

KENTSEL BİR ATMOSFERDEKİ BAZI HAVA KİRLETİCİLERİN METEOROLOJİK PARAMETRELERLE İLİŞKİLENDİRİLMESİ

*Tuncay ERBAŞLAR**

*Yücel TAŞDEMİR**

Özet: Bir hava kalitesi izleme istasyonu Belediye tarafından Bursa'nın Heykel semtinde kurulmuştur. Kükürt dioksit (SO₂), karbon monoksit (CO), azot oksitler (NO_x), toplam hidrokarbonlar (THK), partikül madde (PM) ve ozonun (O₃) dış hava ölçümleri Mayıs 2001 ve Aralık 2003 tarihleri arasında bu ölçüm noktasından rutin olarak alınmıştır. Ölçüm noktasında bir meteoroloji istasyonu bulunmakta olup bu hava kalitesi ölçüm cihazları ile paralel olarak çalıştırılmıştır. Konsantrasyonlar ve meteorolojik parametreler arasındaki ilişkiyi belirlemek için farklı modeller (Lineer, eksponansiyel, logaritmik) kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Klasik Hava Kirleticiler, SO₂, NO_x, PM, HK, CO, Ozon.

The Association of Some Air Pollutants with the Meteorological Parameters in an Urban Atmosphere

Abstract: An air quality monitoring station was set up by the Municipality in the Heykel district of Bursa. Ambient air levels of sulfur dioxide (SO₂), carbon monoxide (CO), nitrogen oxides (NO_x), total hydrocarbons (THCs), particulate matter (PM) and ozone (O₃) were measured routinely between May 2001 and December 2003 from this sampling point. There was a meteorological tower which was simultaneously run with the air quality measurement devices. Different models (linear, exponential, logarithmic) were employed to determine the relationship between concentrations and meteorological parameters.

Key Words: Classic Air Pollutants, SO₂, NO_x, PM, HC, CO, Ozone.

1. GİRİŞ

Evsel ısınma, ulaşım ve çeşitli endüstrilerden kaynaklanan hava kirleticiler, insan sağlığı ve çevre kalitesi üzerinde birçok olumsuz etkiye sahiptirler. Özellikle yanma proseslerinden atmosfere yayılan kükürt dioksit (SO₂), azot oksitler (NO_x), karbon monoksit (CO), hidrokarbonlar (HK) ve partikül maddeler (PM) gibi klasik hava kirleticiler hava kirliliğinin önemli bir bölümünü oluşturmaktadırlar (Finlayson-Pitts ve Pitts, 1986, Müezzinoğlu, 2000, Taşdemir ve ark., 2001).

Hava kirliliği plansız kentleşmenin yol açtığı önemli bir çevre sorunudur. Sıcaklık, nem, yağış miktarı, dikey ve yatay hava akımları gibi meteorolojik koşulların hava kirliliği üzerinde etkili olduğu bilinmektedir (Eser ve ark. 1999). Bu nedenle yerleşim merkezlerinin planlamasında şehre hakim rüzgarların kesilmemesi amaçlanmalıdır (Eser ve ark. 1999).

Hava kirliliği üzerinde etkili meteorolojik parametrelerin önemlilerinden birisi yeryüzünden ısıma ve yüksek basınç koşulları altında meydana gelen sıcaklık terselmesidir (İnversiyon) (Karadağ 1999). Bu durumda kirletici unsurlar yükselerek dağılamadığından hava kirliliğine yol açarlar (Karadağ 1999). Sıcaklık terselmesi ışımanın arttığı, havanın açık, sakın yada hafif rüzgarlı olduğu yüksek basınç koşulları altında genellikle kış aylarında gerçekleşir (Karadağ 1999).

Endüstrileşmenin ve şehirleşmenin yoğun olduğu Bursa'da, özellikle kış aylarında bazen hissedilir boyutlarda hava kirliliği sorunu yaşanmaktadır. Olumsuz meteorolojik koşullar, plansız kentleşme ve topoğrafik yapı, kirliliğin yoğunlaşması ve etkilerinin artmasında etkili olmaktadır.

Bu çalışmada, Mayıs 2001-Nisan 2003 dönemleri arasında Heykel örnekleme noktasında ölçülen SO₂ ve PM kirleticilerinin meteorolojik parametrelerle (Sıcaklık, basınç, nem, rüzgar hızı) olan ilişkileri çeşitli modeller (Lineer, eksponansiyel, üslü ve logaritmik) kullanılarak belirlenmeye çalışılmış ve tartışıl-

* Uludağ Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 16059, Bursa.

mıştır. Ayrıca diğer kirleticilerin meteorolojik değişkenlerle olan lineer ilişkileri belirlenmiştir. Bunun yanında, her bir kirleticinin sıcaklık, nem, basınç ve rüzgar hızı ile çoklu korelasyonu yapılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Ölçümlerin Alınması

Her bir kirlenici için birbirinden bağımsız otomatik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Ölçümler Horiba marka cihazlarla otomatik olarak gerçekleştirilmiştir. Karbon monoksit (CO) ölçümleri dispersiyonsuz çapraz modüllü infrared analiz metodu ile çalışan APMA-360 model, ozon (O₃) ölçümleri çapraz akış modüllü infrared absorpsiyon metodu ile çalışan APOA-360 model, azot oksit (NO_x) ölçümleri çapraz akış modüllü yarı genişmeli kemilüminesans metodu ile çalışan APNA-360 model, kükürt dioksit (SO₂) ölçümleri ultraviyole floresans analiz metodu ile çalışan APSA-360A model, toplam hidrokarbon (THK) ölçümleri çapraz akış modülasyonlu seçici tür yakma metodu ve hidrojen iyonizasyon dedeksiyon metodu ile çalışan APHA-360 model ve partikül madde (PM) ölçümleri ise filtre üzerindeki toz örneğinin sürekli kütle belirlenmesinin radyometrik elektronik sensor-compensation metodu ile belirlendiği FH 62-1 model cihazlar ile gerçekleştirilmiştir.

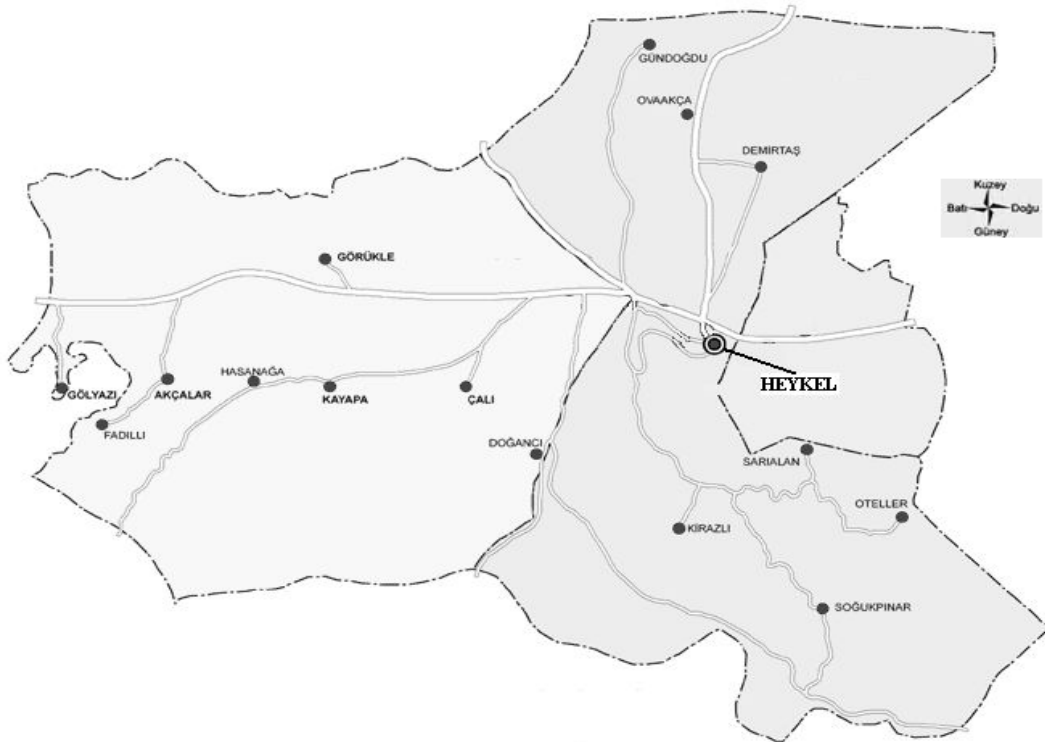
2.2. Ölçüm Bölgesi

SO₂, PM, NO_x, THK, CO ve O₃ kirlenicilerinin ölçümleri Bursa Büyükşehir Belediyesi tarafından Heykel semtinde rutin olarak yapılmaktadır. Ölçüm alınan nokta Şekil 1’de gösterilmiştir. Bu çalışmada, Mayıs-2001 ve Nisan-2003 ayları arasında ölçülmüş olan konsantrasyon değerleri kullanılmıştır. Cihazlardan rutin olarak 30 dakikada bir alınan veriler kullanılarak günlük ve aylık ortalama değerler belirlenmiştir.

2.3. Meteorolojik Veriler

Bursa’da Büyükşehir Belediyesi tarafından Heykel semtinde Mayıs-2001 ve Nisan-2003 tarihleri arasında ölçülmüş olan meteorolojik verilerin aylık ortalamaları Tablo 1’de verilmiştir.

Her ay için hakim rüzgar yönü belirlenirken, o ay içerisinde esen rüzgarların esme sayıları göz önünde bulundurulmuş ve rüzgarın en çok estiği yön hakim rüzgar yönü olarak kabul edilmiştir.



Şekil 1:
Ölçüm Alınan Noktanın Yeri

3. SONUÇLAR VE YORUM

Bu çalışma kapsamında Heykel Semti'nden toplanan iki yıllık ölçüm değerleri gözönüne alınmıştır. Meteorolojik veriler ile kirletici seviyelerinin daha iyi açıklanabilmesi ve herhangi bir maskelemeyi önlemek için birer yıllık değerler hesaplamalarda kullanılmıştır. Bu semtte ölçülen ortalama yıllık kirletici konsantrasyonları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2'de verilen değerler incelendiğinde Mayıs 2001-Nisan 2002 döneminde ölçülen konsantrasyonların, Mayıs 2002-Nisan 2003 döneminde ölçülen değerlerden az da olsa yüksek olduğu görülmektedir. Isınma amaçlı yakıtlarda doğalgazın giderek yaygınlaşması ve kaliteli katı yakıtların kullanılması bunda etken olmuş olabilir. Ayrıca meteorolojik özellikler de kirletici parametrelerin seyrelmesinde etkilidir. Bölgedeki trafik durumu ve coğrafik özellikler de konsantrasyonlar üzerinde önemlidir.

Mayıs 2001-Nisan 2002 döneminde Heykel ölçüm istasyonunda belirlenen SO₂ ve PM kirleticilerinin çeşitli meteorolojik faktörlere (Sıcaklık, basınç, nem, rüzgar hızı) bağlı değişimleri incelenmiştir. Bu kapsamda farklı model alternatifleri denenmiştir. Bunun sonucunda bulunan modeller ve r² değerleri Tablo 3'te sunulmuştur. Hesaplanan r² değerlerine bağlı olarak SO₂ ve PM konsantrasyonlarının salınımında meteorolojik parametrelerin tek başına etkin bir parametre olmadığı sonucuna varılmıştır. Ancak, SO₂'nin sıcaklığa bağlı değişimi basınç, nem ve rüzgar hızına göre daha etkilidir. SO₂'nin sıcaklıkla değişimi en iyi eksponansiyel model ile açıklanmıştır. Bu dönemde PM kirleticisinin meteorolojik parametrelere bağlı değişimi daha düşük korelasyon değerleri vermiştir. Nispeten düşük korelasyon değerleri büyük şehir atmosferleri için beklenen bir durumdur çünkü konsantrasyon seviyelerine etki eden birçok parametre vardır (Müezzinoğlu ve ark., 1998, Taşdemir ve ark. 2004). Gerek bölgesel kaynaklar ve gerek mekanik türbülanslar bu ilişkinin tek bir değişkene bağlı olmasına engel olmaktadır. SO₂ ve PM'nin meteorolojik verilerle açıklanması için denenilen modellerden en iyi sonucu rüzgar hızının üslü regresyon modeli vermiştir. Bu modelde negatif bir korelasyon görülmüş olup bu sonuç rüzgar hızının artmasıyla konsantrasyon seviyelerinin azaldığını göstermektedir.

Tablo 1.
Heykel'deki Mayıs 2001-Nisan 2003 Dönemi Aylık Meteorolojik Veri Ortalamaları

Aylar	Hakim Rüzgar Yönü	Rüzgar Hızı (m/s)	Sıcaklık (°C)	Nem (%)
Mayıs 2001	GGD	0,74	22,65	49,29
Haziran 2001	G	0,79	25,09	43,15
Temmuz 2001	DGD	0,83	28,47	47,33
Ağustos 2001	GGD	0,87	27,01	52,38
Eylül 2001	G	0,72	23,27	52,49
Ekim 2001	GGD	0,76	17,69	56,89
Kasım 2001	G	0,64	11,84	67,06
Aralık 2001	GD	0,89	5,68	78,48
Ocak 2002	G	0,74	4,50	69,43
Şubat 2002	G	0,68	11,45	55,84
Mart 2002	GGD	0,75	12,04	63,23
Nisan 2002	DGD	0,62	12,69	70,22
Mayıs 2002	GD	0,70	19,87	53,35
Haziran 2002	DGD	0,82	25,2	49,67
Temmuz 2002	GGD	0,68	28,58	51,76
Ağustos 2002	G	0,73	26,37	53,8
Eylül 2002	G	0,62	22,41	58,82
Ekim 2002	G	0,63	17,98	64,05
Kasım 2002	GGD	0,60	14,09	59,46
Aralık 2002	D	0,77	6,10	65,9
Ocak 2003	GGD	0,83	10,02	70,15
Şubat 2003	DKD	0,84	3,65	74,02
Mart 2003	GD	0,69	5,99	68,55
Nisan 2003	G	0,80	11,35	65,63

Tablo 2.
Heykel'de Ölçülen Kirlenici Konsantrasyonları ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Kirleniciler	Mayıs 2001-Nisan 2002	Mayıs 2002-Nisan 2003
CH ₄	1548,27±208,78 n=342	1697,75±109,26 n=308
NMHK	296,21±199,86 n=342	541,81±609,02 n=308
THK	1826,33±336,16 n=342	2233,03±679,02 n=308
SO ₂	35,15±31,78 n=349	22,14±23,71 n=231
NO	29,17±29,33 n=349	26,56±26,98 n=319
NO ₂	49,19±19,61 n=349	42,95±11,57 n=319
NO _x	78,98±46,46 n=347	69,51±35,57 n=319
CO	1289,96±1057,12 n=349	856,25±767,86 n=345

Mayıs 2002 ile Nisan 2003 döneminde Heykel'de ölçülen SO₂'nin değişimine en çok sıcaklığın etkidiği hesaplanmıştır (Tablo 4). Bu durum ise en iyi lineer regresyon modeli ile açıklanmıştır. Ancak bu yine de zayıf bir ilişkidir ($r=-0,41$). Basınç, nem ve rüzgar hızının SO₂ konsantrasyonu değişimine etkisi ise çok azdır. Yine aynı şekilde PM kirlenicisinin basınçla değişimi üslü regresyon modeli ile açıklanabilir. Birlikte bu zayıf bir ilişki olmaktadır.

Çeşitli makalelerde kirlenicilerin atmosferik konsantrasyonları meteorolojik verilerle ilişkilendirilerek onların seviyelerinde görülen değişimler açıklanmaya çalışılmıştır (Kartal ve Özer, 1992, Beyazıt ve Bali, 1996, Çuhadaroğlu ve Demirci, 1997). Örneğin, Beyazıt ve Bali (1996) tarafından Sivas'ta hava kirliliği ile meteorolojik parametreler arasında ilişki belirlenmeye çalışılmış ve bulunan sonuçlar Tablo 5'te verilmiştir. Tablo 5'ten kirlenici madde miktarlarını etkileyen en önemli meteorolojik parametrelerin sıcaklık ve nisbi nem olduğu görülmektedir. SO₂'nin sıcaklık ve nisbi neme bağlı değişiminin eksponansiyel model, partikül madde miktarının sıcaklığa bağlı değişiminin lineer regresyon model, nispi neme bağlı değişiminin eksponansiyel regresyon model ile en yüksek korelasyon değerleri verdiği gözlenmiştir.

Tablo 3.
SO₂ ve PM Konsantrasyonlarının Meteorolojik Parametrelerle Olan İlişkileri (Mayıs 2001-Nisan 2002 Dönemi)

Parametre	Lineer $y=ax+b$	Eksponansiyel $y=ae^{bx}$	Üslü $y=ax^2$	Log $y=a\ln(x)+b$	
SO ₂	Sıcaklık	$y=-1,99x+68,63$ $r^2=0,30$	$y=63,52e^{-0,06x}$ $r^2=0,35$	-	-
	Basınç	$y=1,39x-1374,2$ $r^2=0,16$	$y=1E-15e^{0,04x}$ $r^2=0,16$	$y=8E-11x^{37,09}$ $r^2=0,15$	$y=1393,3\ln x-9609,9$ $r^2=0,16$
	Nem	$y=0,55x+2,89$ $r^2=0,06$	$y=9,04e^{0,02x}$ $r^2=0,08$	$y=0,41x^{1,01}$ $r^2=0,08$	$y=33,65\ln x-100,74$ $r^2=0,07$
	R.Hızı	$y=-13,62x+45,78$ $r^2=0,01$	$y=33,95e^{-0,43x}$ $r^2=0,02$	-	-
PM	Sıcaklık	$y=-1,61x+96,94$ $r^2=0,10$	$y=80,21e^{-0,02x}$ $r^2=0,07$	-	-
	Basınç	$y=1,28x-1231,6$ $r^2=0,07$	$y=7E-5e^{0,01x}$ $r^2=0,05$	$y=2E-39x^{13,45}$ $r^2=0,05$	$y=1286,1\ln x-8833,1$ $r^2=0,07$
	Nem	$y=0,47x+42,37$ $r^2=0,02$	$y=44,44e^{0,01x}$ $r^2=0,02$	$y=16,38x^{0,32}$ $r^2=0,02$	$y=28,81\ln x-46,67$ $r^2=0,03$
	R.Hızı	$y=-27,4x+90,86$ $r^2=0,03$	$y=83,21e^{-0,42x}$ $r^2=0,05$	$y=53,57x^{-0,37}$ $r^2=0,05$	$y=-23,59\ln x+62,28$ $r^2=0,03$

Not: PM için n=332, SO₂ için n=339 (n, günlük ortalama değerleri ifade etmektedir). y=Konsantrasyon, x=Meteorolojik değişkenini ifade etmektedir.

Tablo 4.
SO₂ ve PM Konsantrasyonlarının Meteorolojik Parametrelerle Olan İlişkileri (Mayıs 2002-Nisan 2003 Dönemi)

		Lineer $y=ax+b$	Ekspansiyel $y=ae^{bx}$	Üslü $y=ax^2$	Log $y=aln(x)+b$
SO ₂	Sıcaklık	$y=-1,54x+54,64$ $r^2=0,17$	$y=27,35e^{-0,03x}$ $r^2=0,04$	$y=41,69x^{0,35}$ $r^2=0,05$	$y=-13,51lnx+62,17$ $r^2=0,12$
	Basınç	$y=1,24x-1232,6$ $r^2=0,05$	$y=2E-10e^{0,025x}$ $r^2=0,01$	$y=1E-74x^{25}$ $r^2=0,01$	$y=1253,7lnx-8656,1$ $r^2=0,05$
	Nem	-	$y=39,4e^{-0,02x}$ $r^2=0,04$	$y=534,2x^{-0,89}$ $r^2=0,03$	-
	R.Hızı	$y=-20,59x+36,41$ $r^2=0,03$	$y=18,06e^{-0,29x}$ $r^2<0,01$	$y=13,4x^{-0,23}$ $r^2<0,01$	$y=-18,58lnx+14,66$ $r^2=0,04$
PM	Sıcaklık	$y=-1,91x+97,91$ $r^2=0,08$	$y=73,45e^{-0,02x}$ $r^2=0,08$	-	-
	Basınç	$y=3,19x-3175,6$ $r^2=0,09$	$y=5E-17e^{0,04x}$ $r^2=0,17$	$y=5E-124x^{41,6}$ $r^2=0,17$	$y=3243,2lnx-22388$ $r^2=0,09$
	Nem	$y=0,26x+49,72$ $r^2<0,01$	$y=56,44e^{-0,001x}$ $r^2<0,01$	-	$y=19,86lnx-15,51$ $r^2<0,01$
	R.Hızı	$y=-47,6x+100,21$ $r^2=0,05$	$y=94,79e^{-0,77x}$ $r^2=0,14$	$y=41,97x^{-0,69}$ $r^2=0,14$	$y=-46,5lnx+48,38$ $r^2=0,06$

Not: PM için n=329, SO₂ için n=231 (Günlük ortalama değerler). y=Konsantrasyon, x= Meteorolojik değişkenini ifade etmektedir. SO₂ ve PM'in sıcaklık ve nemle değişiminin bazı modelleri programda yapılamadığı için yazılmamıştır.

Tablo 5.
Kirleticiler ile Meteorolojik Parametreler Arasındaki İstatistiksel İlişkiler (r²)

Parametre	Lineer	Ekspansiyel	Üslü	log	
SO ₂	Sıcaklık	0,72	0,86	0,52	0,53
	Basınç	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
	Nem	0,61	0,69	0,69	0,60
	R.Hızı	0,03	0,03	0,03	0,03
PM	Sıcaklık	0,58	0,42	0,43	0,43
	Basınç	<0,01	<0,01	<0,01	0,01
	Nem	0,52	0,53	0,52	0,50
	R.Hızı	0,06	0,07	0,08	0,06

Beyazıt ve Bali (1996) tarafından yapılan çalışma ile bulunan SO₂ ve PM kirleticilerinin sıcaklık ve nisbi neme bağlı değişiminin kuvvetli ilişkisi, Mayıs 2001-Nisan 2003 döneminde Heykel'de yapılan ölçümler neticesinde bulunamamıştır. Bursa'da ölçülen SO₂ ve PM kirleticilerinin meteorolojik parametrelerle aralarında yapılan istatistiksel hesaplamalar sonucunda bulunan r değerlerinin daha düşük çıkma sebepleri, iki şehir arasındaki emisyon miktar ve kaynakları, nüfus, kentleşme, topoğrafik yapı ve meteorolojik faktörler ile açıklanabilir. Sivas şehir merkezinin de nüfusu Bursa gibi artış göstermektedir. Sivas'ta çalışmanın yapıldığı yıllarda ısınma amacıyla katı yakıtlar (Özellikle kömür) kullanılmaktadır. Sivas'ta kış mevsimi Bursa'ya göre daha uzun ve soğuk geçmekte olup, yakıtlardan kaynaklanan kirleticilerin miktar ve etkilerinin artmasına neden olmaktadır. Sivas'ta daha yüksek SO₂ ve PM konsantrasyonları ile meteorolojik parametrelerin ilişkisi Bursa'ya göre daha yüksek korelasyon katsayıları vermiştir. Konsantrasyon miktarlarının özellikle kış aylarında bir hayli artması, diğer faktörlere (Diğer kaynaklar, endüstriyel emisyonlar, yerden tozuma, kaçaklar, vb.) göre PM ve SO₂'nin daha baskın hale geçmesine sebep olurlar.

Demirci ve Çuhadaroğlu (2001) tarafından yapılan çalışmada ise Trabzon'da ölçülen SO₂ ve PM konsantrasyonlarının rüzgar hızlarına göre değişimi incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda kirletici konsantrasyonları ile rüzgar hızları arasında zayıf bir ilişki bulunmuştur. Rüzgar hızının arttığı durumlarda konsantrasyonun azalması beklenen bir durumdur çünkü artan rüzgar hızı ile kirleticilerin taşınımı ve seyrelmesi daha çok olmaktadır. Demirci ve Çuhadaroğlu (2001) tarafından Trabzon'da yapılan çalışmada bulunan r değerleri, Bursa'da yapılan çalışmada bulunan değerlerden daha yüksek düzeydedir.

Bu makale kapsamında SO₂ ve PM detaylı bir şekilde irdelenmiş ve benzer çalışmaların sonuçlarıyla mukayese edilmiştir. Bu çalışmadaki örnekleme noktalarında diğer klasik hava kirleticiler de (THK, NO_x, CO ve O₃) ölçüldüğünden, bu kirletici konsantrasyonları ile meteorolojik parametreler arasında reg-

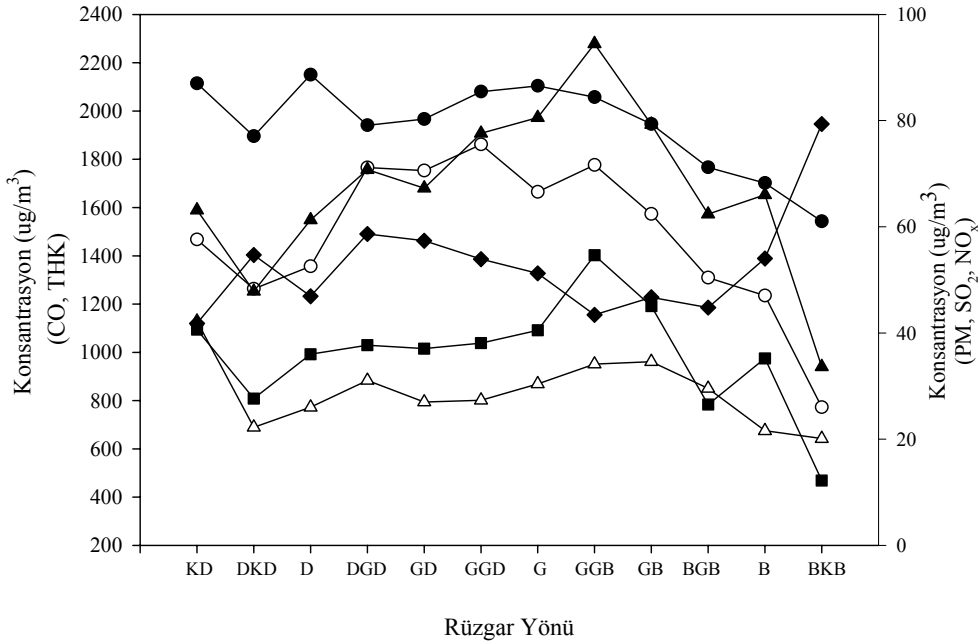
resyon modeli kullanılarak, lineer ilişki belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışma kapsamında 17 Mayıs 2001-30 Nisan 2003 periyodu arasındaki ortalama günlük değerler ele alınmıştır. Bulunan modeller ve r değerleri Tablo 6'da özetlenmiştir.

Tablo 6.
Heykel Ölçüm İstasyonundaki Kirlilik Seviyeleri ile Meteorolojik Veriler
Arasındaki Lineer Model Sonuçları (Mayıs 2001-Nisan 2003).

Parametre	THK	NO _x	CO	O ₃
Sıcaklık	$y=-19,7x+2362,4$ $r^2=0,10$ $n=650$	$y=-1,73x+103,64$ $r^2=0,13$ $n=666$	$y=-56,9x+2021$ $r^2=0,27$ $n=677$	$y=2,11x+16,57$ $r^2=0,48$ $n=677$
Basınç	$y=17,54x-15808$ $r^2=0,06$ $n=650$	$y=1,57x-1518,1$ $r^2=0,08$ $n=663$	$y=41x-40527$ $r^2=0,11$ $n=663$	$y=-1,14x+1210,7$ $r^2=0,11$ $n=663$
Nem	$y=9,86x+1438$ $r^2=0,06$ $n=650$	$y=0,55x+41,64$ $r^2=0,03$ $n=666$	$y=20,05x-128,46$ $r^2=0,08$ $n=677$	$y=-0,94x+108,04$ $r^2=0,23$ $n=677$
Rüzgar Hızı	$y=-381x+2310,4$ $r^2=0,03$ $n=650$	$y=-28,93x+96,1$ $r^2=0,03$ $n=666$	$y=-340x+1331$ $r^2=0,01$ $n=677$	$y=7,64x+45,8$ $r^2=0,01$ $n=677$

Heykel Senti'nde ölçülen kirlenici konsantrasyonları (SO₂ ve PM için olduğu gibi THK, NO_x, CO ve O₃) ile meteorolojik parametreler arasında bulunan r değerleri incelendiğinde, düşük korelasyon değerlerinin olduğu gözlenmektedir. Kirlenici konsantrasyonlarının sıcaklık ve rüzgar hızı ile ters, basınç ve nem ile doğru orantılı olduğu belirlenmiştir. Ancak, ozon bu durum için istisna teşkil etmektedir.

Atmosferik kirlenici konsantrasyon seviyelerini etkileyen bir diğer önemli meteorolojik faktör de rüzgar yönüdür. Rüzgarlar geldikleri bölgelerdeki havanın özelliklerini taşırlar. Bu çalışmada, rüzgar yönlerine göre kirlenici konsantrasyonları belirlenmiştir. Heykel'de rüzgar esiş yönlerinde rastlanan kirlenici konsantrasyonları Şekil 2'de verilmiştir. Kirlenicilerin konsantrasyon seviyeleri dikkate alınarak, iki y-ekseni kullanılmıştır. Grafik oluşturulurken her bir yöndeki rüzgar sınıfları için ölçülen konsantrasyon ortalamaları dikkate alınmıştır. Heykel'de her bir yöndeki esen ortalama rüzgar sayıları Tablo 7'de özetlenmiştir. Esen rüzgar sayıları belirlenirken 16 farklı yön gözönüne alınmıştır.



Şekil 2:
Heykel'de Konsantrasyonların Rüzgar Yönlerine Bağlı Değişimi

Tablo 7.
Heykel’de Yönlere Göre Esen Ortalama Rüzgar Yüzdeleri (%)

K	KKD	KD	DKD	D	DGD	GD	GGD
0	~0	2,4	3,6	6,3	12,6	16,2	21,0
G	GGB	GB	BGB	B	BKB	KB	KKB
21,5	11,6	8,0	3,4	1,7	0,2	~0	~0

Heykel’de ölçülen PM değerleri 26,03 (BKB) – 75,51 (GGD) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ arasında, SO_2 değerleri 20,12 (BKB) – 34,59 (GB) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ arasında ve NO_x değerleri 33,63 (BKB) – 94,45 (GGB) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ arasında ve O_3 değerleri 41,77 (KD) – 79,36 (BKB) salınım göstermiştir. Genelde güneyden esen rüzgarlar ile daha yüksek konsantrasyonlara ulaşılmıştır. THK konsantrasyonları 1541,93 (BKB) - 2149,73 (D) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ arasında, CO konsantrasyonları da 469,22 (BKB) – 1402,08 (GGB) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ arasında değişim göstermiştir.

Konsantrasyonlardaki farklılıkların sebeplerini ortaya koymak için rüzgar geliş yönlerindeki kaynaklar ve rüzgar hızları incelenmiştir. Heykel’de Batı-Kuzeybatı (BKB) yönünden esen rüzgarların esiş hızlarının yüksek olduğu ve bunun sonucunda bu yönlerde düşük konsantrasyonlara ulaşıldığı, Güney-Güneybatı (GGB) yönünden esen rüzgarların esiş hızlarının da düşük olduğu ve bu yönde yüksek konsantrasyonlara rastlandığı tahmin edilmektedir. Yapılan hesaplamalarda BKB yönünden esen rüzgarların ortalama hızları 1,28 m/s, GGB yönünden esen rüzgarların ortalama hızları 0,68 m/s olarak bulunmuştur. Heykel’de ölçülen rüzgar yönlerinde BKB yönünden esen rüzgar yüzdesi ise sadece % 0,2’dir. Aynı anda birden fazla faktörün (Meteorolojik parametreler, topoğrafya vs.) etkileşimi sonucu konsantrasyonlarda farklılıklar olabilmektedir. BKB istikametinden esen rüzgar yönünde şehir içi yerleşim bölgeleri vardır ve bu bölgelerde evsel ısınmadan ve taşıt trafiğinden kaynaklanan kirlilikler mevcuttur. GGB yönünde ise taşıt trafiğinin yanında, bazı yerleşim bölgeleri ve DOSAB (Demirtaş Organize Sanayi Bölgesi) mevcuttur. Her iki yön için de belli oranlarda kirlilik taşınımı sözkonusudur. Dolayısıyla rüzgar hızı konsantrasyonlar üzerinde etkili olmuştur.

Heykel Sempti’nde ölçülen kirlenici konsantrasyonlarının her birine meteorolojik parametrelerin (Sıcaklık, basınç, nem, rüzgar hızı) hepsinin aynı anda etki etmesi durumunda oluşturulan denklemler ve r değerleri Tablo 8’de verilmiştir. Hesaplamalar, günlük konsantrasyon ve meteorolojik verilerden hareketle, çoklu regresyon modeli kullanılarak yapılmıştır.

Tablo 8.
Heykel’de Ölçülen Konsantrasyonlar ile Meteorolojik Parametrelerin İlişkisi

Denklem	n	r^2
$\text{PM} = -2,17\text{T} + 0,62\text{P} - 0,57\text{N} - 29,42\text{V} - 465$	646	0,14
$\text{THK} = -17,18\text{T} + 6,6\text{P} + 0,43\text{N} - 304,8\text{V} - 4216$	625	0,15
$\text{SO}_2 = -2,29\text{T} + 0,35\text{P} - 0,42\text{N} - 4,42\text{V} - 258,15$	549	0,34
$\text{NO}_x = -2,01\text{T} + 0,51\text{P} - 0,46\text{N} - 28,94\text{V} - 362,37$	635	0,19
$\text{CO} = -61,8\text{T} + 8,25\text{P} - 7,53\text{N} - 387,91\text{V} - 5533$	663	0,30
$\text{O}_3 = 2,17\text{T} + 0,07\text{P} + 0,003\text{N} + 8,52\text{V} - 59,2$	655	0,51
$\text{PM} = -2,17\text{T} + 0,62\text{P} - 0,57\text{N} - 29,42\text{V} - 465$	646	0,14

T: Sıcaklık, P: Basınç, N: Nem, V: Rüzgar hızı

Tablo 8’de verilen değerlerden görüldüğü gibi Heykel’de de SO_2 , CO ve O_3 konsantrasyonlarının meteorolojik parametrelerle ilişkilerinden hesaplanan r^2 değerleri düşük olmakla beraber, diğer kirlenicilere nazaran nispeten daha yüksektir. Benzer şekilde, Çuhadaroğlu ve Demirci (1997) tarafından Trabzon’da Aralık-1994 tarihinde yapılan bir başka çalışmada bulunan sonuçlar aşağıda verilmiştir:

$$[\text{SO}_2] = -1,55\text{N} - 12,16\text{V} + 223,05 \quad (r^2 = 0,53)$$

$$[\text{PM}] = 7,16\text{T} - 1,81\text{N} + 168,81 \quad (r^2 = 0,56)$$

Trabzon’daki bu çalışmada 1995 yılının Ocak, Mart ve Nisan aylarında yapılan incelemelerde daha düşük r^2 değerleri elde edilmiştir. Buna göre SO_2 ve PM’nin rüzgar hızı ve nem ile değişimi sırasıyla 0,22

ve 0,19 ile 0,14 ve 0,16, PM'nin nem ve rüzgar hızına bağlı değişimi ise 0,30 r^2 değerini vermiştir. Bu değerlerin tümü negatif korelasyonu ifade etmektedir. Trabzon'da yapılan çalışma ile bulunan sonuçlar, Bursa'da bulunan sonuçlardan daha yüksek r^2 değerleri vermiştir. Benzer düşük ilişkiler, Sivas verileri değerlendirildiğinde de bulunmuştur. Trabzon ve Sivas illerinde elde edilen nispeten yüksek korelasyon değerleri, Bursa'da bu ilişkilerin maskelendiğini ortaya koymaktadır. Bursa, diğer iki ile göre daha büyük olduğundan, emisyon kaynakları daha çeşitli ve daha fazla oranlardadır. Örneğin, 2000 yılı istatistiklerine göre, Bursa İli'nin nüfusu 2.125.140 kişi olup Sivas (755.091 kişi) ve Trabzon (975.137) İlleri'ninkinden fazladır (TUİK, 2007). Sanayi açısından bir mukayese yapıldığında ise, Bursa ülkemizdeki büyük otomobil fabrikalarından 2 tanesini barındırmaktadır. Bu nedenle, otomotiv ve yan sanayi Bursa'da önemli bir yere sahiptir. Ayrıca, tekstil, gıda ve enerji gibi sektörler de Bursa'da yaygın olarak bulunan diğer endüstri gruplarıdır. Bu da olayı daha karmaşık hale getirmekte ve basit korelasyonlarla bu ilişkilerin açıklanmasının yetmeyeceği sonucunu çıkarmaktadır.

4. TEŞEKKÜR

Heykel ölçüm noktasındaki verileri bize temin ettiğimiz Bursa Büyükşehir Belediyesi, Çevre Koruma Daire Başkanlığı'na teşekkür ederiz.

5. KAYNAKLAR

1. Beyazıt, N. ve Bali, U. (1996) Sivas'ta hava kirliliği ve meteorolojik parametrelerle ilişkisinin araştırılması. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü, 1. Uludağ Çevre Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa, 551-559.
2. Çuhadaroğlu, B., Demirci, E. (1997) Influence of some meteorological factors on air pollution in Trabzon city, *Energy and Buildings*, 25, 179-184.
3. Demirci, E., Cuhadaroğlu, B. (2001) Statistical analysis of wind circulation and air pollution in Trabzon. *Energy and Buildings*, 31, 49-53.
4. Eser, E., Dinç, G., Özcan, C., Tartan, M. (1999) Rutin hava kirliliği ve meteoroloji verileri ile bir gün sonraki hava kirliliğinin tahmini üzerine bir deneme. *Hava Kirlenmesi ve Kontrolü Ulusal Sempozyumu*, İzmir, 105-114.
5. Finlayson-Pitts, J. B., Pitts, N. J. (1986) *Atmospheric Chemistry: Fundamentals and Experimental Techniques*. Wiley Publishing Co.
6. Karadağ, A. (1999) Meteorolojik ve klimatolojik verilere göre İzmir'de hava kirliliği ve beşeri etkenlerin rolü. *Hava Kirlenmesi ve Kontrolü Ulusal Sempozyumu*, İzmir, 134-142.
7. Kartal, Ş., Özer, U. (1992) Relationship between high sulphur dioxide concentrations and the duration of their occurrence in the Kayseri atmosphere. *Fresenius Envir. Bull.*, 1, 525-530.
8. Müezzinoğlu, A. (2000) *Hava Kirliliği ve Kontrolünün Esasları*. Dokuz Eylül Üniversitesi Yayınları, İzmir.
9. Taşdemir, Y., Kural, C., Payan, F. (2001) Bursa'daki çeşitli endüstrilerden kaynaklanan yanma kökenli hava kirleticiler. *IV. Ulusal Çevre Mühendisliği Kongresi*, İçel, 548-551.
10. Taşdemir, Y., Cindoruk, S. S., Esen, F. (2005) Monitoring of criteria air pollutants in Bursa, Turkey. *Environ. Monitoring and Assessment*, 110, 227-241.
11. TUİK (2007) <http://www.tuik.gov.tr/VeriBilgi.do>