



**Bu bir MMO  
yayıdır**

MMO bu yayındaki ifadelerden, fikirlerden, toplantıda çıkan sonuçlardan, teknik bilgi ve basım hatalarından sorumlu değildir.

## **METRO İSTASYONLARI İLE METRO VE ŞEHİRLERARASI TREN VAGONLARINDA İÇ HAVA KALİTESİ**

**BURCU ONAT**  
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ



# METRO İSTASYONLARI İLE METRO VE ŞEHİRLERARASI TREN VAGONLARINDA İÇ HAVA KALİTESİ

Burcu ONAT

## ÖZET

Metro ve raylı sistemler, ulaşımda kaliteyi yükseltmesi, kalabalığı azaltması ve trafik yoğunluğunun olduğu güzergâhlarda destek sağlayıp ulaşımı kolaylaştırması gibi niteliklere sahip olmasından dolayı günümüzde en çok tercih edilen ulaşım aracıdır. Ülkemizde büyük şehirlerde trafik yükünün artması nedeniyle farklı ulaşım türlerinin kullanılması ihtiyacı doğmuş, bu da metro ve hafif raylı sistemler gibi ulaşım araçlarının tercih edilmesine neden olmuştur. Metro ve raylı sistemleri kullanan kişiler, gün içinde sadece kısıtlı bir zamanı metro istasyonunda ve tren vagonu içinde geçirmektedir. Ancak bu kapalı mikro çevrelerde hava kirlenmelerinin oranı yüksekse kısa süreli maruz kalınması durumunda bile gün içinde toplam maruz kalımlarına ve dolayısıyla sağlık etkileri üzerinde katkısı büyük olabilmektedir. Bu çalışmada dünyada ve ülkemizde metro sistemlerin peron ve vagonlarında, raylı sistemlerin vagonlarında iç hava kalitesi konusunda yapılmış çalışmalar incelenmiştir. Ülkemizdeki metro ve tren vagonlarındaki iç hava kalitesi, metro sistemlerinin özellikleri de dikkate alınarak farklı ülkelerdeki metro ve raylı sistemlerle karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** İç hava kalitesi, Metro, Raylı sistemler.

## ABSTRACT

Nowadays, subway and railway systems is the most preferred mode of transport, because it has the qualifications such as upgrading the quality of public transport, reducing clutter and providing support on routes where traffic congestion. Due to the increased traffic load in major cities in our country, the use of different modes of transport is needed. This is led the choice of the transport such as subway and light rail systems. Commuters who use the subway and rail systems, spend a limited time in the subway station and train cabin during the day. However, if the level of air pollutants are high in the micro environments, the effect of contribution on the overall health effects and short-term exposure can be great. In this study, the studies about indoor air quality in the platform and the train cabin of the subway and railway systems in the world and in our country was investigated. The indoor air quality in metro and train cabin in our country, taking into account the characteristics of the subways was compared to the subway and railway systems in other countries.

**Key Words:** Indoor air quality, Subway, Railways

## 1. GİRİŞ

Hava kirliliği bugün dünya çapında çoğu şehirleşmiş çevrenin kaçınılmaz gerçeğidir ve bu sebepten artan hastalık ve ölüm yükü nedeniyle hepimizi ilgilendirmektedir. Dünya çapında bir milyardan fazla insan kabul edilemez hava kalitesine sahip şehirlerde yaşamaktadır. Ülkelerdeki ekonomik gelişme araba sayısının artmasına dolayısıyla trafikten kaynaklanan hava kirlenmesinin en önemli çevre sorunlarından biri olmasına sebep olmuştur. Şehirlerde trafik yükünün artması farklı ulaşım türlerinin

kullanılması ihtiyacını doğurmuş, bu da metro, raylı sistemler gibi ulaşım araçlarının tercih edilmesine neden olmuştur. Günümüzde dış hava kalitesi kadar iç hava kalitesi de önem kazanmıştır ve son yıllarda yurtdışında, özellikle büyük şehirlerde ulaşımında çok tercih edilen metrolarda hava kalitesi konusunda çok sayıda çalışma yapılmıştır. Dünyada ilk metro sistemleri 19.yy'ın ortalarında Londra ve New York'ta işletilmeye başlamıştır. Ülkemizde ilk raylı sistem Konya'da 1992 yılında hizmete girmiştir. Daha sonra Ankara hafif raylı sistem 1996'da, Ankara metro sistemi 1997'de, İstanbul'da Aksaray-Havalimanı hafif metro ve 4.Levent-Taksim metro hatları sırasıyla 1989 ve 2000 yılında, İzmir'de ise 2000 yılında işletilmeye başlamıştır.

Metrolarda özellikle tren raylarından ortama yayılan demir tozları, havalandırma sistemlerin yetersiz oluşu ve yolcuların üzerinde ortama taşınan partiküller nedeniyle hava kalitesi insan sağlığı açısından tehlikeli boyutlara ulaşabilmektedir. Metrolardaki hava sirkülasyon miktarının düşük olması, metrodaki konsantrasyonların dış ortam konsantrasyonlarından daha yüksek olmasına neden olmaktadır. Metro ve raylı sistemleri kullanan kişiler, gün içinde sadece kısıtlı bir zamanı metroda geçirmektedir. Ancak metrodaki partikül madde seviyesi ve elementel bileşim oranı yüksekse kısa süreli maruz kalınması durumunda bile gün içinde toplam maruz kalımlarına ve dolayısıyla sağlık etkileri üzerinde katkısı büyük olmaktadır. Metro yolcularının hava kirliliğine maruziyeti ile ilgili ilk çalışma 1980'li yılların sonunda Boston'da yapılmıştır. Bu çalışmayı metro sistemlerinde hava kirliliğinin değerlendirilmesi ile ilgili pek çok çalışma takip etmiştir. Bu çalışmalarda partikül madde (PM), PAH, hidrokarbonlar, UOB (uçucu organik bileşikler), karbon monoksit, azot dioksit, metaller ve çeşitli biyolojik kirleticiler incelenmiştir. Metro sistemleri ve raylı sistemlerde maruz kalınan iç hava kirleticileri bu konuda yapılmış çalışmalar incelenerek aşağıda özetlenmiştir.

### 1.1.Toz Maruziyeti ve Tozun Elementel Bileşimi

Metrolarda en önemli iç hava kirleticilerinden biri partikül maddedir. Metroda ve vagonlarda solunabilir partiküllerin başlıca kaynağı raylar üzerinde tekerleklerin sürtünme ve fren yapması gibi raylarda aşınmaya neden olan hareketlerdir. Bu partiküller büyük oranda demir içerir. Metrolar özellikle Fe (Demir), Cu (Bakır) ve Mn (Mangan) metalleri için en etkin kaynaktır [1]. Partiküllerin bir diğer kaynağı ise yolcuların kıyafetleri ve yolcuların peron içindeki hareketleridir. Ayrıca dış ortamda trafikten kaynaklanan çok küçük partiküller dış ortamdan metro tünellerine girerek birikebilmektedir. Seaton ve diğerleri [2] tarafından Londra'da yapılan bir çalışmada bir kişinin metrodada günde 2 saat geçirmesi durumunda PM<sub>2.5</sub> günlük maruz kalım miktarına 17 µg/m<sup>3</sup>'lük bir katkısı olduğu ve metro ile ulaşımın, günlük maruz kalınan PM<sub>2.5</sub> konsantrasyonunda sadece %3'lük bir artışa sebep olurken, PM<sub>2.5</sub> bileşiminde bulunan Fe (Demir) maruziyetinde %200 lük bir artışa, Mn (Mangan) ve Cu (Bakır) maruziyetinde ise sırasıyla %60 ve %40'luk artışa sebep olduğu tespit edilmiştir. Londra'da benzin katkı maddesinin (MMT) taksi sürücülerine ve metrodada seyahat edenlere etkisini görmek ve maruz kalınan Mn miktarlarının tespiti ve karşılaştırması için bir çalışma yapılmıştır [3]. Taksi sürücülerinin maruz kaldığı Mn konsantrasyonu 20 ng/m<sup>3</sup> iken metrodada seyahat edenlerin bu miktarın yaklaşık 7 kat fazlasına (137 ng/m<sup>3</sup>) maruz kaldığı görülmüştür. Ayrıca aynı karşılaştırma maruz kalınan PM<sub>2.5</sub> ve Toplam Partikül Madde (TPM) için yapılmış, metrodada seyahat edenlerin taksi sürücülerinin maruz kaldığı PM<sub>2.5</sub>'un 8 kat, TPM'in ise 12 kat fazlasına maruz kaldığı tespit edilmiştir.

Stockholm'de yapılan bir çalışmada şehrin merkezinde seçilen bir metro istasyonunda 2 hafta süreyle PM<sub>10</sub> ve PM<sub>2.5</sub> ölçümleri yapılmıştır. Hafta içi 07.00-19.00 saatleri arasında yapılan ölçümler sonucunda ortalama PM<sub>10</sub> ve PM<sub>2.5</sub> konsantrasyonları sırasıyla 470 ve 260 µg/m<sup>3</sup> olarak bulunmuştur. Hafta sonu yapılan ölçümlerde daha düşük konsantrasyon değerleri bulunmuş, bunun nedeni ise tren sefer sayısındaki azalma olarak belirtilmiştir. Ayrıca bu değerler dış ortam konsantrasyonları ile karşılaştırılmış ve metrodaki konsantrasyon değerlerinin dış ortamın 5-10 katı olduğu görülmüştür. Çalışma sırasında tünel duvarları ve raylar yıkanmış ve yıkama sonrası yapılan ölçümlerde PM<sub>10</sub> ve PM<sub>2.5</sub> konsantrasyonlarının sırasıyla %13 ve %10 oranında düştüğü tespit edilmiştir [4].

Meksika'nın başkenti Meksiko City'deki metro sisteminde yapılan bir çalışmada PM<sub>2.5</sub> ölçümleri yapılmış, ve sabah ve akşam yoğun olan saatlerde ortalama değeri 61 µg/m<sup>3</sup> olarak ölçülmüştür. Ayrıca partikülün kimyasal bileşimi de belirlenmiştir. Sabah ve akşam saatlerinde PM<sub>2.5</sub>'un en büyük bileşeninin, toplam kütesinin %10'unu oluşturan organik karbon olduğu tespit edilmiştir. Yüksek seviyelerde Fe (Demir), Cu (Bakır), Si (Silisyum) ve S (Kükürt) elementleri ölçülmüştür [5].

Montreal'da (Kanada) yapılan bir çalışmada da dış ortamı farklı trafik yoğunluklarında olan 3 metro istasyonunda solunabilir Mn (Mangan,  $Mn < 5 \mu g/m^3$ ) ve toplam Mn örnekleme yapılmıştır. Bu çalışmada benzin içinde bulunan MMT (metilsiklo pentadien mangan trikarbonil)'nin metrolara etkisi incelenmiştir. Mangan'ın metrolarda muhtemel kaynaklarının tünel yapı malzemeleri ve araçlar olabileceği, fakat asıl kaynağın filtrasyon uygulanmadan havalandırma sistemiyle dışarıdan metroya verilen hava olduğu belirtilmiştir. Trafik yoğunluğunun az olduğu bölgede düşük Mn konsantrasyonu ( $0.018-0.032 \mu g/m^3$ ), trafik yoğunluğunun fazla olduğu bölgede bulunan metroda ise yüksek Mn oranları ( $>0.05 \mu g/m^3$ ) tespit edilmiş ve metrolarda maruz kalınan hava kalitesinin dış hava kalitesiyle doğrudan ilişkili olduğu tespit edilmiştir [6].

1999 yılında Washington DC'de (USA) yapılan bir çalışmada metroda trenlerin sefer sıklıklarının partikül madde konsantrasyonunu etkilediği, PM konsantrasyonunun tren seferlerinin başladığı saat 05:30'dan itibaren yükselerek en yüksek konsantrasyonuna saat 08:00'de ulaştığı belirtilmiştir. Ayrıca Fe (Demir) ve NaCl (tuz) baskın elementler olarak saptanmıştır. Tuzun muhtemel başlıca kaynağı kış döneminde yağış sonrası yayılan tuzlar olabileceği, Fe kaynağı olarak ise trenlerin ray ve frenlerinden yayıldığı kabul edilmiştir [7].

Finlandiya – Helsinki'de metroda 2 hafta süre ile  $PM_{2.5}$  ölçümleri yapılmış ve partikül sayısı tespit edilmiştir.  $PM_{2.5}$  örnekleri elemental bileşiminin ve karbon oranının belirlenmesi amacıyla analiz edilmiştir.  $PM_{2.5}$  günlük ortalama konsantrasyonları 2 metro istasyonunda  $47 \pm 4$  ve  $60 \pm 18 \mu g/m^3$ , dış ortamda yapılan ölçümlerde ise  $19 \pm 6 \mu g/m^3$  ve  $21 \pm 4 \mu g/m^3$  olarak bulunmuştur. Siyah karbon konsantrasyonu  $6.3 \pm 1.8 \mu g/m^3$  olarak tespit edilmiştir.  $PM_{2.5}$  örneklerindeki en zengin element Fe; metroda  $29 \pm 7 \mu g/m^3$ , dış ortamda  $0.7 \pm 0.3 \mu g/m^3$  olarak belirlenmiştir. Diğer tespit edilen elementler ise Mn, Cr, Ni ve Cu'dur [8].

Mısır- Kahire'de yapılan bir çalışmada dış ortamda ve metro istasyonlarında TPM ölçümleri yapılmıştır. Ortalama TPM konsantrasyonu metrolarda  $938.3 \mu g/m^3$ , dış ortamdaki istasyonda  $447.3 \mu g/m^3$  olarak bulunmuştur. Yüksek konsantrasyon, yolcu aktiviteleri, trenin piston etkisi, platformdaki hava akımı ve taban temizliği ile ilişkilendirilmiştir [9]. Hongkong'ta yapılan bir çalışmada da raylı sistemlerde havalandırma ve havalandırma bulunmayan ulaşım tiplerinde  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  ölçümleri yapılmıştır. Metroda ortalama  $PM_{2.5}$  ve  $PM_{10}$  konsantrasyonları sırasıyla 33 ve  $44 \mu g/m^3$  bulunmuştur [10]. Çok benzer bir çalışma Guangzhou-Çin'de metroda yapılmış, ortalama  $PM_{2.5}$  ve  $PM_{10}$  konsantrasyonları sırasıyla 44 ve  $55 \mu g/m^3$  bulunmuştur [11]. Elektrikle çalışan trenlerin tünel hava kalitesine bir etkisi olmadığından düşük konsantrasyon değerlerinin görüldüğü belirtilmiştir.

Budapeşte'de metro istasyonlarında yapılmış bir çalışmada  $PM_{10}$  konsantrasyonu  $155 \pm 55 \mu g/m^3$ , Fe, Mn, Ni, Cu ve Cr konsantrasyonları ise dış ortama göre 5-20 kat daha yüksek bulunmuştur. Fe'nin %46'sının  $PM_{10-2.0}$  fraksiyonunda bulunduğu belirtilmiştir [12].

## 1.2. Biyolojik Partiküller

Biyolojik kökenli bakteri içeren partiküller genellikle bulaşıcı hastalıkların ajanları olarak bilinmektedir. Çeşitli araştırmalar havadaki mikroplara maruz kalmanın olumsuz sağlık etkileri ile ilişkili olduğunu göstermiştir. Bakteriler tahriş ve grip benzeri semptomlara neden olan endotoksin üretirler. Havada bulunan mantarın atopik rahatsızlıkları bulunan hastalarda önemli bir alerjen kaynak olduğu belirtilmiştir [13]. Hwang ve diğerleri [14] tarafından Seul, Kore'de yürütülen bir çalışmada 25 metro istasyonunda bakteri konsantrasyonları belirlenmiştir. İstasyonların derinliği, istasyonun yapım yılı, sıcaklık, nem, yolcu sayısı ve platform perde kapılarının kullanımı (platform screen door) gibi koşulların bakteri konsantrasyonu ile ilişkisi incelenmiştir. Havadaki toplam bakteri sayısı 4 istasyonda Kore iç ortam sınır değeri  $800 CFU/m^3$ 'ten yüksek, derinliği fazla olan istasyonlarda konsantrasyon daha yüksek, perde kapıların bulunduğu istasyonlarda konsantrasyonlar daha düşük bulunmuştur.

Taiwan'da yapılan bir çalışmada tren vagonlarında havadaki bioaerosollerin boyutsal ve mevsimsel dağılımı incelenmiş, havadaki ortalama bakteri ve küf konsantrasyonu sırasıyla  $417 CFU/m^3$  ve  $413 CFU/m^3$  olarak bulunmuştur. Bakteri ve küfün maksimum olduğu partikül boyut aralığı 1,1-2,1  $\mu m$  olarak tespit edilmiştir. Bakteri konsantrasyonunun sonbaharda en yüksek kışın ise en düşük değerlerde olduğu belirtilmiştir [15].

### 1.3.Metro Tozunun Toksisitesi

Londra metrosunda yapılan bir çalışmada filtre üzerinde toplanan tozlarda toksisite analizleri yapılmıştır. Alveolar epitelyum hücre (A549) kullanılarak yapılan testler sonucunda metro tozunun toksisitesinin titanyum dioksitten daha fazla, kuartzdan ise daha az olduğu bulunmuştur [16]. Metro tozunun DNA'ya zararlı etkisinin olup olmadığını belirlemek amacıyla Karlsson [17] tarafından yürütülen çalışmada insandan alınan akciğer hücreleri metro tozuna maruz bırakılmış ve DNA zararı analiz edilerek belirlenmiştir. Metro tozlarının akciğer hücreleri üzerinde toksik etki ve stres meydana getirdiği görülmüştür. Metro tozlarının atomik kompozisyonuna bakıldığında ise Fe (Demir)'in en baskın metal olduğu ve çoğunlukla magnetit ( $Fe_3O_4$ ) formunda olduğu görülmüştür. Elektron mikroskopuyla yapılan incelemelerde partikül ve akciğer hücreleri arasında etkileşim olduğu görülmüştür.

Ülkemizde metro sistemleri ve hafif metro sistemlerde iç hava kalitesi konusunda yapılan çok fazla çalışma mevcut olmasa da toz konsantrasyonu ve tozun elementel bileşiminin incelendiği çalışmalar mevcuttur. Onat ve Stakeeva [18] ve Şahin ve diğerleri [19] tarafından İstanbul metro ve hafif raylı sistemlerinde vagon ve peronlarında PM konsantrasyonunun ve tozun elementel bileşiminin belirlenmesi amacıyla bir çalışma yürütülmüştür. Bu çalışmalar ayrıntılı olarak aşağıda verilmiştir.

## 2. YÖNTEM

### 2.1. Çalışmanın yapıldığı istasyonlar ve çalışmanın kapsamı

Çalışmada Aksaray-Havalimanı Hafif metro hattı (Havalimanı, Otogar, Aksaray istasyonları) ve Taksim- 4. Levent metro hattında (4.Levent, Şişli, Taksim istasyonları) peronlarda toplam 6 adet istasyonda Eylül 2007 – Ocak 2008 tarihleri arasında 15'er gün 24 saat süreyle  $PM_{2.5}$  ve  $PM_{10}$  ölçümleri yapılmıştır. Peronlarda ayrıca 8 farklı boyutta (0,4-10 $\mu$ m) partikül madde toplanmış ve boyut dağılım analizi ve metal içeriği belirlenmiştir. Peron ölçümleri tamamlandıktan sonra her iki metro hattının tren vagonlarında  $PM_{2.5}$  konsantrasyonları ölçülmüştür. Ayrıca trenlerin makinist kabinlerinde  $PM_{2.5}$  konsantrasyonları belirlenmiştir.

### 2.2 Çalışmada kullanılan cihazlar ve ölçüm yöntemi

İstasyon peronlarındaki toz miktarını standartlara uygun koşullarda belirlemek ve cihazların güvenliğini sağlayabilmek için sabit bir platform yapılmış, Şekil 1'de görüldüğü gibi, 1,5 m yükseklikte 80x80cm ebatlarında yapılan bu platforma cihazlar yerleştirilmiştir. Her istasyonda bir hafta (7 gün) süreyle  $PM_{10}$  ve bir hafta (7 gün) süreyle MIE DataRAM 2000 (Thermo A.Ş.) cihazı ile  $PM_{2.5}$  ölçümleri yapılmış ve 15 dakikalık ortalama konsantrasyonları 24 saat boyunca sürekli kaydedilmiştir.



Şekil 1. İstasyon Peronlarına yerleştirilen PM ölçüm platformu.

Metro İstasyonlarında peronlara yerleştirilen platformlara, ayrıca PM boyut analizi yapmak için 8-Stage Cascade Impacter -Kaskatlı toplayıcı (Thermo A.Ş.) PM cihazı yerleştirilmiştir. Cihaz toplam 8 kademeden oluşmaktadır. Her bir kademeye yerleştirilen filtreler üzerinde toplanan tozlar gravimetrik olarak tayin edilmiştir. Filtreler cihaza yerleştirilmeden önce ve toz toplandıktan sonra 25°C sıcaklık ve %50 nemin bulunduğu laboratuvar koşullarında en az 48 saat sabit tartıma getirilmiş ve 0,0000 gr hassasiyetli terazi ile filtre boş ve dolu iken tartılmıştır. Filtreler üzerinde toplanan toz miktarı belirlenmiş ve kütlese ve hacimsel konsantrasyon hesaplanmıştır. 8-Stage PM toplayıcı ile toplanan toz yüklü filtreler CEM Mars X-Press Cihazı ile EPA Method 3052 (Microwave Asisted Acid Digestion) Metodu temelinde ayrıştırılmış ve elde edilen çözeltiler 50 ml'ye distile su ile tamamlanmış ve metal analizleri yapılmak üzere -4 °C'de buzdolabında muhafaza edilmiştir.

Ayrıca çalışmada pDR 1200 portatif toz ölçüm cihazı kullanılarak yolcuların ve makinistin toz maruziyetini belirlemek amacıyla yolcuların seyahat ettiği tren vagonunda ve makinist kabininde PM<sub>2.5</sub> ölçümleri yapılmıştır.

### 3.SONUÇ

Metro yolcularının seyahatleri esnasında partikül maddeye maruz kaldığı noktalar temel olarak istasyon peronları ve tren vagonlarıdır. Çalışanlar ise (peron görevlileri ve makinistler) istasyon peronlarında ve tren makinist kabininde çalışma vardiyaları süresince partikül maddeye maruz kalmaktadır. Bu çalışma kapsamında İstasyon Peronları, Tren içi ve Makinist kabininde PM konsantrasyon ölçümleri yapılmıştır. İstasyon peronlarında PM<sub>10</sub> ve PM<sub>2.5</sub> konsantrasyonları ortalama değerleri belirlenirken tren çalışma süresi olan (06:00-24:00) saatleri arasındaki ölçümler dikkate alınmıştır. Metro yolcularının PM maruziyetleri metroda seferlerinin yapıldığı zaman aralığında meydana geldiğinden bu süre esnasında yapılan ölçümlerin ortalaması alınarak tespit edilmiştir.

#### İstasyon Peronları

Aksaray- Havalimanı Hafif Metro Hattında çalışmanın yürütüldüğü dönemde 18 adet istasyon mevcut olup ortalama sefer süresi 32 dakikadır ve bu hatta günde 240.000 yolcu taşınmaktadır. Bu hat üzerinde seçilen 3 istasyonda yapılan ölçümlere göre ortalama PM<sub>10</sub> konsantrasyonu 59 ile 113 µg/m<sup>3</sup> arasında değişim gösterirken PM<sub>2.5</sub> konsantrasyonu 48 ile 90 µg/m<sup>3</sup> arasında bulunmuştur. En yüksek PM<sub>10</sub> konsantrasyonu Aksaray Metro istasyon peronunda, PM<sub>2.5</sub> ise Otogar ve Aksaray Metro istasyon

peronlarında yüksek konsantrasyonlarda gözlenmiştir. Metro istasyon peronlarında PM konsantrasyonlarının sabah saat 06:00'dan 12:00'a kadar olan süreçte ve akşam 18:00'dan 22:00'a kadar olan süreçte arttığı, Havalimanı metro istasyonu peronunda ise PM ölçümleri incelendiğinde Cuma akşam saatlerinde (18:00) başlayıp Cumartesi akşam saatlerinde (18:00) sona eren ve 60 ile 140  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  arasında değişen bir  $\text{PM}_{2,5}$  konsantrasyon değerleri gözlenmiştir (Onat ve Stakeeva, 2012).

**Tablo 1.** M1 Aksaray-Havalimanı Hafif Metro Hattı İstasyon Peronlarındaki Ortalama Partikül Madde Konsantrasyonu

İstasyon	İstasyon derinlik	$\text{PM}_{10}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	$\text{PM}_{2,5}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
		Ortalama $\pm$ S.Sapma	Ortalama $\pm$ S.Sapma
		06:00-24:00	06:00-24:00
Havalimanı	Tünel	68,6 $\pm$ 26,7	49,3 $\pm$ 14,1
Otogar	Hemzemin	63,2 $\pm$ 35,9	98,3 $\pm$ 26,6
Aksaray	Tünel	116,9 $\pm$ 27,1	89 $\pm$ 29,3
Taksim	35	220,6 $\pm$ 60,8	181,7 $\pm$ 70,4
Şişli	28	152,5 $\pm$ 58,6	106,8 $\pm$ 35,2
4.Levent	20	90,7 $\pm$ 30,5	105,3 $\pm$ 45,4

Yine çalışmanın yürütüldüğü tarihlerde 8,5 km uzunluğa sahip Taksim – 4.Levent Metro Hattında 6 adet istasyon mevcuttur. Her bir metronun ortalama sefer süresi 12 dakika olup bu hatta günlük 185.000 yolcu taşınmaktadır. Bu hat üzerindeki istasyonlarda ortalama  $\text{PM}_{10}$  konsantrasyonu 85,7 ile 240,9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  arasında değişim gösterirken  $\text{PM}_{2,5}$  konsantrasyonu 104,8 ile 199  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  arasında değerler almıştır. En yüksek  $\text{PM}_{10}$  ve  $\text{PM}_{2,5}$  konsantrasyonu Taksim Metro istasyon peronunda ölçülmüştür. Tablo 2'de istasyon peronlarındaki  $\text{PM}_{10}$  konsantrasyonları, istasyonlara en yakın konumda bulunan İstanbul Büyükşehir Belediyesi dış ortam hava kalitesi istasyonlarında ölçülen  $\text{PM}_{10}$  konsantrasyonları ile karşılaştırılmıştır. Tablo 2'ye göre %99 anlamlılıkla ( $p=0,01$ ) en yüksek korelasyon (0,96) Otogar metro istasyonunda ölçülen  $\text{PM}_{10}$  ile Esenler Hava Kalitesi Ölçüm İstasyonunda ölçülen  $\text{PM}_{10}$  arasında olduğu gözlenmiştir. Otogar istasyonu dış ortama açık Hemzemin bir istasyon olduğundan ve dış ortam hava kalitesi istasyonu Otogar metro istasyonuna çok yakın bir noktada olduğundan korelasyon yüksek çıkmıştır.

**Tablo 2.** Metro İstasyonları Peron içi ve Dış Ortam Hava Kirliliği Ölçüm İstasyonları  $\text{PM}_{10}$  Konsantrasyonları arasındaki oran ve korelasyon.

Metro İstasyonu	Dış Ortam İstasyonu	Korelasyon (R)	Metro Peron içi / Dış Ortam Oranı
Havalimanı	Yenibosna	0,70*	0,9 $\pm$ 0,6
Otogar	Esenler	0,96**	1,0 $\pm$ 0,1
Aksaray	Saraçhane	0,79*	1,3 $\pm$ 0,2
4.Levent	Sarıyer	0,60*	1,8 $\pm$ 0,8
Şişli	Sarıyer	0,89**	4,5 $\pm$ 1,4
Şişli	Beşiktaş	0,55	2,2 $\pm$ 0,8
Taksim	Beşiktaş	0,88**	3,2 $\pm$ 0,7
Taksim	Saraçhane	0,77*	4,7 $\pm$ 1,6

\* $p=0,05$ , \*\* $p=0,01$

4.Levent-Taksim Metro hattında dış Ortam  $\text{PM}_{10}$  ölçümleri ile Metro içi  $\text{PM}_{10}$  ölçümleri arasındaki oran 1,7 ile 4,7 arasında değişim göstermiştir (Tablo 2). Bu değişimin Metro İstasyon peron derinliği ile ilişkili olduğu söylenebilir. Dış ortamın yaklaşık 4,7 katı  $\text{PM}_{10}$  konsantrasyonu ölçülen Taksim metro istasyonu 35 m ile en derin istasyon olup en yüksek günlük ortalama  $\text{PM}_{10}$  (240,9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) ve  $\text{PM}_{2,5}$  (199  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) konsantrasyonları bu istasyonda ölçülmüştür.



### Tren vagonları

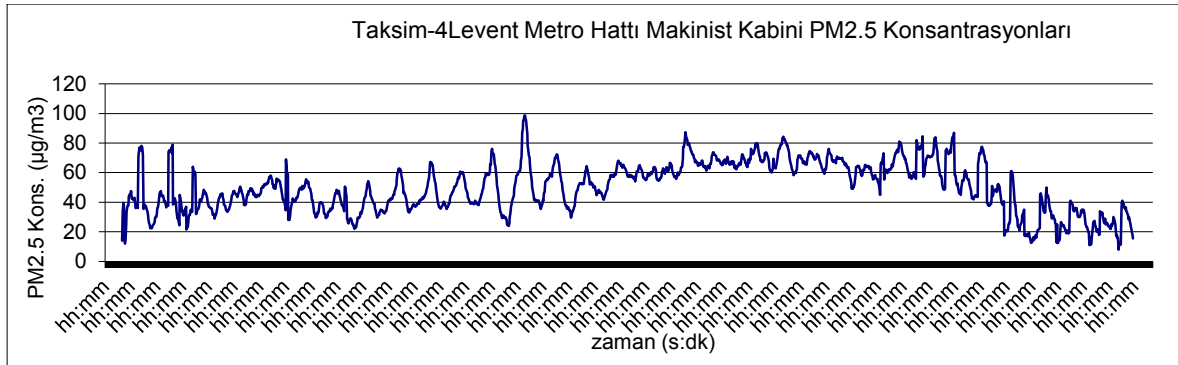
Tren vagonları içindeki yolcuların seyahat esnasında maruz kaldıkları PM<sub>2.5</sub> konsantrasyon ölçümleri her iki hatta da sabah, öğle ve akşam bir tren seferi boyunca yapılmış ve 3 gün tekrarlanmıştır. Sabah ölçümleri saat 07:30-09:30 arasında, öğle ölçümleri saat 12:00-14:00 arasında ve akşam ölçümleri ise saat 18:00-20:00 arasında yapılmıştır. 30 saniye ortalama PM<sub>2.5</sub> konsantrasyon kayıtlarından sabah, öğle ve akşam ortalamaları hesaplanmış ve her iki hatta sefer yapan trenlerin içerisindeki genel ortalama konsantrasyon belirlenmiştir (Tablo 3).

**Tablo 3:** Tren vagonları ortalama PM<sub>2.5</sub> Konsantrasyonları

Metro Hattı	PM <sub>2.5</sub> Konsantrasyonu (µg/m <sup>3</sup> )			
	Sabah	Öğle	Akşam	Günlük Ortalama
Aksaray-Havalimanı	60	53	106	73
Taksim-4.Levent	41	31	115	62

### Tren Makinist Kabin İçi

Her 2 hatta sefer yapan trenlerin makinist kabinlerinde PM<sub>2.5</sub> ölçüm cihazı makinistin tren kullanımı esnasındaki konumu dikkate alınarak solunum mesafe yükseklğine kabin ön kısmına monte edilmiştir. 30 saniye ortalama PM<sub>2.5</sub> konsantrasyon kaydı makinistin çalışma periyodu boyunca (08:00-24:00) 3 gün yapılmış ve ortalama PM<sub>2.5</sub> konsantrasyonları Aksaray Havalimanı hattında 73 µg/m<sup>3</sup>, 4. Levent-Taksim Hattında 50 µg/m<sup>3</sup> olarak bulunmuştur. Şekil 2'de 4. Levent-Taksim Hattı makinist kabini içerisinde PM<sub>2.5</sub> konsantrasyon değişimi görülmektedir.



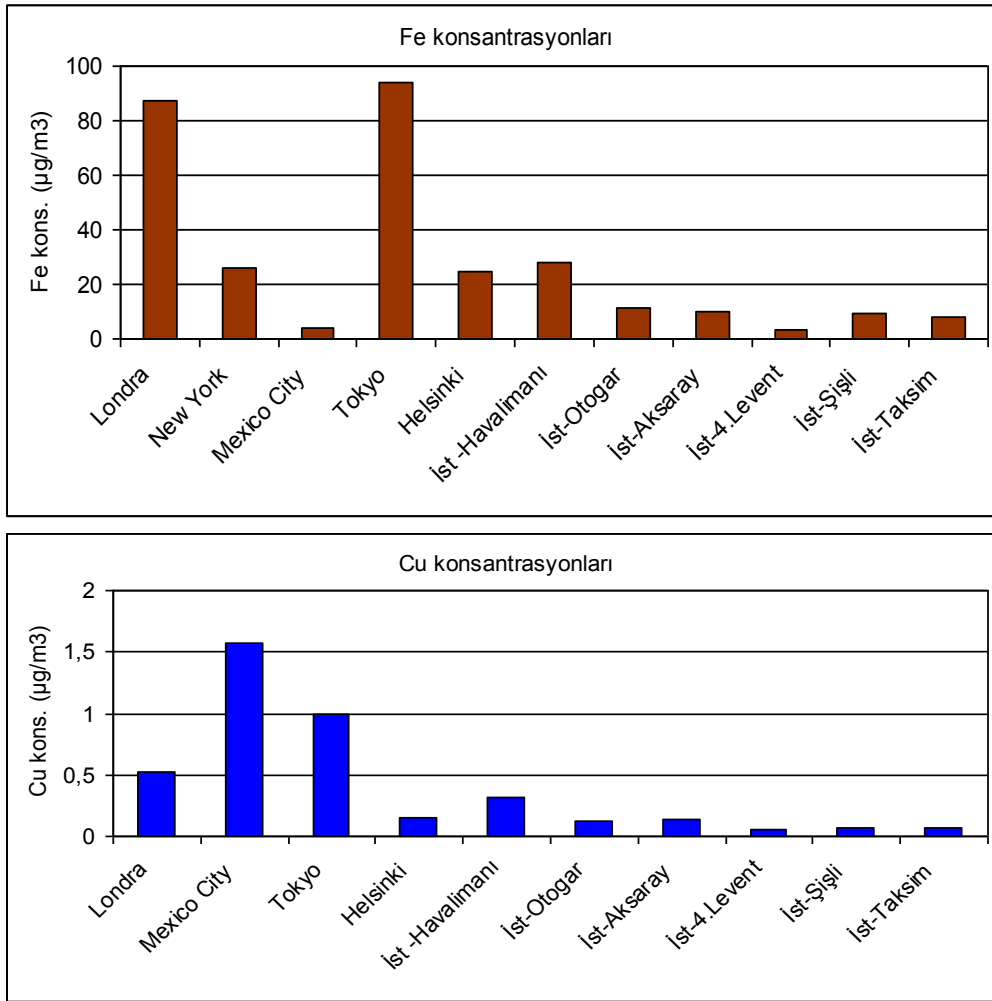
**Şekil 2.** Tren Makinist Kabini içerisindeki PM<sub>2.5</sub> Konsantrasyonunun tren çalışma süresince değişimi

### Elementel Bileşim

Çalışmada 8-Kademeli PM örnekleme cihazı kullanılarak toplanan toz örneklerinde Fe ve Cu konsantrasyonları belirlenmiş ve Tablo 5'te verilmiştir ve görüldüğü gibi Fe ve Cu değerleri istasyonlara göre farklılık göstermektedir. Aksaray- Havalimanı hafif metro istasyonundaki metal konsantrasyonlarının 4.Levent-Taksim metro hattından daha yüksek olduğu görülmektedir. Özellikle en yüksek metal oranı Havalimanı istasyonunda bulunmuştur. Bunun nedeni dış ortam hava kalitesinden etkilenme olarak açıklanabilir. Atatürk Havalimanı trafik yoğunluğu bakımından dünyanın sayılı havalimanlarından biridir. Günde ortalama 350 uçak iniş yapmaktadır. Hava taşıtlarının yakıtları içinde bulunan metal içeren katkı maddeleri egzoz gazı emisyonları içinde dış ortama verilmektedir. Uçağın iniş-kalkış döngüsünde geçirdiği süreçler (seyir yüksekliğinden havaalanına doğru yaklaşma, iniş, yolcu kapısına doğru yerde hareket, diğer bir uçuş için piste doğru hareket, kalkış, tırmanma) esnasında önemli miktarlarda egzoz gazı emisyonu havaya verilmekte ve dış ortam hava kalitesi kötü yönde etkilenmektedir [20].

**Tablo 5:** Metro İstasyonları peron içi Solunabilir PM içerisindeki Metal içeriği.

	Fe		Cu	
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	%
Havalimanı	28,2	25,6	0,32	0,29
Otogar	11,6	11,3	0,13	0,13
Aksaray	10,3	11,2	0,14	0,16
4.Levent	3,5	7,4	0,06	0,12
Şişli	9,4	19,7	0,07	0,14
Taksim	7,81	10,1	0,07	0,1

**Şekil 3.** İstanbul metrosu ve yurtdışındaki çeşitli metrolardaki partikül maddenin ortalama Fe ve Cu konsantrasyonları ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

Aksaray-Havalimanı hattında, Otogar ve Aksaray istasyonlarının metal oranları 4.Levent-Taksim hattı ile karşılaştırıldığında Havalimanı kadar olmasa da daha yüksek bulunmuştur. Bunun sebebi iki metro hattındaki ray-peron arasındaki mesafe farkı olarak açıklanabilir. Aksaray-Havalimanı hattının ray-peron mesafesi daha kısadır (2.65 m). Bu nedenle trenin yavaşlaması sırasında sürtünme ile havaya saçılan partiküller peron seviyesine daha çabuk ulaşarak örnekleme sisteminde daha fazla metal birikimine sebep olmuş olabilir.

Partikül maddenin ortalama metal konsantrasyon sonuçları Şekil 3'de yurtdışındaki çeşitli metrolardaki konsantrasyonlarla karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Havalimanı istasyonu dışında diğer

istasyonlardaki Fe konsantrasyonu 3.5-11.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  arasında değişmektedir. Bu değerler Londra ve Tokyo metrolarıyla karşılaştırıldığında oldukça düşüktür. Londra ve Tokyo'da Fe oranının çok yüksek olmasının nedeni iki metro sisteminin de ortak özellikleri ile açıklanabilir. İki sistemde çok eskidir ve fren sistemleri de aynıdır [21]. Fe partiküllerinin en önemli kaynağı trenin raylar üzerindeki hareketidir. Bu nedenle fren sistemi seçimi metrolardaki Fe oranını önemli ölçüde etkilemektedir. New York metrosu da eski olmasına rağmen fren sisteminin farklı olmasından dolayı daha düşük Fe oranına sahiptir. Bir diğer önemli noktada Mexico City'deki düşük Fe oranıdır. Tekerlek sisteminin lastik olması Fe saçılımını büyük oranda engellemiştir. Aksaray-Havalimanı hattındaki Cu değerleri diğer metrolarla benzerlik göstermektedir. 4.Levent-Taksim hattında ise daha düşük seviyede Cu bulunmuştur.

#### 4.DEĞERLENDİRME

İstanbul metrosundaki partikül maddenin yolcuların günlük maruziyetlerine katkısı dış ortamla karşılaştırıldığında daha fazladır. Dış ortamdaki yüksek PM'nin metro içinde en az 2 kat fazlası olduğu sonucu dikkate alındığında metro hava ortamının günlük toz maruziyetine olan katkısı ve sağlık risklerinin değerlendirilmesi önem taşımaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken nokta partikül maddeye karşı hassasiyeti olan yolcuların (çok genç, çok yaşlı ve solunum sistemi ile ilgili rahatsızlığı bulunan yolcular) yüksek toz oranlarından kısa vadede daha fazla etkileneceğidir. Çalışan personel ise daha uzun süre metroda zaman geçirmektedir. Maruziyetin etkilerini değerlendirirken çalışan personeli tünelde bakım ve onarım bölümünde çalışan işçiler, makinistler ve istasyon peron görevlileri olarak ayırmak daha doğru bir yaklaşım olacaktır.

Tünel tozlarının özelliklerinden biri de küçük boyutlu (ince) partiküllerin oranının fazla olmasıdır. Solunabilir partikül maddenin yaklaşık 5  $\mu\text{m}$ 'ye kadar olan kısmı burun ve boğazda tutulmakta 5  $\mu\text{m}$ 'nin altındaki boyutlar ise nefes borusundan bronşlara ve akciğerlere kadar ulaşabilmektedir. Bu nedenle toksisitesinin ve muhtemel sağlık riskinin fazla olması nedeniyle 5  $\mu\text{m}$ 'nin altındaki partiküllerin içeriğinin bilinmesi çok önemlidir. İstanbul metrosunda yürütülen çalışmada Aksaray – Havalimanı hattındaki tozların içerisindeki Fe ve Cu konsantrasyonunun sırasıyla % 52 ve % 67,8'i, 4.Levent – Taksim hattındaki tozların içerisindeki Fe ve Cu konsantrasyonunun ise sırasıyla % 54 ve % 67'si 5  $\mu\text{m}$ 'nin altındaki partikül madde içinde bulunduğu belirlenmiştir.

**Tablo 6.** Farklı Metro ve raylı sistemlerde platform ve vagonlarda PM<sub>2.5</sub> konsantrasyonunun karşılaştırması

Şehir	İstasyon	Mikro çevre	Ölçüm süresi	PM <sub>2.5</sub> ort.kons. ve standart sapma ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Kaynak
İstanbul	M1 hattı*	Vagon içi	1 trip (35-45 dk)	72.9	[18]
	M2 hattı**	Vagon içi	1 trip (20-30 dk)	61.2	
	M1 hattı (3 stations)	Platform	18 saat	49.3(20.5-136.7)	
				98.3(14.5-291.4)	
				88.8(10-372.8)	
	M2 hattı (3 stations)	Platform	18 saat	181.7(26.7-1014.7)	
			106.8(30.9-391.6)		
	M1 hattı	Makinist kabini	12 saat	73.5 (20.7-138)	
			M2 hattı	16 saat	49.5 (10.1-85.4)
Stockholm	Mariatorget	Platform	Hafta içi	199±104	[4]
			Hafta sonu	148±82	
London		Platform	8 saatlik vardiya	270-480	[2]
		Vagon içi	8 saatlik vardiya	130-200	
Mexico city		Kişisel maruziyet	Yaklaşık 1 saat	61 (31-96)	[5]

Helsinki	İstasyonlar	Gün boyu	47±4 - 60±18	[8]
Hong Kong	Vagon içi	25-50 dk	33 (21-48)	[10]
Guangzhou	Vagon içi	2.5 saat	44	[11]

M1 hattı: Aksaray Havalimanı Hafif Metro hattı  
M2 hattı: 4.Levent-Taksim metro hattı

Aksaray-Havalimanı hattı ile 4.Levent-Taksim hattında istasyon peronu, kabin ve tren içinde yapılan PM<sub>2.5</sub> ölçümlerinin sonuçları ve yurtdışındaki farklı metrolardaki ölçüm sonuçları ile karşılaştırması Tablo 6'da verilmiştir. Tablo 6'dan görüldüğü gibi toz konsantrasyonları her metroda farklılık göstermektedir. Metronun yaşı, derinliği, fren ve havalandırma sisteminin farklı özelliklere sahip olması toz konsantrasyon miktarlarını etkilemektedir. Hong Kong metro sistemi, lastik tekerlek ve klima donanımları sayesinde en düşük PM<sub>2.5</sub> konsantrasyonuna (33 µg/m<sup>3</sup>) sahiptir. Mexico City (61 µg/m<sup>3</sup>) ve New York (62 µg/m<sup>3</sup>) metrolarında benzer konsantrasyonlar ölçülmüştür. Mexico City'de doğal havalandırma olduğu halde tekerleklerin lastik olması toz oranının düşmesini sağlamıştır. New York'ta ise çelik tekerlekler ve klima sistemi mevcuttur. Sonuç olarak metroda uygun fren ve havalandırma sistemleri seçildiğinde toz oranları da azalmaktadır. Toz oranı yüksek olan Londra (270-480 µg/m<sup>3</sup>) ve Stockholm (165-258 µg/m<sup>3</sup>) metrolarında ise eski tip fren sistemi (blok) ve doğal havalandırma mevcuttur.

Metrolarda partikül madde ve hava kirlenmesinin etkilerini azaltmak mümkündür. Ancak güç olan, metal tekerlekler ve tren raylarının olduğu metro sistemlerinde partikül madde seviyesinin nasıl azaltılacağıdır. Eski sistemde yapılmış metrolarda trenin raylar üzerindeki hareketinden kaynaklanan partiküllerin azaltılması için elektrikli fren sistemleri, kauçuk lastikler ve klima sistemlerinin kullanımı gibi değişiklikler yapılabilir. Elektrikli fren sistemi ve kauçuk-lastik tekerlek kullanımı partikül madde miktarını azalttığı gibi metroda gürültü seviyesinin azalmasını da sağlar. Fakat bu yeniliklerin eski metro sistemlerine uygulanması her zaman ekonomik ve teknolojik açıdan uygun olmamaktadır. Yüksek performanslı klima sistemlerinin kullanımı, partikül madde gideriminde çok etkili bir yöntemdir. Bu sistemler hem metrodaki partikül madde seviyesinin düşmesini hem de yeterli derecede ortam sıcaklığı sağlayarak yolcularında rahat seyahat etmesini sağlarlar. Bu sistemlerin en büyük dezavantajı ise yüksek enerji tüketmesidir. Trenlerin bakım ve onarımlarının yapıldığı bölgelerde tozun birikebileceği yerlerin temizlenmesi ve genel olarak tünel temizliğinin düzenli olarak yapılması metro sistemlerindeki partikül maddenin kontrolünü sağlayacaktır.

## KAYNAKLAR

- [1] CHILLRUD, S.N., EPSTEIN,D., ROSS, J.M., SAX, S.N., PEDERSON, D., SPENGLER, J.D., KINNEY, P., 2004. Elevated airborne exposures of teenagers to manganese, chromium, and iron from steel dust and New York city's subway system. Environ. Sci. Technol. 38, 732-737.
- [2] SEATON, A., CHERRIE, J., DENNEKAMP, M., DONALDSON, K., HURLEY, J.F., TRAN, C.L., 2005. The London underground:dust and hazards to health. Occup. Environ. Med.
- [3] PFEIFFER, G.D., HARRISON, R.M., LYNAM, D.R., 1996. Personal exposures to airborne metals in London taxi drivers and office workers in 1995 and 1996. The Science and Total Environment 235 (1-3), 253-260.
- [4] JOHANSSON, CH., JOHANSSON, P.-A., 2003. Particulate matter in the underground of Stockholm. Atmospheric Environment 37, 3-9.
- [5] GOMEZ-PERALES, J.E., COLVILE, R.N., NEUWENHUIJSEN, M.J., BREMAUTNZ, A.F., AVEDOY, G.V.J., FIGUEROA, V.H.P., JIMENEZ, S.B., LOPEZ, E.B., MANDUJANO, F., CABANILLAS, R.B., SEGOVIA, E.O., 2004. Commuters' exposure to PM<sub>2.5</sub>, CO and Benzene in public transport in the metropolitan area of Mexico City. Atmospheric Environment 38, 1219-1229.



- [6] BOUDIA, N., HALLEY, R., KENNEDY, G. 2006, Manganese concentrations in the air of the Montreal (Canada) subway in relation to surface automobile traffic density. *Science of the Total Environment* 366, 143-147.
- [7] BIRENZVIGE, A., EVERSOLE, J., SEAVER, M., FRANCESCO, S., VALDES, E., KULAGA, H., 2003. Aerosol characteristics in a subway environment. *Aerosol Science and Technol.* 37:210-220.
- [8] AARNIO, P., YLI-TUOMI, T., KOUSA, A., MAKELA, T., HIRSIKKO, A., HAMERI, K., RAISANEN, M., HILLAMO, R., KOSKENTALO, T., JANTUNEN, M., 2005. The concentrations and composition of and exposure to fine particles (PM<sub>2.5</sub>) in the Helsinki subway system. *Atmospheric Environment* 39. 5059-5066.
- [9] AWAD, A.H.A. 2002, Environmental study in subway metro stations in Cairo, Egypt. *Journal of Occupational Health* 44, 112-118.
- [10] CHAN, L.Y., LAU, W.L., LEE, S.C., CHAN, C.Y., 2002a. Commuter exposure to particulate matter in public transportation modes in Hong Kong. *Atmospheric Environment* 36, 3363-3373
- [11] CHAN, L.Y., LAU, W.L., LEE, S.C., CHAN, C.Y., 2002b. Exposure level of carbon monoxide and respirable suspended particulate in public transportation modes while commuting in urban area of Guangzhou China. *Atmospheric Environment* 36, 5831-5840.
- [12] SALMAA, I., WEIDINGER, T., MAENHAUT, W. Time-resolved mass concentration, composition and sources of aerosol particles in a metropolitan underground railway station *Atmospheric Environment* 41 (2007) 8391-8405.
- [13] GOLDMAN, D., HUFFNAGLE, G., 2009. Potential contribution of fungal infection and colonization to the development of allergy. *Medical Mycology*, 1-12.
- [14] HWANG, S. H., YOON, C. S., RYU, K.N., PAIK, S.Y., CHO, J.H. 2010, Assessment of airborne environmental bacteria and related factors in 25 underground railway stations in Seoul, Korea *Atmospheric Environment* 44, 1658-1662.
- [15] WANG, Y., WANG, C., HSU, K. 2010, Size and seasonal distributions of airborne bioaerosols in commuting trains *Atmospheric Environment* 44, 4331-4338
- [16] SEATON, A., CHERRIE, J. 2005 The London underground: dust and hazards to health. *Occupational and Environmental Health*. 62, 355-362.
- [17] KARLSSON, H.L., LJUNGMAN, A.G. 2006, Comparison of genotoxic and inflammatory effects of particles generated by wood combustion, a road simulator and collected from street and subway. *Toxicology letters* 165, 203-211.
- [18] ONAT, B., STAKEEVA, B. 2012. Assessment of fine particulate matters in the subway system of Istanbul. *Indoor and Built Environment*. DOI: 10.1177/1420326X12464507.
- [19] ŞAHİN, Ü., ONAT, B., STAKEEVA, B., CERAN, T., KARİM, P. 2011, PM<sub>10</sub> concentrations and the size distribution of Cu and Fe-containing particles in Istanbul's subway system, *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 17, 48-53, DOI:10.1016/j.trd.2011.09.003
- [20] NEMLİOĞLU, S., DEMİR, G., BAYAT, C. 2000, İstanbul Atatürk Havalimanı örneğinde hava taşıtı kökenli hava kirliliği. GAP Çevre Kongresi, 16-18 Ekim 2000, Şanlıurfa.
- [21] İstanbul Metrosunda Çalışanların Ve Yolcuların Maruz Kaldığı Partikül Madde'nin Konsantrasyon, Boyut Dağılımı Ve Kimyasal Özelliklerinin Belirlenmesi, Araştırma Raporu, İstanbul Ulaşım A.Ş., 2008.

## ÖZGEÇMİŞ

### Burcu ONAT

1973 yılı İstanbul doğumludur. 1994 yılında İTÜ Çevre Mühendisliği Bölümünü bitirmiştir. Aynı üniversiteden 1998 yılında Yüksek Mühendis, İstanbul Üniversitesinden 2004 yılında Doktor unvanı almıştır. 1994-1995 yılları arasında proje mühendisi olarak, 1995-2000 yılları arasında İstanbul Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmıştır. 2000-2004 yılları arasında Azerbaycan-Bakü'de yürütülen Şahdeniz Projesinde Çevre Uzmanı ve Kalite Güvence Mühendisi olarak görev almıştır. 2006-2014 yılları arasında İÜ Çevre Mühendisliği Bölümünde Yrd. Doç., 2014 yılından itibaren Doçent ünvanlı olarak görev yapmaktadır. İç ve dış ortam Hava Kirliliği, Kalite Güvence, Çevre Yönetim Sistemleri konularında çalışmaktadır.

