

İSTANBUL METROSUNDA SOLUNABİLİR PARTİKÜL MADDE VE ELEMENTEL BİLEŞİMİ

Burcu ONAT^{1(*)}, Ülkü ŞAHİN¹, Ali KAYA², Pınar KARİM², Tuba CERAN²

¹İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Avcılar/İstanbul

²İstanbul Ulaşım Sanayi ve Ticaret A.Ş., Ferhatpaşa Metro Tesisleri, 34200 Esenler, İstanbul

ÖZET

Bu çalışmada İstanbul'da bulunan Taksim – 4.Levent Metro Hattı ile Aksaray – Havalimanı Hafif Metro Hattı'nda yer alan toplam 6 adet kapalı metro istasyonunda toz örneklemeleri yapılarak toz içindeki Fe, Cu ve Mn konsantrasyonları belirlenmiştir. Metrolarda tekerlek, fren ve havalandırma sistemlerindeki farklılıklar tünel tozunun elementel bileşimini etkilemektedir. Tünel tozunun toksisitesi dış ortam havasındaki toza göre daha yüksektir. Bunun nedeni tünel tozu içinde yüksek oranda Fe bulunmasıdır. Bu çalışmada metro istasyon peronlarında toz örnekleme 8-Kademeli PM toplama cihazı kullanılarak yapılmış ve toz örnekleri içerisindeki metal konsantrasyonları belirlenmiştir. Camyünü ve quartz filtreler üzerine toplanan 8 farklı boyuttaki PM örneklerine mikrodalga ayrıştırma ünitesi kullanılarak HNO₃, H₂O₂, HCl ve HF ilavesi ile toplam üç aşamalı bir parçalama işlemi uygulanmıştır. Çözeltiler 50 ml'ye destile su ile tamamlanmış ve polipropilen kaplara konmuştur. Atomik Absorbsiyon Spektrometre Cihazı ile Fe, Cu ve Mn konsantrasyonları tespit edilmiştir. Taksim – 4.Levent Metro Hattı ile Aksaray – Havalimanı Hafif Metro Hattı'ndaki konsantrasyonlar, Fe; 3.5-28 µg m⁻³, Cu; 0.06-0.32 µg m⁻³ ve Mn; 0.02-0.07 µg m⁻³ olarak bulunmuştur. Aksaray – Havalimanı hattındaki tozların içerisindeki Fe ve Cu konsantrasyonunun sırasıyla % 52 ve % 67,8'sinin, 4.Levent – Taksim hattındaki tozların içerisindeki Fe ve Cu konsantrasyonunun ise sırasıyla % 54 ve % 67'sinin 4,7 µm'nin altındaki PM boyutlarında bulunduğu tespit edilmiştir.

ABSTRACT

In this study, the concentrations of Fe, Cu and Mn in tunnel dust have determined at six subway stations in Taksim-4.Levent subway line and Aksaray-Havalimanı subway line. The elemental composition of tunnel dust can be affected due to different material of the wheel, ventilation levels and breaking systems. The dust in the metro systems can be more toxic than ambient airborne particles. The higher toxicity may be due to the higher iron content. The tunnel dust sampling was performed by eight-stage cascade impactor. The particle size distribution and heavy metal content were determined. Glassfiber and quartz filters were used for sampling. Microwave acid digestion was processed with 3-stage digestion addition with HNO₃, H₂O₂, HCl ve HF chemicals. After digestion, the solution was put into polypropylene holders completed to 50 ml with distilled water. Fe, Cu and Mn concentrations were determined using Atomic Absorption Spectrometry. The concentrations were observed between 3.5-28 µg m⁻³ for Fe, 0.06-0.32 µg m⁻³ for Cu and 0.02-0.07 µg m⁻³ for Mn. The 52% of Fe and 67.8% of Cu concentration were determined in particle size smaller than 4.7 µm tunnel dust of Aksaray-Havalimanı subway line. The 54% of Fe and 67% of Cu concentration

* bonat@istanbul.edu.tr

were determined in particle size smaller than 4.7 µm tunnel dust of Taksim-4.Levent subway line.

ANAHTAR SÖZCÜKLER

Metro Sistemleri, Solunabilir Partikül, Boyut Dağılımı, Eser Element

GİRİŞ

Metro sistemleri, 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. İstanbul'da trafik yükünün artması farklı ulaşım türlerinin kullanılması ihtiyacını doğurmuş, bu da metro gibi ulaşım araçlarının tercih edilmesine neden olmuştur. Dünyada ilk metro sistemleri 19.yy'ın ortalarında Londra ve New York'ta işletilmeye başlamıştır. İstanbul'da ise Aksaray-Havalimanı hafif metro ve 4.Levent-Taksim metro hatları sırasıyla 1989 ve 2000 yılında hizmete girmiştir.

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 (Pfeiffer vd., 1996, Johansson ve Johansson, 2003; Birenzvige, 2003; Gomez-Perales, 2004; Chillrud ve Epstein, 2004; Aarnio, 2005; Seaton ve Cherrie, 2005; Seaton vd., 2005; Karlsson, 2005; Boudia, 2006). Bu çalışmalarda partikül madde (PM), PAH, hidrokarbonlar, VOC (uçucu organik karbon), karbon monoksit, azot dioksit, metaller ve çeşitli biyolojik kirleticiler incelenmiştir. Metrolardaki hava sirkülasyon miktarının düşük olması, metrodaki konsantrasyonların dış ortam konsantrasyonlarından daha yüksek olmasına neden olmaktadır. Partikül maddenin dış ortam hava kirlenmesinde de öncelikli bir kirletici olmasından dolayı, metrolarda diğer kirleticilere nazaran partikül madde maruziyetinin miktarı ve elementel bileşiminin bilinmesi çok daha fazla önem taşımaktadır.

Metro müşterileri, 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 olabilmektedir. Metrolarda solunabilir partiküllerin başlıca kaynağı raylar üzerinde tekerleklerin sürtünme ve fren yapması gibi raylarda aşınmaya neden olan hareketlerdir. Bu partiküller büyük oranda demir içerir. 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.

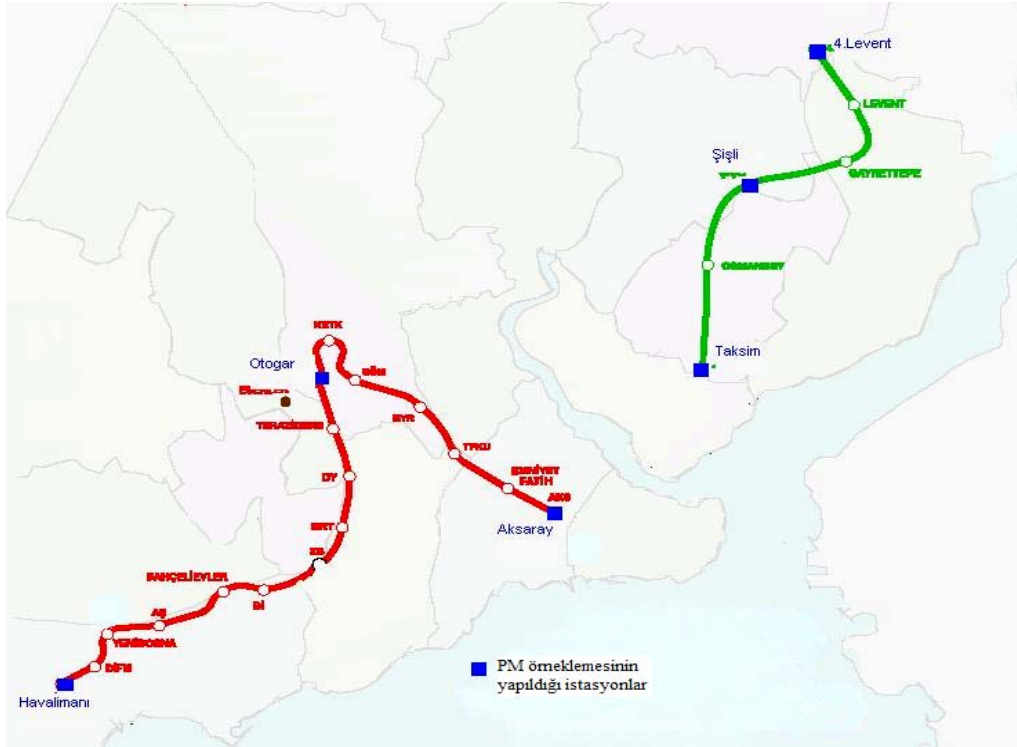
Bu çalışmanın amacı İstanbul'da bulunan Taksim – 4.Levent Metro Hattı ile Aksaray – Havalimanı Hafif Metro Hattı'nda yer alan kapalı metro istasyonlarında solunabilir partikül maddenin boyut dağılım analizinin yapılması ve tünel tozu içindeki Fe, Cu ve Mn konsantrasyonlarının belirlenmesidir.

MATERYAL VE METOD

Çalışmanın Yapıldığı İstasyonlar

İstanbul Ulaşım ve Ticaret A.Ş. tarafından işletilen Taksim – 4.Levent Metro Hattındaki 4. Levent, Şişli ve Taksim İstasyonunda ve Aksaray – Havalimanı Hafif Metro Hattındaki Havalimanı, Otogar ve Aksaray kapalı istasyonlarda ölçümler yapılmıştır. Ölçüm yapılan istasyonların konumları Şekil 1’de verilmiştir. Taksim, Şişli, 4.Levent, Havalimanı ve Aksaray istasyonları tünel yapıda, Otogar istasyonu ise hemzemin yapıdadır.

Aksaray – Havalimanı Hafif Metro Hattı 1989 yılından beri kullanılmakta olup toplam uzunluğu 19,6 km, hat üzerindeki istasyon sayısı 18’dir. Bu hatta 80 adet araç çalışmaktadır ve bir sefer süresi 32 dakika’dır. Günlük yolcu sayısı 240.000’dir. Taksim – 4.Levent Metro Hattı ise 2000 yılında hizmete açılmıştır. Toplam uzunluğu 8,5 km, hat üzerindeki istasyon sayısı 6’dır. Bu hatta 32 adet araç çalışmaktadır ve bir sefer süresi 12 dakika’dır. Günlük yolcu sayısı 185.000’dir. Her iki metro hattında gün içindeki (07:00–21:00) sefer sıklıkları ortalama 5.5 dakikadır.



Şekil 1. Taksim – 4.Levent Metro Hattı ile Aksaray – Havalimanı Hafif Metro Hattında ölçüm yapılan istasyonlar

Partikül Boyut Dağılımının Belirlenmesi

İstasyon peronlarında cihaz güvenliğini sağlayabilmek için sabit bir platform yapılmıştır. İstasyon peronlarına yerleştirilen platforma, PM boyut dağılımını belirleyebilmek için 8 kademeli kaskatlı impaktör (8-Stage Cascade Impactor-Thermo) cihazı yerleştirilmiştir. Sabit platform ve cihazın genel görünüşü Şekil 2’de, cihazda toplanan PM boyutları ise Tablo 1’de verilmiştir. Örneklemeler Eylül 2007 – Ocak 2008 tarihleri arasında yapılmıştır. Her bir kademede bulunan cam yünü ve quartz filtreler üzerinde toplanan tozlar gravimetrik olarak

tain edilmiştir. Aksaray-Havalimanı metro hattında 28,3 l/dk çekiş gücü olan pompa kullanılmıştır. Bu pompa ile yapılan örnekleme, örnekleme süresi ortalama 7 gündür ve her istasyonda 2 örnekleme yapılmıştır. 4.Levent – Taksim metro hattında ise 90 l/dk çekiş gücü olan pompa kullanılmıştır. Bu nedenle örnekleme süresi ortalama 3-4 güne düşürülmüştür ve alınan örnek sayısı 4.Levent ve Şişli’de 3’e, Taksim’de 4’e çıkarılmıştır. Örnekleme öncesi ve sonrasında filtreler $20\pm 1^{\circ}\text{C}$ sıcaklık ve $\%50\pm 5$ nemin sağlandığı laboratuvar koşullarında 48 saat şartlandırıldıktan sonra tartım yapılmıştır.



Şekil 2. 8 kademeli impaktör cihazının genel görünüşü ve yerleştirildiği platform

Tablo 1. 8 kademeli impaktör cihazında toplanan PM boyutları

Kademe	PM boyutu (μm)	
	28,3 l dk ⁻¹ pompa ile	90 l dk ⁻¹ pompa ile
1	9	8,0
2	5,8	6,5
3	4,7	5,2
4	3,3	3,5
5	2,1	2,6
6	1,1	1,7
7	0,7	1,0
8	0,4	0,43

Elementel Analiz

8-kademeli kaskatlı impaktör ile toplanan toz yüklü filtreler Mikrodalga Ayırıştırma ünitesi (CEM Mars X-Press Cihazı) ile ayrıştırılmış ve elde edilen çözeltiler metal analizleri yapılmak üzere -4°C 'de buzdolabında muhafaza edilmiştir.

Literatürde çözünürleştirme prosedürü için pek çok metot tanımlanmış ve metallerin çözünbilme oranları araştırılmıştır. Partikül maddelerin çözünmesi ile ilgili yapılan bir çok çalışmada $\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{O}_2/\text{HF}$ karışımı kullanılmış, $170\text{-}180^{\circ}\text{C}$ 'de ortalama 30 dk mikrodalgada ayrıştırma işlemi uygulanmıştır (Swami vd., 2001; Pekney ve Davidson, 2005; Qureshi vd., 2006; Hueglin vd., 2005). Bunun yanında cadde tozlarının tam ayrışmasının çalışıldığı yayınlarda bu asit karışımlarına ilave olarak HCl'in kullanımının ve ayrıştırma işleminin adım adım yapılmasının önemli ölçüde parçalanmayı artırdığı belirlenmiştir (Boch vd., 2002;

Dijingova, 2003; Niemela, 2004; Niemela vd., 2005). Literatür incelemesinden yola çıkarak, toplanan örnekler Tablo 2’de ayrıntıları verilen metot kullanılarak çözünürleştirilmiştir.

Tablo 2. Partikül Maddenin Mikrodalga Ayırıştırma ünitesi kullanılarak yapılan çözünürleştirme işlemi

Ayırıştırma kademesi	İlave edilen kimyasallar	Adım	Güç (Watt)	Isınma süresi (dk)	Sıcaklık (°C)	Bekletme süresi (dk)
1.Aşama	9 ml HNO ₃ + 3ml H ₂ O ₂	1	1200	10	160	10
		2	1200	10	180	15
2.Aşama	+4ml HCl	1	1200	5	150	10
		2	1200	5	170	10
3.Aşama	+3ml HF	1	1200	3	140	5
		2	1200	2	160	10

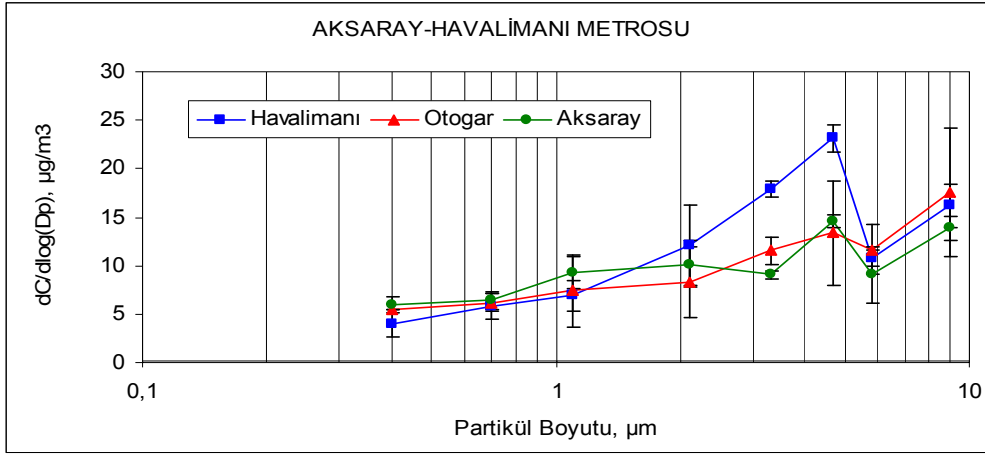
Tablo 2’de özetlenen ayırıştırma prosedüründe her bir metot işleminden önce mikrodalgadan alınan kaplar bir saat soğutulmuş ve oda sıcaklığına gelince kapakları açılmıştır. İşlem bitişinde toplam 15 ml’lik çözelti elde edilmiştir. Çözeltiler 50 ml’ye bidistile su ile tamamlanmış ve polipropilen kaplarda buzdolabında analiz için muhafaza edilmiştir. Daha sonra çözeltilerin elementel analizi Atomik Absorbsiyon Spektrometresi (UNICAM 929 Model) kullanılarak yapılmıştır.

SONUÇLAR

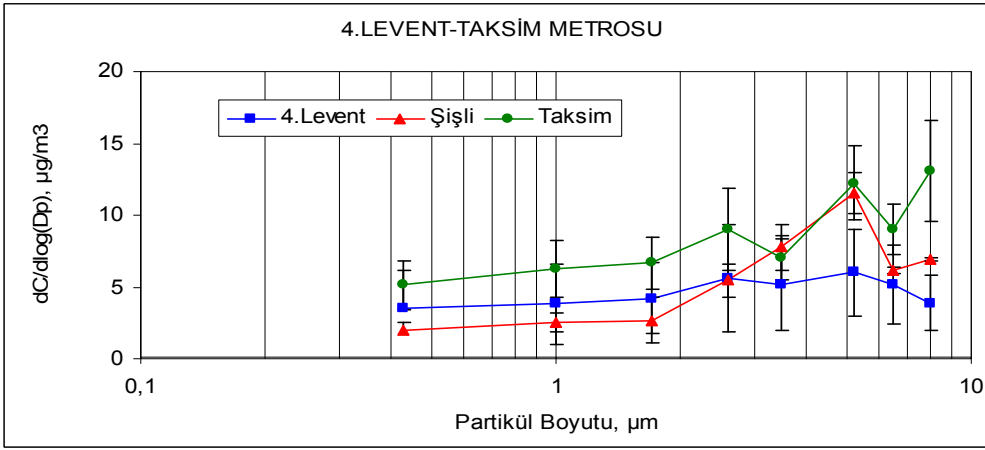
Partikül Maddenin Boyut Dağılımı

Taksim – 4.Levent Metro Hattı ile Aksaray – Havalimanı Hafif Metro Hattı’nda seçilen toplam 6 adet metro istasyonunda partikül maddenin boyut dağılımını belirlemek için Eylül 2007 – Ocak 2008 tarihleri arasında örneklemeler yapılmıştır. Cihazın 8 kademesine yerleştirilen cam yünü ve quartz filtrelerde toz örnekleri toplanmış ve gravimetrik olarak tayin edilmiştir.

Aksaray, Otogar ve Havalimanı istasyonlarının her birinde 2 örnekleme, Şişli ve 4.Levent istasyonlarında 3’er ve Taksim istasyonunda ise 4 örnekleme yapılmıştır. Her istasyon için örnekleme sonuçlarının ortalaması alınarak Şekil 3 ve Şekil 4’te boyut dağılım grafikleri standart sapma değerleri ile birlikte verilmiştir. Aksaray – Havalimanı hafif metro hattında yapılan örnekleme boyut dağılımına bakıldığında her üç istasyonda da 4,7-3,3 µm boyutlu partikül maddenin en yüksek konsantrasyona sahip olduğu belirlenmiştir. 4,7-3,3 µm boyut aralığındaki partikül maddenin konsantrasyon değerleri Aksaray, Otogar ve Havaalanı’nda sırasıyla 14,5 µg m⁻³, 13,3 µg m⁻³ ve 23,14 µg m⁻³, 4.Levent, Şişli ve Taksim’de ise sırasıyla 6,2 µg m⁻³, 12 µg m⁻³, ve 14,1 µg m⁻³ olarak bulunmuştur. Taksim - 4.Levent metro hattında da benzer bir sonuç elde edilmiş ve özellikle Şişli ve Taksim metro peronu PM boyut dağılımında 5,2-3,5 µm boyutlu partikül maddenin baskın olduğu gözlenmektedir. 5,2-3,5 µm boyut aralığındaki partikül maddenin konsantrasyon değerleri ise 4.Levent, Şişli ve Taksim’de sırasıyla 6,2 µg m⁻³, 12 µg m⁻³, ve 14,1 µg m⁻³ olarak bulunmuştur.



Şekil 3. Havalimanı, Otogar, Aksaray Metro Peron İçi Partikül Madde Boyut Dağılımı



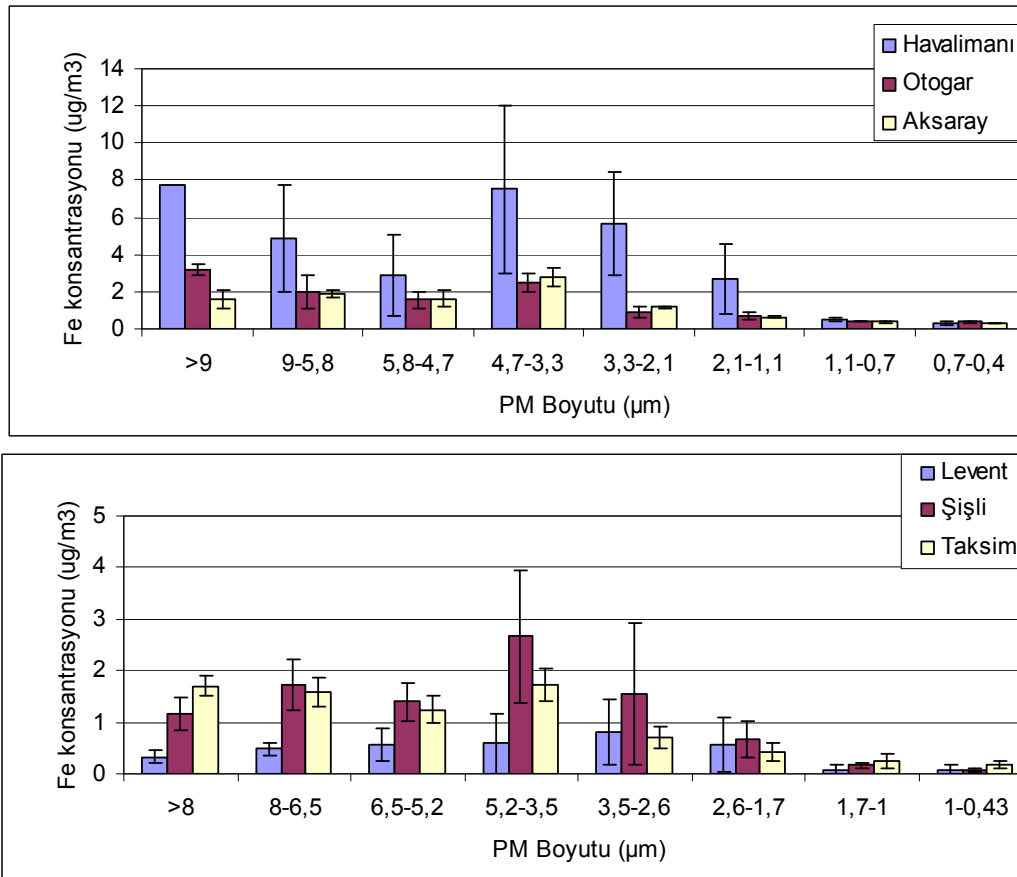
Şekil 4. 4.Levent, Şişli, Taksim Metro Peron İçi Partikül Madde Boyut Dağılımı

Partikül Maddelerin Metal İçeriği

Çalışmada metro istasyon peronlarında toplanan toz örnekleri içerisindeki metal konsantrasyonları belirlenmiştir. Camyünü ve quartz filtreler üzerine toplanan 8 farklı boyuttaki toz örnekleri Tablo 2’de verilen metoda göre ayrıştırılmış ve Atomik Absorbsiyon Spektrometre Cihazı ile Fe, Cu ve Mn konsantrasyonları tespit edilmiştir. Tablo 3’te verilen metal konsantrasyon değerleri Aksaray, Havalimanı ve Otogar istasyonlarında 9 µm’nin altında toplanan partiküller için, Taksim, Şişli ve 4.Levent istasyonlarında da 8 µm’nin altında toplanan partiküller için belirlenmiştir. Fe ve Cu miktarının sekiz farklı toz boyut aralığı içerisindeki konsantrasyon dağılımı ise Şekil 5 ve Şekil 6’da verilmiştir. Mn konsantrasyonları düşük olarak tespit edildiğinden boyut dağılımı şekil üzerinde verilmemiştir.

Tablo 3. İstasyon peronlarında örneklenen partikül madde içerisindeki metal konsantrasyonları

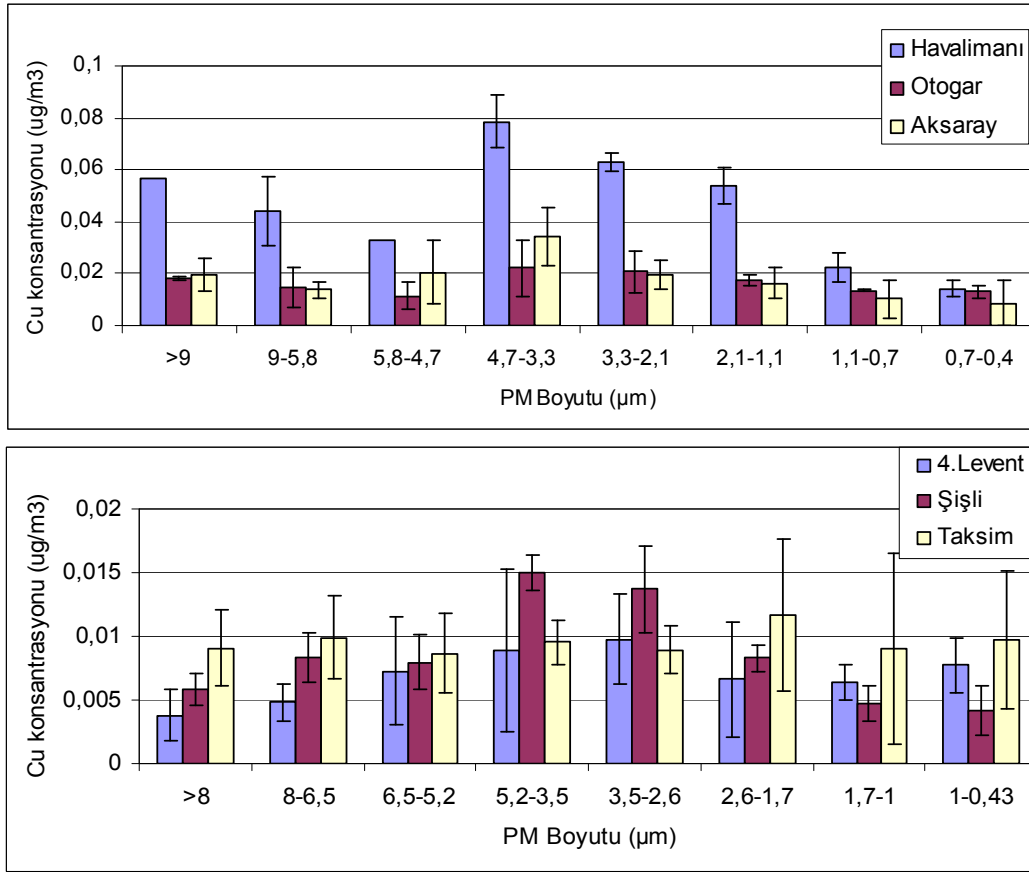
İstasyon	Partikül Boyutu	Fe	Cu	Mn
	μm	$\mu\text{g m}^{-3}$	$\mu\text{g m}^{-3}$	$\mu\text{g m}^{-3}$
Havalimanı	< 9	28,2	0,32	0,07
Otogar	< 9	11,6	0,13	<0,01
Aksaray	< 9	10,3	0,14	<0,01
4.Levent	< 8	3,5	0,06	<0,01
Şişli	< 8	9,4	0,07	<0,01
Taksim	< 8	7,8	0,07	0,02



Şekil 5. Toz örneklerindeki Fe konsantrasyonunun farklı PM boyut aralıklarındaki dağılımı

Şekil 5 incelendiğinde Aksaray-Havalimanı metro hattında, 4.Levent-Taksim metro hattına göre daha yüksek Fe konsantrasyonları tespit edilmiştir. Aksaray-Havalimanı hattında örneklenen 8 partikül boyutu aralığındaki en yüksek Fe konsantrasyonları Havalimanı istasyonunda ölçülmüştür. 4.Levent- Taksim hattında ise 4.Levent istasyonundaki Fe konsantrasyonu $0,1-1,56 \mu\text{g m}^{-3}$ arasında değişim göstermiştir. Şişli istasyonunda ise, Taksim ve 4.Levent istasyonlarıyla karşılaştırıldığında daha yüksek Fe konsantrasyonu görülmüştür.

Her iki metro hattında da ortalama 2.5 µm'den küçük partikül boyutunda Fe miktarının çok düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 6. Toz örneklerindeki Cu konsantrasyonunun farklı PM boyut aralıklarındaki dağılımı

Şekil 6 incelendiğinde Aksaray-Havalimanı metro hattında Cu konsantrasyonlarının 0,11-0,37 µg m⁻³ arasında, 4. Levent-Taksim metro hattında da 0,04-0,1 µg m⁻³ arasında değiştiği görülmektedir. En yüksek Cu konsantrasyonu yine Havalimanı istasyonunda tespit edilmiştir. Yüzdesele ifade edilirse, Aksaray – Havalimanı metro hattında örneklenen toz içerisindeki Fe ve Cu miktarının % 52 ve % 67,8'i, 4. Levent – Taksim hattında ise Fe ve Cu miktarının % 54 ve % 67'sinin, 4,7 µm'nin altındaki partikül madde boyutlarında bulunduğu belirlenmiştir. Buna göre bir kişinin ortalama nefes hızı 0,54 m³ saat⁻¹ olarak kabul edildiğinde, metroda günde ortalama 1 saat seyahat eden bir kişi 5,4 µg Fe ve 0,035 µg Cu konsantrasyonuna maruz kalacaktır.

DEĞERLENDİRME

Tünel tozlarının özelliklerinden biri de küçük boyutlu (ince) partiküllerin oranının fazla olmasıdır. Solunabilir partikül madde'nin yaklaşık 5 µm'ye kadar olan kısmı burun ve boğazda tutulmakta 5 µm'nin altındaki boyutlar ise nefes borusundan bronşlara ve akciğerlere kadar ulaşabilmektedir. Bu nedenle toksisitesinin ve muhtemel sağlık riskinin fazla olması nedeniyle 5 µm'nin altındaki partiküllerin içeriğinin bilinmesi çok önemlidir.

İstanbul metrosunda toz örnekleme sisteminin yapıldığı istasyonlarda Fe, Cu ve Mn değerleri farklılık göstermektedir. Aksaray- Havalimanı hafif metro istasyonundaki metal konsantrasyonlarının 4.Levent-Taksim metro hattından daha yüksek olduğu görülmektedir (Tablo 3). Özellikle en yüksek metal oranı Havalimanı istasyonunda bulunmuştur. Bunun nedeni dış ortam hava kalitesinden etkilenme olarak açıklanabilir. Bilindiği gibi 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 (Nemlioğlu vd., 2000).

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.

Tablo 4’de yurtdışındaki metrolar ve İstanbul metro sistemlerinin genel özellikleri verilmiştir (Nieuwenhuijsen vd., 2007). Tablo 4’ten görüldüğü gibi İstanbul metrosu, yurtdışındaki metrolarla karşılaştırıldığında oldukça yeni ve istasyon sayısı az olan bir metrodur. Metroların yaşı, fren sistemi, tekerlek tipi ve havalandırma sistemleri gibi özellikleri metrolarda maruz kalınan partikül maddenin miktarını ve metal içeriğini etkilemektedir.

Tablo 4. Yurtdışındaki Metrolar ve İstanbul Metro Sistemlerinin Genel Özelliklerinin Karşılaştırılması (Nieuwenhuijsen, 2007)

Yer	Londra	New York	Tokyo	Montreal	Meksiko City	Helsinki	İstanbul	
							M1*	M2**
Açıldığı tarih	1890	1904	1927	1966	1969	1982	1989	2000
Günde seyahat eden yolcu sayısı (milyon)	2.8	4.6	7.4	0.7	4.4	0.2	0.24	0.185
Fren sistemi	Blok	Dinamik (Elektronik) ve sürtünme	Blok	Reostatik/dinamik		Elektrik	Pnömatik Elektro-dinamik	Pnömatik Elektro-dinamik
Tekerlek tipi	Çelik	Çelik	Lastik/Çelik	Lastik	Lastik	Çelik	Çelik	Çelik
Havalandırma sistemi	Doğal	Klima	Klima	Doğal	Doğal	Isıtma ve filtrasyon ile mekanik destek	Doğal	Filtrasyonlu havalandırma
İstasyon sayısı	275	468	266	65	175	16	18	6
Uzunluk (km)	408	368	292	66	201	21	19.6	8.5

M1*: Aksaray - Havalimanı hafif metro hattı

M2**: 4.Levent-Taksim metro hattı

Tablo 5. Yurtdışındaki Metrolar ve İstanbul Metro Sistemlerindeki partikül madde içindeki Fe, Cu ve Mn konsantrasyonları

	Adams (2001)	Chillrud (2004)	Gomez-Perales (2004)	Furuya (2001)	Boudia (2006)	Aarnio (2003)	İstanbul			
Şehir	Londra	New York	Mexico city	Tokyo	Montreal	Helsinki	M1*		M2**	
Partikül boyutu	PM2.5	PM2.5	PM2.5	PM10	PM5-PM10	PM2.5	PM9		PM8	
Fe($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	87,09	26,0	4,24	94,2	-	24,65	Aksaray	10,3	4.Levent	3,5
							Otogar	11,6	Şişli	9,4
							Havalimanı	28,2	Taksim	7,8
Cu($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0,52	-	1,57	1,0	-	0,15	Aksaray	0,14	4.Levent	0,06
							Otogar	0,13	Şişli	0,07
							Havalimanı	0,32	Taksim	0,07
Mn($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1,67	0,24	0,07	-	0,018-0,05	0,32	Aksaray	<0,01	4.Levent	<0,01
							Otogar	<0,01	Şişli	<0,01
							Havalimanı	0,07	Taksim	0,02

M1*: Aksaray - Havalimanı hafif metro hattı

M2**: 4.Levent-Taksim metro hattı

Tablo 5'te yurtdışındaki metrolar ve İstanbul metrosundaki partikül madde içindeki Fe, Cu ve Mn konsantrasyonlarının karşılaştırılması verilmiştir. Tablo 5'ten görüldüğü gibi yurtdışındaki metrolarda yürütülen çalışmalarda $\text{PM}_{2,5}$, PM_5 ve PM_{10} içindeki metal içerikleri belirlenmiştir. Adams ve arkadaşları (2001) tarafından yürütülen çalışmada Londra metrosunda kişisel maruziyetlerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Furuya ve arkadaşları (2001), Tokyo metrosunda 3 istasyonda PM_{10} 'un elementel bileşimini incelemiştir. Gomez-Perales ve arkadaşları (2004) tarafından yürütülen çalışmada ise Mexico City'de metroyu da içeren farklı ulaşım türlerinde partikül maddenin metal içeriği belirlenmiştir. Boudia ve arkadaşları (2006) ise Montreal-Kanada metrosunda sadece Mn konsantrasyonunu belirleyerek trafik ile ilişkisini ortaya koymuştur. Aarnio ve arkadaşları (2003) ve Chillrud ve arkadaşları (2004) ise çalışmalarında $\text{PM}_{2,5}$ içindeki metal konsantrasyonlarını incelemişlerdir.

Tablo 5'ten görüldüğü gibi Havalimanı istasyonu dışında diğer istasyonlardaki Fe konsantrasyonu $3,5-11,6 \mu\text{g m}^{-3}$ 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. 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 ve Mn değerleri diğer metrolarla benzerlik göstermektedir. 4.Levent-Taksim hattında ise daha düşük seviyede Cu ve Mn bulunmuştur.

Sonuç olarak Taksim – 4.Levent Metro Hattı ile Aksaray – Havalimanı Hafif Metro Hattında en yüksek orana sahip partikül boyut aralığı sırasıyla $4,7-3,3 \mu\text{m}$ ve $5,2-3,5 \mu\text{m}$ olarak tespit edilmiştir. Partikül madde içeriğindeki Fe, Cu ve Mn konsantrasyonları ise yurtdışında eski teknolojiye sahip metrolardan oldukça düşük seviyelerde bulunmuştur.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma İstanbul Büyükşehir Belediyesinin bir iştirak şirketi olan İstanbul Ulaşım Sanayi ve Ticaret A.Ş. tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

Aarnio, P., Tuomi, T., Kousa, A. The concentrations and composition of and exposure to fine particles (PM_{2.5}) in the Helsinki subway system. *Atmospheric Environment*, 39,(28), 5059-5066, 2005.

Adams, H.S., Nieuwenhuijsen, M.J., Colvile, R.N. McMullen, M.A., Khandelwal, P. Fine particle (PM_{2.5}) personal exposure levels in transport microenvironments, London, UK, *The Science of the Total Environment*, 279, (1-3), 29-44, 2001.

Brenzvige, A., Eversole, J. Aerosol characteristics in a subway environment, *Aerosol Science and Technology*, 37, 210-220, 2003.

Boch, K., Schuster, M., Risse, G., Schwarzer, M. Microwave-assisted digestion procedure for the determination of palladium in road dust, *Analytica Chimica Acta*, 459, 257-265, 2002.

Boudia, N., Halley, R., Kennedy, G. 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, 2006.

Chillrud, S.N, Epstein, D. Elevated airborne exposures of teenagers to manganese, chromium, and iron from steel dust and New York City's subway system, *Environmental Science and Technology*, 2004.

Dijingova, R., Heidenreich, H., Kovacheva, P., Markert, B. On the determination of platinum group elements in environmental materials by inductively coupled plasma mass spectrometry and microwave digestion, *Analytica Chimica Acta*, 489, 245-251, 2003.

Furuya, K., Kudo, Y., Okinagua, K., Yamuki, M., Takahashi, K., Araki, Y., Hisamatsu, Y. Seasonal variation and their characterization of suspended particulate matter in the air of subway stations. *Journal of Trace and Microprobe Techniques*, 19(4), 469-485, 2001.

Gomez –Perales, L.E., Colvile, R.N., Nieuwenhuijsen, M.J. Commuters' exposure to PM_{2.5}, CO, and benzene in public transport in the metropolitan area of Mexico City. *Atmospheric Environment*, 38(8), 1219-1229, 2004.

Hueglin, C., Gehrig, R., ve diğ., Chemical characterization of PM_{2.5}, PM₁₀ and coarse particles at urban, near-city and rural sites in Switzerland, *Atmospheric Environment*, 39(4), 637-651, 2005.

Johansson, C., Johansson, P.A. Particulate matter in the underground of Stockholm. *Atmospheric Environment* 37 (1), 3-9, 2003.

Karlsson, H.L., Ljungman, A.G. Comparison of genotoxic and inflammatory effects of particles generated by wood combustion, a road simulator and collected from street and subway. *Toxicological letters* 165, 203-211, 2006.

Nemlioğlu, S., Demir, G., Bayat, C. İstanbul Atatürk Havalimanı Örneğinde Hava Taşıtı Kökenli Hava Kirliliği. *GAP Çevre Kongresi*, 16-18 Ekim 2000, Şanlıurfa, 2000.

Niemela, M., Peramaki, P., Pijspanen, J., Poikolainen, J. Determination of platinum and rhodium in dust and plant samples using microwave-assisted sample digestion and ICP-MS, *Analytica Chimica Acta* 521, 137-142, 2004.

Niemela, M., Kola, H., Peramaki, P., Pijspanen, J., Poikolainen, J. Comparison of Microwave-Assisted Digestion Methods and Selected of Internal Standards for the Determination of Rh, Pd, and Pt in dust Samples by ICP-MS. *Microchica Acta* 150, 211-217, 2005.

Nieuwenhuijsen, M.J., Gomez-Perales, J.E., COLVILE, R.N. Levels of particulate air pollution, its elemental composition, determinants and health effects in metro systems. *Atmospheric Environment, Vol 41*, 7995-8006, 2007.

Pekney, N.J., Davidson, C.I. Determination of trace elements in ambient aerosol samples, *Analytica Chimica Acta* 540, 269-277, 2005.

Pfeiffer, G.D., Harrison, R.M., Lynam, D.R. Personal exposures to airborne metals in London taxi drivers and office workers in 1995 and 1996. *The Science of the Total Environment*. 235 (1-3), 253-260, 1996.

Qureshi, S., Dutkiewicz, V.A., Khan, A.R., et al. Elemental composition of PM_{2.5} aerosols in Queens, New York: Solubility and Temporal trends, *Atmospheric Environment* 40(2), 182-191, 2006.

Seaton, A., Cherrie, J. The London underground: dust and hazards to health. *Occupational and Environmental Medicine*, 62, 355-362, 2005.

Swami, K., Judd, C.D., Orsini, J., Yang, K.X., Husain, L. Microwave assisted digestion of atmospheric aerosol samples followed by inductively coupled plasma mass spectrometry determined of trace elements, *Fresenius Journal Analytical Chemistry* 369, 63-70, 2001.