

**İstanbul'da Kırsal, Yarı Kırsal ve Şehir Ortamlarında
Fotokimyasal Kirliliğin Ölçüm ve Model Kullanılarak
Değerlendirilmesi**

Proje No: TUJJB – TUMEHAP – 03 – 06

Prof.Dr. Selahattin İNCECİK

Dr. Ulaş İM

Prof. Dr. Orhan YENİGÜN

Doç. Dr. M. Talat ODMAN

Doç.Dr. Tayfun KINDAP

Prof. Dr. Sema TOPÇU

Adil TEK

Prof. Dr. Mete TAYANÇ

TEMMUZ 2010

İSTANBUL

ÖNSÖZ

Şehir alanları için atmosfer modellerinin uygulanması, artan çözünürlük ile birlikte şehir havasındaki akışların ve hava kirliliği süreçlerinin daha realistik bir şekilde oluşturulmasına izin vermektedir. Bu proje ile İstanbul ve çevresinde yüzey ozonun mezo ölçekte modellenmesi amacıyla MM5/CMAQ model çifti ilk kez kullanılmıştır. Bu proje, ülkemizin diğer bölgelerinde de ozon oluşumunun modellenmesi için bir alt yapı oluşturabilecektir.

Projemizi desteklemelerinden ötürü Türkiye Bilimsel ve Araştırma Kurumu'na teşekkürü bir borç biliriz. Ayrıca ölçme sistemlerinin arazilerinde kurulmalarına izin vermeleri nedeniyle Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi Müdürlüğü ve Devlet Malzeme Ofisi İstanbul Bölge Müdürlüğüne teşekkürlerimizi sunarız. Emisyon envanterinin geliştirilmesinde destek olan İstanbul Teknik Üniversitesi, Avrasya Yer Bilimleri Enstitüsü öğretim üyesi Doç. Dr. Alper Ünal ve Selanik Aristotle Üniversitesi, Fizik Bölümü, Atmosfer Fiziği Laboratuvarından Prof. Dr. Dimitros Melas ve grubuna teşekkür ederiz. Ölçme sistemlerinin devamlılığını sağlayan bu raporun düzenlenmesinde yaptığı katkılardan dolayı Meltem Güler'e, ölçme sistemlerinin kurulmasında ve devamlılığının sağlanmasında verdiği teknik destek için Tetra Endüstriyel ve Teknik Sistemler Anonim Şirketi'ne teşekkürlerimizi sunarız.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	vii
SUMMARY	ix
1.GİRİŞ	1
2. BÜYÜKADA HAVA KALİTESİ ÖLÇÜMLERİ	3
3. EMİSYONLAR.....	5
3.1. İstanbul Emisyonları.....	5
3.1.1. Evsel Isınma ve Ticari Kullanımdan Kaynaklanan Emisyonlar	5
3.1.2. Endüstriyel Yanma	6
3.1.3. Gemi Emisyonları.....	8
3.1.4. Biyojenik Emisyonlar	10
3.1.5. Kimyasal Ayrıştırma.....	12
4. MODELLEMEDE KULLANILAN GEREÇ ve YÖNTEMLER	15
4.1. MM5 Meteorolojik Model	15
4.2. CMAQ Kimyasal Dağılım Modeli	19
5. BULGULAR ve SONUÇLAR	20
5.1. Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi	20
5.2. Model Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	29
5.2.1. MM5 Meteorolojik Model Sonuçları	29
5.2.2. CMAQ Kimyasal Dağılım Model Sonuçları	36
5.2.2.1. Duyarlılık Analizleri	40
5.3. Öneriler	44
6. REFERANSLAR.....	47

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1. Büyükada Hava Kalitesi İstasyonu.	4
Şekil 2. İDO iç hatlar seferlerinde ve boğaz geçişlerinde kullanılan rotalar	8
Şekil 3. İstanbul için yıllık isoprene emisyonlarının dağılımı	12
Şekil 4. MM5 mezo-ölçek meteorolojik modelinin alt modülleri	16
Şekil 5. Modelin kurulduğu alan.	17
Şekil 6. Üçüncü model alanı için a) yükseklik haritası ve b) arazi kullanım haritası	17
Şekil 7. Model sisteminin kurulduğu grid sistemi	18
Şekil 8. Model alanının topografik yükseklik haritası	18
Şekil 9. Model alanındaki arazi kullanım sınıfları	19
Şekil 10. Büyükada Hava kalitesi ölçüm istasyonu, saatlik ozon (O ₃) konsantrasyonunun değişimi (09.01.2008-15.03.2010)	20
Şekil 11. Büyükada Hava kalitesi ölçüm istasyonu, saatlik azot oksit (NO _x) konsantrasyonunun değişimi (09.01.2008-31.05.2009)	20
Şekil 12. Büyükada Hava kalitesi ölçüm istasyonu, saatlik azot mono oksit (NO) konsantrasyonlarının günlük değişimi (09.01.2008-31.05.2009)	23
Şekil 13. Büyükada Hava kalitesi ölçüm istasyonu, saatlik azot dioksit (NO ₂) konsantrasyonlarının günlük değişimi (09.01.2008-31.05.2009)	23
Şekil 14. Büyükada hava kalitesi ölçüm istasyonu, saatlik NO _x (NO+NO ₂) konsantrasyonlarının günlük değişimi (20.07.2007-31.05.2009)	24
Şekil 15. Büyükada Hava kalitesi ölçüm istasyonu, saatlik ozon (O ₃) konsantrasyonlarının günlük değişimi (09.01.2008-15.03.2010)	24
Şekil 16. Büyükada Hava kalitesi ölçüm istasyonu, saatlik O ₃ -NO _x konsantrasyonun ilişkisi	25
Şekil 17. Büyükada Hava kalitesi ölçüm istasyonu, 2008 ve 2009 ozon mevsimi (01.04.2008- 30.09.008; 01.04.2009-31.05.2010), günlük değişimler	26
Şekil 18. Büyükada Hava kalitesi ölçüm istasyonu, hafta içi ve hafta sonu ozon konsantrasyonlarının günlük değişimi	27
Şekil 19. Göztepe DMO hava kalitesi ölçüm istasyonu, ozon (O ₃) konsantrasyonlarının günlük değişimi, (20.07.2007-15.03.2010)	28

Şekil 20. Kandilli Hava kalitesi ölçüm istasyonu, ozon (O ₃) konsantrasyonunun günlük değişimi (07.09.2007-15.03.2010).....	28
Şekil 21. 12 – 21.06.2008 dönemini kapsayan Büyükada, Kandilli ve DMO istasyonları saatlik ozon ölçümleri	30
Şekil 22. 13.06.2008 günü, saat 14:00 için a) deniz seviyesi rüzgar alanı, b) 850 mb nem ve rüzgar alanları, c) 1000 mb sıcaklık ve rüzgar alanları, d) düşey rüzgar sirkülasyon ve e) düşey sıcaklık değişimleri	32
Şekil 23. 16.06.2008 günü, saat 17:00 için a) deniz seviyesi rüzgar alanı, b) 850 mb nem ve rüzgar alanları, c) 1000 mb sıcaklık ve rüzgar alanları, d) düşey rüzgar sirkülasyon ve e) düşey sıcaklık değişimleri	33
Şekil 24. 18.06.2008 günü, saat 21:00 için a) deniz seviyesi rüzgar alanı, b) 850 mb nem ve rüzgar alanları, c) 1000 mb sıcaklık ve rüzgar alanları, d) düşey rüzgar sirkülasyon ve e) düşey sıcaklık değişimleri	34
Şekil 25. a) Yer seviyesi sıcaklık, b) 10 metredeki rüzgarın u bileşeni ve c) 10 metredeki rüzgarın v bileşeni.....	35
Şekil 26. Biyogenik emisyonların eklenmesine karşılık maksimum ozon konsantrasyonlarında meydana gelen değişim	36
Şekil 27. 13 Haziran 2008, saat 12:00 için üretilmiş isoprene emisyonları	37
Şekil 28. Sadece antropojenik ve antropojenik+biyogenik emisyonları kullanarak gözlenen ve modellenen ozon konsantrasyonları a) Büyükada ve b) Kandilli ant., c) Büyükada ant+biog. ve d)Kandilli ant.+bioghava	38
Şekil 29. a) 13, b) 16 ve c) 18 Haziran 2008 günlerine ait maksimum saatlik ozon dağılımları	40
Şekil 30. Ozon ve reaktif azot bileşikleri arasındaki ilişki: a)PAN b) HNO ₃ , c) NO _x	41
Şekil 31. NO emisyonlarında a) %30 artış, b) % 30 azalış sonucu meydana gelen 24 saatlik ortalama ozon değişimleri	43

TABLO LİSTESİ

Tablo 1. İstanbul sınırları içerisinde yer alan sanayi bölgeleri.....	6
Tablo 2. Konutsal / ticari ve endüstriyel yanma kaynakları için emisyon faktörleri.....	7
Tablo 3. Evsel / ticari ve endüstriyel yanmadan kaynaklanan emisyonlar	7
Tablo 4. İstanbul boğazı gemi geçiş istatistikleri, yakıt faktörleri ve miktarları	9
Tablo 5. Emisyon faktörleri	9
Tablo 6. İstanbul boğazı ve İDO yolcu seferlerinden kaynaklanan emisyonlar	10
Tablo 7. İstanbul’ da biyogenik kaynaklı VOC emisyonları.....	11
Tablo 8. EPA kimyasal ayrıştırma faktörleri	13
Tablo 9. MM5 sonuçları ile gözlemler arasındaki korelasyonlar	31
Tablo 10. Model ortamında antropojenik ve biyogenik metan olmayan VOC emisyonlarının günlük toplam değeri.....	38
Tablo 11. Sadece antropojenik emisyonlar gözönüne alındığında model performans istatistikleri.....	39
Tablo 12. Biyogenik ve antropojenik emisyonların gözönüne alınması halinde model performans istatistikleri	39
Tablo 13. Emisyon senaryolarına bağlı olarak ozonun seviyelerinin değişimi (%).....	43

ÖZET

Hava kirliliği kontrol stratejilerini geliştirmek için, atmosferin kompozisyonuna şekil veren meteorolojik ve kimyasal süreçlerin daha iyi anlaşılmasına ihtiyaç vardır. Model çalışmaları bu entegrasyonu güvenilir bir şekilde düzenleyebilmektedir. Örneğin şehir ve bölgesel ölçekte meteorolojik alanların simülasyonlarını yapmak hava kirliliğinin değerlendirilmesinde giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu ölçeklerde hava kirliliğinin daha ayrıntılı olarak değerlendirilmesine ihtiyaç giderek artmaktadır. Meteorolojik değişkenlerin önemli bir kısmının ölçülemediği karmaşık topoğrafya durumlarına gerçekçi değerlendirmeler yapabilmek için, daha yüksek çözünürlükte ve hidrostatik olmayan mezo-ölçek meteorolojik modeller ile bu modellerle çalışabilecek kimyasal modellerin uygulanmasına gerek duyulmaktadır.

Karmaşık mezo-ölçek atmosferik akış şartlarının, kara-deniz meltemi gibi lokal sirkülasyonların sinoptik ölçekli süreçler altında değerlendirilmesi, bölgesel ölçekteki taşınım modelleri açısından da önem kazanmaktadır. Fotokimyasal ozon, meteorolojik değişkenler ve kimyasal reaksiyonlar arasında lineer olmayan, karmaşık girişimler sonucunda meydana gelmektedir. Fotokimyasal sis ise insan sağlığını olumsuz etkileyen, görünürlüğü azaltan, kırsal alanlarda tarımsal ürün kayıplarına yol açan ikincil bir kirleticidir.

İstanbul, 12 milyonu aşan nüfusu ile dünyanın en büyük mega şehirlerinden biridir. Yoğun nüfus ve endüstriyel faaliyetlerden dolayı hava kirliliğine önemli ölçüde maruz kalmaktadır. Geçmiş yıllarda bu bölgedeki kirletici konsantrasyon ölçümleri istatistiksel yöntemler kullanılarak analiz edilmiş olsa da, bu seviyelerin meydana gelişinin ardında yatan meteorolojik ve kimyasal etkenler detaylı olarak incelenmemiştir. Bu anlamda, önemli bir ikincil kirletici olan ozonun, ölçümler ve yüksek çözünürlüklü modeller kullanılarak incelenmesi gerekmektedir. Böyle bir model çalışmasını destekleyecek bir emisyon envanterinin eksikliği de, bu tür çalışmaları zorlaştırmaktadır. Bu çalışma ile birlikte, bölgede koordineli bir şekilde ölçüm ve modelleme çalışmalarının yürütülmesi ve bu amaca uygun yüksek çözünürlüklü antropojenik ve biyojenik emisyon

envanterlerinin oluşturulması amaçlanmaktadır. Bu çalışmadan elde edilecek en önemli katkı lokal hava kirliliği seviyelerinin daha iyi anlaşılmasının sağlanması ve tahminlerin kalitesinin artması olacaktır. Ayrıca, kırsal ve yarı-kırsal bölgelere kurulacak ölçüm istasyonları, farklı bölgelerdeki ozon seviyeleri hakkında da bilgi verecektir.

Anahtar Kelimeler: Yüzey ozon, azot oksitler, MM5 mezo-ölçek meteorolojik model, CMAQ kimyasal dağılım modeli

SUMMARY

In order to develop air pollution control strategies, a better understanding of meteorological and chemical processes that contribute to the composition of atmosphere is required. Modeling studies can achieve this integration confidently. Simulations of meteorological fields over urban or regional scales are gaining a more considerable place in estimation and evaluation of air pollution. The need for more detailed evaluation of air pollution in these scales is continuously increasing. In order to make estimations under complex terrain conditions, where an important portion of meteorological variables cannot be measured, high resolution and non-hydrostatic meso-scale meteorological models and chemistry and transport models that can work coupled to these meteorological models are needed.

The evaluation of complex meso-scale atmospheric flows, and local circulations such as land and sea breezes, under synoptic processes have a more important place in regional transport models. Photochemical ozone is produced through nonlinear and complex processes between a variety of meteorological variables and chemical species. Photochemical smog is a secondary pollutant that negatively affects human health reduces visibility, and leads to crop losses in agricultural areas.

Istanbul is one of the biggest mega cities in the world. With the dense population and industrial activities, the city is exposed to high air pollution levels. Although these high levels of pollutants are investigated through statistical approaches in the past, the meteorological and chemical processes that lead to these levels were not investigated in detail. Thus, ozone, which is an important secondary pollutant, should be studied using high resolution model systems. The lack of an emission inventory to back up such an effort is making these investigations more complicated. With this project, continuous measurements of ozone will be coordinated with modeling exercises, together with development of a high resolution anthropogenic and biogenic emissions inventory. The most important outcome of this study will be its contribution to better understanding of local air pollution levels and increase the quality of projections. Finally, the addition of

semi-urban and rural ozone monitoring stations will provide an insight to levels of ozone in different geographical parts of the city.

Keywords: Surface ozone, nitrogen dioxides, biogenic emissions, MM5 mesoscale meteorological model, CMAQ chemical transport model.

1. GİRİŞ

Fotokimyasal smog, güneş ışığı etkisiyle uçucu organik bileşikler ile azot oksit türevlerinin karmaşık reaksiyonu ile meydana gelir (Sillman, 1999). Ozon, azot dioksinin güneş ışığı ile fotolizinden elde edilen oksijen molekülü ile oksijen atomunun kombinasyonu sonucu oluşur. Hidrokarbonlar ise karbondioksit ve su buharının bulunduğu ortamda ozonun fotolizi ile üretilen hidroksil radikalleri ile okside edilir. Ozon oluşumu, azot oksitlere (NO_x) duyarlı koşullar altında, tamamen NO_x ve çok az oranda da uçucu organik bileşiklere (VOC) bağlı olup, uçucu organik bileşiklerin artışı ile de orantılıdır.

İstanbul, 13 milyona yaklaşan nüfusu ile Türkiye'nin en kalabalık şehridir. İstanbul Boğazı, şehri Asya ve Avrupa olmak üzere ikiye böler. Nüfusun yaklaşık %65'i Avrupa yakasında, %35'i da Asya bölümünde yer alır. Şehrin iki yakasının toplam alanı yaklaşık 5712 kilometrekaredir. İstanbul, Karadeniz ve ılıman Akdeniz ikliminin arasında geçiş bölgesi üzerinde yer almaktadır. Antepioğlu (2000) İstanbul'da sıcaklığın kara üzerinde maksimuma ulaştığı saatlerde Marmara denizi üzerindeki yüzey sirkülasyonu Marmara'yı kaplayacak şekilde gelişmekte olduğunu göstermiştir. Özellikle yaz aylarında bu sirkülasyonun varlığı kirlilik taşınım ve yayılımını etkilemektedir. Bu nedenle, İstanbul'un karmaşık arazisi ve özellikle güney kıyıları üzerindeki lokal sirkülasyonlar şehir üzerindeki ozon seviyelerini arttırabilmektedir (Antepioğlu, 2000; İm vd., 2006 ve 2008). Genel olarak yaz mevsiminde ozon konsantrasyonları öğleden sonra maksimum seviyeye ulaşmaktadır (Topçu ve İncecik, 2002).

Geçen 40 yıl içerisinde, İstanbul hızla artan kentleşme ve sanayileşmeye maruz kalmıştır. İstatistiklere göre, İstanbul'da 2 milyondan fazla kayıtlı araç bulunmaktadır (İstanbul Valiliği, 2005). 1998 yılının başlarından beri araç yakıtı olarak, sıvılaştırılmış petrol gazı yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Ulaşımdan kaynaklanan emisyonlardan dolayı, büyük miktarda ozon öncülü atmosfere bırakılmıştır. 90'ların ortalarından itibaren evsel ısınma amacıyla kömürden doğalgaza geçiş olmuştur (Tayanç, 2000). Özellikle

tekstil, petrol ve kimya sanayisinden kaynaklanan işlenmiş gazların yüksek emisyonu ile trafik emisyonları önemli miktarda VOC ve NO_x birikimine yol açar. VOC ve NO_x birikimi karmaşık arazi kullanımı, topografya ve atmosfer sirkülasyonu etkisi altında önemli oranda fotokimyasal sis oluşumuna neden olur.

Güneş radyasyonu ve sıcaklıktaki artış NO_x ve VOC emisyonları ile birlikte ozon konsantrasyonunun artışına sebep olmaktadır. Rüzgar, sıcaklık ve güneş radyasyonu gibi meteorolojik faktörler, ozon konsantrasyonunun artması ile ilişkilendirilmiştir (Topçu vd., 2005). Bölgedeki ilk ozon modelleme çalışmasında MM5 mezo-ölçek meteorolojik modeli ile UAM ve CAMx kimyasal taşıyım modelleri sadece trafik kaynaklı emisyonlar göz önüne alınarak yapılmıştır (Anteplioğlu, 2000; Topçu vd., 2003).

TUJJB projesi kapsamında, ozon ve ozon öncüllerinin ölçümlerinin sürdürülebilmesi için Büyükkada'da hava kalitesi ölçüm istasyonu kurulmuştur. Ayrıca proje kapsamında belirlenen episod günleri için PSU/NCAR tarafından geliştirilmiş olan MM5 hidrostatik olmayan mezo ölçek meteorolojik modeli ile CMAQ kimyasal taşıyım modeli çalıştırılmıştır. Böylece antropojenik ve biyojenik emisyonların ozon seviyelerine katkılarının anlaşılması için farklı emisyon durumları için duyarlılık testleri yapılmıştır.

2. BÜYÜKADA HAVA KALİTESİ ÖLÇÜMLERİ

Türkiye Ulusal Jeodezi ve Jeofizik Birliği (TUJJB) tarafından desteklenen TUJJB–TUMEHAP–03–06 numaralı ve “İstanbul’da Kırsal, Yarı Kırsal ve Şehir Ortamlarında Fotokimyasal Kirliliğin Ölçüm ve Model Kullanılarak Değerlendirilmesi” isimli proje kapsamında kurulan ve işletilen Büyükkada hava kalitesi ölçüm istasyonunda ozon ve azot oksit ölçümleri 09.01.2008 tarihinde başlamıştır. Anteplioğlu (2000) tarafından yapılan Doktora Tez çalışmasında özellikle sabah saatlerinde, Marmara Denizi üzerinde yüzey ozonun belirgin bir birikimi görülmüştür. Hem İstanbul’dan, hem de Kocaeli bölgesinde yer alan petrokimyasal tesislerden gelen emisyonlar, meteorolojik koşullara bağlı olarak Marmara Denizi üzerinde toplanmaktadır. Bunun yanı sıra, Büyükkada da herhangi bir sanayi veya trafik kaynağının olmaması, evsel ısınmadan kaynaklanacak emisyonların da kış sezonunda görülmesi, yani ozon mevsimi olarak adlandırılan Nisan–Ekim ayları arasında evsel kaynaklı emisyonların çok az olması ya da hiç olmaması, ozon araştırması bakımından bu bölgeyi cazip hale getirmektedir. Özellikle Büyükkada’da ormanlık bölgenin çokluğu ve yoğunluğu, adaya kırsal ya da şehirden uzak (remote) bir karakter sağlamaktadır. Bu istasyon, Büyükkada’nın tepe noktası olan 205 metre yükseklikteki Çevre ve Orman Bakanlığı tarafından işletilen yangın gözlem istasyonu Adakule’nin yanına kurulmuştur (Şekil 1).

Bu proje, TÜBİTAK 105Y005 nolu ve “Karmaşık Meteorolojik Alanların Simülasyonları ile Şehir ve Bölgesel Ölçekte Hava Kirliliğinin Değerlendirilmesi” isimli proje ile birlikte yürütülmüştür. Birbirini tamamlayıcı nitelikte olan bu iki projenin ortak hedefi, İstanbul bölgesindeki hava kalitesi seviyelerini ölçüm ve modelleme yoluyla ayrıntılı bir şekilde inceleyebilmektir.



Şekil 1. Büyükada hava kalitesi istasyonu

3. EMİSYONLAR

3.1. İstanbul Emisyonları

Bu çalışmada emisyonlar;

- evsel ve ticari,
- endüstriyel,
- trafik,
- gemi taşımacılığı,
- biyojenik emisyonlar olarak sınıflandırılmıştır.

3.1.1. Evsel ısınma ve ticari kullanımdan kaynaklanan emisyonlar

2009 yılı nüfus sayımına göre İstanbul' un nüfusu 12.800.000 civarındadır (TÜİK, 2010). İstanbul'un nüfusu son 25 yılda 4 katına çıkmıştır. İstanbul'da nüfusun yaklaşık %65'i Rumeli yakasında; %35'si de Anadolu yakasında yer almaktadır. Nüfusun büyük çoğunluğu boğazın iki yakasında ve Marmara denizi kıyısında bulunmaktadır. İGDAŞ'tan alınan mahalle bazında bilgilere göre 2005 yılında İstanbul'da, konutsal ısınma için harcanan doğalgaz miktarı 2,999,078,488 m³ tür (İGDAŞ, 2005). 1990' lı yılların ortasından itibaren İstanbul' da büyük ölçüde doğalgaza geçilmiş olsa bile İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB, 2005)'nden alınan verilerine göre İstanbul' da yılda 1,000,000 ton kömür yanmaktadır. Ancak bu miktarın mekansal olarak dağılımı hakkında bir bilgi bulunmamaktadır. Bu çalışmada, bu 1,000,000 ton kömürün, nüfusla doğru orantılı ve doğalgaz miktarı ile ters orantılı bir şekilde dağılım gösterdiği kabulü ile mekansal bir dağıtım uygulanmıştır. İGDAŞ bilgilerine göre 2005 yılında İstanbul'da, konutsal ısınma için 2,999,078,488 m³; endüstri için de 688,630,989 m³ olmak üzere toplam 3,687,709,477 m³ doğalgaz kullanılmaktadır (İGDAŞ, 2005). İstanbul'da sanayinin düzensiz dağılımı ve bununla ilgili bir envanter çalışmasının zorluğundan dolayı, endüstriyel faaliyetlerin sadece Organize Sanayi Bölgelerinde yürütüldüğü kabulü yapılmıştır (Tablo 1). Bu sanayi bölgelerinde kullanılan doğalgaz, kömür, fuel oil

ve LPG miktarları, İBB'den temin edilmiştir. Doğalgaz yakılması ile meydana gelen emisyonların hesabı için, EPA (1998) tarafından geliştirilen emisyon faktörleri kullanılmıştır (Tablo 2). Bu faktörlerin kullanılmasıyla hesaplanan konutsal ve endüstriyel emisyonlar Tablo 3'de sunulmuştur.

3.1.2. Endüstriyel yanma

İstanbul'da sanayinin düzensiz dağılımı ve bununla ilgili bir envanter çalışmasının zorluğundan dolayı, endüstriyel faaliyetlerin sadece Organize Sanayi bölgelerinde yürütüldüğü kabulü yapılmıştır. Bu sanayi bölgelerinde kullanılan doğalgaz, kömür, fuel oil ve LPG miktarları, İstanbul Büyükşehir Belediyesi'nden (İBB) temin edilmiştir. Endüstride kullanılan doğalgaz miktarı 688,630,989 m³ olmak üzere toplam 3,687,709,477 m³ tür (İGDAŞ, 2005). Yanma sistemlerinden kaynaklanan emisyonların hesabı için, EPA (1998) tarafından geliştirilen emisyon faktörleri kullanılmıştır.

Tablo 1. İstanbul sınırları içerisinde yer alan sanayi bölgeleri

Bölge No	Bölge adı	Kıta
1	ÇANTA BÖLGESİ	Avrupa
2	BAĞCILAR EVREN MAHALLESİ BÖLGESİ	Avrupa
3	MİMAR SİNAN BÖLGESİ	Avrupa
4	HADIMKÖY BÖLGESİ	Avrupa
5	BEYLİKDÜZÜ ORGANİZE SANAYİ BÖLGESİ	Avrupa
6	FIRUZKÖY BÖLGESİ	Avrupa
7	ESENYURT-KIRAÇ BÖLGESİ	Avrupa
8	İKİTELLİ ORGANİZE SANAYİ BÖLGESİ	Avrupa
9	KÜÇÜKÇEKMECE TEVFIK FİKRET BÖLGESİ	Avrupa
10	GÜNEŞLİ BÖLGESİ	Avrupa
11	BAHÇELİEVLER BÖLGESİ	Avrupa
12	GÜNGÖREN BÖLGESİ	Avrupa
13	BAĞCILAR-ESENLER BÖLGESİ	Avrupa
14	TOPKAPI BÖLGESİ	Avrupa
15	ZEYTİNBURNU BÖLGESİ	Avrupa
16	BAYRAMPAŞA-EYÜP BÖLGESİ	Avrupa
17	GAZİOSMANPAŞA MERKEZ BÖLGESİ	Avrupa
18	GAZİOSMANPAŞA ESENTEPE BÖLGESİ	Avrupa
19	ARNAVÜTKÖY BÖLGESİ	Avrupa
20	KASIMPAŞA BÖLGESİ	Avrupa
21	GÜRSEL-HÜRRIYET BÖLGESİ	Avrupa
22	GÜLTEPE BÖLGESİ	Avrupa
23	LEVENT OTO SANAYİ BÖLGESİ	Avrupa
24	EMİNÖNÜ BÖLGESİ	Avrupa
25	ÜMRANİYE OTO SANAYİ BÖLGESİ	Anadolu
26	DUDULLU ORGANİZE SANAYİ BÖLGESİ	Anadolu
27	MALTEPE BÖLGESİ	Anadolu
28	TUZLA TERSANELER BÖLGESİ	Anadolu
29	KARTAL BÖLGESİ	Anadolu
30	PENDİK BÖLGESİ	Anadolu
31	PENDİK TUZLA D-100 BÖLGESİ	Anadolu
32	SAMANDIRA SULTANBEYLİ BÖLGESİ	Anadolu
33	TUZLA ORGANİZE SANAYİ BÖLGESİ	Anadolu

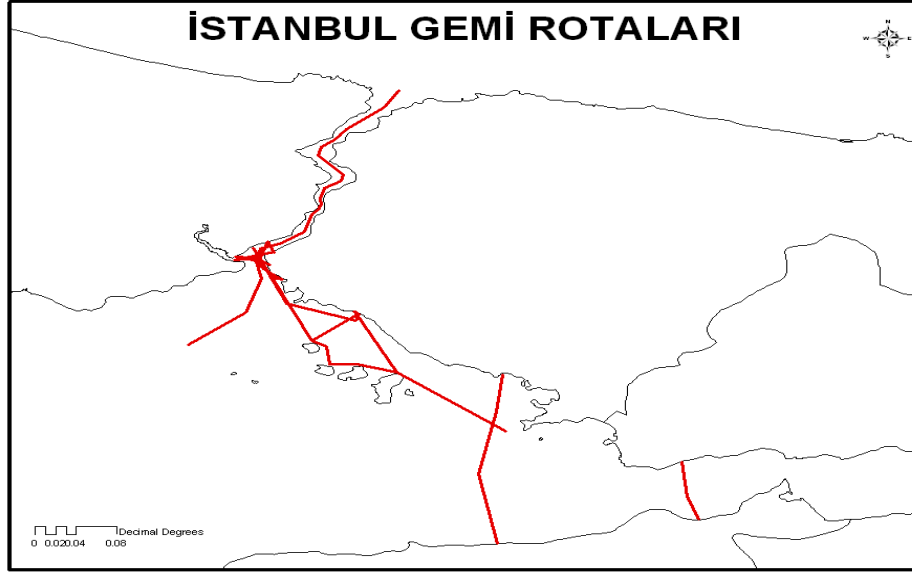
İstanbul' da evsel / ticari ve endüstriyel kaynaklı tüketilen yakıtlardan meydana gelen emisyonlar Tablo 2' de sunulmuştur. Tabloda da görüldüğü gibi emisyonların büyük bir bölümü endüstriyel yanmadan kaynaklanmaktadır. Özellikle kömür ve fuel oilden kaynaklanan SO₂ emisyonları, diğer kirleticilerle kıyasla daha yüksek miktarlardadır.

Tablo 2. Konutsal / ticari ve endüstriyel yanma kaynakları için emisyon faktörleri

KAYNAK YANMA	KİRLETİCİ				
	SO ₂	NO _X	CO	PM	VOC
Doğal Gaz (g/m³)					
Evsel / Ticari Isınma	0.01	1.507	0.641	0.122	0.125
Endüstriyel Yanma	0.01	3.04	1.344	0.122	0.125
Kömür (kg/ton)					
Evsel Isınma	25.93	1.5	0.3	5	4
Endüstriyel Yanma	25.93	1.5	0.3	5	4
Fuel Oil (kg/m³)					
Evsel / Ticari Isınma	142S*0.120	18*0.120	5*0.120	0.4*0.120	0.556*0.120
Endüstriyel Yanma	150S*0.120	20*0.120	5*0.120	7*0.120	0.252*0.120
LPG (kg/m³)					
Endüstriyel Yanma		2.5	0.42	0.07	0.07

Tablo 3. Evsel / ticari ve endüstriyel yanmadan kaynaklanan emisyonlar

KAYNAK	KİRLETİCİ (ton)				
	SO ₂	NO _x	CO	PM	VOC
Evsel / Ticari	25960	5762	2113	5345	4354
Endüstriyel	51866	8090	2503	7630	6040
Toplam	77826	13853	4616	12976	10393



Şekil 2. İDO iç hatlar seferlerinde ve boğaz geçişlerinde kullanılan rotalar

3.1.3. Gemi emisyonları

Gemi emisyonlarının hesabı için İstanbul Deniz Otobüsleri A.Ş.'den İstanbul iç hatlar vapur seferleri ile ilgili veriler alınmıştır. Bu veriler, Üsküdar – Beşiktaş, Kadıköy – Eminönü, Kadıköy – Beşiktaş, Karaköy – Haydarpaşa – Kadıköy, Üsküdar – Eminönü, Kabataş – Bostancı – Adalar – Yalova vapur hatları ile Sirkeci – Harem arabalı vapur hatlarında, günde kaç sefer yapıldığı ve sefer başına ton cinsinden yakıt harcamalarını içermektedir. Bu hatlarda kullanılan rotalar Şekil 2 'de gösterilmiştir. İstanbul Boğazı'ndan transit geçen gemilerin 2007 yılı sayısı Tablo 4' de sunulmuştur (İDO, 2007). Gemi emisyonlarının hesaplanmasında kullanılan emisyon faktörleri Tablo 5'de verilmiştir (EMEP / CORINAIR, 2003). Boğazdan geçen gemilerden kaynaklanan emisyonun hesabı aşağıdaki şekilde yapılmıştır:

$$E_i = ef_i \times (l / v) \times yf \times n_{gemi}$$

Burada E_i , her bir kirletici için emisyon miktarı; ef_i , emisyon faktörü; l , geçiş mesafesi (31.5 km); v , ortalama geçiş hızı (14 knot); yf , yakıt faktörü (EMEP / CORINAIR, 2003); ve n_{gemi} , gemi sayısını göstermektedir. Gemi dağılımları, % 5 yüksek hızlı, % 40 orta hızlı ve % 55 düşük hızlı dizel motorlar için yapılmıştır (Kesgin ve Vardar, 2001).

Tablo 4. İstanbul Boğazi gemi geçiş istatistikleri, yakıt faktörleri ve miktarları

GEMİ TİPİ	GEMİ SAYISI	YAKIT FAKTÖRÜ (ton/gün)	YAKIT MİKTARI (ton)
Kimyasal	2050	32.8	67240
Kuru Yük	5144	33.8	173867.2
Genel			
Kargo	34705	21.3	739216.5
LPG	800	32.8	26240
Yolcu	1702	70.2	119480.4
Tanker	7204	41.1	296084.4
Konteyner	2727	65.9	179709.3
Ro – Ro	439	32.3	14179.7
Diğer	1835	26.4	48444
Toplam	56606		1664461.5

Tablo 5. Emisyon faktörleri

Motor Tipi	Nox (kg/ton)	CO (kg/ton)	VOC (kg/ton)	PM (kg/ton)
Yüksek	70	9	3	1.5
Orta	57	7.4	2.4	1.2
Düşük	87	7.4	2.4	1.2

Gemilerden kaynaklanan emisyonlar Tablo 6’ da sunulmuştur. Bu tablo incelendiğinde özellikle Genel Kargo taşımacılığı ve şehir hatları yolcu vapurlarının önemli bir kaynak olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar, Kesgin ve Vardar (2001) ile karşılaştırıldığında, NOx emisyonlarında % 44, CO ve VOC emisyonlarında % 56, ve PM emisyonlarında % 58 oranında daha fazla olduğu görülmektedir. Görüldüğü gibi, özellikle NOx emisyonları açısından, gemiler önemli bir kaynak oluşturmaktadır. Ancak evsel / endüstriyel yanmadan kaynaklanan emisyonlar ile karşılaştırıldığında, her ne kadar NOx emisyonları karşılaştırılabilir bir aralıkta olsa da diğer emisyonlar açısından gemi emisyonları daha az önem arz etmektedir.

Tablo 6. İstanbul Boğazı ve İDO yolcu seferlerinden kaynaklanan emisyonlar

GEMİ TİPİ	KİRLETİCİ (ton)			
	NOX	CO	VOC	PM
Kimyasal	252	25	8	4
Kuru Yük	653	66	21	11
Genel Kargo	2775	280	91	45
LPG	98	10	3	2
Yolcu	448	45	15	7
Tanker	1111	112	36	18
Konteyner	675	68	22	11
Ro – Ro	53	5	2	1
İDO	1917	249	81	40
Diğer	182	18	6	3
Toplam	8165	879	285	143

3.1.4. Biyojenik emisyonlar

Biyojenik emisyonlar Yay vd. (2005) tarafından tüm Türkiye için hesaplanmış olan 1 x 1 km çözünürlükteki envanterden adapte edilmiştir. Bu çalışmada, biyojenik emisyonların hesabı için aşağıdaki formülasyon kullanılmıştır:

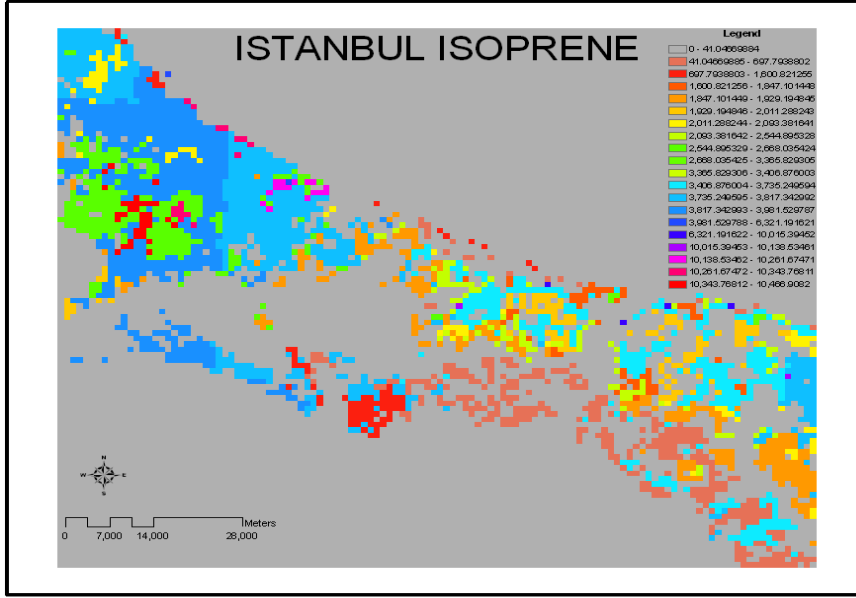
$$F = D \varepsilon \gamma$$

Bu formülde, F emisyonları, D birim alan başına düşen yaprak kuru ağılığı, ε emisyon faktörü ve γ emisyon faktörü için düzeltme faktörünü göstermektedir. Arazi örtüsü verileri USGS EROS' tan, sıcaklıklar IPCC' den, Fotosentetik olarak aktif olan radyasyon – Photosynthetically Active Radiation (PAR) değerleri ise NCAR tarafından geliştirilmiş TUV modelinden faydalanarak hesaplanmıştır. Emisyon faktörleri EMEP / CORINAIR (2003)' den elde edilmiştir. Biyojenik emisyonlar için hesaplanmış olan isoprene, terpene ve OVOC emisyonları Tablo 7' de sunulmuştur. Bu yıllık miktarlar, mevsimsellikle orantılı olup özellikle güneş radyasyonun yüksek olduğu yaz aylarında maksimuma ulaşır. Dolayısıyla ozon mevsimi olarak adlandırdığımız Nisan – Ekim ayları arasında biyojenik emisyonlar da maksimum seviyelerde olmakta ve ozon oluşumuna ciddi katkıda bulunabilmektedir.

Tablo 7. İstanbul’ da biyojenik kaynaklı VOC emisyonları

BİYOJENİK VOC	EMİSYON (ton/km²-yıl)
ISOPRENE	8532
TERPENE	2053
OVOC	7713

Biyojenik hidrokarbonların en büyük kısmı yaprak döken (açık tohumlu) ağaçlardan salınmaktadır. Bu hidrokarbonların ozon oluşum mekanizmalarında önemli bir rolü vardır. Kuzey Amerika için yapılan emisyon envanterlerinde, yaz aylarında doğal vejetasyondan salınan bu hidrokarbon emisyonlarının, toplam antropojenik hidrokarbon emisyonlarına eşit olduğu hesaplanmıştır. Vejetasyondan büyük miktarda VOC salınımı olmaktadır ancak ozon oluşumu söz konusu olduğunda, en önemli parametre bu emisyonların ne kadar reaktif bileşiklerden meydana geldiğidir. Yapılan çalışmalarda görülmüştür ki, ozon oluşumunda büyük rol oynayan biyojenik hidrokarbonlara en önemli örnek isoprene’lerdir (C₅H₈). Ormanlardan yayılan büyük miktarlardaki isoprene’ler, şehirsal alanlardaki antropojenik emisyonlarla reaksiyona girerek ozon oluşumunu önemli oranlarda etkileyecek etkiye sahiptirler. Bu envanterde yer alan isoprene emisyonlarının dağılımı Şekil 3’ de gösterilmiştir.



Şekil 3. İstanbul için yıllık isoprene emisyonlarının dağılımı

3.1.5. Kimyasal ayrıştırma

Yukarıdaki hesaplar, başta da belirtildiği gibi yıllık ve bölgesel toplamları, ana kirletici gruplarında vermektedir. Ancak bu ana kirleticiler, kimyasal olarak alt bileşenlerine ayrılmalıdır. Örnek olarak emisyon girdisi NO_x olarak değil, NO ve NO₂ olarak modele girilmelidir. İşte bu örnekteki gibi, ana kirletici gruplarını alt bileşenlerine ayırabilmek için ayrıştırma faktörleri kullanılmaktadır. Örnek olarak Tablo 8’de, EPA (2002) tarafından hazırlanmış olan bir yanma kaynaklı kirleticilerin ayrıştırma faktörleri sunulmuştur. Tablo 8’ de sunulan değerleri kullanarak mol ya da kütle tabanlı ayrıştırma yapmak mümkündür. Bu ayrıştırma aşağıdaki gibi yapılır.

$$\text{Mol tabanlı ayrıştırma: } Mol_i = Emisyon * \left(\frac{\text{Ayrıştırma faktörü}}{\text{Bölen}} \right)$$

$$\text{Kütle tabanlı ayrıştırma: } Kütle_i = Emisyon * Kütle faktörü$$

İstanbul, içerdiği yüksek nüfus, yoğun sanayi ve trafik yoğunluğu ile önemli bir emisyon potansiyeline sahiptir. Bu bağlamda, İstanbul için yapılan hava kalitesi

değerlendirmelerinde veya modellerinde, bu emisyonların mümkün olduğunca gerçeğe yakın ve detaylı olması gerekmektedir. Bu çalışmada, İstanbul için evsel, endüstriyel, trafik, gemi ve biyogenik emisyonları kapsayan bir emisyon envanteri elde edilmiştir. Şu ana kadar elde edilen değerler, İstanbul’ dan yılda 77 826 ton SO₂, 22 018 ton NO_x, 5495 ton CO, 13119 ton PM ve 10678 ton VOC’ nin, antropojenik kaynaklar tarafından atmosfere salındığını göstermektedir. Envanterin bu aşamasında bile dikkat çeken önemli bir nokta, biyogenik kaynaklardan salınan toplam VOC miktarının (18 298 ton/yıl), antropojenik kaynakların toplamından salınan emisyonlardan (129 136 ton/yıl) 7 kat fazla olduğudur. Burada dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta, bu rakamlara henüz trafik emisyonlarının dahil edilmemiş olmasıdır.

Tablo 8. EPA kimyasal ayrıştırma faktörleri

YAKIT					
Doğal Gaz	Kirletici	Bileşen	Ayrıştırma Faktörü	Bölen	Kütle Faktörü
	CO	CO	1	28	1
	ISOP	ISOP	1	68.12	1
	NH3	NH3	1	17	1
	NO	NO	1	30	1
	NOX	NO	0.9	46	0.9
	NOX	NO2	0.1	46	0.1
	OVOC	NR	0.5	148	0.05
	OVOC	OLE	0.5	148	0.1
	OVOC	PAR	8.5	148	0.85
	SO2	SO2	1	64	1
	SO4	SULF	1	96	1
	SOX	SO2	1	64	1
	TERP	ALD2	1.5	136.23	0.3
	TERP	OLE	0.5	136.23	0.1
	TERP	PAR	6	136.23	0.6
	TERP	TERPB	1	136.23	1
	TOG	ALD2	0.000763079	1	0.0242491
	TOG	ETH	0.001289176	1	0.0459
	TOG	FORM	0.000524689	1	0.0157325
	TOG	ISOP	5.87199E-05	1	0.004
	TOG	NR	0.012918473	1	0.2825161
	TOG	OLE	0.001898605	1	0.0514366
	TOG	PAR	0.026979413	1	0.4930442
	TOG	TOL	0.000592541	1	0.0464625
	TOG	XYL	0.000398111	1	0.036259

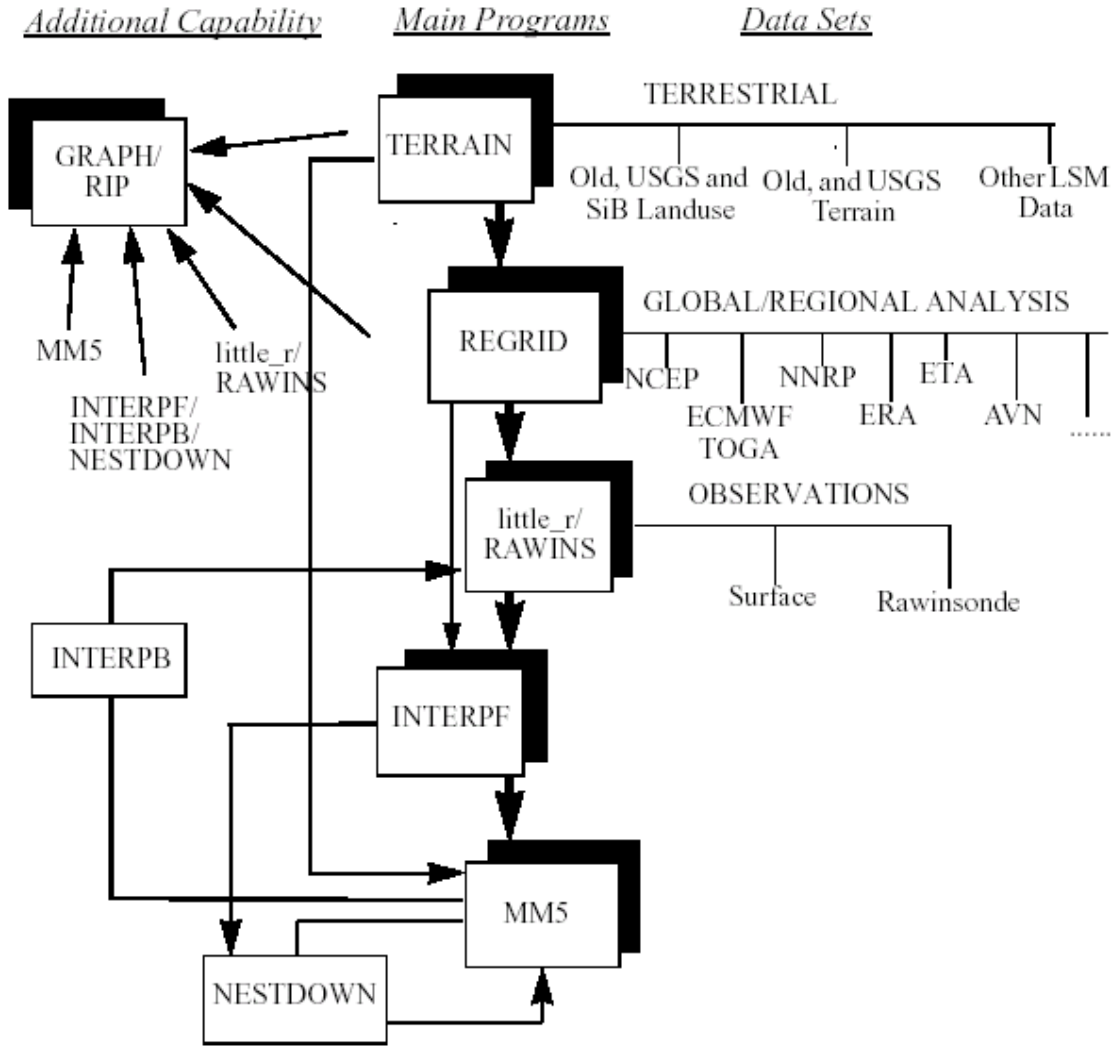
Özet olarak bu sonuçlar bize, nüfus, trafik ve endüstri açısından bu kadar yoğun bir faaliyet içeren İstanbul' un, antropojenik emisyonlar açısından önemli bir kaynak oluşudur. Bu kadar yoğun emisyon kaynağına sahip olan İstanbul kenti hem kendi hem de çevresi için ciddi bir sorun teşkil etmektedir.

4. MODELLEMEDE KULLANILAN GEREÇ VE YÖNTEMLER

4.1. MM5 Meteorolojik Model

Bu çalışmada meteorolojik model olarak kullanılan PSU/NCAR mezo-ölçek modelleme sistemi (MM5) hidrostatik olmayan sınırlı alan modelidir. MM5, meteorolojik alanları tahmin etmek üzere tasarlanmıştır. Bu çalışmada meteorolojik alanlar MM5 V3.7 mezo ölçek meteorolojik model kullanılarak üretilmiştir. İstanbul ve çevresi 2 kilometrelik çözünürlüğe erişmek üzere üç yuvalanmış model ortam 199x175 gridler 30 kilometre çözünürlüğü kapsayan Avrupa'yı; 186x202 gridler 10 kilometre çözünürlüğü içine alan Balkan alanını ve son olarak da 136x111 grid de 2 kilometre çözünürlüğü içeren İstanbul ve çevresini işaret etmektedir. Model düşeyde 37 sigma seviyesinden oluşmaktadır. Meteorolojik veri NCEP olan 1^o çözünürlükte 10 günlük dönem için 10-20 Haziran 2008 için temin edilmiştir. Modelde kümülüs modülü için KF2, sınır tabaka için MRF ve radyasyon modülü için RRTM kullanılmıştır.

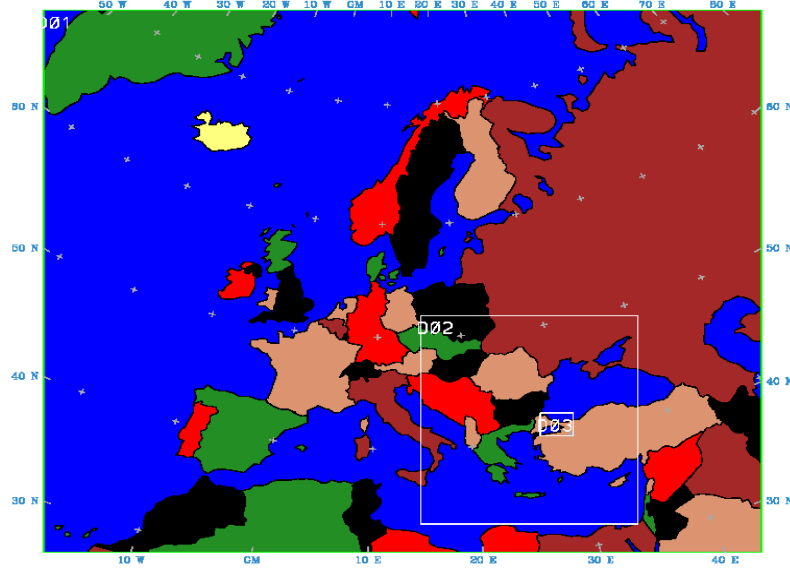
Her şeyden önce doğru bir kirlilik tahmini yapabilmek için doğru atmosferik parametrelerin üretilmesi gerekmektedir (sıcaklık, yağış, rüzgar gibi). MM5 meteorolojik modeli son derece kabul gören ve birçok çalışmada tercih edilen bir meteorolojik modeldir. MM5 mezo – ölçek meteorolojik modeli, simülasyonu yapılacak olan alanın topografik özellikleri ve arazi kullanım sınıfları gibi önemli parametreleri elde etmek için kullanılan TERRAIN modülü, istenilen bu alana, NCEP, ECMWF gibi global ölçekli meteorolojik verilerden sınır şartlarını sağlayan REGRID modülü, dikey basınç seviyelerini, MM5 modelinin istediği sigma seviyelerine çeviren INTERPF modülü, ve son olarak da modelin de ismini aldığı ve TERRAIN, REGRID ve INTERPF tarafından üretilmiş girdileri proses eden MM5 modülünden oluşmaktadır (Şekil 4).



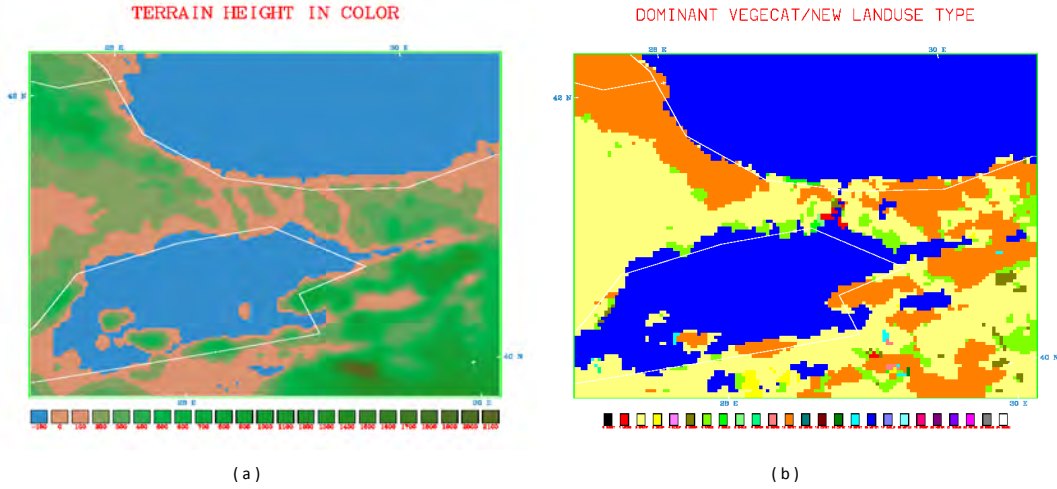
Şekil 4. MM5 mezo-ölçek meteorolojik modelinin alt modülleri

Bu çalışmada meteorolojik model sistemi, iç içe üç adet alandan meydana gelmiştir (Şekil 5). İlk alan, Avrupa kıtasını kapsamaktadır. x yönünde 199, y yönünde ise 175 adet, 30 km çözünürlükteki hücreden meydana gelmiştir. İkinci model alanı, Balkan bölgesini kapsamaktadır. Bu alan, x yönünde 140, y yönünde ise 155 adet, 10 km çözünürlükteki hücreden meydana gelmiştir. Son olarak, esas olarak odaklanılacak olan ve İstanbul'u kapsayan üçüncü model alanı, x yönünde 136, y yönünde ise 111 adet, 2 km çözünürlükteki hücrelerden meydana getirilmiştir. Bu bölge ile ilgili yükseklik haritası ve arazi kullanım haritası ise Şekil 6'de sunulmuştur. Her üç model alanı da dikey yönde 37 tabakadan meydana getirilmiştir. Meteorolojik modelin düzenlenmesinde sınır tabaka

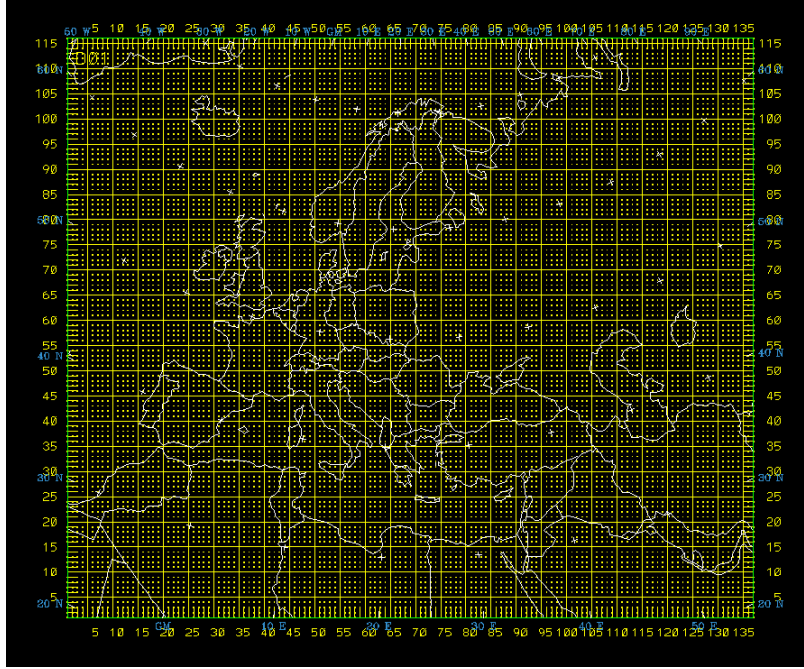
için MFR, nem şeması için Schultz, bulut şeması için KF2 ve toprak yüzey için de NOAA land surface tasarımı kullanmıştır.



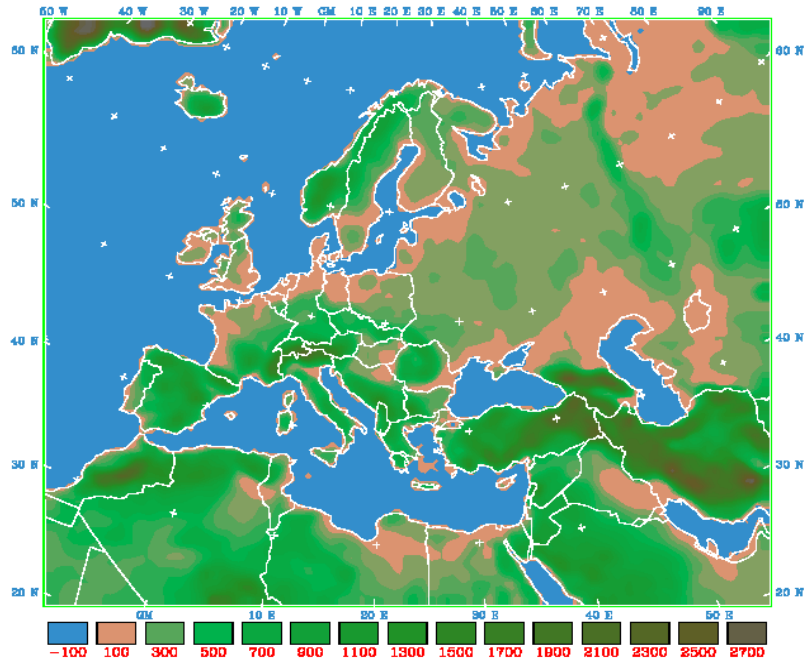
Şekil 5. Model sisteminin kurulduğu alan



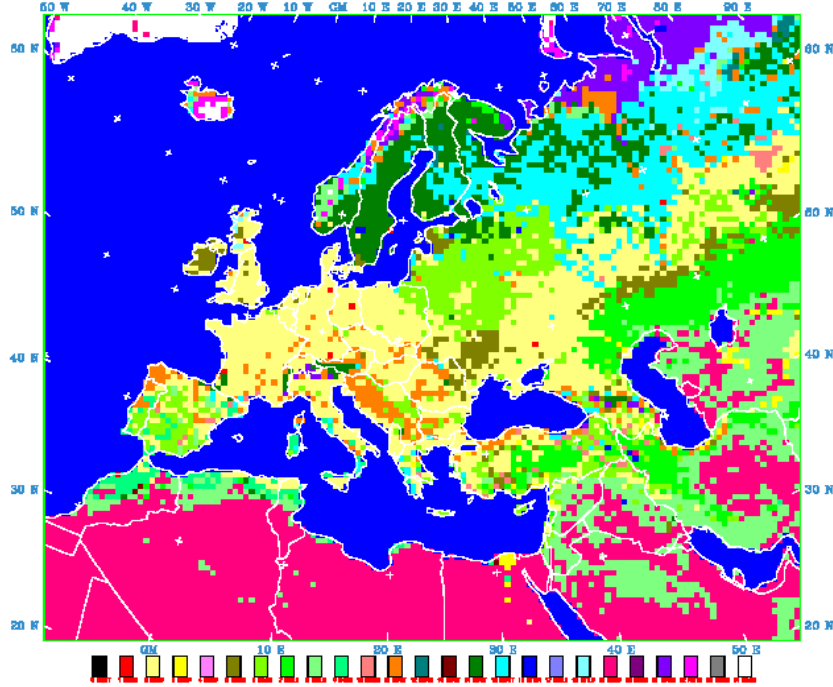
Şekil 6. Üçüncü model alanı için a) yükseklik haritası ve b) arazi kullanım haritası



Şekil 7. Model sisteminin kurulduğu grid sistemi



Şekil 8. Model alanının topografik yükseklik haritası



Şekil 9. Model alanındaki arazi kullanım sınıfları

4.2. CMAQ Kimyasal Dağılım Modeli

The Community Multiscale Air Quality (CMAQ) modeli (versiyon 4.6) bir Eulerian tipte hava kalitesi modeli olup, hava kirleticilerin taşınım, dönüşüm ve birikmesine etki yapan atmosferik ve yüzey prosesleri simüle eder (Byun ve Ching, 1999). Kullanılan kimyasal mekanizma CB-IV, aerosol mekanizması olarak da AER 04'e yer verilmiştir.

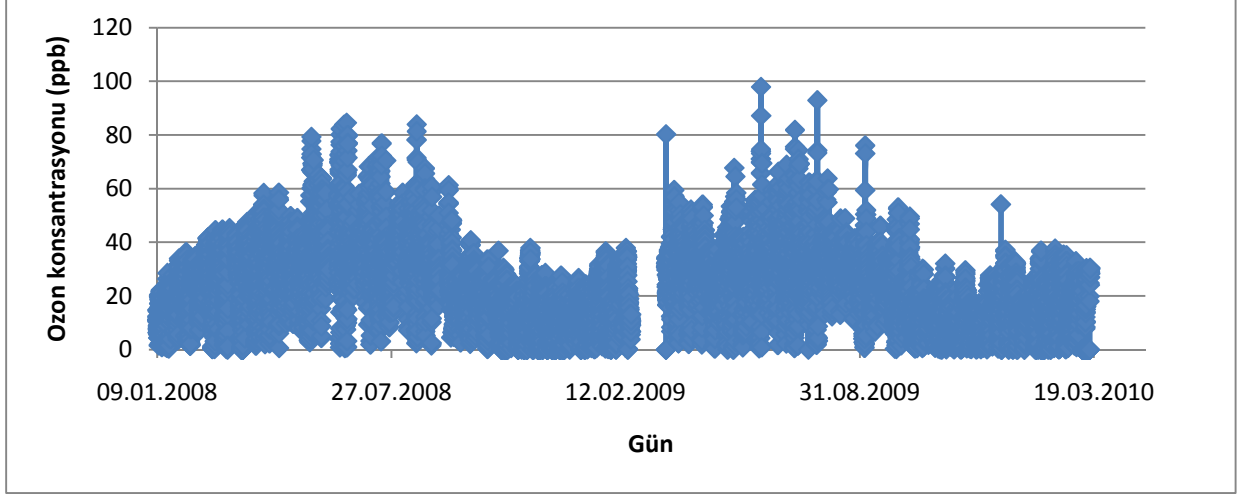
Bölgesel ve şehirsal hava kalitesi çalışmalarında özellikle orman yakınlarında ve içindeki yerleşim alanlarında, biyojenik emisyonların modelleme çalışmalarına katılmasının zorunluluğu artık tartışılmaz bir gerçektir. Bu amaçla, bu proje kapsamında çalışma alanı içerisinde özellikle İstanbul için hakim rüzgar yönünü de düşünerek biyojenik emisyonlar modelleme çalışmasına dahil edilmiş ve CMAQ kimyasal dağılım modeli uygulaması yapılmıştır. Biyojenik emisyonların modele dahil edilmesi gerçek sonuçların elde edilmesi bakımından önemlidir.

5. BULGULAR ve SONUÇLAR

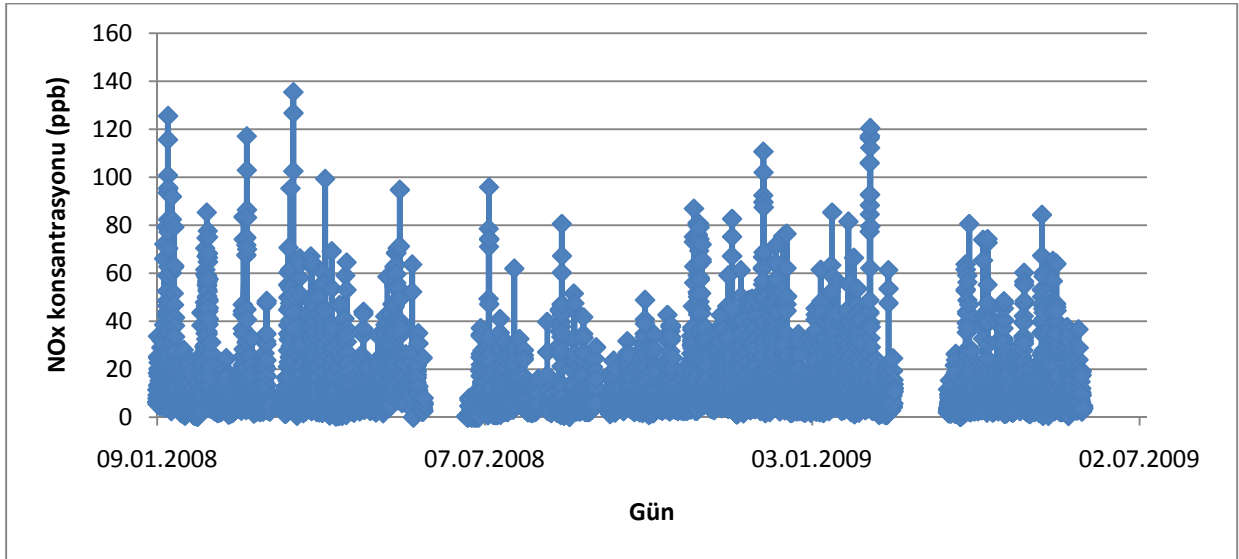
5.1. Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Proje kapsamında kurulan Büyükkada hava kalitesi istasyonu (Adakule) 09.01.2008 tarihinden itibaren ölçümlerine başlamıştır. Büyükkada istasyonunda, 09.01.2008 – 15.03.2010 döneminde ölçülen saatlik ozon seviyeleri Şekil 10’ da sunulmuştur. Şekil 11’ da ise ozon mevsimleri boyunca ozon ve NO_x (NO + NO₂) seviyelerinin günlük değişimleri verilmiştir. Şekil 10 dan de görüldüğü gibi, ozon mevsiminin sonu olan Ekim ayından itibaren ozon seviyeleri düşüşe geçmiştir. Bunun sebebi, sonbahar ve kış dönemine girilmiş olmasından dolayı hem sıcaklıkların düşmesi, hem de güneş radyasyonunun azalmış olmasıdır.

Büyükkada İstasyonu kırsal özellik taşıdığından dolayı O₃ seviyelerinin özellikle ozon sezonu boyunca yüksek olduğu, NO_x seviyelerinde ise belirgin bir artış olmadığı gözlemlenmiştir. Bunu en önemli sebebi, NO_x türevlerinin, özellikle antropojenik kaynaklı oluşudur. Büyükkada’ da, daaha önce de belirtildiği gibi ne trafik ne de sanayiden kaynaklanan emisyonlar mevcut değildir. Adada yaşayan nüfusun da az olması ve sadece kış aylarında evsel ısınmanın son dönemde bağlanan doğal gaz ile mevcut olması, bu yörede NO_x emisyonlarının oldukça düşük olmasına ve ozon seviyelerindeki gibi belirli bir trendin görülmemesine sebep olmaktadır. Ozon seviyelerinde ortaya çıkan farklılık ise ana karadan taşınım yanısıra biyojenik emisyonların ve gemi emisyonlarında ortaya çıkan farklılıklar ve meteorolojik şartların etkisi sonucunda ortaya çıkmaktadır. Çalışmada sağlanan ölçümlerde ortaya çıkan veri eksikliği, çeşitli zamanlarda ortaya çıkan teknik problemlerden dolayı analizörlerin çalışmadığı dönemlere aittir.



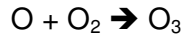
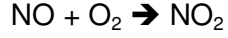
Şekil 10 .Büyükada Hava kalitesi ölçüm istasyonu, saatlik ozon (O₃) konsantrasyonunun değişimi (09.01.2008-15.03.2010)



Şekil 11 .Büyükada Hava kalitesi ölçüm istasyonu, saatlik azot oksit (NO_x) konsantrasyonunun değişimi (09.01.2008-31.05.2009)

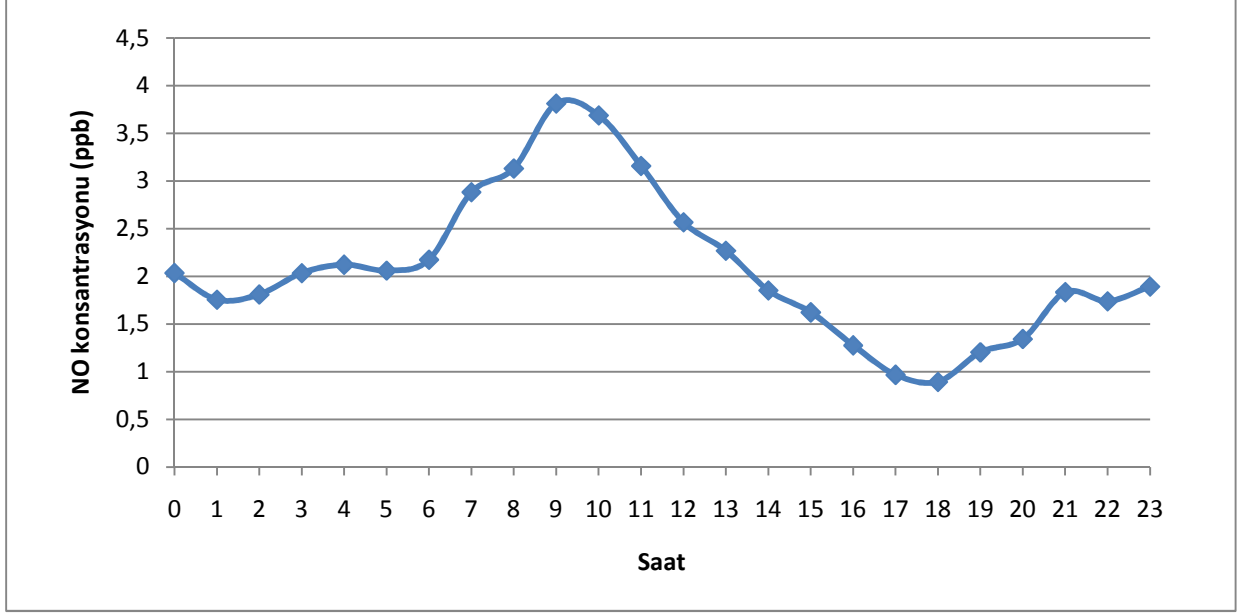
Şekil 12-15 de verilen ozon, NO, NO₂ ve NO_x konsantrasyonlarının gün içerisinde saatlik değişimleri, bize bu bölgede, bu kirleticilerin günlük olarak nasıl değiştiklerini, uzun dönem ortalamasında nasıl bir profil çizdiklerini, ve bu değişimin nedenleri hakkında bilgi verecektir. Şekilden görüldüğü gibi günlük ozon profili, tipik kırsal ozon profiline uymaktadır. Sabah saatlerinde, bir önceki günün akşamından devam eden hafif bir düşüş devam etmekte, bununla birlikte güneşin doğması ile kararsız karışım

tabakasının oluşması ve büyümesi ile ozon seviyelerinde bir düşüş görülmektedir. Bu düşüş, 06:00 – 10:00 saatleri arası, NO emisyonlarındaki artış ile biraz daha artmaktadır. Bu bölgedeki NO_x emisyonlarının önemli bir kaynağı, gemilerden meydana gelen emisyonlardır. Bunun yanında, hakim yönü kuzeyli olan rüzgarlar, İstanbul' dan da bu bölgeye kirleticilerin taşınmasına sebep olmaktadır. Güneş radyasyonunun yüze ulaşması ve saat 10:00' dan itibaren NO_x emisyonlarının azalması ile birlikte ozon konsantrasyonlarında artış başlamakta ve öğleden sonra 16:00 saatlerinde maksimum ozon seviyelerine ulaşılmaktadır. Bu şekil, ozon ile NO arasındaki ters ilişkiyi de, aşağıdaki tepkimede de görüldüğü gibi, net bir şekilde ortaya koymaktadır.

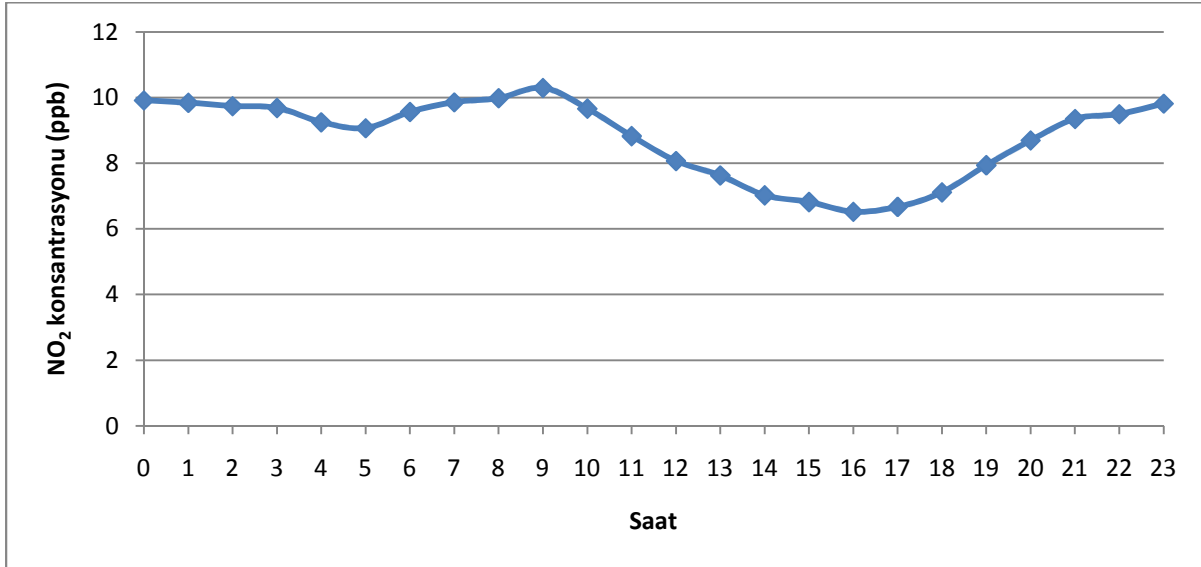


Bu tepkime zincirinde de görüldüğü gibi, ozonun kimyasal olarak bozunması, ortamda bulunan NO ile tepkimeye girmesi ile meydana gelmektedir.

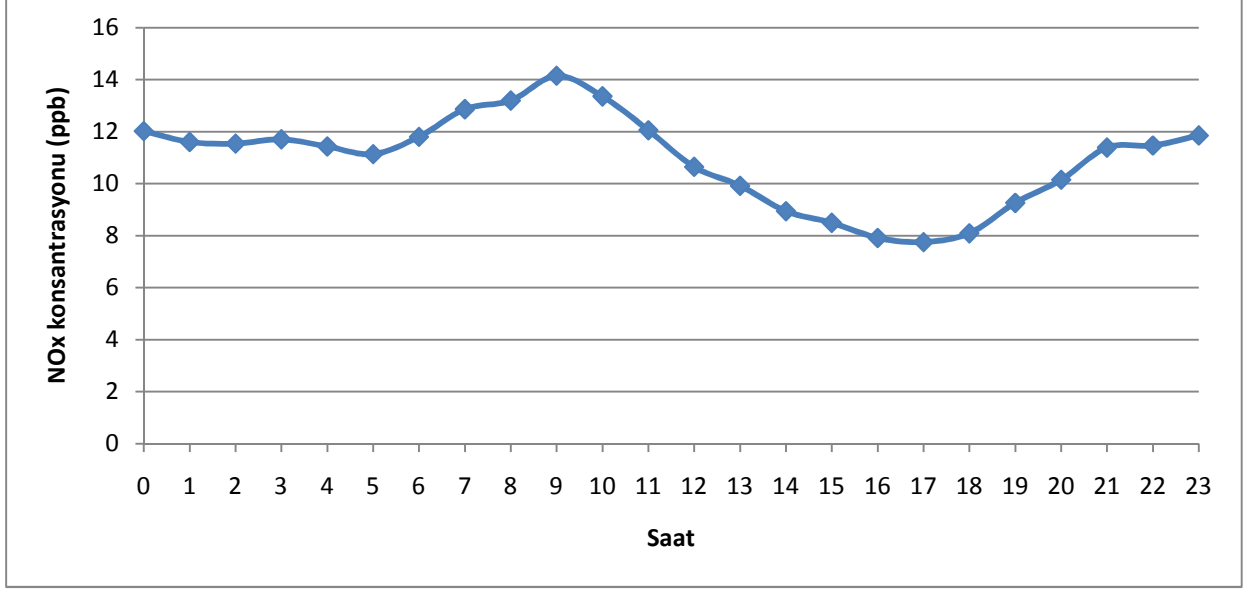
Ozon, azot oksit ve hidrokarbon türevlerinin belirli meteorolojik şartlarda kimyasal olarak tepkimeleri sonucu oluşan ikincil bir gazdır. Emisyon kaynaklarının bulunduğu bölgelerde, özellikle yeni salınmış nitrik oksit gazı, burada oluşan ozonun hızlı şekilde bozunmasına sebep olur. Ancak, bu birincil gazların kaynaktan uzağa taşınımı sırasında meydana gelen ozon daha kalıcı olmaktadır. Bunun sebebi, kaynaktan uzaklaştıkça, yeni emisyon kaynaklarının azalması ve böylece ozonu bozacak nitrik oksit seviyelerinin de azalmasıdır. Bundan dolayıdır ki NO_x – titrasyonu denilen proses, emisyon kaynaklarının bulunduğu bölgelerde daha etkin olmaktadır. Kaynağa yakın bölgelerde ozon oluşumu NO_x seviyelerine hassas iken kaynaktan uzaklaştıkça VOC seviyelerine daha hassas hale gelir. Kırsal bölgelerde, antropojenik azot emisyonlarından çok doğal – yani biyojenik – VOC emisyonları daha fazladır ve ozon oluşumu VOC değişimlerine daha hassas olur.



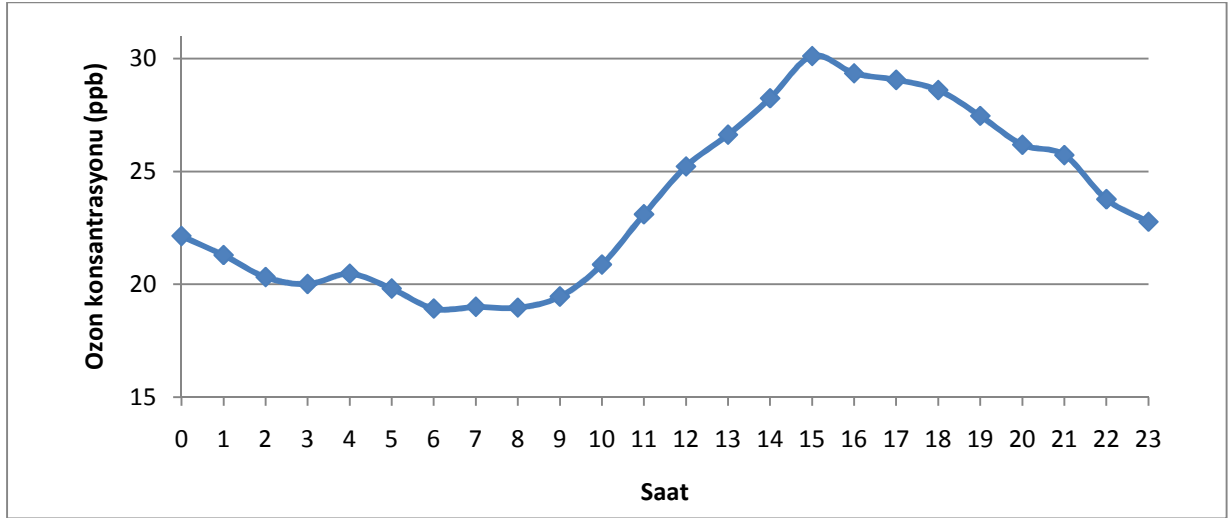
Şekil 12. Büyükada Hava kalitesi ölçüm istasyonu, saatlik azot monoksit (NO) konsantrasyonlarının günlük değişimi, (09.01.2008-31.05.2009)



Şekil 13. Büyükada Hava kalitesi ölçüm istasyonu, saatlik azot dioksit (NO₂) konsantrasyonlarının günlük değişimi (09.01.2008-31.05.2009)



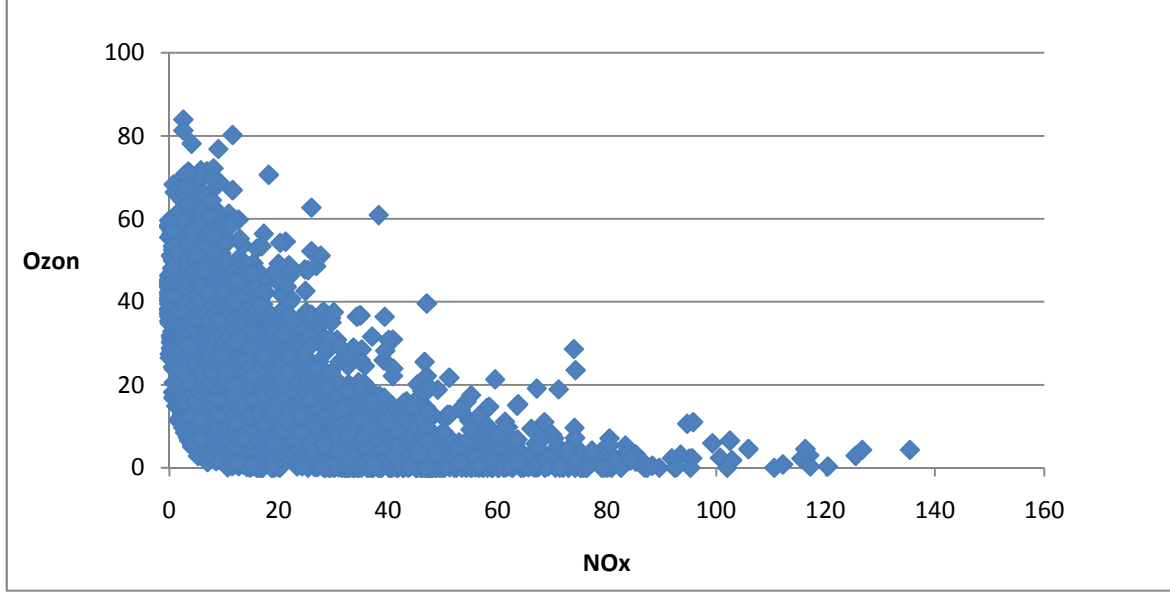
Şekil 14. Büyükada hava kalitesi ölçüm istasyonu, saatlik NO_x (NO+NO₂) konsantrasyonlarının günlük değişimi (09.01.2008-31.05.2009)



Şekil 15. Büyükada Hava kalitesi ölçüm istasyonu, saatlik ozon (O₃) konsantrasyonlarının günlük değişimi (09.01.2008-15.03.2010).

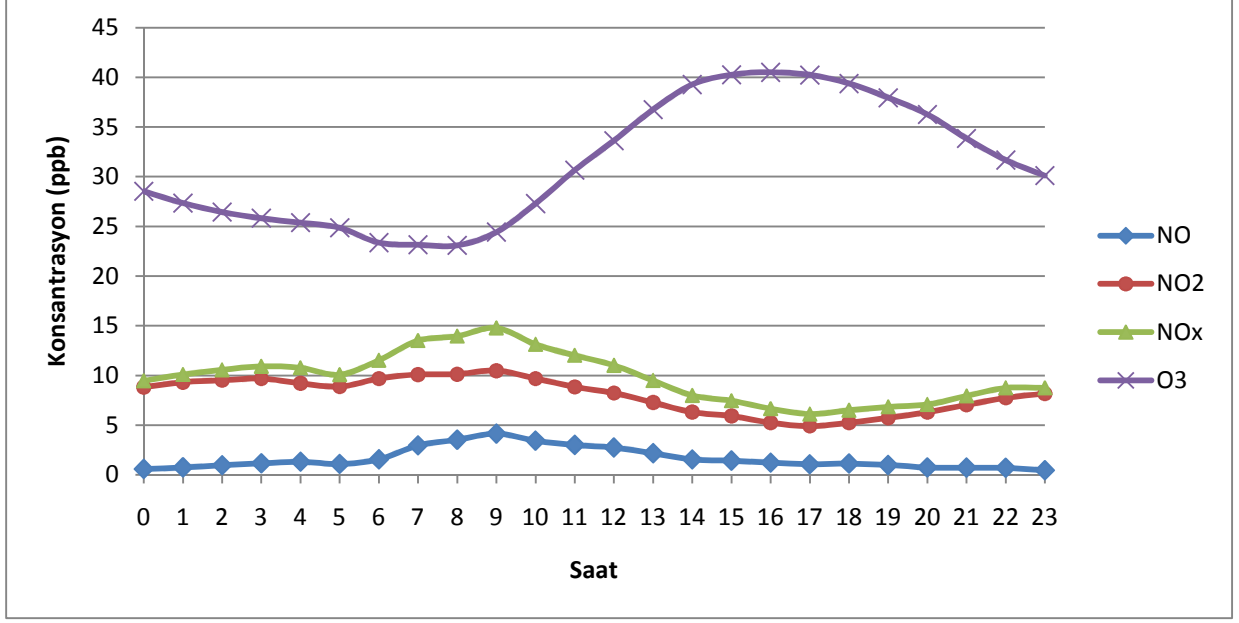
Büyükada İstasyonu'nda ozon profili kırsal özellik göstermektedir. Şehirsel etkilerin çok daha az olmasından dolayı, şehirsel alanlarda görülen değişimler, kırsal özellikli bölgelerde görülmemektedir. Kırsal bölgelerde, değişimler daha küçük olmakta, ozon konsantrasyonları, şehirsel bölgelere göre daha yüksek görülmektedir. Şekil 16'de,

Ozon-NO_x nun yukarıda verilen reaksiyonların sonucu olarak ortaya çıkan negatif ilişkisi açıkça görülmektedir.



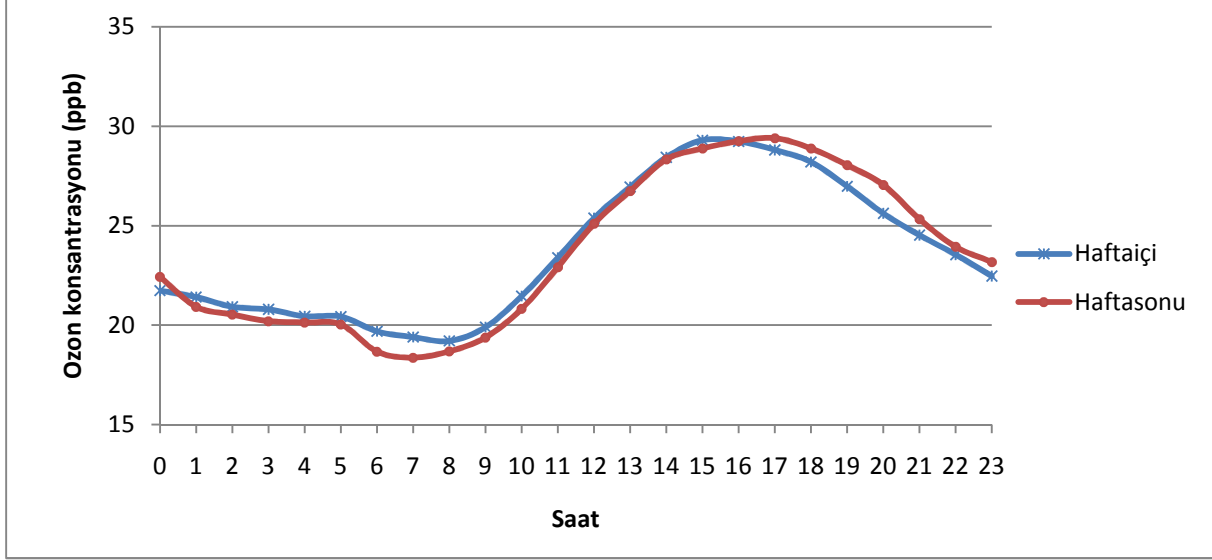
Şekil 16. Büyükada Hava kalitesi ölçüm istasyonu, saatlik NO_x-O₃ konsantrasyonlarının ilişkisi

Ozon seviyelerinin en yüksek olduğu ve bundan dolayı “ozon mevsimi” olarak anılan Nisan – Ekim arası dönem, özellikle yoğunlaşması gereken bir dönemdir. Şekil 17’de ise 2008 ve 2009 yılları ozon sezonları için, ozon saatlik ortalamaları sunulmuştur. Şekillerde gösterildiği gibi, sabah erken saatlerinde hafif bir tepe noktası yapan ozon seviyelerinden de görülmektedir. Yani minimum konsantrasyonlar, trafik emisyonlarının maksimum olduğu özellikle sabah saatlerinde ve güneş radyasyonunun etkisini kaybettiği ve dolayısıyla fotokimyasal tepkimelerin durup ozon için net bozunum mekanizmasının devreye girdiği akşam saatlerinde görülmektedir. Ozon kimyası açısından, net ozon oluşumunun ancak güneş radyasyonunun mevcut olduğu zamanlarda meydana gelebileceği düşünüldüğünde, bu ikinci tepe noktasının ancak taşınım ile mümkün olabileceği düşünülmektedir. Maksimum seviyeler ise güneş radyasyonunun maksimumda olduğu öğleden sonra saatlerinde ölçülmüştür.



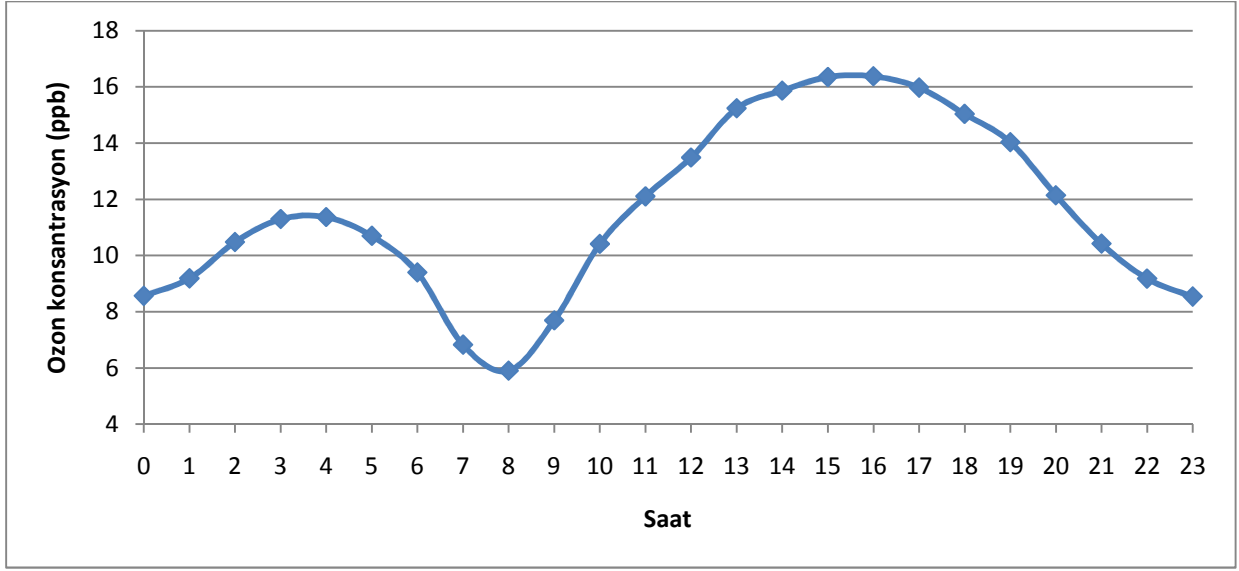
Şekil 17. Büyükada Hava kalitesi ölçüm istasyonu, 2008 ve 2009 ozon mevsimi (01.04.2008-30.09.2008; 01.04.2009-31.05.2009) günlük değişimleri

Son olarak da, “hafta sonu etkisi” olarak adlandırılan, emisyonların hafta içi – hafta sonu farklarından kaynaklanan ozon seviyelerinde günlük değişimler incelenmiştir. Tüm ölçme dönemlerinde hafta içi ve hafta sonu ozonun günlük değişimleri Şekil 18 ‘de gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde, ozon seviyelerinde çok büyük fark olmamasına rağmen, şehir ortamlarında gözlenen daha yüksek hafta sonu ozonunun, Büyükada’ da gözlenmemiş olduğu görülmektedir. Maksimum seviyelere ulaşılan öğleden sonra saatlerinde, çok yakın değerler ölçülmüştür. Hafta sonu etkisi, daha çok, trafik gibi kaynaklardan salınan NO_x emisyonlarının yüksek olduğu şehirseller ortamlarda net bir şekilde görülmektedir.

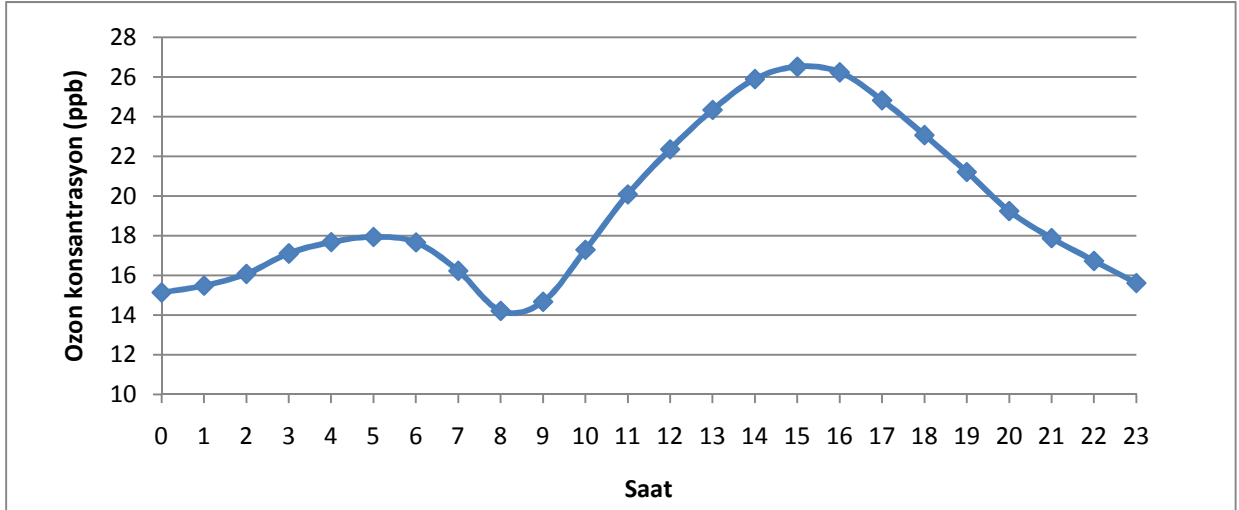


Şekil 18. Büyükada Hava Kalitesi ölçüm istasyonu, hafta içi ve hafta sonu ozon konsantrasyonlarının günlük değişimi (07.09.2007-15.03.2010)

Bu proje, TÜBİTAK 105Y005 nolu proje ile birlikte yürümekte olan bir projedir. Birbirini tamamlayıcı nitelikte olan bu iki projenin ortak hedefi, İstanbul bölgesindeki hava kalitesi seviyelerini ölçüm ve modelleme yoluyla inceleyebilmektir. TÜBİTAK projesi çerçevesinde yürütülen Devlet Malzeme Ofisi (DMO) ve Kandilli istasyonlarından elde edilen saatlik ozon konsantrasyonlarının, Büyükada istasyonundan elde edilenlerle karşılaştırılması, Şekil 19 ve 20 de verilmiştir. Bu üç istasyonun karşılaştırmalı değerlendirmesini yapabilmek için günlük bazda saatlik ortalama ozon konsantrasyonları sunulmuştur. Bu sonuçlar farklı emisyon kaynaklarını temsil eden bölgelerdeki farklı ozon seviyelerini net bir biçimde ortaya koymaktadır. Örneğin trafik emisyonlarına yoğun şekilde maruz kalan DMO' da, NO_x – titrasyonundan dolayı en düşük ozon seviyeleri gözlenirken, nüfus ve trafik yoğunluğu daha az olan Kandilli' de daha yüksek ozon seviyeleri, trafik ve endüstrinin mevcut olmadığı, nüfus yoğunluğunun en az, doğal vejetasyonun ise en yoğun olduğu Büyükada' da ise en yüksek seviyeler gözlenmiştir. Bu durum, ikincil bir kirlenici olan ozonun, birincil emisyon kaynaklarına yakın yerlerde, kimyasal olarak daha fazla bozunması, kaynaktan uzaklaştıkça ise NO_x emisyonlarının azalması, özellikle de kırsal veya trafik veya sanayi gibi önemli antropojenik kaynakların olmadığı bölgelerde ise net ozon üretiminin şehirsal alanlara göre daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 19. Göztepe DMO hava kalitesi ölçüm istasyonu, ozon (O_3) konsantrasyonlarının günlük değişimi, (20.07.2007-15.03.2010)



Şekil 20. Kandilli Hava Kalitesi ölçüm istasyonu, saatlik ozon (O_3) konsantrasyonlarının günlük değişimi (07.09.2007-15.03.2010)

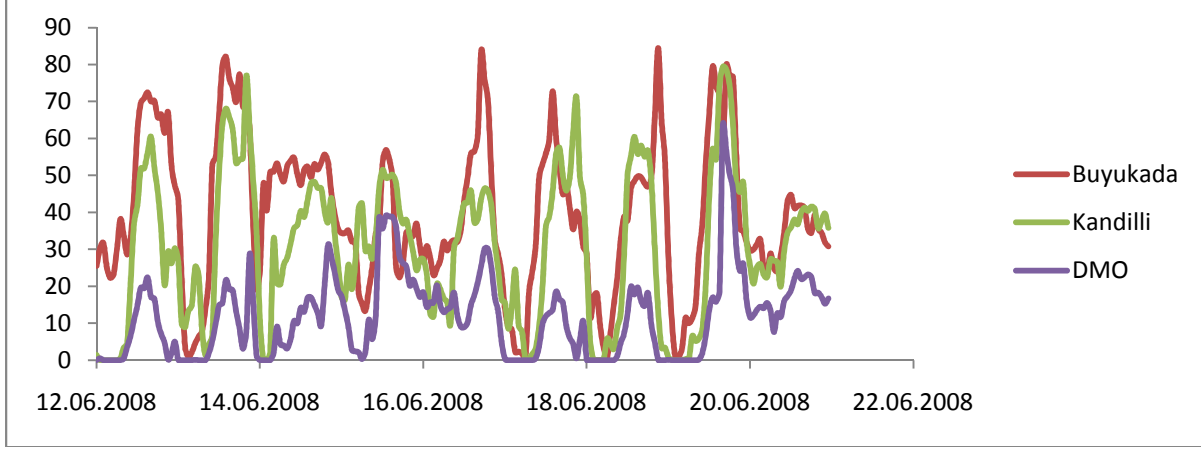
Sonuç olarak, Büyükada istasyonunda ölçülen ozon konsantrasyonları, DMO ve Kandilli istasyonlarında ölçülen konsantrasyonlardan daha yüksek olduğu görülür. Üç istasyon bir arada değerlendirildiğinde, en yüksek ozon seviyelerinin, kırsal özellik gösteren Büyükada istasyonunda, sonra da sırasıyla Kandilli ve DMO istasyonlarında ölçüldüğü anlaşılabilir. Bunun yanı sıra DMO istasyonunda olduğu gibi, Kandilli istasyonu için

hesaplanan ortalama saatlik seviyeler, tipik günlük Şehirsel ozon profilini sağlamaktadır. Kandilli ve DMO istasyonunu karŐılaŐtırdıęımız zaman farklı coğrafi özelliklerin ve emisyon kaynaklarının kirlilik seviyeleri üzerinde yaptığı etki görülmektedir.

5.2. Model Sonuçlarının Değerlendirilmesi

5.2.1. MM5 Meteorolojik Model Sonuçları

Bu alıŐmada, PSU / NCAR tarafından geliştirilmiş olan hidrostatik olmayan mezo lekli MM5 modeli 12 – 19.06.2008 tarihi için çalıştırılmıştır. Bu döneme ait olan ozon konsantrasyonları Şekil 21’ de sunulmuştur. Sınır ve baŐlangıç Şartlarının modellenecek döneme olan etkisinin azaltılması için model 10.06.2008 tarihinden baŐlatılmıŐtır. Ancak analizlerde 10–12 Ağustos 2008 tarihlerine ait çıktılar kullanılmamıŐtır. Şekilde görüldüğü gibi, 13, 17 ve 18 Haziran 2008 günlerinde, maksimum ozon konsantrasyonları 80 ppb nin üstüne çıkmıştır (sırasıyla 82.2, 83.7 ve 84.5 ppb). Bu değerler, Hava Kirliliği Kontrol Yönetmeliği tarafından öngörülen sınır değer olan 240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (~120 ppb) değerini aŐmasa bile, proje döneminde ölçülmüş olan en yüksek değerlerdir. Őekle bakıldığında bu en yüksek değerlerin üçünün de beklendiği gibi Büyükada istasyonunda ölçüldüğü görülmektedir. Bunun sebebi, bir önceki ara raporda da tartıŐıldıęı gibi, ozonun taŐınımıyla ve kimyasal tepkimeler sonucunda, özellikle NO_x emisyon kaynaklarının yoğun olduğu Şehirsel bölgelerde değil, kırsal bölgelerde daha yüksek seviyelere ulaŐmasıdır. Bunların yanında, ölçülen bu maksimum konsantrasyonlar, öğleden sonra – akşam saatleri arasında ölçülmüş değerlerdir.



Şekil 21. 12 – 21.06.2008 dönemini kapsayan Büyükada, Kandilli ve DMO istasyonları saatlik ozon konsantrasyonları

Her şeyden önce doğru bir kirlilik tahmini yapabilmek için doğru atmosferik parametrelerin üretilmesi gerekmektedir (sıcaklık, yağış, rüzgar gibi). Bu çalışmada, meteorolojik alanların simülasyonu için PSU / NCAR tarafından geliştirilen MM5 mezo – ölçek meteorolojik modeli kullanılacaktır. MM5 model son derece kabul gören ve birçok çalışmada tercih edilen bir meteorolojik modeldir.

Maksimum konsantrasyonların ölçülmüş olduğu saatler için MM5 modeli tarafından hesaplanmış olan deniz seviyesindeki rüzgar alanları, 850 mb seviyesindeki nem ve rüzgar alanları, 1000 mb seviyesindeki sıcaklık ve rüzgar alanları, ve dikeydeki rüzgar ve sıcaklık değişimleri sunulmuştur. Şekil 22 ile verilen 13.06.2008 günü, saat 14:00' da, yer seviyesindeki rüzgarlar, İstanbul üzerinde güney batılı olarak estiğini göstermektedir. Sıcaklığın düşey değişimi ise herhangi bir enverziyon veya yağış durumunu işaret etmemektedir. Bu şekilde, kırmızı ile gösterilen sıcaklık ve mavi ile gösterilen çığ noktası sıcaklığının kesişmemesi, yağış olmadığına işaret etmektedir. Şekil 23 ise 16.06.2008 günü, saat 17:00' deki meteorolojik durum gösterilmektedir. Şekilde açık bir şekilde kuzeyli rüzgarların İstanbul üzerindeki hakimiyeti görülmektedir. Düşey sıcaklık değişimine bakıldığında, herhangi bir enversiyon veya yağış gözükmemektedir. Son olarak 18.06.2008 günü, saat 21:00' daki meteorolojik durum Şekil 24 de sunulmuştur. Marmara Denizi üzerindeki batılı rüzgar ile İstanbul üzerindeki güney batılı rüzgarlar açıkça görülmektedir. Son olarak, düşey sıcaklık değişimi, herhangi bir enverziyon veya yağışı işaret etmemektedir. Her üç gün için de oluşturulan düşey sirkülasyon alanları,

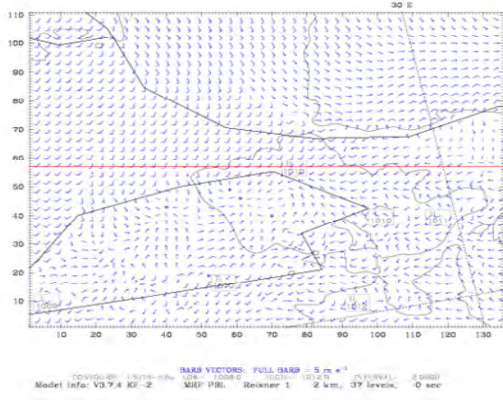
yer seviyesindeki rüzgarların topografi ile nasıl etkileştiğini açıkça göstermektedir. Yükseklik arttıkça, yer seviyesinden kaynaklanan sürtünmenin azalması ile rüzgar şiddetleri de artmaktadır.

Şekil 25 de ise 2 metredeki sıcaklık, 10 metredeki rüzgarın U bileşeni ile V bileşeni için, MM5 modelinin hesapladığı değerler ile Kandilli Rasathanesinde bulunan istasyonumuzda ölçülmüş olan değerlerin bir karşılaştırılması sunulmuştur. Şekil 25a da görüldüğü gibi MM5 meteorolojik modeli, 2 metre sıcaklık değerlerini çok başarılı bir şekilde tahmin etmiştir. Model, beklendiği gibi ölçümlerden daha düşük değerler hesaplamıştır. Bunun sebebi, modelin verdiği 4 km²' lik bir alan için ortalama bir değer noktasal değerler veren ölçümün karşılaştırılıyor olmasıdır. Görüldüğü gibi model gözlem verilerin değişimini çok başarılı bir şekilde yakalamaktadır. Aynı şekilde, rüzgar bileşenlerinin profili de model tarafından yakalanmış ancak değerler, sıcaklık değerleri kadar başarılı üretilmemiştir. Topografinin karmaşık olduğu ve rüzgar hızlarının düşük olduğu durumlarda, bu beklenen bir sonuçtur. Model performansının sayısal bir şekilde ifade edilmesi için, model sonuçları ile gözlemler arasındaki korelasyon katsayıları hesaplanmış ve Tablo 9' da sunulmuştur. Tabloda da görüldüğü gibi model ile gözlemler arasında, özellikle sıcaklık değerleri arasında, iyi bir korelasyon mevcuttur.

Tablo 9 . MM5 sonuçları ile gözlemler arasındaki korelasyonlar

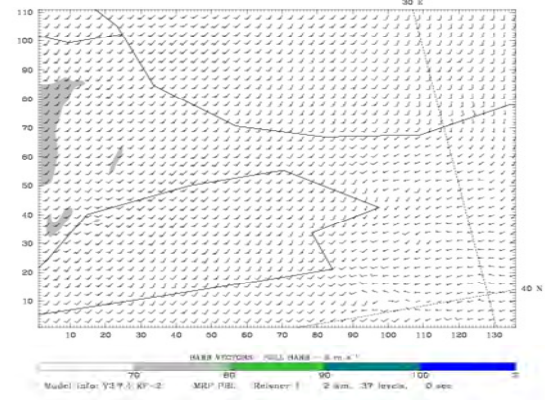
Parametreler	Korelasyon
T 2	0.81
U 10	0.51
V 10	0.67

Dataset: RIP; press humidity
 Fcst: 83.00 h
 Valid: 1100 UTC Fri 13 Jun 08 (1400 LDT Fri 13 Jun 08)
 Horizontal wind vectors
 at k-index = 37



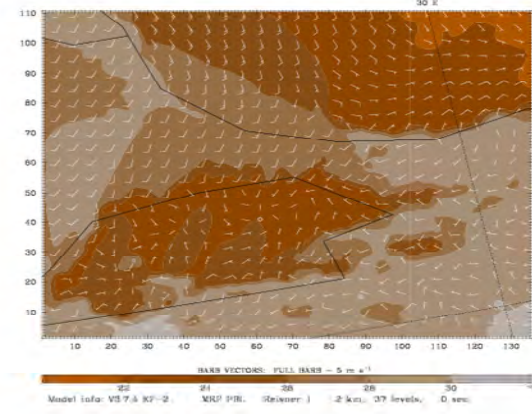
(a)

Dataset: RIP; press humidity
 Fcst: 83.00 h
 Valid: 1100 UTC Fri 13 Jun 08 (1400 LDT Fri 13 Jun 08)
 Relative humidity (w.r.t. water)
 Horizontal wind vectors
 at pressure = 850 hPa



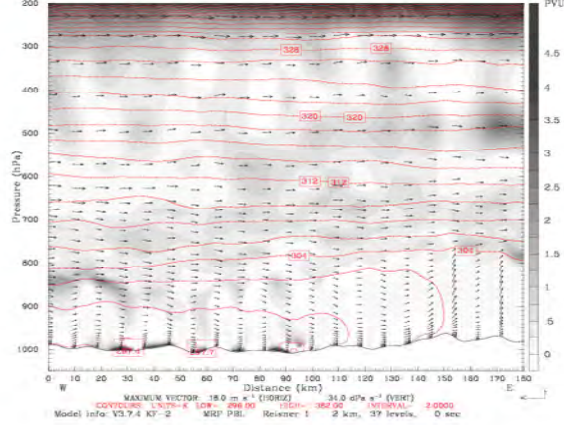
(b)

Dataset: RIP; temp
 Fcst: 83.00 h
 Valid: 1100 UTC Fri 13 Jun 08 (1400 LDT Fri 13 Jun 08)
 Temperature
 Horizontal wind vectors
 at pressure = 1000 hPa



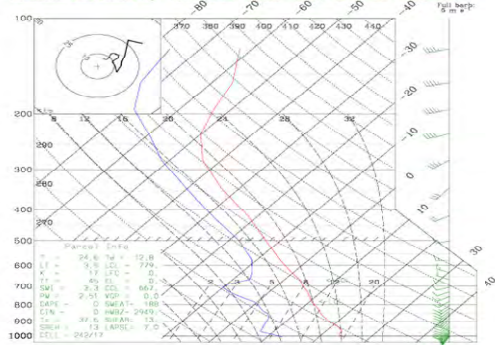
(c)

Dataset: RIP; vertical
 Fcst: 83.00 h
 Valid: 1100 UTC Fri 13 Jun 08 (1400 LDT Fri 13 Jun 08)
 Potential vorticity
 Circulation vectors
 XY = 30.0, 57.0 to 120.0, 57.0
 XY = 30.0, 57.0 to 120.0, 57.0



(d)

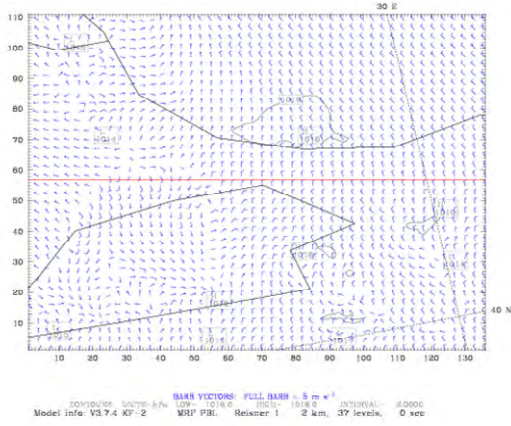
Dataset: RIP; vertical
 Fcst: 83.00 h
 Valid: 1100 UTC Fri 13 Jun 08 (1400 LDT Fri 13 Jun 08)
 Deep point temperature
 Horizontal wind vectors
 x,y = 70.14, 53.32 lat,lon = 40.97, 28.82 alt=1794.17080



(e)

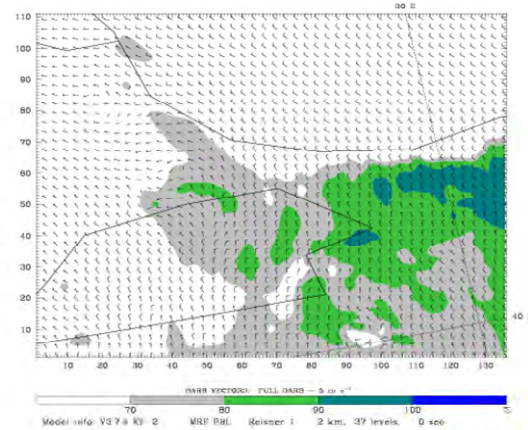
Şekil 22. 13.06.2008 günü, saat 14:00 için a) deniz seviyesi rüzgar alanı, b) 850 mb nem ve rüzgar alanları, c) 1000 mb sıcaklık ve rüzgar alanları, d) dikey rüzgar sirkülasyon ve e) dikey sıcaklık değişimleri

Dataset: RIP: press humidity
 Fcst: 158.00 h
 Sea-level pressure
 Horizontal wind vectors
 Valid: 1400 UTC Mon 16 Jun 08
 at k-index = 37
 Init: 0000 UTC Tue 10 Jun 08
 (1700 LDT Mon 16 Jun 08)



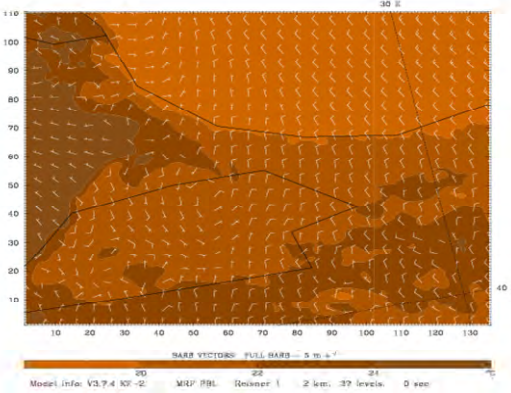
(a)

Dataset: RIP: press humidity
 Fcst: 158.00 h
 Relative humidity (w.r.t. water)
 Horizontal wind vectors
 Valid: 1400 UTC Mon 16 Jun 08
 at pressure = 850 hPa
 Init: 0000 UTC Tue 10 Jun 08
 (1700 LDT Mon 16 Jun 08)



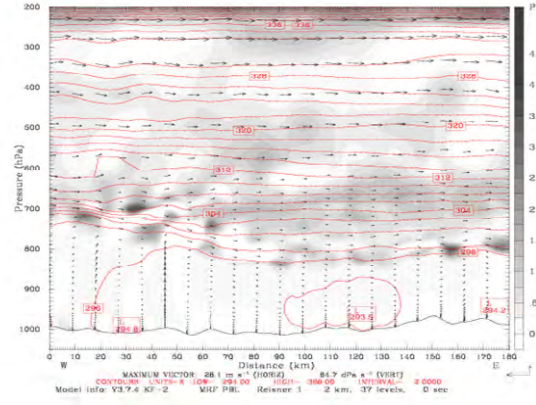
(b)

Dataset: RIP: temp
 Fcst: 158.00 h
 Temperature
 Horizontal wind vectors
 Valid: 1400 UTC Mon 16 Jun 08
 at pressure = 1000 hPa
 Init: 0000 UTC Tue 10 Jun 08
 (1700 LDT Mon 16 Jun 08)



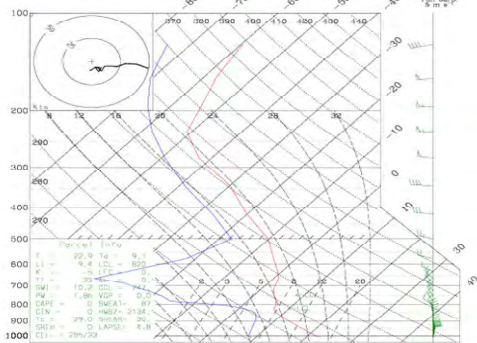
(c)

Dataset: RIP: vertical
 Fcst: 158.00 h
 Potential vorticity
 Potential temperature
 Circulation vectors
 Valid: 1400 UTC Mon 16 Jun 08
 at pressure = 1000 hPa
 Init: 0000 UTC Tue 10 Jun 08
 (1700 LDT Mon 16 Jun 08)
 XY = 30.0, 57.0 to 120.0, 57.0
 XY = 30.0, 57.0 to 120.0, 57.0



(d)

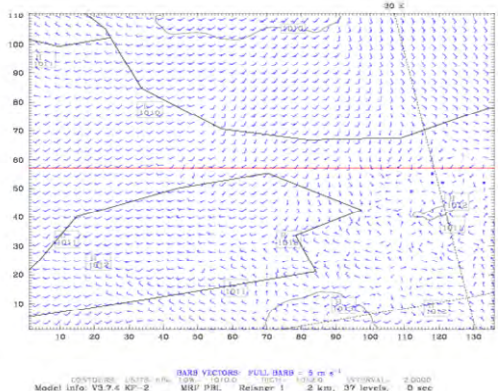
Dataset: RIP: vertical
 Fcst: 158.00 h
 Temperature
 Horizontal wind vectors
 Valid: 1400 UTC Mon 16 Jun 08
 at pressure = 1000 hPa
 Init: 0000 UTC Tue 10 Jun 08
 (1700 LDT Mon 16 Jun 08)
 XY = 70.14, 53.32 lat, lon = 40.97, 28.82 min, LTB, 17080
 XY = 70.14, 53.32 lat, lon = 40.97, 28.82 min, LTB, 17080



(e)

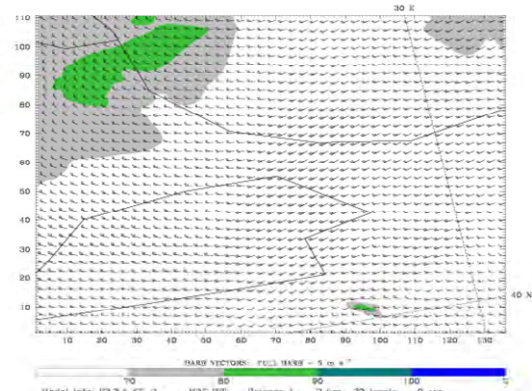
Şekil 23. 16.06.2008 günü, saat 17:00 için a) deniz seviyesi rüzgar alanı, b) 850 mb nem ve rüzgar alanları, c) 1000 mb sıcaklık ve rüzgar alanları, d) dikey rüzgar sirkülasyon ve e) dikey sıcaklık değişimleri

Dataset: RIP: press humidity
 Fcst: 21:00 h Valid: 1800 UTC Wed 18 Jun 08 (2100 LDT Wed 18 Jun 08)
 Horizontal wind vectors at k-index = 37



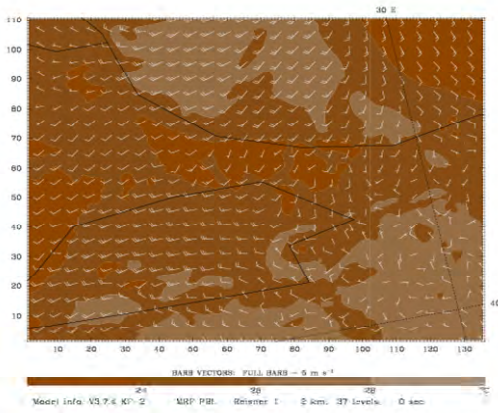
(a)

Dataset: RIP: press humidity
 Fcst: 21:00 h Valid: 1800 UTC Wed 18 Jun 08 (2100 LDT Wed 18 Jun 08)
 Relative humidity (w.r.t. water) at pressure = 850 hPa
 Horizontal wind vectors at pressure = 850 hPa



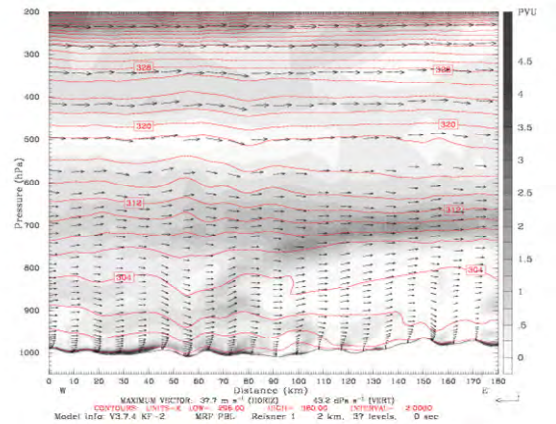
(b)

Dataset: RIP: temp
 Fcst: 21:00 h Valid: 1800 UTC Wed 18 Jun 08 (2100 LDT Wed 18 Jun 08)
 Temperature at pressure = 1000 hPa
 Horizontal wind vectors at pressure = 1000 hPa



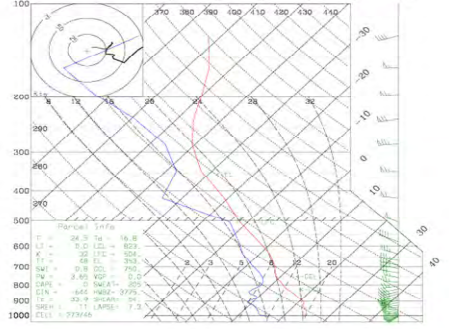
(c)

Dataset: RIP: vertical
 Fcst: 21:00 h Valid: 1800 UTC Wed 18 Jun 08 (2100 LDT Wed 18 Jun 08)
 Potential vorticity
 Potential temperature
 Circulation vectors
 XY = 30.0, 57.0 to 120.0, 57.0
 XY = 30.0, 57.0 to 120.0, 57.0



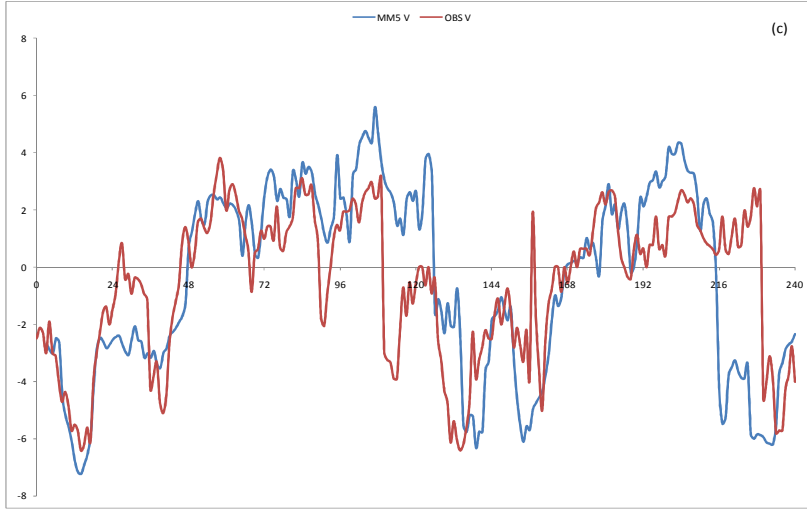
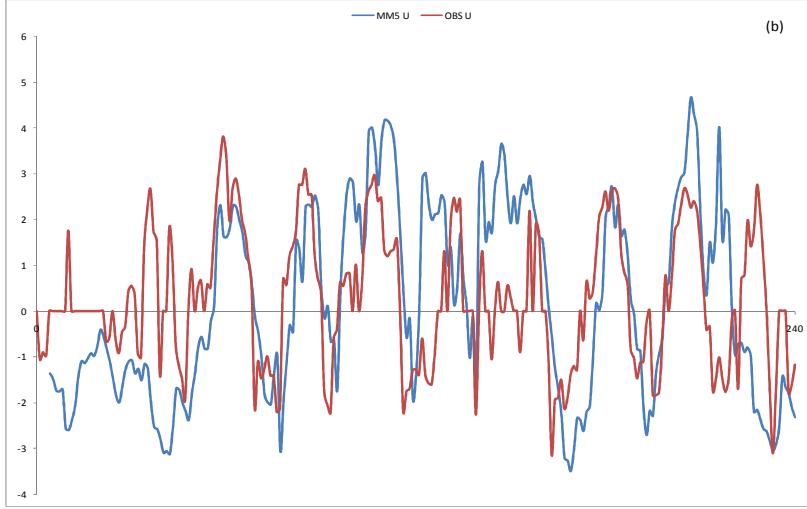
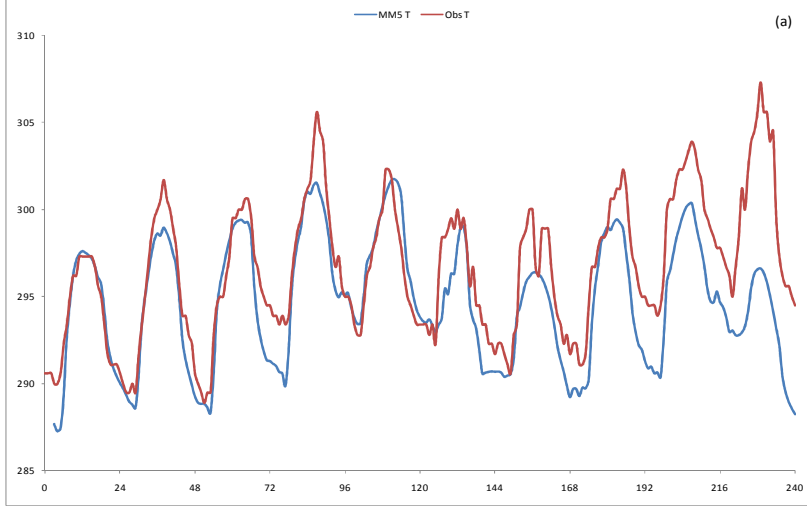
(d)

Dataset: RIP: vertical
 Fcst: 21:00 h Valid: 1800 UTC Wed 18 Jun 08 (2100 LDT Wed 18 Jun 08)
 Temperature
 Horizontal wind vectors
 x,y = 70.14, 53.32 lat,lon = 40.97, -28.82 stn=178A,17860



(e)

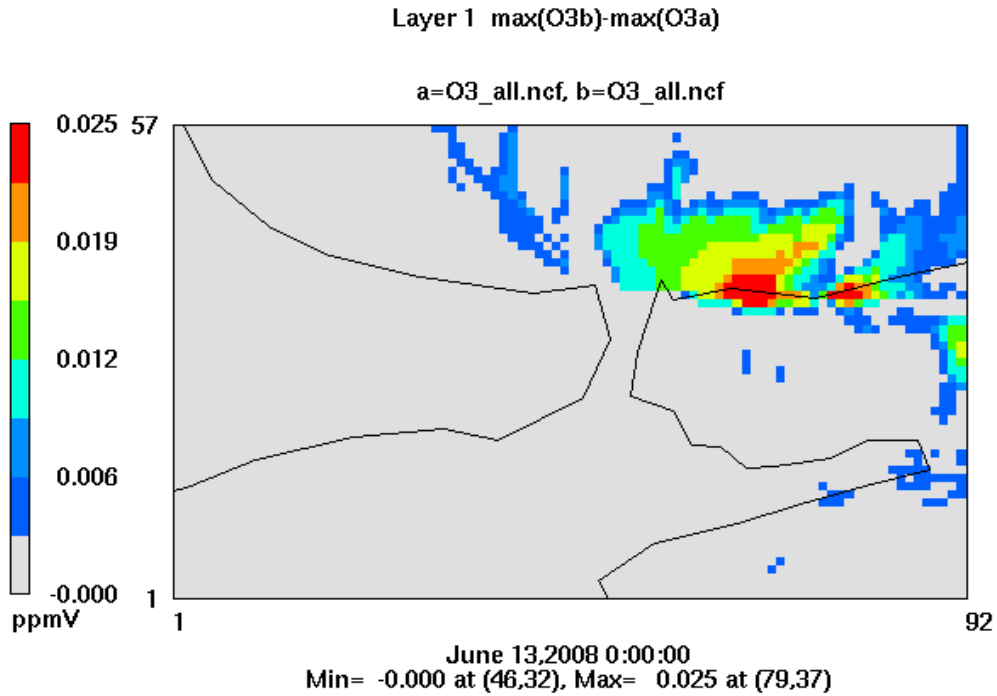
Şekil 24. 18.06.2008 günü, saat 21:00 için a) deniz seviyesi rüzgar alanı, b) 850 mb nem ve rüzgar alanları, c) 1000 mb sıcaklık ve rüzgar alanları, d) dikey rüzgar sirkülasyon ve e) dikey sıcaklık değişimleri



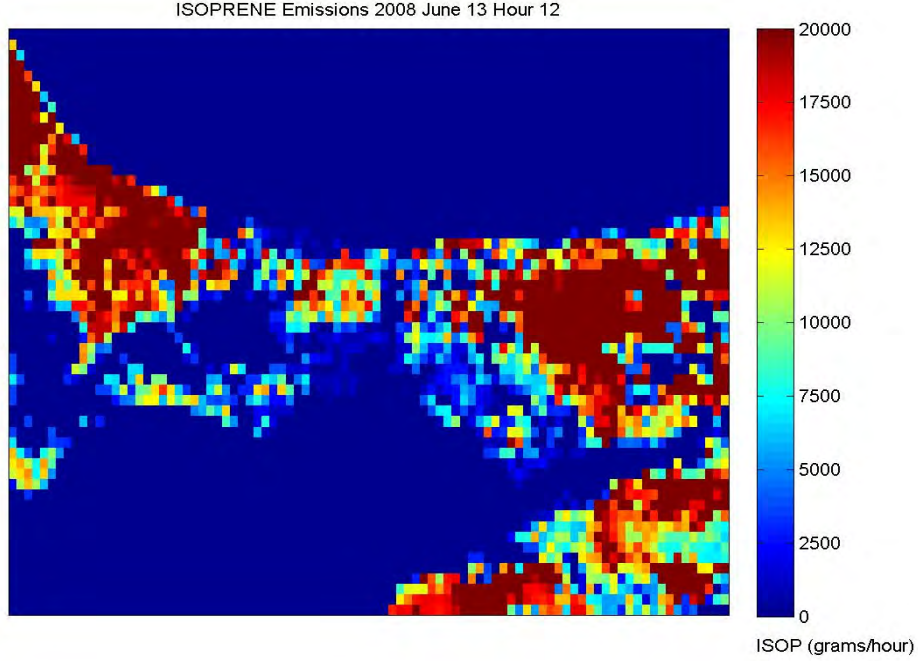
Şekil 25. a) Yer seviyesi sıcaklık, b) 10 metredeki rüzgarın U bileşeni ve c) 10 metredeki rüzgarın V bileşeni

5.2.2. CMAQ Kimyasal Dağılım Model Sonuçları

Uyguladığımız CMAQ Kimyasal Dağılım Model sonuçlarına göre biyojenik emisyonları içeren simülasyonlarda, Kandilli hava kalitesi istasyonunda simülasyon döneminde ozon konsantrasyonları %35 daha düşük, Büyükada hava kalitesi istasyonunda %5 daha yüksek bulunmuştur. Biyojenik emisyonlar model periyodunda maksimum ozon konsantrasyonunun 25 ppb e kadar artış göstermesine yol açmıştır. Şekil 26' dan görüldüğü gibi, maksimum farklar kuzeyde, Karadeniz üzerinde meydana gelmektedir. Bunun sebebi, güney ve güney batılı rüzgarların, şehirde meydana gelen azot bileşiklerini kuzey ve kuzey doğuya taşımaları ve ormanlık alanlarda meydana gelen ve çok reaktif olan izopren gibi reaktif biyojenik bileşiklerle reaksiyona girip ozon oluşturmalarıdır (Şekil 27). Ayrıca, deniz üzerinde, ozon karaya göre daha az kuru birikmeye maruz kaldığından, deniz üzerinde daha fazla ozon birikmesi meydana gelmektedir.



Şekil 26. Biyojenik emisyonların eklenmesine karşılık maksimum ozon konsantrasyonlarında meydana gelen değişim.

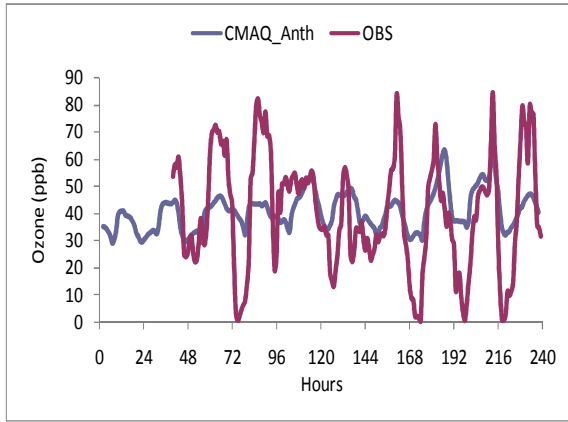


Şekil 27. 13 Haziran 2008, saat 12:00 için üretilmiş izopren emisyonları

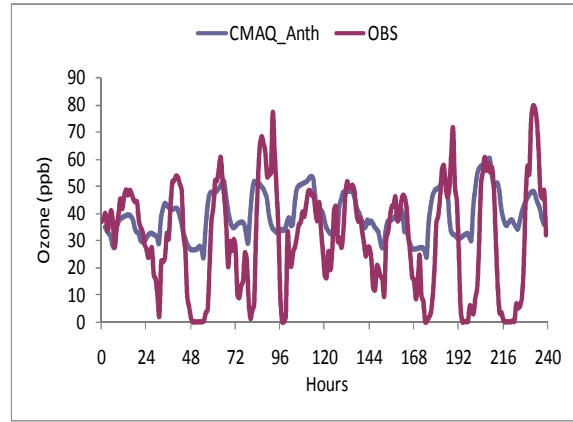
Şekil 28’de biyojenik emisyonlar ile birlikte CMAQ model sonuçları gece dönemlerine ait minimum ozon seviyelerini çok daha iyi bir şekilde belirleyebilmekte olduğunu da göstermektedir. Bu sonuç gece esnasında hayli reaktif olabilen ve bu suretle ozonu bozan monoterpen emisyonlarına atfedilebilir. CMAQ Model sonuçlarına göre Kandilli istasyonunda ozon konsantrasyonlarını hala %16 kadar daha düşük hesaplamaktadır (BIAS değeri ~4.93 ppb dir). Büyükada da ise model sonuçları %10 kadar yüksek çıkmaktadır (4.19 ppb). Bu istasyonlarda gözlenen ve modellenen sonuçlar arasındaki korelasyon katsayısı Kandilli ve Büyükada istasyonlarında sırası ile 0.53 and 0.55 dir. Bu sonuçlar biyojenik kaynakların eklenmesi ile model ile oluşan ozon kaynaklarının ozon seviyelerinin zamansal değişimini değiştirdiğini göstermektedir. Artı yönde değişimler, biyojenik VOC emisyonlarının, antropojenik VOC emisyonlarından daha yüksek olduğu günlerde meydana gelmiştir. Günlük olarak hesaplanmış antropojenik ve biyojenik VOC emisyonları Tablo 10’ da sunulmuştur. Bu her iki duruma göre model performansının istatistiksel değerlendirilmesi Tablo 11 ve 12 de gösterilmiştir.

Tablo 10. Model ortamında antropojenik ve biyojenik metan olmayan VOC emisyonlarının günlük toplam değeri

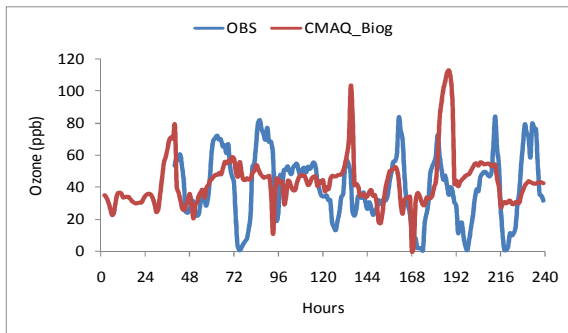
Tarih	Biyojenik VOC (ton)	Antropojenik VOC (ton)
10.06.2008	234	312
11.06.2008	258	314
12.06.2008	335	314
13.06.2008	410	322
14.06.2008	429	207
15.06.2008	213	160
16.06.2008	214	315
17.06.2008	300	312
18.06.2008	404	314
19.06.2008	196	314



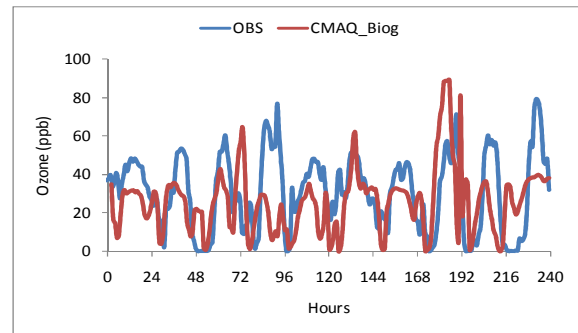
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 28. Sadece antropojenik ve antropojenik+biyojenik emisyonları kullanarak gözlenen ve modellenen ozon konsantrasyonları a) Büyükada ant., b) Kandilli ant., c) Buyukada ant.+biog. Ve d) Kandilli ant.+biog.

Tablo 11. Sadece antropojenik emisyonlar gözönüne alındığında model performans istatistikleri

	Kandilli	Büyükada
Korelasyon	0.30	0.22
Ort.gözlem	30.91	40.34
$Ort_{model} / Ort_{gözlem}$	1.27	1.03
$\sigma_{gözlem}$	19.96	21.13
$\sigma_{model} / \sigma_{gözlem}$	0.41	0.34
BIAS	8.40	1.27
ABSE	15.02	14.96
RMSE	19.01	18.31
IOA(Uygunluk İndeksi)	0.68	0.74

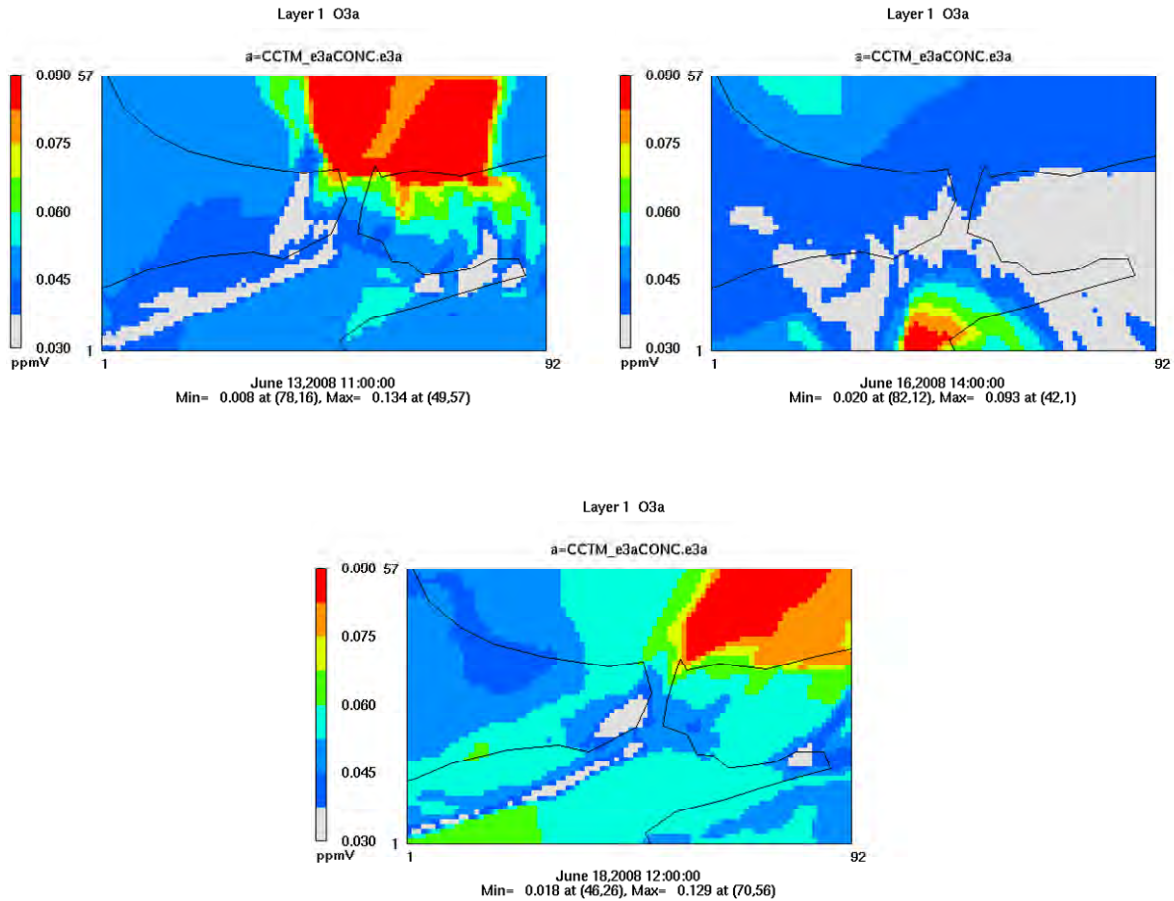
Tablo 12. Biyojenik ve Antropojenik emisyonların gözönüne alınması halinde model performans istatistikleri

	Kandilli	Büyükada
Korelasyon	0.53	0.55
Ort gözlem	30.91	40.34
$Ort_{model} / Ort_{gözlem}$	0.84	1.10
$\sigma_{gözlem}$	19.96	21.13
$\sigma_{model} / \sigma_{gözlem}$	0.85	0.78
BIAS	-4.93	4.19
ABSE	17.92	18.64
RMSE	22.36	24.04
IOA (Uygunluk İndeksi)	0.60	0.60

Antropojenik ve biyojenik emisyonların kullanımı ile meydana gelen ozon dağılım grafikleri Şekil 31'de verilmiştir. Ozon konsantrasyonlarının rüzgar yönüne bağlı olarak taşınımı net bir şekilde görülmektedir. 13 ve 18 Haziran günü güney batılı rüzgarlardan kaynaklanan kuzeyli taşınım, ozonun kuzey ve kuzey doğuya doğru birikmesine sebep olurken 16 Haziran'da tam ters yönlü bir taşınım meydana gelmektedir. Ayrıca şekillerde, emisyon kaynaklarının olduğu bölgelerde ozonun çok az biriktiği görülmektedir. Bunun sebebi, hem bu bölgelerdeki taze NO emisyonlarının ozonun bozulmasına yol açması, hem de ozon oluşumun kimyasal mekanizması dolayısıyla kaynaktan uzaklaştıkça artışa geçmesidir.

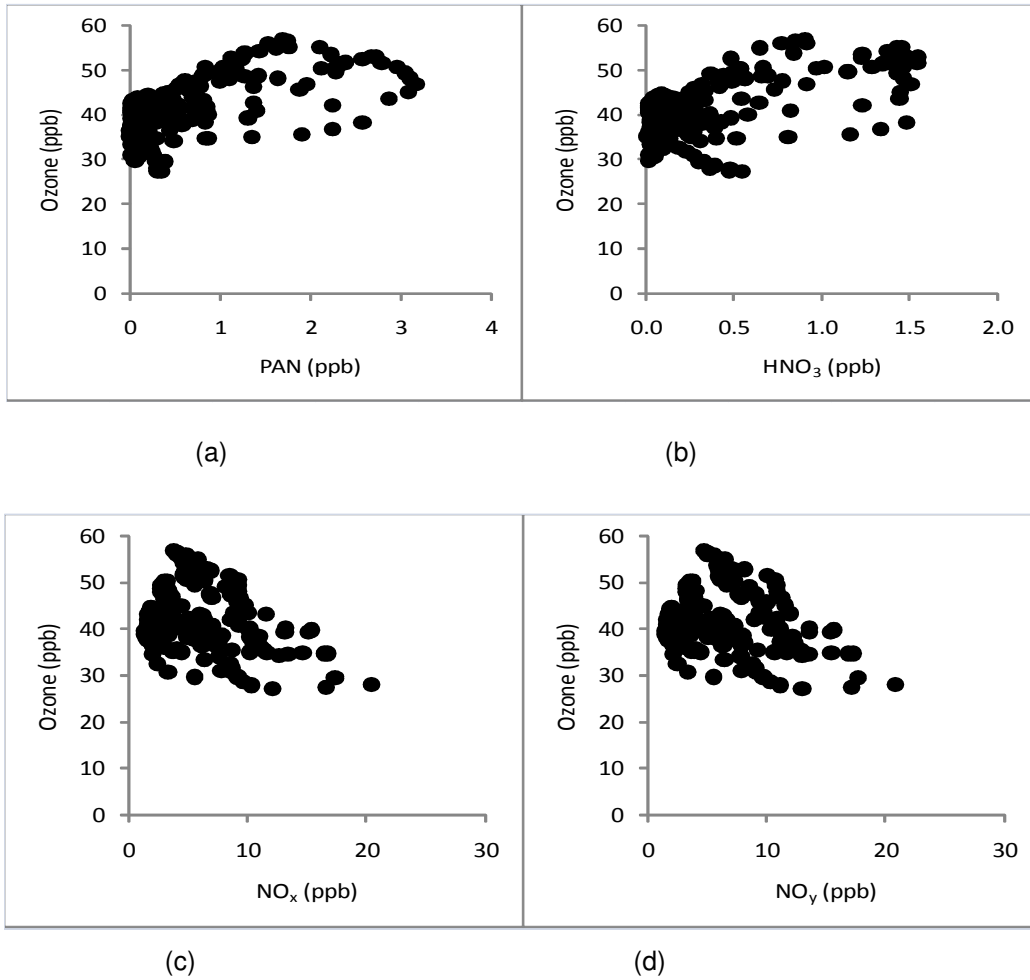
5.2.2.1. Duyarlılık Analizleri

Bu çalışmada bölge atmosferinin kimyasal duyarlılık analizi iki ayrı yaklaşım kullanılarak yapılmıştır. Birinci yaklaşımda, bölgede mevcut ölçümler bulunmadığı için model tarafından hesaplanan ozon ve reaktif azot bileşikleri olan PAN, HNO₃, NO_x ve NO_y konsantrasyonları kullanılmıştır. Bu yaklaşımda, O₃ /NO_x ; H₂O₂/HNO₃ ; PAN/O₃; O₃/HNO₃ ve NO_x/NO_y oranları kullanılarak ozon üretiminin azot veya VOC seviyelerinden hangisine daha duyarlı olduğu tespit edilmeye çalışılmıştır. Bilindiği gibi O₃/HNO₃ oranınının 30' un altında olması ve/veya HNO₃ konsantrasyonunun 3.5 ppb nin üstünde olması, VOC-duyarlı bir atmosferi işaret etmektedir (Sillman ve West, 2008). Bu çalışmada, O₃/HNO₃ oranı 97.6, ortalama HNO₃ konsantrasyonu ise 1.5 ppb olarak belirlenmiştir. Her iki değer de atmosferin NO_x-duyarlı olduğunu işaret etmektedir. H₂O₂/HNO₃ oranı ise 0.2-1 aralığında bulunduğunda NO_x 'a duyarlı atmosferi işaret etmektedir (Sillman ve He, 2002; Sillman ve West,2008).



Sekil 29. a) 13, b) 16 ve c) 18 Haziran 2008 günlerine ait maksimum saatlik ozon dağılımları.

Bu çalışmada bu oran 0.66 olarak bulunmuş olup yine NO_x-duyarlı atmosferi işaret etmektedir. PAN/O₃ oranı da 0.02, korelasyon katsayısı ise 0.63 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar bize sınır tabakada ozon üretiminin bu dönemde arttığını göstermektedir. Son olarak da NO_x/NO_y oranı 0.93 olarak hesaplanmıştır. Bu oran 10' un altında bulunduğu NO_x-duyarlı atmosfer şartlarının mevcut olduğu anlaşılmaktadır (Sillman ve West, 2008). Görüldüğü gibi tüm bulgular, gözönüne alınan çalışma bölgesi atmosferinin NO_x seviyelerine daha duyarlı olduğunu işaret etmektedir. Bu sonuç aynı zamanda İm vd. (2008) çalışmasının sonuçları ile de örtüşmektedir. İlgili bileşiklerin saçılım diyagramları Şekil 32' de sunulmuştur.

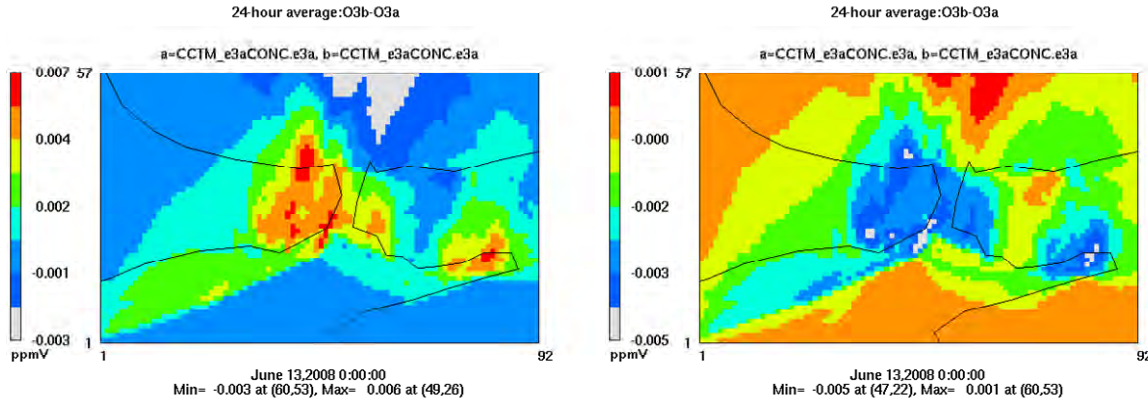


Şekil 30. Ozon ve reaktif azot bileşikleri arasındaki ilişki: a) PAN, b) HNO₃, c) NO_x ve d) NO_y

İkinci bir yaklaşım olarak, Brute-Force simülasyonları kullanılmıştır. Yani, model NO, NO₂, NO_x ve VOC emisyonlarının teker teker \pm %30 değiştirilmesi ile tekrar çalıştırılmıştır. Bu şekilde, her bir kirletici grubun tek başına, ozon seviyeleri üzerindeki muhtemel etkisi, referans model sonuçları ile karşılaştırılarak belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla kullanılan emisyon senaryoları ve meydana gelen ozon konsantrasyonu değişimleri Tablo 13' de sunulmuştur. Tabloda görüldüğü üzere, en fazla etki NO emisyonlarındaki değişimler sonucu elde edilmiştir. NO emisyonlarındaki % 30'luk bir azalma, ozon seviyelerinde % 9.70'lik bir artışa sebep olurken, NO emisyonlarındaki % 30'luk bir azalma, ozon seviyelerinde % 8.2 seviyesinde bir azalmaya sebep olmuştur. Bu değişimlerin sebebi, NO emisyonlarındaki oynama, NO_x-titrasyonu dediğimiz, ozonun NO ile bozunma mekanizmasını doğrudan etkilemesidir. VOC emisyonlarında meydana getirilen % 30'luk bir azalma ise, ozon seviyelerinin maksimum % 4 kadar azalmasına sebep olmuştur. Bunlardan görüleceği gibi ozon seviyeleri en fazla NO_x türevlerindeki değişimlere tepki göstermiştir. Bu durum, birinci yaklaşımla elde edilen sonuçları da desteklemekte, yani atmosferin NO_x-duyarlı olduğunu göstermektedir. Şekil 33' de, 13 Haziran 2008 günü, % 30 luk bir artış ve azalışa tabi tutulan NO emisyonların, ozonun mekansal dağılımı üzerine yaptığı etki görülmektedir. Şekilde açıkça görüldüğü gibi en büyük farklar, bölgenin şehirselleşmiş ve endüstriyel faaliyetlerinin olduğu kısımlarında ve taşınımın rüzgar yönüne bağlı olarak etkili olduğu bölgelerde meydana gelmiştir. NO emisyonlarındaki artma, şehirselleşmiş alanlardaki ozon konsantrasyonlarını düşürürken, taşınım yönünde bulunan alanlarda (örneğin şehrin kuzeyinde Karadeniz kıyıları) ise ozon seviyelerinde artış meydana getirmektedir. Bunun sebebi şehirselleşmiş alanlarda meydana gelen NO_x-titrasyonunun artan NO ile birlikte artması, bunun yanında kaynaktan uzaklaştıkça, fotokimyasal olarak ozon üretiminin fazlalaşmasıdır.,

Tablo 13. Emisyon senaryolarına bağlı olarak ozonun seviyelerinin değişimi (%)

Senaryo	Maksimum (%)	Minimum (%)	Ortalama (%)
30% NO _x Azalma	9.79	-1.96	1.97
30% NO _x Artma	1.30	-8.24	-1.97
30% NO Azalma	9.70	-1.61	2.07
30% NO Artma	1.06	-8.19	-2.02
30% NO ₂ Azalma	0.06	-0.32	-0.07
30% NO ₂ Artma	0.32	-0.06	0.07
30% NMVOC Azalma	0.11	-3.99	-0.67
30% NMVOC Artma	3.43	-0.24	0.49



Şekil 31. NO emisyonlarında a) %30 artış, b) % 30 azalış sonucu meydana gelen 24-saatlik ortalama ozon değişimleri

5.3. Öneriler

Bu projede, İstanbul'da meydana gelen yüzey ozon seviyelerinin daha sağlıklı değerlendirilmesi için sürekli ölçümlerden ve bu seviyelerin oluşmasına sebep olan meteorolojik ve kimyasal süreçleri benzeştiren modellerden faydalanılmıştır. Elde edilen sonuçların değerlendirilmesi aşamasında, projenin bölgedeki hava kirliliği çalışmalarına kattığı katkı değerlerinin yanında, gelecekte bu bölgede veya Türkiye'nin diğer şehir ve bölgelerinde yürütülecek olan benzer çalışmaların, daha da iyiye ve ileriye götürmesi açısından bazı öneriler de getirilmiştir.

Öncelikle, ozon gibi ikincil kirleticilerin gözlenmesinde, bu kirleticilerin oluşumuna ve bozulmasına yol açan diğer bileşiklerin de tümünün izlenmesi gerektiği ortaya çıkmıştır. Ozonun oluşmasına sebep olan azot oksit türevleri ve uçucu organik bileşiklerin de ozon ile birlikte sürekli izlenmesi şarttır. Aksi halde, bu mekanizmaların nasıl işlediği konusunda elde edilen bilgi hep eksik olacaktır. Bunun yanında, bu amaçla kurulan ölçüm istasyonlarında, mutlaka temel meteorolojik parametrelerin izlenmesine de olanak sağlayacak sistemler mevcut olmalıdır. Projenin farklı aşamalarında sürekli gündeme getirildiği gibi ozon, kimyasal mekanizmalar yanında, bu mekanizmaların devreye girmesini sağlayan meteorolojik şartlarla da doğrudan ilgilidir. Ölçüm istasyonlarının işletilmesi, devamlılığının sağlanması ve elde edilen verilerin doğru ve diğer istasyonlar ve bölgelerle karşılaştırılabilir olması için, TÜBİTAK ve diğer kamu kurumları tarafından bir ölçüm protokolü hazırlanmalı ve tüm istasyonlarda, ölçüm, kalibrasyon ve veri akışı için bu protokolün işlerliği izlenmelidir. Son olarak, İstanbul gibi bir mega şehirde, ölçüm ağının daha geniş olması ve özellikle ozon gibi ikincil kirleticiler için bu ağın yarı-şehirsal ve kırsal alanlara yayılması gerekmektedir. Bu tür bir ölçüm ağı, birincil kirletici kaynaklardan uzaklaştıkça seviyeleri artan ozon gibi kirleticilerin, mekansal dağılımı hakkında daha doğru bilgi vereceği gibi, modelleme çalışmalarında da model geçerliliği için daha uygun bir karşılaştırma alanı sağlayacaktır.

Bu projenin ikinci ayağını oluşturan modelleme çalışması da beraberinde bazı öneriler getirmektedir. Bu alandaki en önemli eksiklikler, emisyon envanteri kısmından ileri gelmektedir. Emisyonlar, genel olarak modelleme çalışmalarında belirsizliği en yüksek girdiyi oluşturmakta, bundan dolayı model sonuçlarının doğruluğunda en önemli katkıyı yapmaktadır. Bu projede açıkça görüldüğü gibi Türkiye’de önemli bir emisyon envanteri sorunu mevcuttur. Ancak, burada bahsi geçen envanter, ülkesel ölçekte yıllık ana kirletici gruplarını hedeflemekten çok, belli çözünürlükte alanlara bölünmüş – tercihen birden fazla farklı çözünürlükte -, zamansal ve kimyasal olarak ayrıştırılmış ve modelleme çalışmalarında kullanılacak bir envanterdir. Böyle bir envanterin, tek bir proje kapsamında ve kısıtlı bir ekip tarafından oluşturulamayacağı açıktır. Bu anlamda, kamu kurumları ile üniversiteleri bir araya getirecek ve bilgi ile teknoloji akışını eş zamanlı olarak sağlayacak projelerin oluşturulması ve desteklenmesi ve bu alanda

çalışacak araştırmacı ve uzman personel yetiştirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, TÜBİTAK gibi araştırma olanakları sağlayan ve destekleyen kuruluşlara büyük görev düşmektedir.

Yukarıda konu edilen tarzda bir emisyon envanteri, elbette ülkemiz koşullarını en iyi şekilde temsil edebilecek olan yaklaşımlarla hazırlanmalıdır. Burada amaç, bu proje de dahil olmak üzere, genelde ABD ve Avrupa' da geliştirilmiş olan emisyon faktörleri, zamansal ve kimyasal profilleri kullanmak yerine, ülkemizde yer alan aktiviteleri temsil edecek yeni faktör ve profillerin deneysel olarak geliştirilmesidir. Ancak bu şekilde modellerin gerçeğe daha yakın sonuçlar vermesi mümkün olacaktır. Ayrıca bu tür bir envanter, kaynak bazında çok geniş bir dağılımı temsil etmeli, sadece endüstriyel ve evsel kaynakları değil, farklı birçok kaynağı bir araya getirmelidir. Bu projede, son derece kısıtlı imkanlarla böyle bir envanter üretilmeye çalışılmış, birçok farklı kirlenici kaynağın bir araya getirilmesine gayret edilmiştir. Bu çalışma, yukarıda konu edilen emisyon envanterleri için bir temel oluşturmaktadır.

Yine bu proje göstermiştir ki, hava kalitesi modelleme çalışmaları, özellikle ikincil kirleniciler için biyogenik emisyonlar göz önüne alınmadığında başarılı sonuçlar vermemektedir. Gelecekte yürütülecek olan çalışmalarda, doğal kaynaklı emisyonların envanter modeli içerisinde mutlaka yer alması gerekmektedir.

Bu projede elde edilen duyarlık analiz sonuçları, ozon seviyelerinin düşürülmesinde önem arz edecek öncül kirlenicileri ortaya koymuştur. Ancak bu tür bir çalışma, sadece kirlenici değil, aynı zamanda kaynak bazlı bir şekilde de yürütülmeli ve bir adım daha ileriye götürülmelidir. Böylece hangi emisyon sektörlerinde alınacak önlemlerin daha etkili olacağı net bir şekilde ortaya konulmuş olacaktır.

Son olarak, hava kirliliği modelleme çalışmalarının, sadece belirli episodik dönemler dışında, daha uzun dönemlere uygulanması, ülkemizde kirlilik seviyelerinin temelleri üzerinde daha kapsamlı bilgi sağlayacaktır. Bu anlamda, yukarıda getirilen önerileri kapsayan uzun soluklu projeler oluşturulmalıdır.

6. REFERANSLAR

Anteplioğlu, U., 2000. Modeling of surface ozone with UAM: a case study for İstanbul, Ph.D. Thesis, İstanbul Technical University, 147 pp.

Byun, D.W. and Ching J.K.S., Science Algorithms of the EPA Models-3CMAQ Modeling System, Washington, DC. USEPA, (1999).

EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook - Third edition, October 2003.

Environmental Protection Agency (EPA), 1998.

National Emissions and Inventory Data & Documentation, EPA,2002.

Hava Kirliliği Kontrol Yönetmeliği

İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İstanbul,2005.

İstanbul Deniz Otobüsleri A.Ş (İDO), İstanbul, 2007.

İstanbul Gaz Dağıtım Şirketi ve Ticaret Anonim Şirketi (İGDAŞ), İstanbul, 2005.

İm, U., Tayanç, M., Yenigün, O., 2006. Analysis of major photochemical pollutants with meteorological factors for high ozone days in Istanbul, Turkey. Water, Air, and Soil Pollution 175, 335–359.

İm U., Tayanc, M., Yenigun, O., 2008. Interaction patterns of major photochemical pollutants in Istanbul, Turkey. Atmospheric Research 89, 382–390.

İstanbul Valiliği Araç İstatistiği, İstanbul, (2005).

Kesgin U., Vardar N., 2001. A study on exhaust gas emissions from ships in Turkish Straits, *Atmospheric Environment* 35, 1863-1870.

Sillman, S., 1999. The relation between ozone, NO_x and hydrocarbons in urban and polluted rural environments. *Atmospheric Environment* 33, 1821–1845.

Sillman, S., He, D., 2002. Some theoretical results concerning O₃-NO_x-VOC chemistry and NO_x-VOC indicators. *Journal of Geophysical Research*, Vol 107, No.D22, 4659.

Sillman, S. and West J.J., 2008. Reactive Nitrogen in Mexico City and its Relation to Ozone-Precursor Sensitivity: Results From Photochemical Models, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 8, 20501-20536.

Tayanç, M., 2000. An assessment of spatial and temporal variation of sulfur dioxide levels over İstanbul, Turkey. *Environmental Pollution* 107, 61–69.

Topçu, S., İncecik, S., 2002. Surface ozone measurements and meteorological influences in the urban atmosphere of İstanbul. *International Journal of Environmental Pollution* 17, 390–404.

Topçu, S., Antepioğlu, U., İncecik, S., 2003. Surface ozone concentrations and its relation to wind field in İstanbul. *Water, Air and Soil Pollution: Focus* 3, 53–64.

Topçu, S., Kahya, C., İncecik, S., et al., 2005. Review of surface ozone and its precursors in urban atmosphere of Istanbul, Turkey for 2002–2003. In: Topçu, S., Yardım, M.F., Bayram, A., et al. (Eds.), *Proceedings of Air Quality Management at Urban, Regional, and Global Scales*, vol. 3, pp.1083–1093.

Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK),2010.

Yay, O.D., Poupkou, A., Symeonidis, P., Gandou, A., Melas, D., Dogeroglu, T., Biogenic Emissions Of Volatile Organic Compounds From Turkey, Third International Symposium on Air Quality Management at Urban, Regional and Global Scales, Istanbul-Turkey, 26-30 September 2005.