

Metro İstasyon ve Tünellerinde Havalandırma Performansının Enerji Tüketimine Etkilerinin İncelenmesi

Yaren GÜVEN^{1*}  Mustafa AKTAŞ¹ 

¹Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 06/07/2023
Düzeltilme: 21/08/2023
Kabul: 01/09/2023

Anahtar Kelimeler

Havalandırma
İç hava kalitesi
Metro
Hava kirlenmeleri

Article Info

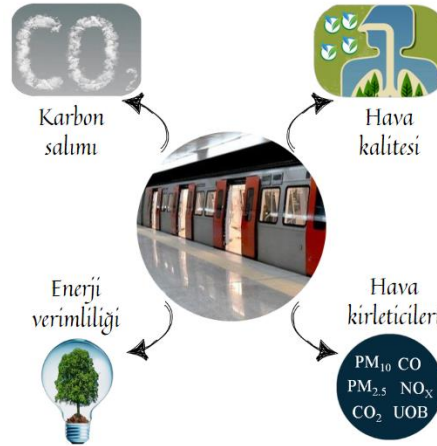
Research article
Received: 06/07/2023
Revision: 21/08/2023
Accepted: 01/09/2023

Keywords

Ventilation
Indoor air quality
Subway
Air pollutants

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada bir metro istasyonunda havalandırma sisteminin nasıl çalıştığı, metro ortamındaki kirlenmeler, havalandırma sisteminin tükettiği enerjiye etki eden faktörler incelenmiştir. Enerjiyi daha verimli kullanarak ortamdaki iç hava kalitesini iyileştirebilecek yöntemler önerilmiştir. / In this study, how the ventilation system works in a subway station, the pollutants in the subway environment, the factors affecting the energy consumed by the ventilation system are examined. Methods that can improve the indoor air quality in the environment by using energy more efficiently were proposed.



Şekil A: Çalışmanın şematik çıktıları / Figure A: Schematic outputs of the study

Önemli Noktalar (Highlights)

- İyileştirilmiş enerji verimliliği ile karbon emisyonları azaltılarak iklim değişikliği hafifletilecektir. / Climate change will be mitigated by reducing greenhouse gas emissions through improved energy efficiency.
- İç hava kalitesindeki iyileşmeye bağlı olarak yolcu ve personel konforu artacaktır. / Passenger and staff comfort will increase due to improvement in indoor air quality.
- Enerjinin verimli kullanılması sağlanarak maliyetler düşürülecektir. / Costs will be reduced by ensuring efficient use of energy.

Amaç (Aim): Havalandırma sisteminin tükettiği enerjinin ve metro ortamındaki kirlenici konsantrasyonlarının azaltılarak iç hava kalitesinin iyileştirilmesi enerji tasarrufu sağlanması amacıyla önerilerde bulunulmuştur. / Recommendations were made to improve indoor air quality and save energy by reducing the energy consumed by the ventilation system and pollutant concentrations in the subway environment.

Özgünlük (Originality): Metro sistemlerinde kullanılacak yeni teknolojiler önerilmiştir. / New technologies that can be used in metro systems have been proposed.

Bulgular (Results): Bir havalandırma sisteminde fanların, elektrik motorlarının, CO₂ miktarının ve havalandırma ekipmanlarındaki kirliliğin enerji tüketimini etkilediği saptanmıştır. / It was found that fans, electric motors, the amount of CO₂ and pollution in the ventilation equipment affect the energy consumption in a ventilation system.

Sonuç (Conclusion): Hareketli CO₂ sensörü ile kontrol, partikül madde sensörü ile kontrol, toz toplayıcı sistemler ile daha etkin filtrasyon, aktif karbon ve zeolit kullanımı gibi enerjiyi daha verimli kullanarak ortamdaki iç hava kalitesini iyileştirebilecek yöntemler önerilmiştir. / Methods that can improve indoor air quality by using energy more efficiently, such as control with a moving CO₂ sensor, control with a particulate matter sensor, more efficient filtration with dust collector systems and the use of activated carbon and zeolite were proposed.



Metro İstasyon ve Tünellerinde Havalandırma Performansının Enerji Tüketimine Etkilerinin İncelenmesi

Yaren GÜVEN^{1*} Mustafa AKTAŞ¹

¹Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 06/07/2023
Düzeltilme: 21/08/2023
Kabul: 01/09/2023

Anahtar Kelimeler

Havalandırma
İç hava kalitesi
Metro
Hava kirleticileri

Öz

Büyük şehirlerde artan trafik yoğunluğu, bir ulaşım aracı olarak metro kullanımını arttırmaktadır. Her gün binlerce kişi ulaşımını metro kullanarak sağlamaktadır. Ancak metro ortamı partikül madde, karbondioksit, uçucu organik bileşikler ve kötü kokular başta olmak üzere birçok kirleticiyi barındırmaktadır. Bu kirleticilere maruz kalmanın uzun vadede birçok sağlık sorununa yol açacağı yapılan çalışmalar sonucunda kanıtlanmıştır. Metro istasyonlarında kirletici seviyelerini azaltarak yolcu ve personel konforunu sağlamak amacıyla havalandırma ve iklimlendirme sistemine gerek duyulur. Havalandırma sistemleri, metro ortamında sağlıklı bir iç hava kalitesi yaratırken büyük ölçüde enerji tüketen sistemlerdir. Fanlar, elektrik motorları, karbondioksit miktarı ve diğer ekipmanlarda oluşan kirlilik faktörü havalandırma sistemlerinin tükettiği enerjiye etki etmektedir. Bir ortamın sağlıklı iç hava kalitesine sahip olması, havalandırma sisteminin yeterli performans gösterdiği anlamına gelmektedir. Verimli havalandırma sistemlerinin tasarlanmasıyla ortamda yeterli iç hava kalitesi sağlanırken havalandırma sisteminin enerji tüketimi de azaltılabilir. Bu çalışmada bir metro istasyonunda havalandırma sisteminin nasıl çalıştığı, metro ortamındaki kirleticiler, havalandırma sisteminin tükettiği enerjiye etki eden faktörler incelenmiştir. Enerjiyi daha verimli kullanarak ortamdaki iç hava kalitesini iyileştirebilecek yöntemler önerilmiştir. Hareketli CO₂ sensörü ile kontrol, partikül madde sensörü ile kontrol, toz toplayıcı sistemler ile daha etkin filtrasyon, aktif karbon ve zeolit kullanımı önerilen yöntemlerden bazıları olabilir.

Investigation of the Effects of Ventilation Performance on Energy Consumption in Subway Stations and Tunnels

Article Info

Research article
Received: 06/07/2023
Revision: 21/08/2023
Accepted: 01/09/2023

Keywords

Ventilation
Indoor air quality
Subway
Air pollutants

Abstract

Increasing traffic density in big cities, increases the using subway as a means of transportation. Every day, thousands of people provide their transportation with using subways. However, the subway environment contains many pollutants especially particulate matter, carbon dioxide, volatile organic compounds and bad smells. It was proven as a result of studies that exposure to these pollutants will cause many health problems in the long run. In order to reduce pollutant levels in subway stations and provide passenger and personnel comfort, ventilation and air conditioning systems are needed. Ventilation systems are systems that consume a great deal of energy while creating a healthy indoor air quality in the subway environment. Fans, electric motors, the amount of carbon dioxide and the pollution factor in other equipment affect the energy consumed by ventilation systems. The fact that an environment has a healthy indoor air quality means that the ventilation system performs adequately. By designing efficient ventilation systems, the energy consumption of the ventilation system can be reduced while providing adequate indoor air quality in the environment. In this study, how the ventilation system works in a subway station, the pollutants in the subway environment, the factors affecting the energy consumed by the ventilation system are examined. Methods that can improve the indoor air quality in the environment by using energy more efficiently were proposed. Control with movable CO₂ sensor, control with particulate matter sensor, more efficient filtration with dust collector systems, use of activated carbon and zeolite can be some of the recommended methods.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Metro istasyon ve tünelleri pek çok zararlı kirleticiye ev sahipliği yapmaktadır. Yolcuların ve personellerin bu kirleticilere maruz kalması çeşitli sağlık sorunlarına yol açmaktadır. Zararlı kirletici konsantrasyonlarını azaltarak sağlıklı bir hava kalitesi sağlamak için havalandırma sistemlerine ihtiyaç duyulur. Ancak havalandırma sistemleri sahip oldukları yüksek fan güçleri ve uzun çalışma süreleri sebebiyle yüksek enerji tüketen sistemlerdir. Uygun havalandırma sistemleri ile sağlıklı bir iç hava kalitesi sağlanırken aynı zamanda enerji tüketimi de azaltılabilir.

Bu çalışmanın amaçları şu şekilde özetlenebilir;

- Metro ortamındaki kirletici konsantrasyonlarını azaltarak iç hava kalitesinde iyileşme sağlamak,
- İç hava kalitesinde sağlanan iyileşmeye bağlı olarak yolcuların ve personellerin kirletici maruziyetini azaltmak ve konfor sağlamak,
- Yüksek enerji tüketen havalandırma sistemlerinin enerji tüketimini azaltmak,
- Yüksek enerji tüketiminden kaynaklanan yüksek maliyetleri ve karbon salımını düşürmek,
- Enerji verimli havalandırma sistemlerinin önemi konusunda farkındalık yaratmak.

Bu çalışmada, metro istasyon ve tünellerinde hava kalitesi ve havalandırma kaynaklı enerji verimliliği konularında bilgiler sunulurken, enerji verimliliği ve iç hava kalitesiyle ilgili kriterlerin minimum enerji tüketimiyle sağlanmasına yönelik çalışmalar yapan araştırmacılara ışık tutacak nitelikte bilgiler sunulması ve yeni yaklaşımlar ortaya konulması hedeflenmiştir.

Üser vd. [1], bir fabrikada kullanılan motorların enerji ve güç kayıplarını inceleyerek standart bir motorun yüksek verimli bir motor ile değiştirilmesi durumunda tasarruf edilebilecek enerji miktarını ve maddi tasarrufu hesaplamışlardır. Ancak bu hesaplar tüm standart motorların yüksek verimli motorlarla hemen değiştirilmesi durumunda geçerlidir ve bu pratikte mümkün değildir. Çünkü ortalama standart elektrik motorlarının ömrü 12 yıldır ve tüm motorları aynı anda değiştirmek mümkün değildir. Bu sebeple ekonomik ömrünü tamamlayan motorların yüksek verimli motorlarla değiştirilmesinin daha mantıklı olduğu kanısına varmışlardır. Fabrika için elde ettikleri sonuçlarda motorların tam yüke yakın değerlerde çalışmadığı

ve motor kayıplarının fazla olması sebebiyle motorların değiştirilmesi gerektiği sonucuna varmışlardır. Kim ve Kim [2], bir metro tüneline havalandırma bacasının konumunun havalandırma performansına etkisini incelemişlerdir. Gerçek bir metro tüneline 1/20 ölçeğinde olan bir model tünel inşa ederek model tünelde 4 farklı havalandırma bacasının konumuna göre havalandırma performansını değerlendirmişlerdir. 1. shaft trenin durduğu noktada trenin hemen arkasındadır. 2. shaft trenin yavaşlamaya başladığı konumdadır. 3. shaft 2. shafttan uzağa, 4. shaft ise 3. shafttan uzağa yerleştirilmiştir. Shaftın amaçlarından biri de tren rüzgarının yolcuların rahatsızlığını azaltmak için istasyona hava akışını azaltmaktır. Bu nedenle shaft istasyona en yakın yere yerleştirilmelidir. İstasyona en uzak olan 4. shaft debi miktarını maksimize ederek tren shafta ulaşana kadar istasyondan geçen miktarı en düşük seviyede tutmuştur. İstasyona en yakın olan 1. shaft, tren shafttan geçerken istasyona doğru tren rüzgarının miktarını en aza indirmiştir. Bu çalışmada en uygun konum 3. shaftın bulunduğu konum olduğunu ve burada verimliliğin 1. shafta göre %7,3 arttığını gözlemlemişlerdir. Moreno vd. [3], istasyon tasarımının ve piston etkisinin platformlarda hava kalitesini ne derece etkilediğini, enerji tüketimini ve yolcu konforu üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Zorunlu mekanik tünel havalandırması ile çalışan on istasyon için alınan ortalama partikül madde konsantrasyonlarını $PM_{10}=50\mu g/m^3$, $PM_3=124\mu g/m^3$, $PM_{10}=59\mu g/m^3$ olarak ölçmüşlerdir. Bu değerler havalandırma kapatıldığında yükselmiştir. Platform boyunca en büyük partikül madde birikimi platformun ucunda meydana gelmiştir. Yolcu erişim tünellerinin dışarıdan temiz hava getirerek platformun partikül madde konsantrasyonunu seyretebileceğini söylemişlerdir. On platformda ölçtükleri ortalama CO_2 seviyesi 371-569 ppm aralığında olup birbirini takip eden trenlerle meydana gelen yolcu birikmesi nedeniyle CO_2 seviyesi yükselmiştir. Tek hatlı tünellere sahip dar platformların zorunlu tünel havalandırmasına bağımlı olduğu ve partikül madde konsantrasyonunu azaltmak için piston etkisinin tek başına yeterli olmadığına ulaşılmıştır. Çift hatlı geniş tünele sahip istasyonlardaki partikül madde seviyelerinin tünel havalandırması kapatıldığında büyük ölçüde etkilenmediğini ve hava kalitesi bozulmadan enerji tasarrufu sağlanmış olduğunu gözlemlemişlerdir.

Chatterjee vd. [4], yer altı madenlerindeki havalandırma fanlarına değişken hızlı sürücülerini uygulayarak minimum enerji maliyeti sağlayan optimum fan hızını belirlemek amacıyla bir optimizasyon modeli oluşturmuşlardır. Enerji verimliliği ve yük yönetimi olmak üzere iki

stratejiyi fan kanunlarına uygun olacak şekilde analiz ederek modellemiştir. Enerji verimliliği yaklaşımında değişken hızlı sürücülerini kullanarak fanı her zaman tam kapasitede değil, talebe bağlı çalıştırıp değişken hava akışına izin vererek elektrik tüketimini azaltmayı amaçlamışlardır. Yük yönetimi yaklaşımında kullanım süresi tarifesine göre madencilik sezonunu minimum maliyete yol açan optimum başlangıç zamanı bulunarak fan hızı ayarlanır. Elde ettikleri sonuçlara göre hızın sabit tutulması günlük 11.499 kWh enerji tüketimine yol açarken, hız değiştirildiğinde enerji tüketimi günlük 4.540 kWh olmuştur. Bu da günlük 6.959 kWh, yıllık 2.540.035 kWh enerji tasarrufu anlamına gelmektedir. Branşman direnci, fan özellikleri, debi gereksinimi gibi faktörlerin bu değerleri etkileyebileceğini belirtmişlerdir. Quan vd. [5], metro istasyonu havalandırma sistemlerinin değişken hızlı çalışmasını sağlayan invertörlü ve yüksek verimli motorların kullanılmasını önermişlerdir. Değişken hızlı çalışma olarak önerdikleri sistemde IE2 sınıfı motor yerine IE4 sınıfı senkron relüktans motoru kullanmışlardır. Maliyetten tasarruf etmek amacıyla önceki sistemin fanlarını ve kanallarını kullanmışlar, sadece motorları değiştirmiş ve yeni invertörler takmışlardır. Ayrıca önerdikleri sisteme hava kalitesinin izlenmesine yönelik sensörler de yerleştirmişlerdir. Mevcut sistemin enerji tüketim miktarı 353.225,80 kWh, yıllık enerji maliyeti ise 25.942,3 ABD dolarıdır. IE4 motor kullandıklarında malzeme, kurulum ve parça değiştirme maliyetleri toplam 27.778,50 ABD doları ek maliyete yol açmıştır. Ancak yıllık enerji tasarrufu miktarı farkı 3.627 ABD doları olmuştur. Bu farkın sistem 20 yıl kullanıldığında 75.272,70 ABD doları, 25 yıl kullanıldığında 94.923,50 ABD doları olacağı sonucuna varmışlardır. Guan vd. [6], yaptıkları çalışmada soğutma sezonunda iki metro istasyonunda normal koşullarda ve tek başına dönüş havası koşullarında havalandırma ve iklimlendirme sisteminin performansının ölçümlerini gerçekleştirmişlerdir. Tünel havalandırma sisteminde istasyonun her iki ucunda çift pistonlu hava bacaları kullanılmaktadır. Soğutma mevsiminde soğutma yükünü azaltmak için mekanik havalandırmayı azaltarak dış hava beslemesini azaltma olasılığı vardır. Bu sebeple mekanik dış hava beslemesinin olmadığı tek başına dönüş havası durumunu bu çalışmada denemişlerdir. Mekanik havalandırmanın olmadığı tek başına dönüş havası koşulu, dış hava sağlamak ve mekanik havalandırmanın enerji tüketiminden tasarruf etmek için hava sızmasından yararlanmaya katkıda bulunmuştur. Tek başına dönüş havası koşulundaki elektrik tüketimi, normal koşuldakine kıyasla benzer iç ortamla A istasyonunda %9,9 ve B

istasyonunda %19,6 oranında tasarruf sağlamıştır. Enerji tasarrufu etkisi, fanların daha düşük enerji tüketimine yol açan toplam dış hava girişinin ve soğutma yükünün azalmasına bağlıdır. Havalandırma ve iklimlendirme sistemlerinin elektrik tüketiminin, soğutma mevsimindeki normal çalışma koşullarına kıyasla %10-%20 oranında azaldığını bulmuşlardır.

Zhang ve Li [7], metro istasyonlarında aşırı taze hava soğutma yükünü azaltmaya yönelik bir çalışma yapmışlardır. Havalandırma sistemi tarafından sağlanan taze hava ile piston etkisiyle oluşan taze havayı ağ simülasyonları ile analiz etmişlerdir. Mevcut çalışma modunda havalandırma sistemi tarafından sürekli temiz hava verilmektedir, bu sebeple platformda ve istasyonda aşırı taze hava oluşmaktadır. Simülasyon sonuçlarına göre tüm çalışma süresi boyunca piston etkisiyle oluşan taze havanın, gerekli olan taze hava talebinden çok daha fazla olduğuna ve mekanik taze hava beslemesine gerek olmadığı kanısına varmışlardır. Ayrıca mevcut havalandırma sistemi ile hassas bir mekanik taze hava beslemesinin sağlanmadığını test etmişler ve sızdırmazlığı iyi olmayan taze hava damperinin sızdırmazlığını iyileştirmişlerdir. Şehirlerdeki metro istasyonlarının havalandırma sistemlerinin iyileştirilmesiyle enerji tasarrufu sağlanabileceğini söylemişlerdir. Liu vd. [8], metro tünellerinin CO₂ konsantrasyonuna ve termal ortamına göre havalandırma sistemi için optimum tren hızını ve enerji tüketimini bulmaya yönelik bir çalışma yapmışlardır. Minimum tren hızını CO₂ konsantrasyonuna göre hesaplamışlardır. Konsantrasyonun 1500 ppm'den az olmasını sağlamak ve piston rüzgarından tamamen yararlanmak amacıyla tren hızının 23,14 m/s'den büyük olması gerektiği sonucuna ulaşmışlardır. Mekanik besleme havasının hacmini en aza indirmek ve tünelin CO₂ konsantrasyonunu ve termal ortamını optimize etmek amacıyla trenin optimum hızını 30 m/s olarak hesaplamışlar ve bu hızın trenin tünele saldırdığı ısının etkisini minimuma indirebileceğini öngörmüşlerdir. Piston rüzgarının etkin kullanımıyla tünel havalandırması için enerji tüketiminin %13-%32'sininin azaltılabileceğini bulmuşlardır. Li vd. [9], piston rüzgarını kullanarak serbest soğutma ve havalandırmadan yararlanmak için ayarlanabilir peron ayırıcı kapı sistemini kullanmışlardır. Peron ayırıcı kapıların üstüne ve altına ayarlanabilir havalandırma monte etmişlerdir. Menfezlerdeki maksimum hava hızını panjur açısının 90°'ye ayarlanması ve hava valflerinin tamamen açılması durumunda 5 m/s olarak bulmuşlardır. Tahmini elektrik tasarrufunu yıllık 275.785,71 kWh olarak hesaplamışlardır. Daha ileri bir çalışmada hava filtresinin piston rüzgarı

verilirken bir hava temizleme cihazı olarak düşünülebileceğini, platformlardaki hava kalitesinin hava filtresi, hava valfi ve panjur açılarının düzenlenmesiyle iyileştirebileceğini söylemişlerdir.

Su ve Li [10], yaptıkları çalışmada metro istasyonlarının enerji tasarruf potansiyellerini analiz etmek için bir enerji modeli oluşturmuşlardır. Model havalandırma sistemi, aydınlatma sistemi, dikey taşıma sistemi ve cihazları kapsamaktadır. Her bir sistemin enerji tüketimini hesapladıktan sonra modeli doğrulamak amacıyla Çin’de peron ayırıcı kapı sistemine sahip 6 farklı istasyonda saha testleri ve simülasyonları yapmışlardır. Modelin doğruluğunu %13’ten az bağıl sapma ile bir istasyonda kanıtlamışlardır. Modele göre 5 farklı tasarruf yöntemi önermişlerdir. Bunlar; iç hava sıcaklığını artırmak, mekanik taze hava beslemesini kaldırmak, peron ayırıcı kapı sisteminin hava geçirmezlik performansını iyileştirmek, havalandırma sisteminin enerji verimliliğini artırmak, aydınlatma gücü yoğunluğunu azaltmaktır. 5 önerinin tümü aynı anda uygulanırsa yıllık enerji tasarruf potansiyelinin incelenen 6 istasyonda %17 ile %32 oranında olabileceğini belirtmişlerdir. He vd. [11], yaptıkları çalışmada geçiş mevsiminde piston etkisiyle oluşan taze havayı etkin kullanarak havalandırma sisteminde enerji tasarrufu sağlamayı amaçlamışlardır. Yaptıkları çevresel kontrol sisteminin 5 modu vardır. Bunlar; mekanik havalandırma modu, pistonlu rüzgar havalandırma modu, mekanik ve piston rüzgar havalandırma modeli, dönüş havası havalandırması klima modeli ve tam taze hava havalandırması klima modudur. Pistonlu rüzgar havalandırma modelinde piston etkisiyle oluşan taze havanın bir kısmı, mekanik ve piston rüzgar havalandırma modelinde ise bu havanın tamamı kullanılmaktadır. Kontrol edilebilir havalandırma peron ayırıcı kapılar piston etkisiyle oluşan havanın verimli kullanılması nedeniyle enerji tasarrufu sağlamıştır. Sistemde iklimlendirme mevsiminde sıcaklığın yüksek olduğu zamanlarda kontrol edilebilir havalandırmalar kapatılmış ve klima sisteminin enerji tüketimi azaltılmıştır. Bu mevsimde sıcaklık düşük olduğunda ise kontrol edilebilir menfezler açılmış ve havalandırma sisteminin enerji tüketimi azaltılmıştır. Geleneksel peron ayırıcı kapı sisteminde Kunming ve Guiyang şehirlerinin enerji tüketimleri sırasıyla 75.888 kWh ve 57.890 kWh’tir. Kunming’de enerji tasarruf oranını %42,71 olarak hesaplamışlardır. Ancak Tianjin, Beijing, Guangzhou ve Nanning’de sırasıyla %9,67, %9,96, %11,07 ve %11,2 olarak hesaplamışlardır. Bu çalışma sonucunda kontrol edilebilir havalandırma peron ayırıcı kapıların

ılıman iklimler için uygun olduğu, diğer iklimlerde enerji tasarrufu potansiyelinin sınırlı olduğu kanısına varmışlardır. Yu vd. [12], yer altı istasyonlarındaki havalandırma sisteminde enerji tasarrufu sağlamak için mevcut stratejileri incelemişlerdir. Peron ayırıcı kapılar peronu tünellerden ayırarak piston etkisini azaltır ve piston etkisinin havalandırma sistemlerinin verimliliği üzerindeki etkisini en aza indirir. Ancak bu sistem tünellerde üretilen ısının piston etkisiyle dışarı atılmasını engelleyeceği için peron altı egzoz fanlarının enerji tüketimini arttıracaktır. Kapı perdeleri eklemek dışarıdan istasyonlara gelen soğuk hava miktarını azaltırken sıcak havanın da istasyon içinde tutulmasını sağlayabilir. Doğrudan genişmeli klima sisteminde soğutucu akışkan soğutulmuş su yerine besleme hava akışındaki ısıyı emerek serpantinlerde buharlaştırılır. Bu sistem soğutulmuş su sistemlerini ve boruları ortadan kaldırarak tasarruf edilmesine yardımcı olur. Makul bir havalandırma bacası tasarımı, minimum enerji girişi ile tünel havalandırmasının iyileştirilmesine katkı sağlayabilir. Peron ayırıcı kapılar, havalandırma şaftları ve kapı perdeleri tren kaynaklı havanın kullanılması amacıyla enerji verimli metro istasyonlarında tercih edilen pasif stratejilerdir. Isıyı geri kazanmak amacıyla kullanılan ısı pompaları, doğrudan genişmeli klimalar ve değişken frekanslı cihazların uygulanması ise aktif stratejilerdir. İlk iki seçeneğin performansı çalışma koşullarından etkilendiğinden değişken frekanslı cihazların uygulanmasının en güvenilir enerji tasarrufu yollarından biri olduğu sonucuna varmışlardır.

Cheng vd. [13], havalandırma sisteminin enerji tüketimini azaltmak amacıyla enerji tasarrufu kısıtlama stratejisine sahip bir hava dengeleme modeli önermişlerdir. Bu yöntemde kontrolör hava dengeleme için gerekli fan voltajını ve damper açısını hava akışı talebini karşılamak için ayarlar. İlk olarak bir makine öğrenme modeli tasarlamışlardır. İkinci olarak kanal sisteminden ölçüm verileri almışlardır. Son olarak, verilen hava debisine göre gerekli fan voltajını ve damper açısının değerini modele göre tahmin etmişlerdir. Yaptıkları deney sonucunu konvansiyonel yöntemle karşılaştırdıklarında maksimum %37,1 enerji tasarrufu potansiyeli elde edildiği sonucuna ulaşmışlardır. Önerdikleri yöntemin enerji verimli olduğu ve değişken yükteki havalandırma sisteminde verimli bir hava dengeleme stratejisi sağlayabileceği sonucuna varmışlardır. He vd. [14], çok faktörlü analize ve piston menfezinin hava özelliklerine dayalı metro havalandırma sisteminde enerji tasarrufu elde etmeyi amaçlamışlardır. İstasyon giriş-çıkışlarından istasyona akan taze hava hacmini etkileyen ana faktörleri incelemek

için dikey deney tasarımı yapmışlardır. Optimal kombinasyonun maksimum enerji tasarrufu 236.729 kWh iken, gerçek metro istasyonununki sadece 75.888 kWh olmuştur. Piston havasının istasyondan mümkün olduğunca uzakta olması gerektiği ve istasyondan çıkan piston havasının havalandırma etkisinin istasyona giren piston havasından daha güçlü olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca istasyon çıkışındaki piston menfezi ile istasyon arasındaki mesafenin yükseltilmesi metronun havalandırılmasında ve enerji tasarrufunda etkili olmuştur. Su ve Li [15], yaptıkları çalışmada Çin'in çeşitli iklim bölgelerindeki peron ayırıcı kapılara sahip metro istasyonları için işletme optimizasyonunun enerji tasarrufu potansiyellerini incelemişlerdir. Mekanik taze hava beslemesinin iptal edilmesi, peron ayırıcı kapının hava sızdırmazlığının artırılması, istasyon hava sıcaklığının artırılması, soğutma grubunun COP'sinin (etkinlik katsayısı) artırılması ve termal ekipmanların enerji verimlilik oranının artırılması inceledikleri yöntemlerdir. Mekanik taze hava hacmindeki artış havalandırma ve iklimlendirme sisteminin enerji tüketimini artırma eğilimindedir. Mekanik taze hava beslemesinin iptal edilmesinin, daha sıcak bölgelerde bulunan metro istasyonları için daha fazla enerji tasarrufu sağlama eğilimindedir. Böylece daha yüksek dış hava sıcaklığı mekanik temiz hava yükünün toplam soğutma yükü içindeki oranının daha yüksek olmasına ve ayrıca daha uzun iklimlendirme süresine yol açar. Bu nedenle, mekanik taze hava beslemesinin iptalinin, daha sıcak iklimlerde daha yüksek enerji tasarrufuyla sonuçlanma eğiliminde olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Peron ayırıcı kapı sistemi, havalandırma ve iklimlendirme sisteminin soğutma yükünü ve enerji tüketimini azaltma avantajına sahiptir. Peron ayırıcı kapının direnç katsayısının artırılmasının düzensiz hava sızma hacminin azalmasına yol açarak havalandırma ve iklimlendirme sisteminin enerji tüketimini azaltabilir. İstasyon sıcaklığı ne kadar düşük olursa düzensiz hava infiltrasyonu ve mekanik taze hava soğutma yükü o kadar yüksek olur. Bu nedenle düşük istasyon sıcaklığı havalandırma ve iklimlendirme sisteminin enerji tüketimini arttırabilir. Soğutma grubunun COP'sinin iyileştirilmesi aynı soğutma kapasitesine sahip soğutma grubunun enerji kullanımını azaltabilir. Terminal ekipmanların enerji verimlilik oranlarının iyileştirilmesi enerji kullanımını azaltabilir. Elde ettikleri sonuçlara göre istasyon hava sıcaklığının artmasının %16,9–%21,0; mekanik taze hava beslemesini iptal ederek soğutma grubunun COP'sini iyileştirmeye ve terminal ekipmanın enerji verimlilik oranının artırılmasıyla %11,6–%20,3 oranında enerji tasarrufu potansiyeli

sağlanmıştır. Peron ayırıcı kapının hava sızdırmazlığının artırılması %5'ten daha az enerji tasarrufu sağladığı için havalandırma ve iklimlendirme sisteminin enerji tasarrufu üzerinde en düşük etkiye sahip olduğunu gözlemlemişlerdir.

Yang vd. [16], piston rüzgarından yararlanarak enerji tüketimini azaltmak amacıyla yan platforma kanatları ayarlanabilir yenilikçi peron kapıları uygulamasını incelemişlerdir. Gerçek bir metro istasyonuna dayalı olarak sayısal model geliştirmişler ve simülasyon sonuçlarını doğrulamışlardır. Platformdaki taze hava hacmini, ayarlanabilir havalandırmanın konumunu, boyutunu ve açısının etkisini incelemişlerdir. Piston rüzgarının yıl boyunca etkin kullanılmasıyla farklı iklim bölgelerinde havalandırma enerji tüketiminin %19,3-%57,25 oranında azaldığı sonucuna ulaşmışlardır. Yenilikçi peron kapıları ile yan ve ada platformlar arasında taze hava hacmi ve termal ortam karşılaştırması yapmışlar ve piston rüzgarının yan platformda daha fazla taze hava sağladığı ve termal ortamı iyileştirdiğini gözlemlemişlerdir. Piston rüzgarından etkin bir şekilde yararlanmak için ayarlanabilir menfezlerin konumları, boyutları ve açılarının platformun termal ortama ve taze hava hacmine olan etkisini kanıtlamışlardır. Kışın yenilikçi peron kapılarının üstüne ayarlanabilir menfezler yerleştirildiğinde tünelden daha fazla ısının platforma gelebildiğine, istasyonun taze hava ihtiyacını karşılamak için menfez ölçüsünün 100 mm'den, açılma açısının ise 75°den büyük olması gerektiği sonucuna ulaşmışlardır. Yenilikçi peron kapıları sisteminin Çin'in farklı bölgelerindeki termal konfor gereksinimlerini karşılayabildiğine ve 5 farklı iklim bölgesinde yıllık 102,8-922,8 kWh enerji tasarrufu sağladığına ulaşmışlardır. Bae vd. [17], bir metro istasyonunun havalandırma sisteminde basit açma/kapama kontrolü ile değişken hız kontrolünün enerji tasarrufu verilerini karşılaştırmışlardır. Değişken hız kontrol yönteminin %71 enerji tasarrufu etkisine sahip olduğu ve fan motorunun değişken hız kontrolü ile değiştirilmesinin %73 enerji tasarrufu sağladığını gözlemlemişlerdir. Uygun bir değişken hız kontrol yönteminin, bir fan motorunun değiştirilmesinden daha yüksek enerji tasarrufu sağladığı sonucuna ulaşmışlardır.

Bu çalışmada metroda havalandırmanın neden gerekli olduğu, metrolardaki havalandırma sisteminin çalışma prensibi ve havalandırma sistemindeki enerji tüketimine etki eden parametreler incelenmiş, havalandırma performansından ödün vermeden daha az enerji tüketmeyi sağlayacak önerilerde bulunulmuştur. Verimlilik ve daha iyi iç hava kalitesi sağlamak

amacıyla sunulan bu önerilerin bu konuda çalışma yapan araştırmacılara yol göstermesi hedeflenmiştir.

2. HAVALANDIRMA (VENTILATION)

Havalandırma, zararlı kirletici konsantrasyonlarının seyreltilip mahalden uzaklaştırılarak mahale taze havanın verilmesi işlemidir. Yeterli hava kalitesi için gereken havalandırma miktarı yolcu yoğunluğu, yolcu faaliyeti ve ortamdaki kirletici emisyonlara bağlıdır. Havalandırma, zararlı kirleticilerin konsantrasyonlarını minimuma indirmek için kritik önem taşır. Bu sebeple yüksek havalandırma oranları genellikle daha iyi sağlıkla ilişkilendirilir [18].

Ortamdaki karbondioksitin dışarı atılarak gerekli oksijen ihtiyacının karşılanması, fazla ısı ve nemin dışarı atılması, gürültü ve rahatsız edici kokulardan kurutulmak gibi birçok nedenden dolayı havalandırmaya ihtiyaç duyulur. Havalandırma yapılırken mahal havasının temizliğini, tezeliğini, sıcaklığını hızını ve nemini kontrol altında tutmak gerekmektedir [19].

2.1. Metro Ortamında İç Hava Kalitesi ve Havalandırmanın Gerekliliği (Indoor Air Quality in Subway Environment and the Necessity of Ventilation)

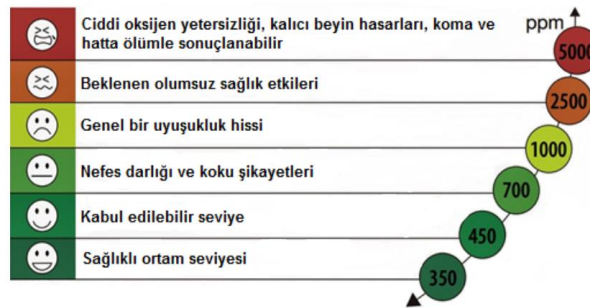
Yeterli iç hava kalitesi, yeterli miktarda temiz havanın iç ortama verilmesidir. İnsanlardan ve diğer kirleticilerden kaynaklanan CO₂ miktarı iç hava kalitesinin bir göstergesi olarak kabul edilmektedir. ASHRAE 55'e göre [20], ortamdaki kirlilik dış havadan 400 ppm kadar fazla olabilmektedir. Sağlığa uygun kabul edilen dış hava kirlilik değerleri ise 600 ppm'e kadardır. Yani bir iç ortamdaki CO₂ ppm değeri en fazla 900-1000 olmalıdır.

İnsanlardan ve iş makinelerinden kaynaklanan ısı ve emisyonlar, sıcaklık, nem, trenlerin hareketiyle rayda oluşan aşınmalar ve hava hızlarında oluşan değişimler, istasyon yapısı ve havalandırma sistemleri metro ortamındaki iç hava kalitesini etkileyen unsurlardır [21,22].

Yolcular zamanlarının kısa bir süresini metroda geçirmelerine rağmen metrodaki partikül madde seviyesi yüksekse, geçirilen kısa süre bile kişinin maruziyetine büyük katkı sağlayabilir [23]. Günümüzde hava kirleticilerine maruz kalmak akut ve kronik olumsuz sağlık etkilerine yol açmaktadır [24]. Ayrıca metro istasyonlarında çalışan personeller, kronik sağlık sorunlarına neden olabilecek sürelerde (günde 8-10 saat) yüksek konsantrasyonlarda hava kirleticilerine maruz kalmaktadır [25].

CO₂, uçucu organik bileşikler, partikül maddeler ve kötü kokular yaygın iç mekan kirleticilerini oluştururlar.

CO₂ konsantrasyonu, metro istasyonları da dahil olmak üzere binalarda havalandırma oranına karar vermek için yaygın olarak kullanılan bir parametredir [26]. Metro istasyonlarındaki CO₂ konsantrasyonunun sınırı ülkelere göre farklılık gösterir. Örneğin Kore'de 1000 ppm ve Çin'de 1500 ppm'dir [6]. ASHRAE'nin 62-1989 no'lu standardına göre 1000 ppm değeri konfor üst sınırındır [27]. CO₂, zehirsiz bir gazdır ancak ortamdaki oksijen seviyesini düşürerek boğulmaya sebep olmaktadır. Bir ortamdaki CO₂ seviyesinin 3.500 ppm'in üzerine çıkması insanlarda solunum yetmezliği ve sinir sisteminde olumsuz etkiler yaratmaktadır [28]. Ortamdaki CO₂ konsantrasyonu ile bu konsantrasyonların insanlar üzerinde yarattığı etkiler arasındaki ilişki Şekil 1'de verilmiştir [29]. Ortamdaki CO₂ konsantrasyonu arttıkça insanlar üzerinde gözlenen olumsuz etkiler de artmaktadır.



Şekil 1. CO₂ konsantrasyon seviyesinin insanlar üzerindeki etkileri [29] (Effects of CO₂ concentration level on humans)

Uçucu organik bileşikler, kaynama noktası 260°C'den düşük olan bazı parafin, benzen, naftalin gibi bileşiklerdir. En yaygın olanı BTEX olarak ifade edilen benzen, toluen, etilbenzen ve ksilendir.

Bu bileşikler arasından iç ortamda en yüksek seviyede bulunana ise toluendir. Solunduklarında ya da deri yoluyla vücuda nüfuz ettiğinde sağlık sorunlarına yol açabilirler. Bu bileşiklere yüksek miktarda maruz kalmak insanlarda baş ağrısı, baş dönmesi ve görme bozukluğuna yol açabilmektedir [30].

Partikül madde havadaki toz, duman, buğu gibi katı ya da sıvı paritküllerden oluşur. Aerodinamik çapları 2,5 µm'den büyük, 10 µm'den küçük olan solunabilir kaba parçacıkları ve çapı 2,5 µm'ye eşit veya daha küçük olan ince parçacıkları içerir [31,32]. Metro sistemleri, toz birikmesine neden olabilecek kapalı bir alanda çalıştığı için metro platformu havasındaki solunabilir PM'nin çoğu yer altında üretilir ve bu nedenle açık havada solunandan farklıdır [33]. Metro istasyonlarındaki PM2.5 ve PM10 konsantrasyonlarının kaynağı piston rüzgarıyla getirilen parçacıklar ile raylar ve tekerlekler arasındaki aşınma ve sürtünmeler sonucu açığa çıkan parçacıklardır [34,35].

Profesyonel sağlık çalışanları boyutu 2 µm'den küçük parçacıkların akciğerlerde tutulduğunu düşünmektedirler [36]. Aerodinamik çapı 8-10 µm'den büyük olan parçacıklar ise üst solunum yolları tarafından ayrılarak tutulur [37]. Bu parçacıkların genotoksik olduğu ve akciğer hücreleri üzerinde oksidatif stres yarattığı görülmüştür [38]. Partikül maddelere uzun süreli maruz kalındığında ise akciğer fonksiyonlarında azalma, solunum semptomları, kronik bronşit gibi sağlık sorunları oluşabileceği epidemiyolojik çalışmalarla kanıtlanmıştır [39].

Partikül madde, karbondioksit ve uçucu organik bileşiklerin yanı sıra biyoaerosol, CO, NO₂, O₃ ve rahatsız edici kokular metro ortamında bulunan diğer kirleticilerdir. Bakteri, mantar ve virüs gibi biyolojik partiküllerden oluşan ve alerjik rahatsızlıklara sebep olan biyoaerosoller kalabalık bir ortama ve sınırlı havalandırmaya sahip olan metrolarda rahatça yayılabilmektedirler. CO zehirlenmelerinde insanlarda baş ağrısı, mide bulantısı ve nefes sıkışması gözlenmektedir [40]. NO₂'ye 24 saatten kısa bir süre maruz kalmak sağlıklı bireylerde astım nöbetlerinin sayısında artış ve hava yolu iltihabı gibi solunum etkilerine yol açabilir [32].

Hava kirleticileri oksidatif stresin yanı sıra akut ve kronik olmak üzere pek çok solunum yolu hastalığına yol açmaktadır. Akut hastalıklar tahriş, iltihap, alerjik reaksiyon ve solunum yetmezliğinden oluşur. Kronik hastalıklar ise

KOAH, kardiyovasküler hastalıklar, astım ve kanserden oluşur.

Metrolarda iç hava kalitesi yönetimindeki temel yaklaşım insanların konforunun iyileştirilmesi, yolcu maruziyetini minimuma indirmek ve enerji ihtiyacını minimum düzeyde tutmaktır [21]. Metrodaki havalandırma sistemi, metroya temiz hava sağlanması ve havadaki kirletici maddelerin metrodan dışarı atılması için önemli bir yere sahiptir. Tünel havası ile istasyon arasındaki hava değişim miktarı sıcaklık, nem ve iç hava kalitesi dahil olmak üzere metro ortamını önemli ölçüde etkiler. Metro ortamında sağlıklı bir hava kalitesi sağlamak için uygun havalandırma sisteminin tasarlanması gerekir. Verimli havalandırma sistemleri ile dışarıdan gelen kirletici konsantrasyonu azaltılarak iç hava kalitesi istenen seviyede tutulabilir.

2.2. Metro Havalandırması (Subway Ventilation)

Metro sistemlerinde havalandırma ihtiyacı işletme çeşidine göre belirlenir. İşletme koşulları normal işletme, sıkışık işletme ve acil durum işletmesi olmak üzere üçe ayrılmaktadır.

Normal işletme koşulunda yolculu alanların konfor düzeyini sağlamak için sıcak hava tünellerden alınıp taze hava içeri çekilir. Taze havanın girmesi ve tren ısısının atılması için istasyonun her iki ucunda havalandırma şaftları bulunur. Sıcak havada istasyon ve tünellerde hava değişimlerini takviye etmek amacıyla taze hava içeri çekilir ve sıcak havanın boşaltılması için tünel havalandırma fanları çalıştırılır.

Sıkışık işletme koşulunda piston etkisi sonucu oluşan hava akımını sağlamak için tünel havalandırma fanları çalıştırılır. Tünelin bir ucundaki fanlar boşaltma durumundayken diğer ucundaki fanlar besleme durumunda çalıştırılarak hava akımı sağlanır. Uzun süre tren geçmediği tespit edildiğinde bu işletme şekli otomatik başlatılır.

Acil durum koşulunda tünel havalandırma fanları itme ve çekme hareketiyle çalıştırılır. Yangına karşı gerekli taze hava için fanlar aynı anda besleme veya boşaltma durumunda çalıştırılabilir. Dumanın toplanmasını önlemek ve sıcak dumanı istenen yönde akmaya zorlamak için gerekli minimum hava hızına kritik hız denir ve tünel havalandırma fanlarının giriş-çıkış değerleri kritik hızı sağlamalıdır.

Havalandırma ihtiyacı ise doğal havalandırma ve mekanik havalandırma olmak üzere iki farklı şekilde sağlanmaktadır. Doğal havalandırma,

trenlerin tünel içerisindeki hareketinden kaynaklı olarak oluşur. Ancak doğal havalandırma tek başına yeterli olmadığı için mekanik havalandırmaya ihtiyaç duyulur.

Mekanik havalandırma sistemleri ise iç havalandırma fanı, egzoz havalandırma fanı ve tünel havalandırma fanı sistemlerinden oluşur. İç havalandırma sistemi temiz havanın içeri alınmasında, egzoz havalandırma sistemi kirli havanın dışarıya atılmasında ve tünel havalandırma sistemi ise tünellerin havalandırılmasında kullanılır. Mekanik havalandırma sistemi acil durum işletmesi şartları baz alınarak tasarlanır [41].

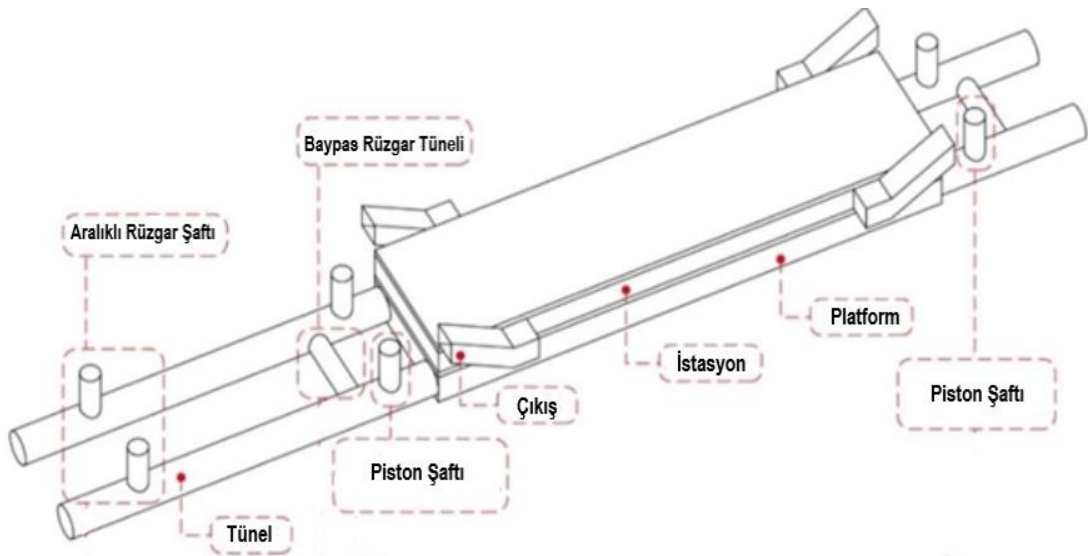
İç havalandırma sistemleri aracılığıyla temiz hava shaftlardan çekilerek yolculu alanlara verilir. Kirli hava ise egzoz havalandırma sistemleri aracılığıyla ortamdan çekilerek shaftlardan dışarı atılır. Tünel havalandırma sistemleri, hem temiz havayı çekmeyi hem de kirli havayı dışarı atmayı sağlayan aksiyel fanlardan oluşur [21].

Acil durumlarda da iç havalandırma sistemlerinden yararlanılmaktadır. Ayrıca egzoz havalandırma sistemi acil durumlarda dumani istasyondan dışarı atması amacıyla da kullanılmaktadır. Tünel havalandırma sistemleri ise tünellerin havalandırılması, sıkışık durumlarda ve acil durumlarda hava ihtiyacını karşılaması amacıyla kullanılmaktadır. Tünel havalandırma sistemleri hem temiz havayı çekmeyi hem de kirli havayı dışarı atmayı sağlayan aksiyel fanlardan oluşmaktadır. Bu sistemler yolcuların seyahati boyunca, personellerin de iş ortamında konforun ve güvenliğin sağlanması amacıyla kullanılmaktadır [21].

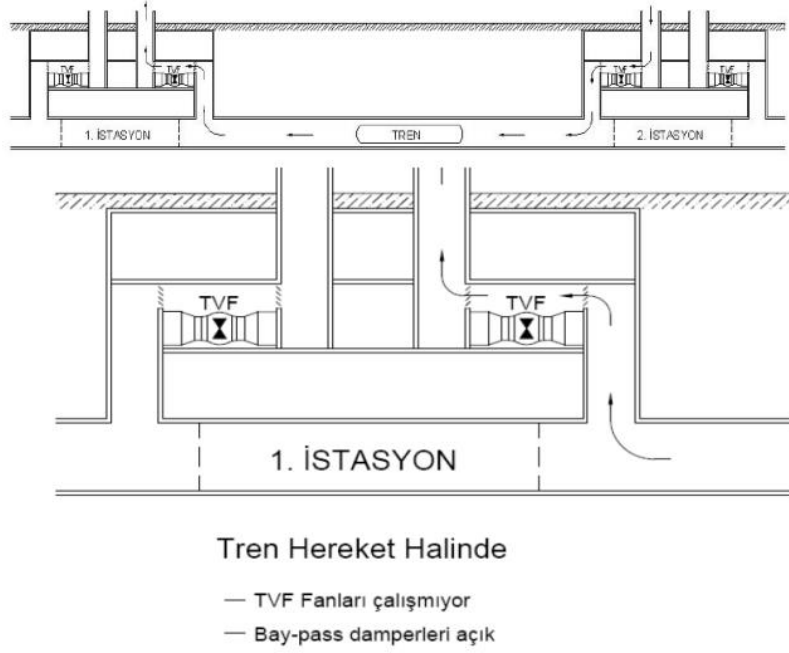
Mekanik havalandırmada fanlar değişken devirli çalıştırılarak her işletme koşulu için gerekli hava debisi sağlanır. Sıkışık işletme koşulunda fan devri düşürülerek menfez ve kanallar ile peron havalandırılıp soğutulurken, acil durumlarda ise fan devri artırılmaktadır [42]. Acil durum anında kullanılan fanlar ve hava akımına maruz kalan tüm ekipmanlar havalandırma sisteminin çalışmaya devam edebilmesi için en az bir saat boyunca 250°C sıcaklığa dayanabilecek şekilde tasarlanmalıdır [43].

Olası bir yangın durumunda tünelde olması gereken minimum hava hızı insanların hava akımını hissedebileceği en düşük hız olan 2,5 m/s, maksimum hava hızı ise insanların yürüyebilecekleri en yüksek hava akımı değeri olan 11 m/s'dir. Yangın haricinde ise tünelde olması gereken minimum hava hızı 7,5 m/s'dir [43]. Herhangi bir metro istasyonunun mekansal prototipi Şekil 2'de [44], normal işletme koşullarında havalandırmanın çalışma prensibi ise Şekil 3'te [45] gösterilmiştir.

Trenler istasyona vardıklarında aralıklı rüzgar shaftları tünellere havalandırma sağlarlar. Trenin hızlı hareketinden kaynaklanan piston rüzgarları metro istasyonunun termal ortamını güçlü bir şekilde etkiler. Piston shaftı ve baypas rüzgar tüneli piston rüzgarlarını diğer tünele boşaltır. Piston rüzgarlarını önlemek amacıyla tam yükseklikteki peron ayırıcı kapı sistemine sahip istasyonlarda bu shaftlar basıncı azaltmak amacıyla piston rüzgarlarını önceden boşaltır [44].



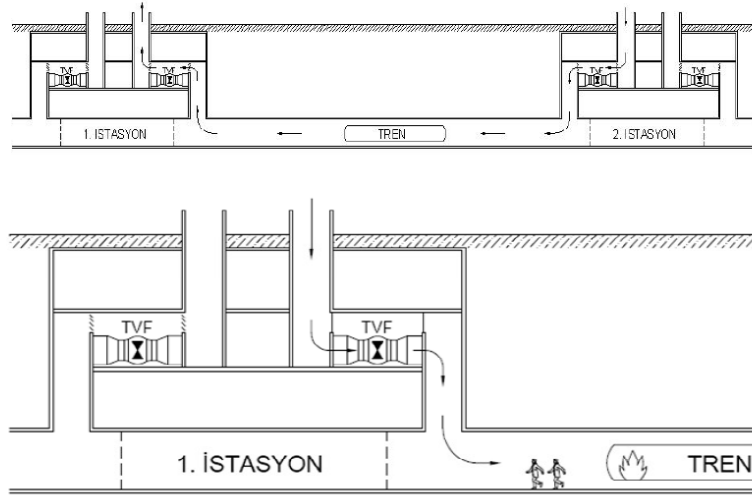
Şekil 2. Metro havalandırmasının mekansal prototipi [44] (Spatial prototype of subway ventilation)



Şekil 3. Normal işletme koşulunda havalandırma sisteminin çalışma prensibi [45] (Principle of operation of the ventilation system under normal operating conditions)

Acil durumlarda istasyon ve tünellerde bulunan tünel havalandırma ve egzoz fanları devreye girerek dumanın tahliye edilmesini ve tünelin soğutulmasını sağlar. Şekil 4'teki örnekte tren 1. istasyonun yakınında bulunmaktadır. Burada yangın çıktığında 1. istasyondaki tünel

havalandırma fanları devreye girerek tünelde taze hava verecek ve bu taze hava tünelde yayılan dumanı 2. istasyona süpürecek. Daha sonra 2. istasyondaki tünel havalandırma fanları devreye girerek tüneldeki dumanı tahliye edecektir [46].



Şekil 4. Tren 1. istasyona yakınken yangın çıkması durumu [45] (Fire outbreak when the train is close to station 1)

3. HAVALANDIRMA SİSTEMİNİN ENERJİ TÜKETİMİ (ENERGY CONSUMPTION OF THE VENTILATION SYSTEM)

Metroda konforlu bir iç ortam sağlamak için havalandırma sistemlerine ihtiyaç duyulur. Havalandırma sistemi metrodaki enerji tüketiminin %54-71'ini oluşturmaktadır [10]. Havalandırma

sistemlerinin performansının iyileştirilmesi, bir metro istasyonunda büyük ölçüde enerji tasarrufu sağlanabileceği anlamına gelmektedir.

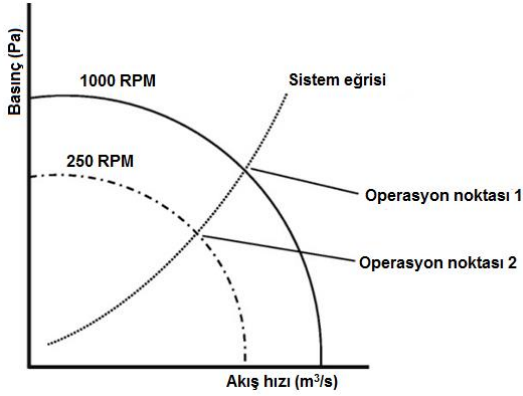
3.1. Fanların Enerji Tüketimine Etkisi (Effect of Fans on Energy Consumption)

Fanlar, metro ortamına temiz hava vererek ortam sıcaklığını azaltmanın yanı sıra duman tahliyesini

de sağlarlar. Acil durum anında sensörler tarafından uyarılan fanlar hızlanarak kirli havayı tünelin sonuna yönlendiriler. Bu sayede istasyon ve tünellerin soğutulmasını, dumanın tahliye edilmesini ve yolculara dumansız bir atmosfer sağlarlar. Fanlar, istasyon ve tünelde olması gereken hava hızlarını sağlayacak kapasitede seçilmelidir [47,48].

Havalandırma sağlayan fanların anma değerleri, kullanımına bağlı olarak 100 kW [49] ile yaklaşık 3.000 kW [50] arasında değişebilmektedir. Bu nedenle, havalandırma fanları toplam güç tüketimine oldukça önemli bir katkı sağlamaktadır.

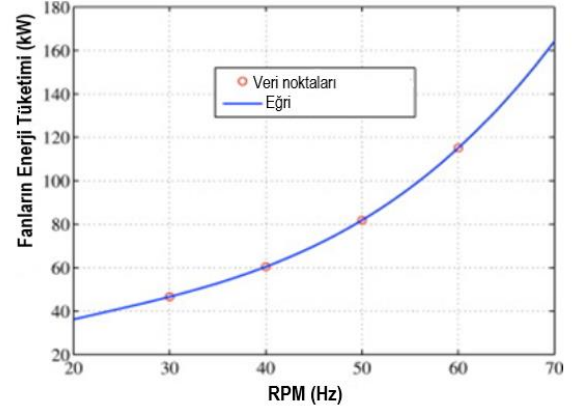
Belirli bir fan, fan eğrisiyle, yani fanın belirli bir akış hızını sağlamak için ne kadar basınç gerektiği ile karakterize edilebilir. Fan eğrilerinin basit bir örneği Şekil 5'te gösterilmektedir. Belirli bir hızda çalışan bir fan, buna karşılık gelen fan eğrisine sahiptir. Bu nedenle hızın değiştirilmesi yeni bir eğri ile sonuçlanacaktır. Hız düştükçe aynı debiyi elde etmek için daha düşük basma yüksekliği/basınç gerekmektedir. Bu, fanı beslemek için daha az güç ihtiyacı duyulduğu anlamına gelir. Böylece daha düşük çalışma hızlarında daha az güç tüketilir [51].



Şekil 5. Fan eğrileri [51] (Fan curves)

Havalandırma fanlarının enerji tüketimi, fan hızından hesaplanabilir. Fan hızı (RPM) ve enerji tüketimi arasındaki ilişki Şekil 6'da gösterilmekte olup denklem (1) ile ifade edilebilir [52]:

$$\text{Enerji Tüketimi} = 0,0007(\text{RPM})^3 - 0,046(\text{RPM})^2 + 2,01(\text{RPM}) + 8,8 \quad (1)$$



Şekil 6. Fan hızı (RPM) ile enerji tüketimi arasındaki ilişki [52] (The relationship between fan speed (RPM) and energy consumption)

Bu şekle göre fan hızındaki artış enerji tüketiminin de artmasına yol açmaktadır. Bir fanın toplam gücü bulunurken ihtiyaç duyulan toplam hava debisi, sistemin toplam basınç kaybı ve fanın verimi dikkate alınmakta olup;

$$P = \frac{\dot{V} \times \Delta P}{\eta} \quad (2)$$

bağıntısı ile hesaplanabilir [53].

Sürtünme kayıpları, mekanik kayıplar, sonlu kanat sayısından dolayı basıncın düşmesi, hacimsel kayıplar ve basınç kayıpları fanlarda enerji verimliliğine etki eden unsurlardır. Optimum kanat tasarımı yapmak ve fan seçimi yaparken fanın bağlı olarak çalışacağı kanal sistemi karakteristiğinin dikkate alınması fan verimliliğinin artırılmasını sağlar. Çoğu zaman fanlarda enerji tasarrufu potansiyeli %30'dan fazladır [53,54].

Fanlarda kapasite kontrolü yapabilmek ve enerji verimliliği sağlamak amacıyla kullanılan bazı yöntemler vardır. Bunlar; fanın konumunun değiştirilmesi, giriş ve çıkış damperlerinin kontrolünün sağlanması, kanal tasarımının iyileştirilmesi, fanın karakteristik eğrisinin değiştirilmesi, fanın dönme hızının ayarlanması, fanın kanat açısının ayarlanması ve fanların seri ya da paralel bağlanması olarak sıralanabilir [54].

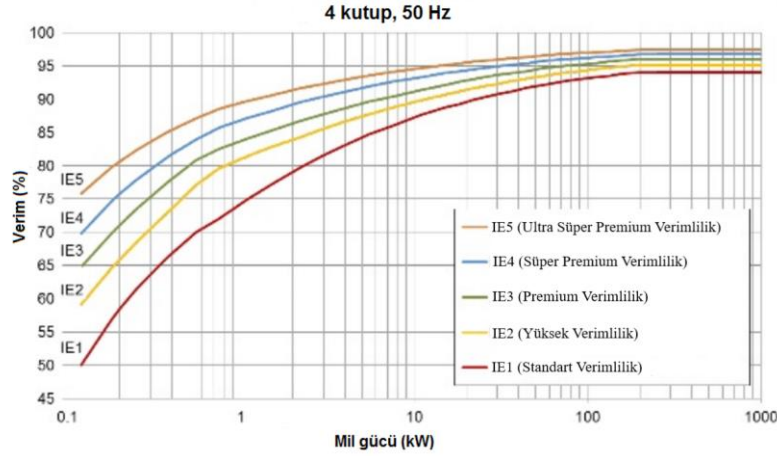
3.2. Elektrik Motorlarının Enerji Tüketimine Etkisi (Effect of Electric Motors on Energy Consumption)

Endüstriyel motorlardaki enerji tüketiminin %22'si fanlar aracılığıyla gerçekleşmekte olup metro istasyonlarındaki havalandırma sistemlerinde genellikle IE2 sınıf motorlar kullanılmaktadır [5,55].

Motor verimlilikleri IEC tarafından IE1 Sınıfı (Standart Motorlar), IE2 Sınıfı (Yüksek Verimli Motorlar), IE3 Sınıfı (Premium Verimli Motorlar) ve IE4 Sınıfı (Süper Premium Verimli Motorlar) olmak üzere dört sınıfa ayrılmıştır [56].

IE5 Ultra Süper Premium verimlilik sınıfına ait motorlarla ilgili çalışmalar devam etmektedir.

4 kutuplu ve 50 Hz bir elektrik motorunun çıkış gücü ile verimliliği arasındaki ilişki Şekil 7'de verilmiştir [57].



Şekil 7. IEC elektrik motoru çıkış gücü ile verimlilik arasındaki ilişki [57] (Relationship between IEC electric motor output power and efficiency)

Havalandırma sistemlerinde kullanılan fan motorlarını daha yüksek verimliliğe sahip motorlarla değiştirerek enerji tasarrufu sağlamak mümkündür. Aktaş vd. [58], bir firmanın fan sistemindeki elektrik motorlarının önemli ölçüde elektrik tükettiğini saptamışlardır. Mevcut sistemdeki %91,3 verimliliğe sahip 3 adet IE2 sınıfı motorun %94 verimliliğe sahip IE4 sınıfı motorla değiştirdiklerinde 3 adet fandan yıllık 12.904,18 kWh tasarruf edileceğini ve fan verimliliğinde %3 oranında artış olacağını hesaplamışlardır. Ayrıca IE4 sınıfı motorun kullanılması ile elektrik enerjisi maliyetinin de %3,49 oranında azalacağını belirleyerek fan sistemindeki elektrik motorlarında yapılacak iyileştirmeler ile enerjinin daha etkin kullanılacağı ve üretim maliyetlerinin azaltılacağı sonucuna varmışlardır.

3.3. CO₂ Miktarının Enerji Tüketimine Etkisi (Effect of CO₂ Amount on Energy Consumption)

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından birim net elektrik üretimi ve birim elektrik tüketimi başına salınan sera gazı emisyonlarının miktarlarını temsil eden Türkiye Elektrik Üretimi ve Elektrik Tüketim Noktası Emisyon Faktörleri hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda, Türkiye'de 1 MWh (birim) net elektrik üretimi başına ortalama 0,440 ton CO₂-eşdeğer sera gazı emisyonu salındığı bulunmuştur. Elektrik tüketim noktası emisyon faktörleri bağlantı noktasına göre değişiklik göstermekle birlikte iletim hattından

bağlı tüketim noktası için birim elektrik tüketimi başına 0,447 ton CO₂-eşdeğer, dağıtım hattından bağlı tüketim noktası için birim elektrik tüketimi başına 0,484 ton CO₂-eşdeğer sera gazı emisyonu salınmaktadır. Bu faktörler, karbon ayak izi hesaplamaları ve sera gazı azaltım miktarlarının hesaplanması gibi çeşitli alanlarda kullanılabilir [59].

Aktaş vd. [58], yaptıkları çalışmada fan sistemindeki elektrik motorlarını değiştirerek fan performans artışının yıllık 5.677,83 kg eş değer karbon salımına engel olacağını hesaplamışlardır.

3.4. Havalandırma Ekipmanlarında Oluşan Kirliliğin Enerji Tüketimine Etkisi (Effect of Pollution in Ventilation Equipment on Energy Consumption)

Havalandırma sistemlerinde kullanılan ekipmanlar, oluşturulacak hava kalitesinin belirlenmesinde rol oynamaktadırlar. Hava kalitesinin belirleyici faktörlerinden olan filtreler tanecik ve tozları tutmak, havadaki virüs ve bakterileri azaltmak amacıyla kullanılmaktadır. Yetersiz ve kötü filtreleme kötü iç hava kalitesi, mikroorganizmaların üreyerek enfeksiyon riskinin artmasına, yüksek enerji maliyetlerine, havalandırma sistemindeki cihazların bozulması işlevlerini yerine getirememeleri gibi pek çok olumsuz sonuca yol açmaktadır [55].

Bir hava filtresi, temiz olduğu zaman en düşük verime sahiptir. Filtre toz tutarak tıkanıkça

filtrenin verimi ve basınç düşümü değeri yükselmektedir. Basınç düşümü değeri yükseldikçe tıkanan filtreler hava akışını, soğutmayı ve nem gidermeyi engellediğinden havanın geçmesi için daha çok enerji gerekir. Bu da işletme masrafının artmasına neden olur. Hava filtreleri hijyenik sebepler ve artan enerji maliyetleri nedeniyle yıkanmamalıdır. Yıkandıktan sonra lif dağılımı bozulan filtreler zaman içinde temiz bir filtreye göre daha fazla direnç oluşturarak toz tutamayacak ve arka kademelerdeki yüksek verimli filtrelerin erken dolmasına yol açacaktır. Yüksek direnç yüksek enerji sarfiyatı anlamına gelmektedir. Filtrelerin debileri katalog değerlerinin biraz altında seçildiği takdirde kullanım ömürleri ve verimleri artacak, enerji maliyetleri de düşecektir [55,60].

Filtrenin enerji tüketimi Eurovent 4/11 kılavuzuna göre aşağıdaki denklemle hesaplanır [61]:

$$W = \frac{\dot{V} \times \Delta P \times \Delta t}{\eta \times 1000} \quad (3)$$

Bu denklem, filtrelerin yıllık enerji tüketimlerinin yanı sıra, ΔP değerinin anlık kullanılmasıyla filtrelerin tükettikleri enerji miktarlarının hesaplanmasını da sağlar.

Metalik yüzeye yapışan kir ve toz topaklarında üreyen küf ve mantarlar daha fazla nemin tutulmasına yol açarak korozyona sebebiyet vermektedir. Bu korozyon havalandırma sisteminin hem enerji tüketimini arttırmakta hem de performansını düşürerek kötü hava kalitesine neden olmaktadır. Kanal montajı sırasında yapılmış hatalar, inşaat esnasında ya da sonradan oluşarak kanallarda sürüklenen bu kir ve tozlar hem filtrelerin kirlenmesine hem de sürtünme kaybı yaratarak toplam hava debisinde azalmaya yol açarlar. Bu da kaybın karşılanması için bir miktar daha elektrik enerjisi gerekli olması anlamına gelmektedir. Yapılan ölçümler, 1 mm'lik kir tabakasının ısı transferini yaklaşık %10 oranında azalttığını göstermiştir. Yani aynı ısı verimi elde etmek için gerekli enerji sarfiyatının %10 artması gerekmektedir. Düzenli olarak temizliği yapılan hava kanalları ile havalandırma sisteminin verimliliğini arttırmanın yanı sıra sağlıklı bir iç hava kalitesi sağlamak da mümkündür [62,63].

Havalandırma kanallarının doğru tasarımı ve düzenli bakımı, sağlıklı bir iç hava kalitesinin oluşturulması ve havalandırma sisteminin enerji tüketiminin azaltılması açısından önem taşımaktadır.

Serpantinlerin performansı, ısı transfer yüzeylerinde biriken tortular sebebiyle zamanla

kötüleşir. Tortu tabakası, ısı transfer direncine ek direnç göstererek ısı transfer hızının azalmasına neden olur. Bu birikmelerin ısı transferi üzerindeki net etkisi R_f kirlenme faktörü ile gösterilmekte olup bu değer kirlenmenin ortaya çıkardığı ısı direncin bir ölçüsüdür. Bu faktörün de bir direnç olarak diğer dirençlere ilave edilmesiyle ısı transferi hesaplanmaktadır. Bu durumda ısı aktarımı;

$$R_{toplam} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{R_{f,i}}{A_i} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi k L} + \frac{R_{f,o}}{A_o} + \frac{1}{h_o A_o} \quad (4)$$

bağıntısı ile ifade edilebilir [64].

Kirlenme faktörü yeni bir serpantinde sıfırdır ve yüzeyde oluşan katı birikintilerden dolayı zamanla artar. Kirlenme faktörü hizmet süresine, akışkanın sıcaklığına ve hızına bağlıdır. Sıcaklığın artması ve hızın azalmasıyla kirlilik artar [64].

3.5. Talep Kontrollü Havalandırma (Demand Controlled Ventilation)

Talep kontrollü havalandırma, iç hava kalitesine bağlı olarak kontrollü hava akış hızına sahip bir havalandırma sistemidir. Bu sistemler, fanın çalışma süresince azaltılmış hava akış hızında çalıştığı için sabit hava hacimli havalandırma sisteminde göre daha az enerjiye ihtiyaç duyar [65].

Havalandırma talebini değerlendirmenin birkaç yolu vardır:

-İzlenen her bölgede insan varlığını ve sayısını algılayan doluluk sensörleri

-Karbondioksit konsantrasyonunu izleyen CO₂ sensörleri

-Bir bina otomasyon sisteminin günün saatine göre mevcut nüfusu tahmin etmesine izin veren programlar

Hangi yöntem kullanılırsa kullanılsın talep kontrollü havalandırma yöntemleri mevcut popülasyona göre dış hava girişini değiştirmeye çalışır [66].

CO₂ bazlı talep kontrollü havalandırma kişi başına havalandırma oranı için bir gösterge olarak CO₂ konsantrasyonlarını kullanılmasını ifade eder. Bu bağlamda CO₂ bir iç mekan hava kirleticisi değil, solunumun yan ürünü olarak kabul edilir. Kararlı durum koşullarında iç mekan ve dış mekan karbondioksit konsantrasyonları arasındaki farkı tahmin etmek için aşağıdaki denklem kullanılır [66]:

$$V_o = \frac{N}{C_s - C_o}$$

(5) yakınında bir kirletici tespit edilmesi durumunda kirleticilerin girmesini önlemek amacıyla bir izolasyon cihazı kurulması [70] ve PM2.5 konsantrasyonlarının aynı filtrenin 90 günden fazla kullanılmasından etkilenmediğinden dolayı bu durumun maliyet tasarrufu sağlayabileceği [71] araştırmacılar tarafından sunulan önerilerden bazılarıdır. Bunlara ek olarak, bu konuda çalışma yapan araştırmacılar Tablo 1'deki yeni yaklaşım ve önerilerden yararlanabilirler;

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (CONCLUSIONS AND DISCUSSION)

Havalandırma sistemlerinin enerji ihtiyacı ile metro istasyonlarındaki iç hava kalitesinin beraber değerlendirilmesi gerekir. Bugüne kadar yapılan çalışmalara bakıldığında bitki biyofiltresinin havadaki demir oksiti azalttığı [68], manyetik hibrit filtre kullanımının PM10 konsantrasyonlarında azalmaya neden olduğu [69] kanıtlanmıştır. Bunların yanı sıra hava giriş menfezlerinin

Tablo 1. Çalışmada bahsedilen problemler ve bu problemlere sunulan çözüm önerileri (The problems mentioned in the study and the proposed solutions to these problems)

Problem	Problemin Detayı	Çözüm Önerisi
Yüksek enerji tüketimi	Havalandırma sistemlerinin yüksek enerji tüketmesi hem karbon salımının hem de maliyetin artmasına yol açmaktadır.	<ul style="list-style-type: none"> Yolcu akışı temiz hava beslemesiyle ilişkili olup havalandırma sisteminin tükettiği enerjiyi etkilemektedir. Kişi sayısı değişken olduğundan CO₂ miktarına göre fan devirleri, dolayısıyla hava debileri kontrol edilerek havalandırma sisteminden optimum verim elde edilirken maliyet tasarrufu da sağlanacaktır. Yüksek fan performansına sahip, atık ısı geri kazanımlı ve yüksek hava filtrasyon teknolojilerine sahip sistemler ile hem enerji verimliliği sağlanırken hem de konfor artırılabilir. Hareket mekanizmalı bir CO₂ sensörünün istasyon içerisinde dolaşarak istasyonun birçok gerekli noktasından ölçüm yapması ile daha detaylı sonuçlar elde edilebilir ve elde edilen havalandırma talebine göre hava debisi ayarlanabilir. Daha önce metro ve tramvay duraklarında elektrik enerjisinin güneş enerjisinden sağlandığı çalışmalar yapılmıştır [72,73]. Metro istasyonlarına kurulabilecek güneş enerji santralleri ile istasyonların elektriği güneşten karşılanarak karbon salımı azaltılmış olacaktır. Metroda güneş enerjisinin termal uygulamalarından da faydalanılabilir. Güneş enerjisinden sıcak hava üretilerek metronun kış mevsimindeki ısıtma yükü karşılanabilir.

Tablo 1'in devamı

Hava kalitesi	Metro ortamında bulunan kirleticilere maruz kalmak uzun vadede çeşitli sağlık sorunlarına yol açmaktadır.	<ul style="list-style-type: none"> Sıcaklık, CO₂ vb. değişkenlerin çok noktadan ölçümü ile yük kontrolü hassas bir şekilde yapılarak iç hava kalitesi iyileştirilebilir. Aktif karbon ve zeolitlerle havadaki uçucu organik bileşikler adsorbsiyon yoluyla emilerek iç hava kalitesi iyileştirilebilir. Havalandırma filtrelerinden önce ve sonra partikül madde sensörleri yerleştirilerek havadaki partikül madde seviyesi ölçülerek filtrenin verimli olup olmadığı gözlemlenebilir. Literatürdeki bir çalışmada [74] hava temizleyicilerinin giderim etkinlikleri test edilmiştir. Test sonucuna göre, serbest radikal üreten hava temizleyicisi partikül madde gideriminde en iyi performans gösteren cihaz olmuştur. Bu cihazın metro istasyonlarında kullanılması partikül madde seviyelerinin azalmasını sağlayacaktır. Toz toplayıcı cihazların metro istasyonlarına yerleştirilmesiyle iç hava kalitesinde iyileşme gözlemlenecektir.
---------------	---	---

Bu çalışmada metro ortamının havasındaki kirleticiler ve bu kirleticilerden kaynaklanan sağlık sorunlarının öneminden bahsedilmiş, havalandırma sisteminin çalışma prensibi ile bu sistemin enerji tüketimini etkileyen faktörler incelenmiştir. Havalandırma sistemleri metrodaki enerji tüketiminin büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Yeraltında olmasının da getirdiği dezavantajdan dolayı metro havasında yüksek konsantrasyonlarda kirleticiler bulunmaktadır. Bu sebeple bu çalışmada yüksek enerji tüketimi ve yetersiz hava kalitesi problemlerine çözüm önerileri sunulmuştur. Bu öneriler sayesinde enerji tüketimi ve maliyet azaltılırken aynı zamanda iç hava kalitesi iyileştirilerek karbon salımı da azaltılmış olacaktır.

SEMBOLLER VE KISALTMALAR (SYMBOLS AND ABBREVIATIONS)

ΔP Toplam basınç kaybı, Pa

Δt Yıllık işletim süresi, saat

A_i Serpantin iç yüzeyindeki ısı transfer alanı, m²

A_o Serpantin dış yüzeyindeki ısı transfer alanı, m²

C_o Dış havadaki karbondioksit konsantrasyonu, ppm

C_s Boşluktaki karbondioksit konsantrasyonu, ppm

CO₂

Karbondioksit

CO

Karbonmonoksit

COP

Etkinlik katsayısı

D_i

Serpantin iç çapı, m

D_o

Serpantin dış çapı, m

h_i

Serpantin iç yüzeyindeki ısı taşınım katsayısı, W/m²K

h_o

Serpantin dış yüzeyindeki ısı taşınım katsayısı, W/m²K

k

Isıl iletkenlik katsayısı, W/mK

L

Kalınlık, m

$R_{f,o}$

Serpantin dış yüzey kirlilik faktörü

ETİK STANDARTLARIN BEYANI

(DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The authors of this article declare that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Yaren GÜVEN: Makalenin araştırma ve yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

She conducted research of article and performed the writing process.

Mustafa AKTAŞ: Makalenin araştırma ve yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He conducted research of article and performed the writing process.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Üser, Y., Yalçın, M. A., Özen, Ş. (2004). Endüstride Yüksek Verimli Motor Kullanımının Enerji Verimliliğine Etkileri. SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 1, 55-61.
- [2] Kim, J. Y., Kim, K. Y. (2009). Effects of Vent Shaft Location on the Ventilation Performance in a Subway Tunnel. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 97, 174-179.
- [3] Moreno, T., Pérez, N., Reche, C., Martins, V., de Miguel, E., Capdevila, M., Centelles, S., Minguillón, M. C., Amato, F., Alastuey, A., Querol, X., Gibbons, W. (2014). Subway Platform Air Quality: Assessing the Influences of Tunnel Ventilation, Train Piston Effect and Station Design. Atmospheric Environment, 92, 461-468.
- [4] Chatterjee, A., Zhang, L., Xia, X. (2015). Optimization of Mine Ventilation Fan Speeds According to Ventilation on Demand and Time of Use Tariff. Applied Energy, 146, 65-73.
- [5] Quan, J., Kim, S. H., Kim, J. H. (2018). A Study on Probabilistic Social Cost-Benefit Analysis to Introduce High-Efficiency Motors into Subway Station Ventilation. Energy Policy, 121, 92-100.
- [6] Guan, B., Zhang, T., Liu, X. (2018). Performance Investigation of Outdoor Air Supply and Indoor Environment Related to Energy Consumption in Two Subway Stations. Sustainable Cities and Society, 41, 513-524.
- [7] Zhang, Y., Li, X. (2018). A Study of Fresh Air Control in Subway Stations. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 175, 384-390.
- [8] Liu, M., Zhu, C., Zhang, H., Zheng, W., You, S., Campana, P. E., Yan, H. (2019). The Environment and Energy Consumption of a Subway Tunnel by the Influence of Piston Wind. Applied Energy, 246, 11-23.
- [9] Li, G., Meng, X., Zhang, X., Zhang, L., Du, C., Li, N., Yu, W., Xiong, J., Zhang, S., Li, B. (2020). An Innovative Ventilation System Using Piston Wind for the Thermal Environment in Shanghai Subway Station. Journal of Building Engineering, 32, 101276.
- [10] Su, Z., Li, X. (2020). Sub-System Energy Model Based on Actual Operation Data for Subway Stations. Sustainable Cities and Society, 52, 101835.
- [11] He, D., Teng, X., Chen, Y., Yuan, Y., Li, X., Shan, S. (2021). Piston Wind Characteristic and Energy Saving of Metro Station Environmental Control System. Journal of Building Engineering, 44, 102664.
- [12] Yu, Y., You, S., Zhang, H., Ye, T., Wang, Y., Wei, S. (2021). A Review on Available Energy Saving Strategies for Heating, Ventilation and Air Conditioning in Underground Metro Stations. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 141, 110788.
- [13] Cheng, F., Cui, C., Cai, W., Zhang, X., Ge, Y., Li, B. (2022). A Novel Data-Driven Air Balancing Method with Energy-Saving Constraint Strategy to Minimize the Energy Consumption of Ventilation System. Energy, 239, 122146.
- [14] He, D., Teng, X., Chen, Y., Liu, B., Wang, H., Li, X., Ma, R. (2022). Energy Saving in Metro Ventilation System Based on Multi-Factor Analysis and Air Characteristics of Piston Vent. Applied Energy, 307, 118295.
- [15] Su, Z., Li, X. (2022). Analysis of Energy-Saving for Ventilation and Air-Conditioning System of Subway Stations with Platform Screen Doors. Journal of Building Engineering, 59, 105064.

- [16] Yang, J., Liu, M., Zhang, H., Zheng, W., You, S., Cui, T. (2022). Ventilation and Energy Performance Study on Platform Screen Doors with Adjustable Vents in a Subway Station. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 120, 104291.
- [17] Bae, S., Kim, J., Yun, J. J. (2015). Energy Efficient Blower Control Strategy for the Ventilation System of a Metropolitan Subway Station. *Indian Journal of Science and Technology*, 8, 1-6.
- [18] Liddament, M. (2015). Thermal Response and Plant Sizing. *CIBSE Guide A Environmental Design*.
- [19] Doğan, H. (2018). Uygulamalı Havalandırma ve İklimlendirme Esasları, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 241-244.
- [20] ANSI/ASHRAE Standard 55-2013 (2013). Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, ASHRAE, Atlanta, GA, USA.
- [21] Abanoz, M. S. (2019). “İstanbul’da Metroların İç Hava Kalitesine Havalandırma Sistemlerinin Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
- [22] Ryu, K. J., Juraeva, M., Jeong, S. H., Song, D. J. (2012). Ventilation Efficiency in the Subway Environment for the Indoor Air Quality. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Computer and Systems Engineering*, 3, 549-553.
- [23] Nieuwenhuijsen, M. J., Gómez-Perales, J. E., Colvile, R. N. (2007). Levels of Particulate Air Pollution, Its Elemental Composition, Determinants and Health Effects in Metro Systems. *Atmospheric Environment*, 41, 7995-8006.
- [24] Passi, A., Nagendra, S., Maiya, M. P. (2021). Characteristics of Indoor Air Quality in Underground Metro Stations: A Critical Review. *Building and Environment*, 198, 107907.
- [25] Bernstein, J. A., Alexis, N., Bacchus, H., Bernstein, I. L., Fritz, P., Horner, E., Li, N., Mason, S., Nel, A., Oullette, J., Reijula, K., Reponen, T., Seltzer, J., Smith, A., Tarlo, S. M. (2008). The Health Effects of Nonindustrial Indoor Air Pollution. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 121, 585-591.
- [26] Wang, Y., Li, J., Li, X. (2017). Subway Simulation of CO₂ Concentration During Close Mode Operation. *Sustainable Cities and Society*, 28, 201-208.
- [27] ASHRAE, Standard 62 (1989). Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta.
- [28] ASHRAE Handbook (2003). HVAC Applications, ASHRAE.
- [29] İnternet: Beyfan, “Havalandırmanın Önemi ve Gerekliliği”. URL: <https://www.havalandirmafanlari.com/havalandirmanin-onemi>.
- [30] İnternet: AEM Laboratuvarı, “VOC (Uçucu Organik Bileşik) Nedir? VOC Ölçümü”. URL: <https://www.aem.com.tr/voc-ucucu-organik-bilesik-nedir-voc-olcumu/>.
- [31] Zenz, C. (1988). Occupational Medicine: Principles and Practical Applications. ABD: Year Book Medical Publishers.
- [32] Vallero, D. (2014). Fundamentals of Air Pollution, Academic Press, ABD, 197-214.
- [33] Martins, V., Moreno, T., Minguillón, M. C., Amato, F., Miguel, E., Capdevila, M., Querol, X. (2015). Exposure to Airborne Particulate Matter in the Subway System. *Science of The Total Environment*, 511, 711-722.
- [34] Park, J. H., Son, Y. S., Kim, K. H. (2019). A Review of Traditional and Advanced Technologies for the Removal of Particulate Matter in Subway Systems. *Indoor Air*, 29, 157-363.
- [35] Martins, V., Moreno, T., Mendes, L., Eleftheriadis, K., Diapouli, E., Alves, C. A., Duarte, M., Miguel, E., Capdevila, M., Querol, X., Minguillón, M. C. (2016). Factors Controlling Air Quality in Different European Subway Systems. *Environmental Research*, 146, 35-46.

- [36] Morrow, P. E. (1964). Evaluation of Inhalation Hazards Based Upon the respirable Dust Concept and the Philosophy and Application of Selective Sampling. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 25, 213-236.
- [37] ASHRAE, Standard 62 (2001). Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta.
- [38] Karlsson, H. L., Nilsson, L., Möller, L. (2005). Subway Particles Are More Genotoxic than Street Particles and Induce Oxidative Stress in Cultured Human Lung Cells. *Chemical Research in Toxicology*, 18, 19-23.
- [39] Bates, D. (1992). Health Indices of the Adverse Effects of Air Pollution: The Question of Co-herence. *Environmental Research*, 59, 336-349.
- [40] Weaver, L., Hopkins, R., Chan, K., Churchill, S., Elliott, C., Clemmer, T. (2002). Hyperbaric Oxygen for Acute Carbon Monoxide Poisoning. *New England Journal of Medicine*, 347, 1057-67.
- [41] Aydın, F. (2013). Combine to the Ventilation Systems for Passengers and Tunnel Areas in Metro Systems, 2. Uluslararası Raylı Sistemler Mühendisliği Sempozyumu, Karabük, Türkiye.
- [42] Özbakır, E. (2007). Yeraltı Raylı Sistem İstasyonlarında Isıtma, Havalandırma, Klima Tesisatı. *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 97, 375-382.
- [43] NFPA-130, (2010), Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems, USA.
- [44] Leng, J., Wen, Y. (2021). Environmental Standards for Healthy Ventilation in Metros: Status, Problems and Prospects. *Energy & Buildings*, 245, 111068.
- [45] Neccar Ö. (2007). Üsküdar-Ümraniye Metro Projesi Mekanik Hesap Raporu. 7A Mühendislik, 30-43, İstanbul.
- [46] Akgül Laloğlu, Ş. (2010). "Metro İstasyon ve Tünellerinde Havalandırma Sistemi Tasarımı", Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- [47] İnternet: Aironn, "Metro ve Demiryolu Havalandırma Sistemleri". URL: <https://www.aironn.com.tr/cozumler/metro-ve-demir-yolu-havalandirma-sistemleri>.
- [48] İnternet: Cvsair, "Metro Fanı-Ürün Özellikleri". URL: <https://cvsair.com.tr/metro-fani/>.
- [49] Cheng, G., Qi, M., Zhang, J., Wang, W., Cheng, Y. (2012). Analysis of the Stability of the Ventilation System in Baishan Coalmine. *Procedia Engineering*, 45, 311-316.
- [50] Acuña, E., Hall, S., Hardcastle, S., Fava, L. (2010). The Application of a MIP Model to Select the Optimum Auxiliary Fan and Operational Settings for Multiple Period Duties. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 2, 95-102.
- [51] Eliason, J. R., Fisher, B. S. (1977). Large Adjustable Speed Fan Drives Including Static Converter Developments for Cement Plants. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 6, 557-562.
- [52] Liu, H., Lee, S. C., Kim, M. J., Shi, H., Kim, J. T., Wasewar, K. L., Yoo, C. K. (2013). Multi-Objective Optimization of Indoor Air Quality Control and Energy Consumption Minimization in a Subway Ventilation System. *Energy and Buildings*, 66, 553-561.
- [53] Doğan, H. (2017). Uygulamalı Havalandırma ve İklimlendirme Tekniği, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 280-281.
- [54] Canbazoğlu, S. (2020). Fan Mühendisliği, Doğa Yayıncılık, İstanbul, 233-243.
- [55] Bulgurcu, H. (2015). Havalandırma Tesisatı, Makina Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, İstanbul.
- [56] İnternet: International Electrotechnical Commission, "Electric Motors". URL: <https://www.iec.ch/government-regulators/electric-motors>.
- [57] Zöhra, B., Akar, M. (2019). Türkiye'de Verimli Elektrik Motorlarına Geçiş Süreci ve Şebeke Kalkışlı Sabit Mıknatıslı Senkron

- Motorlar. International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, 3, 236-242.
- [58] Aktaş, M., Durak, V., Tanrıku, Z. B., Güler, M., Gökben, D. (2023). Akışkan Yatak Kum Kurutma Sisteminde Fan Performansının Kurutm Maliyetine Etkisinin Araştırılması. 9th International Baskent Congress on Life, Engineering and Applied Sciences, Ankara, Türkiye, 86-87.
- [59] İnternet: T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, "Türkiye Elektrik Üretimi ve Elektrik Tüketim Noktası Emisyon Faktörleri". URL: <https://enerji.gov.tr/evced-cevre-ve-iklim-elektrik-uretim-tuketim-emisyon-faktorleri#:~:text=Son%20olarak%2C%20elektrik%20t%C3%BCketim%20noktas%C4%B1,2%2De%2C%20sera%20gaz%C4%B1%20emisyonu>.
- [60] İnternet: T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, "Enerjini Boşa Harcama". URL: <https://webdosya.csb.gov.tr/db/samsun/webmenu/webmenu4374.pdf>.
- [61] EUROVENT 4/11, Energy Efficiency Classification of Air Filters for General Ventilation Purposes, Paris, France.
- [62] Gürdallar, M. (2004). Hijyen ve İç Hava Kalitesi Bakımından HVAC Sistemlerinin Temizliği. Tesisat Mühendisliği Dergisi, 82, 20-32.
- [63] İnternet: Dağsan Havalandırma, "Hava Kanalları". URL: <https://www.dagsanhavalandirma.com/urundetay/hava-kanallari>.
- [64] Çengel, Y. A. (2011). Isı ve Kütle Transferi, Güven Kitabevi, İzmir, 615-617.
- [65] Delwati, M., Merema, B., Breesch, H., Helsen, L., Sourbron, M. (2018). Impact of Demand Controlled Ventilation on System Performance and Energy Use. Energy and Buildings, 174, 111-123.
- [66] Murphy, J., Ap, L., Bradley, B. (2005). CO₂-Based Demand-Controlled Ventilation with ASHRAE Standard 62.1-2004. Engineers Newsletter, 34, 1-8.
- [67] Schell, M. B., Turner, S. C., Omar, S. (1998). Application of CO₂-Based Demand-Controlled Ventilation Using ASHRAE Standard 62: Optimizing Energy Use and Ventilation, ASHRAE Transactions, 104, 1213-1225.
- [68] Kim, T. H., Choi, B. H., Kang, M. S., Lee, H. J. (2021). Removal of Iron Oxide from Indoor Air at a Subway Station Using a Vegetation Biofilter: A Case Study of Seoul, Korea. Atmosphere, 12, 1463.
- [69] Son, Y. S., Oh, Y. H., Choi, I. Y., Dinh, T. V., Chung, S. G., Lee, J. H., Park, D., Kim, J. C. (2019). Development of A Magnetic Hybrid Filter to Reduce PM10 in A Subway Platform. Journal of Hazardous Materials, 368, 197-203.
- [70] Zhao, L., Wang, J., Gao, H. O., Xie, Y., Jiang, R., Hu, Q., Sun, Y. (2017). Evaluation of Particulate Matter Concentration in Shanghai's Metro System and Strategy for Improvement. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 53, 115-127.
- [71] Moreno, T., Reche, C., Minguillón, M. C., Capdevila, M., de Miguel, E., Querol, X. (2017). The Effect of Ventilation Protocols on Airborne Particulate Matter in Subway Systems. Science of the Total Environment, 584-585, 1317-1323.
- [72] İnternet: Metro İstanbul, "Enerjisini Kendi Üreten İstasyon". URL: <https://www.metro.istanbul/haber/detay/enerjisini-kendi-ureten-istasyon>.
- [73] İnternet: Bursa Büyükşehir Belediyesi, "Metro Durakları Enerji İstasyonuna Dönüyor". URL: <https://www.bursa.bel.tr/haber/metro-duraklari-enerji-istasyonuna-donuyor--29786>.
- [74] Babaei, P., Ögün, E., Güllü, G. (2017). Farklı Türdeki Hava Temizleme Cihazlarının Partikül Madde ve Formaldehit Giderim Etkinliklerinin Kıyaslanması. VII. Ulusal Hava Kirliliği ve Kontrolü Sempozyumu, 823-829, Antalya, Türkiye.