

Avrupa hava kirleticilerinin Doğu Akdeniz bölgesine taşınımının modellenmesi

Muwaffaq FREİWAN*, Selahattin İNCECİK

İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Meteoroloji Mühendisliği Bölümü, Ayazağa, 34469, İstanbul.

Özet

Avrupa hava kirleticilerinin Doğu Akdeniz bölgesine taşınımı 26 – 29 Ağustos episodik periyodunda incelenmiştir. 3 ve 2 boyutlu meteorolojik değişkenlerin ve hava sirkülasyonunun öngörüsünü yapmak için Mezoölçekli meteorolojik model, MM5 kullanılmıştır. Hava parsellerinin yörünge simülasyonları MM5/RIP ve HYSPLIT modelleriyle tahmin edilerek Avrupa'dan kaynaklanan 3 ana yörünge kaynağı sektörü bulunmuştur. PSO_4^{2-} ve SO_2 gibi türlerin derişimi, birikmesi ve taşınımının simülasyonunun tahmini üç boyutlu Eulerian CAMx modeliyle yapılmıştır. Sülfatın Avrupa'dan Doğu Akdeniz bölgesine taşınması sırasında iki ana geçidi izlediği saptanmıştır. CAMx simülasyonlarının, HYSPLIT ve MM5/RIP modelleriyle üretilen yörünge simülasyonlarıyla büyük bir uyum sağladığı görülmüştür. Türkiye'de ilk defa kullanılan bu modelleme sistemi yüksek bir performans göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: *Uzun menzilli hava kirliliği taşınımı, geriye doğru yörüngeler, MM5, CAMx, HYSPLIT.*

Modeling European air pollutants transport to the eastern Mediterranean region

Abstract

Measurements of some air pollution species in a rural station located near Antalya (36.47N, 30.34E) on the eastern Mediterranean coasts revealed high concentrations during the years 1992 – 2000. Since the area is free of any source of pollution, it is believed that such high concentrations of various pollution species are transported from other regions, such as Eastern or southeastern Europe. Long range transport of European air pollution to the Eastern Mediterranean region has been investigated during the episodic period 26 – 29 August 1998. Meso-scale Meteorological Model, MM5 was applied to forecast the hourly general circulation conditions and hourly 3 and 2 dimensional meteorological variables. Air mass backward trajectory simulations were also predicted by MM5/RIP and HYSPLIT models. Consequently, three main sectors of air mass trajectory originated from Europe were found. MM5 model outputs were used in the three-dimensional Eulerian photochemical model CAMx to simulate the concentration deposition and the long range transport of the air pollution species PSO_4^{2-} and SO_2 . CAMx air quality model simulations have revealed a great agreement with the air mass trajectory simulations produced by HYSPLIT and RIP/MM5 models and have demonstrated that sulfate transport from central and southeastern Europe to the eastern Mediterranean has two distinguished paths. The modeling system which is used for the first time in Turkey exhibited a high performance.

Keywords: *Long range air pollution transport, backward trajectory, MM5, CAMx, HYSPLIT.*

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Muwaffaq FREİWAN. mfreiwan@yahoo.com.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Uçak-Uzay Bilimleri Fakültesi'nde tamamlanmış olan "Modeling long range transport of European air pollutants to the Eastern Mediterranean region: An episodic analysis for Antalya" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 11.10.2005 tarihinde dergiye ulaşmış, 29.11.2005 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 30.11.2006 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Giriş

Hava kirliliğinin insan sağlığına ve tüm ekosisteme olan etkisinin tehlikeli boyutlara ulaştığı apaçık bir gerçektir. Hava kirleticileri kaynaktan ayrılıp atmosfere salındıkları andan itibaren yayılma, birikme ve taşınım mekanizmaları etkisi altında bulunurlar. Hava kirleticileri taşınımı kısa, orta, uzun ve küresel olmak üzere 4 kategoride gerçekleşmektedir. Bu çalışmanın temel konusunu oluşturan hava kirleticilerinin uzun menzilli taşınımı, son yıllarda hızla artan bir ilgiyle modelcilerin ve araştırmacıların ele aldıkları en önemli araştırma konularından biri haline gelmiştir. Biyojenik veya antropojenik kaynaklardan ortaya çıkan emisyonların taşınımı lokal, bölgesel ve global ölçekte çok sayıda araştırmanın konusu olmuştur (Draxler, 1987; Galperin, 1991; Syrakov ve Prodnova, 2002; Chen vd., 2002; Park ve Lee, 2003; Camkur ve Miller, 2004).

Orta enlemlerdeki konumundan, iklim ve topoğrafya çeşitliliğinden ve farklı orijinlerden kaynaklanan hava kütlelerinin akımına maruz kaldığından dolayı, Güneydoğu Avrupa ve Doğu Akdeniz bölgesi özellikle hava kirliliği taşınımı olaylarının incelenmesi için çekici bir bölge olarak nitelendirilmektedir. Bu bölgede mezo-ölçekte uzun menzilli toz taşınımı (Kubilay vd., 2000; Israelevich vd., 2002), aerosol taşınımı (Doğan ve Tuncel, 2003; Koçak vd., 2004) ve asidik sülfat ve nitrat gibi başka kirleticilerin taşınımı çeşitli çalışmalarda ele alınmıştır (Güllü vd., 2000; Öztürk vd., 2003).

Türkiye’de hava kirleticilerinin ve özellikle aerosollerin derişimleri ve orijin kaynakları çeşitli yöntemler kullanılarak incelenmiştir. Bunlardan gözlenen rüzgar alanının analizi (Tuncel ve Erduran, 2001), istatistiksel geriye doğru yörünge yöntemi (Tuncel, 2002), hava kütleleri yörüngelerinin incelenmesi (Kubilay vd., 2000) veya bir yörünge modelinin İzmir şehri gibi sınırlı bir bölgeye uygulanması (Dinçer vd., 2003) örnek olarak verilebilmektedir. Ancak sınırlar ötesi uzun menzilli hava kirliliği taşınımının modelleme çalışmaları henüz mevcut değildir. Bu çalışmada Avrupa, Türkiye ve Akdeniz bölgesini içine alan oldukça geniş bir bölgede, hava sirkülasyonunu, iki ve üç boyutlu meteorolojik

değişkenleri, hava kirleticilerinin emisyon, derişim ve birikmelerinin saatlik grid değerlerini tahmin etmek ve taşınım yörüngelerini simüle etmek için mezo-ölçek meteorolojik modeli MM5, fotokimyasal model CAMx ve RIP ve HYSPLIT yörünge modellerinden oluşan bir modelleme sistemi kullanılmıştır. Türkiye’de ilk defa kullanılan bu modelleme sistemiyle hava kirleticilerinin Avrupa’dan Türkiye’ye ve Doğu Akdeniz bölgesine olan uzun menzilli taşınımının tahmini, simülasyonu ve yörüngeleri yüksek bir performansla ortaya konulmuştur.

Modelleme sistemi

MM5 modeli, PSU/NCAR (Pennsylvania State University/National Center of Atmospheric Research) tarafından geliştirilmiş bir mezo-ölçek meteorolojik modeldir. Bu model, günlük rutin meteorolojik öngörüsü yanısıra hava kirliliği model çalışmalarında gerekli olan meteorolojik verilerin tahmininde dünya çapında geniş bir şekilde kullanılmaktadır. Model hakkında ayrıntılı bilgi başta MM5 web sayfası olmak üzere birçok yayında bulunabilir.

Bu çalışmada hidrostatik olmayan ve araziye takibeden sigma koordinatlı MM5 V-3.61, 50x50 km’lik yatay çözünürlükte ve 34 seviyelik düşey çözünürlükteki 89x78 (sırasıyla D-B ve K-G) gridden oluşan bir domende üç ve iki boyutlu meteorolojik değişkenleri saatlik olarak tahmin etmekte kullanılmıştır. Buna ilaveten MM5 modelinin bir alt programı olan RIP (Read/Interpolate/Plot) hava parseli yörünge hesapları ve simülasyonlarında kullanılmıştır. Ayrıca hava parseli yörünge hesapları ve simülasyonları MM5’den elde edilen veriler kullanılarak HYSPLIT (HYbrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) modeli vasıtasıyla elde edilmiştir. Üç boyutlu hava kalitesi CAMx modeli (Comprehensive Air Quality Model with extension) antropojenik hava kirleticileri için, yatay ve düşey taşınım, kimyasal prosesler ve kuru ve nem birikim terimlerini içeren süreklilik denklemini çözerek kirleticilerin derişimi, birikimi ve taşınımının simülasyonunu söz konusu domende tahmin etmektedir. Bu amaç için MM5 çıktılarına ilaveten, CAMx modeli çalışma domeni ve periyodu için saatlik

grid niteliğinde hazırlanan emisyon envanteri, hava kirleticilerinin başlangıç ve sınır koşulları değerleri, arazi kullanımı ve vejetasyon dağılımı, albedo kodları, fotoliz oranları, ozon kolonu kodları ve ışık geçirmezliği kodlarından oluşan bir veri seti CAMx modeli tarafından girdi olarak kullanılmıştır.

Simülasyonlar

MM5 modeli

MM5 modelinin binary formatındaki çıktı dosyası, 25–29 Ağustos 1998 tarihleri arasındaki episodik periyodunda tahmin edilen saatlik hava sirkülasyonu ile 2 ve 3 boyutlu meteorolojik değişkenleri içermektedir. Hava sıcaklığı, rüzgar vektörü, basınç ve jeopotansiyel yükseklik haritalarını ana seviyelerde çizmek için RIP görüntüleme programı kullanılmıştır. Bunlara örnek olan Şekil 1, 700 hPa düzeyinde tahmin edilene karşı gözlenen sıcaklık, jeopotansiyel yükseklik ve rüzgar vektörünü kapsayan hava haritalarını göstermektedir. Şekil 1’den de görüleceği üzere model tahmin süresi boyunca yüksek doğruluk oranını korumayı başarmıştır. Öyleki 96^{ncı} ve 120^{inci} saat tahmini en az 24^{üncü} ve 48^{inci} saat tahminleri kadar doğruluk göstermiştir. İstanbul, İzmir ve Antalya istasyonlarında gözlenen ile MM5 modeliyle tahmin edilen sıcaklık ve rüzgar alanlarının karşılaştırılması Şekil 2’de gösterilmektedir.

Ayrıca sıcaklık ve rüzgar alanlarının tahmin edilene gözlenen değerleri arasındaki dağılım diyagramları Şekil 3’te gösterilmektedir. Şekil 3’ten de anlaşılacağı gibi model, sıcaklığı istasyonların üçünde de oldukça yüksek bir doğrulukla tahmin etmiştir. Rüzgar şiddeti İstanbul ve İzmir için iyi bir doğrulukla ancak Antalya rüzgar şiddetini daha az bir doğrulukla tahmin etmiştir. Korelasyon katsayısı (R^2) sırasıyla İstanbul, İzmir ve Antalya için 0.59, 0.55, 0.57 olarak ve 0.47, 0.46, 0.05 olarak sırasıyla sıcaklık ve rüzgar şiddeti için hesaplanmıştır. Model rüzgarın düşük değerlerini daha yüksek tahmin etmiştir.

Yörünge modelleri, HYSPLIT ve RIP

Akdeniz bölgesi ve Türkiye’nin Batı yarısına dağıtılmış 13 noktada 0.998, 0.990, 0.900,

0.850 ve 0.700 sigma seviyelerindeki 96 saatlik geriye doğru yörünge simülasyonları her iki yörünge modeli kullanılarak tahmin edilip grafikleri çizilmiştir. Simülasyonların incelenmesi sonucunda, çalışma periyodunda bölgeye ulaşan hava kütleleri, izledikleri geçiş yolları göz önüne alınarak 3 ana orijin sektörden kaynaklandıkları bulunmuştur. Bunlar:

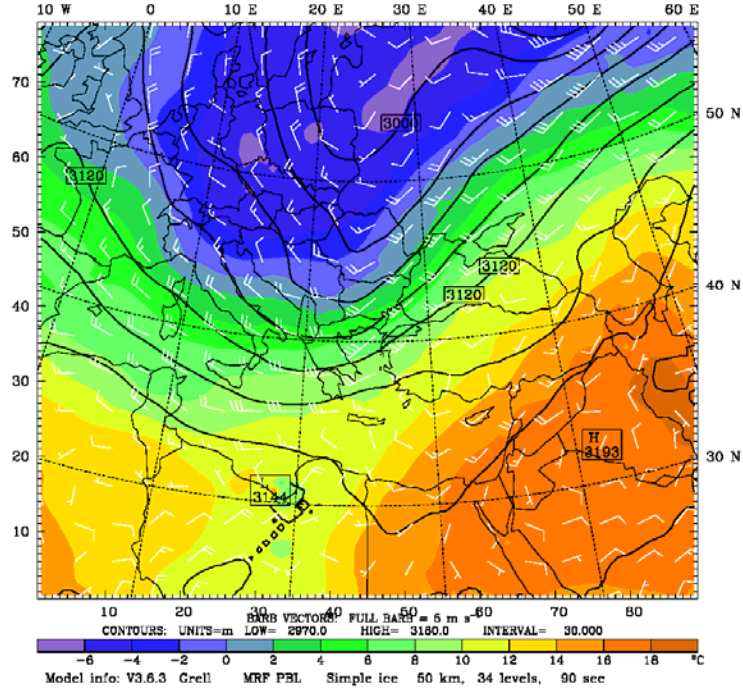
- 1- A sektörü: Türkiye ve Doğu Avrupa.
Bu sektör, Ukranya, Moldavya ve Romanya’dan kaynaklanan, Karadeniz ve Türkiye üzerinden geçip Antalya’nın temsil ettiği Doğu Akdeniz bölgesine ulaşan yörüngeleri içine almaktadır.
- 2- B sektörü: Türkiye ve Orta Avrupa.
Bu sektör esas olarak, Bulgaristan, Makedonya, Arnavutluk, Sırbistan-Karadağ, Hırvatistan ve Slovenya’dan kaynaklanan ve Türkiye’nin batısı üzerinden geçip Doğu Akdeniz bölgesine olan yörüngeleri kapsamaktadır.
- 3- C sektörü: Güney Avrupa ve Akdeniz.
Bu sektör, Orta ve Batı Akdeniz, İspanya, Fransa’nın güneyi, İtalya ve Yunanistan’dan kaynaklanan, Ege Denizi ve Türkiye’nin güneybatısına, sonra da Doğu Akdeniz bölgesine ulaşan yörüngeleri ihtiva etmektedir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar Sciare vd. (2002)’in Girit adasındaki Finokalia istasyonu (35°20’N, 25°40’E) için ortaya çıkardıkları geriye doğru yörünge analiz sonuçlarıyla uyum halindedir.

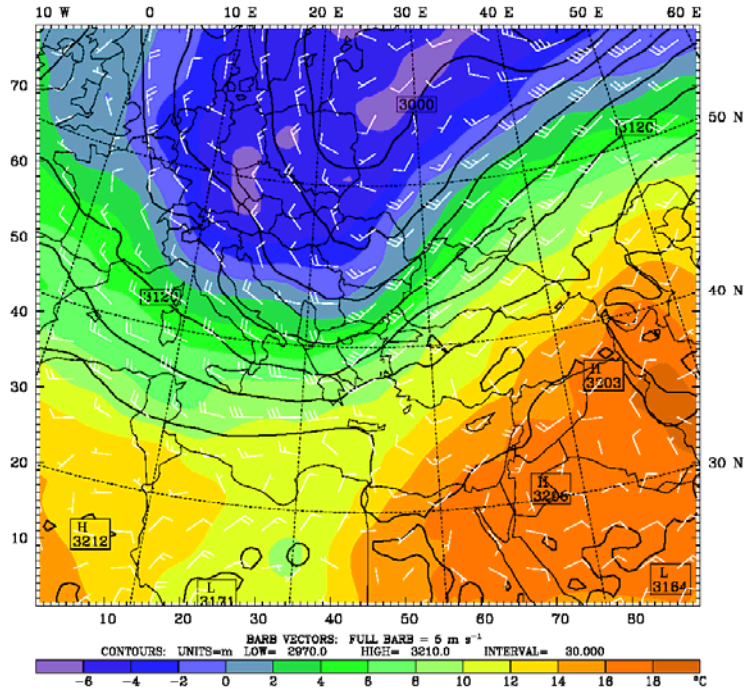
Yukarıdaki üç sektörden Akdeniz bölgesine hava kütlesi taşınımındaki katkı oranları % olarak sırasıyla A, B ve C sektörü için şöyle bulunmuştur:

- a) 0.998 sigma seviyesinde: 54, 31, 15.
- b) 0.990 sigma seviyesinde: 38, 38, 24.
- c) 0.900 sigma seviyesinde: 0, 23, 77.
- d) 0.850 sigma seviyesinde: 8, 8, 84.
- e) 0.700 sigma seviyesinde: 0, 0, 100.

Dataset: MMOUT RIP: rip 12hours Init: 0000 UTC Tue 25 Aug 98
Fcst: 120.00 Valid: 0000 UTC Sun 30 Aug 98 (0300 LDT Sun 30 Aug 98)
Temperature at pressure = 700 hPa
Geopotential height at pressure = 700 hPa
Horizontal wind vectors at pressure = 700 hPa



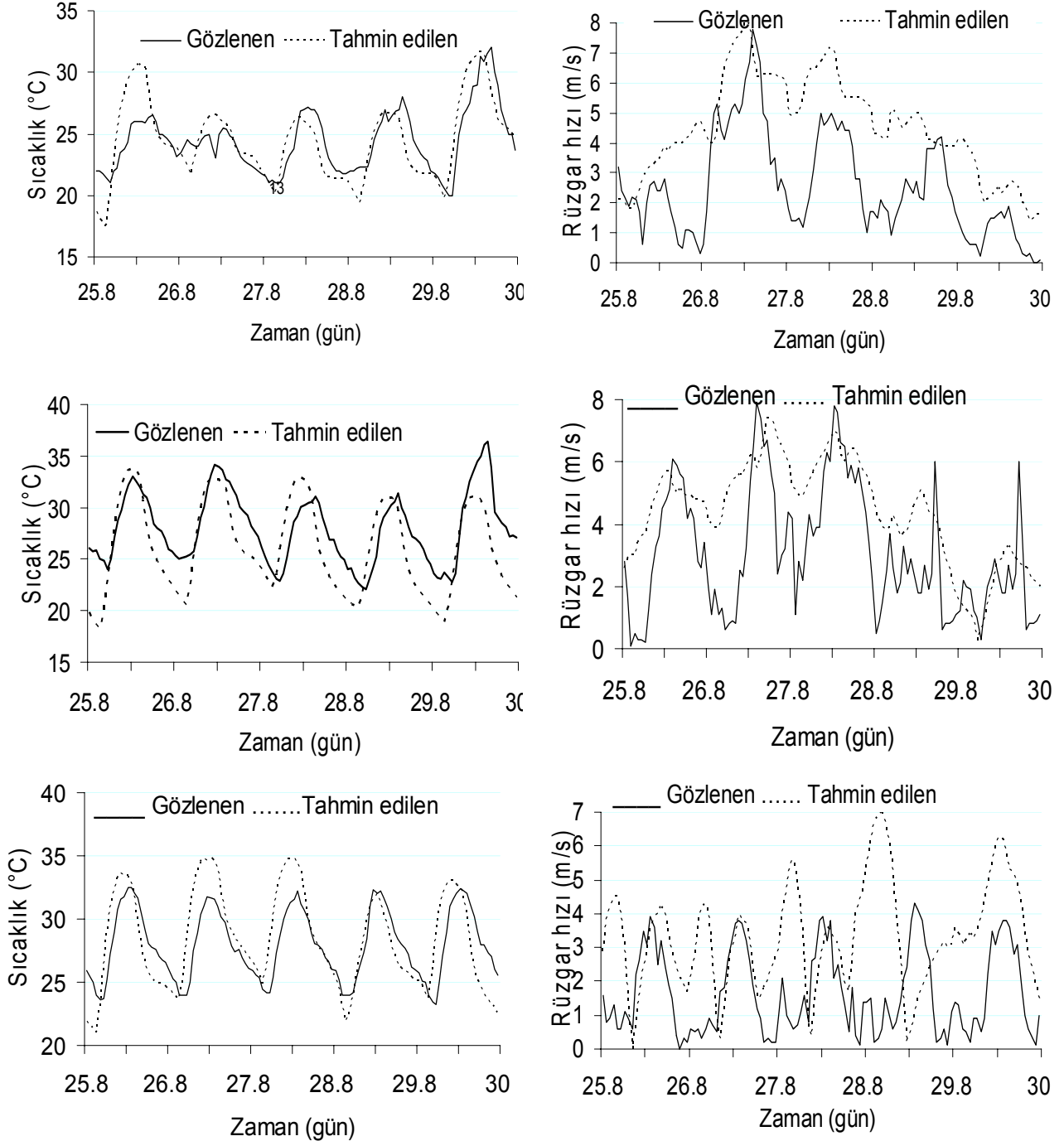
Dataset: MMINPUT RIP: rip input Init: 0000 UTC Tue 25 Aug 98
T + 120.00 h Valid: 0000 UTC Sun 30 Aug 98 (0300 LDT Sun 30 Aug 98)
Temperature at pressure = 700 hPa
Geopotential height at pressure = 700 hPa
Horizontal wind vectors at pressure = 700 hPa



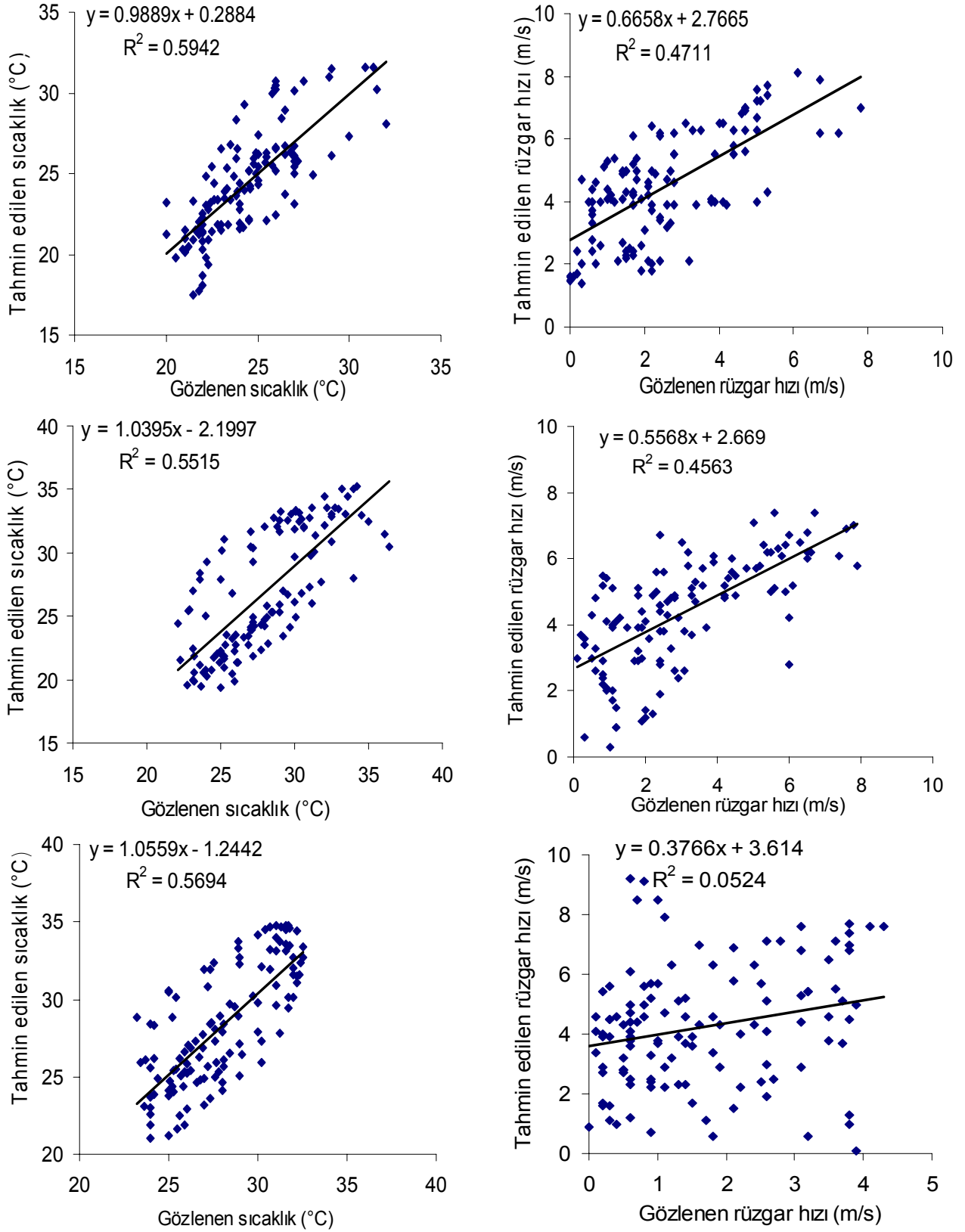
Şekil 1. Tahmin edilen (üst) ve gözlenen (alt) 700 hPa düzeyindeki jeopotansiyel yükseklik (gpm – siyah konturlar), sıcaklık (°C-renkli tarama) ve yatay rüzgar hızı (m/s-beyaz vektörler). Tahmin 120'inci saat (0000 Z, 30 – 08 – 1998) için yapılmıştır

Antalya, İzmir, İstanbul ve Ankara için hazırlanan yer seviyesi üzerinde 3000 m yüksekliğindeki HYSPLIT ve RIP modellerinin öngördüğü 96 saatlik yörünge simülasyonlarını gösteren Şekil 4'ten de görüleceği üzere her iki modelle üretilen yörünge simülasyonlarının arasında

mükemmel bir benzerlik vardır. Ayrıca Türkiye'nin güneybatısına ve Doğu Akdeniz'e gelen hava parselleri yörüngelerinin Güney Avrupa ve Akdenizden kaynaklandığı ve Yunanistan ile Ege Denizi üzerinden geçip bölgeye geldiği görülmüştür.

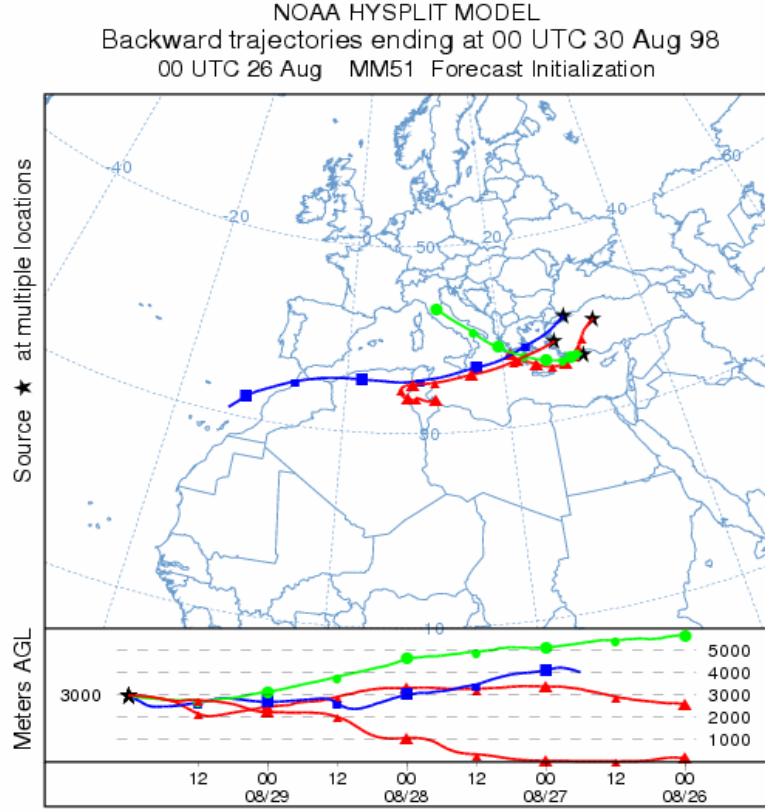


Şekil 2. İstanbul (üst), İzmir (orta) ve Antalya (alt) istasyonlarında MM5 modeliyle tahmin edilen ve gözlenen saatlik sıcaklık(sol) ve 10 m'deki rüzgar hızı (sağ) 00 Z, 25-8 ile 00 Z, 30-8-1998 arasındaki zaman serileri

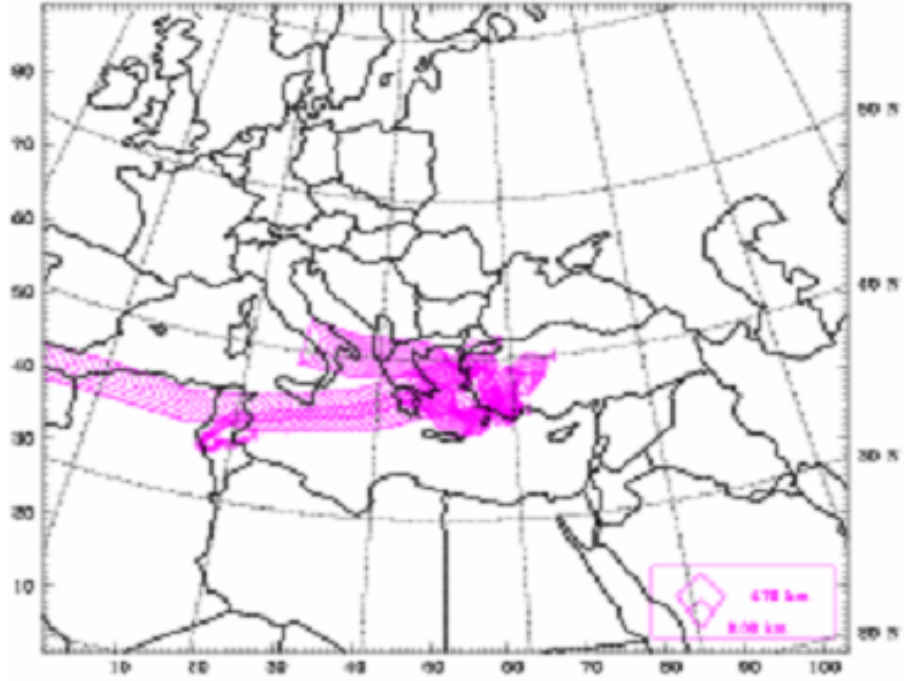


Şekil 3. İstanbul (üst), İzmir (orta) ve Antalya (alt) istasyonlarında 00 Z, 25–8 ile 00 Z, 30–8–1998 arasında MM5 modeliyle tahmin edilenle gözlenen değerlerin dağılım diyagramları. Sıcaklık solda ve 10 m'deki rüzgar hızı sağdadır

Avrupa hava kirleticilerinin Doğu Akdeniz bölgesine taşınımı



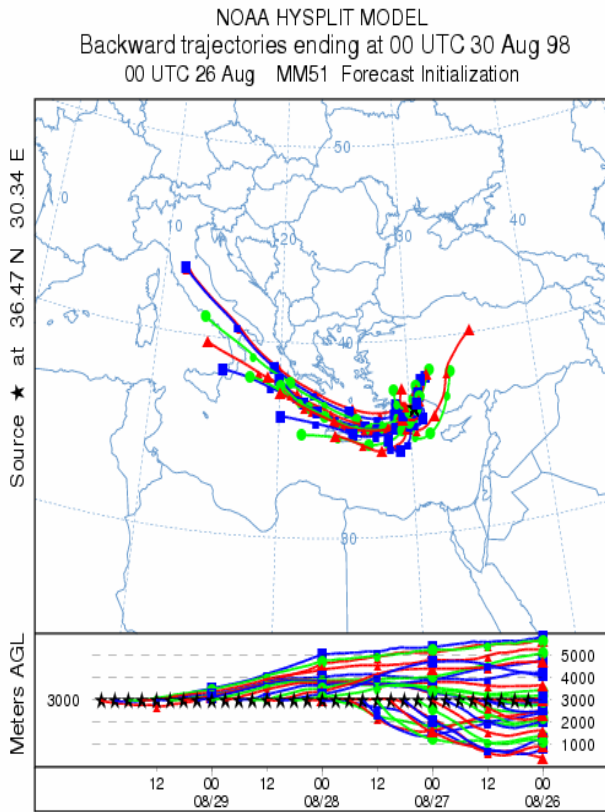
Dataset: MMOUT RIP: rip hourly Init.:0000UTC Wed 28 Aug
Fcst.: 0.00 Valid: 0000UTC Wed 28 Aug 98
Trajectories from hour 0.00 to 96.00



Şekil 4. Antalya, İzmir, İstanbul ve Ankara için HYSPLIT (üst) ve RIP (alt) modellerinin 3000 m'deki 96 saatlik geriye doğru yörünge simülasyonları. Simülasyonlar 30–8 00 Z'de başlayıp 26–8 00 Z'de sona ermektedir

HYSPLIT modeli kullanılarak Antalya için aşamalı çoklu geriye doğru yörünge simülasyonları birkaç seviye için elde edilmiştir. Bunlara bir örnek Şekil 5'te sunulmuştur. Böyle simülasyonlarda, 00 Z, 30–8'de başlayan ve 00 Z, 26–8'de sona eren süre boyunca her 3 saatte yeni bir geriye doğru yörünge başlamaktadır. Ve sonuç olarak 96 saatlik bir süre içinde 32 yörünge ortaya çıkmaktadır. Bunlardan ilki 00 Z, 30–8'de, sonuncusu ise 03 Z, 26–8'de Antalya'da başlayıp, bütün yörüngelerle birlikte origin kaynakta 00 Z, 26–8'de sona ermektedirler.

Şekil 5'ten kısa menzilli taşınımın Türkiye'nin Güneybatısı başta olmak üzere Antalya'ya yakın bölgelerden kaynaklandığı ve 3000 m altında gerçekleştiği görülmektedir. Orta ve uzun menzilli taşınımının da İtalya'dan ve Yunanistan'dan kaynaklandığı ve 3000–6000 m arasındaki yüksekliklerde gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 5. Antalya 3000 m'de aşamalı çoklu geriye doğru yörünge simülasyonu. Yörüngeler 00 Z, 30–8–1998 ile 00 Z, 26–8–1998 süresi boyunca 3 saat arayla hesaplanmıştır

Hava kalitesi modeli, CAMx

26–29 Ağustos 1998 periyodunda antropojenik kirleticilerin, birikimi, derişimi, taşınımı ve kaynaklarını tahmin edip simüle etmek amacıyla, hava kalitesi modeli CAMx 89x78 gridden oluşan, yatay çözünürlüğü 0.45° (B-D)x 0.59° (K-G) ve 14 katmanlık düşey çözünürlüğüne sahip olan bir domene uygulanmıştır. İlk düzey yer yüzünden 50 m yüksekliğinde olup son seviye ise 4000 m yüksekliğindedir. CAMx modeli antropojenik hava kirleticileri için, yatay ve düşey taşınım, kimyasal prosesler, kuru ve nem depozisyon terimlerini içeren süreklilik denklemini çözebilmesi için, aşağıdaki veri setinden oluşan bir girdiye gerek duymaktadır:

- MM5 öngörüsünden alınan 2 ve 3 boyutlu meteorolojik değişkenler,
- Modellenecek bütün türler için grid niteliğinde başlangıç ve sınır koşulları derişimleri,
- 11 kategorili ve 0.45°x0.59° çözünürlükte arazi kullanımı ve bitki örtüsü dağılımıdır. (Bu bilgiler USGS (United States Geological Survey)'den alınmış 24 kategorili ve 30 s'lik yatay çözünürlüğe sahip olan veriden dönüştürülerek üretilmiştir),
- Arazi kullanımı ve vejetasyon dağılımını kullanan bir model vasıtasıyla hesaplanan UV albedo kodları,
- TUV (Tropospheric Ultraviolet & Visible Radiation Model) kullanılarak hesaplanan grid niteliğindeki ışık geçirmezliği kodları, ozon kolonu kodları ve fotoliz oranları,
- Emisyon envanteri (EMEP'ten alınan yıllık ortalama emisyon envanterleri kullanılarak çalışma domeni ve periyodu içinde çeşitli kirlilik türlerinin saatlik grid niteliğindeki emisyon envanterleri hesaplanmıştır).

Bu çalışmada CAMx 4.11s versiyonu, CB-IV gaz fazı kimyasal mekanizma NO₄ kullanılmıştır. Bu mekanizma SO₂'nin PSO₄²⁻'e dönüşümünü gerçekleştiren homojen gaz fazı reaksiyonlarını da içine almaktadır.

Gazların kuru birikmeleri Wesely (1989)'nin rezistans modeline dayanmaktadır.

CAMx modeli yukarıda sözü edilen özellik ve girdilerle 26–29 Ağustos arasındaki episodik periyotta çalıştırılıp, SO₂ ve PSO₄²⁻ türleri için saatlik derişim ve birikme oranları elde edilmiştir. Binary formatında olan bu çıktılar PAVE (Package for Analysis and Visualization of Environmental data) görüntüleme programı kullanılarak harita üzerinde grafiklendirilmiştir.

Şekil 6 periyodun ilk ve son günlerinde tahmin edilen SO₂ ve PSO₄²⁻'nin derişim simülasyonlarını göstermektedir. Şekil 6'dan da anlaşılacağı üzere 26 Ağustos günü saat 12 Z'da İtalya üzerinde yer alan yüksek sülfat derişimi üç gün sonra 29 Ağustos saat 12 Z'da doğuya doğru hareket etmiş ve Türkiye'nin batı sınırlarını geçmeye başlamıştır. Orta Avrupa üzerinde periyodun başında olmayıp sonraki saatlerde üretilen sülfatın yüksek derişimleri de (Şekil 6'da gösterilmemiş) doğuya doğru hareket ederek periyodun sonuna doğru Doğu Avrupa üzerinde yer almaya başlamıştır.

SO₂ derişimi ise Şekil 6'dan da görüleceği gibi büyük bir yer değişimi göstermemiştir. Bu demektirki SO₂ sadece kaynaklar yakınında yüksek derişim göstermekte ve kaynaktan uzak mesafelere taşınmamaktadır. Benzer sonuçlar Sciare vd. (2002) tarafından da elde edilmiştir. Bunun sebebi termik santrallerin bacalarındaki aktif SO₂–SO₄²⁻ oksidasyonu ve ayrıca atmosferde SO₂'nin aerosol sülfata kısa sürede gerçekleşen dönüşümünden dolayı olabilir.

Sonuç olarak sülfatın Orta ve Güneydoğu Avrupa'dan Türkiye ve Doğu Akdeniz bölgesine taşındığı, sülfatın derişim simülasyonlarından çıkarılan açık bir kanıttır.

Dünya çapında küresel veya bölgesel olarak yerine oturmuş düzenli bir kuru birikme gözlem metodolojisi mevcut değildir. Ayrıca kuru birikme çalışmalarının nem birikme çalışmalarına oranla daha seyrek olduğu söylenebilir.

Bu çalışmada SO₂ ve PSO₄²⁻'nin birikme hızıyla nemli ve kuru birikme oranları CAMx modeliyle simüle edilmiştir. Bu simülasyonlar aşağıdakileri içermektedir:

1. İki boyutlu kuru birikim hızı (m/s).
2. İki boyutlu kuru birikim kütlesi (gaz için mol/ha, aerosol için g/ha).
3. İki boyutlu nemli birikim kütlesi (gaz için mol/ha, aerosol için g/ha).
4. İki boyutlu yağış suyu içindeki tür derişimi (gaz için mol/l, aerosol için g/l).

Çalışma periyodunda Doğu Akdeniz bölgesinde dikkate değer yağış kaydedilmemiştir. Ayrıca çalışma alanının bir bölümünde çok az miktarda lokal yağış kaydedilmiş olduğundan, her iki kirleticinin nemli birikmesi ile yağış suyu içindeki derişimi tartışılmayacaktır.

Bir hava kirleticisinin aşağıya (yere) doğru olan akısı ve buna bağlı olarak ta birikimi o kirleticinin derişimine orantılıdır. Dolayısıyla periyodun ilk ve son günlerindeki PSO₄²⁻ ve SO₂ türlerinin derişim ve birikim simülasyonlarını gösteren Şekil 6 ve 7'den de görüleceği üzere, bu türlerin derişimlerinin yüksek oldukları bölgelerde birikimleri de yüksektir ve tersi olarak ta derişimlerinin düşük oldukları yerlerde ise birikme oranları da düşüktür. Buna dayanarak, Doğu Akdeniz bölgesinde gözlenen yüksek birikme oranlarının da Orta, Güney ve Doğu Avrupadan kaynaklandığı söylenebilir.

Sonuçlar

Bu çalışmada mezo-ölçekli meteorolojik model MM5, yörünge modeli HYSPLIT ve fotokimyasal hava kalitesi modeli CAMx'ten oluşan bir modelleme sistemi geliştirilmiş, Avrupa, Türkiye ve Akdeniz'i içine alan oldukça büyük bir bölgede, 26–29 Ağustos 1998 episodik periyodundaki atmosferik sirkülasyonu ve meteorolojik koşulları takiben bölgedeki hava kirleticilerinin derişimi, birikimi ve taşınımı tahmin edilmiştir.

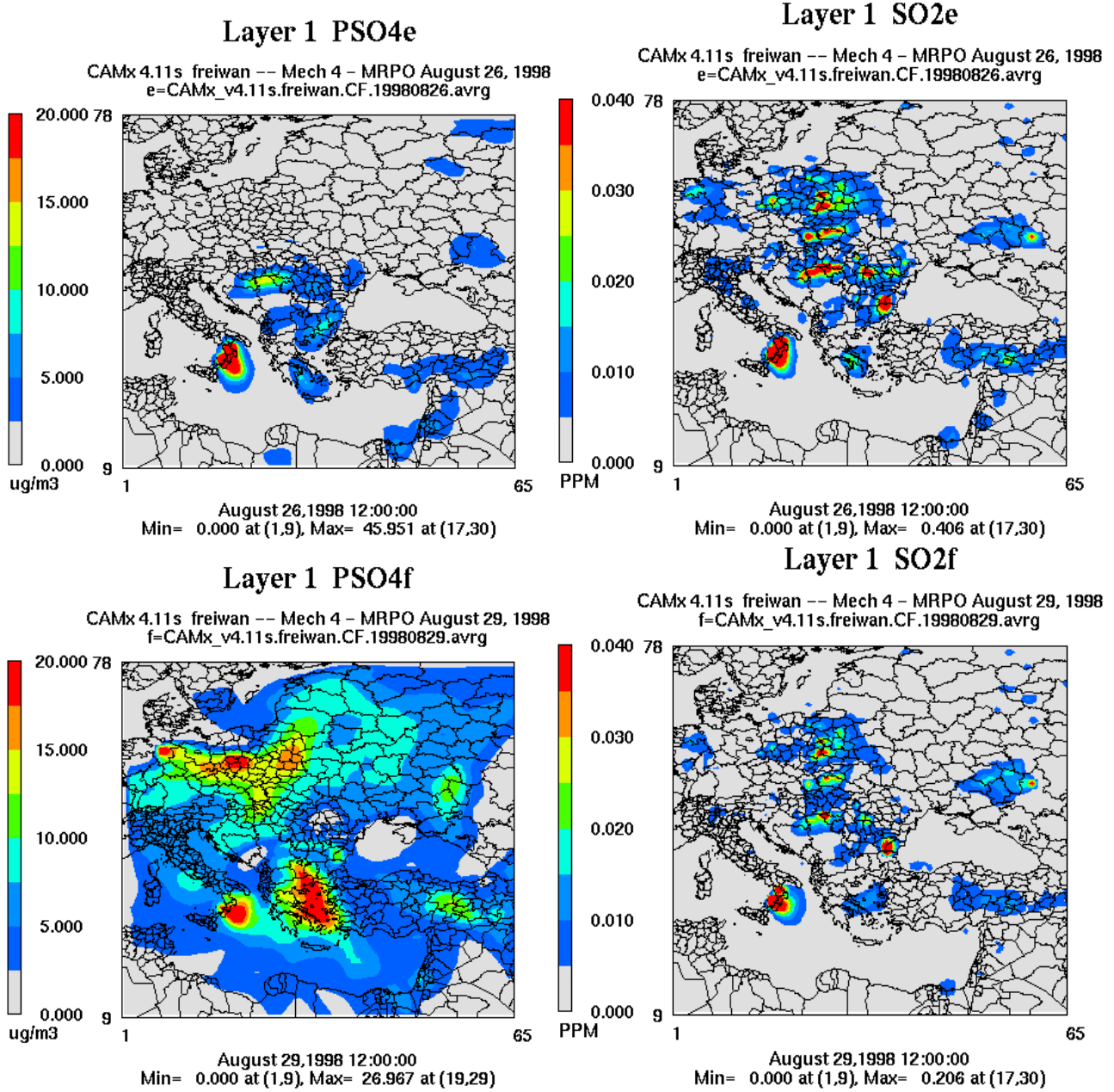
Bu modelleme sistemi bu kadar geniş bir bölgede hava kirliliğinin Türkiye ve Doğu Akdeniz bölgesine olan taşınımı simüle etmek amacıyla Türkiye'de ilk defa kullanılmaktadır. RIP ve HYSPLIT modelleri vasıtasıyla üretilen yörünge simülasyonları, hava parsellerinin üç ana sektörden kaynaklandığı bulunmuştur. Bunlar:

- A sektörü: Türkiye ve Doğu Avrupa.
- B sektörü: Türkiye ve Orta Avrupa.
- C sektörü: Güney Avrupa ve Akdeniz'i içermektedir

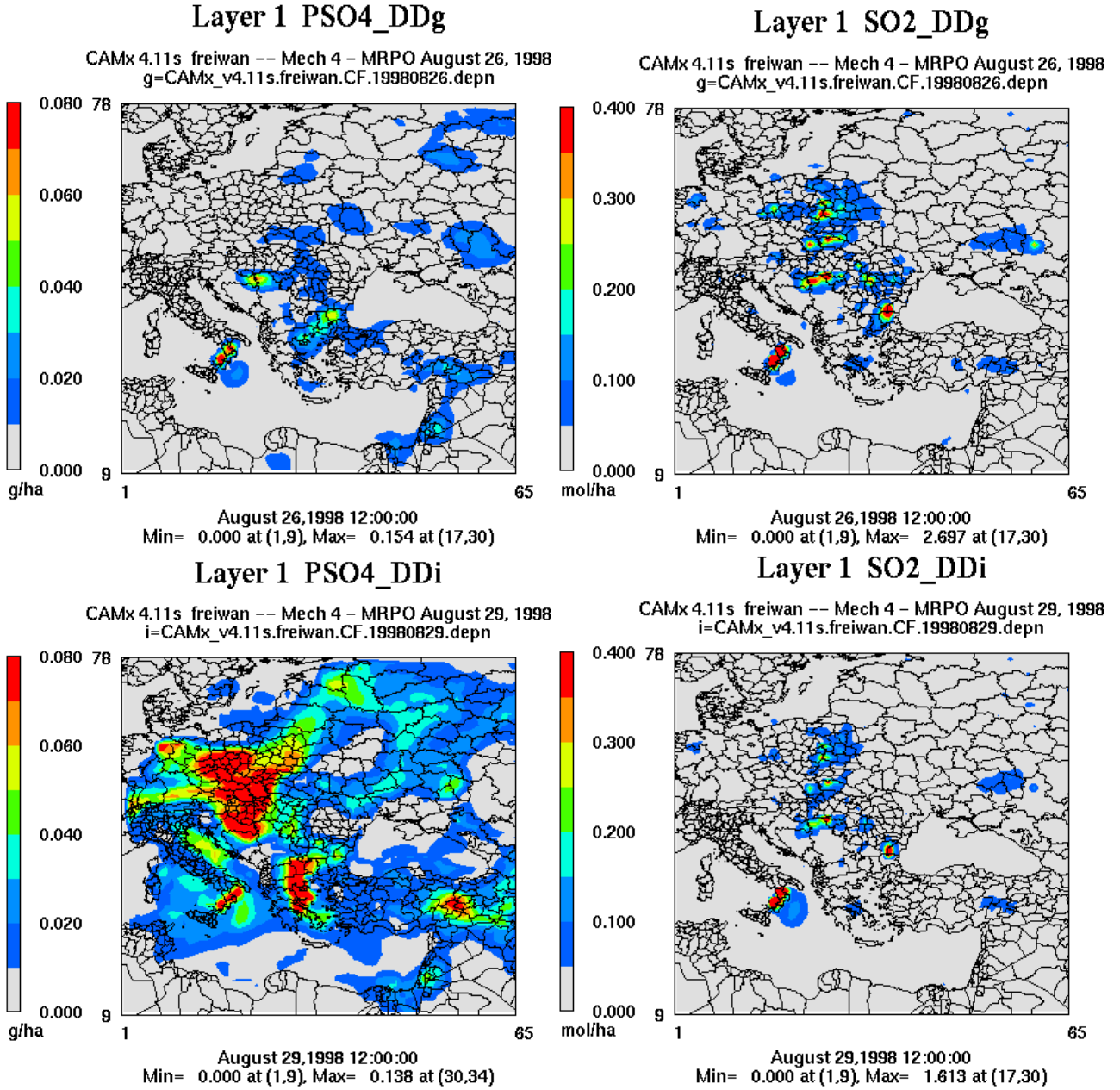
Hava kalitesi modeli CAMx vasıtasıyla üretilen sülfatın derişim ve birikim simülasyonları, RIP ve HYSPLIT modelleri simülasyonlarıyla son derece uyuşmaktadır. Simülasyonlar sülfatın Orta, Doğu ve Güney Avrupa'dan

Doğu Akdeniz bölgesine iki kaynak ve geçiş yolu izlediğini göstermiştir, bunlar:

- İtalya'dan kaynaklanan ve Yunanistan, Ege Denizi ve Türkiyenin güneybatısına olan taşınım yolu,
- Orta ve Doğu Avrupa'dan kaynaklanan ve Türkiyenin kuzeybatısına olan taşınım yoludur.



Şekil 6. 26 Ağustos 1200Z'de (üstte) ve tam üç gün sonra 29 Ağustos 12 Z'de (altta) CAMx tarafından tahmin edilen SO_4 (sol) ve SO_2 (sağ) derişim simülasyonları



Şekil 7. 26 Ağustos 12 Z'de (üstte) ve tam üç gün sonra 29 Ağustos 12 Z'de (altta) CAMx tarafından tahmin edilen PSO_4 (sol) ve SO_2 (sağ) birikim simülasyonları

PSO_4^{2-} ve SO_2 simülasyonları, her bir türün derişimi ve birikimi arasında büyük bir benzerlik olduğunu göstermiştir. SO_2 'nin hem derişimi hem birikimi sadece kaynak yakınında yüksek değer göstermiştir. Bu da SO_2 'nin orijin kaynaklarından uzun mesafelere taşınmadığını ve kaynakları yakınında birikim olarak çökeldiğini ispatlamaktadır. SO_2 'nin tersine Doğu Akdeniz bölgesinde gözlenen sülfat birikimi Orta, Doğu ve Güney Avrupadan kaynaklanmaktadır.

Bu çalışmada kullanılan model sisteminin performansı oldukça yüksektir. MM5 modelinin 4. ve 5. günlerdeki doğruluk oranının 1. ve 2. günlerdekinden daha yüksek olduğu bulunmuştur. CAMx modeli de Çubuk- Ankara için sülfat tahminlerinde iyi bir performans göstermiş ancak Antalya için sülfatı 8 faktörüyle daha düşük tahmin etmiştir. SO_2 'yi ise 6 faktörüyle daha yüksek tahmin etmiştir. Modelin SO_2 'yi daha yüksek tahmin etmesinin sebebi sınır ve başlan-

gıç koşullarında kullanılan SO₂'nin tahmini ortalama değerlerinden kaynaklanmış olabilir.

Kaynaklar

- Camkur, R. V., ve Miller, R. L., (2004). Incorporating the effect of small-scale circulations upon dust emission in an atmospheric general circulation model. *Journal of Geophysical Research*, **109**, D07201, doi: 10.1029/2003JD004067.
- Chen, L.W. A., Doddridge, B. G., Dickerson R. R., Chow, C. C., ve Henry, R. C., (2002). Origins of fine aerosol mass in Baltimore-Washington corridor: implications from observation, factor analysis and ensemble air particle back trajectory. *Atmospheric Environment*, **36**, 4541-4554
- Dinçer, F., Elbir, T., ve Muezzinoglu, A., (2003). HYSPLIT back-trajectory modeliyle İzmir ve çevresindeki hava kirletici kaynakların bölgenin hava kalitesine etkileri analizi. *Yanma ve hava kirliliği kontrolü 6. ulusal sempozyumu*, İzmir, 161 – 168.
- Doğan G., ve Tuncel, G., (2003). Türkiye'nin değişik bölgelerinde aerosol kompozisyonlarının karşılaştırılması. *Yanma ve hava kirliliği kontrolü 6. ulusal sempozyumu*, İzmir, 169–181.
- Draxler, R. R., (1987). Sensitivity of a trajectory model to the spatial and temporal resolution of the meteorological data during CAPTEX. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, Vol. **26**, No: 11, 1577-1588.
- Galperin, M., (1991). Routine model for long-range transport calculations of sulfur and nitrogen compounds from continuous sources allowing for non-linear effects. *Air Pollution modeling and its Application VIII*, Plenum Press, New York.
- Güllü H.G., Ölmez I., ve Tuncel G., (2000). Temporal variability of atmospheric trace element concentrations over the eastern Mediterranean Sea. *Spectrochimica Acta, Part B*, **55**, 1135-1150.
- Israelevich, P. L., Levin, Z., Joseph, J. H., ve Ganor, E., (2002). Desert aerosol transport in the Mediterranean region as inferred from the TOMS aerosol index. *Journal of Geophysical Research*, **107** D21, 4572, doi: 10.1029/2001JD002011.
- Kallos, G., Astitha, M., Gofa, F., O'Connor, M., Mihalopoulos, N., ve Zlatev, Z., (2004). "Transport and deposition patterns of ozone and aerosols in the Mediterranean region". *27th NATO/CCMS International Technical Meeting on Air Pollution Modeling and its Applications*, Banff, Canada, 218 – 225.
- Koçak, M., Nimmo, M., Kubilay, N., ve Herut, B., (2004). Spatio-temporal Aerosol trace metal concentrations and sources in Levantine basin of the Eastern Mediterranean. *Atmospheric Environment*, **38**, 2133-2144.
- Kouvarakis, G., Tsigaridis, K., Kanakidou, M., ve Mihalopoulos, N., (2000). Temporal variation of surface regional background ozone over Crete Island in the southeast Mediterranean. *Journal of Geophysical Research* **105**, No. D4. 4399-4407.
- Kubilay N., Nickovic S., Moulin C., ve Dulac F., (2000). An illustration of the transport and deposition of mineral dust onto the eastern Mediterranean. *Atmospheric Environment*, **34**, 8, 1293-1303.
- Öztürk, F., Soultanov, L., ve Tuncel, G., (2003). Doğu Akdeniz bölgesinde gözlenen yüksek sulfat derişim kaynaklarının belirlenmesi. *Yanma ve hava kirliliği kontrolü 6. ulusal sempozyumu*, İzmir, 298 – 309.
- Park, S.-U., ve Lee, E.-H., (2003). Long-range transport contribution to dry deposition of acid pollutants in South Korea. *Atmospheric Environment*, **37**, 3967-3980.
- Sciare, J., Bardouki, H., Moulin, C., ve Mihalopoulos, N., (2002). Aerosol sources and their contribution to the chemical composition of aerosols in the Eastern Mediterranean Sea during summertime. *Atmospheric Chemistry Discussion*, **2**, 1287-1315.
- Syrakov, D., ve Prodnova, M., (2002). Transboundary exchange of sulfur pollution in region southeastern Europe. *Air Pollution and its Application XV*, Kluwer Academic, New York.
- Tuncel, G., (2002). Wet and dry deposition of natural and anthropogenic aerosol components to the Eastern Mediterranean. *Bi-National Israeli-Turkish workshop on: Atmospheric deposition of aerosols and gases in the Eastern Mediterranean*, Dead Sea, Israel.
- Tuncel, S. G., ve Erduran, M. S., (2001). Characteristics of air pollutant in the Eastern Mediterranean coast. *The 2nd international symposium on: Airquality management at: urban, regional and global scales*. Istanbul, 501–508.
- Wesely, M.L., (1989). Parameterization of surface resistances to gaseous dry deposition in regional-scale numerical models, *Atmospheric Environment*, **23**, 1293-1304.