

Avrupa kaynaklı aerosollerin Türkiye'ye taşınımı

Tayfun KINDAP^{*}, Mehmet KARACA

İTÜ Avrasya Yer Bilimleri Enstitüsü, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Şehirleşmenin yaygın olduğu Türkiye'nin kuzey ve batı kısımlarında genellikle yüksek hava kirliliği olayları ile karşı karşıya kalınmaktadır. Bununla birlikte, bu kirliliğin büyük bir kısmından sorumlu olduğu düşünülen Avrupa ülkeleri için, şu ana kadar, uzun mesafeli taşınımın açısından kapsamlı bir araştırma yapılmadığı görülmüştür. Bu çalışmada amaç, İstanbul hava kirliliğine, Avrupa kökenli uzun mesafeli aerosol taşınımının hem niteliksel hem de niceliksel olarak katkısını araştırıp, tüm yönleriyle açıkça ortaya koymaktır. Bu çalışmanın sonucunda, söz konusu katkının zaman zaman şehrin kirliliğinin yarısından sorumlu olduğu açıkça ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: *Hava Kirliliği, Uzun mesafeli taşınım, Emisyon modeli, PM10.*

Long-range aerosol transport from Europe to Turkey

Abstract

Northern and western parts of Turkey frequently experience air pollution episodes. Transport of air pollutants from Europe to these regions has not been studied sufficiently. This study aims to identify and analyze the contribution of long range aerosol transport to air pollution in the city of Istanbul. Istanbul is the largest urban settlement in northwestern Turkey, with more than 12 million inhabitants in the metropolitan area. Whenever the prevailing wind direction is westerly or northwesterly, such as the case of the episode studied here, a significant fraction of the pollutants emitted from Europe are transported to and deposited in Turkey. The response of Istanbul PM10 can be as much as 26% according to the sensitivity analyses results, when anthropogenic emissions throughout Europe are changed by 50%. This result suggests that trans-boundary sources may be responsible for as much as half of the poor air quality of Istanbul. This paper presents the methodology developed in this study as well as the results obtained. An emission processing module was developed to prepare the emission inputs required by an advanced air quality modeling system. The long-range aerosol transport simulated by this modeling system was further supported by trajectory analysis. Backward trajectories and long-range transport modeling indicated similar source/receptor relationships between Europe and Turkey.

Keywords: *Air pollution, transboundary aerosol transport, emission modeling, PM10.*

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Tayfun KINDAP. kindap@itu.edu.tr; Tel: (212) 285 71 41.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Avrasya Yer Bilimleri Enstitüsü'nde tamamlanmış olan "Avrupa kaynaklı aerosollerin Türkiye'ye taşınımı" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 28.03.2005 tarihinde dergiye ulaşmış, 13.07.2005 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 30.09.2006 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Giriş

Atmosferde uçan katı partiküllerin gazlara nazaran çok daha ciddi sağlık problemleri yarattığı ve görüş mesafesini daha fazla etkilediği artık iyi bilinen bir gerçektir. Özellikle partikül madde (PM) kirliliği ile devamında gelen, günden güne artan ölüm oranları arasındaki açık ilişki araştırmacıların ilgisini bu yöne kolayca çekmektedir. Bu noktada, şehirlerdeki son derece yüksek PM oranları, araştırmaların öncelikli olarak bu konulara odaklanmasını zorunlu kılmaktadır. Kirliliği, şehirleşmenin beraberinde getirdiği kendi kaynakları oluşturduğu gibi, buna ek olarak uzun mesafeli taşınımların da bu yüksek kirlilik olaylarında önemli katkılarda bulunduğu bilinmektedir. Sonuç olarak, bir şehrin yüksek kirlilik değerlerinde, uzun mesafeli taşınımların yersel kaynaklar kadar önemli rol oynayabileceği gerçeği ortaya çıkmaktadır. O halde, kirlilik ile ilgili herhangi bir düzenleme, yaptırım veya alınacak kararlar öncesinde, yerel emisyon kaynakları ile birlikte, uzun mesafeli taşınımları da göz önünde bulundurarak, farklı şehirlerde ve hatta farklı ülkelerdeki emisyon kaynaklarının da dikkate alınması gerekmektedir.

Avrupa'da, uzun mesafeli aerosol taşınımı ile ilgili çalışmalar Avrupa Gözlem ve Değerlendirme Programı (EMEP) çerçevesi altında yapılmaktadır. Bu çalışmalar, Avrupa şehirlerinde görülen partikül kirliliğinin önemli oranlarda uzun mesafeli taşınımlardan kaynaklandığını ortaya koymuştur (Baltensperger, 1999). Avrupa'da, bir çok ülkedeki şehirleşme ve çok fazla sayıdaki araç ve endüstri nedeniyle, insan kaynaklı emisyonların çok daha yaygın olduğu görülmektedir. Kıta Avrupa'sındaki endüstriyel aktiviteler, yüksek hacimdeki trafik ve şehirleşme, PM'nin özellikle şehirlerde yüksek seviyelerde görülmesine neden olmaktadır (EMEP/CCC-Report 8/99, 1999). Son yıllarda görüş mesafesini düşürmesi ve ekosisteme zarar vermesinin yanısıra, ciddi sağlık tehdidi (özellikle yaşlı ve çocuklar için) oluşturması nedeniyle PM ağırlıklı çok fazla araştırma ve düzenleme yapıldığı görülmektedir. Bu araştırmalar uzun mesafeli aerosol taşınımı ile insan sağlığına olumsuz etkileri arasında önemli bir ilişkinin olduğunu işaret etmektedir (EMEP/CCC-Report 8/99, 1999).

Aerosollerin kompozisyonları, morfolojisi, fiziksel ve termodinamik özellikleri, coğrafi konumlarına ve mevsimlere göre değişiklik göstermektedir (Finlayson-Pitts ve Pitts, 1986; Seinfeld ve Pandis, 1998; Alpert ve Hopke, 1981). Kuzeybatı Avrupa için yapılan çalışmalar, şehir ve kırsal alanlardaki PM10 (partikül madde çap büyüklüğü 10 µm'den küçük olanlar) konsantrasyonlarındaki farkın %20'yi geçmediğini göstermektedir (Van Der Zee vd., 1998). Buna ek olarak, yine Avrupa'da 14 şehir ve 14 kırsal alan için yapılan çalışmalarda, PM10 ve siyah duman için yapılan kış ölçümleri sonuçları, şehir ve kırsal alan için farkların nispeten küçük olduğunu göstermektedir (Hoek vd., 1997). Amerika Birleşik Devletleri'nde ise, bölgesel karakterdeki PM10 için benzer sonuçlar rapor edilmiştir (EPA-Air Quality Trends, 1996). Bu durum, uzun mesafeli kirletici taşınımlarının varlığı ile açıklanmaktadır.

Yine uzun mesafeli PM taşınımları ile ilgili çalışmalar Güney İskandinavya için de yapılmıştır (Pakkanen vd., 1996; Lannefors vd., 1983; Amundsen vd., 1992). Orta ve Doğu Avrupa'da görülen kükürtün, Britanya Adaları kaynaklı, uzun mesafeli taşınımlar sonucu olduğu saptanmıştır. Diğer bir çalışmada ise, Batı ve Doğu Avrupa'dan olan genellikle katı yakıtların kullanımını sonucu ortaya çıkan CO'in uzun mesafeli taşınımı sonucu, Akdeniz üzerinde sınır tabaka içerisindeki CO konsantrasyonlarına katkısının %60-80 civarında olduğu görülmüştür (Lelieveld vd., 2002). Hacısalıhoğlu vd. (1992), Karadeniz yakınlarındaki saha çalışmalarında çeşitli kirletici konsantrasyonlarının %70'nin Batı ve Orta Avrupa kökenli olduğunu saptamıştır. Sciare vd. (2003) ise, Akdeniz bölgesine olan ana aerosol katkısının insan kaynaklı emisyonlar açısından Orta Avrupa kaynaklı olduğunu göstermiştir.

Türkiye'nin batı ve kuzeybatı bölgelerinde son derece düşük hava kalitesi değerleri gözlemlenirken, bunun Avrupa ülkelerinden kaynaklandığı tahmin edilmektedir. Son yıllarda açıkça ortaya çıkmıştır ki, çok yüksek PM kirlilik gözlemleri, Avrupa üzerindeki batılı ve kuzeybatılı rüzgarlarla birlikte meydana gelmektedir. Örne-

ğın, 2002 yılı, 5 - 12 Ocak tarihleri arasında İstanbul'da düşük hava kalitesi gözlemlenmiştir. Dünya Sağlık Teşkilatı'nın (WHO, 2004) 24 saatlik PM10 eşik değeri olan $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ değeri bu tarihler arasında fazlasıyla aşılmaktadır. İstanbul'da, uzun mesafeli taşınımların PM10 değerlerindeki aşırı artışta rol oynadığı ciddi bir şekilde düşünölmeye, tartışılmaya başlanmıştır.

Bu çalışmanın amacı uzun mesafeli aerosol taşınımını niteliksel olarak göstermenin yanı sıra, verici/alıcı ilişkisi açısından Avrupa ve Türkiye arasında bazı sayısal sonuçları da ortaya koymaktır. Ne yazık ki, sadece İstanbul için mevcut olan saatlik PM10 ölçümleri bu araştırmayı değerlendirmemize olanak sağlamıştır. PM10 ölçümlerindeki bu olumsuzluğu rağmen, bu çalışmanın uzun mesafeli taşınım için yok denecek kadar az olan bilgi boşluğunu kısmen doldurmaya yardımcı olacağı ve kapsamlı bir bakış açısı da kazandıracığı şüphesizdir.

Avrupa kaynaklı emisyonların İstanbul PM10 konsantrasyonlarına etkisini araştırmak amacıyla çeşitli atmosferik modellerden yararlanılmıştır. Tüm model sistemi meteoroloji, emisyon ve hava kalitesi modelini içermektedir. Her bir model 50 km yatay çözünürlükte tüm Avrupa'yı kapsayacak şekilde tasarlanmıştır. Meteorolojik parametrelerin elde edilmesi amacıyla, 5. jenerasyon olan NCAR (National Center for Atmospheric Research) ve Penn State Üniversitesi'nin birlikte ortaya koyduğu MM5 modeli tercih edilmiştir. Emisyon modeli EME (Emission Model for Europe), bu çalışma için geliştirilmiştir ve EMEP (The European Monitoring and Evaluation Program) emisyon envanterinden yararlanılmıştır. Hava kalitesi modeli olarak ise, Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Dairesi'nin (US-EPA) geliştirdiği CMAQ (The Community Multiscale Air Quality Modeling System) model düşünülmüştür. Çalışma zamanı için İstanbul'da yüksek kirlilik olaylarının görüldüğü 2002 yılı Ocak 5-12 tarihleri arası seçilmiştir. Tüm çalışma, bir orjinal model çalışmasının yanı sıra, hassasiyet testlerinin yapılması amacıyla, bir çok defa tekrarlanan farklı oranlardaki, genellikle Doğu Av-

rupa ülkelerini içeren bölge için, değişik emisyon senaryolarını da içermektedir.

Avrupa için partikül madde ile ilgili verilerin, özellikle kimyasal kompozisyonları hakkındaki bilgilerin, hala çok sınırlı olduğu bir gerçektir. Daha önceleri yapılan çalışmalar ve şu anda mevcut olan ölçümler, daha doğru ve güvenilirliği kontrol edilmiş ölçümlere ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. Türkiye için ise henüz yeni başlanan aerosol ölçümleri ile durumun çok daha zor olduğu ortadadır.

Özetle, sadece çevre kirlilik değerlerini bilmek ve bunu tek başına değerlendirmek eksik bir yaklaşım olacaktır. Meteorolojik şartları da göz önünde tutarak olası uzun mesafeli taşınımları da bu değerlendirmenin içine almak gerekmektedir. Bu çalışmada, duyarlılık analizleri yardımıyla, Doğu Avrupa ülkeleri düşünölerek, sözkonusu taşınım İstanbul için ortaya konmaya çalışılmıştır. Bu nedenle bu çalışma beraberinde çok önemli, yeni ve faydalı bilgileri de getirmiştir.

Metodoloji ve model sistemi

Kirlilik oluşumu

İstanbul, 12 milyondan fazla nüfusu ile Kuzeybatı Türkiye'deki en büyük yerleşim merkezidir (Tayanc vd., 1998). Büyük şehirlerin kaçınılmaz sonucu olan trafik, endüstri ve yerleşim alanlarının çokluğu doğal olarak yüksek kirlilikli konsantrasyonlarını da beraberinde getirmektedir. İstanbul'da da buna benzer düşük hava kalitesi gözlemlerine özellikle son yıllarda sık sık rastlanmaktadır. Buna bir örnek olarak yine İstanbul'da yapılan 2002 yılı PM10 ölçümleri, Ocak 5 - 12 tarihleri arasında aşırı bir kirlilik artışının olduğunu işaret etmektedir.

İstanbul için yapılan PM10 ölçümleri Ocak ayı için ortalama $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ değerini verirken, saatlik ölçümlerde ise $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$ değerini geçtiği görülmektedir. Bu yüksek kirliliğin nedeni olarak yerel emisyonların yanı sıra, uzun mesafeli taşınımların da etkisi olduğu sanılmaktadır. Aslında Şekil 1'de görülen, Kuzey Avrupa üzerindeki oldukça kuvvetli batılı ve kuzey batılı rüzgarlar bu hipotezi kuvvetlendirmektedir.



Şekil 1. 900 mb daki simüle edilmiş rüzgar vektörlerinin 10 Ocak 2002 saat 00:00'daki konumları

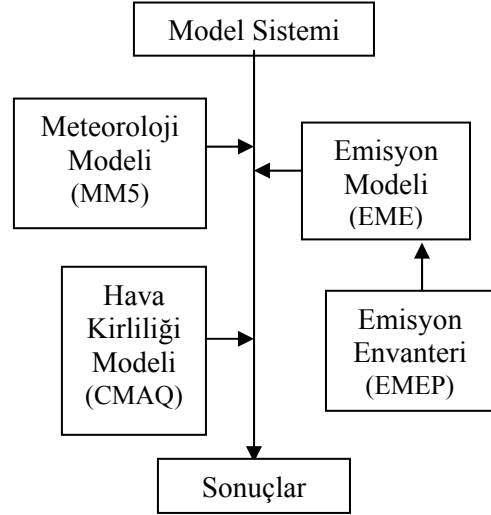
Bu rüzgarların, özellikle Orta ve Doğu Avrupa'daki kirleticileri Türkiye'ye taşımak için gerekli potansiyele sahip olduğu görülmektedir.

Model sistemine genel bakış

Bölgesel ölçekteki herhangi bir hava kirliliği modeli üç ana bileşenden oluşmaktadır: meteoroloji modeli, emisyon modeli ve kimyasal-taşıma modeli (Şekil 2). Meteorolojik model olarak NCAR/Penn State Mesoscale Model (MM5, Grell vd., 1994) ve kimyasal-taşıma modeli olarak US-EPA CMAQ (Byun ve Ching, 1999) modelleri tercih edilmiştir. Emisyon modeli (EME) ise bu çalışma için geliştirilmiştir.

Meteorolojik model

MM5 meteorolojik model, hava kirliliği çalışmalarında kullanmak için gerekli olan meteorolojik parametreleri elde etmede oldukça yaygın bir şekilde tercih edilen bir modeldir. Bu çalışmada da MM5 meteorolojik model kullanılmıştır. Yatay çözünürlüğü 50 km olmak üzere 137, 116, 37 grid sırasıyla doğu-batı, kuzey-güney ve düşey yön boyunca oluşturulmuştur. "RRTM" (Rapid Radiative Transfer Model) radyasyon şeması, "Kain-Fritsch Cumulus" parametrelendirmesi, "MRF" (Medium Range Forecast) sınır tabaka parametrelendirmesi ve "Simple Ice Microphysics" şeması model fiziği için tercih edilmiştir.



Şekil 2. Tüm model sistemi için veri akış şeması

Emisyon modeli

Emisyon modeli oldukça karmaşık ve modele özgü bir çok girdinin hazırlanması gereken ön çalışmaları da içeren zahmetli bir yöntemdir. Hava kirliliği modelleri tüm çalışma alanını içerecek şekilde her bir grid için, her bir zaman adımında, ayrışımı yapılmış emisyon değerlerine ihtiyaç duymaktadır. Şu an için tüm Avrupa'yı kapsayacak şekilde mevcut olan 2001 yılına ait sadece EMEP veri setine ulaşmak mümkün olmaktadır. Bu veride her bir Avrupa ülkesi için gridlenmiş olarak yıllık bazda kirletici değerleri mevcuttur. Bu nedenle bu yıllık değerlerin herhangi bir hava kirliliği modelinin ihtiyaç duyduğu saatlik değerler haline getirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla bir emisyon modeli geliştirilmiştir. Modelde, insan (antropojenik) ve doğal kaynaklı kirleticiler ayrı ayrı ele alınmıştır.

Antropojenik emisyonlar-İnsan kaynaklı (araçlar, endüstri vesaire) emisyonların yeryüzü üzerinde etkilemediği bir yerin olmadığı artık çok iyi bilinmektedir. Hatta Atlantik ve Büyük Okyanus'ların karalardan uzak orta kısımlarının üzerinde bile, antropojenik emisyonların önemli etkileri gözlenmektedir (Parrish vd., 1993; Dickerson vd., 1995). Bu çalışmada, EMEP'e ait tüm Avrupa kıtasını kapsayacak şekilde 2001 yılı veri seti kullanılmıştır. Bu veri seti antropojenik emisyonlar için 10 farklı kaynak sektörü olmak üzere yıllık toplam değerler bazında SO_x (SO₂+SULF), NO_x (NO₂+NO), NH₃,

organic bileşenleri (VOC) ve partikül maddeleri (PM) içermektedir. Fakat bu değerlerin Türkiye'yi de içerek şekilde özellikle doğu Avrupa için tahmin verisi olduğu ve detaylı bir çalışmadan uzak olduğunu belirtmek gerekmektedir.

Ayrışım-Herhangi bir emisyon envanteri yukarıda bahsedildiği gibi yıllık toplam olmak üzere belirli kirleticiler için değerler içerir. Bu değerlerin hava kirliliği modeline girdi olarak verilebilmesi için ayrıştırılması gerekmektedir. SO_x ve NO_x olarak verilen EMEP verisindeki emisyon değerlerinin ayrışımı, EMEP/CORINAIR ve USEPA envanterlerine uygun olarak yapılmıştır. Organik bileşenler (VOC) için ise daha önce İngiltere'de uygulanan bir çalışmadan faydalanılmıştır (Photochemical Oxidants Review Group-1993)

Zamansal ayarlama-EMEP gridlenmiş veri yıllık toplam değerler içerirken, hava kirliliği modelleri saatlik verilere ihtiyaç duymaktadır. Yıllık bazdaki bu verileri saatlik verilere çevirebilmek için zamansal ayarlama faktörlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada SMOKE (Sparse Matrix Operator Kernel Emissions) adlı emisyon modeli yöntemi esas alınmıştır. Bu yöntemde aylık, haftalık ve günlük (hafta içi ve hafta sonu olmak üzere) zamansal faktörler belirlenmiştir. Yıllık değerler bu faktörlerle çarpılmıştır. Bu faktörlerin kaynak sektörlere özgü olduğunu da belirtmek gerekmektedir.

Avrupa için zamansal ayarlama faktörlerinin yayınlanmamış olması, bu çalışmada Amerika Birleşik Devletleri (ABD) için yapılan çalışmalara yönelmeyi zorunlu kılmıştır. Zamansal ayarlama faktörleri açısından, Avrupa ve ABD kaynak sektörlerindeki muhtemel fark da göz önünde bulundurulmalıdır.

Düşey dağılım-Bu çalışmada, emisyonların düşey dağılımları, EMEP için yapılan bir çalışma temel alınarak düzenlenmiştir. Emisyonların düşey dağılımları her bir sektör için ayrı ayrı düşünülmüştür.

Biyolojik emisyonlar-Avrupa kıtası açısından bakacak olursak, biyolojik ve doğal emisyon kaynakları atmosfer kimyası için önemli olabi-

lecek potansiyele sahiptirler. Örneğin, Avrupa ormanları global toplamda küçük bir paydaya sahip iken, yıllık bazda Avrupa organik bileşenler envanterinde önemli bir yere sahip olmaktadır (Simpson vd., 1999). Bu çalışmada, tüm bitki tipleri için organik bileşenler modelin içine dahil edilmiştir. Şu an için EMEP emisyon envanteri biyolojik emisyonları içermemektedir. Zaten tüm Avrupa'yı kapsayacak bir şekilde, detaylı bir biyolojik çeşitliliği verecek bir çalışmaya rastlamak da mümkün değildir.

Biyolojik emisyonları değerlendirmek amacıyla belirli bilgilere ihtiyaç duyulmaktadır. Bunların arasında sıcaklık ve radyasyon değerleri elde edilmesi gerekli en önemli parametrelerdir ki, direkt olarak emisyon değişimini etkilemektedirler. Bununla birlikte, detaylı bitki dağılımı ve yoğunluğu gerekmektedir. Tüm bunlar göz önünde bulundurularak ve BEIS3 (The Biogenic Emissions Inventory System) modeli izlenilerek bir tahmin yapılmaya çalışılmıştır. Yeryüzü tipi verisi için meteorolojik modelden (MM5) yararlanılmıştır. Model 24 farklı veri tipine sahip USGS (Amerika Birleşik Devletleri Jeolojik Araştırmalar Kurumu) verisini kullanmaktadır. Biyolojik emisyonların hesaplanması için ise, 1996'da geliştirilen bir metodoloji kullanılmıştır (Guenther vd., 1996). Bu çalışmaya 1999 yılında yapılan katkılar da (Simpson vd., 1999) dikkate alınarak, özenli bir çalışma ortaya konulmaya çalışılmıştır.

Hava kalitesi modeli

CMAQ model yatayda 50 km çözünürlükte, tüm Avrupa'yı kapsayacak şekilde doğu-batı yönünde 132 grid ve kuzey-güney yönünde 111 gridden oluşmaktadır. Meteorolojik modelinde içinde bulundurduğu 20 düşey tabaka içermektedir. Çalışma alanı için yetersiz gözlem verisi nedeniyle, başlangıç ve sınır şartları için 5 Ocak 2002 saat 00:00 da başlamak üzere model içinde hazır olan atmosferik konsantrasyonlar atanmıştır.

Model simülasyonu

Meteorolojik değerleri elde edebilmek ve emisyon değerlerini belirlemek amacıyla sırasıyla meteorolojik model (MM5) ve emisyon modeli (EME) çalıştırılmıştır. Sonuçlar kirlilik modeli

(CMAQ) için girdi olarak kullanılmış ve böylece 5-12 Ocak 2002 tarihleri arasındaki kirletici taşınımı ve kimyasal dönüşümleri tahmin edilmeye çalışılmıştır. MM5 modelin başlangıç ve sınır şartları için NCEP (The National Centers for Environmental Prediction) verisi (2.5°x2.5° çözünürlükte) kullanılmıştır.

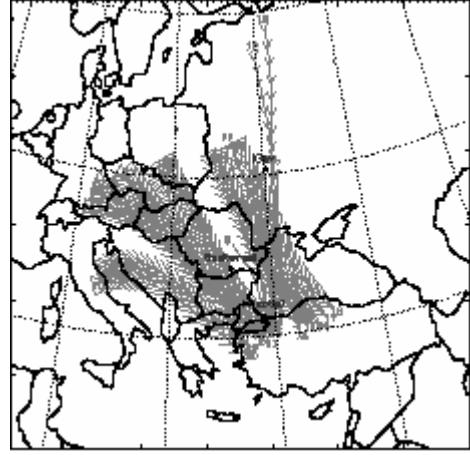
Kirleticilerin taşınımını daha iyi göstermek amacı ile meteorolojik model içerisinde geriye yörlengeleme çalışması yapılmıştır. Bu yöntem ile, İstanbul'da gözlenen yüksek PM10 konsantrasyonlarının (7 ve 10 Ocak 2002) muhtemel kaynaklarına ve izledikleri yollara ulaşılmıştır. Bu sonuçları güçlendirmek amacıyla, çeşitli ülkelerdeki emisyon oranlarının değiştirilmesi ile duyarlılık analizleri yapılarak daha belirgin ve daha doğru kirletici alanları tesbit edilmeye çalışılmıştır. Bu yaklaşım ile Türkiye'de görülen kirliliğin, asıl kaynaktan olan taşınımın büyüklükleri ile ilgili sayısal değerleri de görmek mümkün olacaktır. Her bir simülasyonda, ayrı ayrı ülkeler ve bir alt bölge için insan kaynaklı emisyonlar %50 oranında artırılmış ve azaltılmıştır. Aslında bu %50 oranı EMEP emisyon envanterinde bir çok sektör için verilen belirsizlik oranına karşılık gelmektedir. Bu yaklaşım, belirli ülke ve alanlar için %50 artan/azalan insan kaynaklı emisyonların İstanbul PM10 değişimine olan katkısını verecektir.

Değerlendirme ve tartışma

Meteorolojik değerlendirme

Herhangi bir hava kirliliği modeli taşınım, karışım ve kimyasal reaksiyonları hesaplamak için rüzgar, nem ve sıcaklık gibi meteorolojik veriye ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle, meteorolojik model sonuçlarının doğruluğu, kirlilik modelinin performansını ciddi bir şekilde etkileyecektir. Model sonuçları gözlem ve analizler ile karşılaştırılmış ve modelin oldukça iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Geriye yörlengeleme değerlendirme-Şekil 3, 21 saatlik (10 Ocak saat 00:00 ile 9 Ocak saat 03.00 arasındaki) sonuçları göstermektedir. Sonuçlar Batı, Kuzeybatı ve Kuzey Avrupa'dan Türkiye'ye olan muhtemel kirlilik taşınımını işaret etmektedir.



Şekil 3. MM5 modelin 980 mb seviyesindeki 21 saatlik geriye yörlengeleme simülasyon sonuçları

Emisyon model değerlendirme

Emisyon envanterinin hazırlanması ve bunun modellenmesi kirlilik modeli açısından oldukça önemli adımlardır. CMAQ model, kapsamlı ve oldukça yaygın olarak tercih edilen bir model olmasına rağmen, modelin başarısı için girdi olarak kullanılan verinin uygunluğu önem kazanmaktadır. 2001 EMEP verisi temel alınarak, Avrupa için insan kaynaklı emisyonlar hesaplanmıştır.

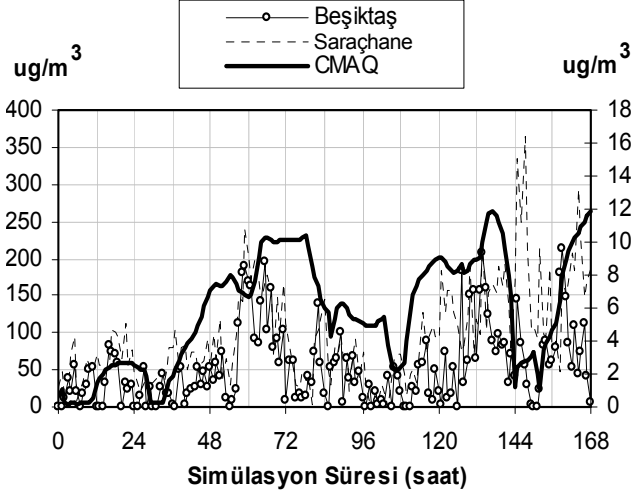
Biyolojik emisyonlar için oldukça büyük olan belirsizlik bu çalışmada kullanılan büyük çözünürlükler için daha da artabilmektedir. Bununla birlikte, insan ve biyolojik kaynaklı emisyon model sonuçlarının daha önce yapılan çalışmalar ile uyum gösterdiği görülmüştür.

Hava kalitesi model değerlendirme

Kirlilik modelinin PM10 sonuçları İstanbul'daki PM10 istasyon ölçümleri ile karşılaştırılmıştır (Şekil 4). Model sonuçları ile gözlemler arasındaki büyüklük farkı belirgin bir şekilde ortaya çıkarken gözlemlerdeki değişimin model tarafından yakalandığı da görülmektedir.

Aslında bu farkın yataydaki çok büyük model çözünürlüğünden kaynaklandığı çok açıktır. Ayrıca, düşeyde yine oldukça büyük olan ilk tabaka yüksekliği (92 m) de bu farka ciddi katkıları bulunmaktadır. Yatay ve düşeyde, bu çözünürlüklere dağılan PM10 konsantrasyonları do-

ğal olarak küçük değerler almaktadır. Tüm bunlara ek olarak, EMEP verisindeki eksiklikler de söz konusu olunca bu fark normal bir sonuç haline almaktadır.



Şekil 4. Beşiktaş ve Saraçhane istasyon gözlemleri ile (şeklin sol tarafındaki değerler) CMAQ model (şeklin sağ tarafındaki değerler) PM10 sonuçlarının İstanbul'daki zamansal değişimi

Tartışma

Geriye yörüngeleme analizi, Türkiye'ye taşınan olası PM10 kaynaklarını ve geliş yollarını göstermektedir. Bununla birlikte, PM10'un yerel ve uzak mesafelerden taşınan emisyonlara olan tepkisini kantitatif olarak incelemek amacıyla, farklı senaryolar için miktarları değiştirilen antropojenik verilerle CMAQ modeli yeniden çalıştırıldı. Öncelikli olarak, uzak mesafelerden taşınan emisyonların katkısını görmek amacı ile, bölgesel antropojenik emisyonlara +/- %50 oranında bir değişiklik uygulanmıştır. Burada, "bölge" olarak atıfta bulunulan alan, şu ülkeleri içermektedir : Bulgaristan, Romanya, Polonya, Ukrayna, Rusya, Macaristan, Slovakya, Moldova, Beyaz Rusya, Litvanya, Letonya ve Estonya. Daha sonra, sözü edilen bölgenin artırılan ve azaltılan emisyonlarına ek olarak, İstanbul PM10 konsantrasyonlarının lokal emisyonlara olan tepkisini ve bu konum ile bir öncekinin farkını gösterebilmek için, Türkiye'nin antropojenik emisyonları da +/- %50 oranında değiştirilmiştir. Tablo 1, iki farklı emisyon girdisine sahip iki modeldeki PM10 yoğunlukları arasındaki farkı göstermektedir.

Tablo1. Antropojenik emisyonların %50 artırılması ve azaltılması sonucu 5 günlük simülasyon sonucunda İstanbul PM10 değişimleri tablosu

	İstanbul PM10 Değişimi %50 Artırım		İstanbul PM10 Değişimi %50 Azaltma	
	Ort.	Maksimum	Ort.	Maksimum
Bölgesel ¹	12%	24%	-9%	-26%
Bölgesel + Türkiye	45%	50%	-46%	-50%

CMAQ modelindeki Avrupa ülkelerinin emisyonlarına karşı İstanbul PM10 yoğunluğunun tepkisini incelemek için, diğer bir deyişle, CMAQ sonuçlarının emisyonlardaki değişime karşı gösterdiği hassasiyeti ölçmek amacıyla, bir ana yaklaşım ve farklı emisyon kontrol senaryoları modellenmiştir. Burada sonuçları gösterilen "bölgesel" ve "bölgesel+Türkiye" yaklaşımlarına dikkat çekilmiştir. Bu noktada, tüm simülasyonlardaki biojenik emisyonların aynı olduğunu belirtmekte fayda görülmektedir.

Şekil 5-a'daki koyu gri zemin rengi, İstanbul'da baz durum (emisyonlarda herhangi bir değişim yapılmamış) ile Romanya emisyonlarının %50 artırıldığı (siyah zemin) durum arasındaki PM10 seviyelerindeki farkı göstermektedir.

Aslında, geriye yörüngeleme analizi ile daha önce aynı sonuç elde edilmişti. Duyarlılık analizleri görsel sonuçlara, kantitatif bilgiler eklemiştir. Bu çalışmaların ışığında, aynı dönem için tüm Doğu Avrupa'yı kapsayacak şekilde hassasiyet analizleri yapılmıştır. Romanya, Bulgaristan, Polonya, Ukrayna ve Rusya'nın yanısıra, Macaristan, Slovakya, Moldova, Beyaz Rusya, Litvanya, Letonya ve Estonya analize eklenmiştir (Şekil 5-a).

İlk bakışta, tüm simülasyon boyunca, İstanbul PM10 değerlerinin sürekli olarak etkilenmesi dikkat çekmektedir. Doğal olarak, zaman zaman bu etkilenişlerin miktarı değişiklik göstermekte-

¹ Bölgesel hassasiyet yaklaşımı Bulgaristan, Romanya, Polonya, Ukrayna, Macaristan, Slovakya, Moldova, Beyaz Rusya, Litvanya, Letonya ve Estonya'yı kapsamaktadır.

dir; ancak duyarlılık analizinde yapılan %50 artış ve azalış sonucunda, İstanbul PM10 konsantrasyonlarında sırasıyla ortalama %12 artış ve %9 azalma gözlemlenmiştir. Analizlerin sonuçları, simülasyonlar sırasında, İstanbul üzerindeki gridda %24 artış ve %26 azalmaya kadar ulaşabilmiştir.

Bir başka yaklaşımda ise, bölgesel emisyonlara ek olarak, Türkiye'nin kendi emisyonları da dikkate alınarak sonuçlar değerlendirilmiştir (Şekil 5-b).

Türkiye yıllık toplam 420 Gg PM10 emisyonu (EMEP) ile, kendi çevresindeki hava kirliliği için de büyük bir kirlenici kaynağıdır.

Ülkenin kuzey ve batısına Avrupa'dan taşınan kirlenicilere ilaveten, bu bölgelerin kendileri de kalabalık nüfusu ve yoğun sanayi tesisleri ile ciddi bir kaynak oluşturmaktadır. Bunun sonucu olarak, tüm bu faktörlerin bir araya gelmesi, zaman zaman hava kalitesini kaçınılmaz olarak olumsuz anlamda etkilemektedir. Bu nedenle, model tüm etki faktörlerinin yanısıra, herhangi bir bölgenin olası etkisini de dikkate almalıdır. Türkiye'nin kendi ürettiği emisyonlar da eklendiği zaman, modelimiz, hassasiyet analizleri için yapılan emisyon değişim miktarının hemen hemen aynılarını vermiştir. Şekil 5-b'de görüldüğü üzere, simülasyon süresince %45 ortalama artış ve %46 azalma gözlenmiştir. Aslında, daha önce yapılan geriye yürüme ve her ülke için ayrı ayrı yapılan hassasiyet analizleri sonuçları bu durumu işaret etmekteydi.

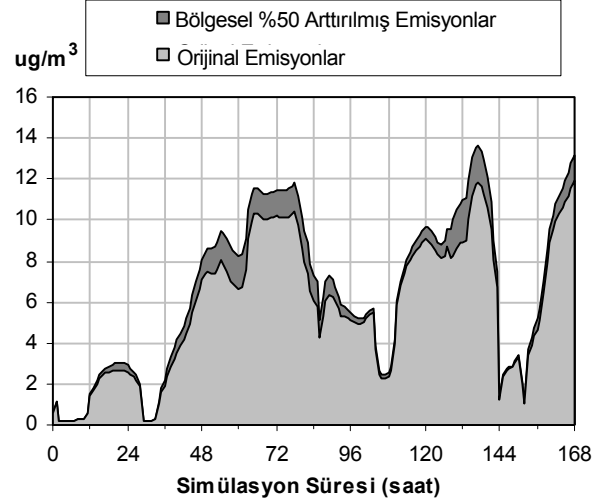
Genel sonuçlar

Bu çalışmada, Doğu Avrupa ülkelerinden Türkiye'ye olan kirlenici madde taşınımı incelenmiştir. Türkiye için bu kapsamda bir çalışma daha önce yapılmamıştır. Atmosferik modeller kurmak ve çalıştırmanın zorluklarının yanısıra, emisyon modellemesi, çalışmanın en zorlu bölümü olmuştur. Bu amaçla yeni bir emisyon işlem modülü geliştirilmiş olup, yüklü miktarda verinin de elden geçirilmesi gerekmiştir

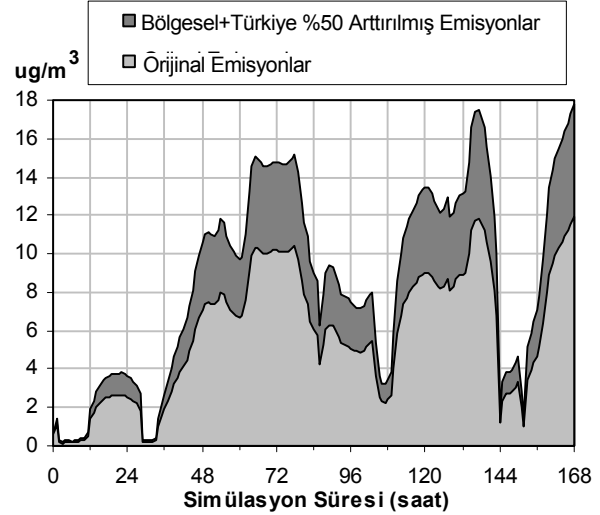
Çalışmanın başında, uzak mesafelerden taşınan kirlenicilerin, incelenen alan için önemli bir

problem olduğu iddia edilmiştir. Çalışmanın sonucunda ise, Doğu Avrupa emisyonlarının, İstanbul PM10 konsantrasyonları üzerindeki kaydedeğer etkisi, açık olarak gösterilmiştir.

(a)



(b)



Şekil 5. Simülasyon süresince İstanbul'daki PM10 konsantrasyonlarının saatlik değişimi (a) ve (b) sırasıyla Bölgesel ve Bölgesel+Türkiye antropojenik emisyonlarının %50 artırılması sonucu olan değişimleri göstermektedir.

Hassasiyet analizleri göstermiştir ki, çalışmanın gerçekleştirildiği süre boyunca, Kuzey ve Batı Türkiye'ye Avrupa'dan bölgesel olarak sürekli aerosol taşınımı olmaktadır. Bu taşınım, analiz sonuçları açısından, İstanbul'daki PM10 sonuçlarının dörtte bir oranında artmasına sebebiyet verebilmektedir. Sonuç olarak, Kuzey ve Batı

Türkiye'nin hava kirliliği değerlendirilirken, Avrupa'dan taşınan uzun-mesafeli kirlilik de kesin olarak göz önünde bulundurulmalıdır. Açıkça ortaya konmuştur ki, Türkiye'de nispeten yüksek yoğunluklu PM10 oluşumları, kuzeybatı rüzgarlarla görülmektedir ki, bu da, özellikle Doğu Avrupa ülkelerinin etkisini işaret etmektedir.

Geriye yörlüme yöntemi çalışmaları ve hassasiyet analizleri yardımıyla PM10 emisyonlarının asıl kaynaklandığı yerler, izledikleri yollar ve bunların miktarları ortaya konmaya çalışılmıştır. Doğu Avrupa ülkelerinden yayılan kirlenici kaynakları Türkiye'nin kuzeybatı bölgelerine 12 ila 48 saatlik bir süreçte ulaşmaktadırlar. İstanbul PM10 konsantrasyonlarının Avrupa'dan etkilenmesini lineer bir kabul altında düşünecek olursak, bu durumda emisyonların etkisinin iki katı görüleceği söylenebilir. O halde, belirli şartlar altında, çalışılan tarihler için, İstanbul PM10 seviyesinin %50'lik kısmından bu tip uzun mesafeli taşınımların sorumlu olduğu söylenebilir.

Gelecekte, daha doğru ve daha iyi çözünürlükte elde edilebilecek emisyon verisi bu çalışmaya adapte edilecektir. Geliştirilen emisyon modeli bunun için gerekli esnekliğe sahip olarak tasarlanmıştır.

Kaynaklar

Alpert, D. J., Hopke, P. K., (1981). A determination of the sources of airborne particles collected during the regional air pollution study, *Atmospheric Environment*, **15**, 675-687.

Amundsen, C. E., Hanssen, J. E., Semb, A. ve Steinnes, E., (1992). Long-range atmospheric transport of trace elements to southern Norway, *Atmospheric Environment*, **26A**, 1309-1324.

Baltensperger, U., (1999). Aerosol measurements within the WMO global atmosphere watchprogramme: providing data related to climate forcing and air quality EMEP/WMO Workshop on Fine Particles, Interlaken, November 22-25, 1999.

Byun, D. W., Ching, J. K. S., (1999). Science algorithms of the EPA Models-3 community multiscale air quality system, *Document EPA/600/R-99/030*. Atmospheric Modeling Division, National Exposure Research Laboratory,

U.S. Environmental Protection Agency Research Triangle Park, NC.

Dickerson, R. R., Doddridge, B., Kelley, P., ve Rhoads, K., (1995). Large scale pollution of the atmosphere over the remote Atlantic Ocean, *Journal of Geophysical Research*, **100**, 8945-8952.

EMEP/CCC-Report 8/99, (1999). Long-range transport of Aerosol Particles, *A Literature Review*. Lazaridis, M., Semb, A. ve Hov, Ø.

Finlayson-Pitts, B. ve Pitts, J., (1986). *Atmospheric Chemistry: Fundamentals and Experimental Techniques*, Wiley-Interscience Publication. New York.

Grell, G. A., Dudhia, J. ve Stauffer, D. R., (1994). A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5), *NCAR/TN-398+STR*, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 122.

Guenther, A. B., Davis, K., Hampton, G., Harley, P., Klinger, L., Vierling, L., Zimmerman, P., Allwine, E., Dilts, S., Lamb, B., Westberg, H., Baldocchi, D., Geron, C., Pierce, T., (1996). Isoprene fluxes measured by enclosure, relaxed eddy accumulation, surface layer gradient, mixed layer gradient, and mixed layer mass balance techniques, *Journal of Geophysical Research*, **101**, 18555-18567.

Hacisalihoglu, G., Eliyakut, F., Olmez, I., Balkas, T. I., Tuncel, G., (1992). Chemical composition of particles in the Black Sea atmosphere, *Atmospheric Environment*, **26A**, 3207-3218.

Hoek, G., Forsberg, B., Borowska, M., Hlawiczka, S., Vaskövi, E., Welinder, H., Branis, M., Benes, I., Kotesovec, F., Hagen, L. O., Cyrus, J., Jantunen, M., Roemer, W., Brunekreef, B., (1997). Wintertime PM10 and Black Smoke concentrations across Europe: results from the PEACE study, *Atmospheric Environment*, **31**, 3609-3622.

Lannefors, H. O., Hansson, H. C. ve Granat, L., (1983). Back-ground aerosol composition in southern Sweden – fourteen micro and macro constituents measured in seven particle size intervals at one site during one year, *Atmospheric Environment*, **17**, 87-101.

Lelieveld, J., Berresheim, H., Borrmann, S., Crutzen, P. J., Dentener, F. J., Fischer, H., Feichter J., Flatau, P. J., Heland, J., Holzinger, R., Korrmann, R., Lawrence, M. G., Levin, Z., Markowicz, K. M., Mihalopoulos, N., Minikin, A., Ramanathan, V., de Reus, M., Roelofs, G. J., Scheeren, H. A., Sciare, J., Schlager, H., Schultz, M., Siegmund, P., Steil, B., Stephanou, G. E., Stier, P., Traub, M., Warneke, C., Williams, J., Ziereis, H., (2002). Global Air Pollution Crossroads over the Mediterranean, *Science*, **298**, 794-799.

- Pakkanen, T. A., Hillamo, R. E., Keronen, P., Maenhaut, W., Ducastel, G., Pacyna, J. M., (1996). Sources and physicochemical characteristics of the atmospheric aerosol in southern Norway, *Atmospheric Environment*, **30**, 1391-1405.
- Parrish, D. D., Holloway, J. S., Trainer, M., Murphy, P. C., Forbes, G. L. ve Fehsenfeld, F. C., (1993). Export of North American ozone pollution to the North Atlantic Ocean., *Science*, **259**, 1436– 1439.
- Photochemical Oxidants Review Group, (1993). Ozone in the United Kingdom. *The Third Report of the United Kingdom Photochemical Oxidants Review Group*, Didcot, AEA Harwell Laboratory, 113, 114.
- Sciare, J., Bardouki, H., Moulin, C., ve Mihalopoulos, N., (2003). Aerosol sources and their contribution to the chemical composition of aerosols in the Eastern Mediterranean Sea during summertime, *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, **3**, 291–302.
- Seinfeld, J. H. ve Pandis, S.N., (1998). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 1309 p., J. Wiley ve Sons (Inc), New York.
- Simpson, D., Winiwarter, W., Borjesson, B., Cinderby, S., Ferreiro, A., Guenther, A., Hewitt C. N., Janson, R., Khalil, A. M. K., Owen, S., Pierce T. E., Puxbaum, H., Shearer, M., Skiba, U., Steinbrecher, R., Tarrasón, L. ve Oquist, M. G., (1999). Inventorying emissions from nature in Europe, *Journal of Geophysical Research*, **104**, D7, 8113–8152.
- Tayanc, M., Karaca, M., Saral, A. ve Erturk, F., (1998). Study of the Decrease of Air Pollution Concentration Levels with the Meteorological Factors in Istanbul, *Air Pollution Modeling and Its Application XII, S-E.*, Gryning ve N. Chaumerliac (Editors), Plenum Press, New York, 699-702.
- Van der Zee, S. C., Hoek, G., Harssema, H., Brunekreef, B., (1998). Characterisation of particulate air pollution in urban and non-urban areas in the Netherlands, *Atmospheric Environment*, **32**, 3717-3729.
-
- EPA, (1996). Air Quality Trends.
<http://www.epa.gov/air/airtrends/aqtrnd96/chapter2.pdf>
- WHO, (2004). Guidelines for Europe.
<http://www.worldbank.org/html/fpd/em/power/standards/airqstd.stm#who>