



Ege Coğrafya Dergisi, 23/2 (2014), 53-64, İzmir
Aegean Geographical Journal, 23/2 (2014), 53-64, Izmir—TURKEY

TOZ TAŞINIMI OLAYININ UZAKTAN ALGILAMA VE SAYISAL TAHMİN MODELİ İLE ANALİZİ

Analysis of Dust Transport Event via Remote Sensing and Numerical Forecast Model

Kahraman OĞUZ & Cihan DÜNDAR

*Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Araştırma Dairesi Başkanlığı,
Atmosfer Modelleri Şube Müdürlüğü, Ankara*

koguz@mgm.gov.tr

cdundar@mgm.gov.tr

Abstract

Dust transports from African deserts cause an intense increase of aerosol concentrations in the tropospheric column and often an increase of particulate matter (PM10) at the ground level. For this reason, they have an important impact on Mediterranean site. The area was selected as the Sahara desert and the eastern Mediterranean, where an intense dust event occurred during the period 6–8 April 2013. As the first step, synoptic analysis of this episode is performed for the period of 7–8 April 2013. Synoptic analysis and satellite based model forecasts showed the Egyptian deserts as dust source region. Dust plumes hovered off the coasts of Egypt on April 7 and spanned Cyprus and the sea's eastern shoreline the following day, reaching as far north as Turkey. The NMMB/BSC-Dust model captured these high values as good matched with the MODIS on NASA's Aqua satellite. It was observed that the NMMB/BSC-Dust model produces well predictions for dust transport and can be used for early warnings in Turkey.

Keywords: desert dust, atmospheric transport, dust modelling, satellite aerosol data

Öz

Afrika çöllerinde gerçekleşen toz taşınımları, atmosfer aerosol konsantrasyonunda ve yer seviyesi partikül madde (PM10) değerlerinde yoğun artışa sebep olmaktadır. Bu nedenle Afrika kaynaklı toz taşınımları, Akdeniz üzerinde önemli etkilere sahiptirler. Bu çalışmada, 6-8 Nisan 2013 döneminde Afrika üzerinden Doğu Akdeniz'e doğru gerçekleşen toz taşınım olayı incelenmiştir. İlk adım olarak, 7-8 Nisan 2013 dönemi sinoptik açıdan analiz edilmiştir. Yapılan sinoptik analizler ve uydu gözlemlerine dayanan model sonuçları, toz taşınımının kaynak alanının Mısır çölleri olduğunu göstermiştir. Mısır üzerinden hareketlenen çöl tozları, Kıbrıs ve Akdeniz'in doğu kıyılarını süpürerek kaynak sahasından ayrıldıktan bir gün sonra Türkiye'nin kuzeyine ulaşmıştır. Tahmin modeli çıktıları bu toz taşınım olayını saptamış ve NASA'nın MODIS/Aqua uydusu ile de iyi eşleşme göstermiştir. NMMB/BSC-Dust tahmin modelinin, toz taşınımı için iyi tahmin ürettiği ve ülkemiz açısından erken uyarılarda kullanılabileceği görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: çöl tozu, atmosferik taşınım, toz modellemesi, uydu aerosol verisi

1. GİRİŞ

Aerosoller insan sağlığına olan olumsuz etkilerinin yanında, direkt ya da dolaylı olarak küresel iklim üzerinde de önemli etkilere sahiptirler. Aerosollerin güneş radyasyonunu yansıtma ve absorblama (absorbe etme) olayı, aerosollerin iklime direkt etkisi olarak bilinmektedir. Bunun yanında aerosol partikülleri, bulut yoğunlaşma çekirdeği etkisi göstererek bulutların yaşam ömürleri ve miktarları üzerinde değişiklikler oluşturabilmektedirler (Lohmann vd., 2005). Nitekim yapılan çalışmalar atmosfere salınan aerosollerin çoğunluğunu oluşturan çöl tozlarının alçak seviye bulutlarında yağışın oluşumunu tetiklediğini göstermektedir (IPCC, 2007). Diğer taraftan, önemli bir demir kaynağı olan çöl tozları okyanus biyojeokimyasal döngüsünü de etkilemektedirler (Jickells vd., 2005).

Çöl tozları, kurak ve yarı kurak yüzeylerden rüzgâr erozyonları ile atmosfere karışmaktadır. Çöl tozlarının kaynak bölgeleri, kuzey yarım kürede, özellikle Sahra çölü, Arabistan yarımadası çölleri ve Güneybatı Asya üzerinde bulunmaktadır (Goudie ve Middleton, 2001).

Toz taşınımı mevsimsel olarak da değişiklik göstermektedir. En önemli çöl tozu kaynağı olarak bilinen Sahra çölünden Doğu Akdeniz'e doğru gerçekleşen toz taşınımı olayları, kışın minimum düzeye ulaşmaktadır (Gullu vd., 1998). Yazın kararlı hava koşulları ile havadaki tozun bölgede uzun süre kalması sebebiyle de toz taşınımı olayları sık gözlemlenmektedir.

Konuyla ilgili yapılan çalışmalar, Sahra Çölü tozlarının oluşumu ve taşınımında etkili olan atmosferik faktörlerin, Orta Enlem Siklonları, rüzgârlar ve Kuzey Atlantik Salınımı olduğunu göstermektedir. Orta enlem siklonları, temelde 35-70° enlemleri arasında meydana gelmektedir. Bu enlemlerde oluştuğunda, Akdeniz Havzası'na ve Türkiye'ye çok fazla çöl tozları taşınmamaktadır. Ancak orta enlem siklonlarının oluşmasını sağlayan sistem biraz daha güneye 30° enlemlerine indiğinden, Sahra Çölü üzerinde çeşitli konvektif hareketler ve türbülanslarla oluşmuş olan çöl tozları, Orta enlem siklonları vasıtasıyla Akdeniz Havzası'na ve Türkiye'ye yoğun olarak taşınmaktadır. Akdeniz Havzası'na çöl kaynaklı tozların taşınmasını sağlayan rüzgârlar ise Hamsin,

Sirokko ve gece oluşumlu Alçak Seviye Jetleridir. Yaz mevsiminde etkili olan bölgesel rüzgârlar, Sahra Çölü ve Arabistan Yarımadası'ndaki karasal tropikal hava kütesinin kuzeye doğru ilerlemesiyle oluşurlar. Akdeniz Havzası'na taşınan çöl tozlarıyla Kuzey Atlantik Salınımı arasında önemli ilişkiler bulunmaktadır. KAS (Kuzey Atlantik Salınımı)'ın pozitif evresinde siklonik aktivitelerin Akdeniz Havzası'nda az olmasından dolayı toz faaliyetlerinin de az olduğu; buna karşılık KAS'ın negatif evresinde ise Akdeniz Havzası'nda siklonik aktivitelerin yoğunlaşmasıyla toz taşınımının artmaya başladığı belirtilmektedir (Şengün ve Kıranşan, 2013).

Bu mekanizmalar ile taşınan çöl tozları, atmosferin üst tabakalarına yükselerek uzun mesafeler kat etmektedir. Göreceli olarak daha büyük olan toz parçacıkları, kaynak alanlarının yakınlarına çökerken, küçük olanlar ise binlerce kilometre yol kat edebilmektedir. Bu nedenle toz taşınımının gözlemi önem arz etmektedir. Çeşitli yöntemlerle gözlenebilen atmosferik toz taşınımı, son yıllarda özellikle uydular aracılığı ile de gözlemlenebilmektedir. Toz taşınımından etkilenen alanlarda atmosferik tozun heterojen dağılımı nedeniyle gözleminin tek bir modül ile net bir şekilde yapılması mümkün değildir. Bu nedenle, yere dayalı ölçümler ve uydu gözlemlerinin bir arada değerlendirilmesi gerekmektedir (Badarinath vd., 2010).

MODIS sensörünün çeşitli uyduları tarafından sağlanan aerosol optik derinliği (AOD) verileri, bölgesel ve küresel olarak tozun gözlemi için önemli bilgiler sağlamaktadır. Fakat bu veriler, kurak bölgelerde görülen yüksek albedolar sebebiyle toz kaynaklarının belirlenmesi için anlamlı olarak kullanılamamaktadır (Levy, vd. 2003). OMI aerosol indeksi (AI) ürünü de toz kaynak bölgelerinin belirlenmesi için bilgiler vermekle birlikte, MODIS'e kıyasla arazi üzerinde kullanıma daha az uygundur (Hsu vd., 2006). Diğer taraftan, hava kalite istasyonları tarafından ölçülen partikül madde 10 (PM10) miktarı küresel anlamda bir veri kaynağı olmasa da kesintisiz olarak toz ölçümü için istasyon verisi sağlamaktadırlar. Atmosferik tozun gözleminin tek bir modül ile tam anlamıyla yapılamaması sebebiyle, toz döngüsünü tahmin eden modellerin yanında uzaktan algılama verilerinin ve yere dayalı gözlemlerin kullanılması

hem tozun mekansal dağılımı, hem de toz kaynak bölgesinin belirlenmesi amacıyla gerekmektedir.

Çalışmamızda, 8 Nisan 2013 tarihinde Sahra çölünden Akdeniz'e doğru taşınan ve Türkiye'yi etkileyen toz taşınımı olayı ele alınmıştır. Bu toz taşınımı olayının bir özelliği Doğu Akdeniz bölgesinden Türkiye'ye giriş yaparak İç Anadolu ve Güney Doğu Anadolu Bölgesindeki pek çok istasyonlarda PM10 ölçüm değerlerinin çok yüksek değerler ($>200 \mu\text{g}/\text{m}^3$) vermesine sebep olmasıdır. Ele alınan bu taşınımın, uydu verileri, yere dayalı gözlemler ve tahmin modeli kullanılarak başlangıcından çökelişine kadarki sürede analizi yapılmıştır. Öncelikle, Hava Kalite istasyonlarının PM10 verileri incelenmiş, sinoptik analizlerin yanında OMI ve MODIS uydu verileri ile toz kaynak alanlarının tespiti yapılmıştır. Sonrasında, toz taşınımı tahmini yapan NMMB/BSC-Dust modelinin çıktıları yorumlanmış, tozun karakteristiği hakkında bilgiler verilmiştir. Elde edilen tüm veriler bir arada incelenmiş ve tahmin modelinin gözlem ve yer verileri ile doğrulaması yapılmıştır.

2. VERİ VE YÖNTEM

Çalışmamızda atmosferik tozu daha iyi temsil etmesi için NASA Aqua uydusuna ait $1^\circ \times 1^\circ$ gridli AOD verileri, toz taşınımının gözlemlendiği günlere ait $1^\circ \times 1^\circ$ gridli OMI/Aura uydu verileri, hava kalite istasyonlarına ait PM10 ölçüm verileri ve NMMB/BSC-Dust toz taşınımı tahmin modeli kullanılmıştır. AOD ve AI uydu görüntüleri NASA'ya ait Giovanni sitesinden (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni>), PM10 ölçümleri ise Çevre ve Şehircilik Bakanlığına ait Hava Kalitesi İzleme İstasyonları Web Sitesinden (<http://www.havaizleme.gov.tr/>) elde edilmiştir. Öte yandan toz taşınımı tahmin modelinin ürünleri ise Dünya Meteoroloji Organizasyonu (WMO) tarafından desteklenen Kuzey Afrika-Orta Doğu ve Avrupa (NA-ME-E) Merkezi'nden (<http://sds-was.aemet.es/>) sayısal olarak elde edilmiş ve analiz edilmiştir.

2.1. MODIS (Orta Çözünürlüklü Spektro-radiometre Görüntüleme Sistemi)

Bu çalışmada veri elde ettiğimiz MODIS, 1999 yılında NASA tarafından fırlatılmış, yer küreye göre sabit yörüngesi olan bir sistemdir. Bu sistem, 36 farklı bant bölgesinde 0,4 -14,4 mikron dalga

boyunda çalışan, farklı seçicilikte özelliklere sahiptir. 1-2 geçiş ile tüm dünyayı görüntüler. Sistemin üzerine kurulu ve aerosoller ile ilgili ürün veren iki çeşit uydu (Terra ve Aqua) bulunmaktadır. Terra yörüngesinde MODIS dünyayı sabah görürken, Aqua MODIS yörüngesi dünyayı öğleden sonra görür. Yeryüzü üzerinde büyük ölçekli küresel dinamik yapılı ölçümleri (aerosol, bulut kapallığı, radyasyon bütçesi, aşağı atmosfer okyanus ve kara yüzeyi değişimleri) verecek şekilde tasarlanmıştır. MODIS aerosol algoritması, kara ve okyanus üzerinde veri sağlamak amacıyla iki bağımsız algoritmadan oluşmaktadır ve sadece bulutsuz bölgelerde veri sağlayacak şekilde geliştirilmiştir (Levy vd., 2010). Uydu ile gözlenen aerosol optik derinliği verileri tozun atmosferik sütunundaki dağılımı ve yoğunluğunu göstermektedir. Çalışmamızda Aqua uydusuna ait karaları temsil eden "Deep Blue, Land-only" ürünü kullanılmıştır.

2.2. OMI (Ozon Görüntüleme Cihazı)

OMI cihazı, TOMS enstrümanının devamıdır ve toplam ozon, ozon kimyası, aerosol ve iklimle ilgili atmosferik parametreleri ölçebilmektedir. Duman, toz, sülfat vb. aerosol türlerini ayırt etmekte ve bunlara ait veriler sağlamaktadır.

Toz analizi için sıkça kullanılan ürünlerden birisi olan OMI Aerosol İndeks (AI) ürünü Ultraviyole (UV) radyasyonunun atmosferdeki aerosollerden ne kadarının yansıtıldığının bir ölçümüdür. Bu algoritma, aerosol tabakası altından saçılan UV akısının pertürbasyonuna dayanmaktadır. AI ürünü, UV radyasyonunu absorblayan ve yansıtan aerosoller ayırt edebilmektedir ve bu yolla aerosoller tarafından absorblanma miktarı ile ilgili bilgi sağlamaktadır. AI pozitif değerleri, UV absorblayan aerosollerle alakalıdır ve bunlar temelde mineral toz, duman ve volkanik aerosollerdir. Negatif AI değerleri ise absorblamanın olmadığı (sülfat, deniz tuzu partikülleri gibi) hem doğal hem de antropojenik kaynaklarla ilişkilidir (Torres et al, 1998).

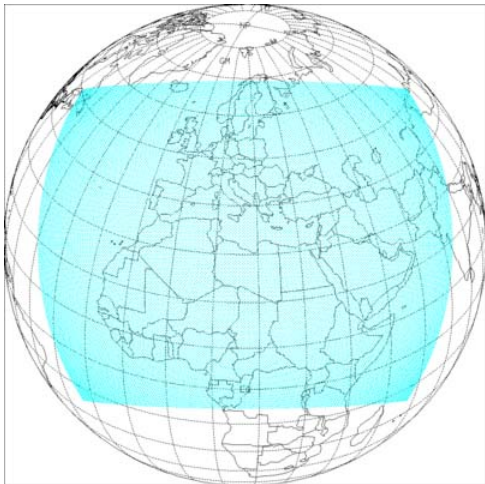
2.3. Hava Kalitesi İstasyonları

Hava kirliliğinin doğru bir şekilde ölçülmesi, tüm illerimizde hava kirliliği politikaları oluşturulması ve bu politikalar çerçevesinde illerin hava kalitesinin bir önceki yılın değerlerinden daha iyi durumlara getirilebilmesi amacıyla, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından 2005-2007 yılları

arasında 81 ilde hava kalitesi ölçüm istasyonları kurulmuştur. Bu istasyonlar, yere dayalı ölçüm verisi sağlamaktadır. Gözlem ağı olarak Türkiye içerisinde 81'i şehir merkezinde olmak üzere 122 adet istasyonu kapsamaktadır. Kurulan hava kirliliği ölçüm istasyonlarının hepsinde kükürtdioksit (SO₂) ve toz için önemli bir ölçüm olan partikül madde (PM10) parametreleri ve bazılarında ek olarak azotoksitler (NO, NO₂, NO_x), karbonmonoksit (CO) ve ozon (O₃) da tam otomatik yöntemle ölçülmektedir. PM10 ölçümü havadaki 10µm ve daha küçük çaplı partiküllerin yoğunlukları hakkında veri sağlamaktadır.

2.4. NMMB/BSC-Dust Toz Taşınımı Tahmin Modeli

Yeni nesil bir toz tahmin modeli olan NMMB/BSC-Dust modeli, NCEP nonhidrostatik modeli (NMMB) ile iç içe geliştirilmiş bir modeldir. Bu yolla kısa ve orta vadeli hava tahmini üzerinde de tahmin çıktıları üretebilmektedir. Çünkü, nonhidrostatik (topoğrafya-troposfer etkisini göze alan) dinamik yapısı, modele bölgesel ve küresel anlamda tahmin yapma yeteneği kazandırmaktadır. NMMB modeline eklenen BSC-Dust modülü, toz üretim, yüzey rüzgarı, türbülans, yatay ve dikey adveksiyon, yatay difüzyon, türbülans ile düşey taşınım ve kuru ve yaş çökme'yi göz önüne alarak kütle denge denklemini çözmektedir (Perez vd., 2011). Model, Barcelona Süperbilgisayar Merkezi'nde Şekil 1'de gösterilen alanda (domain) çalışmaktadır ve tahmin üretmektedir.



Şekil 1. Model Çalışma Alanı
(Kaynak: <http://www.bsc.es/earth-sciences>)
Figure 1. Model Study Area
(Source: <http://www.bsc.es/earth-sciences>)

Burada, modelin yatay çözünürlüğü 1/3° x 1/3° olmakla birlikte, düşey çözünürlüğü 24 dikey sigma-hibrit seviyesidir. Günde bir defa NCEP meteorolojik küresel verileri (0.5°x0.5°) ile çalıştırılan model, 72 saat ileriye yönelik tahminler üretmektedir ve ürünler Barcelona Süperbilgisayar Merkezinde yayınlanmaktadır. Ürünler aynı zamanda hem görsel, hem de sayısal olarak ülkelerin gerçekçi “Kum ve Toz Fırtınası Tahmini” yapma kapasitelerinin geliştirilmesi amacını taşıyan NA-ME-E merkezinde (<http://sds-was.aemet.es/>) yayınlanmaktadır.

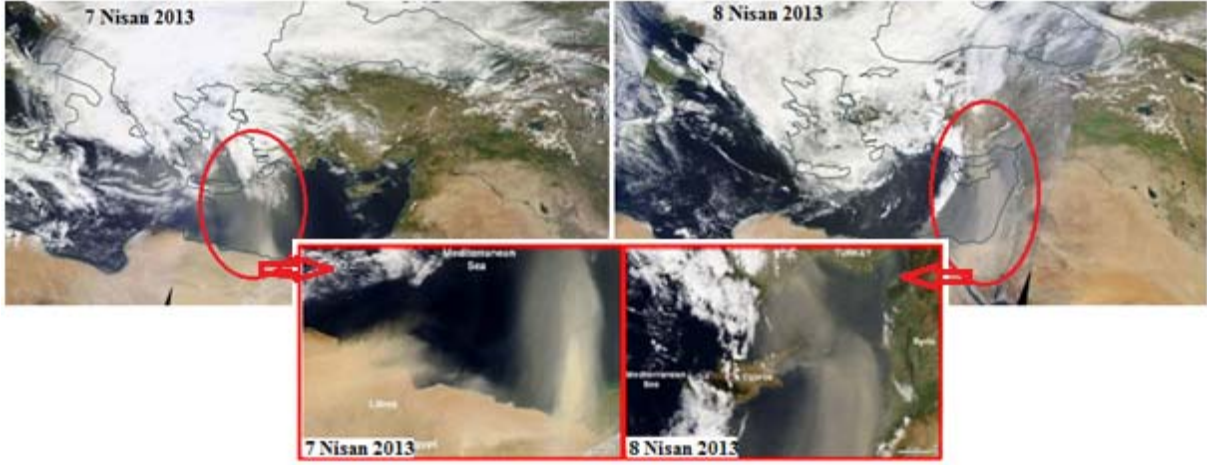
3. BULGULAR

3.1 Seçilen Toz Taşınım Olayı ve Meteorolojisi

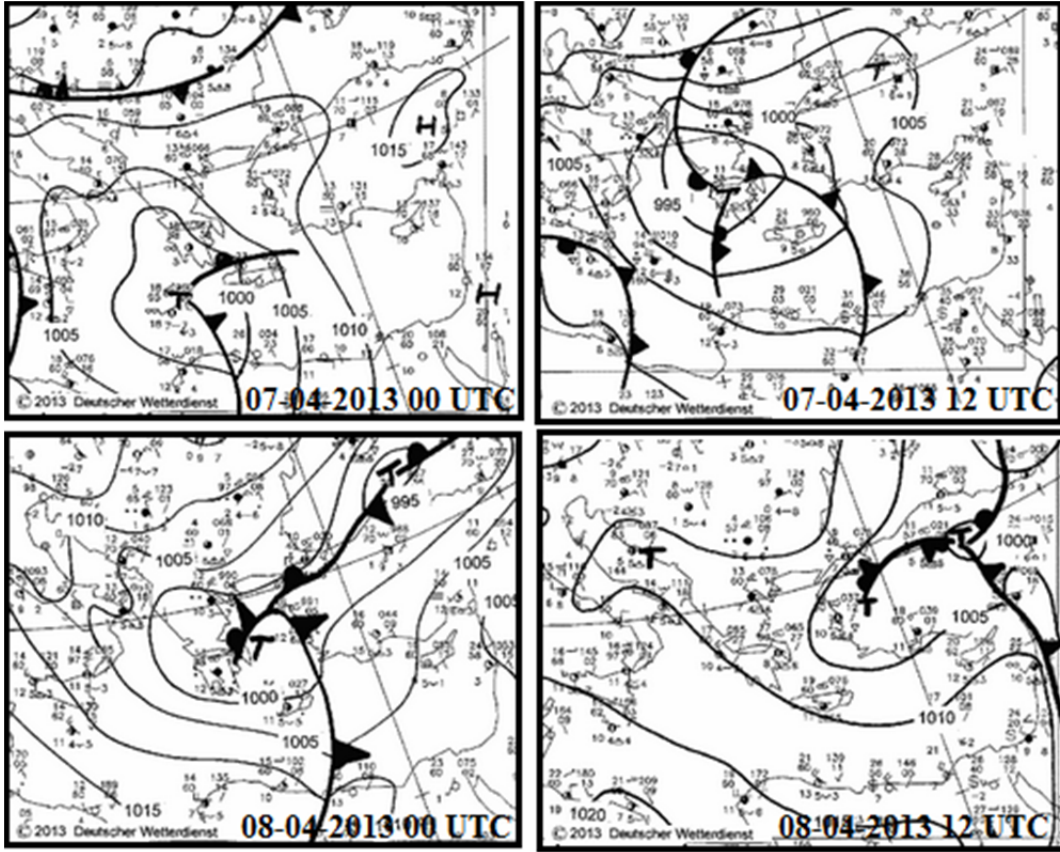
NASA'ya ait “Earthdata” web sitesinden elde edilen çalışma dönemine ait MODIS gerçek renkli (true color) görüntüsü Şekil 2'de sunulmuştur. Toz taşınımının gerçekleştiği günlerde (7-8 Nisan 2013) Yunanistan ve Türkiye'nin batısı üzerinde yoğun bulutluluk gözlenirken, Kuzey Afrika ve Doğu Akdeniz üzerinde bulutluluk görülmemiştir. Bu ise toz taşınımının gerçek renkli görüntü ile gözlemlenmesini mümkün kılmıştır.

7 Nisan 2013 tarihinde taşınımın Türkiye'nin kuzeybatısına kadar ulaştığı görülmektedir. Sonraki gün Afrika kaynaklı yeni bir toz taşınımının gerçekleştiği ve Kıbrıs üzerinden Türkiye'nin iç kesimlerine kadar ulaştığı görülmektedir. Bu taşınım sebebiyle Ankara, Gaziantep, Konya ve Niğde illerindeki PM10 ölçüm değerlerinin sırasıyla günlük ortalama olarak 173 µg/m³, 306 µg/m³, 132 µg/m³ ve 340 µg/m³'e kadar ulaştığı görülmektedir.

Akdeniz ve çevresindeki kıtalar üzerinde mevsimsel olarak değişiklik gösteren meteorolojik koşullar, bölgeyi etkileyen hava kütlelerinin farklı bölgelere taşınımına sebep olmaktadır. Akdeniz bölgesi tüm yıl boyunca siklonik hareketlerin sık olduğu bölge olarak bilinmektedir. Almazroui ve arkadaşları tarafından yapılan çalışma, Doğu Akdeniz siklonlarının şu iki meteorolojik faktör tarafından yönlendirildiğini göstermektedir: (i) Arabistan Yarımadası üzerinde görülen derin alçak basınç sistemi ve (ii) hem Azor hem Sibiryaya termik yüksek basınç merkezinin Doğu Akdeniz bölgesine doğru sokulması. Diğer bir deyişle, Doğu Akdeniz siklonları Kuzeydoğu Afrika (Mısır) üzerinden



Şekil 2. 7-8 Nisan 2013 tarihli Modis/Aqua uydusu gerçek renkli görüntüsü
Figure 2. Modis/Aqua satellite real time image for 7-8 April 2013



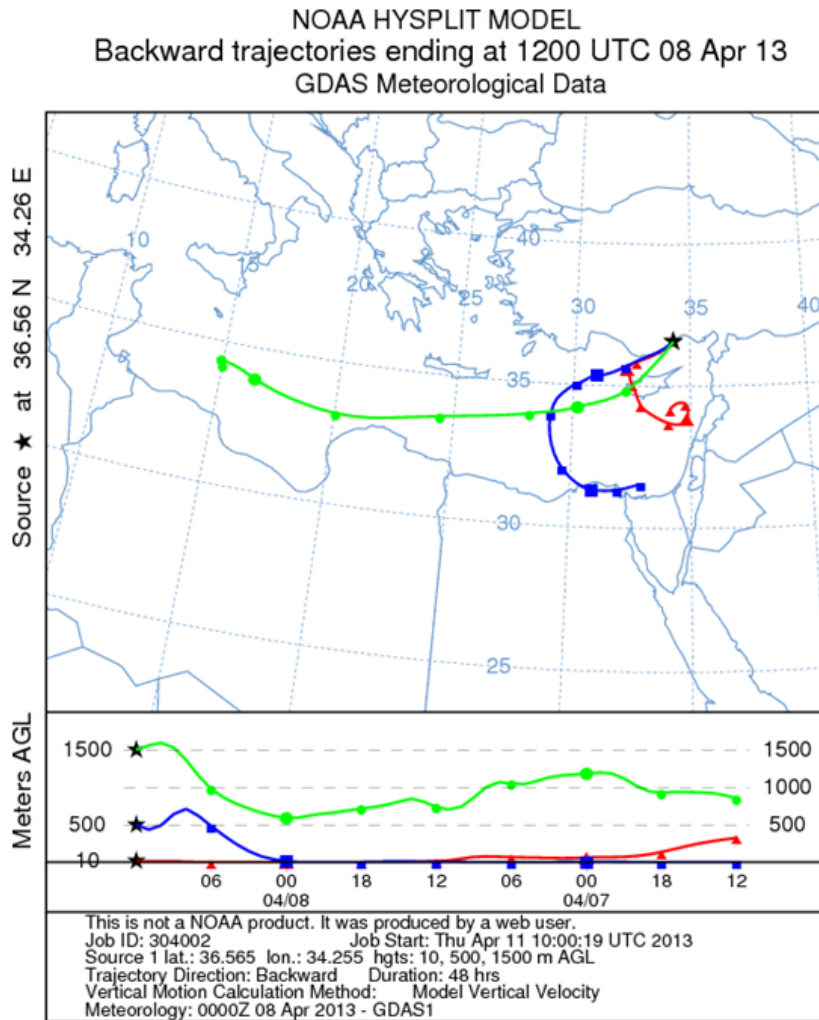
Şekil 3. 7-8 Nisan 2013 tarihli yer kartı. Yer kartında (T) soğuk cepheyi, (H) sıcak cepheyi, (O) oklüzyon cepheyi, (T) alçak basınç merkezini, (H) yüksek basınç merkezini ve (—) izobar çizgilerini gösterir.
Figure 3. Surface charts for 7-8 April 2013. It was indicated that cold front with (T), warm front with (H), occluded front with (O), low pressure center with (T), high pressure center with (H) and isobar lines with (—).

doğu Akdeniz'e gelen ya da sinoptik model gereği Doğu Akdeniz'de basıncın giderek düşmesiyle kendini gösteren siklonlardır. Doğu Akdeniz üzerinde yağışlara ve kuvvetli rüzgarlara neden olurlar. Kuzey Afrika üzerinden gelişlerinde sahra tozlarını Türkiye'nin güney kesimlerine kadar taşırlar (Almazroui vd., 2014).

Bu çalışmada toz taşınımına sebep olan meteorolojik patern; Mısır'ın batısındaki oluk ve Yunanistan'ın güneyinde bulunan alçak basınç merkezli cephe ile ilişkilidir. Arabistan kaynaklı bu alçak basınç sistemi, siklonik dönüşle birlikte Yunanistan üzerinden geçerek 8 Nisan 2013 tarihinde İç Anadolu Bölgesine yerleşmiştir. Gerçekleşen bu atmosferik sirkülasyon ile birlikte,

Mısır üzerinden Doğu Akdeniz ve Türkiye'ye doğru bir rüzgar akışı gerçekleşmiştir. Şekil 3'de görülen siklon, (i) tarafından etkilenen Doğu Akdeniz siklonlarından birisidir (Şekil 3).

Son olarak, Türkiye'ye ulaşan hava kütlelerinin kaynağının tespiti amacı ile HYSPLIT modeli geri yörünge analizi incelenmiştir. Türkiye'nin güneyine ulaşan hava kütlelerinin farklı seviyelerdeki kaynağını incelemek için 8 Nisan 2013 12UTC'ye ait HYSPLIT modeli 10, 500 ve 1500 m seviyelerinde 48 saat geriye çalıştırılmıştır (Şekil 4). Türkiye'nin güneyine 1500 m seviyesinden gelen hava kütleleri batı Akdeniz üzerinden iken; 10 ve 500 m seviyelerinden gelen hava kütleleri Doğu Akdeniz (Mısır) kaynaklıdır.



Şekil 4. Mersin merkezli HYSPLIT modeli geri yörünge analizi. Haritada, kırmızı çizgi 10 m, mavi çizgi 500 m ve yeşil çizgi 1500 m seviyesindeki hava kütlelerinin yörüngesini gösterir. Figure 4. Backward trajectory analysis of HYSPLIT model centered in Mersin. It was indicated that 10 m levels with red line, Red, blue and green lines shows air mass trajectory of 10 m, 500 m and 1500 m levels respectively.

3.2. OMI, MODIS Ürünleri ve Tozun Mekansal Dağılımı

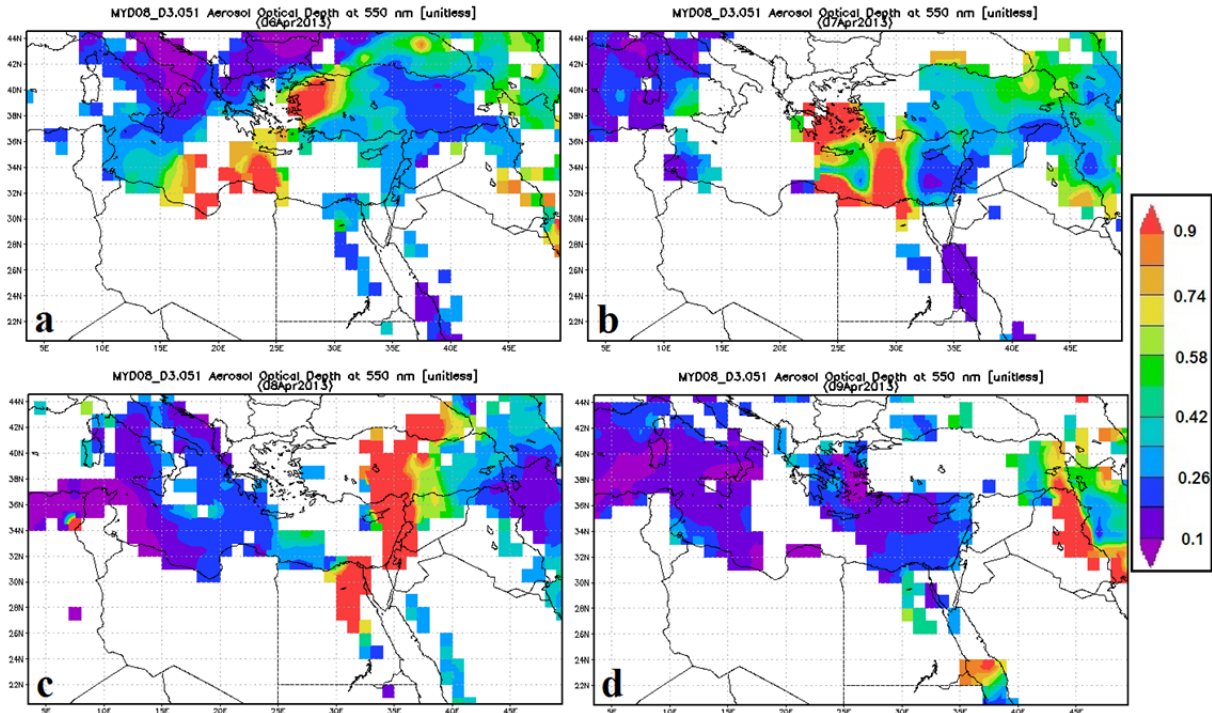
MODIS/Aqua uydusu aerosol optik derinliği (AOD₅₅₀) ölçüm verilerinin 3-50° D boylamı ve 20-45° K enlemlerindeki mekânsal dağılımı 6-9 Nisan 2013 tarihleri için Şekil 5(a-d)'de gösterilmiştir. Beyaz bölgelerde bulut varlığı sebebiyle veri bulunmamaktadır. 6 Nisan 2013(a) tarihinde toz taşınımı ile ilişkili olarak Libya'nın kuzeybatısından Türkiye'nin batısına uzanan alanda yüksek AOD (~0.9) değeri ölçülmüştür. Fakat bu değerler, örnek çalışma periyodumuzdaki taşınım olayından önce gerçekleşmiş bir taşınım sebebiyledir. 7 Nisan 2013(b) tarihinde Mısır'ın kuzey kesimlerinden Türkiye'nin kuzeybatısına uzanan bir alanda atmosferik toz varlığı sebebiyle çok yüksek AOD değeri (>0.9) görülmektedir. Öte yandan, bu tarihte Ege Denizi üzerinde de önemli miktarda toz varlığı sebebiyle yüksek AOD değeri ölçülmüştür. 8 Nisan 2013(c) tarihinde ise toz taşınımının Akdeniz üzerinden Karadeniz'e kadar uzanan bir alanda etkisini gösterdiği ve bunun dolayısı ile bölgede çok yüksek AOD değeri ölçüldüğü görülmektedir. Sonraki gün (d) ise sadece Irak üzerinde yüksek AOD değerleri

görülmektedir ki bu da toz taşınımının Irak'a kadar ulaştığını göstermektedir (Şekil 5).

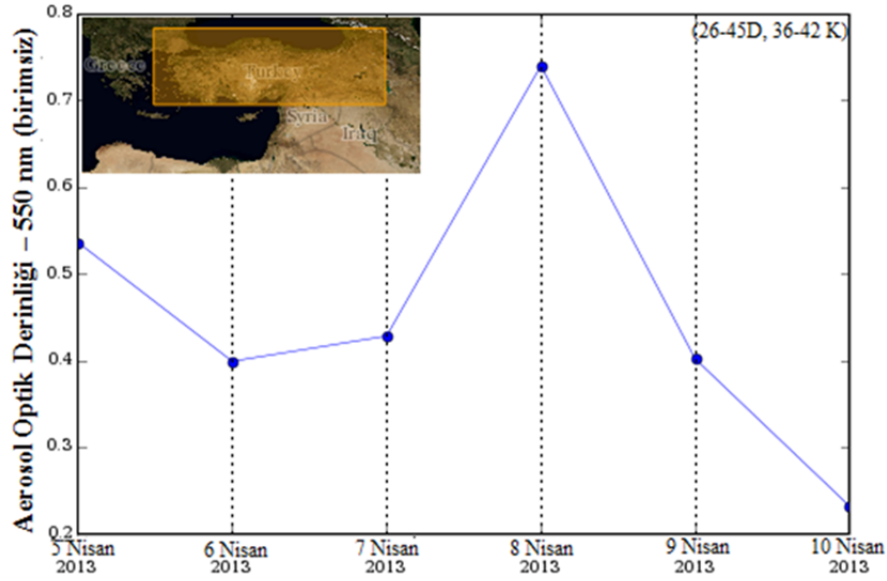
AOD gözlem değerlerini sayısal olarak görmek amacıyla, Türkiye sınırlarına (26-45D, 36-42K) giren alandaki grid noktalarının ortalaması alınarak değerleri günlük olarak Şekil 6'da sunulmuştur.

AOD'nin günlük ortalama değerinin 6 ve 7 Nisan 2013 tarihlerinde 0,4 civarında olduğu görülürken, bu değer 8 Nisan tarihinde 0,7'nin üzerine çıktığı görülmüştür. Sonraki günler ise toz taşınımının Türkiye üzerinde etkisini azaltması sebebiyle, AOD değeri azalarak 0,3 değerinin altına kadar inmiştir.

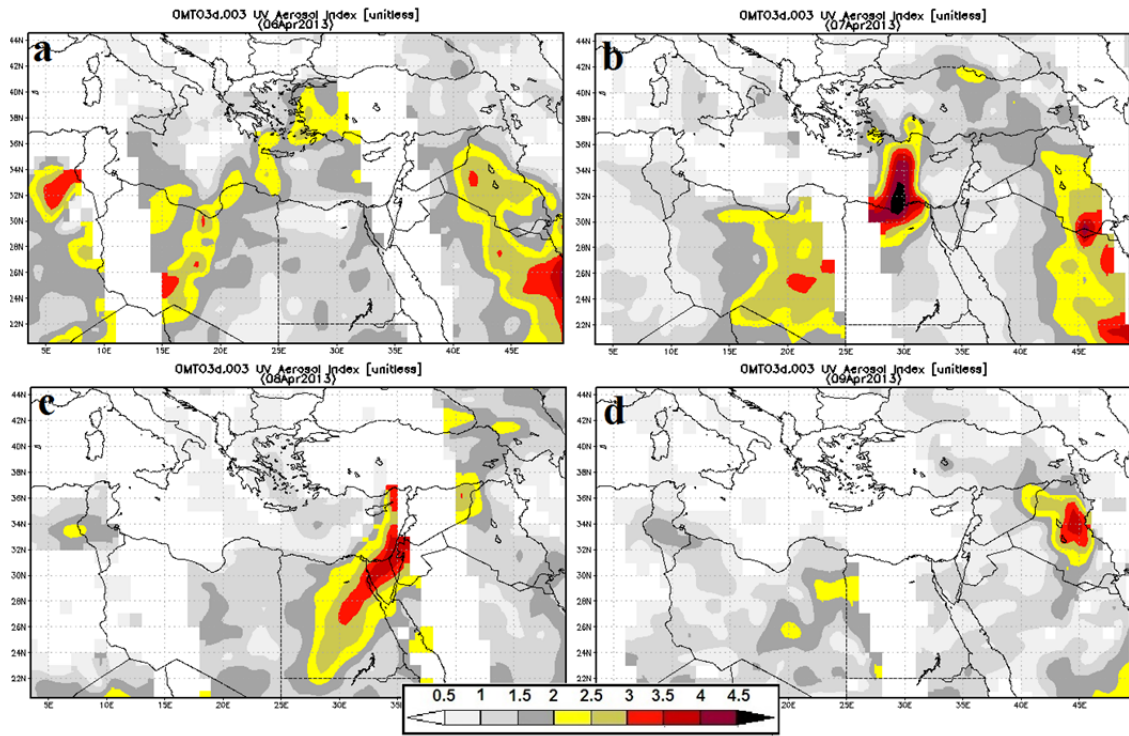
OMI aerosol indeksi (AI) verisinin 6-9 Nisan 2013 tarihlerindeki mekânsal dağılımı Şekil 7 (a-d)'de gösterilmiştir. Bu veri seti, güneş radyasyonunun aerosoller tarafından absorblama ve yansıtımın bir ölçümüdür. Toz aerosolünün var olduğu bölgelerde güneş radyasyonunun fazla absorblanacağı göz önüne alındığında, bu bölgelerde AI değerinin yüksek olması beklenir. 6 Nisan 2013 tarihinde Libya'dan Türkiye'ye uzanan alanda görülen yüksek AI değeri (>2), atmosferik tozun bu bölgelerdeki varlığının sinyallerini vermektedir.



Şekil 5. MODIS-AOD ürünleri; a) 6 Nisan, b) 7 Nisan, c) 8 Nisan ve d) 9 Nisan 2013)
(Figure 5. MODIS-AOD products; a) 6 April, b) 7 April, c) 8 April ve d) 9 April 2013)



Şekil 6. Şekil 5'de gözlenen ürünlerin Türkiye sınırları için günlük AOD ortalamaları
Figure 6. Daily AOD averages of observed products in figure 5 for Turkey's borders



Şekil 7. OMI enstrümanı AI ürünleri; a) 6 Nisan, b) 7 Nisan, c) 8 Nisan ve d) 9 Nisan 2013
Figure 7. OMI instrument AI products; a) 6 April, b) 7 April, c) 8 April ve d) 9 April 2013

7 Nisan 2013 tarihinde Mısır'ın kuzey bölgelerinden kalkan çöl tozlarının Türkiye'nin güneybatısına ulaşması nedeniyle bu bölgede yüksek AI değerleri verdiği görülmektedir. 8 Nisan

2013 tarihinde 40° boylamlarında uydu geçişi sebebiyle veri bulunmamaktadır. Yine de, Mısır'ın iç kesimlerinden Türkiye'nin güneyine uzanan alandaki yüksek AI değerleri toz taşınımının

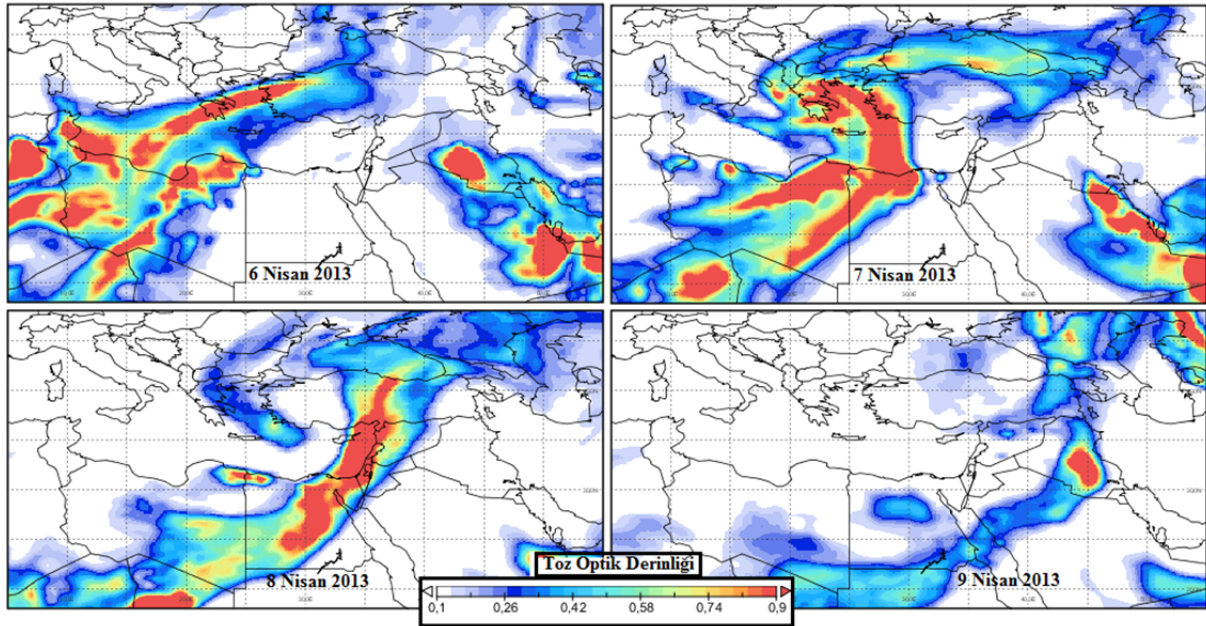
bölgedeki varlığını temsil etmektedir. 9 Nisan 2013 tarihinde ise uydu AI görüntüsü, MODIS-AOD değerlerinde olduğu gibi Irak üzerinde yüksek değerler vermektedir. Diğer taraftan, okyanus rengi vb. gibi yüzey etkilerinin AI değerinin bir miktar da olsa etkileyebileceği göz önünde bulundurulmalıdır (Prospero vd., 2002). Buna rağmen AI verisinin hem okyanus hem de kara yüzeylerinden alınabiliyor olması bu uydu verisini cazip kılmaktadır (Prospero vd., 2002). Çalışma periyodumuzda, MODIS-AOD ve OMI-AI verilerinin birbirine paralel olarak aynı bölgelerde yüksek değerler vermesi analiz yapılan bölgelerdeki tozun varlığını bir arada desteklemektedir.

3.3. NMMB/BSC-Dust Toz Taşınımı Tahmin Modeli Ürünleri

İleriki günlere ait toz taşınımı tahminleri NMMB/BSC-Dust modeli ile sağlanabilmekte ve modelin doğrulaması uydu ve yere dayalı gözlemler aracılığı ile yapılabilmektedir. Her gün 72 saat ileriye yönelik tahmin ürünü veren modelin

NetCDF formatındaki çıktılarından, çalışma periyoduna ait günlerin 12 UTC'deki tahmin çıktıları görselleştirilmiştir. NMMB/BSC-Dust modelinin 6-9 Nisan 2013 tarihleri toz optik derinliği ürünleri Şekil 8'de sunulmuştur. 6 Nisan 2013 tarihi 12 UTC zamanına ait tahmin ürünü önceki günlerden kaynaklanan atmosferik tozun varlığını göstermektedir. Bu saatte tozun atmosferde Mısır üzerinden Ege bölgesine kadar uzanan bir alanda varlığı görülmektedir. Sonraki gün bu toz taşınımı etkisini azaltarak Karadeniz üzerine kadar ulaşmıştır.

Fakat 7 Nisan 2013 tarihinde, örnek çalışmamızı oluşturan Mısır kaynaklı toz taşınımının etkileri Mısır'ın kuzey bölgesi, Ege Denizi ve Yunanistan üzerinde görülmektedir. Diğer taraftan Libya'nın kuzey batısı merkezli bir toz fırtınasının olduğu da görülmektedir. Sonraki gün Mısır ve Libya merkezli iki toz taşınımı kaynak bölgesi yakınlarında birleşerek, kuzeydoğulu rüzgârların da etkisiyle Akdeniz ve Kıbrıs üzerinden geçerek 12 UTC'de Türkiye'nin ortasında, güneyden kuzeye uzanan bir alanda etkisini göstermiştir.



Şekil 8. NMMB/BSC-Dust modeli 12 UTC zamanına ait 6-9 Nisan 2013 tarihleri toz optik derinliği ürünleri.
Figure 8. Dust optical depth products of NMMB/BSC-Dust model for 6-9 April 2013 12 UTC

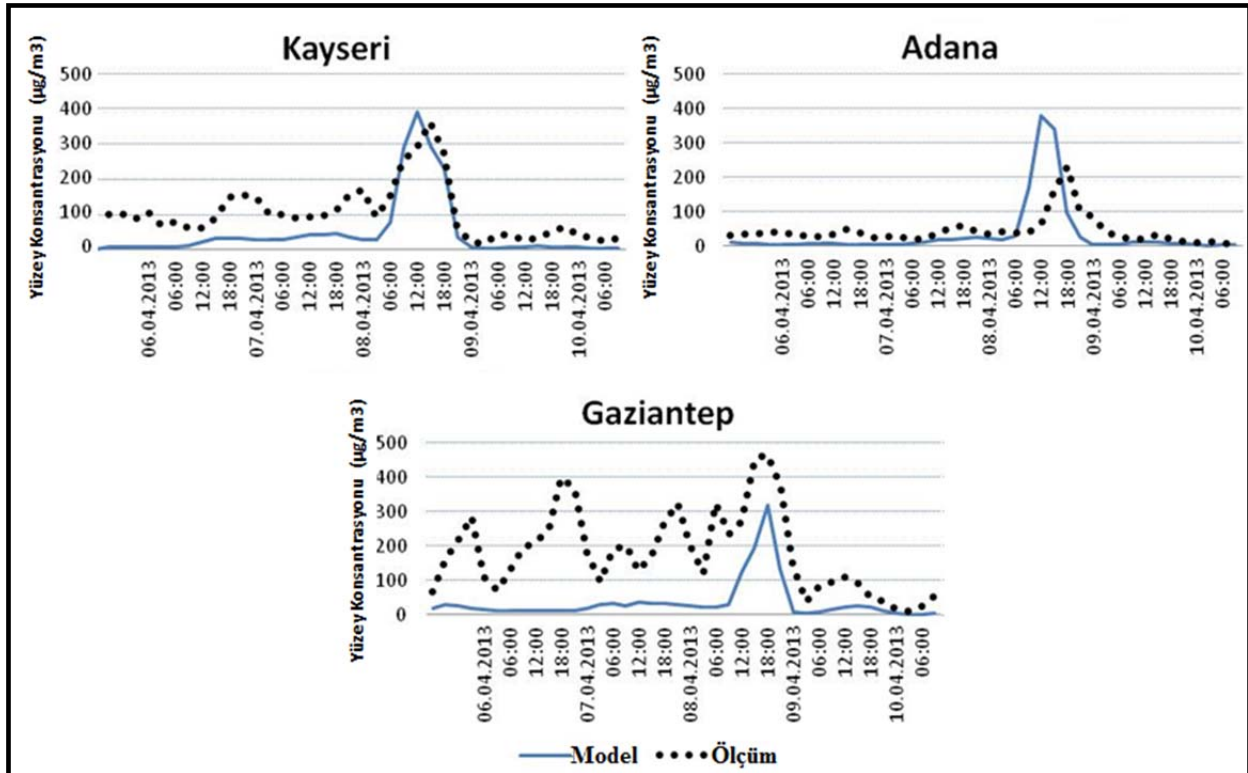
9 Nisan 2013 tarihi 12 UTC zamanına doğru ise taşınan tozun gerek Türkiye, gerekse Suriye üzerine çökerek etkisini azalttıktan sonra Irak'a

kadar ulaştığı görülmektedir. Model tahmin ürünleri (Şekil 8) ile uydu görüntüleri (Şekil 5 ve 7) beraber incelendiğinde, model tahmin

ürünlerinin özellikle 8 Nisan 2013 tarihli taşınım için başarısının çok iyi olduğu görülmektedir.

Diğer taraftan, modelin yüzey toz konsantrasyonu tahmin verileri, yazılan bir kod ile taşınımdan en çok etkilenen bazı şehirlerimiz için koordinatlı olarak çekilmiş ve istasyon PM10 ölçüm verileri ile birlikte Şekil 9'da sunulmuştur. Kayseri için

PM10 ölçüm verileri $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ civarlarında veriler verirken, 8 Nisan 2013 tarihinde ölçüm değerinin $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 'e kadar ulaştığı görülmektedir. Yine model yüzey konsantrasyonu sonuçlarının da bu tarihte yaklaşık aynı değerler verdiği ve ölçüm değerleri ile çok iyi eşleştiği görülmektedir.



Şekil 9. 5-11 Nisan 2013 tarihleri için modellenen yüzey konsantrasyonu değerleri (mavi çizgi) ve ölçülen PM10 değerleri (siyah nokta)

Figure 9. Modelled surface concentration values (blue lines) and measured PM10 values (black dots) for 5-11 April 2013

Adana'da ise $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ civarlarında ölçüm değerleri görülürken, 8 Nisan 2013 tarihi öğleden sonra saatlerinde yüksek değerler ($>200 \mu\text{g}/\text{m}^3$) vermektedir. Model sonuçları ise maksimum değerini öğlen vakitlerinde ($\sim 400 \mu\text{g}/\text{m}^3$) vermektedir. Dolayısı ile model değerleri gerçekleşen maksimum değeri aşmakla beraber, taşınım olayını gerçekleşme zamanından daha erken tahmin etmiştir. Gaziantep'de ölçüm verilerinin en yüksek değerini ($>450 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 8 Nisan 2013 tarihinde vermesine karşın, geçmiş tarihlerdeki ölçüm verilerinin de sık sık yükseldiği görülmektedir. Buna karşın model verileri sadece 8 Nisan öğleden sonraki saatlerde yüksek değer

($\sim 300 \mu\text{g}/\text{m}^3$) vermektedir. Bu şehirde sık sık artış gösteren PM10 değerlerinden sadece 8 Nisan 2013 tarihinde gerçekleşen taşınım model tarafından yakalanmıştır.

4. SONUÇ

Doğu Akdeniz siklonları, Kuzey Afrika üzerinden gelişlerinde sahra tozlarını Türkiye'nin güney kesimlerine taşımaktadırlar. Bu çalışmada, Afrika kaynaklı alçak basınç merkezi siklonik hareketle birlikte İç Anadolu bölgesine yerleşmiştir. Gerçekleşen bu meteorolojik sistem nedeniyle Kuzey Afrika üzerinden Türkiye'ye doğru toz taşınımı gerçekleşmiştir.

Yapılan analizler sonucu, 6 Nisan 2013 tarihinde Ege Bölgesi'nin kuzeyine kadar uzanan bir alanda toz taşınımının yanı sıra, 7 ve 8 Nisan 2013 tarihlerinde Türkiye'nin güneyine ulaşan bir toz taşınımı gözlenmiştir. Uydu gerçek renkli görüntüsü ve HYSPLIT modeli analizi, toz taşınımının Mısır kaynaklı olduğunu göstermiştir. Doğu yönünde ilerleyen toz taşınımının büyük çaplı partikülleri Akdeniz, Kıbrıs ve Türkiye üzerinde çökelirken, küçük çaplı partikülleri ise Irak'a kadar ulaşmıştır. Taşınım sebebiyle atmosferik tozun ulaştığı yerlerde toz yüklemesi gerçekleşmiş ve dolayısıyla PM10 değerleri ciddi oranda artmıştır.

Tahmin modeli ürünlerinin, uydu gözlemleri ile iyi uyuma sağladığı, özellikle Türkiye'ye ulaşan toz taşınımını iyi saptadığı gözlenmiştir. Diğer taraftan, modelin yüzey toz konsantrasyonu verileri Kayseri ve Adana için ölçüm değerlerini iyi

saptamakla birlikte, Gaziantep şehrinde ise bazı farklılıklar göstermektedir. Kayseri'de 8 Nisan 2013 tarihlerine kadar ölçülen PM10 değerlerinin, model tahmin verilerinin üzerinde olması, şehirdeki antropojenik (insan kaynaklı) kirliliğin varlığını göstermektedir. Gaziantep şehri ise, Irak ve Suriye kaynaklı çöl tozlarının da etkisi altında olduğu ve yerel toz kaynaklarından da etkilendiği için model tahmin değerleri bu tarih aralığında sık sık gerçekleşmiş toz taşınımını net bir şekilde yakalayamamıştır. Bu sebeple model çözünürlüğünün yükseltilmesi faydalı sonuçlar sağlayabilir.

Bu farklılıklara karşın ölçülen ve modellenen sonuçlarda, NMMB/BSC-Dust toz taşınımı tahmin modelinin, ülkemiz açısından iyi sonuçlar verdiği ve tahmin ürünlerinin erken uyarılar için kullanılabileceği görülmektedir.

REFERANSLAR

- Almazroui, M., Awad, M. A., Islam, M. N., Al-Khalaf, A.K., 2014. 'A climatological study: wet season cyclone tracks in the East Mediterranean region'. *Theoretical and Applied Climatology*, 10.1007/s00704-014-1178-z.
- Badarinath, K. V. S., Kharol, S. K., Kaskaoutis, D. G., Sharma, A. R., Ramaswamy, V., and Kambezidis, H. D., 2010. 'Long-range transport of dust aerosols over the Arabian Sea and Indian region: A case study using satellite data and ground-based measurements'. *Global and Planetary Change*, **72**(3), 164–181.
- Goudie, A.S., Middleton, N.J., 2001. 'Saharan dust storms: nature and consequences'. *Earth-Science Reviews* **56**, 179–204.
- Gullu, G. H., Olmez, I., Aygun, S., Tuncel, G., 1998. 'Atmospheric trace element concentration over the eastern Mediterranean Sea: factors affecting temporal variability'. *Journal of Geophysical Research* **103**, 21943-21954.
- Hsu, N. C., Tsay, S. C., King, M. D., Herman, J. R., 2006. 'Deep Blue retrievals of Asian aerosol properties during ACE-Asia'. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **44**(11): 3180–3195. Article ID 1717707,
- IPCC, 2007. Summary for policymakers in Climate Change 2007: the Physical Science Basis. Cambridge University Press, New York, NY, USA.
- Jickells T. D., An Z. S., Andersen K. K., Baker A. R., Bergametti G., Brooks N., Cao J. J., Boyd P.W., Duce R. A., Hunter K. A., Kawahata H., Kubilay N., laRoche J., Liss P. S., Mahowald N., Prospero J. M., Ridgwell A. J., Tegen I., Torres R., 2005. 'Global iron connections between desert dust, ocean biogeochemistry, and climate'. *Science*, 308, no. 5718, pp. 67–71.
- Torres, O., Bhartia, P. K., Herman, J. R., Ahmad, Z., Gleason, J., 1998. 'Derivation of aerosol properties from satellite measurements of backscattered ultraviolet radiation' *Theoretical basis, J. Geophys. Res.*, 103, 17,099 – 17,110.
- Levy R. C., Remer, L. A., Tanre D., Kaufman, Y. J., Ichoku C., Holben, B. N., Livingston, J. M., Russell, P. B. and Maring H., 2003. 'Evaluation of the moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS) retrievals of dust aerosol over the ocean during PRIDE'. *Journal of Geophysical Research D*, vol. 108, article 8594, no. 19, 13 pages.
- Levy, R. C., Remer, L. A., Kleidman, R. G., Mattoo, S., Ichoku, C., Kahn, R., and Eck, T. F., 2010. 'Global evaluation of the Collection 5 MODIS dark-target aerosol products over land'. *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 10399–10420.
- Perez, C., Hausteine, K., Janjic Z., Jorba, O., Huneus, N., Baldasano, J. M., Black, T., Basart S., Nickovic, S., Miller, R. L., Perlwitz, J. P., Schulz, M., and Thomson, M., 2011. 'Atmospheric dust modeling from meso to global scales with the online NMMB/BSC-Dust model – Part 1: Model description, annual simulations and evaluation'. *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 13001–13027.
- Lohmann, U. J. Feichter, 2005. 'Global indirect aerosol effects: a review'. *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 5, no. 3, pp. 715–737.
- Prospero, J. M., Ginoux, P., Torres, O., Nicholson, S. E., and Gill, T. E., 2002. 'Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product'. *Reviews of Geophysics*, vol. 40, no. 1.
- Şengün, M.T. ve Kıranşan, K., 2013. 'Sahra Çölü Tozlarının Akdeniz Havzasına Etkisi'. *3. Uluslararası Coğrafya Sempozyumu– GEOMED 2013 Bildiriler Kitabı*, 582-596, Kemer, Antalya.