



Derleme Makalesi

Türkiye’de Hava Kalitesi Modellemesi

Mete TAYANÇ✉

Marmara Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Göztepe Yerleşkesi 34722 İstanbul

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

ÖZET

Çeşitli kaynaklardan atmosfere salınan kirleticilerin farklı meteorolojik koşullardaki yayılımının, kimyasal oluşum/dönüşüm, dispersiyon, birikim, adveksiyon/konveksiyon gibi etken süreçlerin ışığında belirlenmesi amacıyla hava kalitesi modelleme çalışmaları gerçekleştirilmektedir. Türkiye’de atmosferik modelleme konusunda ATDL, ISC, CALPUFF, AERMOD gibi kütle dengesi prensibine dayalı ve Lagrange temelli modeller kullanıldığı gibi, zamansal ve mekansal olarak yüksek çözünürlükte ve çok sayıda atmosferik süreci bir arada bulunduran Euler tabanlı MM5/CMAQ, WRF/CMAQ ve MM5/CAMx gibi hava kalitesi modelleme sistemleri de son yıllarda kullanılmaya başlanmıştır. Bu makalede ülkemizde hava kalitesi modelleme çalışmaları tarihsel süreç de gözetilerek elden geldiğince kapsamlı olarak sunulmaya çalışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Hava Kalitesi, modelleme, Lagrange, Euler, meteoroloji.

© Tüm yayın hakları Hava Kirlenmesi Araştırmaları ve Denetimi Türk Milli Komitesi’ne aittir.

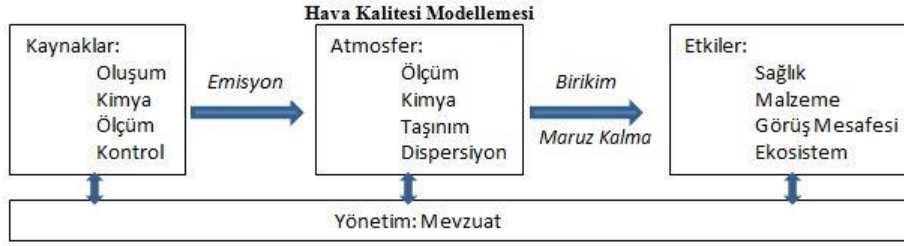
1. Giriş

Hava kirliliği konusu çok sayıda sürecin bir arada bulunduğu kapsamlı ve bir o kadar da kompleks bir sistemdir (Şekil 1). Hava kalitesini etkileyen emisyonlar evsel ısınma araçları, endüstri, taşıtlar gibi insan kaynakları (antropojenik) olabileceği gibi bitki emisyonları (biyojenik), orman yangınları, volkan gibi doğal kaynaklar da olabilir. Söz konusu emisyonlar atmosfere doğrudan kirlетici salıdığı gibi ilk safhada kirlетici olmayan ama kimyasal süreçlerde rol aldığı için hava kalitesini ikincil olarak etkileyen kimyasallar da içerebilir.

Hava kirliliğini bütüncül bir yaklaşımla incelediğimizde karşımıza yaklaşık olarak Şekil 1’deki gibi süreçler çıkar. Fosil yakıtların veya biyokütlenin yakılması gibi antropojenik özellikli kirlетici oluşum süreçlerine örnek olarak, azottan azot oksitlerin, kükürtten kükürt dioksitin oluşması verilebilir. Benzer şekilde biyojenik kirlетici oluşum mekanizmalarına da çiçeklerin parfümsü kokularından yüzlerce çeşit uçucu organik bileşiğin, yapraklardaki klorofil içeren protoplazmadan (kloroplast) ışık varlığında “terpenler”in ve bunlardan da “isoprene” oluşması örnek olarak verilebilir. Günümüzde fotokimyasal kirliliğin oluşumunda antropojenik kaynaklar kadar doğal kaynaklar da büyük önem arz etmektedir.

Atmofere salınan ve hava kalitesini etkileyen maddeler kimyasal/fotokimyasal reaksiyonlarla dönüşüme uğrayabilir ve rüzgar vektörü, bağıl nem, sıcaklık, sıcaklığın yükseklikle değişimi, basınç, yağış gibi meteorolojik faktörler yatay/düşeyde taşınım (adveksiyon/konveksiyon), dispersiyon ve birikimi etkileyebilir. Emisyon gerçekleşikten sonra kirlетicilerin çevredeki konsantrasyonlarını belirleyebilmek için hava kalitesi modelleri kullanılır. Bu atmosferik modeller, emisyon, meteoroloji ve topoğrafya bazı bilgileri girdi verisi olarak kullanırlar. Sonrasında sayısal teknikleri işleterek atmosferdeki taşınım, dispersiyon gibi fiziksel süreçleri çalıştırabildiği gibi kimyasal tepkimeleri işleyen kimya algoritmaları ile birlikte kullanıldığında kirlетici tür dönüşümlerini de gerçeğine uygun bir şekilde üretebilir.

Atmosferdeki dağılım, maruz kalma ve birikim vasıtasıyla alıcı ortamlara ulaşan kirlетiciler en başta sağlık olmak üzere, ekosistemler ve cansız varlıklar üzerinde olumsuz etkiler oluşturabilir. Ülkemizde, hava kalitesi ile ilgili olarak yapılmış birçok modelleme çalışması yukarıdaki süreçlerin belli bir kısmı üzerinde yoğunlaşmışken, birçok süreci bir arada barındıran daha kapsamlı ve sistemli çalışmalar da mevcuttur.



Şekil 1. Hava Kirliliğinde Süreçler

2. Hava Kalitesi Modellemesi

Hava kirliliği kapsamında gerçekleştirilen bilimsel çalışmalarda çeşitli amaçlara ulaşabilmek için geliştirilen ve kullanılan tekniklerin bazıları modelleme olarak isimlendirilmişlerdir. Bu kapsamda emisyon modellemesi, taşınım/dağılım modellemesi, kimyasal modelleme, birikim modellemesi, alıcı ortam modellemesi gibi çeşitli model kavramları geliştirilmiştir. Ancak modelleme çalışmalarının en karmaşık ve belki de en önemli olanı hava kalitesi modellemesi olarak isimlendirilen atmosferik modellemesidir.

Hava kalitesi değerlendirmelerinde kullanılan iki tip fotokimyasal hava kalitesi modeli vardır; yeryüzü üzerinde sabit bir koordinat sistemi kullanan Euler grid modeli ile hareketli bir koordinat sistemi kullanan Lagrange yörünge modeli. Şekil 2’de gösterildiği üzere Euler yaklaşımında hava parselindeki zamana bağlı fiziksel ve kimyasal değişimler sabit koordinat sistemi ile takip edilip ifade edilirken, Lagrange yaklaşımında koordinat sistemi hava parseli ile birlikte hareketli yapıda olup hava parselindeki zamana bağlı değişimler yerinde ifade edilmektedir. Birinci nesil modelleme çabaları kirlenici oluşum ve taşınımında hesaplamada kolaylık sağlaması nedeniyle Lagrange yaklaşımını kullanmışlardır. Ancak Lagrange yaklaşımının dezavantajı fiziksel ve kimyasal süreçleri tam olarak tanımlayamaması olarak belirtilebilir (Web-1). Günümüzde evrensel düzeyde yaygın olarak kullanılan fotokimyasal hava kalitesi modellerinin birçoğu atmosferdeki fiziksel süreçleri daha iyi karakterize edebilen ve tüm model alanı üzerinde kirlenici konsantrasyonlarını yüksek çözünürlük ve hassasiyette belirleyebilen üç boyutlu Euler grid yaklaşımını kullanmaktadır.

Aşağıdaki süreçler hava kalitesini etkiler ve kirlenici konsantrasyon tahmini yapan modellerde bulunmalıdır.

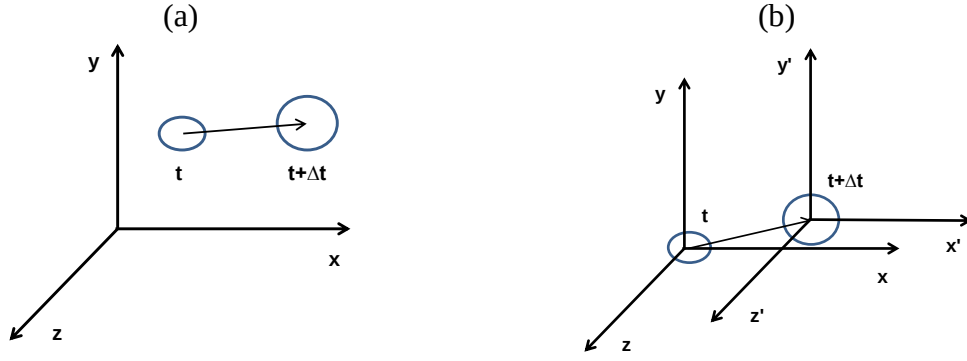
- Kaynak emisyonları
- Yatay ve düşey taşınım
- Yatay ve düşey dispersiyon
- Kimyasal dönüşümler
- Birikim süreçleri

CMAQ, CAMx gibi gelişmiş Euler modeller, kısmi ve genel diferansiyel denklem takımlarını kullanarak uzayda sabit durduğu kabul edilen üç boyutlu grid içerisinde kirlenici konsantrasyonlarını hesaplar. Bunun için kullanılan denklem genel olarak Eşitlik-1’deki gibi ifade edilebilir. Burada grid içerisinde hava kirlenici seviyelerindeki zamana bağlı değişimleri etkileyen süreçler süreklilik denklemi şeklinde sırasıyla adveksiyon, diffüzyon, kimyasal dönüşüm, emisyon ve giderim olarak ifade edilmektedir.

Türkiye’de atmosferik modelleme konusunda ATDL (Atmospheric Turbulence Diffusion Laboratory), ISC (Industrial Source Complex), CALPUFF, AERMOD gibi kütle dengesi prensibine dayalı Gauss duman yaklaşımı temelli modeller kullanıldığı gibi, zamansal ve mekansal olarak yüksek çözünürlükte ve çok sayıda atmosferik süreci bir arada bulunduran Euler tabanlı MM5/CMAQ, WRF/CMAQ ve MM5/CAMx gibi hava kalitesi modelleme sistemleri de son yıllarda kullanılmaya başlanmıştır. Bu makalede Türkiye’de atmosferik modelleme üzerinde yapılan çalışmalar elden geldikçe kapsamlı olarak sunulmaya çalışılmıştır.

Türkiye’de hava kalitesi modellemesi ile ilgili uluslararası endekslerce taranan dergiler incelendiğinde bu konuda yayımlanmış ilk çalışmanın Ertürk (1986) olduğu görülmektedir. Bu makalede ATDL şehir dispersiyon modelinin geliştirilmiş sürümü, yıllık kükürtdioksit ve askıda partiküler madde konsantrasyonlarını belirlemek üzere İstanbul’da Haliç bölgesine uygulanmıştır. Emisyonlar, alan kaynaklar (yerleşim ve küçük endüstriyel veya ticari bölgeler) ve nokta kaynaklar (elektrik santralleri ve büyük endüstriler) olmak üzere sınıflandırılmıştır. Alan kaynaklar 3 km karelik grid yapısına göre dağıtılmıştır. Model tarafından belirlenmiş konsantrasyonlar gözlenmiş konsantrasyonlarla karşılaştırılarak 0.874’lük bir korelasyon katsayısı bulunmuştur. Model, kükürtdioksit ve askıda partiküler madde azaltımı üzerindeki çeşitli kontrol stratejilerinin etkilerini hesaplamada kullanılmış ve bu stratejiler karşılaştırılmalı olarak tartışılmıştır.

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -\nabla_H \cdot V_H C_i + \left[\frac{\partial(C_i \eta)}{\partial z} - C_i \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right) \right] + \nabla \cdot \rho K \nabla (C_i / \rho) + \left. \frac{\partial C_i}{\partial t} \right|_{\text{Kimya}} + \left. \frac{\partial C_i}{\partial t} \right|_{\text{Emisyon}} + \left. \frac{\partial C_i}{\partial t} \right|_{\text{Giderim}} \quad (1)$$



Şekil 2. Hava kalitesi model yaklaşımları (a) Euler, (b) Lagrange

3. Euler Model Sistemleri

3.1. MM5 ve WRF Meteorolojik Modeli

MM5 olarak bilinen beşinci jenerasyon PSU/NCAR orta-ölçek modeli ve daha da geliştirilmiş bir sürümü olan WRF (Weather Research and Forecasting) modeli, atmosfer bilimlerinde akademisyenler ve kurumlar tarafından tercih edilen kapsamlı orta-ölçek sayısal hava tahmin modelleri arasında ilk sıralarda yer alır. Model, üniversiteler, araştırma enstitüleri ve özellikle NCAR (National Center for Atmospheric Research) ve diğer ilgili kurum ve kuruluşlarca sürekli bir destek ve geliştirme kapsamında tutulmaktadır (Web-2).

WRF modeli bir önceki MM5 modelin temelinde kurulmakla birlikte daha esnek, farklı uygulamalara imkan veren, değiştirilebilir bir yazılımı mümkün kılan bir paralel programlama içermektedir. Model, Navier-Stokes denklemleri temelinde üç boyutlu meteorolojik parametreleri (rüzgar hızı ve yönü, sıcaklık, basınç, nem, yağış vb.) hesaplamaktadır. Hem araştırma hem de operasyonel çalışmalar için son derece uygun yaklaşımlar içermektedir. WRF meteorolojik modeli hava kalitesi modellemesi kapsamında, kimyasal modeller (örneğin CMAQ-Community Multiscale Air Quality Modeling System) için gerekli olan meteorolojik parametrelerin elde edilmesinde en çok tercih edilen modellerden birisidir. Başlangıç ve sınır şartlarının hazırlanması, yer ile ilgili verinin modele entegrasyonu, varsa gözlem verisinin eklenmesi ön işlemler arasında yer almaktadır.

Modelin çalıştırılması esnasında en önemli parametreler fiziksel ve dinamik süreçlerin karar verildiği kısımlardır. Bunlar içerisinde mikrofizik, kümülüs parametrelendirilmesi, uzun dalga ve kısa dalga boylu radyasyon, türbülanslı sınır tabaka, yüzey tabaka, yüzey parametrelendirilmesi, adveksiyon ve difüzyon ana süreçlerdir. Fiziksel ve dinamik parametreler için yapılan çalışmanın amacına, grid çözünürlüğüne ve zaman adımına bağlı olarak farklı seçenekler bulunmaktadır. Yapılan çalışmanın arkasındaki fiziksel süreçlerin doğru kurgulanması ve en gerçekçi sonuçların alınması açısından modellemenin bu adımı son derece önem kazanmaktadır.

3.2. CMAQ Hava Kalitesi Modeli

CMAQ hava kalitesine bütüncül bir yaklaşım getiren son derece kapsamlı bir hava kalitesi modelidir. Üç boyutlu Euler hava kalitesi modelleme sistemi olan CMAQ, ozon, partikül madde, atmosferik toksikler, asidik kirleticiler ve görüş mesafesi gibi farklı parametreleri içeren çok-kirleticili, çok-ölçekli bir tasarıma sahiptir. Hava kalitesi modelleri meteoroloji, kimyasal değişim, emisyon, ve birikim süreçlerini entegre bir şekilde analiz edebilme yetisinde olabilmelidir. CMAQ, hava kirleticilerinin kimyasal dönüşümünü, taşınımını ve birikimini hızlı ve verimli hesaplama yapan bir sistem donanımı kullanarak modelleyebilmektedir. Bu açıdan bakıldığında CMAQ'ın şu anda en gelişmiş hava kalitesi modellerinden birisi olduğu belirtilebilir. CMAQ grid yuvalama (nesting) kullanarak büyük ölçeği bölgesel ölçeğe indirebilmektedir.

CMAQ'ın çeşitli amaçlara hizmet eden, başlangıç şartı işlemcisi (ICON), sınır şartı işlemcisi (BCON), fotoliz hız işlemcisi (JPROC), meteoroloji-kimya arayüz işlemcisi (MCIP), CMAQ kimyasal taşınım işlemcisi (CCTM) gibi bileşenleri mevcuttur.

3.3. Türkiye'de Euler Model Sistemleri Kullanılarak Yapılan İlk Çalışmalar

Bu konuda ülkemizde yapılan ilk çalışmaların Anteplioğlu vd. (2004), Kindap vd. (2005), Yay (2006), Kindap ve Karaca (2006), Kindap vd. (2006), Kindap (2008) olduğu görülmektedir. Anteplioğlu'nun birinci yazar olduğu ve Yay'ın yazarı olduğu çalışmalarda MM5/CAMx model sistemi, Kindap'ın birinci yazar olduğu yukarıdaki çalışmalarda ise MM5/CMAQ model sistemi kullanılmıştır.

Anteplioğlu vd. (2004)'nin gerçekleştirdiği çalışmada MM5'in Türkiye'deki hava kalitesi modelleme çalışmalarında ilk defa kullanıldığını görüyoruz. 16-19 Temmuz 2001 episodunda İstanbul'daki yüksek ozon değerleri için yapılmış bu modelleme çalışmasında emisyon envanteri yetersizliği açıkça vurgulanmış ve hava kirliliği modellemesinde meteorolojinin önemi belirtilmiştir.

Kındap ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiş çalışmalarda İstanbul hava kirliliğine Avrupa kökenli uzun mesafeli aerosol taşınımının etkisi hem nitelik hem de nicelik olarak MM5/CMAQ model sistemi ile 5-12 Ocak 2002 dönemi için araştırılmıştır. MM5 modelin başlangıç ve sınır şartları için $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ çözünürlükteki NCEP (The National Centers for Environmental Prediction) verisi kullanılmıştır. CMAQ model yatayda 50 km çözünürlükte, tüm Avrupa'yı kapsayacak şekilde doğu-batı yönünde 132 grid ve kuzey-güney yönünde 111 gridden ve meteorolojik modelin de içinde bulundurduğu 20 düşey tabakadan oluşturulmuştur. Çalışmalarda Avrupa'yı kapsayan EMEP emisyon envanteri seti kullanılarak antropojenik ve doğal kaynaklı kirlleticiler ayrı ayrı ele alınmıştır.

Hava kalitesi modelinin PM_{10} sonuçları İstanbul'daki PM_{10} istasyon ölçümleri ile karşılaştırılmıştır (Şekil 3). Model sonuçları ile gözlemler arasındaki büyüklük farkı belirgin bir şekilde ortaya çıkarken, gözlemlerdeki değişimin model tarafından yakalandığı görülmektedir. Bu farkın yataydaki ve düşeydeki (ilk tabaka yüksekliği 92 m) model çözünürlüğünden ve daha da önemlisi EMEP verisindeki eksikliklerden kaynaklandığı makalelerde vurgulanmış ve daha hassas ve kapsamlı emisyon envanteri ihtiyacı belirtilmiştir.

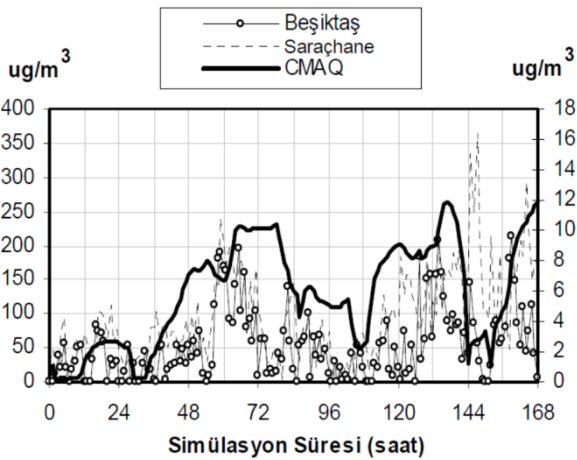
Hassasiyet analizleri, çalışmanın gerçekleştirildiği süre boyunca, Kuzey ve Batı Türkiye'ye Avrupa'dan bölgesel olarak sürekli aerosol taşınımı olduğunu göstermiştir. Bu taşınım, analiz sonuçları açısından, İstanbul'daki PM_{10} sonuçlarının dörtte bir oranında artmasına sebebiyet verebilmektedir.

Yay (2006)'ın gerçekleştirmiş olduğu doktora tezinde, atmosferik bileşenlerden yüzey ozonu oluşum mekanizmaları ve açık ortam konsantrasyonlarının meteorolojik koşullarla, ozon öncülü bileşenlerle ve diğer atmosferik

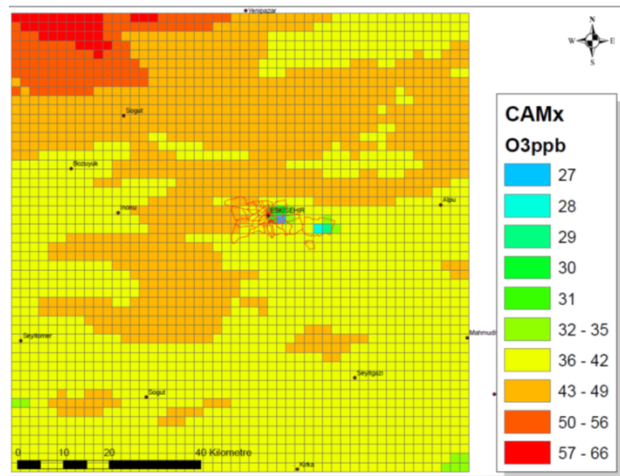
bileşenlerle ilişkisi Eskişehir ve çevresini kapsayan bir alan özelinde, hidrostatik olmayan MM5 ve CAMx modelleri yardımıyla incelemiştir. Çalışma kapsamında, Eskişehir'de açık ortam ozon konsantrasyonları ilk kez sürekli bir ölçüm sistemiyle belirlenmiştir. İkincil bir hava kirleticisi bileşeni olan ozonun oluşumu hem insan kaynaklı hem de doğal kaynaklardan atmosfere salınan, başta azot oksitler ve uçucu organik bileşikler olmak üzere, kirleticilerin emisyon hızlarına bağlı olduğundan, model uygulaması için gerekli olan çalışma alanındaki emisyonlar hesaplanmış ya da önceki hesaplamalar gözden geçirilerek gerekli güncellemeler yapılmıştır. Doğal kaynaklardan salınan (biyojenik) uçucu organik bileşiklerin ozon oluşumuna katkısı nedeniyle Türkiye için ilk kez biyojenik uçucu organik bileşiklerin emisyon envanteri hazırlanmıştır. Açık ortamda sürekli ozon ölçümleri ve model sonuçları, şehirdeki hakim rüzgar yönünün de etkisiyle bölgesel katkının, çalışma alanındaki ozon seviyeleri üzerinde önemli olabildiğini göstermektedir.

Şekil 4'te CAMx model ile 2 Temmuz 2005 tarihinde öğleden itibaren esen hafif güneydoğulu rüzgarların (Web-3) Eskişehir'in kuzey batısında oluşturduğu yüksek ozon değerleri tahmin edilmiştir. Model performansının değerlendirilmesi için model sonuçları ile Anadolu Üniversitesi İki Eylül Kampüsündeki sürekli ozon ölçümlerinin sonuçları karşılaştırılmıştır. Modelin iniş-çıkış eğilimlerini yakaladığı ancak maksimum ve minimum değerlerini çok iyi tahmin edemediği Şekil 5'ten görülmektedir.

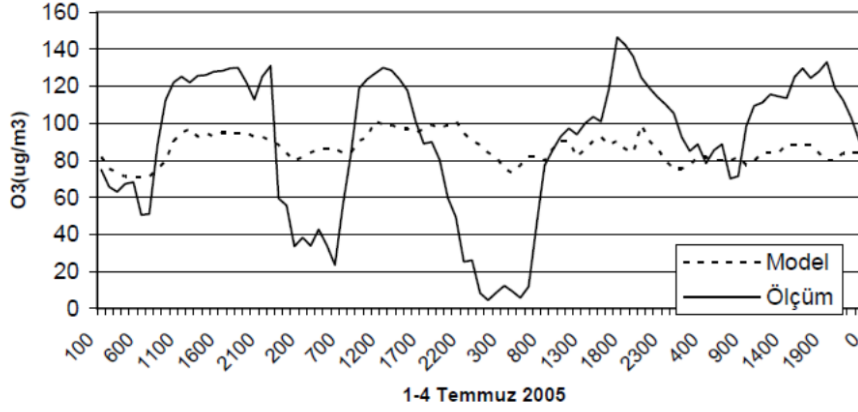
Elde edilen sonuçlara göre, genelde Eskişehir'de insan sağlığını olumsuz yönde etkilemesi beklenmeyen ve belirlenen limit değerlerin altında ozon konsantrasyonlarının hakim olduğu ancak bitkilerin ozonun etkilerinden korunması için belirlenmiş 40 ppb limit değerinin (AOT40) aşıldığı vurgulanmıştır.



Şekil 3. Beşiktaş ve Sarıçay istasyon gözlemleri ile (şeklin sol tarafındaki değerler) CMAQ modeli (şeklin sağ tarafındaki değerler) PM_{10} sonuçlarının İstanbul'daki zamansal değişimi



Şekil 4. 2 Temmuz 2005 15.00'te CAMx ozon dağılım simülasyonu



Şekil 5. 2 Temmuz 2005 15.00'te CAMx ozon dağılım simülasyonu

3.4. Yüksek Çözünürlüklü ve Kapsamlı Emisyon Envanteri Geliştirme Çalışmaları

Önceki çalışmalarda ülkemizde hassas ve kapsamlı bir emisyon bilgi bankası eksikliğinin vurgulanması üzerine İstanbul için yüksek çözünürlüklü bir emisyon envanteri geliştirilmesi üzerinde İm (2009), İm vd. (2010), Markakis vd. (2012) tarafından çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar kapsamında modern, GIS tabanlı ve model için hazır bir emisyon envanteri hazırlanmıştır. Envanter, enerji üretimi, evsel ve endüstriyel yanma, trafik ve gemilik dahil olmak üzere önemli antropojenik kaynaklardan kaynaklanan CO, NO_x, SO₂, NH₃, altı PM türü (organik and elementel karbon, sulfatlar, nitratlar, amonyum ve diğer partiküller) (PM_{2,5} ve PM₁₀) ve 23 metan içermeyen uçucu organik bileşik (NMVOC) türünün 2 km mekansal çözünürlükte aylık, günlük ve saatlik emisyon değerlerini içermektedir. Sonuçlar, araç trafiğinin CO, PM ve NO_x gibi çoğu kirlenici için, sanayinin SO₂ için, trafik ve çözücü kullanımının ise NMVOC'ler için en önemli kaynaklar olduğunu göstermiştir.

Elbir vd. (2001)'nin gerçekleştirdiği çalışmada Ege Bölgesi ölçeğinde sanayi, evsel ısınma ve trafik gibi önemli hava kirlenici kaynaklarının resmi istatistiklerine ve bilimsel ölçüm sonuçlarına dayanarak salımlar envanterlenmiştir. Çalışma sonunda elde edilen envanterin, bazı illerdeki veri eksikliğinden dolayı hedeflenen kalitede olmasa bile yurt içinde bölgesel hava kalitesi belirleme çalışmaları için örnek teşkil edecek ayrıntıda olduğu belirtilmiştir. Ege Bölgesi genelinde (Kütahya İli hariç) 131 904 ton yıl⁻¹ toz (PM), 899 831 ton yıl⁻¹ kükürt oksit (SO_x), 63 323 ton yıl⁻¹ NO_x, 18 515 ton yıl⁻¹ NMVOC ve 18 538 ton yıl⁻¹ CO emisyonunun atmosfere verildiği hesaplanmıştır.

Biyojenik emisyon envanteri hazırlama konusu ülkemizde son yıllarda önem kazanmaya başlamış ve Yay (2006), Daşdemir vd. (2012), İm vd. (2011) gibi çalışmalar yapılmıştır. Temsilîyet gücü yüksek, kapsamlı ve yüksek hassasiyetli biyojenik emisyon envanteri hazırlanabilmesi için online meteoroloji-kimya modeli WRF-CHEM'in Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature

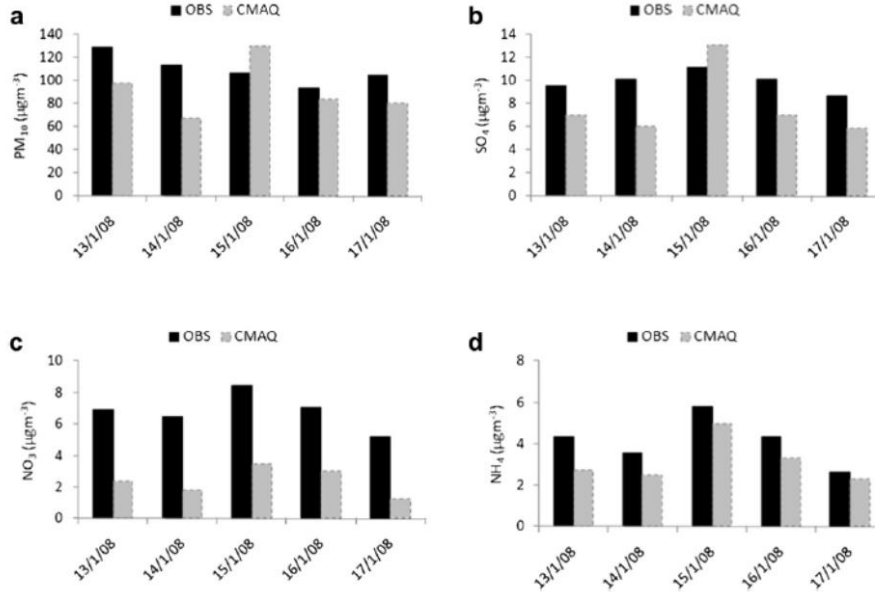
(MEGAN) modülü geliştirilmiştir. MEGAN, karasal bitki örtüsünden kaynaklanan isoprene, monoterpene'ler, sesquiterpene'ler, oksijenli bileşikler ve diğer VOC'ler ve CO emisyonları ile topraktan kaynaklanan NO olmak üzere 20 ana grupta toplanmış 134 biyojenik türü hesaplayabilmektedir.

3.5. MM5/CMAQ veya WRF/CMAQ Model Sistemi Kullanılarak Yapılan Çalışmalar

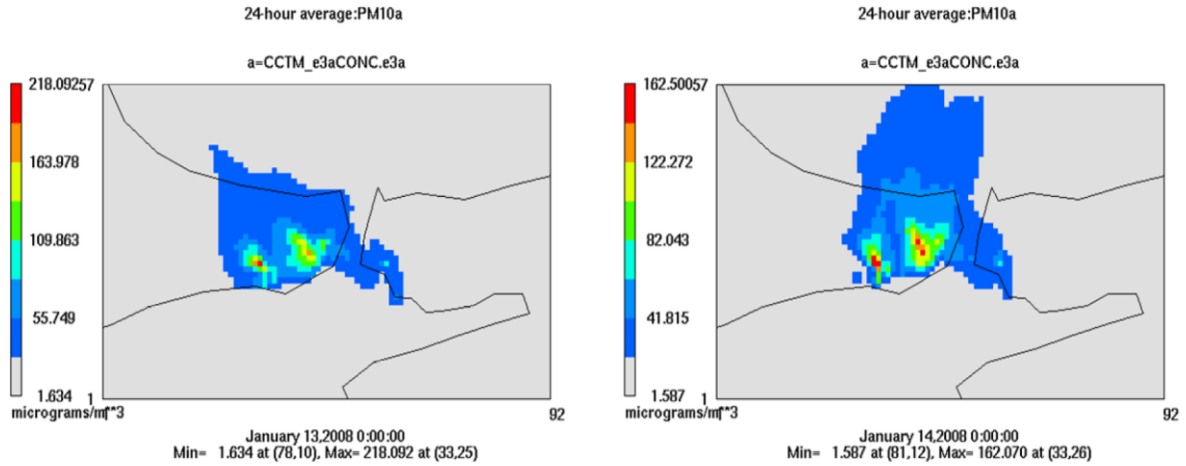
İm vd. (2009), COST-728 Aksiyonu çatısı altında ve TUJJB –TUMEHAP–03–06 projesi kapsamında MM5/CMAQ model sistemini kullanarak İstanbul üzerindeki ozon konsantrasyonlarını tahmin etmiş ve model değerlerini Kandilli ve Büyükkada'daki ölçüm verileri ile karşılaştırmıştır. Model performansının yarı kırsal istasyon olan Kandilli'de yüksek olduğu ancak bir arka plan istasyonu olan Büyükkada'da çıktıkların istasyonun konumundan dolayı gerçek değerlerinin altında kaldığı görülmüştür. Sonuçların istatistiksel değerlendirmesinde model sisteminin zamansal değişimleri ve büyüklükleri yakalamada oldukça başarılı olduğu belirtilmiştir.

İm (2009) ve İm vd. (2010) emisyon envanteri çalışmasından sonra modelleme çalışması gerçekleştirmiş ve PM₁₀ için 24 saatlik Avrupa Birliği standardı olan 50 µg m⁻³ değerini aşan beş günlük bir episod içeren 10 – 20 Ocak 2008 dönemi seçilmiştir. Hesaplanmış PM₁₀ konsantrasyonları İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından işletilen Alibeyköy ve Beşiktaş hava kalitesi istasyonu verileri ve Boğaziçi Üniversitesinde kurulmuş istasyon verileri ile karşılaştırılmış ve 24 saatlik ortalamalar için yapılan grafik ve istatistik analizler, modelin PM₁₀ konsantrasyonlarını kabul edilebilir ölçülerde tahmin edebildiğini göstermiştir (Şekil 6). Aynı şekilde, sülfat, nitrat ve amonyum aerosolları için yapılan analizler vasıtasıyla, modelin diğer kimyasallar için de iyi çalıştığı vurgulanmıştır.

Aerosol konsantrasyonlarının mekansal dağılımı incelendiğinde ise en yüksek konsantrasyonların emisyonların yüksek olduğu yerlerde meydana geldiği görülmüştür (Şekil 7). Çalışmada, model ile gözlemler arasındaki



Şekil 6. 24 saatlik ortalama CMAQ hesaplamalarının Boğaziçi Üniversitesi istasyonunda gözlenmiş değerlerle kıyaslaması



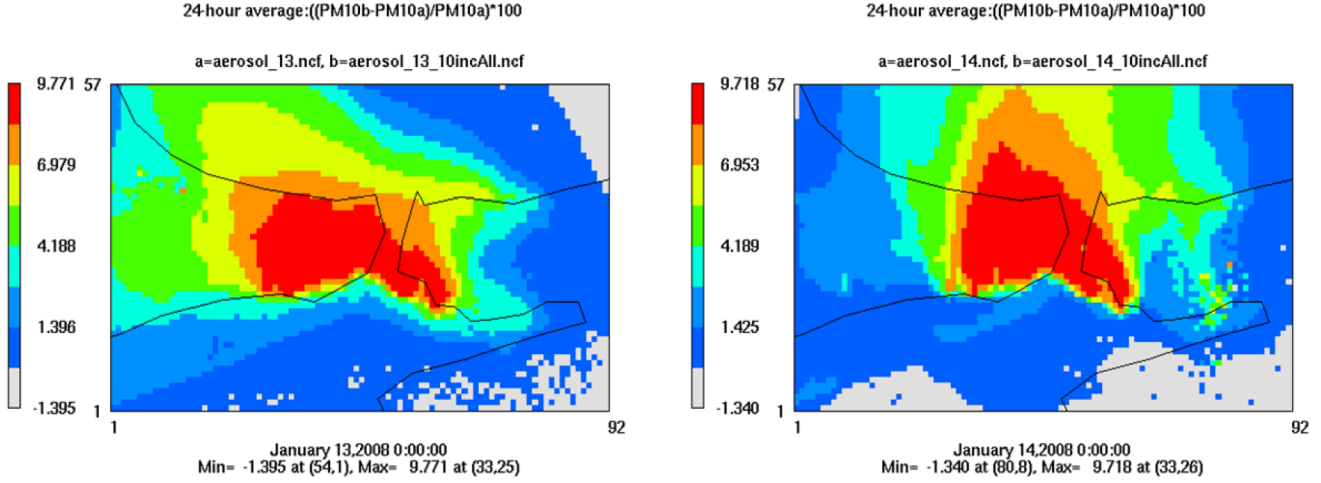
Şekil 7. 13 ve 14 Ocak 2008 günlerine ait CMAQ model çıktısı PM₁₀ dağılımları.

farkların, meteorolojik modellemede kullanılan parametreler, emisyon modellemesinde kullanılan emisyon faktörleri, profiller ve aktiviteler ile ölçümlerden kaynaklanan belirsizlikler gibi birçok hatadan meydana gelebileceği belirtilmiştir.

Aerosol seviyelerinin farklı emisyon senaryolarına olan hassasiyetini belirlemek için Brute zorlama metodu ile hassasiyet analizleri yapılmıştır. SO₂, NO_x, NH₃ ve VOC emisyonları ve tüm emisyonlar ayrı ayrı olmak üzere %10 artırılmış ve %10 azaltılmış ve PM₁₀, sülfat, nitrat ve amonyum aerosollarının bu zorlamalara tepkisi model alanı için hesaplanmıştır. Tüm emisyonlardaki %10'luk bir artışın, rüzgar ve kimyasal aktivite ile birlikte PM₁₀ seviyelerinde anlamlı artışlara sebep olduğu bulunmuştur (Şekil 8).

İstanbul, Türkiye'nin en büyük ve kalabalık şehri olmakla beraber dünyadaki en büyük megakentlerden biridir ve

sıkça yüksek hava kirliliği seviyelerine maruz kalmaktadır. Bu seviyeleri incelemek için istatistik yöntemler sıkça kullanılmıştır. Ancak, bu kirlilik seviyelerinin doğasını, yani meteorolojik ve kimyasal alt yapısını anlamamıza yardımcı olabilecek hava kalitesi modelleri çok az kullanılmıştır. Kindap ve Ünal (2011) gerçekleştirmiş oldukları proje kapsamında, İstanbul'daki çeşitli kaynaklardan ve özellikle gemilerden kaynaklanan emisyonlar, yüksek zamansal ve mekansal çözünürlükte, WRF meteorolojik modeli ve CMAQ hava kalitesi modeli ile çalışmıştır. İstanbul Boğazı başta olmak üzere tüm Marmara için gemi emisyon envanteri sistemi kurulumu ve modelleme çalışmasının ardından emisyon azaltım politikalarının üretilmesine destek olmak ve Marmara Bölgesi'nin Emisyon Kontrol Alanı (Emission Control Area-ECA) ilan edilmesi için başvuruların yapılmasına altyapı hazırlamak hedeflenmiştir.



Şekil 8. 13 ve 14 Ocak 2008 günlerine ait tüm emisyonlardaki %10'luk bir artışın neden olduğu PM_{10} anomalileri

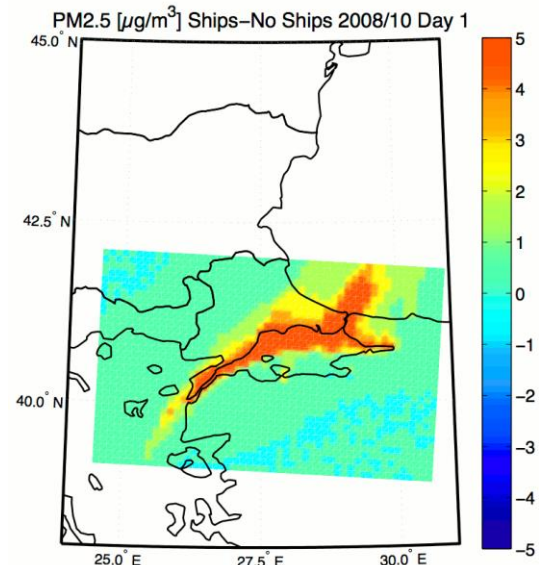
Bu çalışmada gemi emisyonlarının WRF/CMAQ model sistemi kullanılarak hesaplanan $PM_{2.5}$ üzerindeki etkisi Şekil 9'da sunulmuştur. Şekilde 1 Ekim 2008 yılına ait gemilerin varlığındaki $PM_{2.5}$ değerlerinin gemilerin olmadığı durumdaki $PM_{2.5}$ değerlerinden farkı gösterilmiştir. Gemi emisyonlarının etkisinin zamansal dağılımı ise Şekil 10'da sunulmuştur. Gemi kaynaklı emisyonların özellikle İstanbul civarında ciddi anlamda partikül madde kirliliğinde artışa sebep olduğu belirtilmiştir. SO_2 ve NO_2 üzerinde yapılan çalışmalar da göz önüne alındığında gemi kaynaklı emisyonların hava kirliliğini %25 ile %50 oranında artırdığı görülmüştür.

İm vd. (2011) 2008 haziran ayında meydana gelmiş yaz episodundaki yüzey ozon seviyelerini, İstanbul için geliştirilmiş emisyon envanterini kullanan MM5/CMAQ modelleme sistemi ile çalışmıştır. Bu çalışmada biyojenik emisyonların ozon seviyesi üzerindeki etkilerini ortaya koymak için iki set model simülasyonu gerçekleştirilmiştir. İlk simülasyon sadece antropojenik emisyonları kullanırken diğeri hem antropojenik hem de biyojenik emisyonları kullanmıştır. Biyojenik emisyonların eklenmesi model performansını anlamlı bir şekilde artırmış ve düşük gece konsantrasyonlarının ve ozon değerlerinin zamansal değişiminin tahmini konularında başarı seviyesinde olumlu iyileştirme sağlamıştır. Terpene emisyonlarının gece ozon parçalanmasında önemli bir rolünün olduğu ortaya konmuştur. Biyojenik NMVOC emisyonlarının İstanbul'un rüzgar yönü doğrultusundaki ozon konsantrasyonlarını 25 ppb mertebesine varan miktarlarda artırabildiği (Şekil 11) ve VOC/ NO_x oranını hemen hemen iki katına çıkarabildiği bulunmuştur.

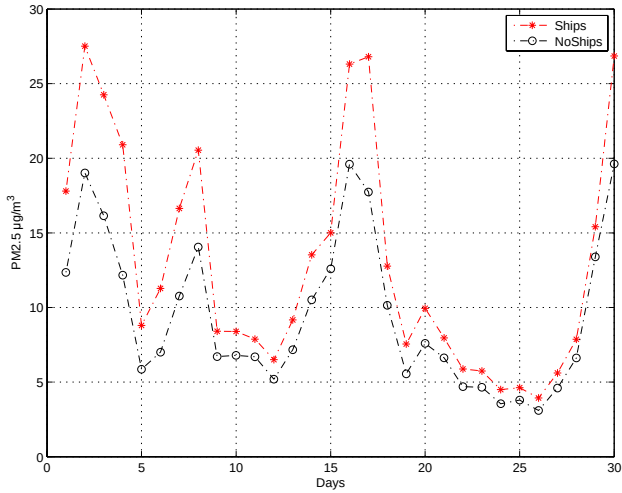
Ünal (2009) İstanbul Büyükşehir Belediyesi Strateji Geliştirme Daire Başkanlığı'nın Toplu Taşımanın İstanbul Hava Kalitesine Pozitif Etkilerinin Belirlenmesi: Metrobüs Örneği başlıklı projesinde Amerikan Çevre Ajansı (USEPA) tarafından kullanılan ve ulaşımdan kaynaklanan emisyonların şehirlerdeki hava kirliliğine etkisini rakamsal olarak

ortaya koyan "Models3" modelleri (Meteorolojik modelleme için WRF ve hava kalitesi modellemesi için CMAQ) kullanılarak metrobüs projesi ile birlikte İstanbul'da metrobüs hattı etrafında hava kalitesinde, partikül maddenin yanı sıra O_3 , CO , SO_2 gibi kirleticilerde, meydana gelen değişimler incelenmiştir. Çalışmada İm vd. (2010) tarafından geliştirilmiş 2 km çözünürlüğündeki emisyon envanteri yeni verilerle güncellenmiştir.

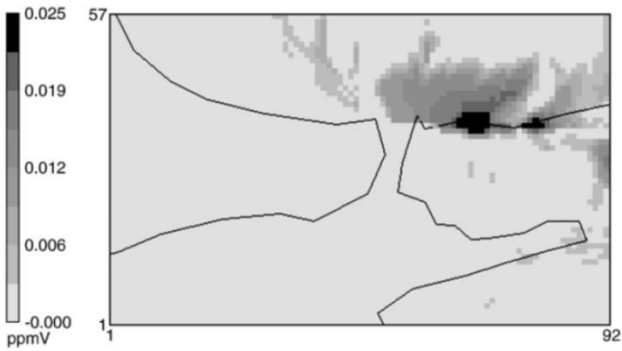
Bölgedeki öncü kirlenici emisyonlarının ozon konsantrasyonları üzerindeki etkisini bulabilmek için duyarlılık simülasyonları gerçekleştirilmiştir: biyojenik ve antropojenik NO_x ve NMVOC seviyeleri ± 30 olarak ötelenmiştir. Duyarlılık çalışmaları özellikle rüzgar yönü doğrultusunda NO_x duyarlı bir kimya sürecinin olduğunu ortaya koymuştur (Şekil 12).



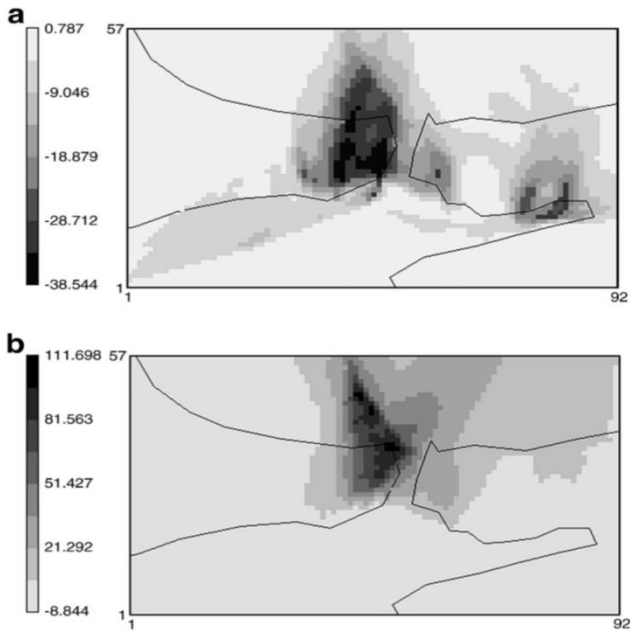
Şekil 9. Marmara Denizindeki gemilerden kaynaklanan emisyonların $PM_{2.5}$ üzerindeki etkisinin mekânsal gösterimi



Şekil 10. Marmara Denizindeki gemilerden kaynaklanan emisyonların $PM_{2.5}$ üzerindeki etkisinin zamansal gösterimi



Şekil 11. Maksimum ozon değerleri için antropojenik ve biyojenik emisyonlar ile gerçekleştirilmiş CMAQ simülasyonunun sadece antropojenik emisyonlarla gerçekleştirilmiş olandan farkı



Şekil 12. Biyojenik ve antropojenik emisyonların varlığında çalıştırılmış CMAQ modeline göre 13 Haziran 2008 günü 24 saatlik ortalama ozon konsantrasyonlarının a) NO ve b) VOC emisyonlarındaki %30'luk artışa yüzde olarak verdiği cevap

Şekil 13'te 15 Ocak 2008 tarihinde PM_{10} için metrobüs öncesi ve metrobüs sonrası arasındaki günlük ortalama farklar verilmektedir. Model çalışması PM_{10} için günlük maksimum azalışı $3,31 \mu g m^{-3}$ olarak, CO için 0,0737 ppm olarak vermektedir. Benzer şekilde, metrobüs hattı boyunca ve civar bölgelerde analiz edilen tüm kirlenici seviyelerinde azalmalar tesbit edilmiştir.

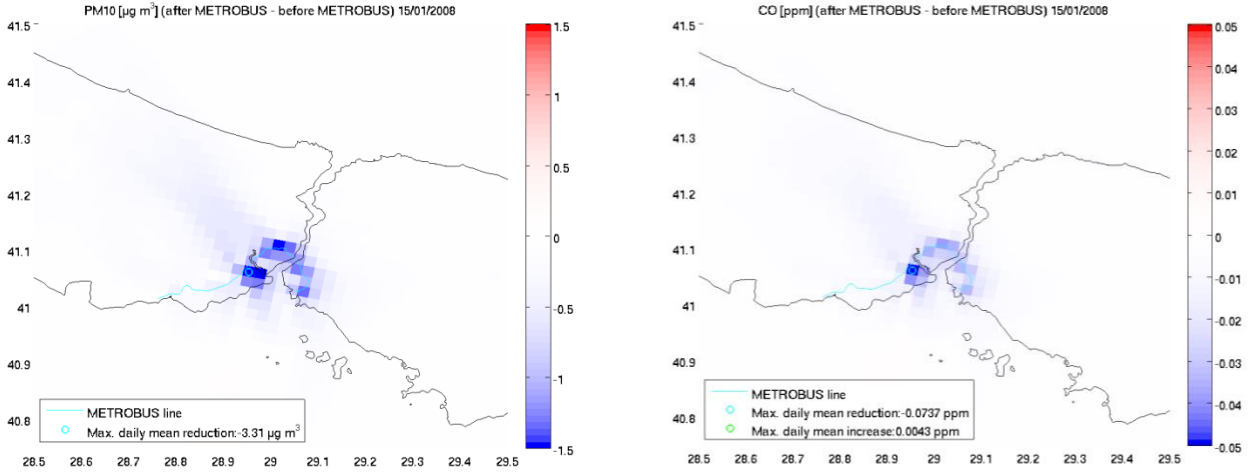
4. Lagrange Model Sistemleri

4.1. CALMET/CALPUFF Model Sistemi Kullanılarak Yapılan Çalışmalar

CALMET/CALPUFF modelleme sistemi bir 3-D diagnostik meteorolojik model olan CALMET ve bir hava kalitesi dispersiyon modeli olan CALPUFF'tan (California Puff Model) oluşmaktadır. Gaussian dispersiyon esasına dayanan CALPUFF, bir Lagrange puff modelidir. CALMET/ CALPUFF model sistemi, kirlenici taşınımı, ıslak-kuru birikim süreçleriyle kirlenici giderimi ve kimyasal reaksiyonlarla dönüşüm sırasında zamansal ve mekansal olarak çeşitlilik gösteren meteorolojik koşulların etkilerinin hesaplarını yapabilen çok tabakalı bir dağılım modelidir.

Bu model sistemi ile ülkemizde yapılan ilk çalışmalardan bir tanesi Elbir (2003) tarafından İzmir'deki endüstriyel ve evsel ısınma kaynaklarından salınan SO_2 'nin dispersiyon tahmini için gerçekleştirilmiştir. Model alanı İzmir merkez olmak üzere 1 km'lik gridlerle 80×100 km'lik bir bölgeyi içine almıştır. Model performansını belirleme amaçlı olarak tahmin edilen ve ölçülen değerlerin karşılaştırılması için 'root mean square error' (RMSE) ve 'index of agreement' (d) istatistik analizleri gerçekleştirilmiştir. 2000 yılı için yapılmış çalışmada dört ölçüm istasyonu için hesaplanmış 'd' değerleri 0,51–0,77 aralığında ve RMSE ise 0,36–0,66 aralığında değişmiştir. Dört istasyon için genel model performansı %68 doğrulukla 'iyi' olarak nitelendirilmiştir.

Bu model sistemi ile ülkemizde yapılan ilk çalışmalardan başka bir tanesi de İm (2003) ve İm ve Yenigün (2005) tarafından Yatağan bölgesi için gerçekleştirilmiştir. Muğla'daki Yatağan Termik Santrali emisyonları uzun yıllardan beri bölgede ve özellikle Yatağan kasabasında ciddi hava kirliliği problemlerine sebep olmaktadır. Bu çalışmada, 2 ve 3 Aralık 2000 tarihlerinde, Yatağan Termik Santralinden kaynaklanan SO_2 kirliliği, CALMET meteoroloji modeli ve Gauss tabanlı CALPUFF duman dağılım modeli kullanılarak modellenmiştir. CALMET 96 saatlik meteorolojik alanları, CALPUFF da saatlik SO_2 konsantrasyonlarını tahmin etmek için kullanılmıştır. Model alanı doğu–batı ve kuzey–güney yönlerinde 15'er km olarak seçilmiş ve alan 1 km'lik gridlere ayrılmıştır. Model çalışmasında Yatağan Termik Santralinin emisyon değerleri kullanılmış ve yer seviyesi meteorolojik verileri Yatağan Meteoroloji İstasyonundan yukarı atmosfer verileri ise Isparta Meteoroloji İstasyonundan alınmıştır. Sonuç olarak, güney batılı düşük hızlı rüzgarların ve gece saatlerinde oluşan inversiyon tabakalarının, kirlenicilerin



Şekil 13. 15 Ocak 2008 tarihinde PM₁₀ ve CO için günlük ortalama farklar

Yatağan bölgesi üzerinde tutularak yüksek konsantrasyonlara çıkmasına neden olduğu bulunmuştur. Model sonuçları, Muğla İl Çevre Müdürlüğü'nce yapılan ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Model sonuçlarına göre, kirleticiler, kaynağın kuzeydoğu tarafında birikmiştir ve bu sonuç, ölçümlerce de doğrulanmıştır. Ancak, model sonuçları ile ölçüm sonuçları arasında, büyüklük açısından farklar görülmüştür. 2 ve 3 Aralık 2000 günlerinin sabah saatlerinde, SO₂ konsantrasyonlarının yüksek değerlere ulaştığı görülmüş ve Yatağan ilçesinin bu kirlilikten ciddi bir biçimde etkilendiği sonucuna varılmıştır. Hassasiyet analizleri, konsantrasyonların emisyonlarla doğru orantılı olduğunu, ancak rüzgar hızının, diğer meteorolojik parametrelere kıyasla daha önemli bir parametre olduğunu ortaya koymuştur.

Tayanç ve Berçin (2007) İzmit Körfezindeki SO₂ dispersiyonunu CALMET/CALPUFF sistemini kullanarak 28 Ocak, 12 Şubat ve 26 Şubat 1997 olmak üzere üç hava kirliliği epizodu için modellemiştir. Bu günler, basıncın 1032 mb'a ulaştığı yüksek basınç sistemlerinin, düşük rüzgar hızlarının ve sıcaklığın 0°C'a düştüğü soğuk günlerin hakimiyeti ile karakterize edilmişlerdir. Bu hava kalitesi açısından kritik günler için gerçekleştirilmiş saatlik simülasyonlar, 1 000 µg m⁻³'ü aşan SO₂ konsantrasyon değerleri ile çok kirli havanın Tüpraş ve Gebze'nin rüzgar yönü doğrultusunda taşındığını göstermiştir. Gece ve sabahın inversiyon ile birlikteliği durumunda gerçekleştirilmiş simülasyonlar, meltem ile birlikte olan öğleden sonrası simülasyonlarından daha yüksek değerler oluşturmuştur. Model verifikasyonu sekiz istasyonda ölçülmüş günlük ortalama değerlerin o noktalara tekabül eden model tahmin değerleri ile karşılaştırılması ile yapılmıştır. Sonuçlar, her üç epizod durumu için de modelin Gebze'deki değerleri 'iyi' olarak tahmin ettiğini göstermiştir. Diğer alıcı noktalarda ise modelin zaman zaman daha fazla, zaman zaman da daha az tahminlerde bulunduğu belirtilmiştir.

Elbir vd. (2010)'nin İstanbul için yapmış oldukları emisyon envanter çalışmasından sonra CALMET/CALPUFF sistemi kullanılarak hava kalitesi tahminleri gerçekleştirilmiştir. Model tahminlerinin temsil edilebilirlik seviyesi gözlenen hava kalitesi değerleriyle karşılaştırılarak hesaplanmıştır. Bunun için, model tahminleri 10 hava kalitesi izleme istasyonundan elde edilen konsantrasyonlarla mukayese edilerek değerlendirilmiştir. Tahmin edilen ve ölçülen konsantrasyonların ortalamasının karşılaştırılması, PM₁₀ dışında diğer tüm kirlenici tahminlerinin uyumunun yüksek olduğunu göstermektedir. PM₁₀ konsantrasyonu tahmini için toplam doğruluk %37 iken, NO_x, CO ve SO₂ konsantrasyonu tahminlerinin toplamdaki doğruluğu ise sırasıyla %44, %57 ve %58 olarak bulunmuştur. Her bir ölçüm istasyonu ayrı olarak değerlendirildiğinde Ümraniye, Aksaray ve Üsküdar istasyonlarındaki tahminlerin doğruluğunun NO_x için %76, CO için %75, SO₂ için %67 ve PM₁₀ için %50'lik toplam doğruluk değerleriyle daha iyi olduğu belirtilmiştir. Bununla birlikte Sarıyer İstasyonunda PM₁₀ ve SO₂ için doğruluk %39, CO için %41 olarak bulunmuştur. Çalışma neticesinde tahminlerdeki belirsizliğin emisyon hesaplamaları ve dağılım modelinden kaynaklanmış olabileceği vurgulanmıştır.

4.2. Diğer Hava Kalitesi Modelleri ile Yapılan Çalışmalar

ISC (Industrial Source Complex) modeli de Lagrange temelli bir Gauss modelidir ve iki türü vardır: ISCST (Industrial Source Complex Short Term) ve ISCLT (Industrial Source Complex Long Term). ISC modeli, nokta kaynaklara ilave olarak alan kaynaklarını da modelleyen algoritmalar içerir. Literatür taraması yapıldığında bu modelin ülkemizde günümüze gelinceye kadar oldukça yaygın bir şekilde kullanıldığını görmekteyiz (Kayın vd., 1995; Atımtay ve Kayın, 1997; Tiris vd., 1997; Elbir, 2002; Uyar vd. 2007; Arar, 2007; Dölek, 2007; Elbir vd., 2007; Saral vd., 2009; İlek ve Elbir, 2012).

Bunların dışında da hava kirliliği ile ilgili çeşitli amaçlara yönelik modeller kullanılmaktadır. Örneğin, yörünge modelleri, sokak kanyon modelleri, yapay sinir ağları temelli modeller, tracer modeller, emisyon modelleri, birikim modelleri, kaynak belirleme ve alıcı ortam modelleri vb. Bu makalenin kapsamına girmediğinden bu konularda yapılan çalışmalara yer verilmemiştir.

5. Sonuçlar

Hava kalitesi çalışmalarında bölgenin her noktasında ölçüm yapmak mümkün değildir. Ölçüm yapılmamış diğer yerlerdeki konsantrasyon değerlerinin belirlenmesinde hava kalitesi modelleri kullanılır. Modelin sınanması aşamasında hava kalitesi model tahminleri ile ölçüm verileri karşılaştırılarak model performansı belirlenir. Kullanılan model açık kaynaklı bir koda sahipse, zayıf halka olduğu düşünülen çeşitli süreçlerin koduna müdahale edilerek modelde iyileştirme sağlanır.

Günümüzde gelişmiş bir hava kalitesi modeli meteorolojik model ile birlikte bir sistem oluşturmaktadır. Meteorolojik modelin ürettiği atmosferik koşullar hava kalitesi modeline girdi olarak katılır. Meteorolojik modeller diagnostik, yani mevcut şartları simüle eden, veya prognostik,

yani geleceğe yönelik tahmin yapan bir kurguya sahip olabilirler. Dolayısıyla çeşitli senaryolar ışığında geleceğe yönelik hava kalitesi tahminleri yapmak da mümkün olabilmektedir. Ancak burada açıkça belirtmekte fayda gördüğüm bir husus, model ne kadar kapsamlı olursa olsun, girdi olarak verilen parametrelerin (emisyon değerleri, topografik veriler, meteorolojik gözlem değerleri gibi) kalitesi ve çözünürlüğü düşükse, model performansı da o derece düşük olacaktır. Belirsizlikleri minimize etmek için atmosferdeki fiziksel ve kimyasal süreçleri iyi işleyebilen ve tüm model alanı üzerinde kirlenici konsantrasyonlarını yüksek hassasiyetle belirleyebilen üç boyutlu modelleri kullanmanın yanı sıra, yüksek çözünürlüğe sahip girdi veri setlerini de oluşturup model sistemlerinde kullanmak gerekmektedir.

Ülkemizde özellikle son zamanlarda üst düzey hava kalitesi modellemesi ile ilgili çeşitli projelerin yapılması ve bu konudaki çalışmaların ivme kazanması memnuniyet vericidir. Burada yayınına referans verdiğim veya veremediğim tüm bilim insanlarımızı tebrik eder, hava kalitesi model çalışmalarının ülkemizin tüm bölgelerine yayılmasını temenni ederim.

Kaynaklar

- Anteplioglu, Ü., Incecik, S., Topcu, S., 2004. Simulation of Meteorological Conditions and Surface Ozone Concentrations with MM5 and CAMx in Istanbul. 16. *Air Pollution Modeling and Its Application* 145-151.
- Arar, S., 2007. *Eskisehir'deki Sanayi Kaynaklı NO₂ ve CO Emisyonları ve Modelleme*. Doktora Tezi, Eskisehir Osmangazi Üniversitesi.
- Atımtay, A., Kayın, S., 1997. Air pollution modelling studies in the city of Ankara. *Air Quality Management: at Urban, Regional and Global Scales*, Editorler: Incecik, S., Ekinci, E., Yardim, F., vd., 432-436.
- Daşdemir, O., Yaman, B., Odabaşı, M., Elbir, T., 2012. Farklı Maki Türlerinden Kaynaklanan Biyojenik Uçucu Organik Bileşik (BVOC) Emisyonlarının Belirlenmesi, *Hava Kirliliği Araştırmaları Dergisi* 1, 41-52.
- Dölek, E., 2007. *Comparison of ISCST3 and AERMOD Air Dispersion Models: Case Study of Çayırhan Thermal Power Plant*. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- Elbir, T., Müezzinoğlu, A., Bayram, A., Seyfioğlu, R., Demircioğlu, H., 2001. Ege Bölgesi Hava Kirlenici Emisyon Envanteri. *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi* 3, 21-27.
- Elbir, T., 2002. Application of an ISCST3 model for predicting urban air pollution in the Izmir metropolitan area. *International Journal of Environment and Pollution* 18, 498-507.
- Elbir, T., 2003. Comparison of model predictions with the data of an urban air quality monitoring network in Izmir, Turkey. *Atmospheric Environment* 37, 2149-2157.
- Elbir, T., Dincer, F., Muezzinoglu, A., 2007. Evaluation of measured and predicted odor concentrations around a meat packaging and rendering plant. *Environmental Engineering Science* 24, 313-320.
- Elbir, T., Mangir, N., Kara, M., Simsir, S., Eren, T., 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.
- Ertürk, F., 1986. Investigation of Strategies for the Control of Air Pollution in the Golden Horn Region, Istanbul, Using a Simple Dispersion Model. *Environmental Pollution Series B-Chemical and Physical* 11, 161-168.
- İlek, F., Elbir, T., 2012. İzmir Körfezi'nde Toplu Taşıma Yapan Deniz Taşıtlarından Kaynaklanan Hava Kirlenicilerin Kent Atmosferindeki Dağılımlarının EPA-ISCST3 Modeli ile Belirlenmesi. *Hava Kirliliği Araştırmaları Dergisi* 1, 2-9.
- İm, U., 2003. Modeling of SO₂ Emissions from Yatagan Power Plant, Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi.
- İm U., 2009. İstanbul'daki aerosol seviyelerinin yüksek çözünürlüklü MM5/CMAQ hava kalitesi modelleme sistemi ile modellenmesi, Doktora Tezi, Boğaziçi Üniversitesi.
- İm, U., Yenigun, O., 2005. An application of a puff dispersion model on power plant emissions in Yatagan region, Turkey *International Journal of Environment and Pollution* 23, 314-324.
- İm U., Incecik, S., Markasis, K., Kindap, T., Poupkou, A., Yenigun, O., Odman, M.T., Topcu, S., Tayanc, M., Melas, D., 2009. An investigation of high summertime ozone levels in Istanbul. *30th NATO/SPS International Technical Meeting on Air Pollution Modeling and its Application*, 18-22 May 2009, San Francisco, USA.
- İm, 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 the high resolution WRF/CMAQ modeling system. *Atmospheric Environment* 44, 3085-3094.

- İm, U., Poupkou, A., Incecik, S., Markakis, K., Kindap, T., Unal, A., Melas, D., Yenigun, O., Topcu, S., Odman, M.T., Tayanc, M., Guler, M., 2011. The impact of anthropogenic and biogenic emissions on surface ozone concentrations in Istanbul. *Science of the Total Environment* 409, 1255-1265.
- Kayın, S., Onder, K., Tokinan, N., vd., 1995. Comparison of environmental impacts of natural gas-fired combined cycle power plants with different cooling systems, *Efficiency, Costs, Optimization, Simulation And Environmental Impact of Energy Systems*, Editorler: Gogus, Y.A., Ozturk, A., Tsatsaronis, G., 2, 769-775.
- Kindap, T., Chen, S.H., Unal, A., Odman, M.T., Karaca, M., 2005. A First Approach to Estimating Air Pollutants in Turkey Using an Air Quality Model. *3rd International Symposium on Air Quality Management at Urban, Regional and Global Scales*, Istanbul, Turkey, 1, 619-628.
- Kindap, T., Karaca, M., 2006. Avrupa kaynaklı aerosollerin Türkiye'ye taşınımı. *İTÜ dergisi/d* 5, 3-12.
- Kindap, T., Unal, A., Chen, S.H., Hu, Y., Odman, M.T., Karaca, M., 2006. Long-Range Aerosol Transport from Europe to Istanbul, Turkey. *Atmospheric Environment* 40, 3536-3547.
- Kindap, T., 2008. Identifying the Trans-Boundary Transport of Air Pollutants to the City of Istanbul Under Specific Weather Conditions. *Water Air and Soil Pollution*, 189, 279-289.
- Kindap T., Ünal A., 2011. Yaşanabilir İstanbul için Gemi Emisyon Kontrol Alanı, 2011/KCE/20 no'lu İstanbul Kalkınma Ajansı (İSTKA) Proje Raporu.
- 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.
- Saral, A., Demir, S., Yildiz, S., 2009. Assessment of odorous VOCs released from a main MSW landfill site in Istanbul-Turkey via a modelling approach, *Journal of Hazardous Materials* 168, 338-345.
- Tayanç, M., Berçin, A., 2007. SO₂ Modeling in İzmit Gulf, Turkey, During the Winter of 1997: 3 Cases. *Environmental Modeling and Assessment* 12, 119-129.
- Tiris, M., Dilmac, S., Tiris, C., Ekin, E., 1997. Modelling of SO₂ pollution changes with improving thermal performance of buildings in Gebze, Turkey. *Energy* 22, 477-480.
- Uyar, G., Ören, M., Yildirim, Y., Ince, M., 2007. Mosses as indicators of atmospheric heavy metal deposition around a coal-fired power plant in Turkey, *Fresenius Environmental Bulletin* 16, 182-192.
- Ünal A., 2009. Toplu Taşımanın İstanbul Hava Kalitesine Pozitif Etkilerinin Belirlenmesi: Metrobüs Örneği. İBB İstanbul Altyapı-Çevre-Enerji Kullanımı Sektörü Akademik Araştırmalar Projesi Raporu, İstanbul Büyükşehir Belediyesi Strateji Geliştirme Daire Başkanlığı.
- Yay, O.D., 2006. Eskişehir ve Yakın Çevresinde Yüzey Ozon Dağılımının MM5 ve CAMx Modelleri Kullanılarak Belirlenmesi", Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- Web-1. <http://www.epa.gov/scram001/photochemical/index.htm>
- Web-2. <http://www.wrf-model.org/index.php>
- Web-3. http://www.wunderground.com/history/station/17124/2005/7/2/DailyHistory.html?req_city=NA&req_state=NA&req_statename=NA



Hava Kirliliği Araştırmaları Dergisi
www.hkad.org



Review Article

Air Quality Modeling in Turkey

Mete TAYANÇ✉

Marmara University, Department of Environmental Engineering, Göztepe Campus 34722 İstanbul, Turkey

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

ABSTRACT

Air quality modeling studies are done for the behaviour of air pollutants emitted from various sources under different meteorological conditions by considering main processes such as chemical production/destruction, dispersion, deposition, and advection/convection. In Turkey, besides the use of models based on mass balance and Lagrangian approach such as ATDL, ISC, CALPUFF, and AERMOD, the use of Eulerian models having high resolution in time and space, and including many complex atmospheric processes together such as coupled MM5/CMAQ, WRF/CMAQ, and MM5/CAMx models have been increasing. In this article, air quality modeling studies carried out for Turkey will be presented with a scope as broad as possible in a historical perspective.

Keywords: Air quality, modeling, Lagrangian, Eulerian, meteorology.

© Turkish National Committee of Air Pollution Research and Control.