



**T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ -
CERRAHPAŞA LİSANSÜSTÜ EĞİTİM
ENSTİTÜSÜ**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

**İSTANBUL'DA METROLARIN İÇ HAVA KALİTESİNE
HAVALANDIRMA SİSTEMLERİNİN ETKİSİ**

Muhammet Sırrı ABANOZ

**DANIŞMAN
Doç. Dr. Ülkü ALVER ŞAHİN**

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Mühendisliği Programı

İSTANBUL-2019

Bu çalışma 11.07.2019 Tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Çevre Mühendisliğı Anabilim Dalı, Çevre Mühendisliğı Programı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

TEZ JÜRİSİ



Doç. Dr. Ülkü ALVER ŞAHİN
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi



Doç. Dr. Burcu ONAT
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakülte



Doç. Dr. Pınar ERGENEKON
Gebze Teknik Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa’nın abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Bu tez, 115Y263 numaralı TUBİTAK projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Yüksek lisans öğrenimim boyunca gösterdiği anlayış ve her türlü katkıdan dolayı değerli hocam Doç.Dr. Ülkü ALVER ŞAHİN'e en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Bu çalışma 115Y263 numaralı Tübitak 1001 proje desteği kapsamında yapılmıştır. Proje süresince ölçümlerde birlikte çalıştığımız arkadaşlarım Burcu Uzun, Özcan Akın ve Fazilet Özkaya'ya destek ve dostlukları için tesekkürler.

Bu çalışma boyunca her türlü desteğiyle yanımda olan aileme, eşim Eda CEBE ABANOZ'a, METROİSTANBUL firmasına, çalışmamı destekleyen İstanbul Üniversitesi'ne ve TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Haziran 2019

Muhammet Sırrı ABANOZ

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ	vii
TABLO LİSTESİ.....	ix
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	x
ÖZET	xii
SUMMARY	xiii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL KISIMLAR.....	3
2.1. RAYLI SİSTEM ÇEŞİTLERİ	4
2.1.1. Tramvay Sistemi.....	5
2.1.2. Hafif Raylı Sistem	5
2.1.3. Metro Sistemi	5
2.2. RAYLI SİSTEMLERDE HAVALANDIRMA	6
2.2.1. Metrolarda İç Ortam Koşulları	6
2.2.1.1. Dış Ortam Şartları	6
2.2.1.1. İç Ortam Şartları.....	6
2.2.2. Metro Sistemlerinde Havalandırma.....	9
2.2.2.1. Havalandırma Sistemleri Dizayn Kriterleri.....	10
2.2.2.2. Metro Sistemlerinde Yolcu Bölgelerinin Havalandırılması.....	18
2.3. METROLARDA HAVA KALİTESİ	20
2.3.1. Partikül Maddeler	23
2.3.2. İnce (PM _{2.5}) ve Ultra İnce (PM _{0.1}) Partikül Maddeler	26
2.4. METROLARDA İÇ ORTAM HAVA KALİTESİ ÇALIŞMALARI.....	28
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	30
3.1. İSTANBUL'DA METROLARDA HAVALANDIRMA SİSTEMLERİ.....	30
3.1.1. M1A Yenikapı – Havalimanı Metro Hattı.....	31
3.1.2. M2 Yenikapı – Hacıosman Metro Hattı	32
3.1.3. M4 Kadıköy – Tavşantepe Metro Hattı.....	33
3.2. METRODA YAPILAN ÖLÇÜMLER VE METRONUN ÖZELLİKLERİ.....	34

3.3. METRO SİSTEMİNDE YAPILAN ÖLÇÜMLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	37
3.4. METRO SİSTEMİNDE YAPILAN ÖLÇÜMLER İLE DIŞ ÖLÇÜMLERİN KARŞILAŞTIRILMASI	37
4. BULGULAR.....	38
4.1. METRO HATLARINDAKİ TREN İÇİ VE PERON $PM_{2.5}$ KONSANTRASYON DEĞERLERİ	38
4.2. METRO SEYAHAT SIRASINDA $PM_{2.5}$ DEĞİŞİMİ.....	41
4.3. METRO ARAÇ İÇİ VE PERONLARDA ÖLÇÜLEN $PM_{2.5}$ KONSANTRASYONLARININ KORELASYONU	48
4.4. METRO ARAÇ İÇİ VE PERONLARDA ÖLÇÜLEN $PM_{2.5}$ İLE DIŞ ORTAM $PM_{2.5}$ KONSANTRASYONLARININ KORELASYONU	49
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	53
KAYNAKLAR.....	56
EKLER	64
EK – 1 YOLCU SAYILARI İSTATİSİĞİ.....	64
ÖZGEÇMİŞ	65

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1: Sırasıyla Oluklu Ray Tipi ve Mantar Ray Tipi	4
Şekil 2: Normal İşletmede Havalandırma Sistemi	15
Şekil 3: Trenin 1. İstasyona Yakınken Yangın Çıkması Durumu	17
Şekil 4: Trenin 2. İstasyona Yakın iken Yangın Çıkması Durumu	18
Şekil 5: EXF ve INF Sistemlerinin Planlaması	19
Şekil 6: TVF, EXF ve INF Sistemlerinin Planlaması.....	19
Şekil 7: Seul'de metro sistemi partikül madde kaynakları	23
Şekil 8: Seul metrosunda yolcu sayısı ile iç ortam parametreleri arasındaki korelasyon.....	23
Şekil 9: EPA'ya göre PM _{2.5} ve PM ₁₀ Kaynakları	25
Şekil 10: M1A Metro Güzergahı	31
Şekil 11: M2 Metro Güzergahı	32
Şekil 12: M4 Metro Güzergahı	33
Şekil 13: Vagon İçinde Yapılan Ölçümler	35
Şekil 14: Peronda Yapılan Ölçümler	35
Şekil 15: PM _{2.5} Ölçüm Cihazı (pDR 1200)	36
Şekil 16: M1A,M2 ve M4 Metro Hatlarında Peronda ve Vagon İçinde Ölçülen PM _{2.5} Konsantrasyonlarının Aylık Ortalamaları	40
Şekil 17: M1A, M2 ve M4 Metro Hatlarında Vagon İçi PM _{2.5} Ölçümlerinin Her Bir Seyahat Boyunca (Trip) Değişimi Box-Blot Grafiği.....	41
Şekil 18: M1A Hattı Tren İçi PM _{2.5} Konsantrasyonunun Sabah ve Öğle Saatlerinde Ölçülen Değerleri	42
Şekil 19: M2 Hattı Tren İçi PM _{2.5} Konsantrasyonunun Sabah ve Öğle Saatlerinde Ölçülen Değerleri	43
Şekil 20: M4 Hattı Tren İçi PM _{2.5} Konsantrasyonunun Sabah ve Öğle Saatlerinde Ölçülen Değerleri	43

Şekil 21: M1A Hattı Dönüş Güzergahı Boyunca Sırasıyla İlkbahar, Kış, Sonbahar ve Yaz Mevsimlerinde Tren İçi PM _{2.5} Konsantrasyon Değişimi	45
Şekil 22: M1A Hattı Gidiş Güzergahı Boyunca Sırasıyla İlkbahar, Kış, Sonbahar ve Yaz Mevsimlerinde Tren İçi PM _{2.5} Konsantrasyon Değişimi	45
Şekil 23: M2 Hattı Dönüş Güzergahı Boyunca Sırasıyla İlkbahar, Kış, Sonbahar ve Yaz Mevsimlerinde Tren İçi PM _{2.5} Konsantrasyon Değişimi	46
Şekil 24: M2 Hattı Gidiş Güzergahı Boyunca Sırasıyla İlkbahar, Kış, Sonbahar ve Yaz Mevsimlerinde Tren İçi PM _{2.5} Konsantrasyon Değişimi	46
Şekil 25: M4 Hattı Dönüş Güzergahı Boyunca Sırasıyla İlkbahar, Kış, Sonbahar ve Yaz Mevsimlerinde Tren İçi PM _{2.5} Konsantrasyon Değişimi	47
Şekil 26: M4 Hattı Gidiş Güzergahı Boyunca Sırasıyla İlkbahar, Kış, Sonbahar ve Yaz Mevsimlerinde Tren İçi PM _{2.5} Konsantrasyon Değişimi	48
Şekil 27: M1A, M2 ve M4 Vagon İçinde Aylık Ölçülen PM _{2.5} Değerlerinin Peronlarda Ölçülen Değerler ile Korelasyonu	49
Şekil 28: M1A Hattı Tren İçi ve Peronlardaki Ölçümlerin Dış Ortam Hava Kalitesi Ölçüm İstasyon Verileri ile Korelasyonu	50
Şekil 29: M2 Hattı Tren İçi ve Peronlardaki Ölçümlerin Dış Ortam Hava Kalitesi Ölçüm İstasyon Verileri ile Korelasyonu	51
Şekil 30: M4 Hattı Tren İçi ve Peronlardaki Ölçümlerin Dış Ortam Hava Kalitesi Ölçüm İstasyon Verileri ile Korelasyonu	51

TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 1: Tramvay, Hafif Raylı Sistem ve Metronun Genel Özellikleri	3
Tablo 2: Dış Ortam Şartları	6
Tablo 3: İç Ortam Şartları.....	7
Tablo 4: İstasyon ve Tünellerde Hava Hızları.....	9
Tablo 5: Asya ve Avrupa’da bulunan metro sistemlerinin yapım yılları, yolcu kapasiteleri ve ölçüm yapılan bazı iç ortam kirletici değerleri.....	21
Tablo 6: EPA’ya göre Partiküllerin Çapına Göre Sınıflandırılması.....	24
Tablo 7: EPA’ya göre Parçacık Kirliliği Parametre Standartları	25
Tablo 8: M2 İstasyonlarında Bulunan Havalandırma Sistemleri ve Sayıları	32
Tablo 9: M4 İstasyonlarında Bulunan Havalandırma Sistemleri ve Sayıları	33
Tablo 10: Metro Hatları ve Özellikleri	34
Tablo 11: Metro Trenlerinde Seyahat Boyunca Ölçülen PM _{2.5} Konsantrasyonları (µg/m ³).....	38
Tablo 12: Metro Peronlarda Ölçülen PM _{2.5} Konsantrasyonları (µg/m ³)	38
Tablo 13: 2017 ve 2018 Yılı Ortalama Yolcu İstatistikleri	64

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

M1A	: Yenikapı – Atatürk Havalimanı Hafif Metro Hattı
M1B	: Yenikapı – Kirazlı Hafif Metro Hattı
M2	: Yenikapı – Hacıosman Metro Hattı
M3	: Kirazlı – Olimpiyat – Başakşehir Metro Hattı
M4	: Kadıköy – Tavşantepe Metro Hattı
M5	: Üsküdar – Çekmeköy Metro Hattı
M6	: Levent – Boğaziçi Ü./Hisarüstü Metro Hattı
T1	: Bağcılar – Kabataş Tramvay Hattı
T2	: Taksim – Tünel Nostaljik Tramvay Hattı
T3	: Kadıköy – Moda Tramvay Hattı
T4	: Topkapı – Mescid-i Selam Tramvay Hattı
TF1	: Maçka – Taşkışla Teleferik Hattı
TF2	: Eyüp – Piyer Loti Teleferik Hattı
F1	: Taksim – Kabataş Funiküler Hattı
F2	: Karaköy – Beyoğlu Tarihi Tünel
F3	: Seyrantepe – Vadistanbul Funiküler Hattı
$\mu\text{g}/\text{m}^3$	: Metreküp hava başına mikrogram
$^{\circ}\text{C}$	: Derece – Sıcaklık Birimi
m^3/h	: Saat başına hava metrekübü
MW	: MegaWatt
d/h	: Saatte hava değişim sayısı
BSİ	: Bağlı Sıcaklık İndeksi
EPA	: Çevre Koruma Ajansı
WHO	: Dünya Sağlık Örgütü
Dpa	: Partikül Çapı
PM₁₀	: Partikül Çapı 10 μm 'den küçük 2.5 μm 'dan büyük olan parçacıklar
PM_{2.5}	: Partikül Çapı 2.5 μm 'den küçük olan parçacıklar (İnce Parçacıklar)
UIP	: Partikül Çapı 0.1 μm 'den küçük olan parçacıklar (Ultra İnce Parçacıklar)
TVF	: Tünel Havalandırma Fanı
EXF	: Egzoz Havalandırma Fanı
INF	: İç Havalandırma Fanı

PM	: Partikül Madde
OTE	: Peron Üstü Egzoz
UPE	: Peron Altı Hava Egzoz
NFPA	: Ulusal Yangından Korunma Kurumu
ASHRAE	: Isıtma Soğutma ve İklimlendirme Mühendisliği Amerikan Birliği
DC	: Doğru Akım
İBB	: İstanbul Büyükşehir Belediyesi
HKÖİ	: Hava Kirliliği Ölçüm İstasyonu
SK	: Siyah Karbon
UIP	: Ultra İnce Partikül Madde

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İSTANBUL’DA METROLARIN İÇ HAVA KALİTESİNE HAVALANDIRMA SİSTEMLERİNİN ETKİSİ

Muhammet Sırrı ABANOZ

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. Ülkü ALVER ŞAHİN

Bu çalışmada İstanbul’da bulunan metro sistemlerinde PM_{2.5} ölçümleri yapılarak yolcuların ve çalışan personellerin maruz kaldıkları konsantrasyonlar belirlenmiştir. Dış ortamda ölçülen PM_{2.5} konsantrasyonları ile karşılaştırılarak metro havalandırma sistemlerinin iç hava kalitesine etkisi değerlendirilmiştir. Metro havalandırma sistemlerinin cadde üzerinde bulunması önemli bir metro içi hava kalitesi etkisi yaratmaktadır. Dış ortam PM_{2.5} ölçümleri ile metro ve peronlarda PM_{2.5} ölçümleri arasında anlamlı bir korelasyon tespit edilmiştir. Metro havalandırma sistemlerinin, PSD (Platform Screen Doors) sistemi ile desteklenmesi ve dış ortam hava kalitesinde iyileşmenin metro iç hava kalitesini önemli ölçüde iyileştirebileceği değerlendirilmiştir.

Haziran 2019, 55. sayfa.

Anahtar kelimeler: Metro, PM_{2.5}, İstanbul, Ulaşım

SUMMARY

M.Sc. THESIS

INFLUENCE OF AERATION SYSTEMS ON INDOOR AIR QUALITY OF METRO IN ISTANBUL

Muhammet Sırrı ABANOZ

Istanbul University-Cerrahpasa

Institute of Graduate Studies

Department of Environmental Engineering

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Ülkü ALVER ŞAHİN

In this study, PM_{2.5} measurements were performed on the metro systems in Istanbul and the concentrations to which the passengers and employees were exposed were determined. The effect of metro aeration systems on indoor air quality was evaluated by comparing with PM_{2.5} concentrations measured outside. The presence of metro aeration systems on the street creates an important indoor air quality effect in metro. A significant correlation was determined between outdoor PM_{2.5} measurements and PM_{2.5} measurements in metro and platforms. It was evaluated that subway ventilation systems could be supported by PSD (Platform Screen Doors) system and improvement of outdoor air quality could significantly improve metro indoor air quality.

June 2019, 55 pages.

Keywords: Metro, PM_{2.5}, Istanbul, Transportation

1. GİRİŞ

Gelişmiş kentlerin en büyük problemlerinden bir tanesi trafik sorunudur. Trafiğe alternatif çözüm üretmek, hızlı, kolay ve rahat ulaşım sağlamak amacıyla gelişmiş kentlerde, toplu taşıma büyük önem arz etmektedir. Toplu taşıma türlerinden olan raylı sistemler, trafiğin içinde olmaması ve hızlı olması nedeni ile en çok tercih edilen ulaşım türüdür (Li ve diğ., 2018). Hızlı ve rahat olmasının yanı sıra güvenilir ve konforlu sistemlerdir. Ayrıca raylı sistemler kullandıkları enerji sistemi itibari ile çevreye karşı duyarlı sistemlerdir. Bu sebeple şehir içi ulaşım sorunlarının çözümünde en iyi yollardan bir tanesi olan raylı sistemler geliştirilmeli ve uygulanmalıdır.

Raylı sistemler yol ve hat özelliklerine, işletme kapasitesi ve özelliğine göre sınıflandırılır. Dünyada birçok raylı sistem çeşidi mevcuttur. İstanbul'da bulunan sistemler uluslararası sistemlerdir. Tramvay, Hafif Metro ve Metro olarak 3 farklı sınıfta incelenen raylı sistemlerden hangisinin seçileceği tamamen yapılacak olan ön çalışmaya bağlıdır. Ön çalışma sonucu yolcu potansiyelinin yüksek olduğu yerlerde metro sistemi tercih edilir. Metro yatırım ve işletme maliyeti yönünden en pahalı olan sistemdir. Bunun yanı sıra yolcuların taşınması, konfor ve hız konusunda da en iyi olan sistemdir. Ancak ön çalışmanın iyi yapılarak yolcu potansiyelinin belirlenmesi ve diğer ulaşım türleri ile entegrasyonun sağlanarak maliyetin karşılanması gerekmektedir. Eğer yapılan ön çalışma sonucu yolcu potansiyelinin istenen seviyeden düşük olması veya merkezi yerlere uzak olduğu anlaşılırsa diğer sistemler düşünülmelidir.

Metro sistemi çoğunlukla yer altında bulunan bir sistemdir. Bu anlamda gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir. Yer altı istasyonlarında yolcuların ve personelin güvenliği ve konforunu sağlamak için sistemin havalandırılması, iklimlendirilmesi, drenajı ve yangın güvenliğinin sağlanması gerekir. Sıcaklık yolcu ve personel konforu için önemlidir. İstasyonların çok sıcak veya çok soğuk olması yolcu ve personel için istenen bir durum değildir. Ayrıca hava hızlarının limit değerlerinin üzerine çıktığı durumlarda toz kalkmasına, taşınmasına ve solunmasına sebep olur. Havalandırma sistemi bu gibi durumları istasyonlarda kontrol altına alınmasında önemli bir rol oynar. Ayrıca yangın anında duman ve sıcak gazları içermeyen tahliye yolları için gerekli havayı sağlayarak yolcu ve personel için güvenlik sağlanmış olur (Laloğlu, 2010).

Metro sistemlerinde havalandırma ihtiyacı işletme çeşidine göre belirlenir. İşletme çeşitleri normal, sıkışık ve acil durum olmak üzere 3'e ayrılır. Havalandırma sistemi belirlenmesinde yolcuya açık alanların havalandırılması, yardımcı alanların havalandırılması, platform altı kirli hava egzoz sistemi ve tünellerin havalandırılması düşünülmelidir. Havalandırma ihtiyacı ise doğal ve mekanik olmak üzere 2 farklı şekilde sağlanır. Doğal havalandırma trenlerin tünel içerisindeki hareketinden kaynaklı olarak oluşur. Ancak doğal havalandırma tek başına yeterli olmaz ve mekanik havalandırmaya ihtiyaç duyulur. Mekanik havalandırma sistemleri ise INF (İç Havalandırma Fanı), EXF(Egzoz Havalandırma Fanı) ve TVF(Tünel Havalandırma Fanı) sistemleridir. INF sistemi temiz havanın içeri alınmasında, EXF kirli havanın dışarıya atılmasında ve TVF sistemi ise tünellerin havalandırılmasında kullanılır. Mekanik havalandırma sistemi tasarımında acil durum işletmesi şartları kriter olarak kabul edilmektedir (Aydın, 2013).

Metrolarda hava kalitesini etkileyen en önemli sebepler arasında insanlardan ve iş ekipmanlarından açığa çıkan ısı, sıcaklık, nem, trenlerin tünel içindeki hareketlerinin sonucu hava hızlarında ve basınçta meydana gelen farklılıklar, trenlerin hareketleri sonucu rayda oluşan aşınmalar, metro veya taşeron firma personellerinin çalışma esnasında yaydıkları emisyonlar gösterilebilir. Bu yüzden metro sistemlerinde hava kalitesini etkileyen faktörlerin giderilmesinde havalandırma sistemlerinin etkisi büyüktür. Kirleticilerin birçok kısmı filtreler aracılığıyla verimli bir şekilde tutulabilmektedir. Ancak ince parçacık maddelerin ($PM_{2.5}$) kontrolünün sağlanmasında metrolarda bulunan havalandırma sistemlerinin verimliliği tartışma konusudur. Bu tez ile havalandırma sistemlerinin özellikle ince parçacık maddelerin kontrolü üzerindeki etkisinin araştırılması hedeflenmiştir. Dış ortam ve metro sisteminde ölçülen $PM_{2.5}$ değerleri karşılaştırılarak ve yorumlanarak havalandırma sistemlerinin hava kalitesi üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

2. GENEL KISIMLAR

Raylı sistemleri hafif raylı sistem, metro ve tramvay olmak üzere 3 farklı sınıfta inceleyebiliriz. Bu raylı ulaşım sistemleri toplu taşıma araçlarının çekiciliğini ve kalitesini artırmada önemli bir rol oynar (Laloğlu, 2010). İstasyonların yakınındaki yerlerin durumunu etkileyebilir ve önemli yerlerin erişilebilirliğini artırır. Aynı zamanda şehir içi raylı sistem varlığıyla bir yerin değerini arttırabilir ve yerin modern ve dinamik görünmesini sağlar (Pagliara ve Papa, 2011). Hangi sistemin seçileceği yapılacak olan ön çalışma sonrası belirlenir.

Tablo 1: Tramvay, Hafif Raylı Sistem ve Metronun Genel Özellikleri (Tunc, 2007)

ÖZELLİK	TRAMVAY	HAFİF RAYLI	METRO
İSTASYON BOYU	En fazla 60 m	100 m civarında	200 m civarında
ARAÇ GENİŞLİĞİ	2200 mm – 2650 mm	Genellikle 2650 mm	2650 mm – 3050 mm
RAY TİPİ	RİD 59 veya RİD 60 oluklu ray	S46 Vinyol (Patenli) Ray	S49, UIC4 veya UIC60Vinyol (Patenli) Ray
ENERJİ TEMİNİ	Kataner	Kataner, Rijit Kataner veya 3.Ray	Kataner, Rijit Kataner veya 3.Ray
AKIM	750 Volt DC	750 DC veya 1500 DC	750 DC, 1500 DC veya 3000 DC
TİCARİ HIZ	18-20 km/saat	42-45 km/saat	42-48 km/saat
MAX. SEYİR HIZI	40 km/saat	80 km/saat	90 km/saat
SAATTEKİ MAX. YOLCU TAŞIMA	15000 yolcu/yön	35000 yolcu/yön	70000 yolcu/yön
ARAÇ UZUNLUĞU	14-20 m	20-33 m	15-23 m
DURAK ARALIĞI	300-500 m	600-1000 m	1000-1500 m
MALİYET (İstanbul için km)	5-10 milyon dolar	15-20 milyon dolar	35-55 milyon dolar

Tablo 1’de raylı sistemlerin genel özellikleri verilmiştir. Araçlara enerji temini katanerler vasıtasıyla olur. Kataner trafodan aldığı enerjiyi teller aracılığıyla araca ileten sistemdir. Rijit kataner raylı sistemlerde enerji besleme sistemlerinden kataner sisteminin tünellerde kullanılan versiyonudur. 3. Ray araçların enerjisini alttan 3. bir raydan alması sistemidir (Tunc, 2007).

Şekil 1’de görüleceği üzere ray tipleri oluklu (RID), çift mantarlı (S) ve vinyol (tek mantarlı) (UIC) olmak üzere 3 sınıfa ayrılabilir. Şehir içinde lastikli oto araçlarının da zaman zaman kullanabildiği oluklu ray tipi tramvayda tercih edilen sistemdir. Hafif raylı sistemlerde ise mantarlı sistem tercih edilirken, trenlerin sıkça geçtiği metro gibi sistemlerde vinyol tipi raylar tercih edilmektedir. Metro sistemlerinde çift mantarlı sistem de tercih edilebilir ancak bu ray tipinde araç geçtikçe aşınmalar çok olacağından dolayı genellikle vinyol tipi raylar tercih edilir. (Eroğlu 2014; Tarhan 2009).



Şekil 1: Sırasıyla Oluklu Ray Tipi ve Mantar Ray Tipi (Eroglu 2014; Tarhan 2009)

Tablo 1’den anlaşılabacağı gibi metro sistemlerinin avantajları diğer sistemlere göre çok daha fazladır. Ancak metro sisteminin en büyük dezavantajı ise maliyetidir. Durak aralıklarının fazla olması, güzergah olarak daha uzun mesafelerde hizmet verebilmesi, daha hızlı olması, trafiğe girmemesi, daha çok yolcu kapasitesine sahip olması metro sisteminin avantajlarıdır.

2.1. RAYLI SİSTEM ÇEŞİTLERİ

Raylı sistemlerin tercihinde güzergahların potansiyel yolcu sayısı, yatırım maliyeti, işletme maliyeti, verimlilik vb. gibi birçok neden düşünülerek sisteme karar verilir. Metro sistemi en iyi ve avantajlı gibi görünen sistem olsa da yatırım ve işletme maliyeti yüksektir. Bu yüzden hangi sistemin tercih edileceği daha önceden yapılacak olan ön çalışma sonrası karar verilir.

2.1.1. Tramvay Sistemi

Tramvay sistemi ulaşımda kullanılan en eski sistemdir. Hızları hemzemin güzergâhta olduğu için düşüktür. Trafiğin içerisinde geçmek zorunda kalması, trafik ışıkları vb. gibi nedenler hızının düşük olmasının sebeplerindendir. Duraklar arası mesafe azdır, çoğunlukla yer üstünde tesis edilir, az mekânsal içeriğe sahiptir ve genellikle maliyetleri diğerk raylı sistemlere göre azdır (Pagliara ve Papa 2011).

2.1.2. Hafif Raylı Sistem

Sistem ve işletme özellikleri açısından tramvaydan daha yüksek, metrodan daha az gelişmiş sistemlerdir. Metropollerde ana ulaşım sistemi olarak tercih edilmemelidir. Çünkü yolcu sayısı kapasitesi tramvaydan fazlada olsa metrolara göre daha azdır. Bu yüzden ana ulaşım olarak metro sistemi tercih edilmelidir (Pagliara ve Papa 2011).

2.1.3. Metro Sistemi

Metropollerde ulaşımın en önemli ve gelişmiş sistemleridir. Metro sistemleri, yer üstünde yapılaşmanın sonucu doğan alan sıkıntısına çözüm olarak yer altında tesis edilmesi, yolcu kapasitesinin yüksek olması, hızlı olması ve trafiğe dahil olmaması özellikleri yüzünden ulaşımda çok önemli bir paya sahiptir. Metro projeleri şehirde yer alan önemli bölgeler ve yapılara diğerk toplu taşıma sistemleri ile entegre edilecek şekilde dizayn edilir. Böylece hem yolcu sayısı artırılır hem de ulaşım kolaylaştırılır (Pagliara ve Papa 2011).

Metro sistemlerinin avantajlarının yanı sıra dezavantajları da vardır. Bunlardan en önemlisi maliyettir. Yatırım maliyeti metro bilet geliri ile kısa sürede karşılanmayacağı için genellikle parayı hükümet veya belediyeler sağlar. Maliyeti yüksek olması sebebi ile metro sisteminin gerekliliğinin belirlenmesi gerekir. Yapılacak bölgedeki nüfus yoğunluğu, araba sayısı, kentin önemli bölge ve yapılarının bulunduğu bölgeler, turizm, iş alanları vb. gibi nedenler göz önünde bulundurularak hava, kara, deniz, tren gibi toplu taşıma sistemleri ile de entegre olacak şekilde metro projeleri hayata geçirilmektedir (Laloğlu, 2010).

2.2. RAYLI SİSTEMLERDE HAVALANDIRMA

Tramvay ve Hafif Raylı sistemlerin istasyonları ve hat güzergahı genellikle yer üstünde bulunur. Bu yüzden havalandırma doğal yollarla rahatlıkla sağlanabileceğinden mekanik havalandırmaya ihtiyaç duyulmaz. Metro sistemleri yer altında olduğu için doğal havalandırmanın yanı sıra mekanik havalandırmaya da ihtiyaç duyulur.

2.2.1. Metrolarda İç Ortam Koşulları

Metro sistemlerinde havalandırma sistemlerinin kurulmadan önce dikkat edilmesi gereken hususlar vardır. Bunlar dış ve iç ortam şartlarıdır.

2.2.1.1. Dış Ortam Şartları

Havalandırma tesisatı tasarımı öncelikle mevsimsel şartlar göz önünde bulundurularak en sıcak ve en soğuk günlerin ortalama sıcaklık dağılımından yararlanılarak yapılır. Diğer dikkat edilmesi gereken husus ise doruk saatlerdeki yani yolcu potansiyelinin fazla olabilecek saatlerdeki ortam şartlarıdır (MHSTŞ, 2018).

Tablo 2: Dış Ortam Şartları (MHSTŞ, 2018)

Yaz Şartları	Dış Hava Sıcaklığı (Gündüz)	33 °C
	Dış Hava Sıcaklığı (Akşam Doruk Saati)	29 °C
	Nisbi Nem (Akşam Doruk Saati)	70 %
Kış Şartları	Dış Hava Sıcaklığı (kuru termometre)	-3 °C

2.2.1.1. İç Ortam Şartları

İç ortam şartları ise sıcaklık ve nem, hava hızları ve hava değişim katsayıları faktörlerini içermektedir (Laloğlu, 2010). Tablo 3'te metro havalandırma sistemlerinde iç ortam şartları verilmiştir.

Tablo 3: İç Ortam Şartları (MHSTŞ, 2018)

MAHAL	Kış °C Asgari	Yaz °C Azami	Basınç	HAVA MİKTARI	TAZE HAVE ORANI	SİSTEM TÜRÜ
Yer altı yolculu açık alanlar Platform (Peron) Konkors (Bilet Holü)	- -	33 33	N/P N/P	4 d/h (1) 4 d/h (1)	%100 %100	E ve B E veya B
Tüneller: Normal işletme Sıkışık işletme	2 2	32 34	N/P N/P	Kritik hıza göre Kritik hıza göre	%100 %100	E ve B E ve B
Acil durumda çıkış geçitleri	-	50	P	(2)	%100	B
Sinyalizasyon, Haberleşme, Paks pano, Fiber optik kablo	18	25	P	3,3 m ³ /h, m ² (3)	%100	B ve K
Akü	25	25	N	6 d/h	%100	E, B ve K
İstasyon kontrol, Sağlık, Büro, vb.	22	25	P	36 m ³ /h, kişi 4 m ³ /kişi (4)	%100	E, B ve K
OG, AG ve DC ekipman	15	40	P	Isı Yüküne Göre	%100	E ve B
DC ayırıcı	15	40	P	Isı Yüküne Göre	%100	E ve B
Fan odaları, Yangın pompa, GSM, Kollektör, Yedek oda	-	-	N	4 d/h	%100	E ve B
Elektrik pano	-	-	N	6 d/h (5)	%100	E ve B
Pis su pompa, Drenaj pompa, Temizlik	-	-	N	6 d/h (5)	-	E ve B
Tuvalet: Yolcu	(7)	-	N	150 m ³ /h, ünite (6)	-	E
Tuvalet: Personel	(7)	-	N	100 m ³ /h, ünite (6)	-	E
Teknik oda, Soyunma odası ve personel koridoru	-	-	N/P	Bitişik mahaller için tamamlama havası (8)	%100	E veya B
Bebek bakım	25	-	N	4 d/h	-	E
Mescit	20	25	P	4 d/h	%100	E, B ve K
Atölye, vb.	18	25	-	4 d/h	%100	E, B ve K

Tablo 3 ile ilgili notlar aşağıda yer almaktadır.

D.H.	-	Dış hava
P	-	Hafif artı
N	-	Hafif eksi
E	-	Emici
B	-	Besleyici
K	-	Klima (İklimlendirme)
d/h	-	Saatte hava değişim sayısı

- (1): Duman atımı için 1 MW yangın yüküne göre hesaplanan debi kullanılacaktır.
- (2): Acil durum basınçlandırma gereksinmesi hesabına göre belirlenecektir.
- (3): Asgari 150 m³/h, oda kullanılacaktır.
- (4): Asgari 500 m³/h, oda kullanılacaktır.
- (5): Besleme havası miktarı 300 m³/h'e kadar olan mahallerde besleme havası için kapı menfezi kullanılabilir.
- (6): WC taşları ve pisuarlar bir ünite, lavabolar yarım ünite olarak değerlendirilecektir.
- (7): Toprak altında olmayan tuvalet ve diğer ıslak hacimler 10 °C'ye ısıtılacaktır. Toprak altında olanlar ise ısıtılmayacaktır.
- (8) Tamamlama havası koridorlardan gerekli hava ihtiyacı karşılandığında yapılacaktır. Asgari 1,1 m³/h, m² kullanılacaktır.
- (9): Pozitif basınçta tutulacak mahaller için sağlanacak temiz hava miktarı kirli havadan %10 daha yüksek olacaktır.
- (10) : Negatif basınçta tutulacak mahaller için sağlanacak kirli hava miktarı temiz havadan %10 daha yüksek olacaktır (MHSTŞ, 2018).

İstasyon içinde sıcaklık, nem, insan ve ekipmanların aktivitelerine ve hava hızı değişkenlerinin yolcu ve personel konforu üzerindeki etkisi ASHRAE(Isıtma Soğutma ve İklimlendirme Mühendisliği Amerikan Birliği) tarafından açıklanan Bağlı Sıcaklık İndeksi (BSİ) ile belirlenir. BSİ değişkenlerinin konfor üzerindeki etkileri yolcu ve personel tarafından anlık sürelerde hissettiği konfora dayanmaktadır. Çünkü yolcular bulundukları ortamda kısa bir süre havalandırmanın etkilerine maruz kalmaktadır (Ozbakır, 2007).

Hava hızları araç hareketlerinden kaynaklanır. Aracın tünel içerisindeki hareketi nedeni ile hava trenin önünde ileri itilir ve tren hızına bağlı olarak değişir. Tren araçlarının yaptığı bu harekete piston etkisi denir. Bu yüzden tünellerdeki hava hızları sabit olmaz ve istasyonlarda da geçici de olsa yüksek hava hızları meydana gelir. En yüksek hava hızı 5 m/s olarak Kabul edilmektedir. Tehlike hallerinde çalışan havalandırma sistemleri nedeni ile hava hızı en fazla 11 m/s olmalıdır (Eralp ve Musluoğlu, 2003). İstenen hava hızları istasyon ve tüneller için Tablo 4'te görülmektedir.

Tablo 4: İstasyon ve Tünellerde Hava Hızları (URL 1)

	Minimum	Ortalama	Azami
Platform (yatay)		3 m/sn	5 m/sn
Merdiven ve yürüyen merdivenler		1,8 m/sn	2,5 m/sn
Tüneller (tehlike hallerinde)	0,75 m/sn		6 m/sn
İstasyon girişi			6 m/sn
Havalandırma bacaları		5 m/sn	11 m/sn
Kaldırım ızgaraları		2,5 m/sn	5 m/sn
Kaldırımdan 3 m ve daha yüksekte menfezler		5 m/sn	8 m/sn

NFPA (Ulusal Yangından Korunma Kurumu) VE ASHARE standartlarına göre normal ve acil durumunda saatlik olarak istasyon ve tünellerde yer alan her mahal için hava değişimleri belirlenmiştir. Ayrıca bu standartlara göre minimum kişi başına alınacak taze hava miktarı $0,005 \text{ m}^3/\text{s}$ olması gerekmektedir (Ozbakır, 2007).

2.2.2. Metro Sistemlerinde Havalandırma

Her yeraltı istasyonunda iki adet tünel havalandırma fanı odası ve gerekli alan kadar havalandırma şaftları, en az bir adet egzoz temizleme fan odası, en az bir tane taze havalandırma fan odası ve gerekli alan kadar havalandırma şaftları bulunur (URL 1).

Elektrik enerjisi ile çalışan vagonlardan kaynaklı ısı, yolcular ve personel için konforsuz şartlar sağlamasının yanında iş ekipmanlarına da zararı olmaktadır. Sıcaklık dışında tünellerin ve istasyonların tavanı ve duvarlarından sızan ve önlenmesi güç olan suların sebep olduğu nem, hava hız ve basınçlarındaki değişimler de yolcu, personel ve iş ekipmanları için konforsuz ortam sağlamaktadır. Sıcaklık, nem, koku ve havalandırmadan kaynaklı hava akımının personele, yolcuya ve iş ekipmanlarına etkileri üzerinde durulması gereken önemli sebeplerdir. Havalandırma tesisatı ile yolcu ve personel konforu ve iş ekipmanlarının kullanım ömrünün uzamasının yanı sıra acil durumlarda kaçış yollarında oluşabilecek duman ve sıcaklık kontrolü de sağlanır (URL 1).

2.2.2.1.Havalandırma Sistemleri Dizayn Kriterleri

Havalandırma tesisatı tasarım aşamasında iç ve dış ortam şartlarının belirlenmesi gerekmektedir. Havalandırma tesisatı dizaynı için toplu bir kriter bulunmamasına rağmen TS2164, TS 3419, TS 12127, ASHRAE, NFPA standartlarından yararlanılarak yapılmaktadır.

İstasyon ve tünellerdeki havalandırma sistem ve çeşitleri belirlenirken sistem tasarımı 4 bölümden oluşmaktadır. Bunlar; yolcuya açık alanların havalandırılması, yardımcı alanlar havalandırılması, platform alt kirli hava egzoz sistemi ve tünel havalandırma sistemleridir (Laloğlu, 2010).

2.2.2.1.1. Yolcuya Açık Alanların Havalandırılması

Bilet holü, ara katlardaki kontrollü ve kontrolsüz alanlar, iniş ve çıkış merdivenleri ve geçitlerin havalandığı kısımdır. Vagonların yaydığı ısı, insanlardan ve aydınlatma tesisatlarından kaynaklanan ısı konforu etkilemektedir. Bu alanlarda havalandırma ve soğutma öncelikle doğal yollarla sağlanması düşünülür. Bu da tren araçlarının hareketi sonucu oluşan “piston etkisi” dediğimiz havanın araç ile dışarı atılması ve içeri alınmasıdır (Ozbakır, 2007).

Araç hareketi sırasında istasyona yaklaşp durduğu anda trenin önünde oluşan basınç yardımı ile tünel ve istasyon içindeki sıcak ve kirli havayı en yakın şafttan, istasyon giriş ve çıkışlarından ve diğer açıklıklardan dışarı atar. Genellikle istasyonların her iki başında bulunan dış havaya açık tünel ile aynı en kesit alınana sahip şaftlardan atılır. İstasyondan tekrar hareket etmeye başladığı anda ise negatif basınç yardımı ile aynı açıklıklardan dış hava içeri alınmış olur. Piston etkisinin yarattığı bu durum doğal havalandırma olarak adlandırılmaktadır. Ancak “normal işletme” diye tanımlanan, zeminin yaklaşık iki veya üç kat altında bulunan, 5 veya 6 dakika arayla araç geçişi olan durumlar için ihtiyacı karşılamaktadır. İşletmeden kaynaklı sorunlar, tren gecikmeleri ve yolcu yoğunluğunun arttığı “Sıkış İşletme” diye tanımlanan durumlarda ise doğal havalandırma yetersiz kalmakta mekanik havalandırmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Mekanik havalandırmanın olmasının bir başka nedeni ise “Acil Durum İşletmesi”dir. Yangın sonucu oluşacak dumanın tahliyesi, yolcu ve personelin güvenli tahliye edilmesi ve acil durumlara rahatlıkla müdahale edilebilmesi için gerekli olan havalandırma mekanik yollar ile sağlanır.

Mekanik havalandırma “Acil Durum İşletmesi” kriterleri göz önüne alınarak tasarımı yapılır. Her bir işletme için ayrı ayrı tasarım düşünmek ekonomik açıdan ağır bir yük getireceğı için en kötü durum düşünülerek acil durumlar için mekanik havalandırma dizayn edilir. Mekanik havalandırmanın fanları değişken devirli çalıştırılarak havalandırma tesisatının her işletme şekli için gereken hava debisi sağlanır. Sıkışık işletme durumlarında fan devri düşürülerek menfez ve hava kanalları ile peron havalandırılır ve soğutulur. Aynı şekilde acil durumlarda ise fan devri artırılarak kullanılır (Ozbakır, 2007).

2.2.2.1.2. Yardımcı Alanların Havalandırılması

İstasyonlarda işlevsel alanlar da bulunmaktadır. Bunların en başında elektrik ve elektronik odalar gelir. Bu odaların yanı sıra drenaj pompa odaları, temizlik odaları, WC, personel soyunma ve dinlenme odaları vs. gibi işlevsel alanlar da vardır. Elektrik ve elektronik odalar yer üstünde dışarıda yapılmak istense de alan sıkıntısı ve görsellik yüzünden genellikle yer altında istasyonlar içinde bulunmaktadır (Ozbakır, 2007).

Araçlar için gerekli enerjinin sağlandığı cer trafo odası, istasyon içi elektrik ihtiyacı trafo odaları, orta gerilim ve alçak gerilim pano odaları, gazlı söndürme odaları elektrik odalarıdır. Bu odalarda sürekli olarak personel bulunmaz, bakım ve onarım amacıyla personel giriş çıkışı olur. Bu yüzden bu odalarda temiz hava gereksinimi yok kabul edilir. Bu mahallerde ısıtma gereksinimi duyulmaz çünkü içlerinde ısı yayan elektrikli cihazlar mevcut olduğu için sıcaklık hiçbir zaman kritik en düşük sıcaklık olan 5 °C'nin altına düşmez. Ancak buralarda elektrikli cihazların sürekli çalışmasından kaynaklı ortam sıcaklığının 40 °C'nin üstüne çıkmaması gerekir (Ozbakır, 2007). Soğutmanın sağlanarak sıcaklığın kritik seviyelere ulaşmaması amacı ile mekanik havalandırma kullanılır. Dış ortamdan alınan temiz hava kaba filtreden geçirilip, vantilatörle basınçlandırılıp, hava kanalları ve menfezlerle alanlara verilir. Aynı alandan menfezler, hava kanalları ve aspiratör ile emilen ısınmış hava da dışarı atılır. Havalandırma ile akü odalarının nötr, yangın tüp odasının eksi basınçta tutulması, diğer odalarında az bir artı basınçta tutulması yararlı olacaktır. Enerji gücü büyük olan Cer trafo ve iç ihtiyaç trafo odalarına temiz ve soğuk havanın döşeme seviyesinde üflenmesi, kirli ve sıcak olan havanın tavan seviyesinden emilmesi tasarım aşamasında dikkat edilmesi gereken başka bir unsurdur. Böylece hava sirkülasyonu sağlanarak ortam sıcaklığı kritik sıcaklığa ulaşması sağlanır. Havalandırma tesisatında fanlarda çıkabilecek sorunlara karşı vantilatör ve aspiratörlerin birer asıl ve birer yedek olarak bulunması gerekmektedir. Ayrıca havalandırma tesisatının uzaktan erişim ile izlenme ve kumanda edilme olanağı da bulunması gerekmektedir. Soğutma amacı ile bu mahallerde klima da tercih edilebilir ancak klimanın işletilme maliyeti nedeni ile çok tercih edilmemektedir.

Haberleşme ve sinyalizasyon ekipmanlarının konulduğu yerlere elektronik odalar denmektedir. Bu odalarda havalandırmanın yanı sıra ısıtma ve iklimlendirme koşulları olmalıdır. Yazın kışın sıcaklığın sabit tutulması, nem kontrolü, artı basınç ve daha yüksek tozsuzluk ana koşullardır. Dış ortamdan alınan temiz hava kaba ve ince filtrelerden geçirildikten sonra vantilatörle basınçlandırılıp hava kanalları ve menfezler aracılığıyla alanlara üflenmesi, düşük miktardaki egzoz havasının ise motorlu yangın damperli transfer merkezi ile dışarı atılması gerekir. Ayrıca bu alanların klima ile sıcaklığının sürekli olarak sabit olması sağlanır (MHSTŞ, 2018).

Elektrik ve elektronik odalar dışında istasyonlarda yangın pompa (sulu söndürme springler sistemi) odaları, drenaj pompa odaları, WC, temizlik odaları, personel dinlenme ve soyunma odaları, istasyon işletme odaları, hattın başlangıç ve bitiş istasyonlarında sürücü dinlenme odaları bulunur. Bunların dışında çalışma ofisleri (taşeron firmalar, metro personeli odaları vs.) ve ticari alanlar (büfe, kart başvuru merkezi vs.) gibi diğer alanlar da bulunabilir. Bu alanlarda da konfor şartlarının sağlanması amacıyla havalandırma tesisatı şarttır. WC ve temizlik odaları gibi ıslak hacimlerde yalnız hava kanallı egzoz sistemi yeterli olur. Diğer odalarda ise yalnız hava kanallı egzoz sistemi ya da hava kanallı egzoz ve hava kanallı üfleme sisteminin kombinasyonu olacak şekilde tasarlanabilir. Bu odalarda gerekli durumlarda hava yükü durumuna göre klima da tercih edilebilir. Özellikle yaz aylarında ekipmanların verimliliği ve personelin konforu için klima tesisatı tasarlamakta fayda vardır.

Ofislerde %100 temiz hava olmalı ve egzoz havası da dışarı atılmalıdır. Cer gücü trafo odaları, elektrik odaları ve makine odalarında ortam sıcaklığı 40°C'yi aşmaması için taze hava ve egzoz fanları ile hava sirkülasyonu sağlanır. Asansör makine daireleri, akü odaları, WC'ler ve drenaj pompa odalarında egzoz fanları ile alanlar negatif basınçta bırakılır ve odalara yerleştirilen panjurlar ile taze hava içeri alınması sağlanır (MHSTŞ, 2018).

2.2.2.1.3. Peron Altı Kirli Hava Egzoz Sistemi

Normal işletme durumlarında istasyon teçhizatının, yolcuların, personelin ve araçlardan kaynaklı oluşan ısının giderilmesinde ve acil durum anında dumanın dışarı atılmasına yardımcı olmak için yer altı istasyonlarında platform altı boşaltma sistemi oluşturulur. Sistem yeterli hava akışını sağlayacak, platform altındaki yerlerde her hat için kanallar bulunmalı ve kanalların bakımının yapılabilmesi için çıkarılabilir menfezler kullanılmalıdır (Laloğlu, 2010).

2.2.2.1.4. Tünellerin Havalandırılması

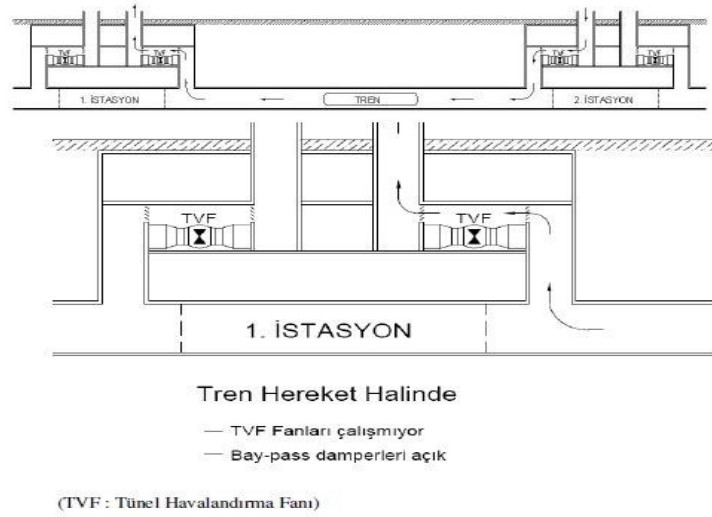
Normal, sıkışık ve acil durumlarda tünel ortam şartlarını kontrol etmek amacıyla tünel havalandırma sistemi kullanılır. Tünel havalandırma sistemi aynı zamanda yüksek hızda hareket eden araçlar sebebi ile oluşan ısı ve trafikten kaynaklı etkileri de kontrol altında tutacak şekilde tasarımı yapılır. Tünel havalandırma sistemleri mekanik teçhizat, fanlar, damperler, panjurlar ve susturuculardan oluşur. Fanlar çift yönlü çalışır ve hem havayı besleme hem de havayı emme durumunda tamamen tersine çevrilebilir yani aksiyal akışa sahiptir. İstasyonun her iki baş tarafında bulunan şaftlardaki damperler ya fanların çalışması sırasında ya da tren hareketi sırasında fandan By-Pass yoluyla havanın yönlendirilmesi sağlanır.

Tüm işletme durumlarında çalışabilecek fan devrinin ayarlanması ve damper konumunun elde edilmesi için tünel havalandırma tesisatının hem lokal hem de kontrol merkezinden uzaktan kontrol edilecek şekilde olması gerekir (URL 1).

İşletme esnasında oluşabilecek ısı kaynakları mevcuttur. Bunlar araçtan kaynaklı olan aerodinamik sürtünmeden açığa çıkan ısı, mekanik dirençlerden gelen ısı, resistör dirençlerinden gelen ısı, motor kayıplarından açığa çıkan ısı, kataner ve ray dirençlerinden gelen ısı, araç soğutma dış ünitesinden gelen ısı, araç aksesuar motorlarından gelen ısıdır. Araç dışında oluşacak diğer kaynaklar ise tünel aydınlatmalarından açığa çıkan ısı ve istasyondan açığa çıkan ısıdır. İstasyonda ısının açığa çıkmasındaki ana kaynaklar ise yolculardan kaynaklanan ısı, aydınlatma, reklam pano aydınlatması, sinyaller ve yürüyen merdivenlerdir. Açığa çıkan ısıların giderilmesinde ise istasyonlarda platform altında emiş yapan havalandırma tesisatı bulunmaktadır. Platform altı havalandırma tesisatı %60 - %65 arası verimlilikle çalıştırılır. Öte yandan toprak temaslı duvarlardan da ısı transferi gerçekleşir (Laloğlu, 2010).

a. Normal İşletme Esnasında Tünellerin Havalandırılması

Trenlerin normal periyotlarında seyir ettiği, çevre koşullarının uygun olduğu (sıcaklık, nem vs.) ve yolcu popülasyonunun yüksek olmadığı durumlarda araç hareketinden kaynaklı piston etkisi ile çalışacak şekilde tünel havalandırma tesisatı tasarımı düşünülür. İstasyonun her iki ucuna yerleştirilen tünel havalandırma sistemlerinde yer alan şaft damperlerinden By-Pass yapacak şekilde havalandırma fanları çalıştırılmadan trenin hareketi sonucu sıcak hava dışarı atılır ve taze hava içeri alınır. Sıcaklığın arttığı durumlarda ise piston etkisinin oluşturduğu hava akımını desteklemek için havalandırma fanları çalıştırılarak istasyon ve tünellerdeki sıcak hava dışarı atılıp, taze hava içeri alınır (MHSTŞ, 2018). Şekil 2’de normal işletme durumunda tren hareketinden kaynaklı piston etkisinin oluşturduğu hava akımı görülebilmektedir (Neccar, 2007).



Şekil 2: Normal İşletmede Havalandırma Sistemi (Neccar, 2007)

b. Sıkışık İşletme Esnasında Tünellerin Havalandırılması

Araçların normal periyotlarında seyir etmediği durumlarda piston etkisi sağlanamazsa hava akımı tünel havalandırma fanları ile sağlanır. Tünel havalandırma fanları kirli-sıcak havayı dışarı atmak ve taze-soğuk havayı içeri almak üzere çift yönlü çalışmaktadır. Hat boyunca tüm istasyonlarda her iki uçta da bulunan bu sistem ile tünelin bir ucundaki havayı boşaltma diğer ucundaki ise havayı besleme durumunda olur. Yani fanlar itme-çekme hareketi ile çalıştırılmış olur. Lokal veya sinyal sistemi ile uzun süre tren geçmediği zamanlarda TVF'ler ile kirli hava boşaltılmış ve taze hava içeri alınmış olur. İtme-çekme hareketi araç istikameti yönünde olur (MHSTŞ, 2018).

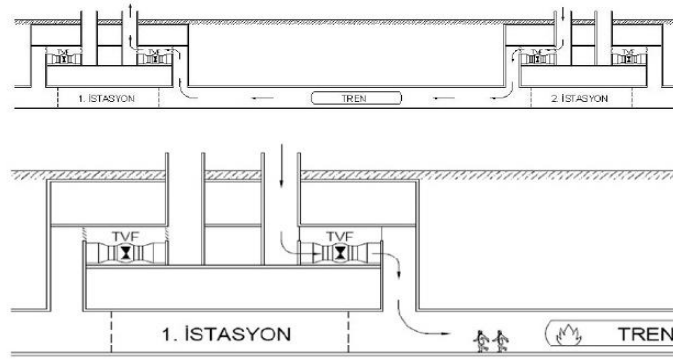
Tünel havalandırma sistemleri tasarımında dikkat edilmesi gereken hususlar vardır. İstasyonların her iki ucunda bulunan hava çekiş şaftları, araçtan kaynaklanan piston etkisi basıncına yardımcı olur. Havalandırma şaftları mümkün olduğu kadar kolay bir hava geçiş yolu sağlayacak şekilde olması gerekmektedir. Her şaftta 2 adet tamamen tersine dönebilir (aksiyal) fan ile By-Pass ve yalıtım damperleri olur ve fanlar hem besleme hem de emme bakımından eşit performansta olur. By-Pass damperleri normal işletme sırasında demiryolu ve yüzey arasında hava akımını sağlayacak şekilde yerleştirilir. Yalıtım damperleri ise olağanüstü durumlarda demiryolları arasındaki hava akımını önleyecek şekilde yerleştirilir. Tünel ısı ve duman dedektörleri ile belirlenen sıcaklığın üstüne çıkıldığı durumlarda tünel havalandırma fanları belirlenen sıcaklığa düşürülmek amacıyla soğutmak üzere çalıştırılır (Neccar, 2007).

c. Acil Durum İşletme Esnasında Tünellerin Havalandırılması

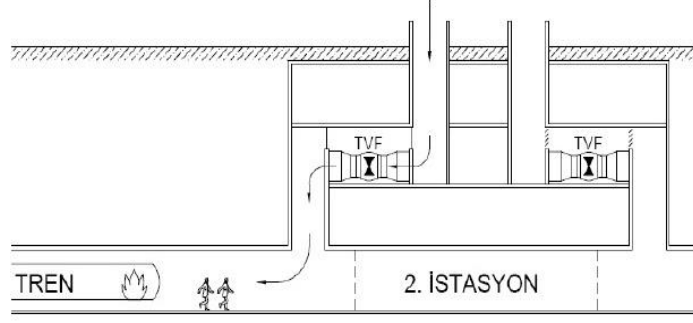
Metrolarda acil durumlarda konfor ve güvenliğin sağlanması amacıyla yoğun tedbirler düşünülmüştür. Acil durumların en başında ise yangınlar gelmektedir. İstasyon, tünel veya araçlarda meydana gelebilecek yangınlarda insanların tahliyesinin sağlanarak güvenli ve konforlu bir bölgeye ulaşmalarının sağlanması gerekmektedir. Tünel ve istasyonlarda normal, sıkışık ve acil durum işletme durumları için aerodinamik, termodinamik ve duman dağılımı analizleri aşırı çevre koşulları göz önüne alınarak yapılmalıdır. Analizler, işletme durumlarına göre oluşabilecek tahmini sıcaklık dereceleri, bağıl nemleri, hava akım hızları, duman dağılımı ve trenin oluşturduğu basınç koşullarını da kapsamalıdır (Eralp ve Musluoğlu, 2003).

Yangın esnasında dumansız bir acil çıkış yolunun sağlanabilmesi, yolcu ve personelin tahliye yolunda sıcaklığın maksimum 60 °C seviyesinde tutulabilmesi ve bu koşulların bir saat süreyle sağlanacak kapasitede olması gerekir. İstasyon ve tünellerde bulunan teçhizatların da bir saat boyunca 250 °C sıcaklığa dayanıklı olması gerekir. Yangın durumlarında TVF ve EXF fanları çalıştırılarak duman tahliyesi ve tünelin soğutulması sağlanır. Aynı zamanda yolcu ve personel tahliye yönünün tersi yönünde dumanı iterek güvenli kaçış yolu da sağlanması gerekir (Eralp ve Musluoğlu, 2003).

Şekil 3'te tren hareketinin 2. İstasyondan 1. İstasyona hareket ettiği anda 1. İstasyona yakın bölgede araç içinde çıkan yangının görseli görülebilmektedir. Araç hareket durumunda hava yönü 2. İstasyondan 1. İstasyona doğru iken 1. İstasyona yaklaşıldığında araç içinde yangın çıktığı anda 1. İstasyondaki TVF fanları ters yönde çalıştırılarak dışarıdan alınan taze hava tünele doğru basılacak ve hava akış yönünü 1. İstasyondan 2. İstasyona doğru yönlendirilerek duman ve sıcak hava 2. İstasyonda bulunan TVF aracılığıyla dışarı atılacaktır. Böylece 1. İstasyona doğru yolcu ve personel için güvenli kaçış yolu sağlanacaktır. Şekil 4'te ise yukarıda bahsedilen durumun tam tersi şekilde TVF fanları çalıştırılarak güvenli kaçış yolu sağlanır (Neccar, 2007).



Şekil 3: Trenin 1. İstasyona Yakınken Yangın Çıkması Durumu (Neccar, 2007)



Şekil 4: Trenin 2. İstasyona Yakın İken Yangın Çıkması Durumu (Neccar, 2007)

Kapalı alanda oluşan yangın, başlamasından sönmeye kadar 3 evreye ayrılır. Bunlar gelişmekte olan yangın, tam gelişmiş yangın ve sönmek üzere olan yangındır. Yangında bu evrelerinin davranış biçimi değiştiğinden ayrı ayrı olarak Yangın Simülasyon programların yardımı ile değerlendirilir. Program sayesinde gözlenmesi beklenen yangın evrelerinin süreleri, her evre için açığa çıkan ısı güçleri ile tünel içindeki yangın anında TVF ve EXF havalandırma fanlarının belirlenen hava hız değerini sağlama konusunda yeterlilikleri ve tünel içindeki sıcaklık dağılımı bulunabilir. Böylece Yangın Simülasyon programları ile yangın anındaki davranışlar incelenerek alana koyulacak fanların kapasitesinin yeterliliğine bakılmış olur (Kayılı ve Eralp, 2007).

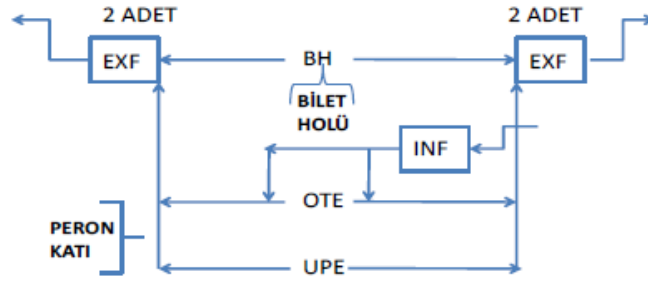
2.2.2.2. Metro Sistemlerinde Yolcu Bölgelerinin Havalandırılması

Metrolarda normal şartlar altında ve acil durumlarda hava kalitesinin iyileştirilmesi ve konforun sağlanması amacıyla yolcuya açık alanların havalandırma sistemleri, platform alt kirli hava egzoz sistemi ve tünel havalandırma sistemleri olmak üzere 3 tane sistem bulunmaktadır. Yardımcı alanlar havalandırma sistemi ise personel ve yolcuların bulunmadığı yerlerin ihtiyacını karşılamaktadır. Personeller bu alanlarda bakım veya onarım dışında sürekli olarak bulunmazlar. Bu yüzden yardımcı alanların havalandırma sistemlerinden çok diğer havalandırma sistemlere odaklanılacaktır.

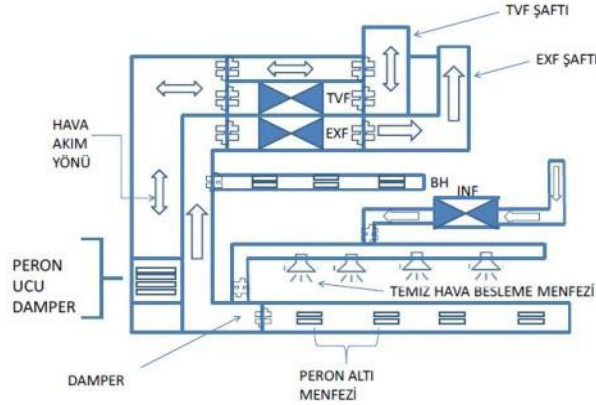
Temiz hava INF havalandırma sistemlerinin yardımı ile şaftlardan çekilerek yolcuların bulunabilecekleri alanlara verilmektedir. Acil durumlarda da temiz hava ihtiyacı da INF sistemlerinden yararlanılmaktadır. Kirli hava EXF havalandırma sisteminin yardımı ile çekilerek istasyondan dışarı şaftlar aracılığıyla atılmaktadır. Ayrıca EXF sistemi acil durumlarda dumanı istasyondan dışarı atması amacıyla da kullanılmaktadır. TVF sistemleri ise

tünellerin havalandırılması, sıkışık durumlarda ve acil durumlarda hava ihtiyacını karşılaması amacıyla kullanılmaktadır. TVF sistemleri hem temiz havayı çekmek hem de kirli havayı dışarı atacak şekilde aksiyel fanlardan oluşmaktadır. Bu sistemler yolcuların seyahati boyunca, personellerin de iş ortamında konforun ve güvenliğin sağlanması amacıyla kullanılmaktadır.

Şekil 5'te M2, M1A ve M4 hatlarında kullanılan EXF ve INF sistemlerinin dizaynı görsel olarak gösterilmiştir. Şekil 6 'da ise TVF, EXF ve INF sistemlerinin çalışması ve hava akım yönleri görsel olarak gösterilmiştir.



Şekil 5: EXF ve INF Sistemlerinin Planlaması (Aydın, 2013)



Şekil 6: TVF, EXF ve INF Sistemlerinin Planlaması (Aydın, 2013)

Havalandırma sistemlerinin vasıtasıyla dışarıdan alınan ve içeriden çekilen havanın içinde bulunan kirlenmelerin filtreler yardımıyla tutulması gerekmektedir. METROİSTANBUL firması ile yapılan görüşmede TVF sistemlerinde filtre olmadığı, EXF ve INF sistemlerinde ise filtrelerin bulunduğu söylenmiştir. Bu filtrelerin ayda bir kez yıkanarak temizlendiğinin ve gözle görülür bir yıpranma varsa eğer değiştirildiğinin, filtre çeşidinin satın almaya bağlı olduğunun bu yüzden her bölgede farklılık gösterebileceğinin bilgisi alınmıştır.

2.3. METROLARDA HAVA KALİTESİ

Günümüzde dünyada yaklaşık 160 şehirde metro sistemi kolay ve ekonomik açıdan ulaşımında aktif olarak kullanılmaktadır. Yerel yönetimler metro sistemlerindeki güvenlik ve temizlik konularını sürekli takip etmektedirler. Dünya genelinde her yıl dünya toplam nüfüsünün 5 katı kadar fazla insan (30 milyar/yıl) metrolarda seyahat etmektedir. Bazı metro sistemleri özellikle yoğun saatlerde oldukça kalabalık ve yoğun bir yolcu kapasitesine sahiptir. Dünyada en kalabalık metro sistemi yılda 3,16 milyar yolcu kapasitesi ile Tokyo metrosudur. 1927 yılında açılan Tokyo metrosunda günde 8,7 milyon kişi seyahat etmektedir. İkinci en kalabalık metro sistemi ise Moskova'dadır ve günde 6,6 milyon yolcusu bulunmaktadır (URL 2).

Asya ve Avrupa'da bulunan metro sistemlerinin yapım yılları, yolcu kapasiteleri ve ölçüm yapılan bazı iç ortam kirletici değerleri Tablo 5'te verilmiştir. Metro sistemlerindeki çevresel değerlendirmeler yapılırken metro yolcu platformları, araç içleri ve tüneller olmak üzere temel üç bölüm değerlendirilmektedir. Metrolarda takip edilen iç ortam çevresel koşullar ise termal koşullar, hava kalitesi, ışıklandırma ve gürültünün kontrolüdür. İç ortam hava kalitesi takibinde dikkate alınan genel parametreler partikül maddeler (TSP, PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁ ve UFP), Radon, CO₂, VOC türleri, Mikroorganizmalar, Mantarlar ve Metallerdir. Son yıllarda ise Siyah Karbon önemle takip edilmeye başlanmıştır (Li ve diğ. 2015; Morena ve diğ., 2015; Onat ve diğ., 2019).

Tablo 5'te görüleceği gibi yapılan çalışmaların büyük çoğunluğunda partikül madde izlemesi yapıldığı anlaşılmaktadır. 1995'de ilk metrolarda PM çalışması 1863'de kurulan Londra metrosunda yapılmış ve 893 µg/m³ PM_{2.5} konsantrasyonu tespit edilmiştir (Xu ve Hao, 2017). Asya ülkelerinde genel olarak 10 ile 200 µg/m³ aralığında PM değişimi gözlenirken Shangay'da en yüksek PM ölçümleri olduğu görülmektedir (sırasıyla PM₁₀, PM_{2.5} ve PM₁ 366; 287; 231 µg/m³).

Türkiye'de metrolarda iç ortam hava kalitesi ölçümleri ilk olarak İstanbul Üniversitesi, Çevre Mühendisliği bölümü tarafından 2007 yılında başlatılmıştır. Devam eden bu çalışmaların son ve en detaylısı yine aynı çalışma grubu tarafından 2018'de sonlandırılan ve bu tezin de bir parçası olduğu Tübitak projesidir. Sonuçların paylaşıldığı birçok sempozyum bildirisi ve makale yayınlanmıştır (Şahin ve diğ., 2012; Onat ve Stakeeva, 2014; Onat ve Stakeeva 2013; Onat ve diğ., 2017; Onat ve diğ., 2019).

Tablo 5: Asya ve Avrupa’da bulunan metro sistemlerinin yapım yılları, yolcu kapasiteleri ve ölçüm yapılan bazı iç ortam kirletici değerleri (Xu ve Hao, 2017)

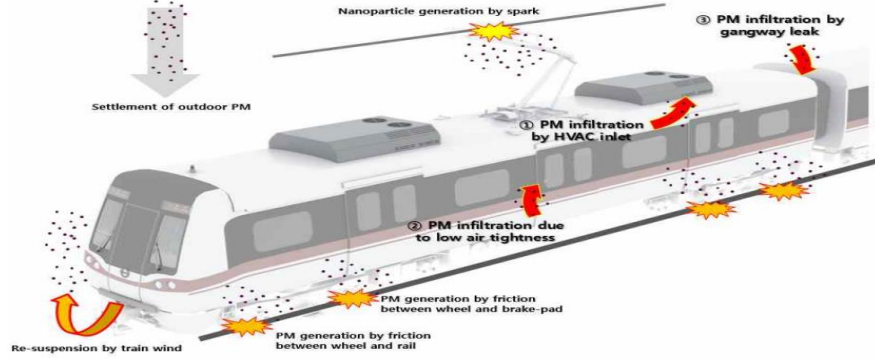
Şehir	Metro Yapım yılı	Ölçüm yılı	Kirletici	Ortalama Konsantrasyon
ASYA				
Hong Kong	1979	1995-96 2014	CO, NO _x PM ₁₀ , PM _{2.5}	1500, 205 ppb 120; 10,2 µg/m ³
Beijing	1969	2004 2005 2007 2011	TVOC TSP, PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM ₁ Benzen, Toluen, Xylen Karbonlu Bileşenler Bakteri ve Mantar PAHs	0,3 ppm 166; 108; 36,9; 14,7 µg/m ³ 13,7; 12,4; 4,1 µg/m ³ 98,5 µg/m ³ 12639; 1806 CFU/m ³ 50,3 ng/m ³
Shanghai	1993	2008 2008 2015	PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM ₁ Karbonlu Bileşenler Siyah Karbon	366; 287; 231 µg/m ³ 24 µg/m ³ 9,43 µg/m ³
Guangzhou	1997	2002 2000	PM ₁₀ , PM _{2.5} VOC	55; 44 µg/m ³ 60,5 µg/m ³
Tianjin	1984	2015	PM _{2.5}	151,4 µg/m ³
Taipei	1996	2011	PM ₁₀ , PM _{2.5}	58; 32 µg/m ³
Seoul	1971	2007-2008 2005 2015 2006	PM ₁₀ , PM _{2.5} Fe Bakteri, Mantar VOC	150; 118 µg/m ³ 70% 210; 75 CFU/m ³ 146,7 µg/m ³
Tokyo	1927	2004 1997	Mantar TSP	342 CFU/m ³ 90 µg/m ³
Tehran	1986	2011 2015-2016 ^a	Mantar PM ₁₀ , PM _{2.5}	1210 CFU/m ³ 33-102; 40-98 µg/m ³
Delhi	2002	2012	PM _{2.5}	78 µg/m ³
St.Petersburg	1935	2007	Bakteri ve Mantar	2236; 205 CFU/m ³
AMERİKA				
Boston	1897	1990	VOC	12,5 µg/m ³
Washington	1976	1999	PM	10 ⁶ adet/m ³
New York	1907	1999 2007	Fe, Cr, Mn PM _{2.5}	500; 84; 240 ng/m ³ 30,6 µg/m ³
Los Angeles	1990	2012 2010 2011	PM PM ₁₀ , PM _{2.5} PAHs	27500 adet/m ³ 78; 56,7 µg/m ³ 3693 µg/m ³
Mexico City	1969	2002 2010-2011	PM ₁₀ , PM _{2.5} Benzen VOC Bakteri ve Mantar	126; 78 µg/m ³ 4 ppb 22,2 µg/m ³ 415; 284 CFU/m ³
Montreal	1966	2003	Mn	32 ng/m ³
Buenos Aires	1913	2002-2006	TSP Fe, Zn, Cu	211 µg/m ³ 86; 0,08; 0,8 µg/m ³

Santiago	1975	2011	PM _{2.5}	16,9 µg/m ³
AVRUPA				
London	1863	1996	Mantar PM _{2.5}	284 CFU/m ³ 892,8 µg/m ³
Barcelona	1924	2013	PM ₁₀ , PM ₃ , PM ₁	183; 165; 67 µg/m ³
Milan	1964	2010	UFP; PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM ₁	1,3x10 ⁴ adet/cm ³ ; 147,7; 91,1; 36,7 µg/m ³
İtalya şehirleri	1964	2006	PM ₁₀ , PM _{2.5}	217; 53 µg/m ³
Lisbon	1959	2014	PM ₁₀ , PM _{2.5}	40; 13 µg/m ³
Berlin	1902	1995	PAHs	19,7 ng/m ³
Frankfurt	1902	2013	PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM ₁	77; 44; 23 µg/m ³
Paris	1900	2007	Fe	41,8 %
Stockholm	1950	2000	PM ₁₀ , PM _{2.5}	390; 139 µg/m ³
Helsinki	1982	2004	PM _{2.5}	53 µg/m ³
Prague	1974	2004	PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM ₁	164,3; 93,9; 44,8 µg/m ³
Budapest	1894	2007	PM ₁₀ ; Fe	155 µg/m ³ , 40%
Athens	2000	2013	PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM ₁	400; 100; 40 µg/m ³
İstanbul	1910	2007 ^{b,c}	PM ₁₀ , PM _{2.5} Fe, Cu	50-200; 49-181 µg/m ³ 10-28 ; 0,13-0,32 µg/m ³ ;

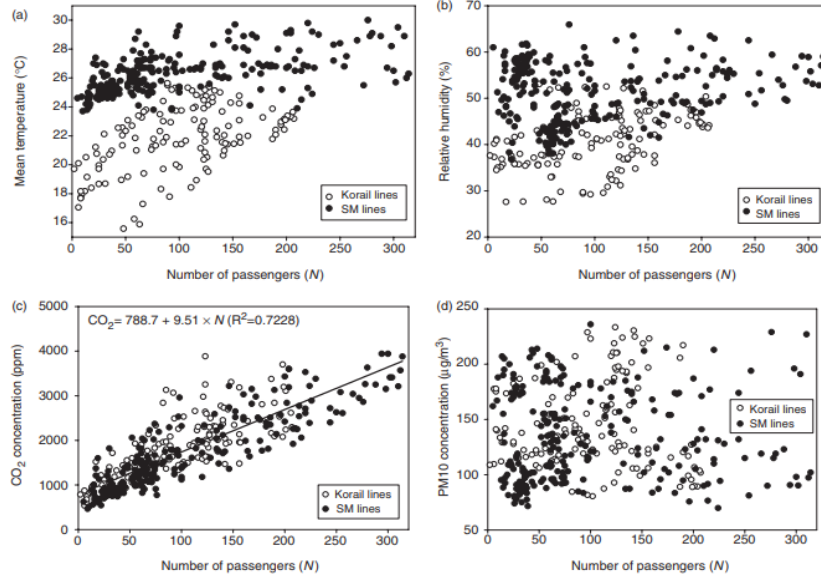
Metrolarda iç ortam hava kalitesi yönetiminde temel yaklaşım yolcu konforunun geliştirilmesi, yolcu maruziyet etkisinin minimize edilmesi ve enerji ihtiyacının en az düzeyde olmasının sağlanmasıdır. Şekil 7’de Güney Kore’de metro sistemlerinde PM kaynaklarını gösteren bir çizim verilmiştir. Metrolardaki hava kalitesini etkileyen başlıca kaynaklar, raylar üzerinde tekerleklerin sürtünme ve fren yapması gibi raylarda aşınmaya sebep olan hareketler, yolcu ve personelin aktiviteleri, dış ortamda trafikten kaynaklanan kirleticilerin havalandırma sırasında metro tünellerine girmesi, metro güzergahı üzerinde hat veya istasyon dışında yapılan çalışmaların emisyonları ve araç hareketleri sonucu oluşan emisyonlar ve istasyon, tünel ve ray hatlarında yapılan bakım-onarım çalışmalarıdır. Hava kalitesini kötü yönde etkileyen bu faktörlerin arasındaki en önemlisi partikül maddelerdir. Ülkemizde sadece İstanbul metrolarında hava kalitesi izlenmesi yönünde çalışmalar mevcuttur ancak metro sistemindeki hava kalitesini etkileyen kaynakların neler olduğu ve katkı oranları henüz tanımlanmış değildir. Bu yönde bir çalışma yapılması gerekliliği mevcuttur.

Barcelona metrosu için PM kaynak analizi çalışması yapılmış ve on çeşit kaynak türü ortaya konmuştur. Bu kaynaklardan beş tanesi metro sistemi orjinli (fren, ray ve tekerlek kaynaklı emisyonlar ve Pb), dört tanesi dış ortam kaynaklı (trafik, gemi emisyonu, ikincil aerosoller ve deniz tuzu) ve bir tanesi iç ve dış ortam kaynaklı tespit edilmiştir (Minguilló ve diğ., 2018; Font ve diğ., 2019). Ancak Known ve diğ., Seul metrosunda yaptıkları çalışmada metrolardaki yolcu

sayısı değişimi ile CO₂ arasında kuvvetli bir korelasyonun olduğunu ancak PM₁₀, Sıcaklık ve Nem ile benzer bir ilişki olmadığını tespit etmişlerdir (Known ve diğ., 2008). Bu durum göstermektedir ki PM konsantrasyonun metro sistemlerindeki temel kaynağı insan aktivitelerinden ziyade metronun mekanik sistemi ve havalandırmaya bağlı dış ortam havasının girişi.



Şekil 7: Seul'de metro sistemi partikül madde kaynakları (Known, 2017)



Şekil 8: Seul metrosunda yolcu sayısı ile iç ortam parametreleri arasındaki korelasyon (Known ve diğ., 2008)

2.3.1. Partikül Maddeler

Partikül maddeler sağlığa ve çevreye en büyük tehditlerden birisidir. Partikül madde son derece küçük parçacıkların ve sıvı damlacıkların karışımıdır. Partikül madde asitler (nitratlar ve sülfatlar gibi), organik kimyasallar, metaller ve toprak veya toz partikülleri dahil olmak üzere bir dizi bileşenden oluşur. Katı ve sıvı parçacıkların arasında toz, duman, is, sıvı damlacıklar,

spor, bakteri, metalik bileşikler, temel karbon, inorganik iyonlar vs. gibi hem organik hem de inorganik maddeler olabilir. Atmosferdeki bazı parçacıklar higroskopiktir ve parçacıkla bağlı olan suyu içerir. Organik kısmı ise yüzlerce organik bileşiği içeren özel bir komplekstir. Organik kısmı ise yüzlerce organik bileşiği içeren özel bir komplekstir. Partikülün boyutu partikülün çapı demektir (Onat ve diğ., 2009). EPA'nın Partiküllerin çapına göre sınıflandırması Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6: EPA'ya göre Partiküllerin Çapına Göre Sınıflandırılması (Onat ve diğ., 2009)

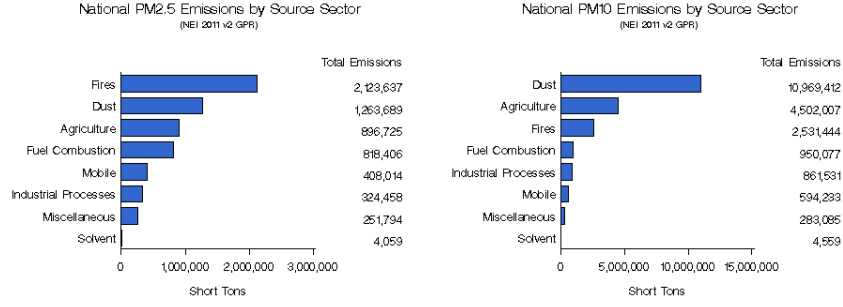
EPA'nın Tanımı	Partikülün Boyutu
Çok Kaba	$D_{pa} > 10 \mu m$
Kaba	$2,5 \mu m < D_{pa} \leq 10 \mu m$
İnce	$0.1 \mu m < D_{pa} \leq 2,5 \mu m$
Çok (ultra) İnce	$D_{pa} \leq 0,1 \mu m$

Parçacıkların büyüklüğü, sağlık sorunlarına neden olma potansiyeli ile doğrudan bağlantılıdır. 10 mikrometre çaplı veya daha küçük partiküller genellikle boğaz ve burundan geçip akciğerlere giren partiküllerdir. Solunduğunda, bu parçacıklar kalbi ve akciğerleri etkileyebilir ve ciddi sağlık sorunlarına neden olabilir. Hatta akciğerlerinizin derinlerine inebilirler ve bazıları da kana karışabilirler. Parçacık kirliliği özellikle ince parçacıklar akciğerlerde daha derine inip ciddi sağlık sorunlarına neden olabilir. Çok sayıda bilimsel çalışma, parçacık kirliliğine maruz kalmanın, aşağıdakiler de dahil olmak üzere çeşitli problemlerle bağlantılı olduğunu göstermiştir:

- Kalp ya da akciğer hastalığı olan insanlarda erken ölüm,
- Düzensiz kalp atışı,
- Azalmış akciğer fonksiyonu ve
- Solunum yollarında tahriş, öksürme veya solunum zorluğu gibi artan solunum semptomları.

Parçacık maddeler birçok ebat ve biçimde bulunabilir ve yüzlerce farklı kimyasaldan oluşabilirler. Parçacıkların boyutları küçüldükçe taşınma mesafesi artar. Parçacık maddeler uzun mesafeler boyunca rüzgârla da taşınabilir. Özellikle küçük parçacıkların taşınması daha kolaydır. Çünkü büyük parçacıklar yerçekimi yüzünden daha çabuk çökerek yeryüzüne ulaşırken küçük parçacıklar daha uzun mesafeler taşınır. EPA'ya göre birincil parçacıklar olarak bilinen bazı parçacıklar, doğrudan şantiyeler, asfalt olmayan yollar, toz taşınımı, bacalar

veya yangınlar gibi kaynaklardan yayılır. Diğerleri ise enerji santralleri, endüstriler ve otomobillerden yayılan sülfür dioksitler ve nitrojen oksitler gibi kimyasalların atmosferinde karmaşık reaksiyonlar oluştururlar. İkincil parçacıklar olarak bilinen bu parçacıklar, atmosferdeki ince parçacık kirliliğinin çoğunu oluşturur. Şekil 9’da sırasıyla EPA’ya göre PM_{2.5} ve PM₁₀ kaynaklarını görülebilmektedir (Abanoz, 2015).



Şekil 9: EPA’ya göre PM_{2.5} ve PM₁₀ Kaynakları (Abanoz, 2015)

EPA'nın halk sağlığına ve çevreye zararlı olduğu düşünülen kirleticiler için Ulusal Ortam Hava Kalitesi Standartları belirlenmiştir. EPA’nın belirlediği Temiz Hava Yasası, iki tür ulusal ortam hava kalite standardı tanımlar. Birincil standartlar, astımlılar, çocuklar ve yaşlılar gibi "hassas" popülasyonların sağlığını korumak dahil halk sağlığını koruma amaçlar. İkincil standartlar görünürlüğü, hayvanlara, ekinlere, bitki örtüsüne ve binalara verilen zararın azaltılmasına karşı koruma da dahil olmak üzere kamu refahı korunması içindir (Abanoz, 2015).

EPA, parçacık kirliliği için Ulusal Ortam Hava Kalite Standartları belirlemiştir. Parçacık kirliliği için EPA’nın dışında WHO (Dünya Sağlık Örgütü)’nün standartları da mevcuttur. WHO ve EPA’nın standartları Tablo 7’de görülmektedir. Standartlar için ölçü birimleri hava başına mikrogram ($\mu\text{g} / \text{m}^3$) şeklindedir (Abanoz, 2015; URL3).

Tablo 7: EPA ve WHO’ya göre Parçacık Kirliliği Parametre Standartları (Abanoz, 2015; URL3)

Kirletici	Birincil/ İkincil	Ortalama Zaman	Limit	Oluşumu
EPA	Birincil	Anlık	12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	3 yıl boyunca anlık ortalaması
	İkincil	Anlık	15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	3 yıl boyunca anlık ortalaması
	Birincil ve İkincil	24-Saatlik	35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	3 yıl boyunca %98’lik ortalamanın aşılmaması
WHO	-	Anlık	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	-
		24-Saatlik	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	

Türkiye’de hava kalitesinin kontrolü “Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği”, “Isınmadan Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği” ve “Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği” yönetmelikleri ile sağlanmaktadır. Ancak bu 3 yönetmeliğe de baktığımızda $PM_{2.5}$ için henüz mevzuatlarda standart belirlenmemiştir.

2.3.2. İnce ($PM_{2.5}$) ve Ultra İnce ($PM_{0.1}$) Partikül Maddeler

Bölgesel ölçekte atmosferik partiküllerin hava kalitesi ve görüş mesafesi üzerindeki etkileri endişe verici boyutlara ulaşmıştır. Trafik, şehirlerdeki partikül madde kirliliğinin önemli bir kaynağıdır (Knibbs ve diğ., 2011; Morawska ve diğ., 2008). Krakow’da (Polonya) yapılan bir araştırmaya göre ince partiküllerin %53-68’inin trafikten kaynaklandığı belirlenmiştir (Watkiss ve diğ., 2005). Fruin ve diğ. tarafından (2008) Los-Angeles’te yapılan araştırmada hareketli kaynaklardan verilen egzoz gazlarının etkisini bulmak amacıyla bir araca PM ve partikül sayıcı ölçüm cihazı yerleştirilmiş ve otobanda ölçülen ultra ince partiküllerin (UİP) konsantrasyonu oldukça yüksek bulunmuştur.

Düzenli olarak yapılan günlük seyahat sırasında kişiler partikül maddelere önemli miktarda maruz kalabilmektedir (Dons ve diğ., 2011). Sağlığa zararlı etkilere neden olan trafik emisyonlarının bileşenleri arasında, aerodinamik çapı 100 nm'den daha küçük olan parçacıklar olarak tanımlanan UİP’ler de yer almaktadır (Li ve diğ., 2009; Delfino ve diğ., 2005).

UİP, büyük partiküllerden farklı olarak geniş yüzey alanına sahip olması, farklı kimyasal bileşimi ve küçük boyutu ile alveollere kolayca nüfus etme özelliği göstermesinden dolayı kardiyovasküler ve solunum yolları üzerinde olumsuz etkilere sahiptir (Valavanidis ve diğ., 2008). Boyutlarının küçük olması, solunum yollarına nüfuz ederek organlara ve merkezi sinir sistemine ulaşmasını kolaylaştırmaktadır (Oberdorster ve diğ., 2004; Elder ve diğ., 2006). Yapılan çalışmalarda, UİP maruziyetinin, $PM_{2.5}$ maruziyeti ile karşılaştırıldığında kardiyovasküler ve solunum sistemi üzerinde daha fazla sağlık etkisi ile ilişkili olduğu belirlenmiştir (McCreanor ve diğ., 2007). Aynı zamanda, UİP’e kısa süreli maruz kalınması durumunda bile kardiyorespiratuar morbidite üzerinde önemli etkileri olabileceği belirtilmiştir (Weichenthal, 2013; Hemmingsen ve diğ., 2015).

UİP'in yüzey alanı, akciğer iltihaplanmasında dikkate alınması gereken bir faktördür (Brown ve diğ., 2001; Oberdorster ve diğ., 2005). Ayrıca, trafik emisyonlarından gelen UİP'in, sistemik oksidatif stres yoluyla DNA hasarına neden olabileceği belirtilmiştir (Brauner ve diğ., 2007; Møller ve diğ., 2008). Astımlı bireylerde UİP maruziyetinin, akciğer fonksiyonlarının azalması ve akciğer iltihaplanmasının artmasıyla ilişkisi olduğu belirtilmiştir (McCreanor ve diğ., 2007). Çocuklar üzerine yapılan çalışmalar yetersiz olmakla birlikte UİP'lerin çocuklardaki astım artışı ile ilişki olduğu öne sürülmüştür (Oberdorster ve diğ., 2005).

UİP'nin olumsuz sağlık etkileri olmasından dolayı ulaşım ortamlarındaki UİP maruziyeti üzerine odaklanılmıştır (Hoek ve diğ., 2010). UİP konsantrasyonları özellikle trafiğin yoğun olduğu yollarda yüksektir (Morawska ve diğ., 2008; Zhu ve diğ., 2002). UİP, büyük miktarda yanma kaynaklıdır fakat şehirlerde başlıca kaynağı taşıtlardır (Morawska ve diğ., 2008). Taşıt egzozundan verilen UİP'ler ya birincil partiküller olarak ya da SO_2 , amonyak (NH_3) ve NO_x 'in, sülfat (SO_4^{2-}), amonyum (NH_4^+) ve nitrat (NO_3^-)'a dönüşmesiyle ikincil partiküller olarak atmosfere yayılmaktadırlar (Morawska ve diğ., 2008). Birincil partiküllerin ikincil partiküllere oranı yakıt türüne, çalışma ve çevre koşullarına göre farklılık göstermektedir, ancak çekirdek modundaki partiküllerin UİP içindeki oranı %90 veya daha fazladır. Ancak çok düşük kükürt içeriğine sahip dizelin kullanıldığı modern araçlarda bu oranın %40-50 seviyelerine düştüğü gözlenmiştir (Morawska ve diğ., 2008).

Yapılan araştırmalarda, UİP konsantrasyonlarının trafik hacmi (Boarnet ve diğ., 2011; Briggs ve diğ., 2008; Kaur ve Nieuwenhuijsen, 2009), yakıt türü (Fruin ve diğ., 2008), yola olan uzaklık (Buonanno ve diğ., 2009; Zhu ve diğ., 2002) gibi faktörlerden etkilendiği belirtilmiştir. Trafikin olduğu yerlerde ve trafiğe yakın yerlerde kaba ve ince partiküllere göre UİP'ler daha çok gözlenmektedir (Molnar ve diğ., 2002). Birçok çalışma, karayollarındaki veya çevresindeki UİP konsantrasyonlarının ortam seviyelerine kıyasla daha fazla olduğunu göstermiştir (Westerdahl ve diğ., 2005). Bu sonuçlar UİP'lerin ana kaynağının trafik olduğunu ve ana yolların bulunduğu civarda ortam havasında önemli miktarda UİP bulunduğunu göstermektedir.

2.4. METROLARDA İÇ ORTAM HAVA KALİTESİ ÇALIŞMALARI

Metro sistemleri içinde geçmişten günümüze partikül madde maruziyeti üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Barselona (İspanya), Atina (Yunanistan) ve Oporto (Portekiz) şehirlerindeki metro ortamlarında ölçülen $PM_{2.5}$ değerleri açık ortam havasında bulunan değerlerden sırasıyla 3,7, 6,9 ve 2,2 kat daha fazla bulunmuştur (Know ve diğ. 2015). $PM_{2.5}$ akciğer fonksiyonunu etkiler, astım ve miyokard infarktüsü dahil olmak üzere advers solunum ve kardiyovasküler gibi sağlık etkilerine neden olur (Hua ve diğ., 2014; Pope III ve Dockery, 2006; Web ve diğ., 2016). Pekin (Çin)'de metro sistemlerinde yapılan ölçüm çalışmalarında ise $PM_{2.5}$ değerlerinin $25,4 \mu g/m^3$ ve $145,5 \mu g/m^3$ arasında olduğu görülmüştür (He ve diğ., 2018).

2004 yılında Helsinki metro sisteminde iki hafta boyunca $0,01-0,5 \mu m$ arasındaki partiküllerin sayımı, SK ve organik karbon ölçümü yapılmıştır. Metro istasyonunda günlük ortalama partikül sayısı $31000 \text{ partikül/cm}^3$ ve Siyah Karbon (SK) konsantrasyonu $6,3 \mu g/m^3$ olarak bulunmuştur (Aarnio ve diğ., 2005). Yine Helsinki'de yapılan başka bir çalışmada yeni ve eski özellikteki otobüs ve tramvaylarda $0,01-1 \mu m$ boyutundaki partiküllerin sayımı, $PM_{2.5}$, SK ölçümleri kabin ve sürücü bölmelerinde yapılmış ve kişilerin maruz kalma durumu araştırılmıştır. Partikül sayısı ve SK konsantrasyonlarının özellikle şehir merkezinde yoğun saatlerde bir miktar arttığı belirlenmiştir. En düşük partikül konsantrasyonu, yeni otobüs sürücü bölmesinde $18500 \text{ partikül/cm}^3$ olarak ölçülmüştür (Asmi ve diğ., 2009).

Londra'da 2005 yılında yapılan bir çalışmada üç metro istasyonunda ve sürücü kabinlerinde $0,02-1 \mu m$ arasında partiküllerin sayımı yapılarak toz konsantrasyonlarının boyut ve bileşimi analiz edilmiştir. Çalışanların ve yolcuların maruz kaldıkları konsantrasyonlar tahmin edilmiştir. Metroda üç farklı sürücü kabininde ölçülen partikül sayısı sırasıyla $23000 \text{ partikül/cm}^3$, $17000 \text{ partikül/cm}^3$, $22000 \text{ partikül/cm}^3$ ve platformlarda ise sırasıyla $29000 \text{ partikül/cm}^3$, $14000 \text{ partikül/cm}^3$ ve $24000 \text{ partikül/cm}^3$ olarak bulunmuştur (Seaton ve diğ., 2005).

Ragettli ve diğ. (2013) tarafından Basel'de yapılan bir çalışmada, beş farklı ulaşım türünde (yürüyüş, bisiklet, otobüs, tramvay, otomobil) UİP ölçümleri yapılmıştır. Ulaşım türlerindeki ortalama UİP konsantrasyonu, otomobilde $31784 \text{ partikül/cm}^3$, bisiklet sürerken $22660 \text{ partikül/cm}^3$, yürüyüş sırasında $19481 \text{ partikül/cm}^3$ ve otobüste $14055 \text{ partikül/cm}^3$ olarak bulunmuştur. Aynı çalışmada trafiğe yakın olan ulaşım türlerinde daha yüksek UİP konsantrasyonlarının gözlemlendiği ve trafiğin yoğun olduğu saatlerde tüm ulaşım türlerinde ölçülen konsantrasyonların en yüksek seviyede olduğu gözlemlenmiştir (Ragettli ve diğ., 2013).

Santiago’da yapılan bir çalışmada ise belirli bir rotada farklı ulaşım türlerinde (bisiklet, otobüs, otomobil ve metro) UİP ve $PM_{2,5}$ ölçümleri yapılmıştır. Metro, otomobil, bisiklet ve otobüste ortalama UİP konsantrasyonları sırasıyla 8400 partikül/cm³, 16200 partikül/cm³, 25600 partikül/cm³ ve 30100 partikül/cm³ olarak ölçülmüştür (Suarez ve diğ., 2014).

Barselona’da yapılan bir çalışmada ise yürüyüş otobüs, metro ve tramvayda ölçülen ortalama UİP konsantrasyonları sırasıyla 48000 partikül/cm³, 54000 partikül/cm³, 23000 partikül/cm³ ve 30000 partikül/cm³ olarak bulunmuştur (Moreno ve diğ., 2015).

Londra’da yapılan bir çalışmada dört farklı ulaşım türünde (otomobil, otobüs, yürüyüş ve metro) UİP, SK, PM_1 , $PM_{2,5}$ ve PM_{10} maruziyetini belirleyen faktörler analiz edilmiştir. Her kirletici için, meteorolojinin (rüzgar hızı) veya ortam yoğunluklarının (yüksek uzaysal veya zamansal çözünürlükle) etkisini değerlendirmek için ayrı ayrı modeller yapılmıştır. Rüzgar hızının, yer altı ulaşımı hariç otomobil, otobüs, yürüyüş sırasında tüm kirleticiler ve özellikle partikül madde fraksiyonu için önemli bir değişken olduğu belirtilmiştir (Rivas ve diğ., 2017). Hong Kong’da ulaşım mikro ortamlarında, yoğun yollarda bulunan otobüs duraklarında, açık ve kapalı terminallerde, yerüstü ve yer altı demiryolu platformlarında $PM_{2,5}$, SK, UİP ve CO konsantrasyonları ölçülmüş ve yolcu maruziyetlerini etkileyebilecek faktörler tahmin edilmiştir. Dizel kullanan otobüs kabinlerinde ve yoğun trafiğin olduğu yol kenarlarında yüksek SK ve partikül madde konsantrasyonları gözlenmiştir (Yang ve diğ., 2015).

Sacramento’da yapılan bir çalışmada yolcuların maruz kaldıkları hava kirliliğini tahmin etmek için altı ulaşım türünde (tek kişilik araçlar, yüksek kapasiteli araçlar (birden fazla yolcu), otobüs, hafif raylı tren, tren ve bisiklet) $PM_{2,5}$, SK ve UİP ölçümleri yapılmıştır. Ulaşım araçları içerisinde ortalama UİP konsantrasyonları, otomobil, otobüs, hafif raylı sistem, tren ve bisiklette sırasıyla 7900 partikül/cm³, 13000 partikül/cm³, 5500 partikül/cm³, 42000 partikül/cm³ ve 22000 partikül/cm³ olarak ölçülmüştür (Ham ve diğ., 2017).

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1.İSTANBUL'DA METROLARDA HAVALANDIRMA SİSTEMLERİ

İstanbul'da aktif olarak çalışan raylı sistemler; T1 (Bağcılar – Kabataş Tramvay Hattı), T2 (Taksim – Tünel Nostaljik Tramvay Hattı), T3 (Kadıköy – Moda Tramvay Hattı), T4 (Topkapı – Mescid-i Selam Tramvay Hattı), M1A (Yenikapı – Atatürk Havalimanı Hafif Metro Hattı), M1B (Yenikapı – Kirazlı Hafif Metro Hattı), M2 (Yenikapı – Hacıosman Metro Hattı), M3 (Kirazlı – Olimpiyat – Başakşehir Metro Hattı), M4 (Kadıköy – Tavşantepe Metro Hattı), M5 (Üsküdar – Çekmeköy Metro Hattı), M6 (Levent – Boğaziçi Ü./Hisarüstü Metro Hattı) ve Ayrılıkçeşmesi – Kazlıçeşme Marmaray hatlarıdır. Bu raylı sistemlerin yanı sıra F1 (Taksim – Kabataş Funiküler Hattı), F2 (Karaköy – Beyoğlu Tarihi Tünel), F3 (Seyrantepe – Vadi İstanbul Funiküler Hattı), TF1 (Maçka – Taşkışla Teleferik Hattı) ve TF2 (Eyüp – Piyer Loti Teleferik Hattı)'dır.

Bu sistemler arasında yolcuya açık bölümlerin havalandırma ihtiyacı olmayan ve yüzeysel olan hatlar T1, T2, T3, T4, TF1, TF2'dir. Diğer sistemlerde ise yolcuya açık olan bölgeler için havalandırma sistemleri bulunmaktadır. Ancak M1A, M2 ve M4 hatları güzergahları itibari ile EK-1'de de görüleceği üzere yolcu sayısının diğer hatlara oranla fazla olduğu için hava kalitelerinin dış ortamdan etkilenmesi diğer hatlara kıyasla daha fazladır. Çünkü bu hatlar trafiğin ve insan yoğunluğunun en fazla olduğu bölgelerde hizmet vermektedir. Havalandırma sistemleri hava ihtiyacını dış ortamdan aldığı için iç hava kalitesi, bu hatlarda diğerleri ile kıyaslandığında daha fazla etkilenmektedir.

İstanbul nüfusunun ve iş hayatının büyük bir bölümü M1A, M2 ve M4 hatlarının güzergahlarında bulunmaktadır. Bu hatlarda yapılan ölçümler İstanbul'da bulunan metroların havalandırma sistemlerinin iç hava kalitesine etkisinin değerlendirilmesinde daha net bir fikir vermesi açısından yararlı olacaktır. EK-1'de de görüleceği üzere 2 yıllık yolcu taşıma kapasiteleri bu hatlarda daha fazladır.

3.1.1. M1A Yenikapı – Havalimanı Metro Hattı

M1A hattı hafif metro sistemi olarak yapılmıştır ve üzerinde 18 durak bulunmaktadır. Bu durakların Yenikapı, Aksaray, Fatih-Emniyet, Topkapı-Ulubatlı, Bahçelievler ve Atatürk Havalimanı olmak üzere 6 tanesi yer altında bulunmaktadır ve bu istasyonlarda havalandırma sistemi mevcuttur. Diğerleri yüzeysel istasyonlardır ve yolcuya açık alanlarda havalandırma sistemlerine ihtiyaç yoktur.



Şekil 10: M1A Metro Güzergahı (URL3)

Atatürk Havalimanı istasyonu hattın en son durağıdır ve istasyonda 4 adet EXF, 1 adet INF ve 2 adet TVF Havalandırma sistemi mevcuttur. Atatürk Havalimanı istasyonundan önceki durak olan DTM - İstanbul Fuar Merkezi atmosfere açık yüzeysel bir istasyondur. Ancak DTM - İstanbul Fuar Merkezi ile Atatürk Havalimanı hat arasında kalan bölgenin bir kısmında tünel bulunmaktadır. TVF sistemleri Atatürk Havalimanı istasyonunun her iki ucunda bulunmakta ve tünelin havalandırma ihtiyacı, sıkışık ve acil durumlar için havalandırma ihtiyacı bu sistemler ile sağlanmaktadır. INF havalandırması ile dışarıdan alınan temiz hava istasyon bölgelerine basılmaktadır. EXF havalandırma sistemleri istasyonun her iki ucunda bulunmaktadır. Kirli hava ise EXF havalandırmalar ile istasyondan dışarı atılmaktadır. EXF havalandırma sistemi acil durumlarda da çalıştırılarak istasyonda oluşabilecek dumanları dışarı atmakta kullanılmaktadır. Bahçelievler istasyonunda ise bir tanesi Ataköy yönüne bir tanesi de Bakırköy-İncirli yönüne doğru olmak üzere 2 adet TVF havalandırma sistemi bulunmaktadır. Her iki yönde kalan kısımda bulunan tünel bölgelerindeki ve istasyondaki sıkışık durumlarda havalandırma ihtiyacı ve acil durum havalandırması bu sistemler ile sağlanmaktadır. Topkapı – Ulubatlı, Emniyet – Fatih, Aksaray ve Yenikapı istasyonları arasında kalan tünel ve istasyon bölgelerinin sıkışık ve acil durumlardaki havalandırma ihtiyacı Aksaray istasyonunda bulunan 1 adet TVF havalandırma sistemi ile sağlanmaktadır.

3.1.2. M2 Yenikapı – Hacıosman Metro Hattı

M2 hattı metro sistemi olarak yapılmıştır ve üzerinde 16 durak bulunmaktadır. Haliç istasyonu dışındaki tüm istasyonlarda havalandırma sistemleri mevcuttur. Haliç istasyonu atmosfere açık ve yüzeysel bir istasyondur.



Şekil 11: M2 Metro Güzergahı (URL 3)

Tablo 8: M2 İstasyonlarında Bulunan Havalandırma Sistemleri ve Sayıları

İSTASYON ADI	EXF	INF	TVF
YENİKAPI	4	1	2
VEZNECİLER	4	2	2
ŞİŞHANE	4	2	2
TAKSİM	6	2	2
OSMANBEY	4	3	2
ŞİŞLİ-MECİDİYEKÖY	4	2	2
GAYRETTEPE	4	3	2
LEVENT	4	2	2
4 LEVENT	4	2	2
SANAYİ MAHALLESİ	8	2	4
SEYRANTEPE	2	-	-
İTÜ-AYAZAĞA	4	1	2
ATATÜRK OTO SANAYİ	4	-	2
DARÜŞŞAFAKA	4	2	2
HACIOSMAN	4	2	2

M2 hattında, TVF sistemleri istasyonların her iki ucunda bulunmakta ve tünelin havalandırma ihtiyacı ve acil durum havalandırması bu sistemler ile sağlanmaktadır. INF havalandırması ile dışarıdan alınan temiz hava istasyon bölgesine basılmaktadır. EXF havalandırma sistemleri istasyonun her iki ucunda bulunmaktadır. Kirlenen hava EXF'ler ile istasyondan dışarı atılmaktadır. EXF havalandırma sistemi acil durumlarda da çalıştırılarak istasyonda oluşabilecek dumanları dışarı atmakta kullanılmaktadır.

3.1.3. M4 Kadıköy – Tavşantepe Metro Hattı

M4 hattı metro sistemi olarak yapılmıştır ve üzerinde 19 durak bulunmaktadır. Tüm istasyonlar yeraltında yer almaktadır.



Şekil 12: M4 Metro Güzergahı (URL 3)

Tablo 9: M4 İstasyonlarında Bulunan Havalandırma Sistemleri ve Sayıları

İSTASYON ADI	EXF	INF	TVF
KADIKÖY	4	2	2
AYRILIK ÇEŞMESİ	4	1	2
ACIBADEM	4	2	2
ÜNALAN	4	1	2
GÖZTEPE	4	1	2
YENİSAHRA	4	1	2
KOZYATAĞI	4	1	2
BOSTANCI	4	1	2
KÜÇÜKYALI	4	1	1
MALTEPE	4	1	2
HUZUREVİ	6	1	2
GÜLSUYU	4	1	2
ESENKENT	4	1	2
HASTANE – ADLİYE	12	1	4
SOĞANLIK	4	1	2
KARTAL	2	2	2
YAKACIK – ADNAN KAHVECİ	4	1	2
PENDİK	4	2	2
TAVŞANTEPE	4	1	2

3.2.METRODA YAPILAN ÖLÇÜMLER VE METRONUN ÖZELLİKLERİ

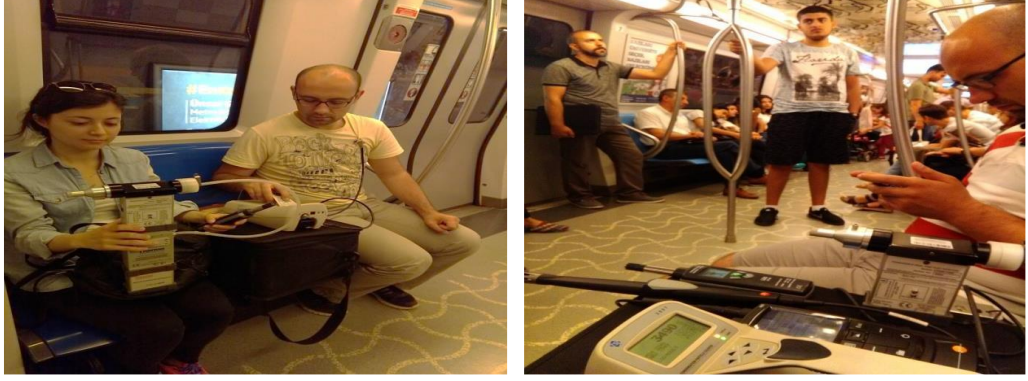
Bu çalışmada İstanbul’da gün içinde seyahat amacıyla kullanılan metro sistemlerinde araç içinde ve dış ortamda (peron) kişilerin maruz kaldıkları PM_{2.5} konsantrasyonlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Ölçümler Haziran 2016 – Eylül 2017 tarihleri arasında araç içi ve dış ortamda gerçekleştirilmiştir. Tablo 10’ da saha çalışmasında tercih edilen metro hatları ve özellikleri gösterilmektedir (Uzun, 2018; Onat ve diğ. 2018).

Tablo 10: Metro Hatları ve Özellikleri

	GÜZERGAH	UZUNLUK (km)	DURAK SAYISI	SEYAHAT (GİDİŞ – DÖNÜŞ) (DAKİKA)	ÖLÇÜM PERİYODU (gün/ay)
METRO HATLARI	M1A YENİKAPI – ATATÜRK HAVALİMANI	26,1	18	70	1
	M2 YENİKAPI - HACIOSMAN	23,5	16	66	1
	M4 KADIKÖY TAVŞANTEPE	26,5	19	77	1

Ulaşım türünde gerçekleştirilen ölçüm çalışmasında öncelikle güzergahın ilk durağında dış ortamında 15 dakika süre ile ölçüm yapılmıştır. Daha sonra araca binerek araç içi ölçüme güzergahın son durağına kadar devam edilmiştir. Araçtan indikten sonra son durakta aracın dış ortamında 15 dakika süre ile ölçüm yapılmıştır. Tekrar araca binerek güzergahın dönüş yönünde ölçüme devam edilmiştir. Dönüş yolundaki seyahat tamamlandıktan sonra aracın dış ortamında 15 dakika süre ile ölçüm yapılmıştır. Sabah ilk ölçüm çalışması (gidiş-dönüş) tamamlandıktan sonra aynı hatta tekrar ölçüm çalışması yapılmıştır.

Ölçüm çalışması trenin 2. vagonunda yürütülmüştür. Vagon içinde yapılan ölçüm çalışmasına ait görüntüler Şekil 13’de verilmiştir (Uzun, 2018; Onat ve diğ. 2018).



Şekil 13: Vagon İçinde Yapılan Ölçümler

Peron ölçümleri Yenikapı, Atatürk Havalimanı, Hacıosman, Kadıköy ve Tavşantepe peronlarında gerçekleştirilmiştir. Peronlarda yapılan ölçüm çalışmasına ait görüntüler Şekil 14’te verilmiştir (Uzun, 2018; Onat ve diğ. 2018). Bu tez çalışması birçok parametrenin ölçüldüğü bir projenin içinden yapılandırılmış olup çok sayıda sabit ve hareket halindeki ortamda Haziran 2016 – Eylül 2017 tarihleri arasındaki ölçümleri esas almaktadır. Ölçülen parametreler arasından metro sistemlerindeki $PM_{2.5}$ verileri değerlendirilmiştir. Tezin yazarı ölçümlerin bir kısmına katılmış olup havalandırma sisteminin tanımlanması ve verilerin analizi kısmının tümünü gerçekleştirmiştir.



Şekil 14: Peronda Yapılan Ölçümler

Araç içi ve dış ortamda $PM_{2.5}$ ölçümleri ışık saçılımı yöntemine göre çalışan PDR 1200 portatif partikül ölçüm cihazı ile yapılmıştır (Şekil 15). Cihaz optik okuma başlığı, pompa modülü ve batarya olmak üzere üç ana bölümden oluşmaktadır.



Şekil 15: PM_{2.5} Ölçüm Cihazı (pDR 1200)

Cihazda saha koşullarında parçacık büyüklüğünü seçerek ölçümler yapabilmek için pompa modülü veya örnekleme pompası kullanılmaktadır. Örnekleme pompası ve optik okuyucu arasındaki hava akışı ince bir hortum vasıtası ile sağlanmıştır. Optik okuyucunun çıkış kısmına pompanın tıkanmasını önlemek amacı ile filtre haznesi takılmıştır. Ölçümler sırasında quartz filtre kullanılmıştır. Filtre değişimi 3-4 günde bir yapılmıştır. Optik okuyucunun giriş kısmına parçacık ayırma özelliğine sahip optimal olarak tasarlanmış metal siklon takılmıştır. Ölçüm sırasında cihaza ait bu bölümlerin tıkalı veya kapalı olmamasına dikkat edilmiştir.

Cihazın belirli akış hızlarında pompanın çalıştırılması ile partikül boyutlarının tanımlanması sağlanmaktadır. Bu çalışmada PM_{2.5} boyutu için pompa çekiş hızı 4 L/dk olarak ayarlanmıştır. Çalışma için ölçüm periyodu 10 saniyede bir olarak seçilmiştir. Cihaza ait pompa modülü ve batarya AC güç kaynağı vasıtasıyla şarj edilebilmektedir. Ölçüme ait veri dosyaları, pdr1200 yazılım programı kullanılarak cihaz üzerinde bulunan bağlantı girişi ile bilgisayara aktarılmıştır.

3.3.METRO SİSTEMİNDE YAPILAN ÖLÇÜMLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

M1A, M2 ve M4 hatları için Haziran 2016 ve Eylül 2017 tarihleri arasında 14 tane ölçüm yapılmıştır. Bu hatlarda yapılan seyahat esnasındaki $PM_{2.5}$ ölçüm verileri kontrol edilmiş ve istasyonlara denk gelen anlık konsantrasyon verileri belirlenmiştir. Hatların ilk ve son duraklarında yapılan 15 dakikalık ölçümlerin ise ortalaması alınmıştır. Her istasyon arası genellikle bazı belirlenen istasyon araları hariç 2 dakika olarak düşünülmüştür. Bazı istasyon araları gereğinden uzun veya kısa olabilmektedir. Uzun ve kısa olan hat araları sırasıyla 3 ve 1 dakika olarak belirlenmiştir. Araç içine geçilip seyahat başladığında cihazın 2 dakika sonra ölçüm aldığı anlık konsantrasyon değeri bir sonraki istasyonun ya da hat arasının konsantrasyon verisi olarak kabul edilmiştir. Bu durum yukarıda belirtildiği gibi uzun olan istasyon aralarında 3 dakika sonrası, kısa olanlarda ise 1 dakika sonrası cihazın o zamanda ölçtüğü anlık değere denk geldiği düşünülmüştür. Hat aralarına denk gelen konsantrasyon verileri ise iki istasyon arasında geçen zamanın yarısına denk gelen anlık ölçüm konsantrasyon verisi olarak kabul edilmiştir. Ancak seyahat esnasında karşılaşılan problemler nedeni ile zaman zaman düşünülen süreleri aştığı veya altında kaldığı zamanlarda olmuştur. Bu problemlere örnek olarak araç istasyonda normalde durduğundan fazla bir süre kalmış olabilir, sinyalizasyon arızası nedeni ile duraksamış olabilir veya yolcu sayısı az olması nedeni ile istasyonda daha kısa süre durmuş olabilir. Bu yüzden hat boyunca seyahat sürelerinde günden güne değişiklik meydana gelmiştir. Her istasyon için belirlenen ölçümler sonrası istasyon ve tarih bazlı grafikleri Microsoft Excel 2010 programı kullanılarak çizilmiş ve değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu verilerden mevsimsel ortalama hesaplanmış ve her bir hat için mevsimsel haritalar Mapbox uygulaması kullanılarak çizilmiş ve yorumlanmıştır.

3.4.METRO SİSTEMİNDE YAPILAN ÖLÇÜMLER İLE DIŞ ÖLÇÜMLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

Metro sistemi içerisinde alınan $PM_{2.5}$ ölçüm tarihi ve yerleri baz alınarak T.C Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'na bağlı Ulusal Hava Kalitesi İzleme Ağı'ndan dış ortam $PM_{2.5}$ ölçüm değerleri indirilmiştir. Ölçüm çalışmalarında elde edilen hat geneli ortalama konsantrasyon değerleri ile dış ortam konsantrasyon değerleri karşılaştırılmıştır ve korelasyonları değerlendirilmiştir. Bu karşılaştırma sonunda metrolarda bulunan havalandırma sistemlerinin verimliliği yorumlanmıştır.

4. BULGULAR

4.1.METRO HATLARINDAKİ TREN İÇİ VE PERON $PM_{2.5}$ KONSANTRASYON DEĞERLERİ

Metro Trenleri içinde ve peronlarda ölçülen $PM_{2.5}$ konsantrasyonlarının ortalama, standart sapma, medyan, maksimum ve minimum değerleri Tablo 11 ve Tablo 12’de verilmiştir.

Tablo 11: Metro Trenlerinde Seyahat Boyunca Ölçülen $PM_{2.5}$ Konsantrasyonları ($\mu g/m^3$)

Ulaşım Türü	Veri Sayısı (N)	Ortalama	Standart Sapma	Medyan	Maksimum	Minimum
M1A	7778	29,5	16,9	24,5	113,4	3,5
M2	9563	28,3	22,1	21,7	224,7	2,1
M4	10010	59,2	21	55,3	163,1	17,5

Tablo 12: Metro Peronlarda Ölçülen $PM_{2.5}$ Konsantrasyonları ($\mu g/m^3$)

Dış Ortam	Veri Sayısı (N)	Ortalama	Standart Sapma	Medyan	Maksimum	Minumum
Yenikapı Peron-M1A	2119	35,4	11,2	34,3	90,3	8,4
Havalimanı Peron-M1A	1928	26,4	11,6	21,7	70	8,4
Yenikapı Peron-M2	3382	49,4	19,8	44,1	49,4	12,6
Hacıosman Peron-M2	1980	48,3	28,5	37,8	48,3	16,8
Kadıköy Peron-M4	2848	30,4	15	25,9	30,4	9,1
Tavşantepe Peron-M4	1672	59,9	18,8	59,5	59,9	27,3

N:10 saniyede bir veri

Tablo 11’de görüleceği üzere metro hatları içinde tren içinde seyahat boyunca en yüksek ortalama $PM_{2.5}$ konsantrasyonu M4 metro hattında $59,2 \pm 21,0 \mu g/m^3$ olarak ölçülmüştür. M1A ve M2 hattındaki tren içi $PM_{2.5}$ konsantrasyon seviyeleri ise birbirine yakın olup sırasıyla $29,5 \pm 16,9 \mu g/m^3$ ve $28,3 \pm 22,1 \mu g/m^3$ olarak ölçülmüştür.

Tablo 12’de ise peronlarda en yüksek ortalama $PM_{2.5}$ konsantrasyonu M4 metro hattında Tavşantepe Metro durağında $59,9 \pm 18,8 \mu g/m^3$ ve Kadıköy Metro durağında $30,4 \pm 15 \mu g/m^3$, M1A hattında Havalimanı Metro durağında $26,4 \pm 11,6 \mu g/m^3$ ve Yenikapı Metro durağında $35,4 \pm 11,2 \mu g/m^3$, M2 hattında Hacıosman Metro durağında $48,3 \pm 28,5 \mu g/m^3$ ve Yenikapı Metro durağında $49,4 \pm 19,8 \mu g/m^3$ olarak ölçülmüştür.

M1A Yenikapı-Atatürk Havalimanı metro hattında vagon içi ve peronda $PM_{2.5}$ ortalama konsantrasyonlarının aylara göre değişimi Şekil 16’da verilmiştir. En düşük $PM_{2.5}$ ortalaması Havalimanından Yenikapı’ya öğlen seyahati esnasında $48,3 \pm 28,5 \mu g/m^3$, en yüksek ise her iki

yöne sabah seyahat esnasında $49,4 \pm 19,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ kaydedilmiştir. Vagon içi $\text{PM}_{2.5}$ değerleri dış ortam hava sıcaklığının 18°C 'nin altına düştüğü kış günlerinde ortalama $30,2 \pm 12,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 18°C 'nin üstüne çıktığı yaz günlerinde ise ortalama $25,7 \pm 11,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ olduğu belirlenmiştir. Peronlarda ve Vagon içinde ölçülen Kış ve Yaz $\text{PM}_{2.5}$ değerleri arasındaki fark istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık değildir ($t=1,22/0,37$, $p=0,22/0,71$).

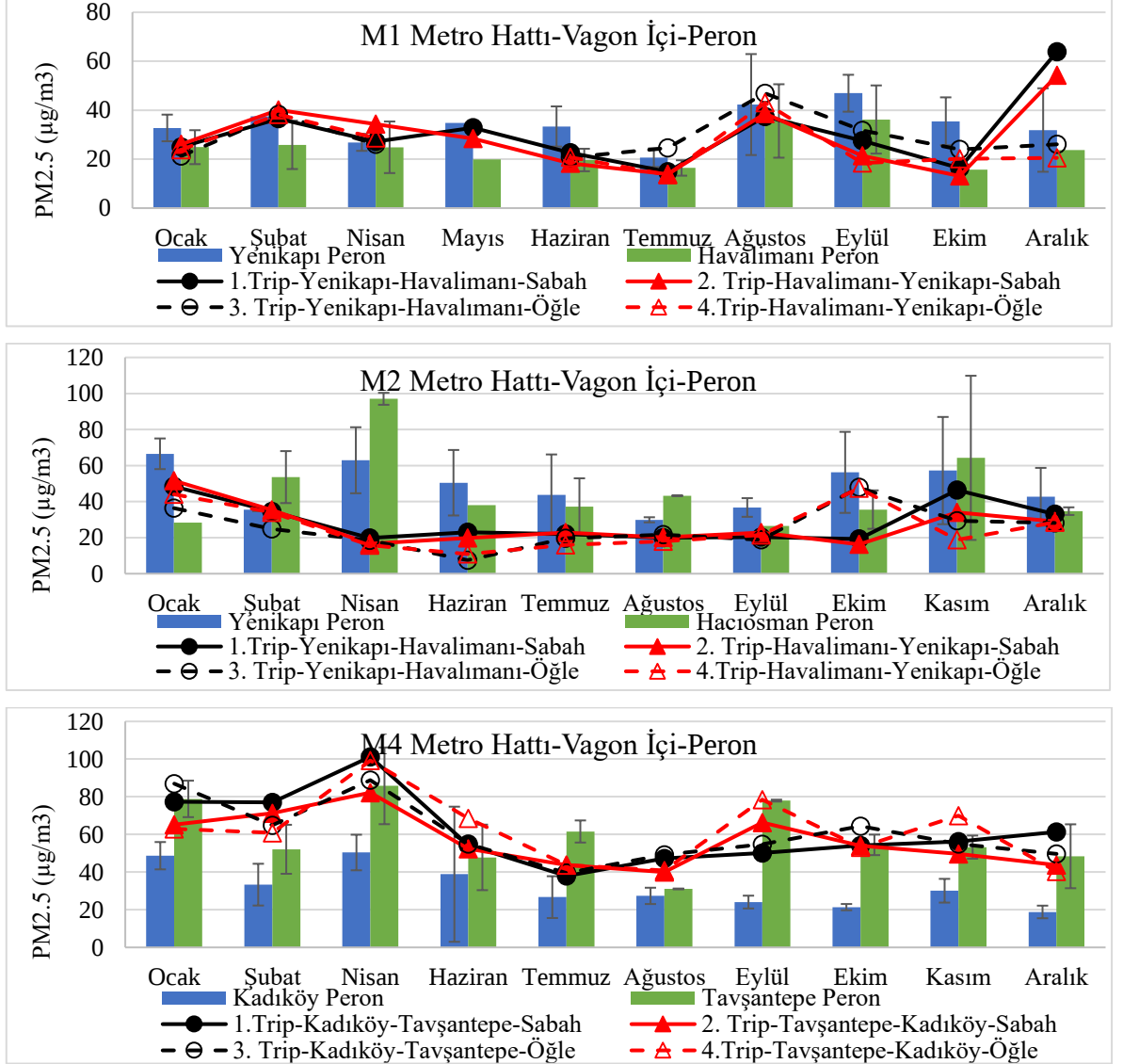
Şekil 17'de herbir parametrenin sabah ve öğlen seyahat güzergahlarına (Yenikapıdan Havalimanı ve Havalimanından Yenikapı) göre değişimi box plot grafikleri verilmiştir. Yapılan Anova testine göre güzergahlar açısından tüm parametreler benzer bir değişim göstermektedir. Seyahat yönünün bu kirleticilerin konsantrasyonları açısından hiçbir farkı yoktur ($p=0,89-0,99$).

M2 Yenikapı-Hacıosman metro hattında vagon içi ve peronda $\text{PM}_{2.5}$ ortalama konsantrasyonlarının aylara göre değişimi Şekil 16'da verilmiştir. En düşük $\text{PM}_{2.5}$ ortalaması Hacıosmandan Yenikapıya sabah seyahati esnasında $26,3 \pm 16,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en yüksek ise Yenikapıdan Hacıosmana sabah seyahati esnasında $29,6 \pm 17,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ olarak kaydedilmiştir. $\text{PM}_{2.5}$ konsantrasyonu her ay benzer değerler almaktadır ($p=0,089$). Vagon içi $\text{PM}_{2.5}$ değerleri ise dış ortam hava sıcaklığının 18°C 'nin altına düştüğü kış günlerinde ortalama $33,5 \pm 26,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 18°C 'nin üstüne çıktığı yaz günlerinde ise ortalama $20,3 \pm 6,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ olduğu belirlenmiştir. Peronlarda ve Vagon içinde ölçülen Kış ve Yaz $\text{PM}_{2.5}$ değerleri arasındaki fark %99 güvenle istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık değildir ($p>0,01$).

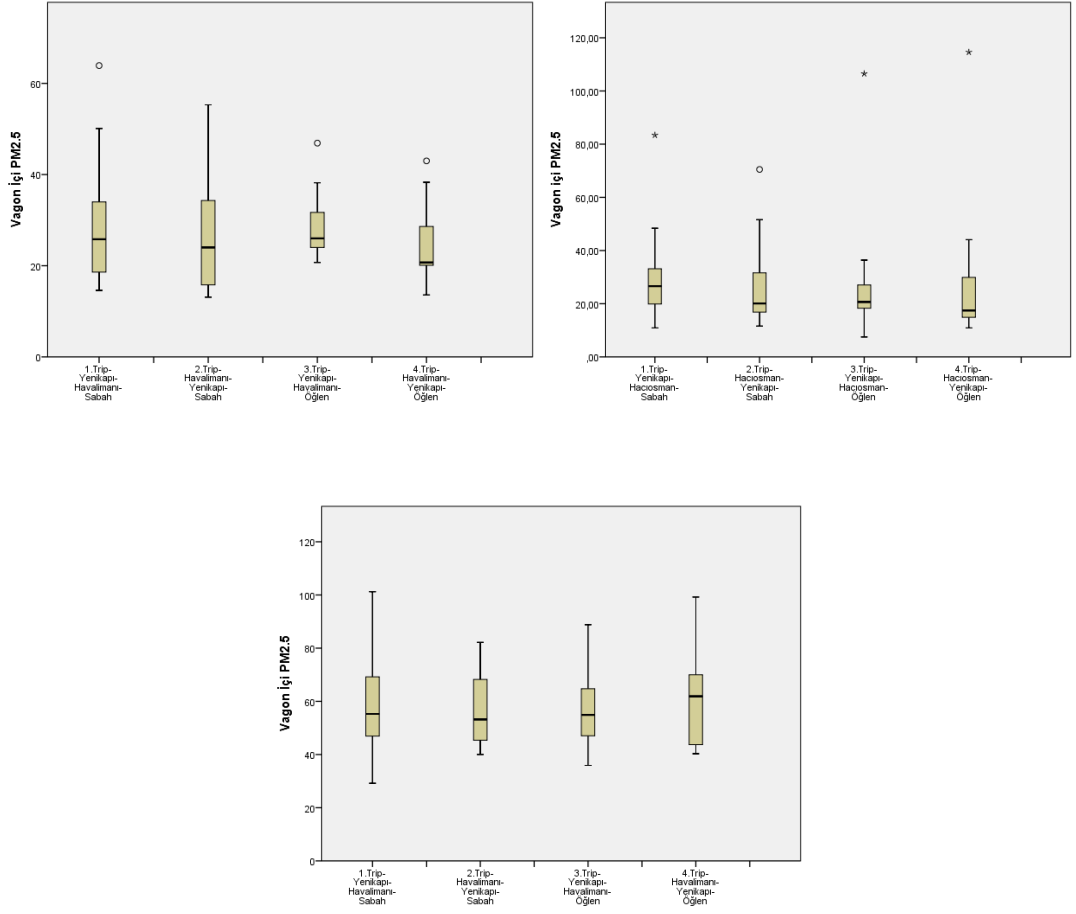
Şekil 17'de herbir parametrenin sabah ve öğlen seyahat güzergahlarına (Yenikapıdan Hacıosman ve Hacıosman'dan Yenikapı) göre değişimi verilmiştir. Yapılan Anova testine göre güzergahlar açısından tüm parametreler benzer bir değişim göstermektedir. Seyahat yönünün bu kirleticilerin konsantrasyonları açısından hiçbir farkı yoktur ($p=0,12-0,98$).

M4 Kadıköy-Tavşantepe metro hattında vagon içi ve peronda $\text{PM}_{2.5}$ ortalama konsantrasyonlarının aylara göre değişimi Şekil 16'da verilmiştir. En düşük $\text{PM}_{2.5}$ ortalaması Tavşantepe'den Kadıköy'e sabah seyahati esnasında $56,6 \pm 13,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en yüksek ise Tavşantepe'den Kadıköy'e öğlen seyahati esnasında $61,8 \pm 18,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ olarak kaydedilmiştir. Vagon içi $\text{PM}_{2.5}$ değerleri ise dış ortam hava sıcaklığının 18°C 'nin altına düştüğü kış günlerinde ortalama $63,2 \pm 14,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 18°C 'nin üstüne çıktığı yaz günlerinde ise ortalama $54,3 \pm 18,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ olduğu belirlenmiştir. Peronlarda ve Vagon içinde ölçülen Kış ve Yaz $\text{PM}_{2.5}$ değerleri arasındaki fark %99 güvenle istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık değildir ($p>0,01$).

Şekil 17’de her bir parametrenin sabah ve öğlen seyahat güzergahlarına (Kadıköy’den Tavşantepe’ye ve Tavşantepe’den Kadıköy’e) göre değişimi verilmiştir. Yapılan Anova testine göre güzergahlar açısından tüm parametreler benzer bir değişim göstermektedir. Seyahat yönünün bu kirleticilerin konsantrasyonları açısından hiçbir farkı yoktur ($p=0,31-0,91$).



Şekil 16: M1A,M2 ve M4 Metro Hatlarında Peronda ve Vagon İçinde Ölçülen PM_{2.5} Konsantrasyonlarının Aylık Ortalamaları

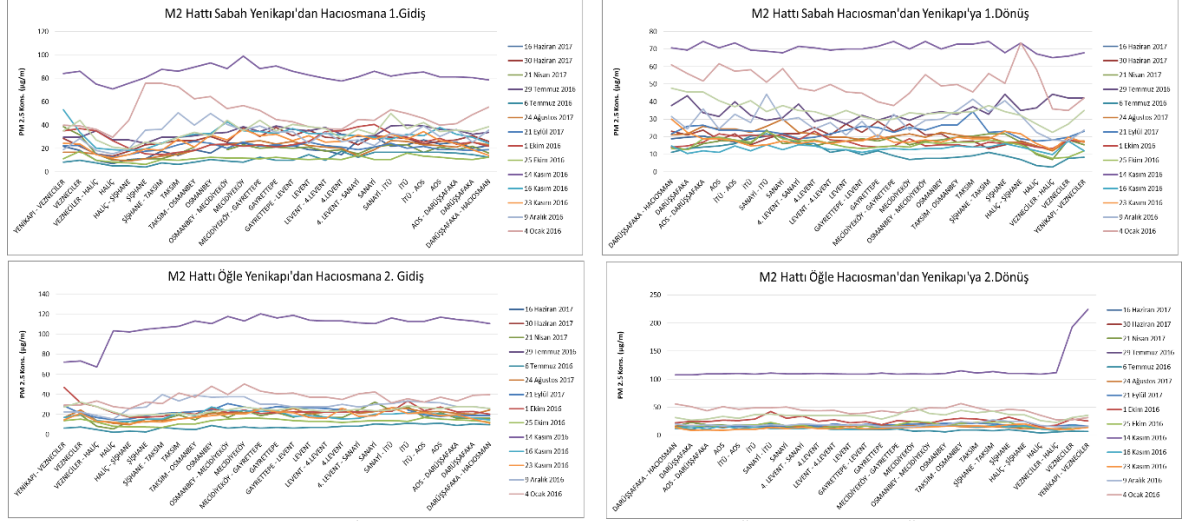


Şekil 17: M1A, M2 ve M4 Metro Hatlarında Vagon İçi PM_{2.5} Ölçümlerinin Her Bir Seyahat Boyunca (Trip) Değişimi Box-Blot Grafiği

4.2.METRO SEYAHAT SIRASINDA PM_{2.5} DEĞİŞİMİ

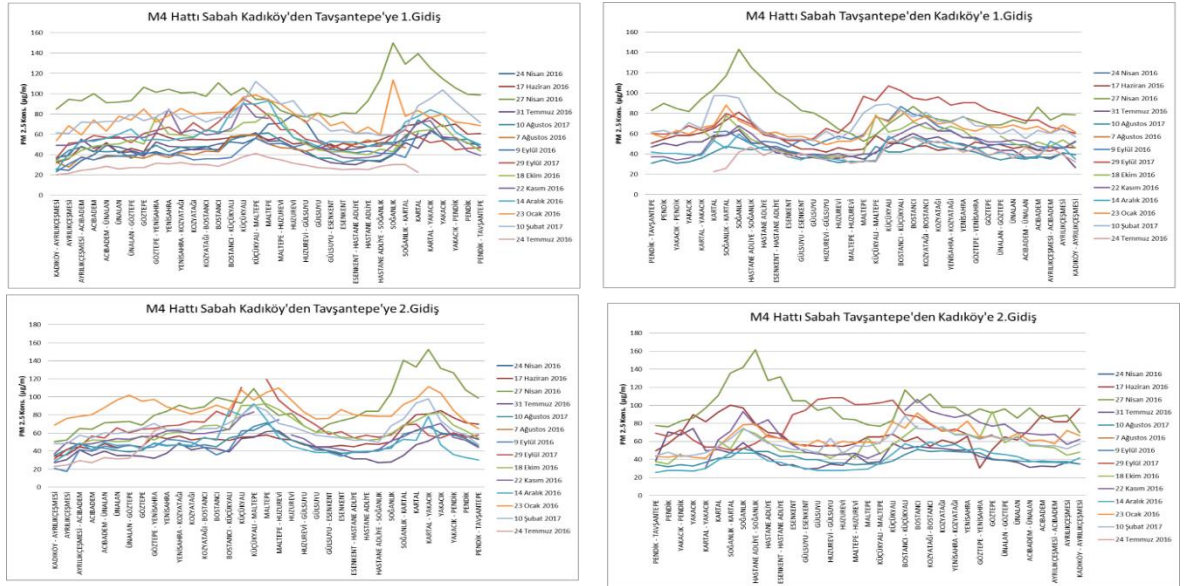
M1A hattında araç içinde seyahat boyunca ölçülen PM_{2.5} konsantrasyon ölçümlerinin yapıldığı tarihler ve konsantrasyon değerleri Şekil 18’de verilmiştir. M1A hattının zamana bağlı analizi yapıldığında sabah yapılan Yenikapı’dan Havalimanı’n’a 1. Gidiş olarak adlandırılan ölçümlerde özellikle 01.08.2016, 05.12.2016 ve 24.02.2017 tarihlerinde PM_{2.5} konsantrasyonlarının yüksek olduğu görülmektedir. Aynı şekilde Havalimanı’ndan Yenikapı’ya 1. Dönüş olarak adlandırılan ölçümlerde de aynı tarihlerde konsantrasyonların yüksek olduğu görülmüştür. 2. Gidiş olarak adlandırılan Yenikapı’dan Havalimanı’n’a Gidiş ve 2. Dönüş olarak adlandırılan Havalimanı’ndan Yenikapı’ya dönüş ölçümlerinde 01.08.2016 ve 24.02.2017 tarihlerinde konsantrasyonların yüksek olduğu ancak 05.12.2016 tarihinde konsantrasyon değerlerinin neredeyse yarı yarıya indiği görülmüştür. Bu tarihler dışında da anlık yükselmelerin olduğu gözükmemektedir. Ancak bu tarihlerde ölçüm boyunca konsantrasyon

mekana bağılı analizi yapıldığında ise Haliç istasyonunda konsantrasyonların düştüğü, haliç istasyonundan sonra devam eden ölçümlerde ise konsantrasyonlarda Şişhane istasyonunda artış gösterdiği görülmüştür. Bazı zamanlar pik değerler elde edilmesine rağmen genel anlamda M2 hattı için havalandırma sistemlerinin verimli çalıştığı söylenebilir.



Şekil 19: M2 Hattı Tren İçi PM_{2.5} Konsantrasyonunun Sabah ve Öğle Saatlerinde Ölçülen Değerleri

M4 hattında araç içinde seyahat boyunca ölçülen PM_{2.5} konsantrasyon ölçümlerinin yapıldığı tarihler ve konsantrasyon değerleri Şekil 20'de verilmiştir. M4 hattı boyunca yapılan ölçümlerin zamana ve mekana bağılı incelemesi yapıldığında PM_{2.5} konsantrasyon değerlerinin çok yüksek olduğu görülmüştür. Trafığın yoğun olduğu bir güzergahta yer alan M4 hattının havalandırma sistemlerinin verimli olmadığı düşünülmektedir.

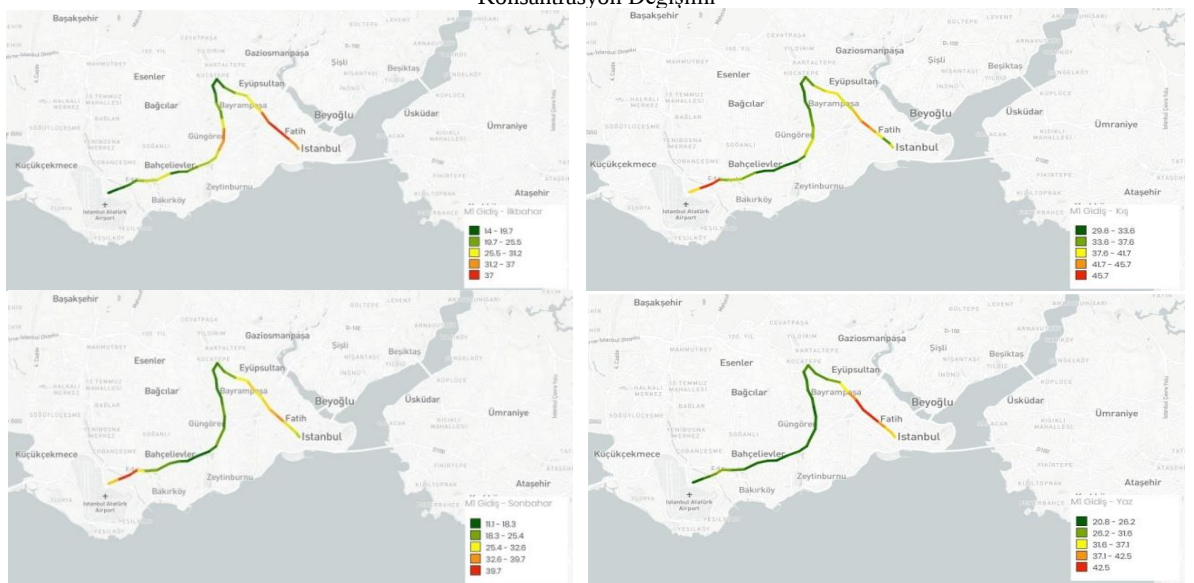
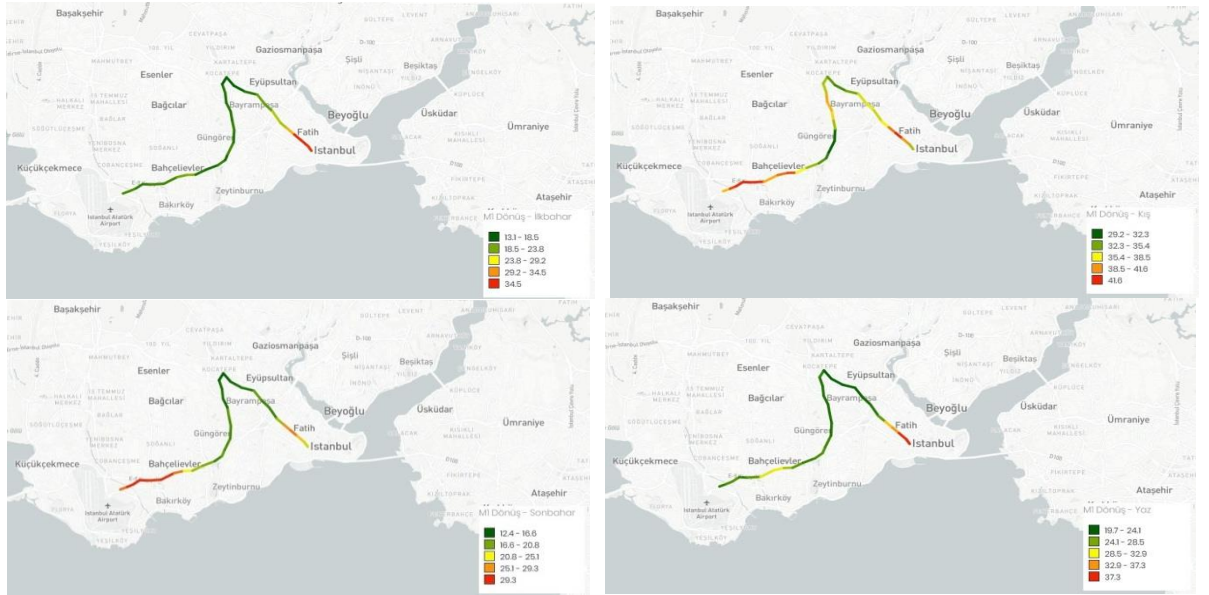


Şekil 20: M4 Hattı Tren İçi PM_{2.5} Konsantrasyonunun Sabah ve Öğle Saatlerinde Ölçülen Değerleri

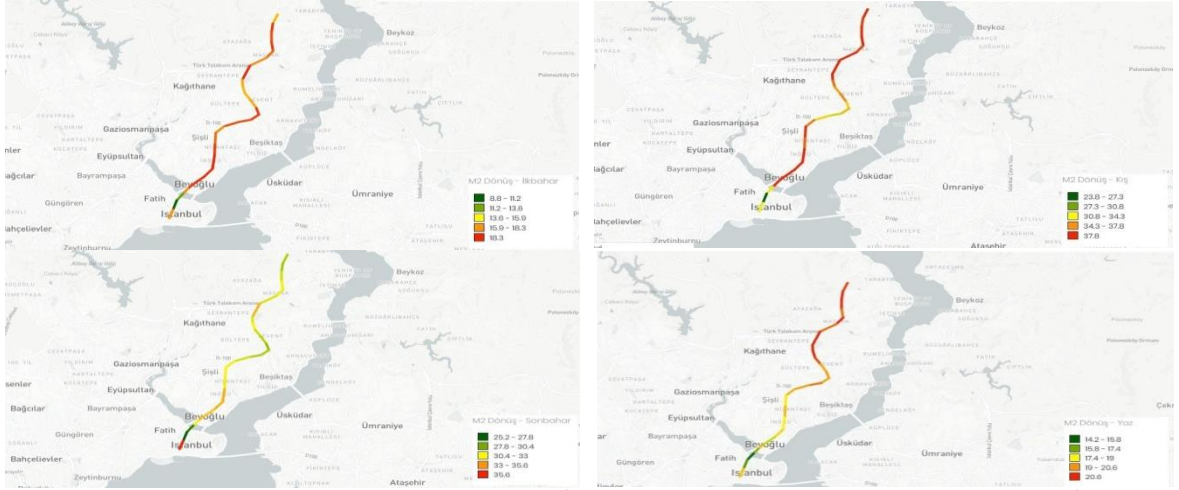
Her bir hat için hesaplanan mevsimlik PM_{2.5} konsantrasyon ortalamalarının haritada gösteriminde en yüksek değerlere yakın olan bölgeler kırmızı renk ile gösterilmiştir. Kırmızı renk ile gösterilmiş olması hava kalitesinin iyi olmadığını göstermez. Sadece o veri grubunda en yüksek değerlerin olduğu aralığı temsil eder. Yeşil ile gösterilmiş olması da hava kalitesinin iyi olduğunu göstermez. Aynı şekilde o veri grubunun en düşük değerlerinin olduğu aralığı temsil eder.

M1A metro hattında araç içinde seyahat boyunca ölçülen PM_{2.5} konsantrasyon ölçümlerinin hesaplanan mevsimlik ortalamalarının haritalandırılması Şekil 21 ve Şekil 22’de görülmektedir. İlkbahar mevsiminde dönüş ölçümlerinin PM_{2.5} konsantrasyon ortalamasının yüksek olmadığı, en yüksek değerlere Fatih ilçesinde bulunan Yenikapı – Ulubatlı istasyonları arasında ulaştığı görülmüştür. Gidiş ölçümlerinde ise gene aynı istasyonlar arasında en yüksek değerlere ulaştığı, bu istasyonlara ek olarak Güngören ilçesinde bulunan Davutpaşa – Terazidere istasyonlarında da yükseliş olduğu görülmüştür. Bu istasyonların ilkbahar PM_{2.5} konsantrasyon değerlerine bakıldığında ise dönüş ölçümlerinde 34,5 µg/m³ veya üzerindedir. Gidiş ölçümlerinde ise Aksaray – Ulubatlı istasyonları arasında 37 µg/m³ veya üzerinde, Yenikapı – Aksaray ve Davutpaşa – Terazidere istasyonları arası 31,2 - 37 µg/m³ arasındadır. Davutpaşa – Terazidere istasyonları açık istasyonlar olup trafik ve yerleşimden direkt olarak etkilenmektedir. Yenikapı - Ulubatlı istasyonları yerin altında bulunmaktadır. PM_{2.5} konsantrasyon ortalamaları değerlendirildiğinde Aksaray istasyonunda bulunan tek TVF havalandırma sistemi ile ilkbahar aylarında havalandırma ihtiyacı karşılandığı düşünülebilir. Kışın dönüş ölçümlerinde ise genel hat itibari ile istasyonlar arasında konsantrasyon miktarlarının yüksek olduğu görülmüştür. En düşük konsantrasyon ortalamaları 29,6 ve 32,3 µg/m³ veya altında olduğu görülmüştür. Diğer bölgelerde konsantrasyonlar bu değerlerden yüksektir ve Fatih ilçesinde bulunan Emniyet – Ulubatlı ve Bakırköy ilçesinde Yenibosna – DTM istasyonlarında en yüksek değerlere ulaşmıştır. Gidiş konsantrasyon ölçümleri haritası incelendiğinde dönüş ölçümlerine benzer ve yakındır. Yenibosna – DTM istasyonları açık istasyonlardır. Aksaray istasyonunda bulunan tek TVF kış mevsimi için hava kalitesi üzerinde yetersiz kaldığı söylenebilir. Sonbahar mevsiminin gidiş ve dönüş konsantrasyon ortalamaları ve istasyonları ilkbahar mevsimi ile benzerlik göstermektedir. İki mevsim arasındaki farklılıklar ise ilkbahar mevsiminde yüksek olan Davutpaşa – Terazidere istasyonları arasında kalan bölge sonbahar mevsiminde daha düşük konsantrasyona sahiptir. Bir diğeri ise ilkbahar mevsiminde düşük olan Yenibosna – DTM istasyonları arasında kalan bölge sonbahar mevsiminde daha yüksektir. Ancak kapalı alanlarda

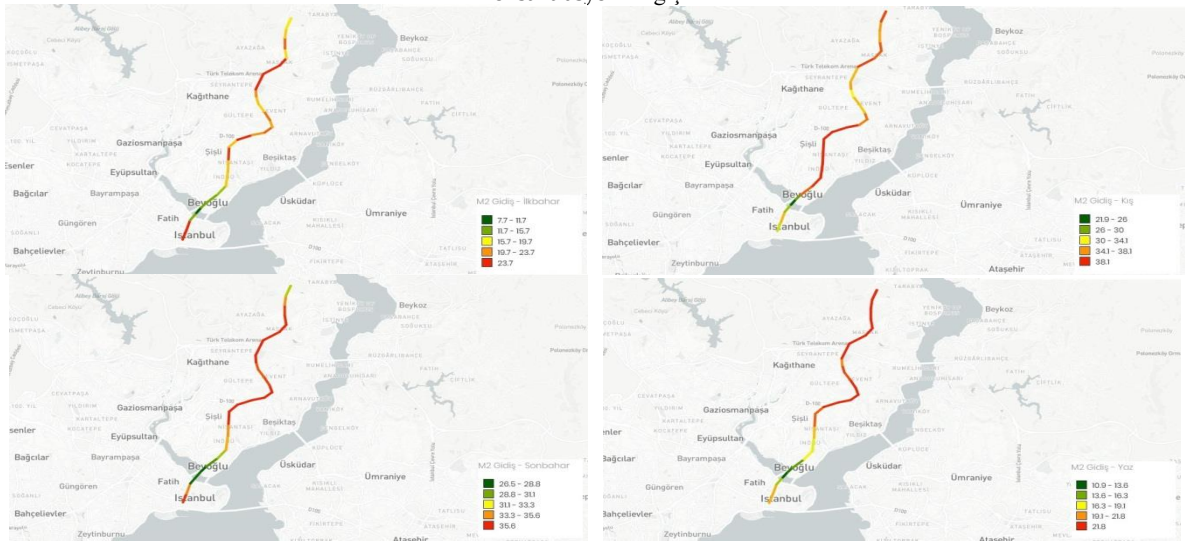
bulunan havalandırma sistemlerinin ilkbahar ve sonbahar mevsimleri için yeterli olduğu düşünülebilir. Yaz mevsiminde dönüş ölçümlerinde Fatih ilçesinde Yenikapı – Ulubatlı istasyonları arasında konsantrasyon ortalamaları 32,9 ve 37,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ aralarında veya daha yüksek ortlamalara sahip olduğu görülmüştür. Gidiş ölçümleri de dönüş ölçümleri ile benzerlik göstermektedir. Ancak sadece Emniyet – Ulubatlı istasyonları arasında 42,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ veya daha yüksek bir değere sahiptir. Yaz mevsimindeki yüksek ortalamaya sahip olan bu bölge gidiş ölçümünde yer alan Emniyet – Ulubatlı istasyon araları dışındaki konsantrasyon ortalamaları ilkbahar ve sonbahar mevsimleri ile benzerlik göstermektedir. Yaz mevsiminin bu diğer iki mevsimden farkı sadece yüksek değerlere Yenikapı – Ulubatlı istasyonlarında ulaşmasıdır.



M2 metro hattında araç içinde seyahat boyunca ölçülen $PM_{2.5}$ konsantrasyon ölçümlerinin hesaplanan mevsimlik ortalamalarının haritalandırılması Şekil 23 ve Şekil 24'te görülmektedir. İlkbahar ve yaz mevsiminde gidiş ve dönüş ölçümlerinin $PM_{2.5}$ konsantrasyon ortalaması haritada kırmızı çizgiler fazla olduğu gözüksede en yüksek değerlerin ilkbahar dönüşte $18.3 \mu g/m^3$ veya üzerinde, gidişte ise $23,7 \mu g/m^3$ veya üzerinde, yaz dönüşte $20,6 \mu g/m^3$ veya üzerinde olduğu, gidişte ise $21,8 \mu g/m^3$ veya üzerindedir. Sonbahar ve kış mevsimlerinde bu ortalamalar yükselsede sonbahar dönüşte $35,6 \mu g/m^3$ veya üzerinde, gidişte ise $35,6 \mu g/m^3$ veya üzerinde, kış dönüşte $37,8 \mu g/m^3$ veya üzerinde olduğu, gidişte ise $38,1 \mu g/m^3$ veya üzerindedir. Özellikle yerleşim, insan ve trafik yoğunluğunun fazla olduğu bu hatta INF, EXF ve TVF havalandırma sistemlerinin hava kalitesi üzerine etkisi her mevsim için iyi olduğu söylenebilir. Ayrıca Haliç istasyonunun her mevsimde konsantrasyon ortalamalarının düşük olduğu görülmüştür. İstasyon açık ve mevki olarak Haliç'in üstünde köprüde yer almaktadır.

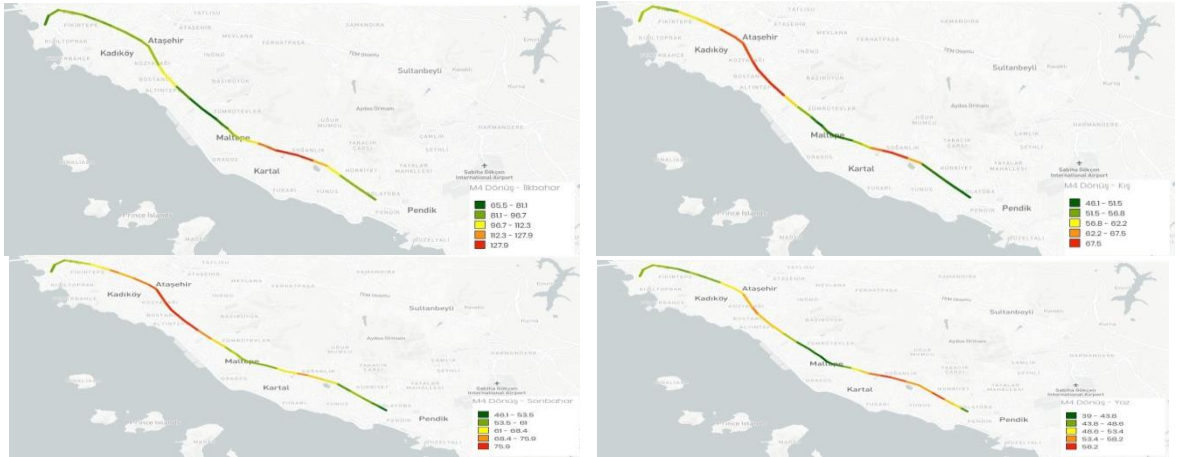


Şekil 23: M2 Hattı Dönüş Güzergahı Boyunca Sırasıyla İlkbahar, Kış, Sonbahar ve Yaz Mevsimlerinde Tren İçi $PM_{2.5}$ Konsantrasyon Değişimi

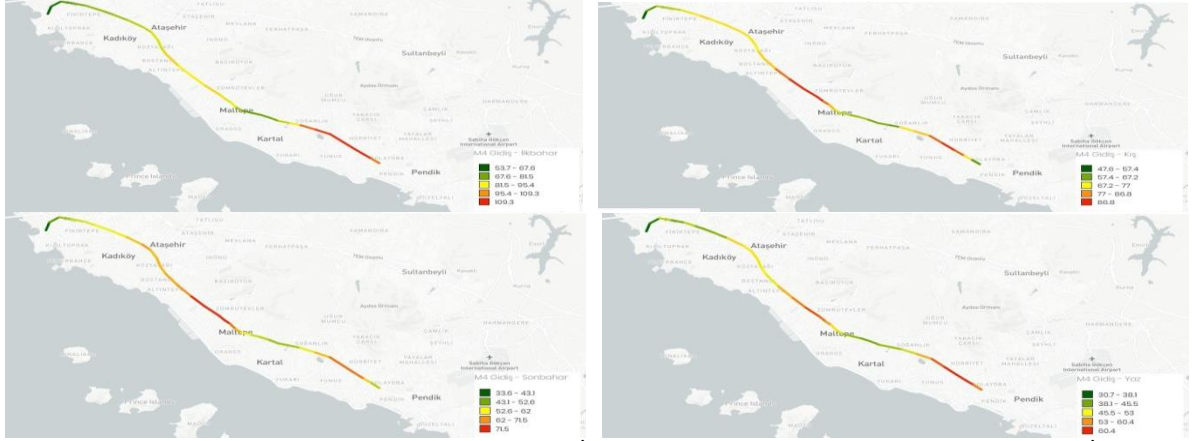


Şekil 24: M2 Hattı Gidiş Güzergahı Boyunca Sırasıyla İlkbahar, Kış, Sonbahar ve Yaz Mevsimlerinde Tren İçi $PM_{2.5}$ Konsantrasyon Değişimi

M4 metro hattında araç içinde seyahat boyunca ölçülen $PM_{2.5}$ konsantrasyon ölçümlerinin hesaplanan mevsimlik ortalamalarının haritalandırılması Şekil 25 ve Şekil 26’da görülmektedir. Bu hatta yapılan ölçümlerin mevsimlik ortalamaları alındığında $PM_{2.5}$ konsantrasyonlarının diğer 2 hat ortalamalarına göre oldukça yüksek olduğu görülmüştür. Havalandırma sistemleri M2 hattında olduğu gibi INF, EXF ve TVF sistemlerinden oluşmaktadır. Ancak burada bu sistemlerin tam verimli olarak çalıştığını söylememiz mümkün değildir. İlkbahar mevsiminin dönüş ölçümlerinin ortalamalarını incelediğimizde en düşük ölçülen konsantrasyon değerinin $65,5 - 81,1 \mu g/m^3$ veya hafif altında ve en yüksek değer ise $127,9 \mu g/m^3$ veya üzerindedir. Gidiş ölçümlerinde ise en düşük $53,7 - 67,6 \mu g/m^3$ veya hafif altında ve en yüksek değer ise $109,3 \mu g/m^3$ veya üzerindedir. Bu ortalama değerler diğer hatlara oranla oldukça yüksektir. Kış sonbahar ve yaz mevsimlerinin ortalamaları birbirine yakın değerlerdir. Dönüş kışın en düşük ölçülen konsantrasyon değerinin $46,1 - 51,5 \mu g/m^3$ veya hafif altında, en yüksek değer ise $67,5 \mu g/m^3$ veya üzerinde, sonbaharda en düşük ölçülen konsantrasyon değerinin $46,1 - 53,5 \mu g/m^3$ veya hafif altında, en yüksek değer ise $75,9 \mu g/m^3$ veya üzerinde, yazın en düşük ölçülen konsantrasyon değerinin $39 - 43,8 \mu g/m^3$ veya hafif altında, en yüksek değer ise $58,2 \mu g/m^3$ veya üzerindedir. Gidiş ise kış için en düşük ölçülen konsantrasyon değerinin $47,6 - 56,4 \mu g/m^3$ veya hafif altında, en yüksek değer ise $86,8 \mu g/m^3$ veya üzerinde, sonbaharda en düşük ölçülen konsantrasyon değerinin $33,6 - 43,1 \mu g/m^3$ veya hafif altında, en yüksek değer ise $71,5 \mu g/m^3$ veya üzerinde, yazın en düşük ölçülen konsantrasyon değerinin $30,7 - 38,1 \mu g/m^3$ veya hafif altında, en yüksek değer ise $60,4 \mu g/m^3$ veya üzerindedir. Kış, sonbahar ve yaz mevsimlerindeki ortalamalar birbirine yakın ve ilkbahar mevsiminin ortalamalarının altında olduğu söylenece PM_{2.5} konsantrasyonlarının mevsimlik ortalaması diğer 2 hatlara kıyasla yüksektir.



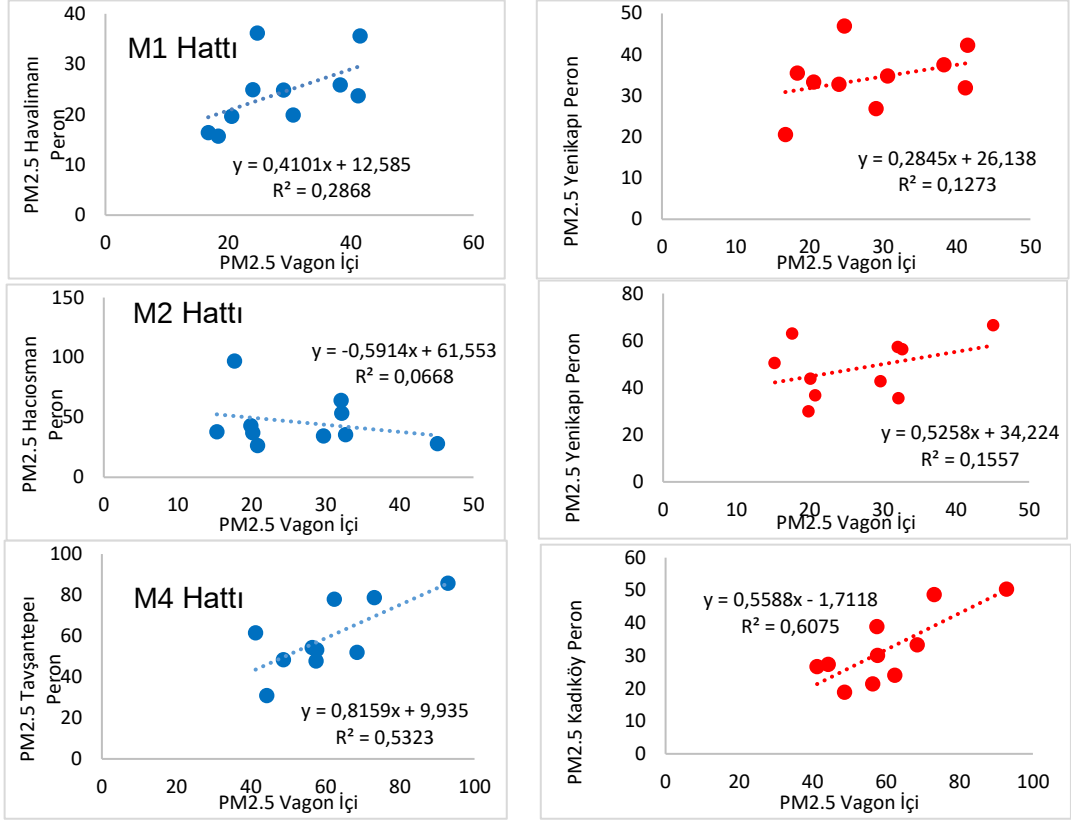
Şekil 25: M4 Hattı Dönüş Güzergahı Boyunca Sırasıyla İlkbahar, Kış, Sonbahar ve Yaz Mevsimlerinde Tren İçi $PM_{2.5}$ Konsantrasyon Değişimi



Şekil 26: M4 Hattı Gidiş Güzergahı Boyunca Sırasıyla İlkbahar, Kış, Sonbahar ve Yaz Mevsimlerinde Tren İçi PM_{2.5} Konsantrasyon Değişimi

4.3.METRO ARAÇ İÇİ VE PERONLARDA ÖLÇÜLEN PM_{2.5} KONSANTRASYONLARININ KORELASYONU

Şekil 27’de M1A, M2 ve M4 Vagon İçinde Aylık Ölçülen PM_{2.5} Değerlerinin Peronlarda Ölçülen Değerler ile Korelasyonu görülmektedir. M1A hattında Havalimanı peronda ölçülen PM_{2.5} ile aynı dönemde vagon içinde ölçülen PM_{2.5} arasında orta düzeyli 0,52 seviyesinde bir korelasyon mevcuttur. Buna karşın Yenikapı peronu PM_{2.5} konsantrasyon değişimi ile aynı dönemde ölçülen vagon içi PM_{2.5} konsantrasyon değişimi daha düşük 0,34 mertebesinde ilişki göstermektedir. M2 hattında Hacıosman ve Yenikapı peronlarında ölçülen PM_{2.5} değerlerinin vagon içi ölçümleri ile anlamlı bir korelasyonu mevcut değildir. Ancak M4 hattında Tavşantepe ve Kadıköy peronlarında ölçülen PM_{2.5} konsantrasyonlarının vagon içi PM_{2.5} seviyelerini direk etkilediği ve yüksek anlamlı bir korelasyon gösterdiği görülmektedir (0,72-0,77). M1A hattında kısmen ama M4 hattında doğrudan vagon içi hava kalitesinin peronlardaki hava kalitesi ile ilişkili olduğu açıkça görülmektedir. Vagon içi hava kalitesindeki iyileşme veya kötüleşme doğrudan vagon içine yansımaktadır.

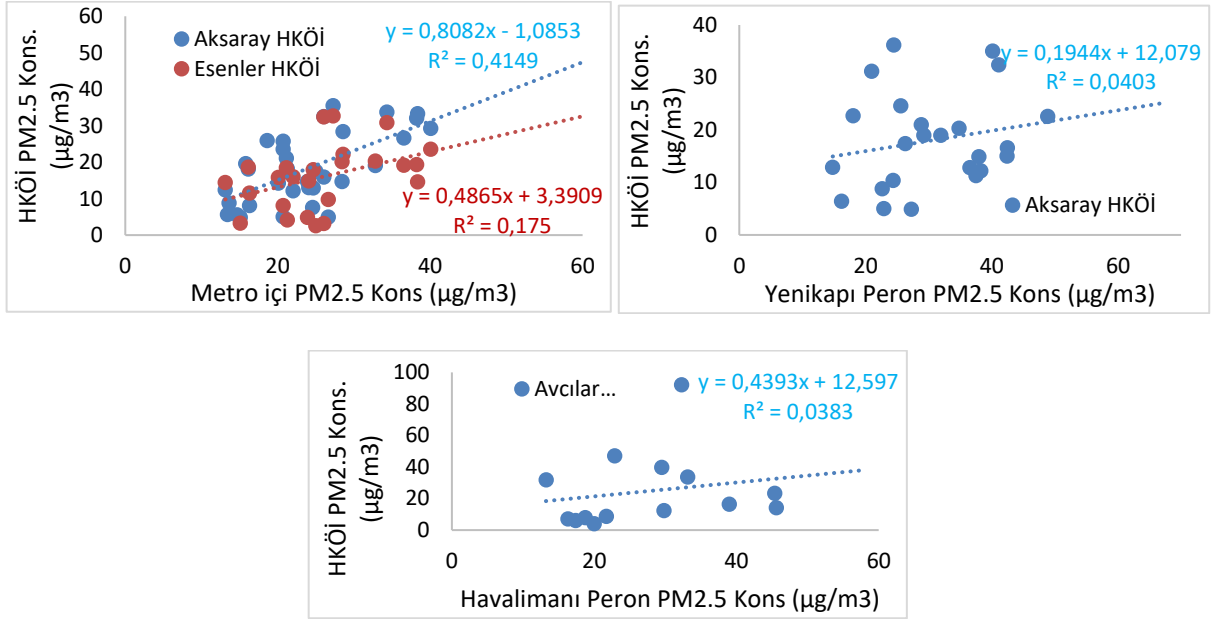


Şekil 27: M1A, M2 ve M4 Vagon İçinde Aylık Ölçülen PM_{2.5} Değerlerinin Peronlarda Ölçülen Değerler ile Korelasyonu

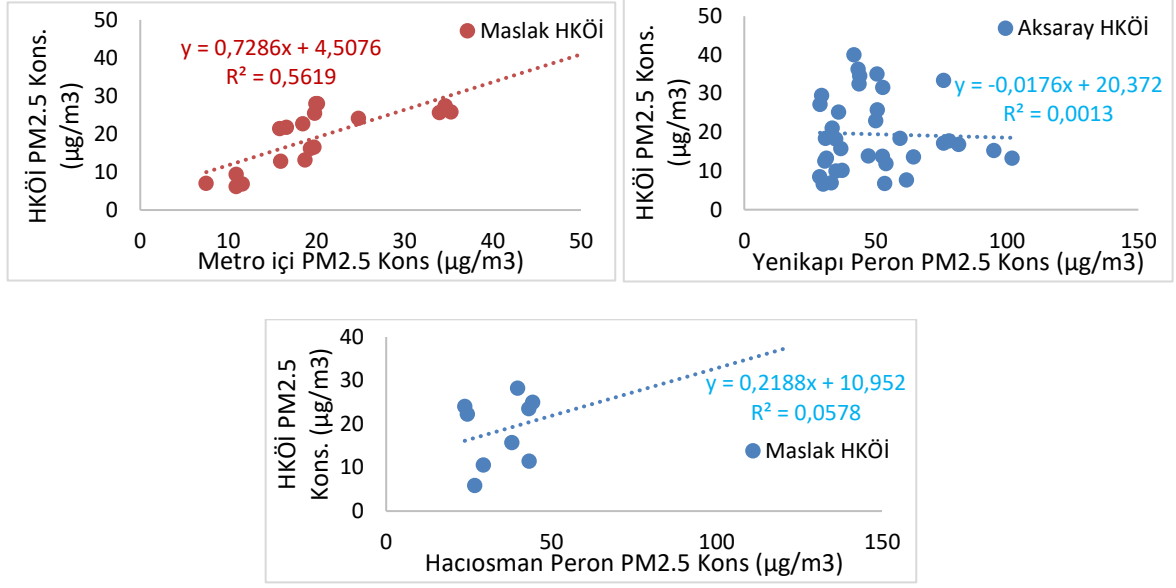
4.4.METRO ARAÇ İÇİ VE PERONLARDA ÖLÇÜLEN PM_{2.5} İLE DIŞ ORTAM PM_{2.5} KONSANTRASYONLARININ KORELASYONU

M1A, M2 ve M4 hatlarında tren içi ve peronlardaki ölçümlerin dış ortam hava kalitesi ölçüm istasyon verileri ile korelasyonları sırasıyla Şekil 28, Şekil 29 ve Şekil 30'da verilmiştir. İlk korelasyon seyahat boyunca araç içinde gidiş ve dönüş ölçüm ortalamaları ile güzergahlarında yer alan dış ölçüm istasyon verilerinin karşılaştırılması, diğer 2 şekilde ise hatların başında ve sonunda yer alan peronlardaki ölçüm ortamları ile o istasyonlara yakın olan dış ölçüm istasyon verilerinin karşılaştırılması gösterilmiştir.

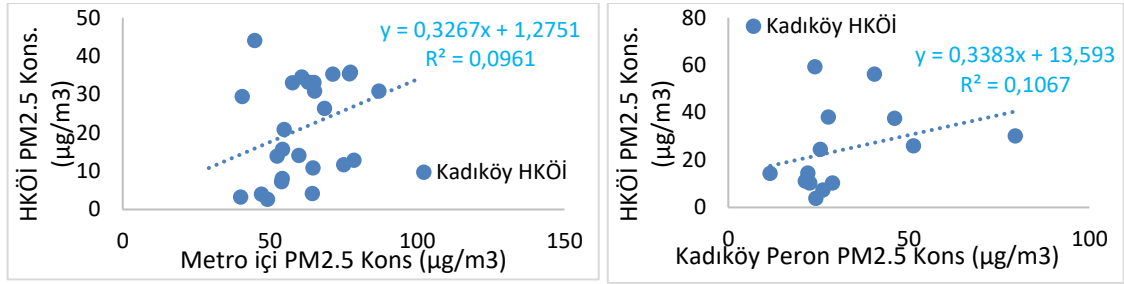
M1A hattında vagon içindeki PM_{2.5} konsantrasyonu ile Aksaray Hava Kalitesi ölçüm istasyonunda dış ortamda ölçülen PM_{2.5} konsantrasyonu arasında 0,64 düzeyinde anlamlı bir korelasyon mevcuttur. Buna karşın en yakın ikinci dış ortam PM_{2.5} ölçüm noktası olan Esenlerde ölçülen PM_{2.5} ile vagon içi PM_{2.5} arasında orta düzeyli (0,41) bir korelasyon mevcuttur. Peronlarda ölçülen PM_{2.5} ile dış ortam PM_{2.5} seviyeleri arasında ise anlamlı bir ilişki tespit edilememiştir. M2 hattında Maslak hava kalitesi ölçüm istasyonu en yakın dış ortam PM_{2.5} ölçüm noktasındadır ve vagon içi PM_{2.5} ölçümleri Maslakta ölçülen dış ortam konsantrasyonları ile yüksek düzeyli bir korelasyon mevcuttur (korelasyon 0,75). Buna karşın peronlarda ölçülen PM_{2.5} konsantrasyonlarının dış ortam değerleri ile ilişkisi tespit edilememiştir. M4 hattında ise ne vagon içi PM_{2.5} değişimi nede peronlardaki ölçümler direkt dış ortamla ilişkili değildir.



Şekil 28: M1A Hattı Tren İçi ve Peronlardaki Ölçümlerin Dış Ortam Hava Kalitesi Ölçüm İstasyon Verileri ile Korelasyonu



Şekil 29: M2 Hattı Tren İçi ve Peronlardaki Ölçümlerin Dış Ortam Hava Kalitesi Ölçüm İstasyon Verileri ile Korelasyonu



Şekil 30: M4 Hattı Tren İçi ve Peronlardaki Ölçümlerin Dış Ortam Hava Kalitesi Ölçüm İstasyon Verileri ile Korelasyonu

Korelasyonlar sonucu dış ortam hava kalitesi ölçümü yapan Esenler ve Aksaray istasyonları ile M1A hattının güzergah boyunca araç içinde yapılan ölçümler arasında ve aynı şekilde dış ortam hava kalitesi ölçümü yapan Maslak istasyonu ile M2 hattının güzergah boyunca araç içinde yapılan ölçümler arasında karşılaştırma yapılarak havalandırma sistemlerinin verimliliğini yorumlamak mümkün olacaktır. M1A, M2 ve M4 hatlarının peronlarında yapılan ölçüm ortalamaları ile dış ortam hava kalitesi ölçümü yapan istasyon verileri arasında karşılaştırma yapmamız mümkün olmayacaktır. M4 hattının güzergahında yer alan istasyonlarda PM_{2.5} için karşılaştırma yapmak mümkün olmasada PM_{2.5} konsantrasyon seviyeleri yüksek olduğu için havalandırma sistemlerinin verimli olmadığı söylenebilir.

M1A hattında 05.06.2017 tarihinde 1. Gidiş ve 1. Dönüşlerde yapılan ölçüm ortalamaları Esenler ve Aksaray HKÖİ ölçüm veriler ile kıyaslandığında vagon içinde yapılan ölçümlerin oldukça yüksek olduğu görülmüştür. Esenler ve Aksaray HKÖİ’de 1. Gidiş zaman aralığı için sırasıyla 5 ve 9,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ iken vagon içi ölçüm güzergah ortalaması 26,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ olarak ölçülmüştür. Aynı şekilde 11.07.2016 tarihinde 1.Gidiş, 1. Dönüş, 2. Gidiş ve 2. Dönüş, 11.07.2016 tarihinde 1.Gidiş, 22.08.2017 tarihinde 1.Gidiş ve 1. Dönüş, 08.05.2017 tarihinde 1.Gidiş ve 1. Dönüş, 05.10.2016 tarihinde 1.Gidiş, 1. Dönüş, 2. Gidiş ve 2. Dönüş, 03.01.2017 tarihinde 1.Gidiş ve 1. Dönüş, 24.02.2017 tarihinde 1.Gidiş, 1. Dönüş, 2. Gidiş ve 2. Dönüş, 10.04.2017 tarihinde 1.Gidiş zamanlarındaki ortalamalarda HKÖİ istasyonlarında ölçülen değerlerden yüksek olduğu görülmüştür. M1A hattı genel itibari ile açık istasyonlardan oluşmaktadır. Bu yüzden havalandırma sistemleri ile ilgili yorum yapmak buradan yola çıkarak mümkün olmayabilir. Ancak günleri ve istasyonları ayrı olarak ele aldığımızda Yenikapı – Ulubatlı istasyonları arasında yer alan Aksaray istasyonunda bulunan tek bir TVF havalandırma sisteminin yeterli olmayacağı söylenebilir.

M2 hattında Haliç istasyonu dışındaki tüm istasyonlar yeraltında bulunmaktadır. Bu hatta 16.06.2017 tarihinde 1. Gidiş ve 1. Dönüşlerde yapılan ölçüm ortalaması sırasıyla 19,3 ve 18,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ iken Maslak HKÖİ’de sırasıyla 16,2 ve 13,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ olarak ölçülmüştür. 24.08.2017 tarihinde 1.Gidiş, 06.07.2017 tarihinde 1. Gidiş, 1. Dönüş, 2. Gidiş ve 2. Dönüş, 07.02.2017 tarihinde 1. Gidiş, 1. Dönüş, 2. Gidiş ve 2. Dönüş zamanlarındaki ortalamalarda HKÖİ istasyonlarında ölçülen değerlerden yüksek olduğu görülmüştür. Ancak 16.06.2017 tarihindeki gibi farkın fazla olmadığı görülmüştür. Genel itibari ile havalandırma sistemlerinin verimli bir şekilde çalıştığı ve hava kalitesi üzerinde olumlu etkisinin bulunduğu söylenebilir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışmasında İstanbul'da şehir içi ulaşımında önemli bir yeri olan metro sistemlerinde vagon içlerinin ve peronların hava kalitesi incelenmiş ve PM_{2.5} ölçümleri yapılmıştır. Metroların halk sağlığı açısından durumunun değerlendirildiği ülkemizdeki bu ilk çalışmada metro içi hava kalitesi ortaya konulmuştur. Ayrıca sözkonusu hava kalitesine önemli bir etkisi olan metro havalandırma sistemi incelenmiş ve havalandırma ile hava kalitesi arasındaki ilişki değerlendirilmiştir. M1A, M2 ve M4 hatlarında her ay olmak üzere bir yıl boyunca ilk ve son peron arasında seyahat süresince gidiş ve dönüş olmak üzere ölçümler yapılmıştır. Her araç içi ölçüm başlangıcında ve sonunda peronlarda ortalama 15 dk ölçüm yapılmıştır. Tüm ölçüm zamanlarındaki dış ortamda hava kalitesi ölçüm istasyonlarında yapılan PM_{2.5} ölçümleri temin edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Peronlarda ve vagon içlerinde kaydedilen PM_{2.5} değerlerinin dış ortam havasında ölçülen PM_{2.5} değerleri ile ilişkisi ortaya konmaya çalışılmıştır.

M1A hattında Fatih ilçesinde Yenikapı – Ulubatlı istasyonları arasında kalan bölgede PM_{2.5} konsantrasyonlarının yüksek olduğu görülmüştür. Bu bölgede Aksaray'da yer alan sadece tek TVF sisteminin hava kalitesinin iyileştirilmesinde yeterli olmadığı söylenebilir. M2 hattı boyunca havalandırma sistemlerinin hava kalitesi üzerinde olumlu etkisi olduğu, M4 hattında ise konsantrasyonların çok yüksek olduğu görülmüştür. M4 hattı güzergahı boyunca yer alan dış ortam hava kalitesi ölçüm istasyonlarının PM_{2.5} konsantrasyon verileri yeterli olmadığı için M4 hattında yapılan ölçümler ile dış ölçümler kıyaslanamamıştır. Buna rağmen M4 hattında yer alan konsantrasyon değerleri çok yüksek olduğu için havalandırma sistemlerinin yeterli olmadığını söyleyebiliriz. M4 hattında mevsimsel konsantrasyon değerlerinin 30 µg/m³ ve 127 µg/m³ arasında değer aldığı ve diğer hatların konsantrasyon değerleri ile kıyaslandığında neredeyse 2 katı veya daha fazla olduğu görülmüştür. Özellikle ilkbahar aylarında en yüksek PM_{2.5} konsantrasyon değerlerine sahiptir. İlkbahar mevsimi göz önüne alınarak havalandırmanın kötü şartlar olarak belirlenen durumlara göre çalıştırılması düşünülmelidir, Daha bütünlüklük bir metro işletim sistemi (yolcu sayısı, nem, sıcaklık, doruk saatler, mevsimsel etkiler, dış hava kalitesi vs yi dikkate alarak çalıştırılan) ile akıllı ve sürdürülebilir bir kent oluşturabilir.

M1A hattında kısmen ama M4 hattında doğrudan vagon içi hava kalitesinin peronlardaki hava kalitesi ile ilişkili olduğu açıkça görülmektedir. Peron içi hava kalitesindeki iyileşme veya kötüleşme doğrudan vagon içine yansımaktadır. İstasyon derinliği arttıkça havalandırma ihtiyacı artmakta ve dış ortam ile metro içi toz konsantrasyonu ilişkisi kuvvetlenmektedir.

Metrolarda peron içlerinde ve vagonlardaki $PM_{2.5}$ konsantrasyonunun kaynaklarının ortaya konması için detaylı kimyasal içerik analizine ihtiyaç vardır. Minguillón ve diğ (2018) Barcelona'da eski ve yeni metro sistemlerinde partikül maddenin kaynak belirlemesini yapmışlar ve eski sistemlerde $PM_{2.5}$ 'un 30–66 % Fe_2O_3 ve 18–37% karbonlu maddeler içerdiğini tespit etmişlerdir. Yeni sistem metrolarda Platform Screen Doors (PSD) kullanımının bu bileşenlerin PM içindeki oranını 21–44 % ve 15–30 % düzeyinde azalttığını tespit etmişlerdir. İstanbul'da yeni yapılacak metro sistemlerinde PSD'nin değerlendirilmesi metro içi PM konsantrasyonu azaltımı için faydalı bir seçim olabilecektir. Çünkü PSD sistemleri metro sistemi içerisinde yer alan kirli havayı peron bölgesine girmeden direkt şaftlar aracılığıyla dışarı atmaktadır. PSD sistem peron ve ray hattı arasında kalan bölgeye yapılan, yerden tavana kadar yüksekliği olan, otomatik kapıları bulunan ve araç geldiğinde kapıların açıldığı bir sistemdir. Bu sistemde peron ve ray hattı arasında bir duvar görevi göreceği için tünelden aracın piston etkisi ile getirdiği hava veya TVF sistemleri ile tünelin havalandırılması esnasında oluşan hava peron bölgesine girmeden direkt olarak peron sonlarında yer alan şaftlar aracılığıyla dışarı atılacaktır. Mevcut sistemlerde bunu yapmak teknik anlamda mümkün olmadığı için yeni yapılacak olan metro sistemlerinde iç hava kalitesinin iyileştirilmesi adına yapılması önerilmektedir. Ayrıca PSD sistem ile perondan ray hattına izinsiz girişler veya düşmeler de engellenebilecektir.

Moreno ve Miguel (2018) tarafından metrolardaki hava kalitesinin iyileştirilmesine yönelik bir değerlendirme makalesi yayınlamışlardır. Metrolardaki hava kalitesinin iyileşmesi için en temel yaklaşımın PSD uygulaması olduğu ve ikinci önemli unsurunda dış ortam hava kalitesinde oluşacak iyileşmenin olduğunu vurgulamışlardır. Özellikle metro sistemlerinin havalandırılmasının trafik yakınından alınan hava ile yapıldığı düşünüldüğünde trafik emisyonunun azaltım politikalarının metro içi emisyon azaltımına önemli fayda sağlayacağı kaçınılmazdır. Ulusal düşük emisyonlu ulaşım planlarımızı oluşturmamız önemlidir.

Bu tez ile İstanbul'daki raylı sistemlerdeki hava kalitesi ve havalandırma ile ilgili yapılacak daha sonraki çalışmalara bir temel ve metodoloji sunulmuştur. İç dış hava etkileşimi, zamana bağlı değişim, peron ve vagon içi havasının etkileşimi gibi pek çok sayıdaki etken parametre eş zamanlı olarak ölçümler ile daha detaylı incelenebilir. Çalışmaların daha derinleşmesi, sonuçlarının ilgili paydaşlarca kullanılarak yararlı hale gelmesi ancak ariyl sistemlerin işletmesinden sorumlu kuruluşlar ile işbirliği ile gerçekleştirilebilecektir. Araştırma grupları ve işletme firmalarının işbirliği ile İstanbul halkı için daha temiz havalı bir metro içi havası

sağlamak mümkündür. Bu tez çalışması ile sistemdeki havalandırma ile ilgili bazı durumlar tespit edilmiş olup gelecekteki çalışmalarda yapılan iyileştirme sonuçları incelenebilecektir. Ayrıca elde edilen ölçüm sonuçları, ulaşım aıt yolcu sayıları, peron derinlikleri ve havalandırma çalışma planı ile ilgili verilerin sağlanması ile model çalışmaları yapılabilecektir. Bu tip bir modelleme ölçüm yapılmadan da hava kalitesinin takibini ve ona göre önlem alınmasını sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Akgül Laloğlu, Ş. (2010). Metro istasyon ve tünellerinde havalandırma sistemi tasarımı (Master's thesis, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü)
- [2] Onat B. Stakeeva B. (2009). İstanbul'da Farklı Ulaşım Türleri ile Seyahat Esnasında Maruz Kalınan Partikül Maddenin ($PM_{2.5}$) Belirlenmesi, IX. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi
- [3] Abanoz S. (2015). Analysis of Air Pollution Over Turkey: AN UP-TO-DATE STUDY
- [4] Aydın F. (2013). Combine to the ventilation systems for passengers and tunnel areas in metro systems, 2. Uluslararası Raylı Sistemler Mühendisliği Sempozyumu
- [5] Tunç, H. (2007). Yeraltı metro istasyonlarında algısal faktörlerin irdelenmesi: Taksim Metro İstasyonu (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [6] Özbakır, E. (2007). Yeraltı Raylı Sistem İstasyonlarında Isıtma, Havalandırma, Klima Tesisatı, Tesisat Mühendisliği Dergisi, sayı 97, s.375-382
- [7] Kayılı, S. & Eralp, O. C., (2007). Yeraltı Taşıma Sistemleri İstasyonlarında Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemiyle Yangın ve Havalandırma Simülasyonu, VII. Ulusal Tesisat Kongresi, İstanbul, s.65-68
- [8] Neccar Ö.(2007). Üsküdar-Ümraniye Metro Projesi Mekanik Hesap Raporu 7A Mühendislik s.30-43, İstanbul
- [9] Eralp, O.C & Musluoğlu, E, (2003). Yeraltı Toplu Taşıma Sistemlerinde Acil Durum Havalandırması, IV. Ulusal Tesisat Kongresi, İstanbul
- [10] URL 1:
http://www.ubak.gov.tr/BLSM_WIYS/DLH/tr/DOKUMAN_SOL_MENU/Rayli_Sistem_Kriterleri/20140228_153217_10288_1_10315.pdf, [Ziyaret tarihi 09.01.2019]
- [11] Metroistanbul (2018), Metro Havalandırma Sistemleri, Teknik Şartname (MHSTŞ), İstanbul
- [12] URL 3: <https://www.metro.istanbul/YolcuHizmetleri/AgHaritalari> [Ziyaret tarihi 09.01.2019]

- [13] Kwon, S.B., Jeong, W., Park, D., Kim, K.T., Cho, K.H., 2015. A multivariate study for characterizing particulate matter (PM₁₀, PM_{2.5}, and PM₁) in Seoul metropolitan subway stations, Korea. *J. Hazard. Mater.* 297, 295–303.
- [14] Li, Z., Che, W., Frey, H. C., & Lau, A. K. (2018). Factors affecting variability in PM_{2.5} exposure concentrations in a metro system. *Environmental research*, 160, 20-26.
- [15] He, S., Jin, L., Le, T., Zhang, C., Liu, X., & Ming, X. (2018). Commuter health risk and the protective effect of three typical metro environmental control systems in Beijing, China. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 62, 633-645.
- [16] Pope III, C.A., Dockery, D.W., 2006. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. *J. Air Waste Manag. Assoc.* 56 (6), 709–742.
- [17] Hua, J., Yin, Y., Peng, L., Du, L., Geng, F.H., Zhu, L.P., 2014. Acute effects of black carbon and PM_{2.5} on children asthma admissions: a time-series study in a Chinese city. *Sci. Total Environ.* 481, 433–438.
- [18] Weber, S.A., Insaf, T.Z., Hall, E.S., Talbot, T.O., Huff, A.K., 2016. Assessing the impact of fine particulate matter (PM_{2.5}) on respiratory-cardiovascular chronic diseases in the New York City Metropolitan area using Hierarchical Bayesian Model estimates. *Environ. Res.* 151, 399–409.
- [19] Pagliara, F., & Papa, E. (2011). Urban rail systems investments: an analysis of the impacts on property values and residents' location. *Journal of Transport Geography*, 19(2), 200-211.
- [20] Tarhan, R. (2009). Raylı Sistemlerde Ölçme Teknikleri ve Donanımları, TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 12. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı 11-15 Mayıs 2009, Ankara.
- [21] EROĞLU, M., & Hazırlanmıştır, O. (2014). RAYLI SİSTEMLERDE RAY VE TEKER ARASINDAKİ TEMAS ANALİZİNİN ANSYS ORTAMINDA İNCELENMESİ.

- [22] Onat B., Sahin U.A., Mangır N., Dogan M., Uzun B., Akın O., Ozkaya F., Erdogan H., Akarsu F. (2018). Ulaşım araçları içinde ve dış ortamda trafik kaynaklı ultra ince partiküllerin ve siyah karbonun belirlenmesi ve çevresel faktörlerle ilişkisinin incelenmesi, TÜBİTAK Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı 1001 kodlu, 115Y263 proje numaralı
- [23] Uzun B., (2018). Ulaşım araçları içinde ultra ince partikül ve siyah karbon maruziyetinin belirlenmesi (Master's thesis, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü)
- [24] Knibbs, L.D., Cole-Hunter, T., Morawska, L. 2011. “A review of commuter exposure to ultrafine particles and its health effects”, *Atmospheric Environment*, 45 (16), 2611-2622.
- [25] Morawska, L., Ristovski, Z., Jayaratne, E.R., Keogh, D.U., Ling, X. 2008. “Ambient nano and ultrafine particles from motor vehicle emissions: characteristics, ambient processing and implications on human exposure”, *Atmospheric Environment*, 42 (35), 8113-8138.
- [26] Watkiss, P., Steve P., Mike, H. 2005. “Baseline scenarios for service contract for carrying out cost-benefit analysis of air quality related issues, in particular in the clean air for Europe (CAFE) programme”, *AEA Technology Environment*, (2005), 1–122.
- [27] Fruin, S., Westerdahl, D., Sax, T., Sioutas, C., Fine, P.M. 2008. “Measurements and predictors of on-road ultrafine particle concentrations and associated pollutants in Los Angeles”, *Atmospheric Environment*, 42 (2), 207-219.
- [28] Dons, E., Int Panis, L., Van Poppel, M., Theunis, J., Willems, H., Torfs, R., Wets, G. 2011. Impact of time–activity patterns on personal exposure to black carbon”, *Atmospheric environment*, 45 (21), 3594–602.
- [29] Oberdorster, G., Oberdorster, E., Oberdorster, J. 2005. “Nanotoxicology: an emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles”, *Environmental Health Perspectives*, 113 (7), 823-839.
- [30] Li, N., Wang, M., Bramble, L.A., Schmitz, D.A., Schauer, J.J., Sioutas, C., Harkema, J.R., Nel, A.E. 2009. “The adjuvant effect of ambient particulate matter is closely reflected by the particulate oxidant potential”, *Environmental Health Perspective*, 117 (7), 1116-1123.

- [31] Delfino, R.J., Malik, S., Sioutas, C. 2005. "Potential role of ultrafine particles in associations between airborne particle mass and cardiovascular health", *Environmental Health Perspectives*, 113 (8), 934-946.
- [32] Valavanidis, A., Fiotakis, K., Vlachogianni, T. 2008. "Airborne particulate matter and human health: toxicological assessment and importance of size and composition of particles for oxidative damage and carcinogenic mechanisms", *Journal of Environmental Science and Health, Part C*, 26, 339-362.
- [33] Oberdorster, G., Sharp, Z., Atudorei, V., Elder, A., Gelein, R., Kreyling, W., Cox, C. 2004. "Translocation of inhaled ultrafine particles to the brain", *Inhalation Toxicology*, 16 (6-7), 437-445.
- [34] Elder, A., Gelein, R., Silva, V., Feikert, T., Opanashuk, L., Carter, J., Potter, R., Maynard, A., Ito, Y., Finkelstein, J., Oberdörster, G. 2006. "Translocation of inhaled ultrafine manganese oxide particles to the central nervous system", *Environmental Health Perspectives*, 114 (8) , 1172-1178.
- [35] McCreanor, J., Cullinan, P., Nieuwenhuijsen, M.J, Stewart-Evans, J., Malliarou, E., Jarup, L., Harrington, R., Svartengren, M., Han, I., Ohman-Strickland, P., Chung, K.F., Zhang, J. 2007. "Respiratory effects of exposure to diesel traffic in persons with asthma", *The New England Journal of Medicine*, 357 (23), 2348-2358.
- [36] Weichenthal, S. 2013. "Selected physiological effects of ultrafine particles in acute cardiovascular morbidity", *Environmental Research*, 115, 26-36.
- [37] Hemmingsen, J.G., Rissler, J., Lykkesfeldt, J., Sallsten, G., Kristiansen, J., Møller, P., Loft, S. 2015. "Controlled exposure to particulate matter from urban street air is associated with decreased vasodilation and heart rate variability in overweight and older adults", *Particle and Fibre Toxicology*, 12, 6.
- [38] Brown, D., Wilson, M., MacNee, W., Stone, V., Donaldson, K. 2001. "Size-dependent proinflammatory effects of ultrafine polystyrene particles: a role for surface area and oxidative stress in the enhanced activity of ultrafines", *Toxicology and Applied Pharmacology*, 175 (3), 191-199.

- [39] Brauner, V.E., Forchhammer, L., Moller, P., Simonsen, J., Glasius, M., Wahlin, P., Raaschou-Nielsen, O., Loft, S.. 2007. "Exposure to ultrafine particles from ambient air and oxidative stress-induced DNA damage", *Environmental Health Perspectives*, 115 (8), 1177-1182.
- [40] Møller, P., Folkmann, J.K., Forchhammer, L., Brauner, E.V., Danielsen, P.H., Risom, L., Loft, S. 2008. "Air pollution, oxidative damage to DNA and carcinogenesis", *Cancer Letters*, 266 (1), 84-97.
- [41] Aarnio, P., Yli-Tuomi, T., Kousa, A., Mäkelä, T., Hirsikko, A., Hämeri, K., Raisanen, M., Hillamo, R., Koskentalo, T., Jantunen, M. 2005. "The concentrations and composition of and exposure to fine particles (PM_{2.5}) in the Helsinki Subway System", *Atmospheric Environment*, 39 (28), 5059–5066.
- [42] Asmi, E., Antola, M., Yli-Tuomi, T., Jantunen, M., Aarnio, P., Mäkelä, T., Hillamo, R., Hämeri, K. 2009. "Driver and passenger exposure to aerosol particles in buses and trams in Helsinki, Finland", *Science of The Total Environment*, 407(8), 2860–2867.
- [43] Boarnet, M.G., Houston, D., Edwards, R., Princevac, M., Ferguson, G., Pan, H., Bartolome, C. 2011. "Fine particulate concentrations on sidewalks in five Southern California cities", *Atmospheric Environment*, 45 (24), 4025-4033.
- [44] Briggs, D.J., de Hoogh, K., Morris, C., Gulliver, J. 2008. "Effects of travel mode on exposures to particulate air pollution", *Environment International*, 34 (1), 12-22.
- [45] Buonanno, G., Lall, A.A., Stabile, L. 2009. "Temporal size distribution and concentration of particles near a major highway", *Atmospheric Environment*, 43 (5), 1100-1105.
- [46] Ham, W., Vijayan, A., Schulte, N., Herner, J.D.. 2017. "Commuter exposure to PM_{2.5}, BC and UFP in six common transport microenvironment in Sacramento, California", *Atmospheric Environment*, 167, 335-345.
- [47] Hoek, G., Boogaard, H., Knol, A., de Hartog, J., Slotje, P., Ayres, J.G., Borm, P., Brunekreef, B., Donaldson, K., Forastiere, F., Holgate, S., Kreyling, W.G., Nemery, B., Pekkanen, J., Stone, V., Wichmann, H.E., van der Sluijs, J. 2010. "Concentration response

functions for ultrafine particles and all-cause mortality and hospital admissions: results of a European expert panel elicitation”, *Environmental Science and Technology*, 44 (1), 476-482.

[48] Kaur, S., Nieuwenhuijsen, M.J. 2009. “Determinants of personal exposure to PM_{2.5}, ultrafine particle counts, and CO in a transport microenvironment”, *Environmental and Science Technology*, 43 (13), 4737–4743.

[49] Molnar, P., Janhall, S., Hallquist, M. 2002. “Roadside measurements of fine and ultrafine particles at a major road north of Gothenburg”, *Atmospheric Environment*, 36 (25), 4115–4123.

[50] Moreno, T., Reche, C., Rivas, I., Minguillon, M.C., Martins, V., Vargas, C., Buonanno, G., Parga, J., Pandolfi, M., Brines, M., Ealo, M., Fonseca, A.S., Amato, F., Sosa, G., Capdevila, M., De Miguel, E., Querol, X., Gibbons, W. 2015. “Urban air quality comparison for bus, tram, subway and pedestrian commutes in Barcelona”, *Environmental Research*, 142, 495–510.

[51] Ragettli, M.S., Corradi, E., Braun-Fahrlander, C., Schindler, C., de Nazelle, A., Jerrett, M., Ducret-Stich, R.E., Kunzli, N., Phuleria, H.C. 2013. “Commuter exposure to ultrafine particles in different urban locations, transportation modes and routes”, *Atmospheric Environment*, 77, 376–384.

[52] Rivas, I., Kumar, P., Hagen-Zanker, A., Andrade, F.M., Slovic, D.A., Pritchard, P.J., Geurs T.K. 2017. “Determinants of black carbon, particle mass and number concentrations in London transport microenvironments”, *Atmospheric Environment*, 161, 247-262.

[53] Seaton, A., Cherrie, J., Dennekamp, M., Donaldson, K., Hurley, J.F., Tran, C.L. 2005. “The London underground: dust and hazards to health”, *Occupational and Environmental Medicine*, 62 (6), 355–62.

[54] Suarez, L., Mesias, S., Iglesias, V., Silva, C., Caceres, D.D., Ruiz-Rudolph, P. 2014. “Personal exposure to particulate matter in commuters using different transport modes (bus, bicycle, car and subway) in an assigned route in downtown Santiago, Chile”, *Environmental Science: Process and Impacts*, 16 (6), 1309-1317.

[55] Yang, F., Kaul, D., Wong, K.C., Westerdahl, D., Sun, L., Ho, K.F., Tian, L., Brimblecombe, P., Ning, Z. 2015. “Heterogeneity of passenger exposure to air pollutants in public transport microenvironments”, *Atmospheric Environment*, 109, 42-51.

- [56] Zhu, Y., Hinds, W.C., Kim, S., Sioutas, C. 2002. "Concentration and size distribution of ultrafine particles near a major highway", *Journal of The Air and Waste Management Association*, 52 (9), 1032-1042.
- [57] Westerdahl, D., Fruina, S., Sax, T., Finec, P.M., Sioutasc, C. 2005. "Mobile platform measurements of ultrafine particles and associated pollutant concentrations on freeways and residential streets in Los Angeles", *Atmospheric Environment*, 39 (20), 3597-3610.
- [58] Wang, X., Westerdahl, D., Wu, Y., Pan, X., Zhang, K.M., 2011, On-road emission factor distributions of individual diesel vehicles in and around Beijing, China, *Atmospheric environment*, 45 (2), 503–513.
- [59] URL 2: <https://www.thoughtco.com/busiast-subways-1435753> [Ziyaret tarihi 27.05.2019]
- [60] Onat B., Şahin Ü.A., Uzun B., Akın Ö., Özkaya F., Ayvaz C., 2019, Determinants of exposure to ultrafine particulate matter, black carbon, and PM_{2.5} in common travel modes in Istanbul *Atmospheric Environment*, 206, 258-270.
- [61] Xu B., Hao J., 2017, Air quality inside subway metro indoor environment worldwide: A review, *Environment International* 107, 33-46.
- [62] Li, B., Lei, X.N., Xiu, G.L., Gao, C.Y., Gao, S., Qian, N.S., 2015. Personal exposure to black carbon during commuting in peak and off-peak hours in Shanghai. *Sci. Total Environ.* 524, 237–245.
- [63] Bolourchi A., Atabi F., Moattar F., Ehyaei M.A., 2018, Experimental and numerical analyses of particulate matter concentrations in underground subway station, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 15/12,2569–2580.
- [64] Şahin Ü.A., Onat B., Stakeeva B., Ceran T., Karim P., 2012, PM₁₀ concentrations and the size distribution of Cu and Fe-containing particles in Istanbul's subway system. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 17/1, 48-53.
- [65] Onat, B., Stakeeva, B., 2014. Assessment of fine particulate matters in the subway system of Istanbul. *Indoor Built Environ.* 23, 574–583.
- [66] Onat B., Stakeeva B., 2013, Personal exposure of commuters in public transport to PM_{2.5} and fine particle counts, *Atmospheric Pollution Research* 4 (3), 329-335.

- [67] Onat ., , Şahin Ü.A., Sivri N., 2017, The relationship between particle and culturable airborne bacteria concentrations in public transportation, *Indoor and Built Environment* 26 (10), 1420-1428
- [68] Kwon S.B, 2017, Advances on Understanding Subway Air Quality, Korea Railroad Research Institute, RICTA 2017 Sempozyum Sunumu, 5-6 Haziran 2017, Barcelona.
- [69] Minguillóna M.C., Reche, C., Martins, V., Amatoa, F., Miguel E., Capdevila M., Centelles, S. Querol, X., Moreno , T., Aerosol sources in subway environments. *Environmental Research* 167, 314-328.
- [70] Kwon S.B., Cho Y., Park D., Park E.Y., 2008, Study on the Indoor Air Quality of Seoul Metropolitan Subway during the Rush Hour. *Indoor Built Environ* 17;4:361–369.
- [71] Fonta,O., Moreno, T., Querol, X. Ve diğ., 2019, Origin and speciation of major and trace PM elements in thebarcelona subway system, *Transportation Research Part D* 72, 14-35.
- [72] Moreno T., Miguel E., 2018, Improving air quality in subway systems: An overview, *Environmental Pollution* 239, 829-831.
- [73]URL3:https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69477/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_ng.pdf;jsessionid=57C1BE5DA95D4AEA472FFE5CF1E2769D?sequence=1 [Ziyaret tarihi: 26.07.2019]

EKLER

EK – 1 YOLCU SAYILARI İSTATİSİĞİ

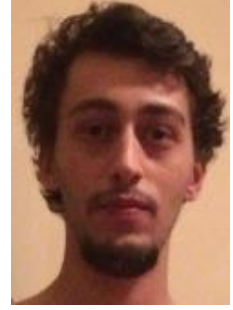
Metroistanbul firmasından elde edilen bilgiler doğrultusunda 2017 ve 2018 yılı yolcu istatistiklerinin olduğu bilgiler aşağıdaki tabloda görülmektedir.

Tablo 13: 2017 ve 2018 Yılı Ortalama Yolcu İstatistikleri

Hatlar	2017 Yılı Ortalaması		2018 (Ekim Ayına kadar) Yılı Ortalaması		Maksimum Yolculuk	
	Yolcu Sayısı	Yüzdelik Dağılımı (%)	Yolcu Sayısı	Yüzdelik Dağılımı (%)	Tarih	Yolcu Sayısı
M1	416226	24.2	421713	23.9	09.04.2018	501695
M2	388601	22.6	399149	22.6	16.03.2018	564509
M3	60193	3.5	62824	3.6	06.01.2017	91977
M4	273116	15.9	273025	15.5	24.11.2017	369017
M5	74346	4.3	68650	3.9	16.12.2017	103105
M6	16141	0.9	15031	0.9	18.09.2017	24431
T1	335249	19.5	360167	20.4	05.10.2018	451267
T3	2662	0.2	2821	0.2	02.04.2018	3868
T4	137669	8.0	142445	8.1	17.09.2018	182492
F1	11756	0.7	13201	0.7	11.03.2016	30709
TELEFERİK	4172	0.2	5134	0.3	21.04.2018	7705
TOPLAM	1720131	100	1764204	100	06.04.2018	2223030

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	MUHAMMET SIRRI ABANOZ
Doğum Yeri	FATİH
Doğum Tarihi	04.12.1990
Uyruğu	☒ T.C. ☐ Diğer:
Telefon	05311022480
E-Posta Adresi	s_abanoz@hotmail.com
Web Adresi	-



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	MARMARA ÜNİVERSİTESİ
Fakülte	MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ
Bölümü	ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ (İNG.)
Mezuniyet Yılı	24.07.2015

Yüksek Lisans	
Üniversite	İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
Enstitü Adı	FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Anabilim Dalı	ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
Programı	ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS BÖLÜMÜ

Makale ve Bildiriler
-