

Marmara Bölgesi' ndeki Hava Kirliliğinin Modellenmesi, Kirlilik Azaltımı ve Maruziyet Analizi

Alper KILIÇ^{1,*}, Serdar KUM², Alper ÜNAL³, Tayfun KINDAP³

¹Marine Intelligent Solutions, İstanbul.

²İstanbul Teknik Üniversitesi, Denizcilik Fakültesi, Tuzla, İstanbul.

³İstanbul Teknik Üniversitesi, Avrasya Yer Bilimleri Enstitüsü, Maslak, İstanbul.

Özet

Günümüzde insan kaynaklı hava kirliliği önemli ölçüde artış göstermiştir. Marmara Bölgesi, Türkiye' nin en fazla endüstrileşmiş ve en yoğun nüfusa sahip bölgesidir. Bölge, hava kirliliği açısından, sahra taşınımları gibi doğal kirletici kaynaklarla beraber, değişik sektörlerden gelen kirletici kaynaklardan etkilenmektedir. Bu çalışmada; Marmara Bölgesi' ndeki yüksek çözünürlüklü kirletici kaynaklar tespit edilerek, bölgenin meteorolojik koşulları altında kirletici konsantrasyonları tahmin edilmiş, bölgedeki insan nüfusunun maruz kaldığı kirlilik düzeyi belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Marmara Bölgesi, hava kirliliği, CMAQ.

Air Pollution Modeling, Pollution Reduction and Exposure Analysis in Marmara Region

Abstract

Today, antropogenic air pollution has increased significantly. Marmara Region of Turkey is the most industrialized and most densely populated region. In terms of air pollution, the region is affected from different pollution sources such as natural sources like saharan dust. In this study, air pollution sources are defined at high resolution, pollution concentrations are estimated under the meteorological conditions of the region and human populations are determined exposed those concentrations.

Keywords: Marmara Region, air pollution, CMAQ.

* Alper KILIÇ, alperkilic10@yahoo.com, Tel: (505) 266 35 15.

1. Giriş

Günümüzde dünya yeni bir jeolojik çağa sahne olmaktadır. Bu çağa İnsan Çağı anlamına gelen "Antroposen" adı verilmektedir. Bu çağda, artan nüfus ile birlikte şehirleşme ve sanayileşme artmış, ormanlar ve doğal bitki örtüsü yok edilmektedir, küresel ısınmayla birlikte okyanus su sıcaklıkları artmakta, bitki ve hayvan türleri azalmaktadır.

İnsan kaynaklı emisyonlar (gaz salınımları) önemli hava kirliliğine yol açmakta, çevre ve insan sağlığı üzerinde tehlikeli boyutlarda olumsuz etkiler meydana getirmektedir. Hava kirliliği, havada katı, sıvı ve gaz şeklinde bulunan kirlenici maddelerin canlıların normal yaşamına ve çevrenin doğal dengesine zarar vermesidir. Kirlenici madde, havanın doğal bileşimini bozan ve aynı zamanda çevre ve sağlık açısından olumsuz etkileri olan kimyasal maddelerdir.

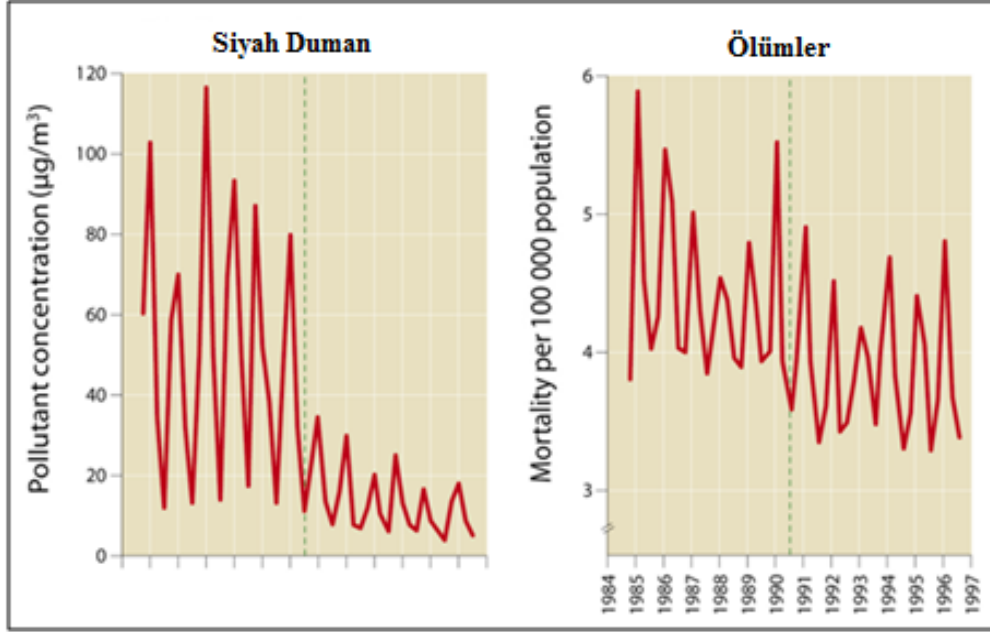
Eski zamanlarda hava kirliliğinin etkileri bilinmediğinden bir bilim olarak ele alınmamış sadece bu konuda bazı kısıtlama ve kurallar getirilmiştir. Hava kirliliği konusu eski Yunan şehirleri ve Roma dönemine kadar uzanır. Roma döneminde yakılan odunların binaları kararttığından sözedilmektedir. Diğer bir hava kirliliği kaynağı olarak, para basmak amacıyla Roma çağında Akdeniz kıyılarında bakırın eritilmesi neticesinde havadaki bakır konsantrasyonlarının artmasına sebep olmuştur. 1228 yılından itibaren İngiltere' deki demir ocakları ve kireç ocaklarında odun yerine yeni keşfedilen deniz kömürünün kullanılmasıyla ciddi hava kirliliği meydana getirmiştir.

Dünya çapındaki hava kirliliği çalışmaları, atmosferik inversiyon ve toporafik yapının etkisiyle oluşan çok yüksek Partikül Madde (PM) emisyon konsantrasyonlarının 1934'te Belçika'da Meuse Vadisinde, 1947'de ABD'de Donora'da ve 1952'de Londra'da bir aydan kısa sürede binlerce kişinin ölümüne sebep olmasıyla başlamıştır. Bunun sonucunda ilk defa Londra'da emisyon kontrolü amacıyla kömür kullanımına kısıtlamalar getirilmiştir (Jacobson, 2002). Ancak, PM ve SO₂ ile ilgili ilk köklü karar 1272 yılında Londra' da Kral Edward tarafından kömür yakılmasının yasaklanması olmuştur [1].

Hava kirlilik kaynakları; doğal ve insan kaynaklı olmak üzere iki çeşittir. Doğal kaynaklar olarak yangınlar (karbonmonoksit (CO)), volkanlar (kül, asit buharı, kükürtdioksit (SO₂), toksikler), deniz suyu (sea spray) ve bitki örtüsünün bozunması (reaktif sülfür bileşenleri), ağaçlar, çalılar vb. (uçucu organik bileşikler (VOC) (terpenler ve isoprenler), polenler, sporlar, virüsler, bakteriler (Alerji ve hava yoluyla taşınan enfeksiyonlar), kurak bölgelerdeki fırtınalar ile toz bulutları ve toz taşınımı, hayvanlar (CH₄), yıldırım (Azotoksitler (NO_x)) sayılabilir.

İnsan kaynaklı (antropojenik) kaynaklar ise genel olarak, termik santraller (SO₂), ulaşım (NO_x, CO), endüstriyel prosesler (kurşun (Pb), partikül madde (PM), NO_x, SO₂), evsel ve endüstriyel yakıt kullanımı (SO₂, PM) ve solvent kullanımı (VOC) olarak sıralanabilir. PM emisyonu kalp ve solunum rahatsızlıklarına, aynı zamanda zehirli bir gaz olan VOC türevleri solunum yolu tahrişlerine, anormal doğum ve düşükler ile kansere, azot oksitler solunum rahatsızlıkları, gen bozuklukları ve kansere, azot oksit ve VOC türevlerinin güneş ışığı etkisiyle yer seviyesinde meydana getirdiği ozon gazı solunum rahatsızlıklarına ve erken ölümlere, kükürt oksitler solunum yolu rahatsızlıkları ve alerjilere neden olmaktadır.

Dünya Sağlık Örgütü'nden (WHO) Dr. Michal Krzyzanowski, hidrokarbon emisyonu ile kalp-damar hastalıkları kaynaklı ölümler arasındaki ilişkiyi tespit etmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. HC ile kalp-damar hastalıkları kaynaklı ölümler (WHO).

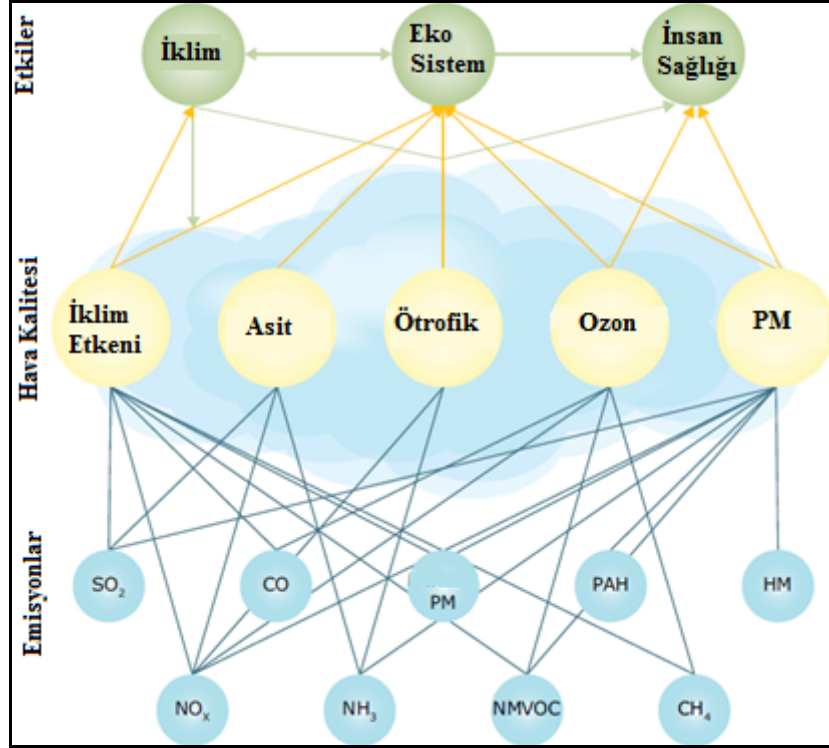
Çevre ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkileri bulunan çok çeşitli emisyonlar bulunmaktadır. Kirleticilerin sektörlere göre ayrımları Tablo 1' de gösterilmektedir.

Tablo 1. Emisyonların sektörel kaynakları [2].

	NH ₃	SO ₂	NO _x	Ağır metaller	VOC	Halojen	POP	PM	CO ₂	CO	Metan
Enerji Üretimi		*	*	*		*		*	*	*	
Çimento Üretimi		*	*					*			
Seramik Üretimi		*				*		*			
Atıkların Yakılması		*	*								*
Rafineriler		*	*		*						
Demir-Metal Üretimi		*	*	*		*	*	*			
Gübre Üretimi	*		*					*			
Taşımacılık	*	*	*	*	*		*	*	*	*	
Tarım (Çiftlik)	*							*			*

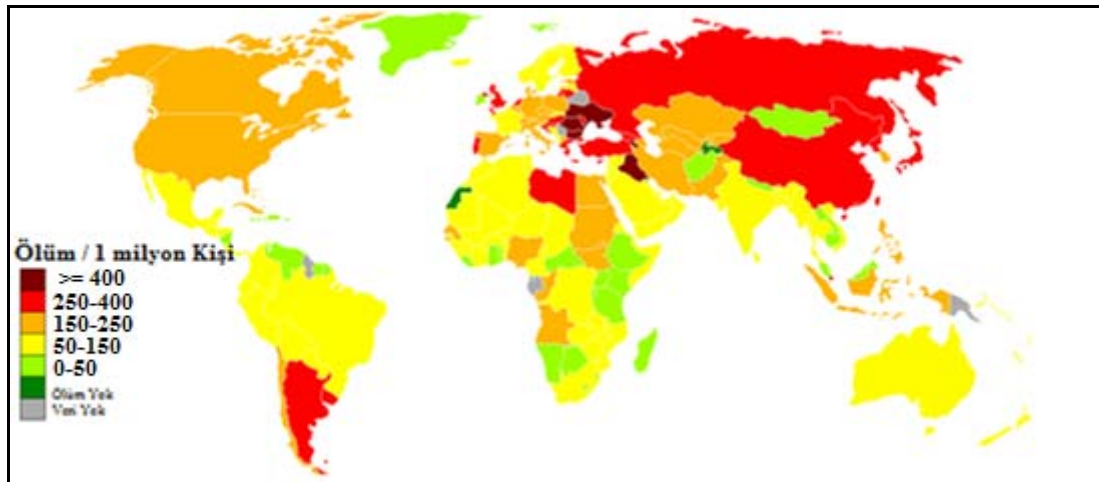
Tabloda görüldüğü üzere, taşımacılık sektörü, önemli kirleticilerden hemen hemen tamamının meydana gelmesine yol açan bir sektördür. Bütün sektörlerde emisyonların tamamı küçük miktarlarda da olsa oluşmaktadır. Ancak, her sektör tabloda işaretli olan kirleticilerin oluşumundan büyük oranda sorumludur. Taşımacılık sektöründe, az da olsa halojen ve metan emisyonları da meydana gelmektedir.

Meydana gelen emisyonlar atmosferde ikincil kirleticiler de meydana getirmekte, hava kalitesinde olumsuz etkiler meydana getirmektedir. Önemli kirletici emisyonların etkileri Şekil 2' de gösterilmektedir [3].



Şekil 2. Emisyonların etkileri [3].

Temiz hava, insanın refah seviyesi için belirlenen temel gerekliliklerden biri olmasına rağmen, hava kirliliği gelişmiş ülkelerde bile başlıca sağlık risklerindedir. Günümüzde hava kirliliği ile sağlık problemlerini ilişkilendiren önemli bilimsel kanıtlar bulunmaktadır. Hava kirliliğine bağlı ölümler Şekil 3' te gösterilmektedir.



Şekil 3. Hava kirliliğine bağlı ölümler [4].

Hava kirliliğini kontrol altına almak amacıyla dünyanın birçok ülkesinde yerel ve Dünya Sağlık Örgütü'nün (WHO) belirlediği kirletici sınır değerleri kullanılmaktadır. Türkiye, WHO' nun kabul ettiği sınır değerleri kullanmaktadır [5].

Tablo 2' de, emisyon konsantrasyonlarının Dünya Sağlık Örgütü tarafından kabul edilen sınır değerleri gösterilmiştir.

Tablo 2. Kirletici derişimlerin sınır değerleri [6].

Kirletici	Sınır Değer
PM _{2.5}	10 µg / m ³ yıllık ortalama
PM _{2.5}	25 µg / m ³ günlük ortalama
PM ₁₀	20 µg / m ³ yıllık ortalama
PM ₁₀	50 µg / m ³ günlük ortalama
Ozon	100 µg / m ³ 8 saatlik ortalama
NO ₂	40 µg / m ³ yıllık ortalama
NO ₂	200 µg / m ³ saatlik ortalama
SO ₂	20 µg / m ³ günlük ortalama
SO ₂	500 µg / m ³ 10 dakikalık ortalama

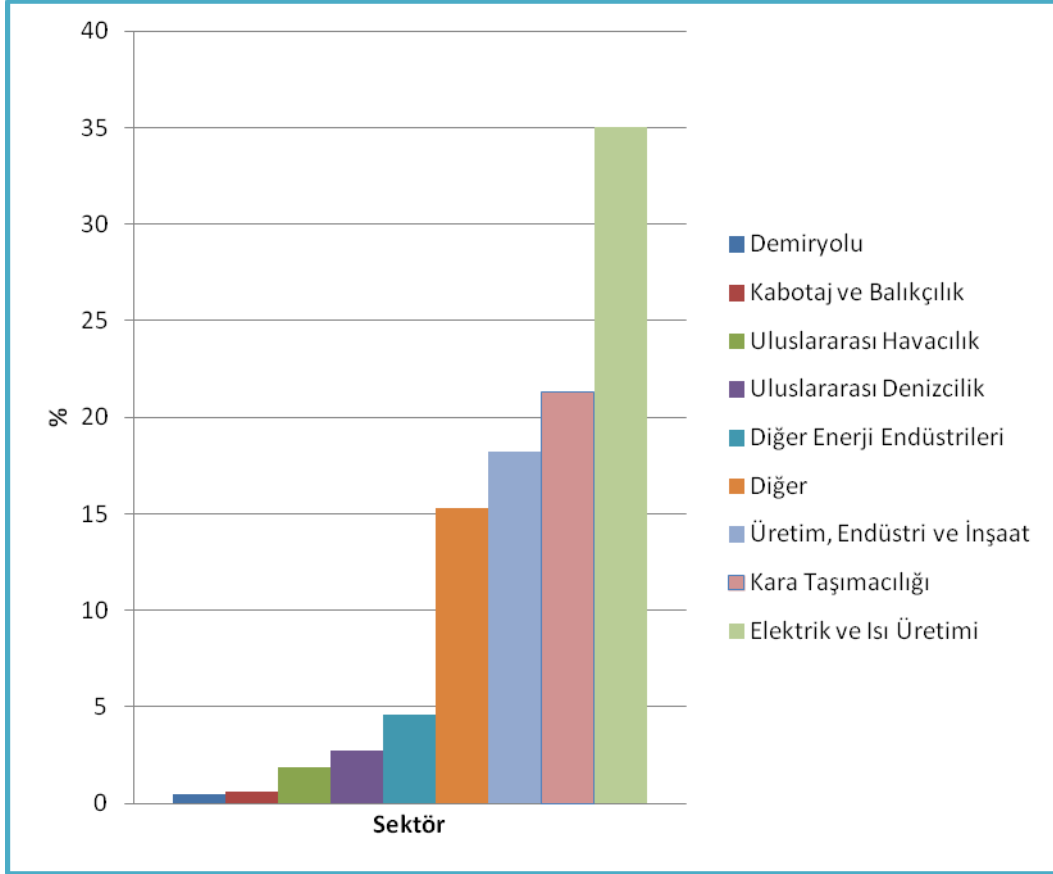
Ancak, 6 Haziran 2008 tarihinde 26898 sayılı Resmi Gazetede yayınlanan “Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi” yönetmeliği madde 3b' de yönetmeliğin Avrupa Birliği' nin 96/62/EC, 99/30/EC, 2000/69/EC, 2002/3/EC ve 2004/107/EC sayılı direktiflerine paralel olarak hazırlandığı belirtilmektedir. Tablo 3' te Türkiye için 2009–2014 yılları arasındaki geçiş dönemi için uzun vadeli hava kalitesi sınır değerleri gösterilmektedir.

Tablo 3. Geçiş dönemi uzun vadeli sınır değerler (µg / m³).

	Mevcut (1 Ocak 2009)	Hedef (1 Ocak 2014)
SO ₂	60	20
NO ₂	100	60
PM ₁₀	150	60
CO	10	10

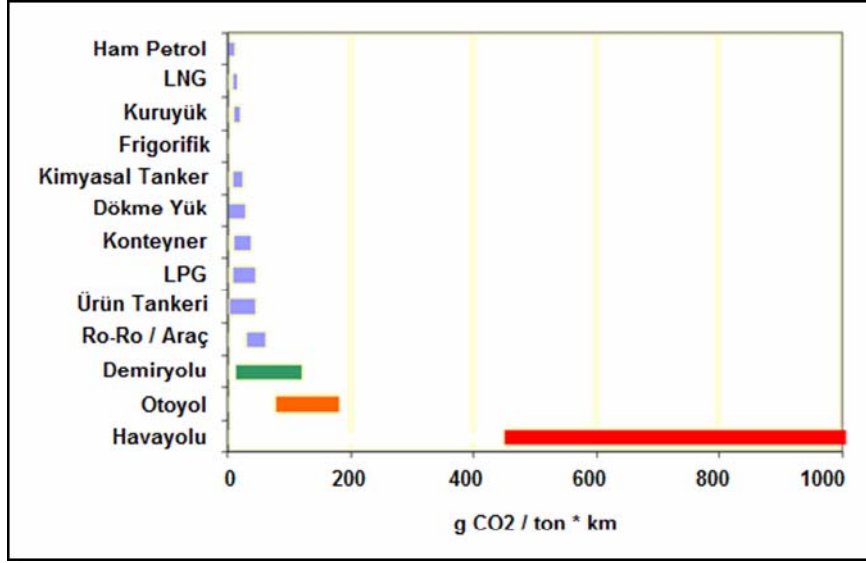
Hava kirliliği sınırlarının ihlal edildiği şehirlerde hava kirliliğine bağlı ölümler nispeten daha temiz şehirlere oranla %15–20 oranında daha fazla olmaktadır. Avrupa Birliği' nde PM_{2.5} 'e bağlı olarak yaşam süresinin normalden 8,6 ay daha kısadır. Ozon seviyesi sınırı daha önce 120 iken, bu değer altında ölümlerle ozon seviyesi arasında bağlantı tespit edildiğinden 100 değerine çekilmiştir. Birçok Avrupa kökenli çalışmalar göstermektedir ki; Ozon seviyesindeki 10 mikrogramlık artış günlük ölüm ve kalp rahatsızlıklarını sırasıyla %0,3 ve %0,4 oranında arttırmaktadır.

Çevre sorunlarının başında gelen iklim değişikliğine sebep olan insan kaynaklı GHGs, 1980' li yıllardan itibaren artış göstermiştir. Bu gazların içinde en önemlisi, küresel ısınma etkisinin %60' ından sorumlu olan CO₂' dir. CO₂ emisyonunun sektörel kaynaklarına bakıldığında, en büyük payı elektrik üretimi ve ısınma almaktadır. Şekil 4' te görüldüğü üzere, kabotaj, balıkçılık ve uluslararası denizcilik faaliyetleri sebebiyle küresel CO₂ nin %3,3' ü kadardır.



Şekil 4. Küresel CO₂ Emisyon Kaynakları [7].

Hava yolu, karayolu, demiryolu ve gemi türüne göre denizyolu taşımacılığının CO₂ verimliliği Şekil 5' te görülmektedir [7]. Buna göre; taşıma hızı arttıkça ve taşınan yük miktarı azaldıkça taşıma maliyetinin arttığı görülmektedir.



Şekil 5. Farklı taşıma modlarının CO₂ verimliliği [7].

Denizyolu taşımacılığının enerji verimliliği en yüksek enerji etkin taşıma şekli olduğu, gemi türleri arasında da, taşıma hacmi yüksek, seyir hızı düşük olan ham petrol ve dökme yük gemilerinin daha az birim maliyetle taşıma yaptıkları söylenebilir.

Türkiye’de doğal gaz kullanımına geçilmesiyle birlikte, evsel ısınma kaynaklı emisyonlarda azalma görülmüş, taşımacılık ve trafik kaynaklı emisyonlar önem kazanmıştır. Marmara Bölgesi, Türkiye'nin en fazla endüstrileşmiş ve en yoğun nüfusa sahip bölgesi olup, diğer tüm çevresel kirliliklerin yanısıra, hava kirliliği açısından sahra taşınımları gibi doğal kirlitici kaynaklarla beraber, çok farklı sektörlerden meydana gelen kirlitici kaynaklardan etkilenmektedir.

İnsan kaynaklı kirlilik oluşturan sektörlerin başında; evsel ısınma, üretim ve taşımacılık gelmektedir. Özellikle taşımacılık sektörü, gerek kara ve hava gerekse deniz taşımacılığı olmak üzere çok önemli kirlilik kaynaklarıdır. Bunlara ilave olarak, Marmara Bölgesi içinde bulunan Marmara Denizi ve Türk Boğazları, uğraklı ve uğraksız geçiş yapan ticaret gemileri ile iç sefer yapan yolcu gemilerinin oluşturduğu yoğun bir deniz trafiğine sahiptir.

Bu çalışmanın amacı; Marmara Bölgesi'ndeki kirlitici kaynaklarını yüksek çözünürlüklü olarak belirlemek, bölgenin meteorolojik koşulları altında oluşacak kirlitici konsantrasyonlarını tahmin etmek ve bölgedeki insan nüfusunun maruz kaldığı emisyonları belirleyerek, kirlitici kaynaklardaki azaltımların bu maruziyet miktarlarına etkilerini araştırmaktır. Böylece etkin azaltım yöntemleri tespit edilebilecektir.

2. Marmara Bölgesi ve Hava Kirliliği

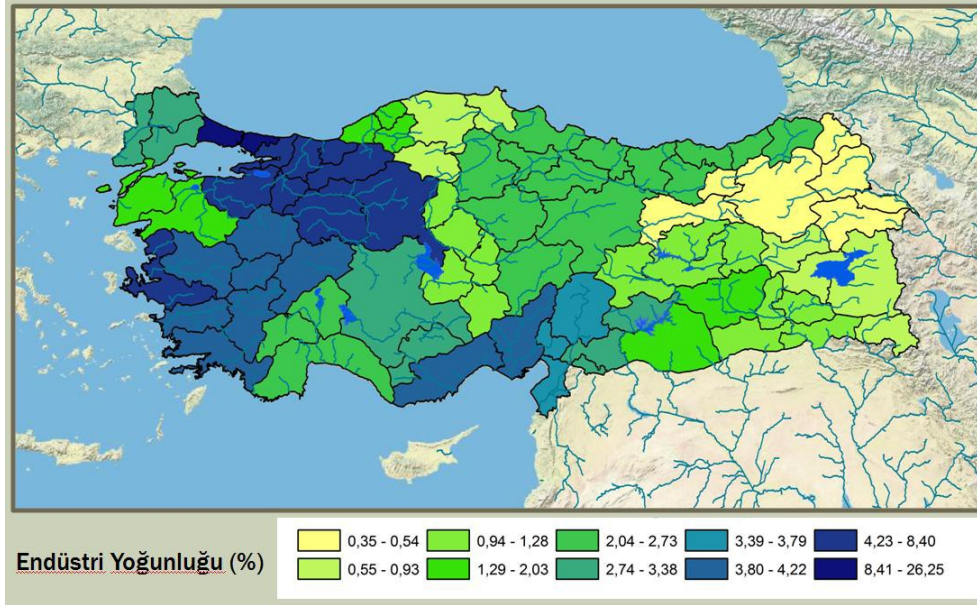
Hava kirliliği, havanın normal bileşiminin bozulmasıdır. Havanın normal bileşimindeki element veya bileşiklerin fazlalığı veya eksikliği hava kirliliği olarak tanımlanmaktadır. Tablo 4' te, havanın normal bileşimi görülmektedir.

Tablo 4. Havanın normal bileşimi [2].

Kimyasal	Konsantrasyon (ppm)	Kimyasal	Konsantrasyon (ppm)
Azot	780.900,00	Metan	2,30
Oksijen	209.400,00	Kripton	0,50
Argon	9.300,00	Hidrojen	0,50
Karbon dioksit	315,00	Xenon	0,08
Neon	18,00	Azot dioksit	0,02
Helyum	5,20	Ozon	0,01 - 0,04

Türkiye'nin kıyı şeridi 8,333 km olup, sanayi sektörünün %70'i kıyı şeridinde yer almaktadır [8]. Marmara Bölgesi, Türkiye'nin en gelişmiş bölgesidir; sanayi, ticaret, turizm ve tarım sektörleri diğer bölgelere oranla önemli yer tutmaktadır. Enerji tüketimi en yüksek olan bölgedir.

Türkiye'nin sanayide tüketilen elektrik enerjisi miktarı 2008 yılı için toplam tüketimin % 46' sını oluştururken; Bilecik, Kocaeli, Tekirdağ ve Çanakkale' de bu oranlar %80' ler düzeyindedir [9]. Türkiye'nin toplam elektrik enerjisinin %39' u, toplam sanayi elektrik enerjisinin ise %43' ü bu bölgede tüketilmektedir. Şekil 6' da, Türkiye'nin endüstri yoğunluğu görülmektedir.



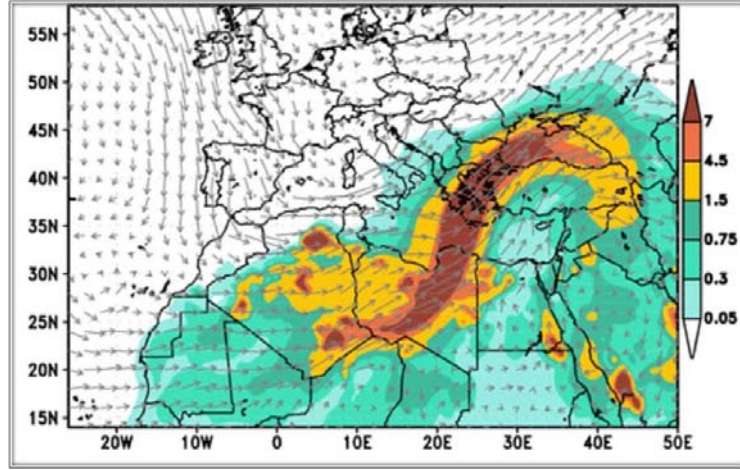
Şekil 6. Türkiye endüstri yoğunluğu [9].

İstanbul, Asya ve Avrupa kıtalarını bağlayan karayolları üzerinde bulunan, yüksek nüfus yoğunluğuna ve uluslararası hava ve deniz trafiğine sahip büyük bir kenttir. Türkiye'deki endüstriyel istihdamın %20' sine ve yine endüstri tesislerinin %38' ine sahiptir [10]. Türkiye'deki toplam istihdamın yaklaşık 1/3' ü ve sanayi istihdamının ise yarısı bu bölgededir.

İstanbul'daki PM₁₀ emisyon konsantrasyonuna Avrupa'dan gelen taşınımların etkisini inceledikleri çalışmada, Avrupa'daki emisyon değerlerinin %50 azaltılması durumunda,

İstanbul' daki PM₁₀ konsantrasyonunun %26 azaldığı, dolayısıyla, İstanbul' daki PM₁₀ konsantrasyonunun yarısının Avrupa kaynaklı olduğu sonucuna varılmıştır [11].

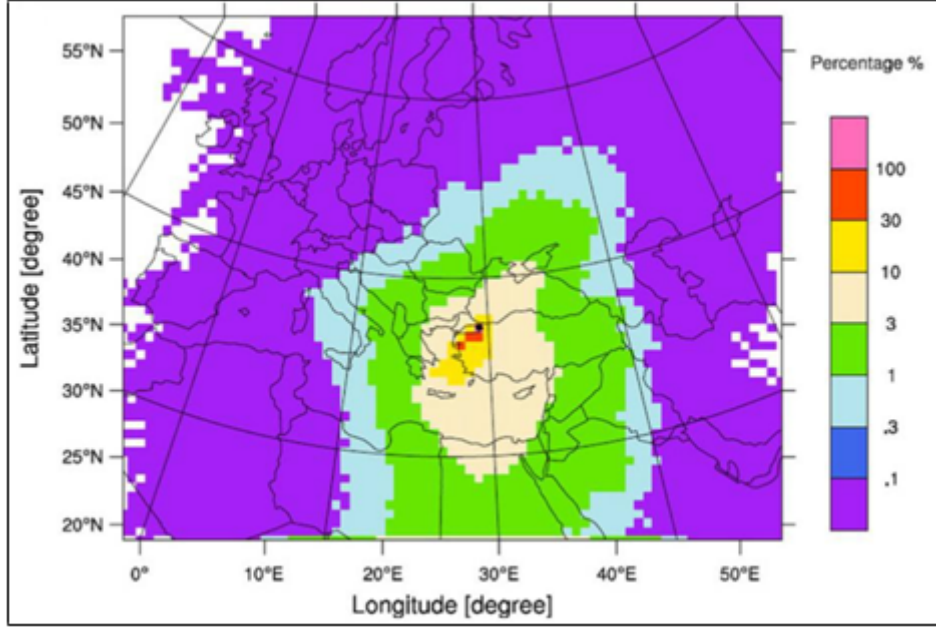
Doğal ve insan kaynaklı kirleticilerin bölgeler arası taşınımları, bu bölgelerdeki kirlilik kaynakları kadar önemlidir [12]. Marmara Bölgesi, meteorolojik olarak bir geçiş bölgesi özelliği göstermektedir ve hakim rüzgar yönü kuzeyli rüzgarlardır. Şekil 7' de görüldüğü üzere, zaman zaman esen Lodos (Güneybatı), sahra çöllerindeki kumların çok yoğun bir şekilde Marmara Denizi ve Türk Boğazları' na ulaşmasına sebep olmaktadır.



Şekil 7. Marmara Bölgesi' ne sahra taşınımı [13].

Marmara Bölgesi' nin yoğun nüfus yapısı, endüstrileşme, yoğun kara, hava ve deniz trafiğine ek olarak sahradan da taşınan kumlar neticesinde özellikle PM emisyonunun zararlı etkilerine maruz kaldığı görülmektedir.

Emisyon kaynakları ve meteorolojik şartların, İstanbul' da meydana gelen PM₁₀ konsantrasyonu üzerindeki etkileri incelendiğinde, PM₁₀ konsantrasyonunun endüstriyel alanlarda ve araç trafiğinin yoğun olduğu bölgelerde EC hava kalitesi sınır değerlerini aştığı, zamansal dağılım açısından da, kış aylarında yüksek, yaz aylarında düşük miktarlarda konsantrasyonların oluştuğu tespit edilmiştir [14]. İstanbul' da meydana gelen kirlilik, atmosferik taşınımlarla Doğu Akdeniz' e ihraç edilmektedir [12]. Şekil 8' de, İstanbul' da meydana gelen hava kirliliğinin taşınımı görülmektedir.

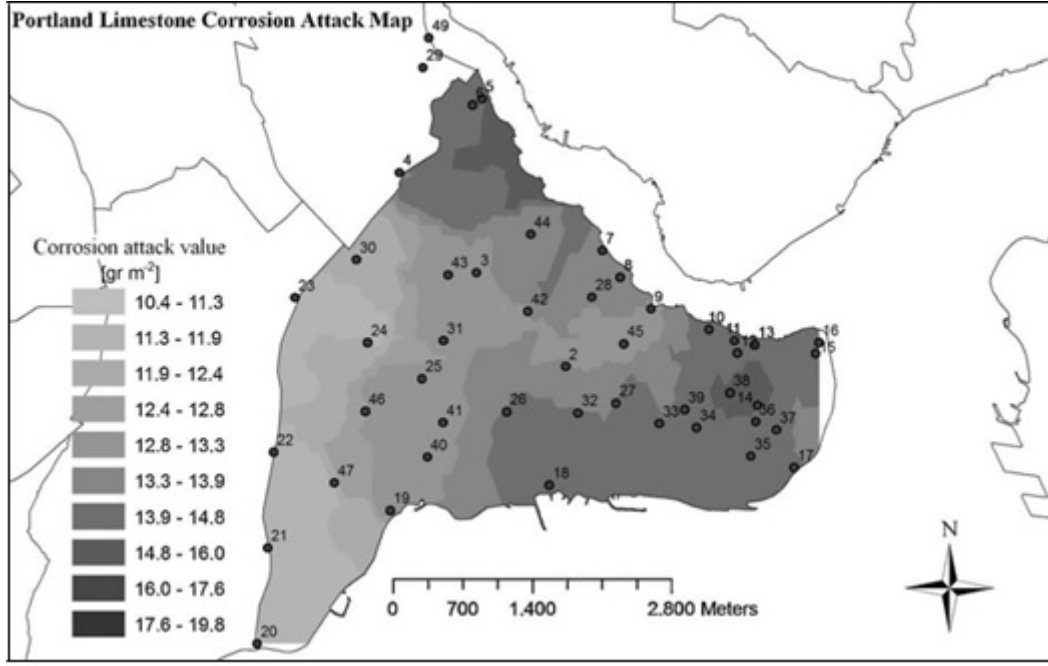


Şekil 8. İstanbul' daki hava kirliliğinin taşınımı [12].

Çan-Bayramiç bölgesinde 2007–2008 yılları arasındaki SO_2 ve NO_2 emisyonlarının hava kalitesine etkileri Calpuff modeli ile incelenmiş ve model sonuçlarının doğrulaması da bölgedeki 10 adet hava kalitesi istasyonu verileri kullanarak yapılmıştır [15].

Hava kirliliğinin önemli etkilerinden bir tanesi de, kültürel miras olan tarihi eserler üzerinde yaptığı korozyon ve tahribattır. SO_2 , NO_x , PM ve O_3 kirleticilerin aşındırıcı etkileri bilinmektedir. İstanbul' daki tarihi yarımada bulunan 50 adet hava kalitesi izleme istasyonu verileri kullanılarak kireçtaşı, çelik, bakır ve bronz malzemeler üzerindeki aşınma miktarı tahmin edilmiştir [16]. Şekil 9' da, hava kirliliğinin İstanbul' daki tarihi yarımada üzerinde meydana gelen tahribat gösterilmektedir.

En önemli kirliliğin tarihi yarımadaının ucunda ve Atatürk (Unkapanı) Köprüsü civarında meydana geldiği tespit edilmiştir.



Şekil 9. Hava kirliliğinin İstanbul' daki kültürel miras üzerindeki etkileri [16].

3. Hava Kirliliğini Azaltma Yöntemleri

Kirletici emisyonlar türlerine göre farklı şekillerde oluşmaktadır ve oluşan bu emisyonları oluşumlarından önce veya oluşumlarından sonra azaltmak için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Emisyonların azaltılması için en önemli yöntem, miktarı sonsuz kabul edilen yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanmaktır. En önemli yenilenebilir enerji kaynakları olarak, güneş enerjisi, jeotermal enerji, hidroelektrik enerjisi, rüzgâr enerjisi, dalga enerjisi, biyokütle kullanılması gibi tabiatın sunmakta olduğu enerjiler sayılabilir. Bu tür doğal enerjilerin kullanımı ve yaygınlaşması, başta küresel ısınmaya yol açan CO₂ olmak üzere, birçok zararlı emisyonların salınımını azaltmaktadır.

Hava kirliliğini önlemenin bir diğer yolu da, enerji tasarrufu yapmaktır. Özellikle ısı süreçlerinde yeni bir uygulama olarak kojenerasyon uygulamaları gelmektedir. Endüstri sektöründe kojenerasyon uygulamaları yapılarak 2020 yılına kadar %11 oranında enerji tasarrufu sağlanabilecektir [17].

Denizcilik sektörü açısından, sadece gemiler değil, limanda kullanılan ekipmanlar ve enerji kullanımları da önemli emisyon kaynaklarıdır. Limanlarda kullanılan ekipmanların tür ve sayıları ile operasyonlarının optimizasyonu önemli ölçüde enerji kullanımı ve enerji tüketimini düşürmektedir [18].

Gemilerden kaynaklanan emisyonları azaltmak için her gemi ve emisyon türü için çok çeşitli yöntemler vardır. Meydana gelen emisyonların miktarları, özellikle CO₂ emisyon miktarı doğrudan yakıt tüketimine de bağlı olduğundan, gemilerde yakıt ekonomisi sağlamak için, geminin tekne tasarımı, makine tasarımı, pervane sistemi, diğer teknolojik tasarımlar ile gemi işletim yöntemlerinde iyileştirmeler yapılmalıdır [19].

Gemi dizel motorlarında meydana gelen emisyonları azaltmak için farklı yöntemler bulunmaktadır. Bunlar; motor optimizasyonu, motor modifikasyonları, egzoz gazlarının arıtılması, alternatif yakıtların kullanılması, limanlarda uygulanan emisyon azaltma yöntemleri, gemilerin verimli işletilmesi ve piyasa mekanizmalarının kullanılması gibi yöntemlerdir.

Dizel motorlarının silindir içi parametrelerin kontrol edilerek emisyon azaltılması ve yakıt ekonomisinin iyileştirilmesi, yanma odası geometrisinin optimizasyonu, yanma süresinin optimizasyonu, yakıt püskürtme sistemlerindeki gelişimler, yanma işlemine su, üre, amonyak (NH₃) eklenmesi, yanma odasına yüksek basınçlı su püskürtülmesi, düşük kükürt oranlı yakıtların egzoz gazlarının tekrar sirküle edilerek tekrar yanmaya katılması ve yıkama sistemlerinin kullanılmasıyla NO_x emisyonlarının azaltılması, yanma odası veya yanma odasından hemen sonra egzoz gazına üre veya NH₃ enjekte edilmesi, oksitleme reaktörleri ile eksik yanma ürünü olan CO ve HC gazlarını yeniden yakarak CO₂ ve H₂O moleküllerine çevrilmesi alternatif yakıt kullanımları olarak sayılabilir.

Alternatif yakıt olarak LPG, LNG, CNG, metanol, etanol ve hidrojen kullanılabilir. İstanbul'da kullanılan doğal gazın kükürt oranı 110 mg / m³ tür. 20 °C ve 100 kPa' da gaz yoğunluğu 0.71 kg / m³ olduğundan, ağırlıkça kükürt oranı % 0,0155 olmaktadır. Dolayısıyla günümüz gemi yakıtlarının ortalama kükürt oranı %2,7 ile kıyaslandığında gemi yakıtlarının % 0,6' sı kadar kükürt ihtiva etmektedir. Otomobil motorlarında doğal gaz kullanımıyla NO_x' ta %80, CO' da %76, benzende %97, ozona zarar veren hidrokarbonlarda %90, PM' de %99 azalma görülmektedir [20].

Dizel motorlarında 5 farklı biyodizel yakıtı motorun farklı devir sayısı ve yükünde denemesi ile motor performansı ve meydana gelen emisyonlar konusunda yapay sinir ağları modeli kullanılarak yapılan çalışmada; farklı biyodizel karışımların performans ve emisyon çıktıları tahmin edilmeye çalışılmıştır. Ancak, silindir içindeki karmaşık yanma süreçlerine göre oluşan CO, NO_x ve UHC emisyonu miktarı için modelin yüksek seviyede hata verdiği tespit edilmiştir [21].

Biyodizel uygulamalarında, yakıt içeriğine düşük konsantrasyonlarda kayısı tohumunun çekirdeğindeki yağdan elde edilen metil esterinin katılmasıyla motor performansı ve egzoz emisyonlarında iyileşme görüldüğü belirtilmektedir [22]. 4 zamanlı bir dizel motorunda, dizel yakıtta %15' e varan oranlarda metanol karıştırılarak yapılan deneyde; B_{sf}c, NO_x ve CO₂ emisyonları BTE ile birlikte artarken, duman opaklığı (smoke opacity), UHC ve CO emisyonlarının azaldığı belirlenmiştir [23]. Ancak, başka bir çalışmada, metanol ve etanol kullanımına nazaran, bütanolün üstün yakıt özelliği sayesinde kullanımının daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir [24].

Sadece yakıt türü ve içeriği değil, makinenin yanma parametrelerini değiştirecek herhangi bir etki de makinelerin emisyon faktörlerini değiştirebilir. Motor silindirindeki yakıt püskürtme zamanlamasını değiştirdiklerinde NO_x ve CO₂ emisyonlarının arttığını, buna karşın HC ve CO emisyonlarının azaldığı belirtilmektedir [25].

Denizcilik sektöründe emisyonların kontrolü için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması, sahil elektrik bağlantısı yapılması, gemi formlarının optimize edilmesi, geminin toplam enerji ekonomisinin iyileştirilmesi, CO₂ indeksi ile gemilerin performanslarının ölçülmesi, filo yönetiminin daha etkin kullanımıyla gereksiz gemi

hareketlerinin önlenmesi, gemi yakıtlarının vergilerinin arttırılması, emisyon ticareti uygulamalarına geçilmesi, limanlarda CO₂ bazlı ücret alınması, soğutucu gaz kaçaklarına denetim ve yaptırımların getirilmesi, HC ve NO_x'un da küresel ısınmaya sebep olan gazlar sınıfına sokulması gibi konular üzerinde halen tartışılmaktadır.

Küresel ısınma ve iklim değişikliğine sebep olan CO₂ emisyonu için ise, uzun ve kısa dönemde olmak üzere, teknik, operasyonel ve piyasa mekanizmaları tabanlı bir takım azaltma mekanizmaları önerilmektedir.

Limanlarda gemi kaynaklı emisyonları azaltmak için cold ironing metot (gemilere limandayken sahilinden elektrik verilmesi) ve cloud chamber scrubbing (gemi bacalarından egzozun alınarak sahile verilmesi) yöntemleri mevcuttur.

Tekne tasarımı konusunda gemi boyutlarında iyileştirmeler yapmak (gemi boyutu arttıkça birim emisyon düşmektedir), düşük balastlı seyire uygun gemi inşa etmek, boş tekne ağırlığını (lightweight) düşürmek, optimum gemi ölçülerinde gemi tasarlamak (gemi boyunun uzaması yakıt tüketimini düşürür), teknenin su altındaki açıklıkları (bow thruster ve kinistin sandıkları gibi) türbülans yapmayacak şekilde tasarlamak gibi yöntemler önerilmektedir. Gemi tasarımı, pervane, makine, operasyon ve yakıt olarak ana hatlarıyla sınıflandırılan yöntemlerin kullanılmasıyla %80 NO_x, %90 PM, %70 SO_x, %70 CO₂ azaltımı mümkündür [26].

Önerilen diğer teknolojilerden bazıları ise değişken hızda çalışan elektrik motorları kullanımı, güneş ve rüzgar enerjisinin gemilere uyarlanmalarıdır. Gemilerin işletimiyle ilgili olarak optimum seyir planlaması yapmak, teknenin su altı temizliğini yaptırmak, yakıt katkıları kullanmak, optimum trimde seyir yapmak gibi yöntemler bulunmaktadır [19].

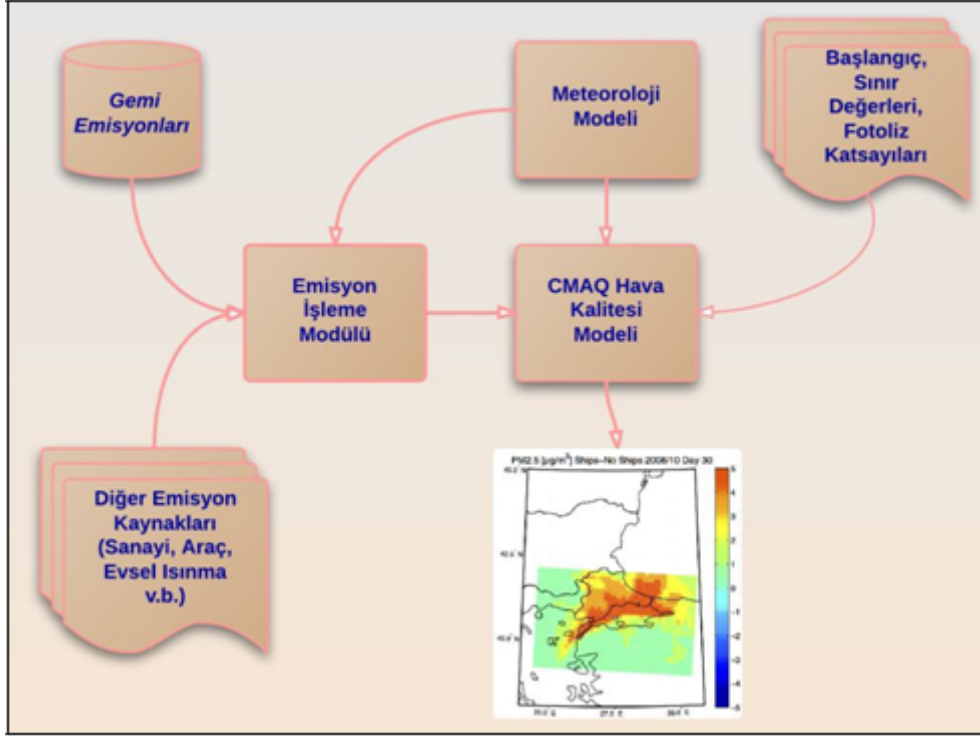
2020 yılı gemi emisyonları miktarına göre yapılan çalışmada, Avrupa için SO₂ ve NO_x emisyonlarını azaltma yöntemlerinin maliyetleri ile bu yöntemlerin uygulanması ile meydana gelen fayda karşılaştırılmıştır. Buna göre, çevresel faydası en yüksek yöntem olan SCR yöntemi ile birlikte kükürt oranının % 0.5' e düşürülmesi öngörülmesine karşılık, fayda-maliyet oranı en yüksek yöntem ise motorlarda Humid Air Motor (HAM) yönteminin uygulanması olarak görülmektedir [27].

Yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemli türlerinden biri olarak görülen biyokütle enerji kaynakları; kaynağa yönelik üretim ve çevrim teknolojilerinin iyi bilinmesi, her ölçekte enerji verimi için uygun olması, çevre ile dost olması, sürdürülebilir enerji üretimini ve çevre yönetimini sağlaması ve kalkınmayı hedefleyen özellikleri ile tüm dünyada geniş bir uygulama alanı bulmuştur [28].

4. Hava Kalitesinin Modellenmesi ve Maruziyet Analizleri

Hava kalitesi modelleri ile farklı kaynakların hava kalitesine etkileri ve hava kalitesiyle ilgili senaryolar oluşturulabilir. Sadece belli noktalardan hava kalitesi ölçümleri ile bu gerçekleştirilemez. Dahası, ölçümler tek bir noktanın değerlerini belirttiğinden, ölçüm noktasının seçimi de çok önemlidir.

Ancak, atmosferde meydana gelen olayların karmaşıklığını temsil edecek hava kalitesi modelleri de fiziksel ve kimyasal olarak hayli karmaşıktır. Hava kalitesi modelleri küresel (global), bölgesel (mezoscale) ve yerel (local) ölçeklerde yapılmaktadır. Hava kalitesi modelleri, uygulandıkları alanların merkezinde daha iyi çözümler sunarken, sınır noktalarında hata payları artmaktadır. Sınır noktaları, karasal etkilerden kaçınabilmek için daha çok denizler üzerinde seçilmektedir. Şekil 10' da, yeni oluşturulan gemi emisyonu envanterinin hava kalitesi modelinde değerlendirilmesi aşamaları gösterilmektedir.

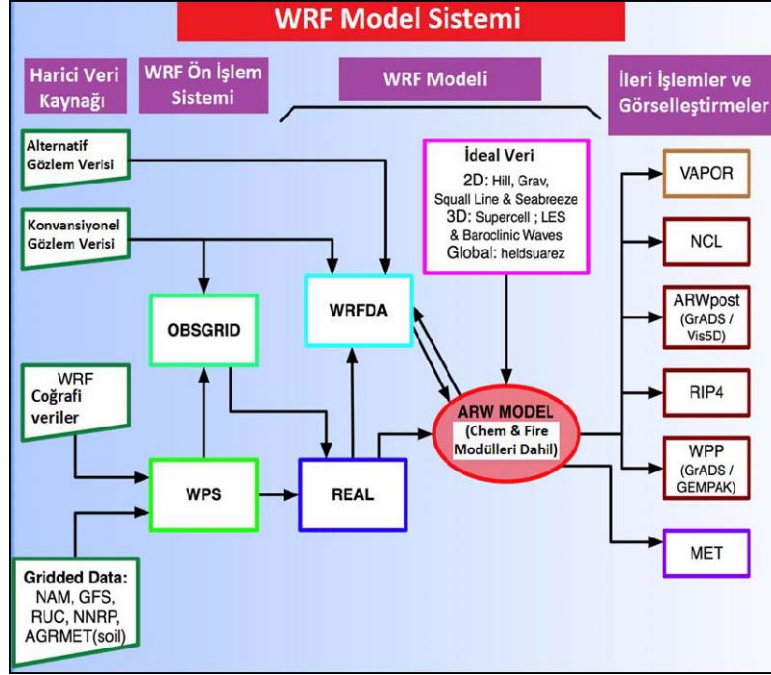


Şekil 10. Emisyonların hava kalitesi modelinde değerlendirilmesi [29].

Hava kalitesi çalışmalarının düzlemdeki çözünürlüğü çok önemlidir. Çözünürlük arttıkça bilgisayarların yapması gereken işlemler artmaktadır. Avrupa kıtasını içine alan bölgede (domain) çözünürlük 30 km x 30 km, Balkanlarda 10 km x 10 km iken, İstanbul için çözünürlük 2 km x 2 km' ye düşmektedir. Dış domain' deki model sonuçları, iç domain' lerde girdi olarak kullanılmaktadır. Bölgesel (mezoscale) modellerin sınır değerleri için ise uydu verileri veya küresel modellerin çıktıları kullanılmaktadır. Çözünürlüğün 1 km x 1 km' nin altına düştüğü durumlarda atmosferdeki rassal (random) olayların varlığı nedeniyle, hatalar büyümekte, bu hatalar da katlanarak artmaktadır.

Marmara Denizi ve Türk Boğazları' nı içine alan bölgedeki yıllık ticari gemi emisyonlarının hava kalitesine etkilerini görmek amacıyla Community Multiscale Air Quality (CMAQ) modeli kullanılmıştır. Hava kirliliği simülasyon modelleri çevre politikaları, kuralları ve araştırmaları için kullanılan önemli araçlardır. Hem çevresel hem de kontrol maliyetlerini en uygun seviyede belirleyebilmek için hava kirliliği kontrol yöntemlerini kullanmak gereklidir.

Meteoroloji modeli olarak seçilen The Weather Research and Forecasting (WRF), yeni nesil bölgesel ölçekli hava tahmin sistemi olup hava tahmin ve atmosfer araştırmalarının ihtiyaçlarına hizmet etmektedir. WRF, metreden binlerce kilometreye kadar olan geniş bir spektrumdaki uygulamalar için uygun bir modeldir. Çoklu dinamik yapıdaki 3 boyutlu değişken değer asimilasyon sistemi (3DVAR) ve paralel hesaplama izin veren yazılım mimarisine sahiptir. Şekil 11' de, WRF modelinin yapısı gösterilmektedir.



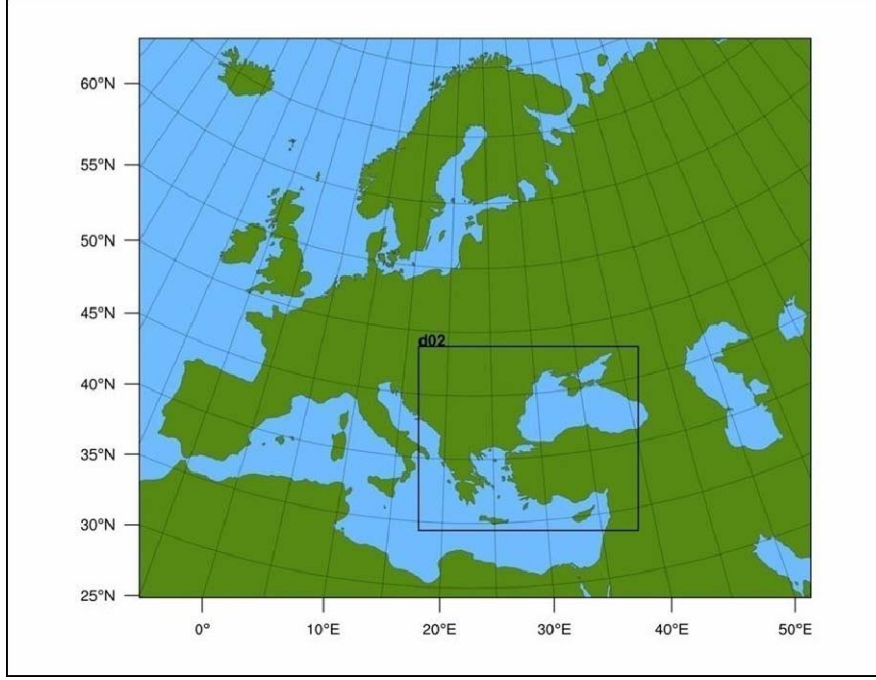
Şekil 11. WRF model sistemi [30].

WRF modelinin geliştirilmesinde National Center for Atmospheric Research (NCAR), the National Oceanic and Atmospheric Administration (the National Centers for Environmental Prediction (NCEP), the Forecast Systems Laboratory (FSL), the Air Force Weather Agency (AFWA), the Naval Research Laboratory, Oklahoma Üniversitesi ve Federal Aviation Administration (FAA) kuruluşları etkin rol almaktadır.

WRF modeli, gerçek veri veya ideal durumlar için simülasyonlar yapılmasına izin vermektedir. WRF ileri derecede fiziksel, numeric (sayısal) ve araştırma kuruluşları tarafından karşılanan veri asimilasyonları sunmakta, verimli ve esnek bir hesaplama ve tahmin sağlamaktadır.

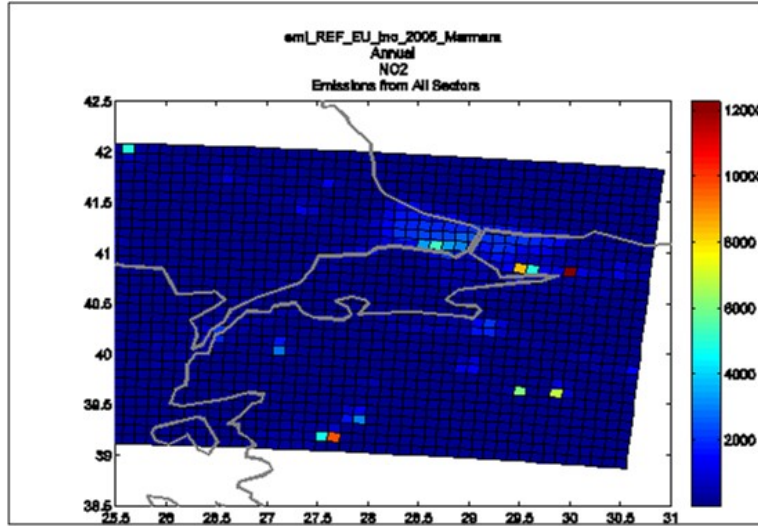
CMAQ, hava kalitesi modellemelerinde troposferik ozon, asit birimi, görünürlük ve hava kirletici maddelerin konsantrasyonları için kullanılan güçlü bir model sistemidir. Model, 1990' lı yılların başından itibaren EPA' nın Atmosfer Modelleme ve Analiz Bölümünün liderliğinde North Carolina' daki National Exposure Research Laboratory (NERL)' de geliştirilmektedir [31].

Avrupa için kullanılan domain sistemi Şekil 12' de gösterilmektedir. Referans domain 30 x 30 km' lik gridler halinde olup, 190 x 158 adettir. D02 domaini ise, 10 x 10 km çözünürlükte olup, 186 x 156 hücreden oluşmaktadır.

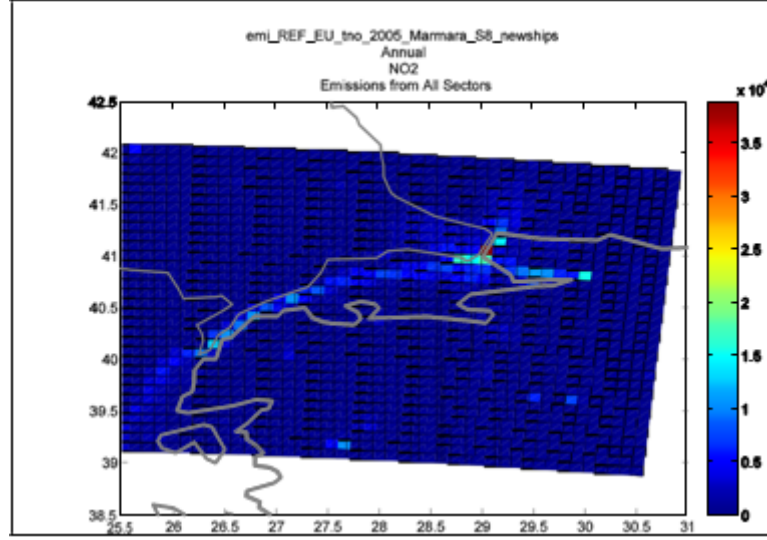


Şekil 12. Modeller için kullanılan domain sistemi [29].

Meteoroloji modelinin sonuçları elde edildikten sonra, TNO domain yapısı içine AIS verilerini yerleştirebilmek için TNO (10x10 km) ve çalışma bölgesi için oluşturulan domain yapıları kullanılarak intersection işlemi yapılmıştır. Bu işlemde, birbiriyile örtüşmeyen farklı iki domain arasındaki alansal ilişki kullanılarak, bir domain içindeki her bir gride ait emisyonlar diğer domainin gridlerine aktarılmaktadır. TNO' nun tüm sektörler için öngördüğü NO₂ emisyonu toplamı Şekil 13' te gösterilmiştir. Ancak, gemi kaynaklı NO_x emisyonu olması gerektiği kadar dikkat çekici değildir.

Şekil 13. TNO yıllık NO_x emisyonu [29].

Ancak, TNO' nun tüm sektörlerinden yine TNO' ya ait gemi kaynaklı emisyonlar çıkarıldıktan ve yeni AIS verileri yerleştirildikten sonra meydana gelen toplam emisyonlar Şekil 14' te görülmektedir.



Şekil 14. TNO ve AIS NO₂ emisyonu toplamı [29].

Marmara Bölgesi ve Türk Boğazları' nın Emission Control Area (ECA) ilan edilmesi durumunda meydana gelecek PM_{2.5} konsantrasyon farkı ve nüfus yoğunluğu dikkate alındığında, özellikle İstanbul' da, PM_{2.5} kaynaklı kardiyovasküler ve akciğer kanserine bağlı ölümlerde azalmalar meydana geleceği görülmektedir. Gemilerdeki kükürt oranlarının ECA' nın öngördüğü kükürt oranına düşürülmesinin sağlığa etkilerinin belirlenebilmesi için, Anenberg ve arkadaşlarının 2010 ve 2012' de yaptıkları çalışmalar kullanılmıştır [32,33].

6. Sonuçlar ve Genel Değerlendirmeler

Bu çalışmada hava kirliliği ile ilgili çalışmalar gözden geçirilmiştir. Özellikle hava kirliliği ile ilgili çalışmalarda önemli bir yer tutan envanter çalışmalarının bu bölge için yetersiz olduğu tespit edilmiş, denizcilik ve havacılık sektörü ile ilgili detaylı bir envanter çalışması gerçekleştirilmiştir.

Marmara Denizi ve Türk Boğazları' nı içine alan bölgede yıllık emisyonlar hesaplanmış ve hava kirliliğine etkileri değerlendirilmiştir. Çalışmada, sadece AIS cihazı bulunan

300 grt (Groston) ve üzeri gemilerden gelen veriler kullanılmıştır. AIS sistemi hakkında detaylı bilgilere de çalışmada yer verilmiştir.

Gemi kaynaklı emisyonlarla ilgili daha önce yapılmış olan uluslararası kabul görmüş küresel, bölgesel, yerel ölçekli envanter çalışmalarındaki yöntemler ve sonuçlar incelenmiştir. Bölgesel ölçekli envanter çalışmalarının günümüzde AIS verileri kullanılarak yapılmakta olduğu, daha önceki yöntemlere göre yapılmış çalışmalara göre, oldukça yüksek çözünürlükte ve gerçeğe daha yakın sonuçlar verdiği, yeni yöntemle yapılan çalışmaların sonuçlarının, top-down yöntemi veya diğer basit kabullenmelere göre yapılan çalışmalardan önemli ölçüde farklı olduğu görülmüştür. Aynı zamanda bu çalışmalar, gemi emisyonlarının, daha önceki yöntemlere göre, çok daha önemli miktarlara ulaşmakta olduğunu da göstermektedir.

Hava kirliliğini azaltmak için tek bir yöntem bulunmamaktadır. Kükürt emisyonunu kontrol edebilmek için yakıt içeriğindeki kükürt oranlarının sınırlandırılabilmesi için gerekli yasal zorunluluklar üzerinde durulmuştur.

Marmara Bölgesi' nin coğrafi özellikleri ve denizcilik faaliyetleri araştırılarak, bölgedeki endüstrileşme ile birlikte önemli bir yer tutan gemi trafiğinin bölgedeki yoğun nüfus üzerindeki muhtemel etkileri işaret edilmiştir.

Gemi trafiği ile ilgili anlık veriler değerlendirilerek, gemi türüne, bölgelere, zamana ve oluştukları yere göre, önemli kirletici türlerinin yıllık toplamları yüksek çözünürlükte hesaplanmıştır. Gemi trafik yoğunluğu tespit edilerek, yapılan envanter çalışması sonuçları da, farklı yöntemlerle doğrulanmıştır. Gemi emisyonları, Marmara Bölgesi için özellikle NO_x ve SO₂ emisyonları açısından ciddi bir kaynak oluşturmaktadır. Bunlara bağlı olarak partikül madde konsantrasyonları çalışılan dönem için %50'ye varan artışlara sebep olmuştur.

Hava kalitesi modeli sonuçları, bölgedeki ölçüm istasyonlarının sonuçları ile karşılaştırıldığında, AIS verilerine göre elde edilen gemi emisyonlarının, literatürdeki mevcut emisyon verilerinden daha doğru sonuçlar verdiği görülmüştür. Ayrıca, kükürt oranlarına göre yapılan hassasiyet analizlerine göre, kükürt oranlarının ECA sınırlarına çekilmesi durumunda kirletici konsantrasyonlarının ciddi şekilde azalacağı tespit edilmiştir.

Gemi emisyonları yüzünden Marmara Bölgesi' ndeki ölüm oranlarında ciddi bir artış (yılda 4500 kişi) olmuştur. Bu sebeple, Marmara Bölgesi' nin Emisyon Kontrol Alanı (ECA) ilan edilmesi yerinde olmakla birlikte, bu sayede kazanılacak yararlar konunun aciliyetini gündeme taşımaktadır.

Çalışmanın amacı, doğal ve insan kaynaklı tüm emisyon kaynaklarının Marmara Bölgesi ve civarındaki etkilerinin belirlenmesi olmasına rağmen, deniz taşımacılığı kaynaklı hava kirliliğinin diğer sektörlerden çok daha önemli olduğu görülmüştür.

Kaynaklar

- [1]. Jakobson, M. Z., Atmospheric pollution, history, science and regulation, Cambridge University Press, (2002).
- [2]. Kılıç, A., Gemilerden kaynaklanan egzoz emisyonları ve dağılım modellemesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul (2006).
- [3]. European Environment Agency (EEA), Air quality in Europe, Report No: 4/2012, (2012).
- [4]. World Health Organization (WHO), Air Quality Guidelines Global Update 2005, World Health Organization, ISBN 92 890 2192 6, (2006).
- [5]. Bayram, H., Dörtbudak, Z., Fişekçi, F. E., Kargin, M. ve Bülbül, B., Hava kirliliğinin insan sağlığına etkileri, dünyada, ülkemizde ve bölgemizde hava kirliliği sorunu, **Dicle Tıp Dergisi**, 33(2), 105-112, (2006).
- [6]. World Health Organization (WHO), Air quality and health, Fact Sheet No: 313, (2008).
- [7]. Buhaug, Ø., Corbett, J.J., Endresen, Ø., Eyring, V., Faber, J., Hanayama, S., Lee, D.S., Lee, D., Lindstad, H., Markowska, A.Z., Mjelde, A., Nelissen, D., Nilsen, J.,

- Palsson, C., Winebrake, J.J., Wu, W.Q., and Yoshida, K., Second IMO GHG study, International Maritime Organization (IMO) London, UK, (2009).
- [8]. Şahin, M., İklim değişikliği ve Türkiye, Çevre ve Orman Bakanlığı, Ankara, (2008).
- [9]. TÜİK, 2010.
- [10]. <http://www.ito.org.tr>, (24.03.2011).
- [11]. Kindap, T., Unal, A., Chen, S. H., Hu, Y., Odman, M. T., and Karaca, M., Long- range aerosol transport from Europe to Istanbul, Turkey, **Atmospheric Environment**, 40(19), 3536-3547, (2006).
- [12]. Kanakidou, M., Mihalopoulos, N., Kindap, T., Im, U., Vrekoussis, M., Gerasopoulos, E., Dermizaki, E., Unal, A., Koçak, M., Markakis, K., Melas, D., Kouvarakis, G., Youssef, A. F., Richter, A., Hatzianastassiou, N., Hilboll, A., Ebojie, F., Wittrock, F., von Savigny, C., Burrows, J. P., Ladstaetter-Weissenmayer, A. and Moubasher, H., Megacities as hot spots of air pollution in the East Mediterranean, **Atmospheric Environment**, 45(6), 1223-1235, (2011).
- [13]. Kindap, T., Ünal, A. And Karaca, M., Analysis of the Saharan dust transport to the Anatolian Peninsula: megacity perspective, **Atmospheric Chemistry and physics**, In review, (2010).
- [14]. Unal, Y. S., Toros, H., Deniz, A., and Incecik, S., Influence of meteorological factors and emission sources on spatial and temporal variations of PM₁₀ concentrations in Istanbul metropolitan area, **Atmospheric Environment**, 45(31), 5504-5513, (2011).
- [15]. Ozkurt, N., Sari, D., Akalin, N., and Hilmioglu, B., Evaluation of the impact of SO₂ and NO₂ emissions on the ambient air-quality in the Çan–Bayramiç region of northwest Turkey during 2007–2008, **Science of The Total Environment**, 456–457, p 254-266, (2013).
- [16]. Karaca, F., Mapping the corrosion impact of air pollution on the historical peninsula of Istanbul, **Journal of Cultural Heritage**, 14, 129-137, (2013).
- [17]. Atikol, U. and Güven, H., Impact of cogeneration on integrated resource planning of Turkey, **Energy**, 28(12), 1259-1277, (2003).
- [18]. Esmemr, S., Ceti, I. B. and Tuna, O., A Simulation for Optimum Terminal Truck Number in a Turkish Port Based on Lean and Green Concept, **The Asian Journal of Shipping and Logistics**, 26(2), 277-296, (2010).
- [19]. OECD, Greenhouse gas emissions reduction potentials from international shipping, Discussion Paper No : 2009-11, (2009).
- [20]. <http://www.palgaz.com.tr/index.php?contentId=150>, (16.03.2011).
- [21]. Canakci, M., Ozsezen, A. N., Arcaklioglu, E. and Erdil, A., Prediction of performance and exhaust emissions of a diesel engine fueled with biodiesel produced from waste frying palm oil, **Expert Systems with Applications**, 36(5), 9268-9280, (2009).
- [22]. Gumus, M. and Kasifoglu, S., Performance and emission evaluation of a compression ignition engine using a biodiesel (apricot seed kernel oil methyl ester) and its blends with diesel fuel, **Biomass and Bioenergy**, 34, 134-139, (2010).
- [23]. Sayin, C., Ilhan, M., Canakci, M. and Gumus, M., Effect of injection timing on the exhaust emissions of a diesel engine using diesel–methanol blends, **Renewable Energy**, 34(5), 1261-1269, (2009).
- [24]. Kumar, S., Cho, J. H., Park, J. and Moon, I., Advances in diesel–alcohol blends and their effects on the performance and emissions of diesel engines, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 22, 46-72, (2013).

- [25]. Sayin, C., Uslu, K. and Canakci, M., Influence of injection timing on the exhaust emissions of a dual-fuel CI engine, **Renewable Energy**, 33(6), 1314-1323, (2008).
- [26]. Miola, A., Ciuffo, B., Grovine, E., Marra, M., Regulating air emission from ships, JRC Report, (2010).
- [27]. Sieber, N. and Kummer, U. Environmental costs of maritime shipping in Europe. [28]. <http://www.marmore.com.tr>, (28.11.2013).
- [29]. Kılıç, A., Marmara Bölgesi' ndeki deniz ve hava taşımacılığında kaynaklanan emisyon envanterinin oluşturulması ve hava kirliliğinin modellenmesi, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul (2014).
- [30]. <http://www.wrf-model.org/index.php>, (16.02.2012).
- [31]. CMAQ, Operational guidance for the community multiscale air quality (CMAQ) modeling system, Version 4.7.1, University of North Carolina, (2010).
- [32]. Anenberg SC, Horowitz LW, Tong DQ, West JJ., An estimate of the global burden of anthropogenic ozone and fine particulate matter on premature human mortality using atmospheric modeling, **Environment Health Perspect**, 118, 1189-1195, (2010).
- [33]. Anenberg SC, Schwartz J, Shindell D, Amann M, Faluvegi G, Klimont Z, Janssens-Maenhout G, Pozzoli L, Van Dingenen R, Vignati E, Emberson L, Muller NZ, West JJ, Williams M, Demkine V, Hicks WK, Kuylenstierna J, Raes F, Ramanathan V., Global air quality and health co-benefits of mitigating near-term climate change through methane and black carbon emission controls, **Environment Health Perspect**, 120(6), 831-839, (2012).