun üzerinde nüfusa sahip olan uluslararası bir metropoldür. Şekil 1'de görüldüğü gibi Beijing üçgen şeklinde olan Kuzey Çin platosunun kuzeyinde yer alır. Şehrin kuzeyi, kuzeybatısı ve batısı dağlarla çevrilidir. Pek çok büyük şehirde olduğu gibi hava kirliliği Beijing'de yaşayanların en büyük sorunudur. Özellikle 1980'li yıllardan bu yana şehir, hızlı bir



Şekil 1. The Principal Agglomerations of the World (2012) tarafından belirlenen dünyadaki 28 megaşehir.

şekilde büyümektedir. 1980-2006 arasında meydana gelen nüfus artışının en büyük kısmını kırsal bölgelerden göç oluşturmuştur. 2004 yılında yapılan şehir planına göre Beijing dört bölgeye ayrılmıştır. Bunlar merkez şehir bölgesi, yakın yarı kırsal bölge, uzak yarı kırsal bölge ve ekolojik koruma alanlarını kapsayan bölgedir. Çin’de hızlı şehirleşme milyonlarca insanın yaşam kalitesini arttırır iken sosyal ve çevresel problemleri de beraberinde getirmektedir (İncecik and İm, 2012). Hızla artan nüfus, şehirleşme ve artan araç sayısı şehirdeki hava kirliliği emisyonlarının artışının en büyük sebebidir. Bu nedenle Beijing hava kalitesi ile ilgili ciddi sorunlar yaşamaktadır. Ayrıca Beijing şehri özellikle kuzeyindeki bölgelerden toz taşınımını yaşamaktadır. Toz taşınımı şehir üzerinde özellikle bazı meteorolojik durumların etkisi altında bir battaniye etkisi yapmaktadır.

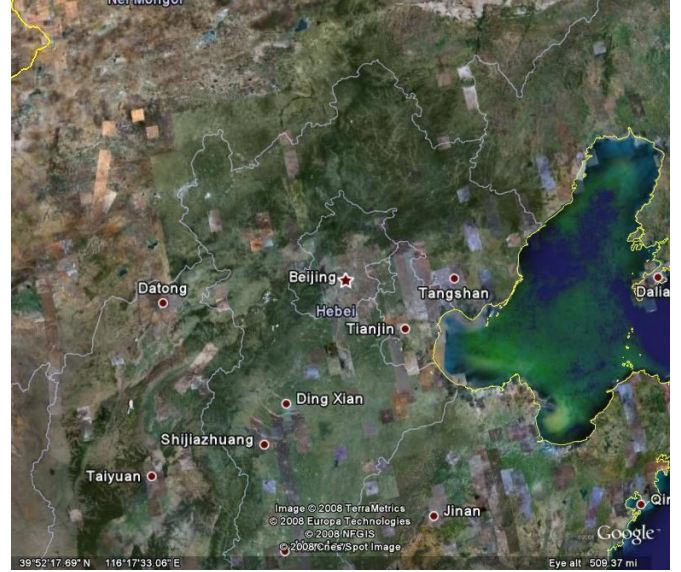
Beijing İklim Koşulları ve Emisyon Kaynakları

Beijing şehri ılıman iklim kuşağında yer almakta ve kısaca nemli karasal iklimi yaşamaktadır. Sıcak ve nemli yazlar ile soğuk ve kurak kış mevsimleri Beijing’in temel özelliğidir. Yıllık ortalama sıcaklık 11.7°C’dir. Beijing yılda ortalama 700 mm yağış alırken en fazla yağış Temmuz ve Ağustos aylarında meydana gelmektedir. Şehir, yılda toplam 2 670 saat güneş ışığı almaktadır.

Beijing’de en önemli hava kirliliği kaynakları kömür yakıtlı konut ısıtılması, trafik emisyonları ile sanayidir. Konutların ısıtılması genellikle Kasım ortalarında başlar Mart ayı sonuna kadar devam eder. Beijing çevresindeki kömür yakıtlı termik santraller ise şehirdeki SO₂’nin temel kaynağını oluşturmaktadır (Hao vd., 2005; Wang vd., 2005; Chan ve Yao, 2008; He vd., 2001). Sanayi ise daha çok Beijing şehrinin batısında bulunmaktadır. Örneğin Shijingshan bölgesinden yayılan emisyonların Beijing partikül konsantrasyonlarının en önemli kaynağını oluşturduğu söylenebilir. Mevsimsel toz fırtınaları genellikle kuzey ve kuzeybatı Çin’de hakimiyet gösterir ve şehirleri adeta kaplar. Bunun yanısıra motorlu araçlar ve yollarındaki toz da şehirdeki partikül konsantrasyonuna katkı yapmaktadır (Song vd., 2006). Şehirde araç sayısı hızlı bir artış göstererek beş milyona yaklaşmıştır.

Beijing’de Hava Kalitesi

Beijing’deki hava kirliliği insan sağlığına ciddi zararlar verecek seviyelerdedir. Metropolde yaşayan insanlar PM, CO, SO₂ ve VOC’lerin yüksek konsantrasyonlarına maruz kalmaktadır. Bu maddeler Beijing’de özellikle solunum problemlerinin, astım ve allerjik rahatsızların çokça yaşanmasına sebep olmaktadır. Beijing’de kirlilik seviyeleri ısınma mevsimlerinde (Kasım-Mart) belirgin bir şekilde daha yüksektir. Kalkınmakta olan megaşehirlerde hava kirliliği seviyelerine ait zaman serileri istatistiksel analiz yapmaya çoğu zaman yeterli uzunlukta bulunmamaktadır. Bu nedenle Beijing şehrine ait hava kalitesine ait yeterli uzunlukta zaman serileri bulunmamaktadır. Örneğin Beijing’de 1980’li yıllardan itibaren hava kalitesi değerleri kullanılabilir. Çin hava kalitesi standart-



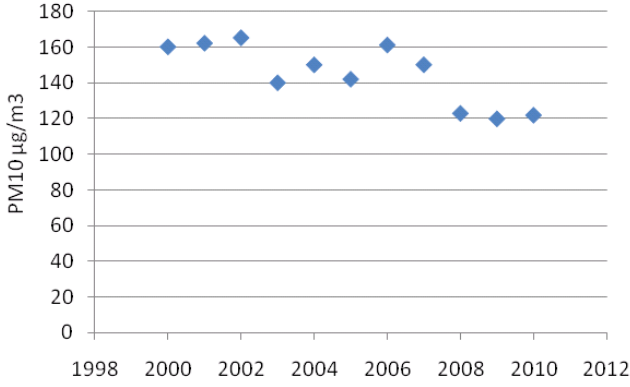
Şekil 2. Beijing ve çevresi

ları üç ayrı sınıf için limitler düzenlemiştir. Sınıf I, II ve III şeklindeki hava kalitesi limitleri bölgenin fiziksel karakteristiklerine bağlı olarak değişmektedir. Örneğin doğal koruma alanları, özel sanayi alanları gibi tanımlara göre yapılmıştır. Beijing ise Sınıf II alanına karşı gelmektedir. Sınıf II, yerleşim alanı, ticari ve yerleşim, kültürel alan, sanayi ve kırsal alana karşı gelmektedir (İncecik ve İm, 2012).

Şekil 3, Beijing’de yerleşim bölgelerinde PM₁₀ konsantrasyonlarının yıllık ortalama değişimi son yıllarda azalma gösterse dahi WHO limitlerinin (20 µg m⁻³) çok üzerinde olduğunu göstermektedir. Beijing’de hava kirliliği kontrol ölçülerinin yürürlüğe girmesi ve kirlilik kaynaklarındaki değişim arasındaki girişim hava kalitesinin değişimine sebep olan temel faktördür (Zhang vd., 2011).

Bunun yanısıra, Beijing ilkbahar aylarında toz taşınımı nedeniyle de yüksek PM₁₀ seviyelerini yaşamaktadır. Zhu vd. (2011) toz taşınımına yol açan fırtınaların 7 m s⁻¹lik şiddette olabildiği ve bu taşınmanın Beijing’in 1 000-2 000 km kuzeybatısında yer alan toz kaynaklarından meydana geldiğini göstermiştir. Bu toz, Beijing’e üç gün içerisinde ulaşmaktadır.

Çin’de 1990 sonlarından itibaren hava kalitesini iyileştirmek üzere pek çok çalışma yapıldı. Ancak ekonomik büyüme ve ulaşım sisteminin genişlemesi ile son yıllarda hava kalitesini iyileştirmek için sağlanan kazanımların pek çoğu kaybolmuştur. Beijing şehri de bu durumdan fazlaca etkilenmiştir. Özellikle 2008 Olimpiyat oyunları için yerel emisyonların azaltılmasında sert tedbirler alınmasına ve yeni kontrol ölçüleri yürürlüğe konulmasına rağmen şehirde hava kalitesi özellikle PM seviyeleri WHO limitlerinin çok üzerindedir. Bu duruma yol açan en önemli özellik de toz taşınımından şehirdeki PM seviyelerinin çok fazla etkilenmesidir.



Şekil 3. Beijing'de PM₁₀ konsantrasyonlarının 2000-2010 arasında yıllık ortalama değişimi (Incecik ve İm, 2012)

2.2. Jakarta (Jabodetabek), Endonezya

Dünyanın 4. en kalabalık ülkesi olan Endonezya'nın başkenti Jakarta, Java adasında yer almaktadır. Jakarta, Bogor, Depok, Tangerang ve Bekasi ile birlikte Jabodetabek büyük metropolü 28 milyonu aşan nüfusu ile dünyanın ikinci megaşehridir. Hava kirliliği Jakarta şehrinin en önemli çevre sorunlarından biridir. Her yıl %2 oranında artan nüfus ve beraberindeki insan aktiviteleri, ulaşım ve sanayiden kaynaklanan kontrolsüz emisyonlar Jakarta'da hava kalitesinin çok ciddi şekilde bozulmasına yol açmıştır. Şehir halen dünyanın en kirli havasına sahip şehirlerinden biridir.

Jakarta İklim Koşulları ve Emisyon Kaynakları

Jakarta tropikal muson ve savanalar sınırında sıcak ve nemli iklime sahiptir. Ekvatora çok yakın bir bölgede olmasına rağmen kurak ve nemli mevsimleriyle ayrılmaktadır. Yağışlı mevsim Kasım ayından Hazirana kadar sürerken kalan dört ayda kurak mevsim şartları hakimdir. Yılda ortalama 3 000 saat güneş ışığı almaktadır. Yıllık ortalama sıcaklık 33°C olup yıllık toplam yağış 1 700 mm'yi bulmaktadır.

Jakarta'da hava kirliliğine sebep olan önemli emisyon kaynakları sanayi ve motorlu araçlardır. Şehirde motorlu araç sayısı beş milyonun üzerindedir (Şekil 4). Şehrin doğusunda başta tekstil ve kimya olmak üzere 2 500 civarında sanayi tesisi yer almaktadır. Bunun yanı sıra, Endonezya'da son derece yüksek kükürlü yakıtlar kullanılmaktadır.

Jakarta'da Hava Kalitesi

Jakarta'da hava kalitesinin iyileştirilmesi konusunda alınan bir dizi önleme rağmen yılda sadece 27 gün temiz hava solunabilmektedir. Jakarta Environmental Management Agency (2012)'ye göre yıllık PM₁₀ ve NO₂ seviyeleri Şekil 5'te gösterilmiştir. Buna göre PM₁₀ seviyeleri yıllık 20 µg m⁻³ olan WHO limitlerinin çok üzerinde bulunurken NO₂ seviyeleri ise yıllık 40 µg m⁻³ olan WHO limitlerin altında kalmaktadır. PM₁₀ seviyelerinin en büyük kaynağı %70 ile sanayi olurken %21 ile de trafiktir.



Şekil 4. Jakarta'da trafik

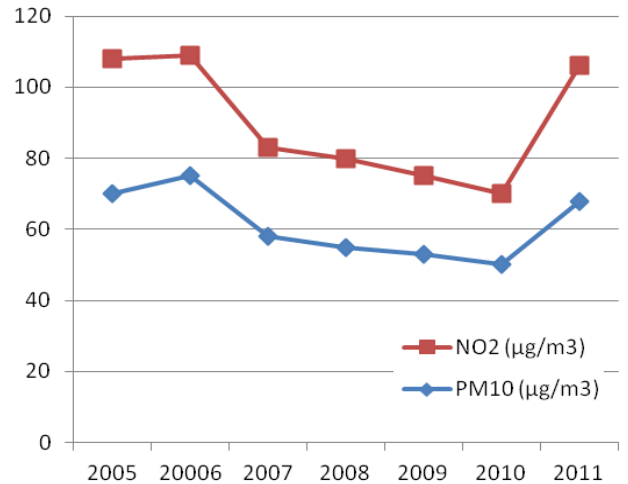
Jakarta'nın hava kalitesini yükseltmek üzere yürürlüğe konulan en önemli uygulama "Clean Air Project Phase IV" projesidir. Bu projenin ana fikri motorlu araçlardan yayılan emisyonları azaltmak üzere bir ulusal eylem planı çerçevesinde yasal düzenlemeler getirmektir. Bu stratejiler arasında temiz hava için kampanyalar düzenlenmesi, hava kalitesi izleme ağının oluşturulması, araçlarda bakım uygulamasının geliştirilmesi, emisyon testlerinin yaygınlaştırılması ve eğitim çalışmaları yer almaktadır.

2.3. Kahire, Mısır

Kahire, Mısır'ın başkenti ve Afrika'nın en büyük şehridir. Kuzey Mısır'da ve Nil deltasında yer alan 17 milyon nüfusu ile Kahire dünyanın hava kalitesi bakımından en sorunlu şehirlerinden biridir (Gurjar vd., 2008). Mısır nüfusunun üçte biri Kahire'de yaşamaktadır. Mısır sanayisinin de %60'ı Kahire'de bulunmaktadır.

İklim Koşulları ve Emisyon Kaynakları

Kahire'de iklim sıcak ve kurak çöl iklimi ile tanımlanır. Bununla beraber Nil nehri vadisi boyunca yüksek nemli bir bölge oluşur. Yıllık ortalama sıcaklık 27,8°C iken yılda toplam 25 mm yağış almaktadır. Kahire yılda toplam 3 400 saat güneş ışığı almaktadır.



Şekil 5. Jakarta'da yıllık ortalama PM₁₀ ve NO₂ konsantrasyonlarının 2005-2011 periyodu esnasında değişimi

Kahire’de sanayi ve motorlu araçlar en etkili emisyon kaynaklarıdır. Bu emisyonlar başta PM₁₀ olmak üzere SO₂, CO ve NO₂’nin yüksek seviyede konsantrasyonlarının meydana gelmesine sebep olmaktadır. Kahire’de ulaşım ve sanayi en önemli PM kaynakları olur iken şehirde katı atık yakılması da partiküler madde seviyeleri üzerinde önemli şekilde etkili olmaktadır (Kanakidou vd., 2011). Şehirdeki SO₂’nin en önemli kaynağı ise sanayidir. İlkbahar mevsiminde (Mart ve Nisan aylarında) şiddetli rüzgarlarla Sahara’dan taşınan toz şehir üzerinde etkili olmaktadır. Kışın ise rüzgarın son derece düşük şiddetlerde bulunması şehir üzerinde dispersiyon gücünü zayıflatmaktadır. Safar ve Labib (2010) bu durumu şehirdeki yüksek PM₁₀ seviyelerinin sebeplerinden biri olarak açıklamıştır. Bunun yanı sıra Kahire’de özellikle sonbahar mevsimlerinde Molina ve Molina (2004) tarafından açıklanan ve Nil deltasının kırsal bölgelerini ve Kahire’yi kaplayan “kara bulut” olayı şehirde sanayi ve trafik emisyonlarına ek olarak çiftçiler tarafından pirinç hasadı sonrasında yakılan zirai atıklar nedeniyle meydana gelmektedir. Prasat vd. (2010) Batı Sahara’dan Nil deltasına taşınan tozun “kara bulut” olayı ile birlikte bölgesel iklim üzerinde de etkiler oluşturması beklemektedir.

Kahire’de Hava Kalitesi

Kahire hava kalitesi bakımından dünyanın en sorunlu şehirlerinden biridir (İncecik ve İm, 2012). WHO (2010) tarafından yayınlanan Mısır raporunda Kahire’de her yıl en az 6 000 erken ölümün meydana geldiği, her yıl en az 5 000 kanser vakasının ilave olduğu belirtilmektedir. Yapılan çeşitli araştırmaların ortak sonucu PM₁₀ konsantrasyon seviyelerinin Kahire’de en kritik hava kirlenici olmasıdır (Zakey ve Omran, 1997; Abu-Allaban vd., 2007; Zakey vd., 2008; Safar ve Labib, 2010). Kahire şehir atmosferine motorlu araçların yanısıra Shoubra Kheima sanayi bölgesinden yayılan kurşunun yüksek seviyelerdeki değerleri de şehirde önemli sağlık riskleri oluşturmaktadır (yıllık ortalama kurşun seviyeleri 25-26 µg m⁻³). Son yıllarda sanayide alınan tedbirler kurşun seviyelerinin azalmasını sağlamıştır.

Kahire’de hava kalitesini iyileştirmek üzere son yıllarda hükümet tarafından gerek sanayide ve gerekse trafikte yeni stratejilerin yaşama geçmesi sağlanmıştır (Cairo Air Improvement Project, 2004). Doğal gaz kullanımının sanayi ve konutlarda yaygınlaşmasında önemli ilerlemeler elde edilmiştir. Ulaşımında ise metro ağının yaygınlaştırılması, toplu taşımanın teşvik edilmesi, açıkta yakmanın yasaklanması, katı atık yönetiminin etkinleştirilmesi çabaları artmaktadır.

3.3. Delhi, Hindistan

Delhi, Hindistan’ın ikinci büyük metropolüdür. Delhi, Yeni Delhi ve Hindistan’ın başkenti civarında yer alan yerleşim alanlarını içine alan bölgeye verilen isimdir. Delhi 23 milyon nüfusu ile dünyanın dördüncü büyük megaşehridir (İncecik ve İm, 2012).

Delhi İklim Koşulları ve Emisyon Kaynakları

Delhi’de iklim muson etkisinde çok sıcak yazları ve soğuk kışları olan nemli subtropikal iklimdir. Delhi’de kış mevsimi kuraktır ve bu mevsimde yüzey enversiyonları nedeniyle yoğun sis olayları yaşanır. Bu durum hava kirliliği episodların yaşanmasına yol açar. Muson mevsimi ise Haziran sonunda başlar Eylül ortasına kadar sürer. Yazın ayrıca kuvvetli batılı rüzgarlarla Thar çölünden toz taşınımı şehirde etkili olur. Muson mevsimi ise PM₁₀ bakımından en az kirliliğin yaşandığı mevsimdir.

Delhi’de en önemli hava kirliliği kaynakları motorlu araçlar ve sanayidir. Şehirdeki toplam kirlilik yüküne motorlu araçların katkısı %67 iken sanayiden ve kömür yakıtlı güç santrallerinden gelen katkı %25 kadardır. Delhi’de bulunan üç adet güç santrali günde 6 000 Mton uçucu kül yaymaktadır. Delhi’de motorlu araç sayısı her yıl %10 oranında artmaktadır (Şekil 6). 2012 sonu itibarıyla toplam motorlu araç sayısı 11 milyonu aşmıştır. Ancak bu sayının dörtte birini otomobiller oluşturmaktadır.

Delhi’de Hava Kalitesi

Delhi halen dünyanın en kirli dördüncü megaşehridir. Delhi’de PM₁₀ konsantrasyon seviyeleri Asya ülkeleri arasında en yüksek seviyededir (Mahmoud vd., 2008). Şekil 7, Delhi yerleşim bölgelerinde Respirable Suspended Particulate Matter (RSPM) ya da PM₁₀, SO₂ ve NO₂ konsantrasyonlarının yıllık ortalama değerlerinin 2001-2008 arasındaki değişimini göstermektedir. PM konsantrasyon seviyeleri WHO emniyet limitlerinin çok üzerindedir. 2008 yılında PM₁₀ seviyesi WHO limitlerinin dokuz kat üstündedir. Delhi’de yıllık ortalama RSPM ve NO₂ konsantrasyonu artarken SO₂ değerleri azalmaktadır. Güç santrallerinde düşük kükürlü yakıt kullanımı bu azalmanın sebebidir. Şehirde konut ve iş yerlerinde yakıt değişimine gidilmiş, araçlarda ise sıkıştırılmış doğal gaz ve LPG kullanımına geçilmiştir.

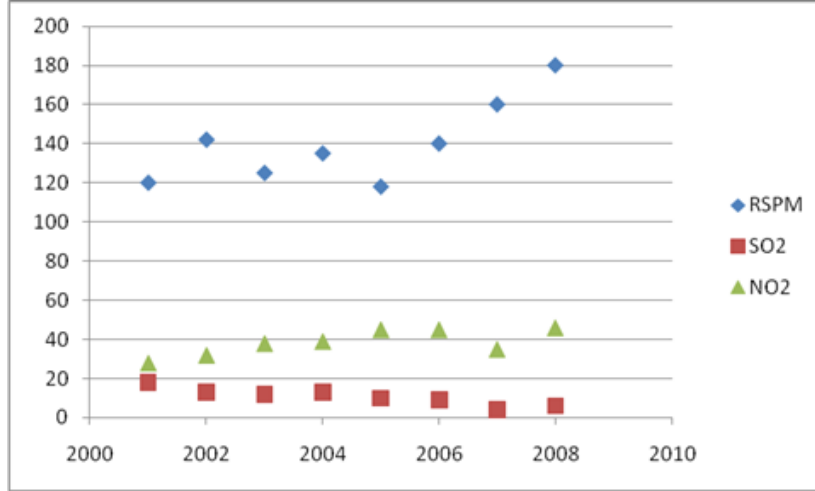
2.4. Megaşehir İstanbul

Giriş

İstanbul, 13,2 milyon nüfusu ile Avrupa’nın ikinci en büyük megaşehri olup dünyanın tarihsel ve kültürel anlamda en önemli şehirlerinden biridir. Şehir 5 343 km²



Şekil 6. Delhi’de trafik



Şekil 7. Delhi şehri yerleşim bölgesinde ölçülen RSPM, SO₂ ve NO₂ konsantrasyonlarının (µg/m³) yıllık ortalama değerlerinin 2001-2008 yılları arasında değişimi (Incecik ve Im, 2012).

bir yüzey alanına sahip olup 39 ilçeden oluşmaktadır. İstanbul, Türkiye'nin endüstri, ekonomi ve finans merkezi olarak kabul edilmekte olup Türk ticaretinin %55'ini ve milli üretiminin %27,5'ünü gerçekleştirmektedir. Yakın geçmişinde 2000 yıldan beri barındırdığı önemli politik, dini, kültürel ve sanatsal birikimden dolayı UNESCO Dünya Mirasları listesine eklenmiştir.

İstanbul'da hava kirliliği 1980'lerden itibaren günümüze Türkiye'nin en önemli çevre sorunlarının biri olagelmıştır. Şehir 1980 sonlarından itibaren, yoğunlukla evsel ısınma ve endüstriyel yanma amaçlı olarak kullanılan fosil yakıtlardan kaynaklanan önemli PM ve SO₂ episodlarına maruz kalmıştır. Bunlardan en önemlisi 1993 Ocak ayında şehrin Avrupa yakasında yaşanmış ve şehirde acil durum ilan edilmesine, okulların kapanmasına sebep olmuştur. Fosil yakıtların kalitesinin kontrol altına alınması ve doğalgaza geçiş ile birincil PM ve SO₂ seviyelerinde önemli düşüş yaşanırken ikincil PM ve NO_x seviyelerinde artış olmuştur.

Topografya ve İklim

İstanbul (41°K, 29°D) Türkiye'nin kuzey batısında bulunmakta olup İstanbul Boğazı ile Asya ve Avrupa kıtaları üzerinde ikiye bölünmüştür. İstanbul Boğazı Karadeniz ve Marmara denizlerini birbirine bağlamaktadır. Şehir ayrıca kuzeybatısında doğal bir halice ev sahipliği yapmaktadır. Şehrin Avrupa kısmında bulunan tarihi yarımada yedi tepe üzerinde kurulmuş olup etrafı tarihi duvarlarla çevrilmiştir. Şehrin en yüksek noktaları Asya tarafında bulunan Aydos (537 m), Yakacık (420 m) ve Çamlıca (288 m) tepeleridir. İstanbul'un şehrsel kısmı, özellikle 1980'lerden itibaren kırsal kesimlere doğru sürekli olarak genişlemiştir (Tayanç vd., 2009).

İstanbul Akdeniz iklimine sahip olup dört mevsimi de yaşayan bir şehirdir. Yaz ayları (Haziran-Ağustos) kuru ve sıcak geçenken kış ayları (Aralık-Şubat) yumuşak ve yağışlıdır. Ortalama en düşük sıcaklıklar 6,5°C ile Ocak ayında, en yüksek sıcaklıklar ise 22,7°C ile Temmuz ayında göz-

lemlemektedir. Ortalama olarak yılda çoğunluğu kışın olmak üzere 124 yağışlı gün bulunmaktadır. İstanbul'da gözlemlenen aylık nem miktarı %75 olup kış aylarında çoğunlukla bu değer genellikle %80'in üzerindedir. Ortalama yıllık güneşlenme süresi 2 460 saat olup yazın ortalama aydınlatma miktarı 21 MJ m⁻² olarak ölçülmektedir. Rüzgarlar kışın ağırlıklı olarak kuzeybatılı (Karayel) ve güneybatılı (Lodos), yazın ise, özellikle "Etesian" sistemi güçlendiğinde, kuzeyli (Poyraz) olarak, orta şiddette esmektedir (Ünal vd., 2000).

Emisyon Kaynakları

İstanbul'da emisyon kaynakları zaman ile önemli ölçüde değişmiştir. Yirmi yıl önce antropojenik emisyonlar çoğunlukla evsel ısınma ve endüstriyel kaynaklarca üretilirken günümüzde en önemli antropojenik kaynaklar endüstriyel kaynakların yanı sıra araç trafiği ve trafik sonucu tekrar havalanan çökmüş tozlar olmuştur (Koçak vd., 2011). 1980'li yıllarda başlayan kırsaldan şehre göç sebebiyle şehrsel nüfusta önemli bir artış olmuş, bu da beraberinde enerji ihtiyacı, ulaşım ve üretim alanlarında hızlı bir büyümeye sebep olmuştur (Atımtay ve İncecik, 2004).

1970'lerdeki enerji krizi petrol fiyatlarında ciddi bir artışa neden olmuş, bu da özellikle evsel ısınmada kömüre yönelmeye sebep olmuştur. Kullanılan Türk linyit kömürünün düşük kalorifik değere ve yüksek sülfür ve kül içeriğine sahip olması beraberinde verimsiz yanma prosesi ve yüksek miktarda emisyon üretimine ve dolayısıyla hava kalitesinin ciddi bir şekilde bozulmasına neden olmuştur. 1983 yılında yürürlüğe giren ilk Çevre Yasası ve 1986 yılında yürürlüğe giren ilk Hava Kirliliğini Kontrol Yönetmeliği ile düşük kaliteli kömür kullanımına kısıtlamalar getirilmiştir. Ocak 1992 yılında İstanbul Gaz Dağıtım Anonim Şirketinin doğalgaz dağıtımına başlaması ile birincil gaz ve partikül emisyonları aşağıya çekilmeye başlamıştır (Atımtay ve İncecik, 2004). Günümüzde evsel ısınma ve endüstriyel proseslerde %95 oranında ısınma ve doğalgaz kullanılmaktadır.

Tablo 1. IBB (2009) yıllık toplam emisyon değerleri

Kaynak (ton/yıl)	CO	NO _x	SO ₂	VOC	PM ₁₀
Evsel Isınma	123 510	7 014	10 983	18 451	13 531
Endüstri	1 714	9 394	58 458	117	7 630
Trafik	270 000	158 000	1 016	38 500	5 200
Toplam	395 224	174 408	70 457	57 068	26 361

1980'lerde 0,3 milyon civarında olan kayıtlı araç sayısı 2010 rakamlarına göre üç milyona yaklaşmış durumdadır. Şehrin büyümesi cadde ve otoyolların da artması ve uzamasına sebep olmuştur. Trafikteki bu büyüme araç emisyonlarını eskisine göre çok daha yüksek seviyelere çekmiş ve CO ve NO_x gibi kirleticiler açısından en önemli emisyon kaynağı haline getirmiştir. İstanbul'da yolcu araçlarının %60'ı benzinli, %40'ı ise dizel motorlu iken otobüs ve kamyon gibi ağır vasıtalarda dizel motor oranı çok daha yüksek olmakta ve araç emisyonlarının yüksek seviyelere ulaşmasına yol açmaktadır. Avrupa ve Asya'yı birbirine bağlayan iki köprüdeki araç miktarı 2001 yılından bu yana %25 artış göstermiş ve beraberinde köprü ve köprülere bağlanan ana arterlerde önemli trafik artışları ve bu bölgelerde emisyon alanları meydana gelmiştir. Günümüzde trafik sorununa çözüm için alternatif yollar üzerinde çalışılmaktadır. Avrupa yakasındaki metro hatlarında ağ büyütme çalışmaları devam etmekte olup Asya yakasında da yeni metro hattı inşası sürmektedir. Bunun yanında Boğaziçi köprüsü üzerinde 2009 yılında Kadıköy'den Avcılar'a kadar uzanan 30 km'lik Metrobüs hattı hizmete açılmıştır. Son olarak da Avrupa ile Asya'yı Marmara denizi altından birbirine bağlayacak olan Marmaray raylı sisteminin inşası devam etmektedir. İstanbul iki adet uluslararası havalimanına da ev sahipliği yapmaktadır. Bunlardan Avrupa yakasında kurulu olan Atatürk Havalimanı dünyanın en yoğun 34. havalimanı olup yıllık 32,1 milyon yolcu kapasitesine sahiptir. Anadolu yakasında bulunan Sabiha Gökçen Havalimanı ise daha küçük ölçekli olmakla beraber önemli miktarda iç hat uçuşuna ev sahipliği yapmaktadır. Bu havalimanları da hem yer emisyonları, hem uçak emisyonları, hem de bu alanlara olan yolcu trafiği açısından önemli emisyon alanları oluşturmaktadır.

Envanter Çalışmaları

İstanbul'da yıllar içinde sektörel bazda birçok emisyon envanteri hazırlanmıştır. Ancak bu envanterler sadece endüstri, evsel ısınma gibi belli başlı kaynakların yıllık toplam emisyon miktarları hakkında bilgi vermiştir. Bununla birlikte son 10 yılda daha kapsamlı ve amaçlı envanterler hazırlanmaya başlanmıştır. Bunlardan ilki 2005 yılında İstanbul Çevre Koruma Genel Sekreterliği ve EMBARQ tarafından ortak yürütülen ve İstanbul'daki araç emisyonlarının azaltılmasını hedefleyen bir proje kapsamında oluşturulmuştur. Genelde kullanılan hazır emisyon faktörleri üretmek yerine İstanbul trafik ve araç çeşitliliğini temsil edecek şekilde emisyonlar ölçülmüş ve ilk defa şehrin gerçek trafik emisyon yapısı ortaya çıkarılmıştır. Üretilen bu araç emisyonları daha sonra kaynak ve amaç

açısından daha kapsamlı envanterlerin üretilmesinde temel oluşturmuştur.

Bu envanterlerden ilki Avrupa Birliği (AB) Life Programı kapsamında İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB) tarafından üretilen İstanbul Hava Kalitesi Stratejik Raporu (İBB, 2009) kapsamında ve Dokuz Eylül Üniversitesi ile birlikte gerçekleştirilen ve endüstriyel yanma, evsel ısınma ve trafik kaynaklarını içeren envanterdir (İBB, 2009; Elbir vd., 2010). Bu envanter 1 km alansal ve 1 saatlik zamansal çözünürlükte hazırlanmış olup NO_x, CO, SO₂, VOC ve PM₁₀ kirleticilerini içermektedir (Tablo 1). Diğer bir envanter çalışması ise yine bir AB projesi olan CityZen (Megacities: Zoom on the Environment) kapsamında gerçekleştirilmiştir (Markakis vd., 2012). Bu envanterde mümkün olan tüm emisyon kaynakları değerlendirilmiş ve 2 km alansal ve saatlik zamansal çözünürlükte toplam NO_x, CO, SO₂, VOC, amonyak (NH₃), PM₁₀ ve PM_{2,5} emisyonlarının yanında kimyasal olarak ayrıştırılmış VOC ve PM emisyonları hesaplanmıştır (Tablo 2). İki tabloda da görüldüğü gibi kullanılan veri setleri, emisyon faktörleri, kaynak sektörleri ve bunun gibi birçok sebepten dolayı envanterler farklı sonuçlar verebilmektedir. Bu çalışmalara göre araç trafik emisyonları CO ve NO_x kirleticileri için en önemli kaynaklardır. Trafik sektörü CO emisyonlarının %83-89'unu, NO_x emisyonlarının ise %68-79'unu oluşturmaktadır. Endüstriyel kaynaklar ve enerji sektörü en önemli SO₂ (%24-83) kaynağı olarak görülmektedir. İBB (2009) hesaplamalarına göre en önemli PM kaynağı %51 ile evsel ısınma iken Markakis vd. (2012)'ne göre %65 ile endüstriyel kaynaklardır. Markakis vd. (2012)'ne göre en önemli VOC kaynakları %45 ile araç trafiği, %30 ile çözücü kullanımı ve %20 ile atık arıtımdır. Gemi trafiği, SO₂ ve NO_x emisyonlarının %36 ve %10'unu oluşturmaktadır (Tablo 2). NH₃ emisyonları ise enerji sektörü ile tarımsal uygulamalar arasında yarı yarıya bölünmüştür (Tablo 2). Yine Tablo 2 göstermektedir ki, sağlık açısından daha fazla önem arz eden PM_{2,5} emisyonları, evsel ısınma, trafik, gemicilik gibi önemli kaynaklardan salınan toplam PM emisyonlarının çok büyük kısmını oluşturmaktadır.

Markakis vd. (2012) verilerinden yola çıkılarak yapılan İm vd. (2010) model çalışması göstermektedir ki, İstanbul'da ölçülen kış PM seviyelerinin neredeyse tümü lokal emisyonlardan kaynaklanmaktadır. Koçak vd. (2011) de bu bulguyu Theodosi vd. (2010) tarafından yapılan İstanbul PM kimyasal kompozisyonu verisine yörunge analizleri ile istatistik modelleme (PMF: Positive Matrix Factorization) uygulayarak desteklemiştir.

İstanbul'da Hava Kalitesi

Ölçüm Ağı. İstanbul'daki ilk ölçüm ağı günlük ortalama SO₂ ve askıda partikül madde (TSP) ölçümleri için 1985 yılında Hıfzıssıhha Enstitüsü tarafından kurulan yedi istasyonluk bir ağıdır. 1989 ortalarında 10 istasyon daha ölçüm ağına katılmıştır. 1998 yılında ise İBB ayrı saatlik ölçüm yapan bir ölçüm ağı kurmuştur. Bu 10 istasyonluk ölçüm ağı şehrsel, ticari ve endüstriyel bölgelere yerleştirilmiş olup ilk olarak PM₁₀ ve SO₂ ölçümleri yapılmaya başlanmıştır. Daha sonra dört istasyona CO ve NO_x analizörleri eklenmiş, 1999-2005 yılları arasında ise iki istasyona O₃ analizörleri eklenmiştir. Günümüzde ise bu ağı AB SIPA projesi kapsamında 36 adet şehrsel, yarı-şehrsel ve kırsal ölçüm istasyonu eklenme çalışmaları sürdürülmektedir.

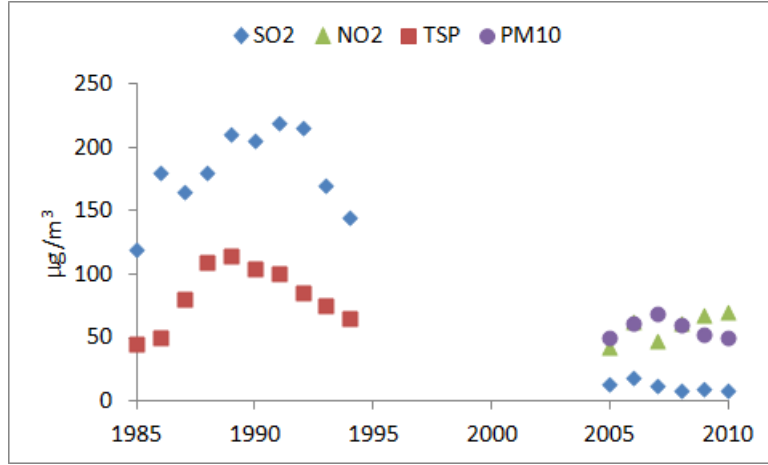
Sürekli olan bu ölçüm ağı dışında, belli dönemlerde akademik çalışmalar kapsamında ölçüm yapan geçici istasyonlar da kurulmuştur. Örneğin COST 728 Aksiyonu çerçevesinde gerçekleştirilen bir TÜBİTAK projesi ile (İncecik vd., 2010) 2007-2010 yılları arasında Anadolu yakasında bir istasyon Göztepe'ye (şehrsel/trafik), bir istasyon Kandilli'ye (yarı-şehrsel) ve bir istasyon da Büyükkada'ya (kırsal) O₃ ve NO_x ölçmek üzere kurulmuştur (İm vd., 2013). Büyükkada istasyonu proje bitiminde İBB'ye devredilmiştir. Bunun dışında CityZen projesi kapsamında Boğaziçi Üniversitesi'nde 2007-2009 yılları arasında PM₁₀ (Theodosi vd., 2010), 2008-2010 yılları arasında ise İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) Maslak yerleşkesine PM₁₀ ve PM_{2,5} kimyasal kompozisyon örneklem sistemleri kurulmuştur. Son olarak da bir TÜBİTAK projesi kapsamında 2009-2012 yılları arasında Kağıthane vadisine NO_x, SO₂, CO, O₃, PM₁₀ ölçüm istasyonu kurulmuştur (Deniz vd, 2012). Daha sonra bu sisteme VOC ölçüm cihazı da eklenmiştir (Toros vd, 2013).

Hava Kalitesi Seviyeleri. İstanbul'da yapılan ilk ölçümler şehirdeki SO₂ ve TSP seviyelerinin (Şekil 1) ulusal ve uluslararası limit değerlerin çok üstünde olduğunu ortaya koymuştur (İncecik, 1996; Tayanç, 2000; Topçu vd., 2001). İncecik (1996) özellikle kış aylarında gözlenen bu yüksek kirlenici seviyelerinin düşük kaliteli kömür kullanımına bağlı olarak salınan yüksek kirlenici emisyonların, yüksek basınç ve düşük yüzey rüzgar hızları sebebiyle şehir üstünde çökmesi sonucu gerçekleştiğini gösterdi. Bunun dışında şehrin karmaşık topografik yapısı ve geceleri radiatif soğuma ile ya da yüksek basınç alanları sebebiyle meydana gelen inversiyon olayları bu kirlenici seviyelerine sebep vermektedir. İncecik (1996), yüksek kirlenici seviyeleri gözlenen dönemlerin %48'inde karışım yüksekliğinin 250 m altında olduğunu ve %20 ve daha fazlasında durgun hava koşullarının hakim olduğunu göstermektedir. Bu dönemde, 18 Ocak 1993 tarihinde İstanbul en ileri hava kirliliği episodlarından birini yaşamış, SO₂ ve TSP seviyeleri 4 070 ve 2 662 µg m⁻³ seviyelerine ulaşmıştır. Bölgeye hakim olan yüksek basınç merkezi sebebiyle oluşan inversiyon tabakası ile karışım yüksekliğinde önemli bir düşüş meydana gelip, düşük rüzgar hızları ile beraber bölgedeki ventilasyonu aksatmış ve kirlenicilerin özellikle Avrupa yakası üzerinde birikmesine sebep olmuştur (Batuk vd., 1997). Bu kararlı atmosfer durumu 20 Ocak'a kadar sürmüş ve şehirde okullar bu süre zarfında kapatılmış, yaşlılar ve çocuklar için acil durum ilan edilmiştir. Şekil 8'de de görüldüğü gibi 1992 yılında, İstanbul ilk önce Asya yakasında doğalgaz kullanımının başlaması ile SO₂ seviyelerinde düşüş başlamıştır (Tayanç, 2000). Ancak PM₁₀ ve NO₂ seviyeleri hâlâ limit değerlerin üstünde seyretmektedir. Günümüzde de bu durum özellikle kış aylarında görülmektedir. İstanbul'daki 10 ölçüm istasyonundan 2005-2010 yılları arasında saatlik olarak alınan PM₁₀ verisi kullanılarak Ünal vd. (2011) tara-

1

Tablo 2. Markakis vd. (2012) yıllık toplam emisyon değerleri

Kaynak (kton/yıl)	CO	NO _x	SO _x	VOC	NH ₃	PM ₁₀	PM _{2,5}
Evsel Isınma	47 399	6 513	13 369	2 011		4 286	4 273
Endüstriyel Yakma	1 741	7 123	21 020	88		29 796	8 709
Endüstriyel Prosesler	14 352	211		273		9 605	7 354
Fosil Yakıt Dağıtım			2 121				
Kömür Çıkarma						38	4
Çözücü Kullanımı				23 000	3 256		
Trafik	363 252	241 895	2 124	34 661		10 533	10 533
Yol Dışı Trafik	51	1 233	1 273	301		2 268	2 148
Havalimanı	2 792	1 600	85	541			
Yerel Yolcu Gemileri	174	2 009	273	32		79	79
Kargo Gemileri	1 199	27 050	15 686	464	9	1 822	1 822
Atık Arıtımı	3 173			15 764		1 047	1 047
Enerji	3 187	9 880	32 316	154		1 088	809
Tarım	34	7 195	2 415	8	3 249	100	22
Toplam	437 354	304 709	90 682	77 297	6 514	60 662	36 800

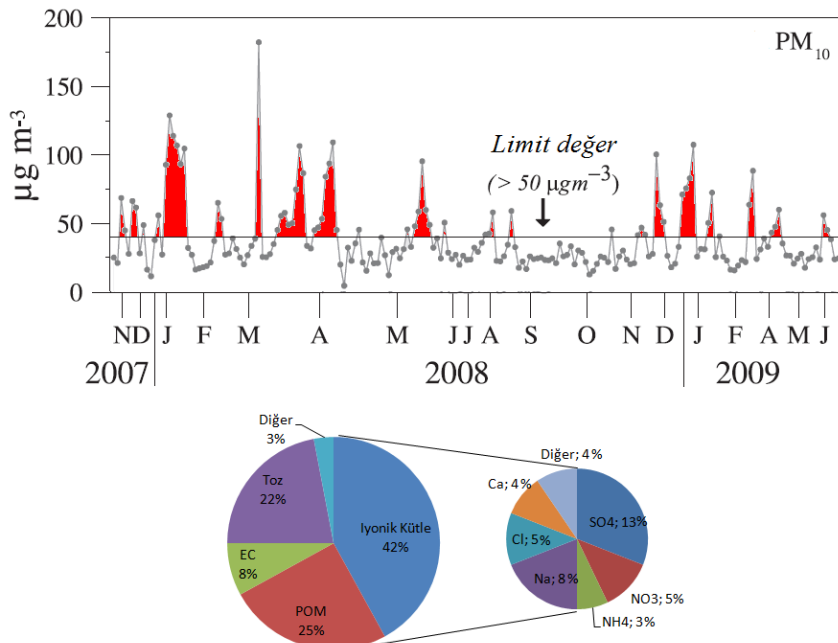


Şekil 8. 1985-1994 SO₂ ve TSP (İncecik, 1996) ve 2005-2010 SO₂, NO₂ ve PM₁₀ (Ünal vd. 2011) yıllık ortalama değerleri

findan yapılan çalışma bu dönemi kapsayan günlerin %32'sinde PM₁₀ değerlerinin günlük limit değer olan 50 µg m⁻³'ü geçtiğini göstermiştir. PM₁₀ seviyeleri ile ilgili benzer sonuçlar Çelebi vd. (2010)'nin çalışmasında da görülmüştür.

Karaca vd. (2005), 2002-2003 yılları arasında yarı-kırsal Küçükçekmece bölgesinde PM₁₀ ve PM_{2,5} örnekleme yapıp ve şehirsel etkinin az olduğu bu bölgede yıllık ortalama 40 ve 20,8 µg m⁻³ PM₁₀ ve PM_{2,5} seviyeleri ölçmüştür. PM₁₀ seviyeleri limit değerlere yakın iken PM_{2,5} seviyeleri limit değer üstünde seyretmekte ve bu kırsal bölgede bile partikül madde seviyelerinin taşınım vasıtası ile yüksek olabildiğini göstermektedir. Theodosi vd. (2010), Kasım 2007-Haziran 2009 tarihleri arasında İstanbul'un ilk bütün PM₁₀ kimyasal kompozisyonunu ortaya koymuştur. Bu dönemdeki günlük PM₁₀ seviyeleri Şekil 9'da görülmektedir. Kış ve geçiş dönemlerinde PM₁₀ seviyeleri günlük limitin üstünde gözlenmektedir. Doğal

kaynakları temsil eden metaller geçiş mevsimlerinde en yüksek seviyelerine çıkmakta ve bu da güneyli esen rüzgarlar da göz önüne alındığında bölgedeki en önemli toz kaynağı olan Sahra çölünü işaret etmektedir. Koçak vd. (2011) Nisan ayında ölçülmüş yüksek PM seviyelerinin Sahra kaynaklı toz taşınımı sebebiyle oluştuğunu göstermiştir. Karaca vd. (2009) da 2008 yılında 10 istasyonda ölçülen PM₁₀ verisine geri yörünge analizleri ile istatistiksel potansiyel kaynak belirleme analizi uygulamış Sahra tozunun İstanbul üzerindeki etkisini göstermiştir. Kışın ise ısınma, trafik ve endüstri kökenli elementlerin en yüksek seviyelere çıkması, kirlilik seviyelerinde bu sektörlerin rol oynadığını göstermektedir. Şehirdeki yüksek kirlilik seviyelerine lokal emisyonlar dışında uzun ölçekli taşınım da etki etmektedir. Örneğin Kındap vd. (2006) kış aylarında meydana gelen bazı PM episodlarının kuzeyli taşınım ile doğu Avrupa üzerinden gelen antropojenik kökenli partiküllerden kaynaklandığını göstermiştir. Ölçülen PM₁₀ kimyasal kompozisyon, İstanbul'daki PM

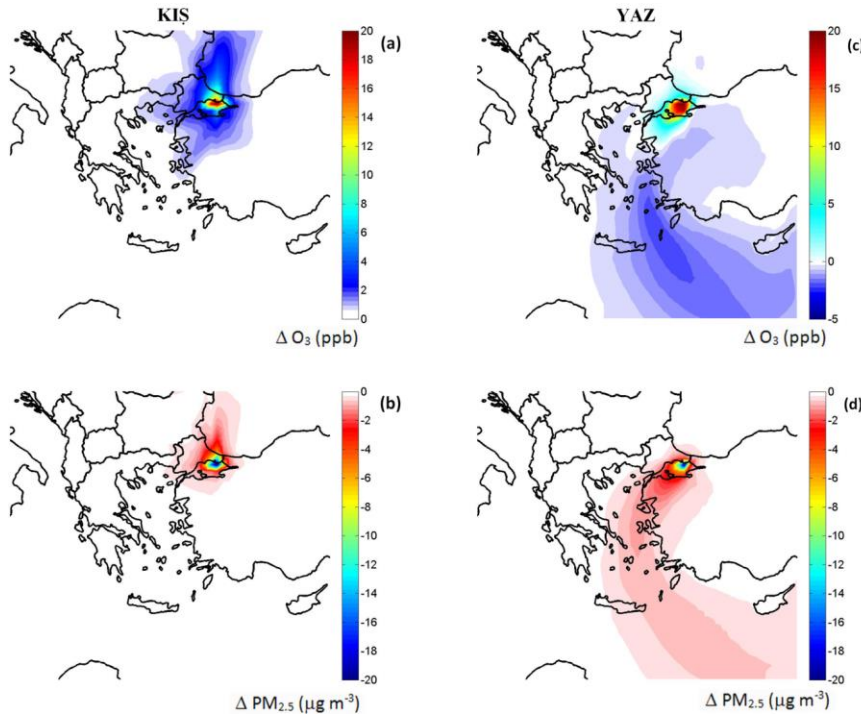


Şekil 9. Kasım 2007-Haziran 2009 PM₁₀ zamansal değişimi ve kimyasal kompozisyonu (Kaynak: Theodosi vd., 2010; Koçak vd., 2011)

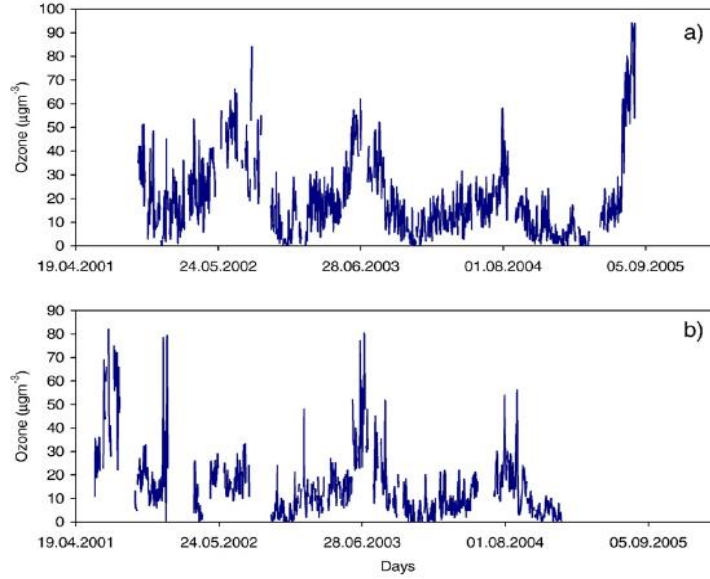
kütlesinin ağırlıklı olarak ikincil bileşenlerden (%42) meydana geldiğini göstermektedir (Şekil 2). Organik bileşenler ve toz da önemli bileşenlerdir. Organik-elemental karbon oranı, organik karbonun çoğunlukla birincil olduğunu ve elemental kısmın da önemli ölçüde trafik kaynaklı olduğunu göstermektedir. Kış aylarında ise karbon yüklemesine evsel ısınma da önemli katkı sağlamaktadır.

Koçak vd. (2011), Theodosi vd. (2010) tarafından oluşturulan PM₁₀ kimyasal kompozisyonunu ve geri yörünge analizlerini kullanarak İstanbul üzerindeki toz yüklemesinin önemli bir bölümünün Cezayir, Libya ve Tunus çöllerinden kalkan Sahra tozu olduğunu göstermiştir. Aynı çalışmada, kış döneminde PM₁₀ seviyelerine en büyük katkının %29 ile trafik ve %37 ile toplam yakma kaynaklarından geldiği rapor edilmektedir. Yaz aylarında ise özellikle ikincil bileşen seviyelerinde artan sıcaklıklardan dolayı önemli bir yükseliş olmakta (%38), deniz tuzu katkısı da %16 ile en yüksek seviyeye gelmektedir. Yazın trafik kaynaklarının görece katkısı en düşük seviyeye gelmektedir (%4). İstanbul emisyonları taşınarak çevresini de etkilemektedir. Yakın zamanda İm ve Kanakidou (2012) tarafından yapılan bir model çalışması İstanbul emisyonlarının özellikle yaz aylarında uzun mesafeler boyunca etki edebildiğini göstermiştir (Şekil 10). Özellikle yazın, kuzeyli rüzgarların daha da güçlenmesi ile İstanbul emisyonları tüm Ege ve doğu Akdeniz üzerinde etkili olmaktadır. Bu çalışmanın sonuçlarına göre İstanbul emisyonları, lokal O₃ seviyelerini, yüksek miktardaki NO_x emisyonları ile titre ederek kışın %60, yazın ise %20 seviyesinde alta çekmektedir. PM_{2,5} seviyeleri ise O₃'nun tersine kışın %75, yazın ise %50 oranında şehrin kendi emisyonlarından meydana gelmektedir. İstanbul emis-

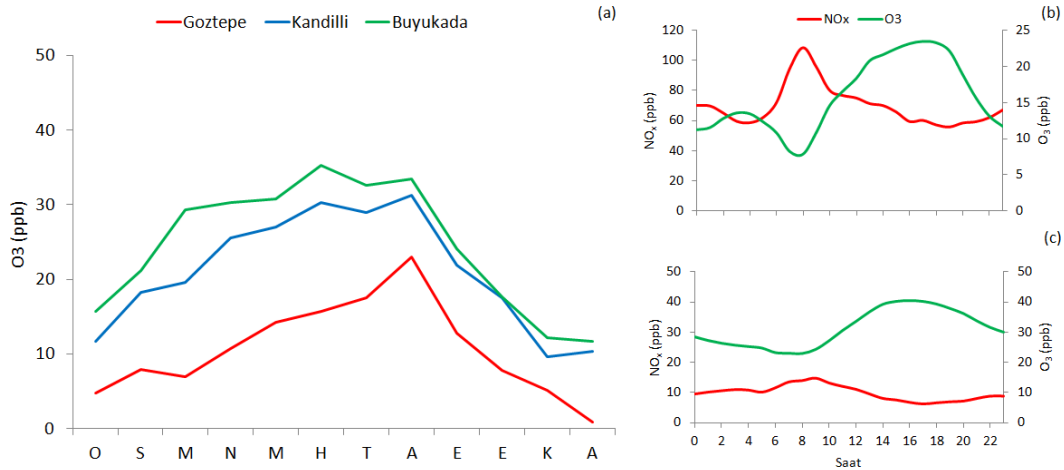
yonları ayrıca Doğu Akdeniz bölgesindeki NO_x ve PM_{2,5} seviyelerinin %9-18'i ve %4'ünden sorumludur. Aynı çalışmada, şehirdeki O₃ seviyelerinin kışın %60-80, yazın ise %40-50 oranında uzun ölçekli taşıma ile biriktiğini göstermiştir. PM_{2,5} seviyeleri ise özellikle kışın lokal emisyonlar tarafından kontrol edilmektedir. Kanakidou vd. (2011) ise geçmişe dönük 30 yıllık yörünge analizlerini kullanarak İstanbul emisyonlarının güney Marmara bölgesine %30-100 olasılıkla, doğu ve güney Ege'ye %10-30 olasılıkla, batı Karadeniz'den güneyde Mısır'a kadar bir bölgeye %3-10 olasılıkla ulaşabileceğini göstermiştir. Aynı çalışmada, uydu verileri kullanılarak İstanbul'daki 2003-2009 yılları arası troposferik NO₂ ve formaldehit kolonu ortalamalarının bölgedeki Atina ve Kahire gibi diğer büyük ve megaşehirlerden daha yüksek olduğu ortaya konmuştur. İstanbul'da Kadıköy ve Aksaray'da yapılan ilk yüzey O₃ ölçümleri, şehirdeki O₃ seviyelerinin episodik boyutlarda olmadığını göstermiştir (Topçu ve İncecik, 2002 ve 2003). Ancak bu bölgede yüksek basınç alanlarına ve güneyli rüzgarlara maruz kaldığı zamanlarda O₃ seviyelerinin yükseldiği görülmektedir. İm vd. (2008) 2001-2005 yıllarında ölçülmüş olan O₃ verilerini (Şekil 11) analiz etmiş ve yüksek O₃ seviyelerinin güneyli rüzgarlarla birlikte güneşli ve hava sıcaklığının 25°C'nin üstünde olduğu günlerde meydana geldiğini belirlemiştir. Antepioğlu vd. (2003) tarafından yapılan meteorolojik simülasyonlar da bu bulguları desteklemektedir. Şekil 11'de de görüldüğü üzere çok belirgin bir mevsimsel patern mevcut olup kış aylarında minimum, yaz aylarında ise sıcaklığın ve güneşlenmenin artması ile maksimum O₃ seviyeleri gözlenmektedir.



Şekil 10. İstanbul emisyonlarının kış (Aralık) ve yaz (Temmuz) dönemlerinde doğu Akdeniz bölgesine etkisi (Kaynak: İm ve Kanakidou, 2012)



Şekil 11. (a) Kadıköy ve (b) Saraçhane 2001-2005 dönemi O₃ seviyeleri (Kaynak: İm vd., 2008)



Şekil 12. (a) Şehirsel (Göztepe), yarı-şehirsel (Kandilli) ve kırsal (Büyükkada) alanlarda aylık ortalama O₃ seviyeleri ve (b) şehirsel ve (c) kırsal alanlarda O₃-NO_x ilişkisi (Kaynak: İm vd., 2013)

2007-2010 yılları arasında şehirsel, yarı-şehirsel ve kırsal bölgelerde yapılan yapılmış olan O₃ ve NO_x ölçümleri ise (İm vd., 2013) şehirde ilk defa farklı bölgelerde O₃ seviyelerinin nasıl değiştiğini ortaya koymuş (Şekil 12), bu ölçümlerin sadece şehirsel alanlarda değil, daha temsil edici olabilmeleri için kırsal alanları da kapsamı gerektiğini göstermiştir. Bu çalışmada İstanbul'da kırsal bölgelerdeki O₃ seviyelerinin şehirsel bölgelere göre %70'e, yarı-şehirsel bölgelere göre de %25'e kadar daha yüksek olabildiği gösterilmiştir (Şekil 12a). Bunun sebebi, Şekil 5'de gösterildiği gibi şehirsel alanlarda (Şekil 12b), kırsal alanlara göre (Şekil 12c) daha fazla NO_x olması ve O₃'ü bozmasıdır. Şehirde tipik O₃:NO_x profili mevcut olup yoğun trafik saatlerinde maksimum NO_x ile minimum O₃, öğleden sonra ise NO_x un azalması ve sıcaklık ve güneş radyasyonunun artması ile O₃ seviyelerinin yükselmesi görülmektedir. Kırsal bölgelerde ise bu profil çok belirgin olmamakta ve taşınan veya burada oluşan O₃ birikebilmektedir.

4. Sonuç

Halen dünyada nüfusu 10 milyonu aşan 28 megaşehir bulunmaktadır. İstanbul ise 20. megaşehirdir. Ancak dünyadaki 28 megaşehrin sadece 7'si sanayileşmiş ülkelere aittir. Geriye kalan 21 şehir ise kalkınmakta olan ülke şehirleridir. Megaşehirlerde hava kirliliği seviyesi ülkenin teknolojik durumuna, temiz yakıt kullanımına, yenilenebilir enerjilere yer verilmesine ve hava kirliliğini iyileştirme planlarının uygulanabildiği şehirlere göre değişmektedir. New York, Los Angeles, Tokyo gibi şehirlerde PM_{2,5} ve ozon seviyeleri sorun yaratırken başta Asya megaşehirleri olmak üzere 20'ye yakın megaşehirde özellikle partiküler madde konsantrasyonları Dünya Sağlık Örgütü limitlerinin en az 8-10 kat üzerindedir. Bu ülkelerde hava kirlilik konsantrasyonları ciddi sağlık etkilerinin olduğu seviyeler olarak bildirilmektedir. Özellikle erken ölümlerin, akciğer kanser vakalarının en fazla yaşandığı şehirler içerisinde özellikle Beijing,

Kahire, Jakarta, Delhi, Bangkok ve Meksiko City yer almaktadır. Bu şehirler halen alınan tedbirlere rağmen çok ciddi hava kalitesi sorunları ile karşı karşıyadır. Nüfus, trafik ve sanayinin giderek büyümesi bu megaşehirlerde hava kalitesinin bozulmasına yol açan en önemli gelişmedir.

2050 yılına kadar dünya nüfusunun dokuz milyara yükselmesi beklenmektedir. OECD'ye göre dünya ekonomisinin

yaklaşık dört kat büyüyeceği ve bu durumun da enerji talebini arttıracacağı ve doğal kaynakların azalacağına işaret etmektedir. Bu nedenle sadece bu senaryo bile 2050 yılına kadar özellikle Asya kıtasında erken ölümlere yol açan çevre olaylarının başında hava kirliliği gelecektir. 21. yüzyılın iki temel kirleticisi bulunmaktadır. Bunlar partiküller madde ve ozondur. Her yıl yaklaşık 3,6 milyon insan sadece partiküller madde kirliliği nedeniyle erken ölümlere karşı karşıya kalacaktır.

Kaynaklar

- Abu-Allaban, M., Lowenthal, D.H., Gertler, A.W., Labib, M., 2007. Sources of PM₁₀ and PM_{2.5} in Cairo's ambient air. *Environmental Monitoring and Assessment* 133, 417-425.
- ALA, 2012. State of the Air. American Lung Association.
- Antepliöğlü, U., Topçu, S., Incecik, S., 2003. An application of a photochemical model for urban airshed in Istanbul. *Journal of Water, Air and Soil Pollution: Focus* 3, 55-66.
- Atımtay, A., Incecik, S., 2004. Air Pollution Problem in Istanbul and Strategically Efforts in Air Quality Management, 13th World Clean Air Congress, 22-27 Aug. 2004, London.
- Batuk, D.N., Gürsoy, E., Ertut, H., Erdun, H., Incecik, S., 1997. Analysis of SO₂ and TSP under mesoscale weather conditions in Istanbul, Turkey. *Environmental Research Forum* 7-8, 73-83.
- Cairo Air Improvement Project, 2004. USAID/Egypt, Office of Environment Contract 263-C-00-97-00090-00
- Celebi, M., Incecik, S., Deniz, A., 2010. Investigation of PM₁₀ levels in urban atmosphere of a megacity: Istanbul. *Better Air Quality Conference*, 9-11 Nov. 2010. Singapore.
- Chan, C.K., Yao, X., 2008. Air pollution in megacities in China. *Atmospheric Environment* 42, 1-42.
- Deniz, A., S. Incecik, H. Okutan, O. Yenigün, Y.S. Ünal, H. Toros, İ. Mert 2012, İstanbul-Kağıthane Bölgesinde Hava Kalitesinin Araştırılması, TÜBİTAK Proje No. 109Y132
- Elbir, T., Mangir, N., Kara, M., Ozdemir, S., 2010. Development of a GIS-based decision support system for urban air quality management in the City of Istanbul. *Atmospheric Environment* 44, 441-454.
- Gurjar, B.R., Butler, T.M., Lawrence, M.G., Lelieveld, J., 2008. Evaluation of emissions and air quality in megacities, *Atmospheric Environment* 42, 1593-1606.
- IBB, 2009. Istanbul Municipality Report. İstanbul'da kentsel hava kalitesi yönetimi için CBS tabanlı karar destek sisteminin geliştirilmesi, Teknik olmayan rapor.
- Im, U., Tayanc, M., Yenigün, O., 2008. Interaction patterns of major photochemical pollutants in Istanbul, Turkey. *Atmospheric Research* 89, 382-390.
- Im, U., Markakis, K., Unal, A., Kindap, T., Poupkou, A., Incecik, S., Yenigun, O., Melas, D., Theodosi, C., Mihalopoulos, N., 2010. Study of a winter PM episode in Istanbul using high resolution WRF/CMAQ modeling system. *Atmospheric Environment* 44, 3085-3094.
- Im, U., Incecik, S., Guler, M., Tek, A., Topcu, S., Unal, Y.S., Yenigun, O., Kindap, T., Odman, M.T., Tayanc, M., 2013. Analysis of surface ozone and nitrogen oxides at urban, semi-rural and rural sites in Istanbul, Turkey, *Science of the Total Environment* 443, 920-931.
- Incecik, S., 1996. Investigation of atmospheric conditions in Istanbul leading to air pollution episodes, *Atmospheric Environment* 30, 2739-2749.
- Incecik, S., Im, U., Yenigün, O., Odman, M.T., Kindap, T., Topcu, S., Tek, A., Tayanc, M., 2010. Meteorolojik alanların modellenmesi ve İstanbul ile Kocaeli bölgelerindeki hava kirliliğinin araştırılması. TÜBİTAK COST Projesi No: 105Y005
- Incecik, S., İm, U. 2012, Air Pollution in Megacities: in Air Pollution- Monitoring, Modeling and Health. Ed: M. Khare, Intech Open Access Publisher, 77-116.
- Kanakidou, M., Mihalopoulos, N., Kindap, T., Im, U., Vrekoussis, M., Gerasopoulos, E., Dermizaki, E., Unal, A., Koçak, M., Markakis, K., Melas, D., Kouvarakis, Y., Youssef, A.F., Richter, A., Hatzianastassiou, N., Ebojio, A.F., Wittrock, F., von Savigny, C., Burrows, J.P., Weissenmayer, A.L., Moubasher, H., 2011. Megacities as hot spots of air pollution in the East Mediterranean. *Atmospheric Environment* 45, 1223-1235.
- Karaca, F., Anil, I., Alagha O. 2009. Long-range potential source contributions of episodic aerosol events to PM₁₀ profile of a megacity. *Atmospheric Environment* 43, 5713-5722.
- Kocak, M., Theodosi, C., Zampas, P., Im, U., Bougiatioti, A., Yenigun, O., Mihalopoulos, N., 2011. Particulate matter (PM₁₀) in Istanbul: Origin, source areas and potential impact on surrounding regions. *Atmospheric Environment* 45, 6891-6900.
- Mage, D., Ozolins, G., Peterson, P., Webster A., Orthofer, R., Vandeweerd, V., Gwynne, M., 1996. Urban air pollution in megacities of the world. *Atmospheric Environment* 30, 681-686.
- Mahmoud, K.F., Alfaro, S.C., Favez, O., Abdel Wahab, M.M., Sciare, J., 2008. Origin of black carbon concentration peaks in Cairo. *Atmospheric Research* 89, 161-169.
- Markakis, K., Im, U., Unal, A., Melas, D., Yenigun, O., Incecik, S., 2012. Compilation of a GIS based high spatially and temporally resolved emission inventory for the Greater Istanbul Area. *Atmospheric Pollution Research* 3, 112-125.
- Markakis, K., Poupkou, A., Melas, D., Tzoumaka, P., Petrakakis, M., 2010. A computational approach based on GIS technology for the development of an anthropogenic emission inventory for air quality applications in Greece. *Water, Air, and Soil Pollution* 207, 157-180.
- Markakis, K., Poupkou, A., Melas, D., Zerefos, C., 2010. A GIS based methodology for the compilation of an anthropogenic PM₁₀ emission inventory in Greece. *Environmental Pollution Research* 1, 71-81.
- Molina, M.J., Molina, L.T., 2004. Megacities and atmospheric pollution, *Journal of Air and Waste Management Association* 54, 644-680.

- Nel, A., 2005. Air Pollution-Related Illness: Effects of Particles. *Science* 308, 804-806.
- OECD, 2012. Environmental Outlook to 2050: The Consequences of Inaction, ISBN 978-92-64-122161.
- The Principal Agglomerations of the World, Population Statistics and Maps, 2012.
- Safar Z.S., M.W.Labib, (2010), Assessment of particulate matter and lead levels in the Greater Cairo area for the period 1998–2007. *Journal of Advanced Research* 1, 53-63.
- Tayanc, M., 2000. An assessment of spatial and temporal variation of sulfur dioxide levels over Istanbul. *Environmental Pollution* 107, 61-69.
- Tayanc, M., Im, U., Dogru, M., Karaca, M., 2009. Climate change in Turkey for the last half century. *Climatic Change* 94, 483-502.
- Theodosi, C., Im, U., Bougiatuoti, A., Zampas, P., Yenigun, O., Mihalopoulos, N., 2010. Aerosol chemical composition over Istanbul. *Science of the Total Environment* 408, 12, 2482-2491.
- Topcu, S., Incecik, S., Unal, Y.S., 2001. The influence of meteorological conditions and stringent emission control on high TSP episodes in Istanbul. *Environmental Science and Pollution Research* 10, 24-32.
- Topcu, S., Incecik, S., 2002. Surface ozone measurements and meteorological influences in the urban atmosphere of Istanbul. *International Journal of Environment and Pollution* 17, 390-404.
- Topcu, S., Incecik, S., 2003. Characteristics of surface ozone concentrations in urban atmosphere of Istanbul: A Case Study. *Fresenius Environmental Bulletin* 12, 3.
- Toros.H.,A.Deniz, A.Öztürk, M.Coşkun2013, İstanbul-Kağıthane Pilot Bölgesinde Uçucu Organik Bileşenlerinin (VOC) Araştırılması, TUJJB-TUMEHAP Projesi No:-01-10.
- Unal, Y.S., Incecik, S., Borhan, Y., Menten, S., 2000. Factors influencing the variability of SO₂ concentrations in Istanbul. *Journal of the Air and Waste Management Association* 50, 75-84.
- Unal, Y.S., Deniz, A., Toros, H., Incecik, S., 2011. Influence of meteorological factors and emission sources on spatial and temporal variations of PM₁₀ concentrations in Istanbul metropolitan area. *Atmospheric Environment* 45,5504-5513.
- Wang, Y., Zhuang, G., Tang, A., Yuan, H., Sun, Y., Chen, S.,Zheng, A., 2005. The ion chemistry and the source of PM_{2.5} aerosol in Beijing. *Atmospheric Environment* 39, 3771-3784.
- Wang, J-F., Hu, M-G., Xu, C-D., Christakos, G., Zhao, Y., 2013. Estimation of Citywide Air Pollution in Beijing. *PLUS ONE* 8. e53400. doi:10.1371/journal.pone.0053400
- WHO, 2011. Air quality and health, Fact Sheet No 313
- Zakey, A. S., and M. A. Omran, 1997. *1st LAS/WMO International Symposium on Sand and Dust Storms*, WMO Programme on Weather Prediction Research Report Series Project No. 10, World Meteorological Organization (WMO), Technical Document No. 864.
- Zakey, A.S., Abdelwahab, M.M., Patterson, J.J.C., Gatari, M.J., Hallquist, M., 2008. Seasonal and spatial variation of atmospheric particular matter in a developing mega city, the Greater Cairo, *Egypt Atmosfera* 21, 171-189.
- Zhang, J., Ouyang, Z., Miao, H., Wang, X., 2011. Ambient air quality trends and driving factor analysis in Beijing, 1983-2007. *Journal of Environmental Sciences* 23, 2019-2028.
- Zhu, L., Huang, X., Shi, H., Cai, X., Song, Y., 2011. Transport pathways and potential sources of PM₁₀ in Beijing. *Atmospheric Environment* 45, 594-604.



Hava Kirliliği Araştırmaları Dergisi

www.hkad.org



Review Article

Ambient Air Quality in Megacities and the Case of Istanbul

Selahattin İNCECİK¹, Ulaş İM²

¹Istanbul Technical University, Dept. of Meteorological Engineering, Maslak 34469 İstanbul, Turkey

²Institute for Environment and Sustainability, Air and Climate Unit, Ispra, Italy

Received: May 27, 2013; Accepted: November 5, 2013

ABSTRACT

In this study, the polluted atmosphere of the four most problematic megacities (Beijing, Cairo, Jakarta, Delhi) of the world are examined in terms of emission sources, climate, and population characteristics. Furthermore, current and historical background of air quality in the megacity of İstanbul are extensively evaluated.

Keywords: megacity, air quality, Beijing, Jakarta, Delhi, Cairo, İstanbul.

© Turkish National Committee of Air Pollution Research and Control.