



**Bu bir MMO
yayıdır**

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

ŞEHİRLERARASI OTOBÜSLERDE HAVALANDIRMA ve İÇ HAVA KALİTESİ

İBRAHİM ATMACA
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ

ŞEHİRLERARASI OTOBÜSLERDE HAVALANDIRMA VE İÇ HAVA KALİTESİ

İbrahim ATMACA

ÖZET

İnsanların toplu halde yolculuk yaptığı otobüs kabinleri iklimlendirilmesi zaruri ortamlardan bir tanesidir. Otobüsler, yakın veya orta uzaklıktaki mesafelere seyahat için insanların sıklıkla tercih ettikleri araçlardan birisidir ve çok sayıda insanın uzun süreli seyahatlerinde temiz ve ısıtılma açısından konforlu bir ortamın temini için kabinlerinin iklimlendirilmeleri son derece önemlidir. Yaşam mekânlarında olduğu gibi otobüslerin iklimlendirilmesinde de amaç, ortamın ısıtılması, soğutulması, neminin uygun değerlerde tutulmasının yanı sıra temiz bir iç ortamın teminidir. Bu kapsamda mevcut çalışmada otobüs kabini iklimlendirilmesinde iç çevresel şartlar ele alınmıştır. Çalışmada öncelikle otobüs klima sistemleri tanıtılmış, daha sonra ise otobüslerde ısıtılma konforu, iç hava kalitesi ve enerji verimliliği üzerine son yıllarda yapılan çalışmalar özetlenerek değerlendirilmiştir. Daha sonra ise piyasada mevcut otobüs iklimlendirme sistemlerinin özelliklerinden bahsedilmiş, şehirlerarası otobüslerde kabine alınan taze hava miktarının karbondioksit (CO₂) emisyonları üzerine etkisi incelenmek suretiyle elde edilen bulgular özetlenmiş ve öneriler sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: Otobüs, İç hava kalitesi, Isıtılma Konforu, Enerji verimliliği

ABSTRACT

The bus cabin where people travel together is one of the essential air – conditioned environments. Buses are frequently preferred for close or medium distance travels and air – conditioning of their cabins are extremely important for providing thermally acceptable and clean indoor environment for a large number of people during long-term trips. As in living spaces, the purpose of the air – conditioning in the bus cabin is to supply heating, cooling, humidification / dehumidification at the appropriate values and also providing a clean indoor environment. In this context, the indoor environmental conditions in the air – conditioned bus cabin are discussed in the present study. At first, bus air conditioning systems have been introduced, and then the recent studies conducted on thermal comfort, indoor air quality and energy efficiency in the buses are summarized and evaluated. The characteristics of the existing bus air-conditioning systems on the market has also been mentioned, the findings are summarized and recommendations are presented by examining the effects of fresh air intake the bus cabin on the carbon dioxide (CO₂) emissions in the long-distance buses.

Keywords: Bus, Indoor air quality, Thermal comfort, Energy efficiency

1. GİRİŞ

Çok çeşitli teknolojiler ve sistemler vasıtasıyla günümüzde yaygın olarak kullanılan iklimlendirme sistemlerinin amacı; bu ortamı kullanan insanlara kabul edilebilir kalitede konforlu ve temiz iç ortam havası hazırlamaktır. Bu amaçlar gerçekleştirilirken enerji tüketiminin minimum olmasına da tabi ki dikkat edilmelidir. İklimlendirme işlemi yapılacak bir hacim için uygun sistemin seçimi, sistemin

ekonomikliği ve güvenilirliğinin yanında hacimde çalışan, ikamet eden veya seyahat edenler için ısı konforun ve temiz bir ortam havasının sağlanması da konuyla ilgili mühendislerin ilgi alanına girmektedir. Isıl konfor “ısıl çevreden memnun olunan düşünce hali”, ergonomi ise “insanların anatomik özelliklerini, antropometrik karakteristiklerini, fizyolojik kapasite ve toleranslarını göz önünde tutarak, endüstriyel iş ortamındaki tüm faktörlerin etkisi ile oluşabilecek, organik ve psikososyal stresler karşısında, sistem verimliliği ve insan – makine – çevre temel yasalarını ortaya koymaya çalışan çok disiplinli bir araştırma ve geliştirme alanı” olarak tanımlanmaktadır [1,2]. Konfor bir düşünce hali olduğu ve çalışılan ortamın ısı koşulları insan verimliliğini etkilediği için ısı konfor ergonominin bir konusu olarak da ele alınabilir ve incelenebilir. Çünkü konforlu olmayan bir ortamda ikamet eden insan üzerindeki pozitif veya negatif yöndeki ısı yük, dikkatin dağılmasına ve neticesinde performansın düşmesine sebep olabilir. Kişiyi göre değişimler, yaş, ortama uyum sağlama, cinsiyet, hava akımı (cerayan) ve asimetric ısı ışınım gibi detay noktalar dışında konfora etki eden en temel faktörler kişisel ve çevresel parametreler olarak iki grup altında toplanabilir [3]. Kişisel parametreler;

- Kişinin giyinme durumu,
- Kişinin aktivite düzeyi

çevresel parametreler ise;

- Ortam sıcaklığı,
- Ortam bağıl nemi,
- Ortamdaki hava hızı,
- Ortamdaki çeşitli yüzeylerin sıcaklığına bağlı olarak ortalama ışınım sıcaklığı

olarak sıralanabilir.

İklimlendirme sistemlerinden beklenen diğer önemli amaç ise bahsedildiği üzere kabul edilebilir kalitede temiz iç ortam havası hazırlamaktır. İç hava kalitesi kavramı, yaşanan hacimlerde teneffüs edilen havanın temizliği ile ilgilidir ve konu, ASHRAE Standart 62 [4] “Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality” başlıklı standartta geniş bir biçimde ele alınmaktadır. Bu standartta kabul edilebilir iç ortam hava kalitesi; yetkili otoriteler tarafından belirlenen zararlı derişiklik düzeylerinin üzerinde bilinen hiçbir kirlenici madde içermeyen ve bu havayı teneffüs eden önemli çoğunluktaki insanın (%80 veya daha fazla) havanın kalitesiyle ilgili herhangi bir tatminsizlik hissetmediği hava olarak tanımlanmaktadır. İç hava kalitesini bozan ve kirlilik oluşturan zararlı maddeler ve bunların kaynakları şu şekilde gruplandırılabilir [5];

- Canlıların (özellikle insanların) solunumları ve ayrıca yanma kaynaklı karbondioksit miktarı,
- İnsan kaynaklı koku,
- Çevre ve insan kaynaklı mikroorganizmalar,
- Çevre ve pişirme gibi insan faaliyetleri kaynaklı nem (bu faktör ısı konfor için de önemlidir),
- Toprak kaynaklı radon gazı,
- Eşya veya bina elemanları kaynaklı organik buharlar,
- Çevre ve eşya kaynaklı toz,
- Çevre kaynaklı alerjen maddeler ve canlılar,
- İnsan kaynaklı sigara dumanı,
- Yukarıda sayılanlar dışında hava kalitesine etken diğer faktörler (elektronik kirlenme, radyasyon gibi).

İklimlendirilen ortamlardaki kirleniciyi dâhili ve harici kaynaklı olarak sınıflandırabilmekte mümkündür. Klimatize edilen ortamda bulunan veya kullanılan yapıştırıcılar, kaplama ve döşemeler, bazı ahşap ürünler, kullanılan temizlik malzemelerinden yayılan formaldehit de içeren uçucu organik bileşikler dâhili kaynaklar olarak örneklendirilebilir. İklimlendirilen ortama taze hava olarak alınan havanın çevrede diğer kaynaklardan atılan kirli hava olma olasılığı da söz konusudur. Bu, özellikle taşıtların iklimlendirilmesinde, şehir içi ulaşımında ortaya çıkabilme olasılığı yüksek olan ve harici kaynaklı kirlenici olarak adlandırılacak bir durumdur. Gerek dâhili gerekse harici kaynaklı kirlenicilerde verilen örnekler kimyasal kirlenicilerdir. Bunların dışında bakteri, küf, polen ve çeşitli virüsler gibi biyolojik kirleniciler de klimatize edilen ortamlar için dikkate alınması gereken kirlenici türleridir. Biyolojik

kirleticiler iklimlendirme sistemlerinde özellikle kanallar, nemlendiriciler ve drenaj tavalarında biriken sularda ortaya çıkabilecek, riskli kirleticilerdir [5].

İç hava kalitesinin iyileştirilmesinde kullanılacak metotlar ise şu şekilde sıralanabilir;

- Kirletici kaynağın kontrolü ve azaltılması veya yok edilmesi,
- Zararlı kirleticilerin henüz ortama karışmadan kaynağında tutulması ve bertaraf edilmesi,
- Sirküle edilen havanın filtrasyonu ve temizlenmesi,
- Yeteri miktar taze havanın iklimlendirilen hacme beslenmesi, yani havalandırma.

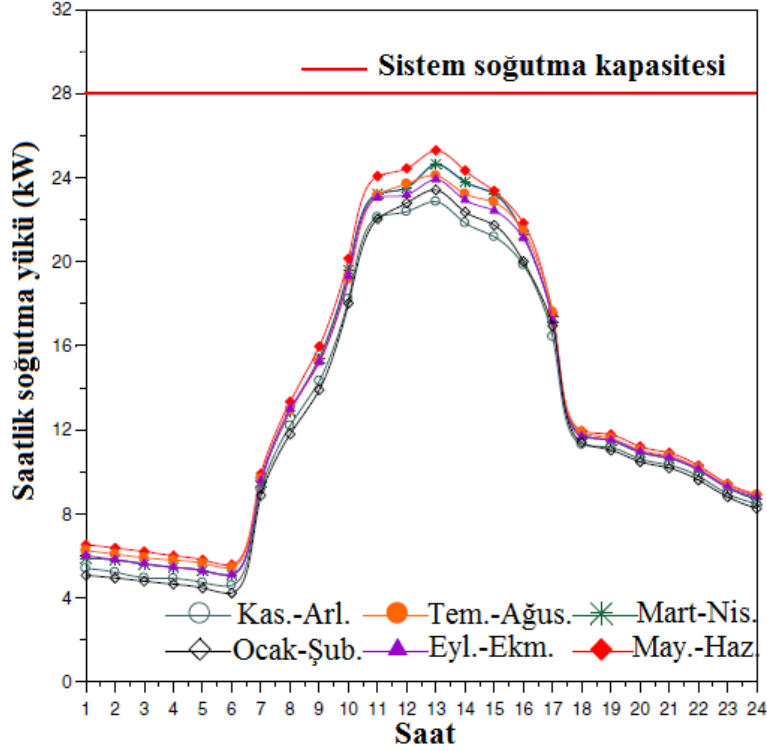
Bahsedilen bu metotlardan ilki ideal gibi görünse de uygulaması oldukça güçtür. Kirleticiyi kaynağında tutma ise mutfak havalandırması gibi kaynağın net olarak tespit edilebildiği durumlarda uygulanabilir gözükmektedir. Filtrasyon aktif olarak kullanılan ve günden güne gelişen bir teknolojidir. Özellikle havalandırmanın mümkün olmadığı uygulamalarda (alınması planlanan dış hava da kirli olabilir) önem arz eder. Fakat çok farklı türde ve miktarda kirleticinin hâsıl olması durumunda filtreleme işleminin başarısı da kısıtlanır. Günümüzde en etkin yöntem ise havalandırma. Klimatize edilen ortamdaki kirlilik oranını azaltmak dolayısıyla kabul edilebilir mertebede temiz iç ortam havası elde edebilmek için uygulamaya bağlı olarak değişen miktarlarda taze havanın mahale gönderilmesi ideal ancak maliyeti yüksek bir uygulamadır. En ideal yöntem olan havalandırma uygulanırken toplam kalitede dikkate alınması mecburi olan ısı konfor ve özellikle enerji verimliliği kavramları kesinlikle unutulmamalıdır. Havalandırma yapılırken minimum enerji tüketimini sağlayabilmek önemli bir hedef olmalıdır. Günümüzde bu kapsamda ısı geri kazanım sistemleri, iklimlendirilen ortamlarda havalandırma yapılırken ortamı kullanan insanların ısı konfor algısının bozulmaması yanı sıra yeteri kalitede temiz havanın temini ve minimum enerji tüketimi sağlaması amacıyla vazgeçilmez hale gelmiştir [5].

Genel değerlendirmelerden de görüleceği üzere, klimatize edilen her türlü ortam için iç çevre şartları ele alınırken ısı konfor, iç hava kalitesi ve enerji verimliliği bir bütün olarak değerlendirilmesi gereken önemli kavramlardır. Zira herhangi biri için yapılacak bir değişiklik veya iyileştirme bir diğerini de önemli derecede etkilemektedir. İnsanların toplu halde yolculuk yaptığı otobüsler kabinleri de iklimlendirilmesi zaruri ortamlardan bir tanesidir. Otobüsler, yakın veya orta uzaklıktaki mesafelere seyahat için insanların sıklıkla tercih ettikleri araçlardan birisidir ve çok sayıda insanın uzun süreli seyahatlerinde temiz ve ısı açıdan konforlu bir ortamın temini için kabinlerinin iklimlendirilmeleri son derece önemlidir. Yaşam mekânlarında olduğu gibi otobüslerin iklimlendirilmesinde de amaç, ortamın ısıtılması, soğutulması, neminin uygun değerlerde tutulmasının yanı sıra temiz bir iç ortamın teminidir. Bu kapsamda mevcut çalışmada otobüs kabini iklimlendirilmesinde iç çevresel şartlar ele alınmıştır. Çalışmada öncelikle otobüs klima sistemleri tanıtılmış, daha sonra ise otobüslerde ısı konfor, iç hava kalitesi ve enerji verimliliği üzerine son yıllarda yapılan çalışmalar özetlenerek değerlendirilmiş, daha sonra ise piyasada mevcut otobüs iklimlendirme sistemlerinin özelliklerinden de bahsedilmek suretiyle elde edilen bulgular özetlenmiş ve öneriler sunulmuştur.

2. OTOBÜSLERDE KLİMA SİSTEMİ

Otobüslerde ısıtma için gerekli ısı aracın motor soğutma suyundan veya dizel yakıtlı brülörlü bir sistem tarafından sağlanmakta iken soğutma ve nem ile ilgili kontroller tavan tipi (roof top) klima cihazları ile yapılmaktadır. Bu klima cihazları split tiptedir ve hava soğutmalı dış ünite kondenser otobüsün üst kısmında ince ve uzun bir gövde içerisinde bulunurken, iç ünite evaporatörler ise kabin içerisinde ve santrifüj fan destekli hava kanallarına bağlantılıdır. Klima kompresörleri ise sabit hızlı işletme şartlarının sağlanabilmesi için genellikle yedek motor tahriklidir. Ancak hala ana motordan tahrikli kompresöre sahip klimalarda bulunmaktadır. İster şehirlerarası ister şehir içi otobüsü olsun, klima sistemi araçtaki en büyük ikinci enerji tüketimine sahip elemandır. Araç motorundan tahrikli kompresörü olan klimalarda manyetik kavrama kullanılmaktadır ve klima sistemi devreye girdiğinde sürücü aracın gücündeki düşüşü kolaylıkla hissedebilmektedir. Bütün bunların yanı sıra klima sistemi performansının otobüs iç ve dış ortam şartlarına bağlı olan günlük soğutma yükünün salınımından etkilendiği de tecrübeler ile sabittir. Örnek olarak kapıların açılıp kapanması, güneş yükündeki değişimler ve kabin içindeki yolcu sayısına bağlı olarak kabin soğutma yükü değişkenlik arz edecektir.

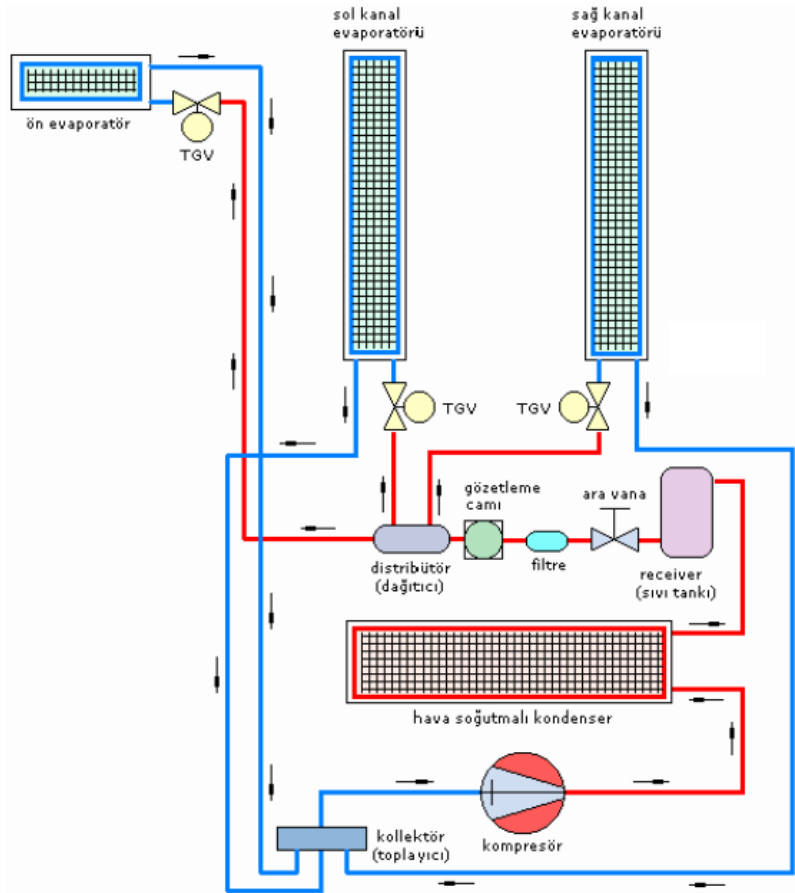
Bir örnek olması açısından soğutma yükünün saatlik değişimi Şekil 1.' de sunulmuştur. Bu soğutma yükleri tropikal ülkeler için ASHRAE 1997' ye göre Mansour ve ark. [6] tarafından oluşturulan simülasyondan elde edilen verilerden oluşmaktadır. Şekilden açıkça görülebileceği üzere, otobüsler için soğutma kapasitesi gün içindeki saatlerde oldukça değişkendir. Gerek pik yükü karşılayabilmek gerekse ilk çalıştırmada kabin içini konfor şartlarına hızlı bir şekilde ulaştırmak amacıyla otobüs klimaları yüksek kapasiteli olarak tasarlanırlar. Bu nedenle otobüs klimaları 136.000 – 150.000 Btu/h gibi yüksek kapasitelere sahiptirler ve soğutulan hava debisi 2000 ile 6000 m³/h arasındadır [7].



Şekil 1. Tropikal ülkeler için otobüs kabini soğutma yüklerinin anlık değişimi [6].

Küçük ölçekli araçlarda klima sistemleri termostat kontrollü olarak aç-kapa (on/off) çalışmaktadır. Otobüs klima sistemlerinde bu tip kontrol çeşitli sakıncalar içermektedir. Küçük araçların klima sistemleri ile karşılaştırıldığında bir otobüs kliması kompresörünün hacim kapasitesi oldukça büyük olduğu için, kompresör her çalıştığında yüksek bir atalet momenti oluşmaktadır. Eğer kısa bir zaman aralığında bu aç-kapa sık bir şekilde tekrarlırsa, sistem kararsız bir davranışa sürüklenmektedir ki bu da kompresörün çok çabuk arıza yapmasına sebep olabilmektedir. Uygulamada, çoğu konvansiyonel otobüs klima sistemi termostat kontrolüne sahip değildir ve bu nedenle kompresör sürekli olarak maksimum kapasitede çalışmaktadır. Tabii ki bu da kısmi yüklerde aşırı soğumaya ve fazla enerji tüketimine sebep olabilmektedir. Bazı prototip sabit sistemlerde kullanılan diğer bir kontrol stratejisi ise değişken hızlı kompresörlerdir. Fakat bu strateji de mobil sistemler için uygulanabilir değildir. Değişken hızlı kompresörler, yüksek ilk yatırım maliyetleri yanı sıra kurulumlarındaki zorluklar sebebiyle tüketicilere cazip gelmemiştir. Bu sistemlerin geri ödeme süreleri de oldukça uzundur. Değişken hızlı kompresörlere benzer şekilde elektronik genleşme valfleri de pahalı kurulum maliyetlerine sahiptir. Değişken deplasmanlı kompresörler ise pistonun strok uzunluğunu değiştirmektedir ve böylece klima sistemi arzu edilen anlık soğutma yükünü karşılayabilmektedir. Bu tip kompresörler değişken soğutma yüklerini karşılarlarken sürekli çalışma avantajına sahiptirler. Fakat bu kompresörler sabit deplasmanlı kompresörlere nazaran daha kompleks ve daha az emniyetlidir. Bunlara ek olarak bu tip kompresörler, özellikle düşük dış ortam sıcaklıklarında kondenser basıncının dizayn değerinin çok altına düşmesi durumunda soğutucu akışkan debisindeki ani değişimlere bağlı olarak kararsız sistem davranışı gösterebilmektedir [6].

Konvansiyonel bir otobüs klima sisteminin şematik diyagramı Şekil 2.' de verilmiştir. Sistem, kabinin her iki tarafındaki yolcular için havanın şartlandırılmasında kullanılmak üzere 2 adet ve ön tarafta şoför mahalinin soğutulması için bir adet olmak üzere toplam üç adet evaporatör grubu ile bir adet kompresör, bir kondenser ve termostatik genişleme valflerinden oluşur. Her bir yolcu sırası ile şoför mahali için dizayn edilen evaporatörler paralel bağlı hat üzerindedir. Soğutucu akışkan buharı kompresörde yüksek basınç ve sıcaklığa basılarak büyük kapasiteli kondensere gönderilir. Soğutucu akışkan buharı kondenserde yoğuşma için gerekli ısıyı dış ortama atarak yoğuşur. Kondenserden dağıtıcıya gelen soğutucu akışkan termostatik genişleme valflerinde kısılarak ıslak buhar fazında evaporatörlere girer. Soğutucu akışkan kabinin soğutulması için gerekli ısıyı her bir evaporatörde ortamdaki çekerek kızgın buhar fazında toplayıcıya ulaşır. Her bir evaporatörden gelen kızgın buhar fazındaki soğutucu akışkan toplayıcıda birleşerek tekrar kompresöre doğru yol alır ve döngü devam eder. Kabinin her iki yanında ve şoför mahalindeki evaporatörler üzerinden fanlar vasıtasıyla sirküle edilerek soğutulmuş hava, menfezlerden iç ortama aktarılır.

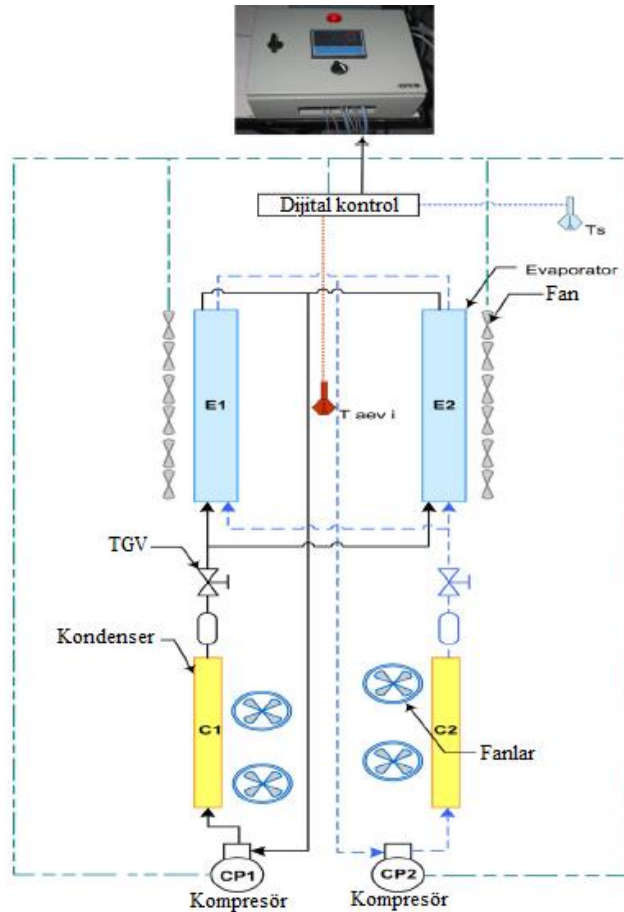


Şekil 2. Konvansiyonel otobüs kliması şematik diyagramı [7].

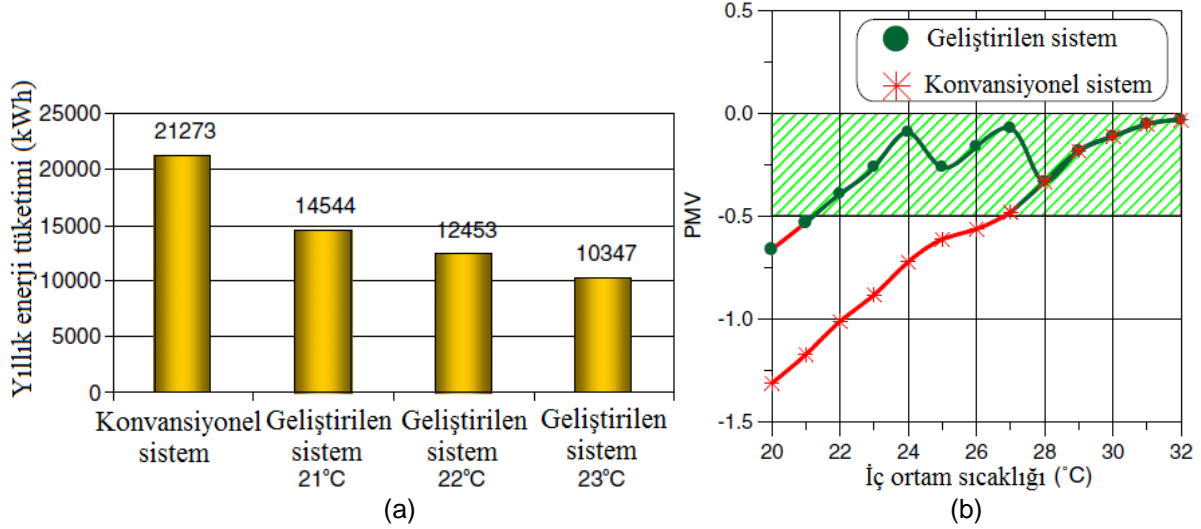
3. OTOBÜSLERDE ISIL KONFOR ve ENERJİ VERİMLİLİĞİ ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Mansour ve ark. [6] çalışmalarında, enerji verimliliği sağlamak ve yolcuların ısı konfor hissini iyileştirmek amacıyla kısmi soğutma yükü koşullarında çalışan yeni tavan tipi çoklu çevrim klima sistemi için geliştirdikleri otomatik kontrol stratejisini sunmuşlardır. Şekil 2.' de sunulan konvansiyonel otobüs klima sistemlerinin, gerek pik yükleri karşılamak amacıyla gerekse ilk çalıştırmada kabinin çok çabuk konfor sıcaklığına erişmesi için büyük kapasitelerde seçildiğinden bahsederek, önerdikleri çoklu

çevrim sistemi ele almışlardır. Önerdikleri bu çoklu çevrim sistem ile soğutma kapasitesinin düşük kaldığı saatlerde daha konforlu bir ortamın temin edilebileceğini, aynı zamanda enerji tasarrufunun da sağlanacağını göstermişlerdir. Şekil 3.' de şematik gösterimi sunulan bu çoklu çevrim klima sistemde birden fazla ünite kullanılabilmekte ve her bir ünite bir bağımsız kompresör, kondenser ile kısılma vanası içerirken tek bir evaporatörün yüzey alanı paylaşılmaktadır. Tabii ki böyle bir sistem mükemmel bir kontrol stratejisine sahip olmalı ki hem konfor hem de enerji verimliliği sağlanabilsin. Önerilen kontrol sistemi iç ortam set sıcaklığı ile ($21 - 22$ ve 23 °C) evaporatör hava giriş sıcaklığı arasındaki farka bağlı olarak 4 farklı çalışma moduna bağlıdır. Bu modlar şu şekilde sıralanmıştır; sıfırıncı mod: tüm sistem kapalıdır ve sadece evaporatör fanları çalışmaktadır, birinci mod: her iki kompresörde tam kapasiteli fan ile çalışmaktadır, ikinci mod: sadece bir kompresör tam kapasiteli fan ile çalışmaktadır ve üçüncü mod: sadece bir kompresör kısmi fan kapasitesinde çalışmaktadır. Önerilen sistem ve kontrol stratejisi deneysel olarak incelenmiş ve çeşitli bulgulara ulaşılmıştır. 21 °C set sıcaklığında yılda 4500 saat çalışma durumu için %31,6 enerji tasarrufunun sağlanabileceği sonucuna ulaşılmış olup, set sıcaklığına bağlı olarak konvansiyonel sistem kullanımına nazaran oluşacak yıllık enerji tüketim seviyeleri Şekil 4.' de verilmiştir. Ayrıca geliştirilen sistemin, özellikle düşük yükler olmak üzere farklı soğutma yükü durumlarında yolcuların ısıl konforlarını sağlayabileceğine vurgu yapılmıştır. Örneğin 25 °C iç ortam sıcaklığı için geliştirilen sistemin kullanımı durumunda PMV -0.25 iken konvansiyonel sistem kullanımını durumunda PMV -0.66 olarak tespit edilmiştir. Yani geliştirilen sistem ile düşük soğutma yüklerinde oluşan aşırı soğutma durumunun önüne geçilebildiği sonucuna varılmış olup, farklı iç ortam sıcaklıklarına bağlı olarak geleneksel sistem ve geliştirilen sistem arasında PMV değerinde oluşan farklılıklar Şekil 4.' de sunulmuştur.



Şekil 3. Çoklu çevrim otobüs klima sisteminin şematik gösterimi [6].



Şekil 4. Konvansiyonel ve çoklu çevrim otobüs klima sistemlerinin (a) yıllık enerji tüketimlerinin karşılaştırılması, (b) iç ortam sıcaklığına bağlı olarak PMV değerinin değişimi [6].

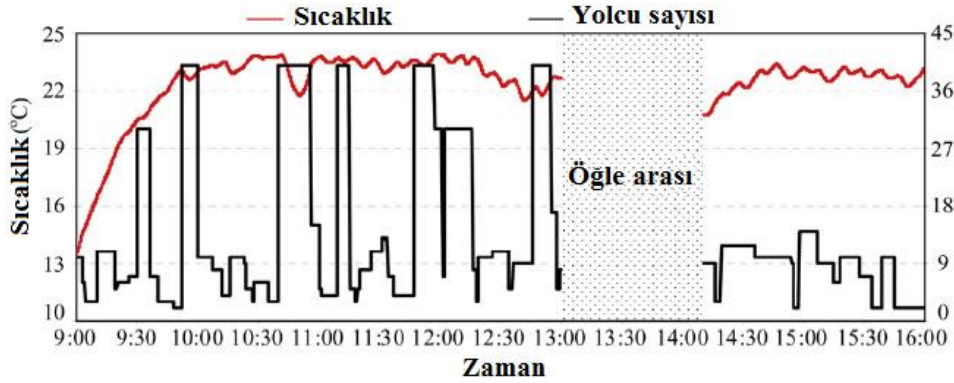
Vollaro ve ark. [8] halk taşıma otobüslerinde enerji performans optimizasyonu üzerine çalışmışlardır. Çalışmanın amacı yakıt tüketimlerini ve dolayısıyla CO₂ emisyonunu azaltmak amacıyla otobüs kabuğunun enerji performansının analizi ve optimizasyonu üzerinedir. Çalışmada dinamik analiz yapabilen bir simülasyondan yararlanılmıştır. Çalışmada aynı iç ortam sıcaklığını sağlayacak şekilde otobüslerde kullanılan geleneksel 4 mm kalınlıkta camlar yerine yüksek performanslı camların tercihi, yalıtım köpüklerinin kullanımı ve yüksek yansıtma katsayısına sahip beyaz boyanın kullanılması ile otobüs fiyatının sadece %3 artacağı ancak dizel yakıttan %20 tasarruf edilebileceği sonucuna varılmıştır.

Otobüsler içerisinde ısı konfor ve enerji verimliliğinin araştırıldığı daha başka çalışmalarda mevcuttur. Söz konusu bu çalışmalarda iç hava kalitesi de incelendiği için değerlendirmeler bir sonraki başlık altında yapılmıştır.

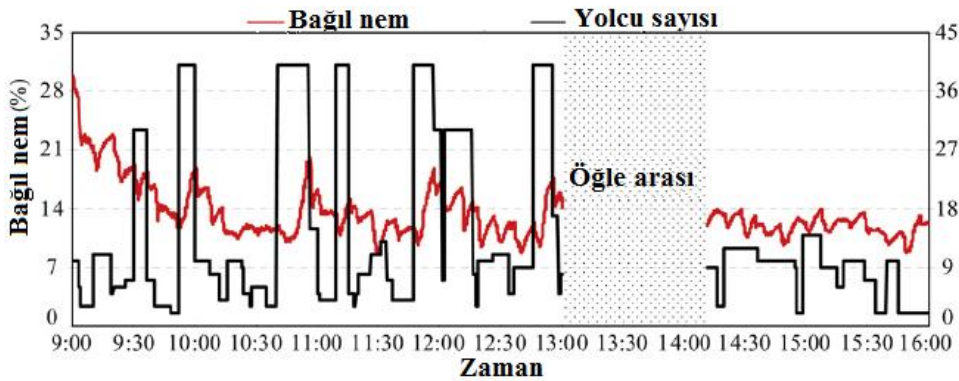
4. OTOBÜSLERDE İÇ ORTAM HAVA KALİTESİ ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Zhu ve ark. [9] halk otobüslerinde mikro çevresel şartları hem deneysel hem de sayısal olarak incelemişlerdir. Bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) modeli oluşturmuşlar ve deneysel olarak doğrulamışlardır. CFD modeli ile otobüs havalandırma sisteminin verimliliğini değerlendirilmiştir. Buna ek olarak, yolcuların maruz kaldığı çeşitli çevresel şartlar, otobüslerdeki iç hava kalitesini değerlendirmek için, deneysel olarak izlenmiştir. Partiküler madde düzeylerinin değişkenlik gösterdiği ve havalandırma sistemi veya kapıların açılıp kapanmasından giren dış havadan etkilendiği gözlenirken, CO düzeylerinin çok düşük kaldığı tespit edilmiştir. CO₂ düzeyinin ise yükseldiği ve doluluk durumundan etkilendiği sonucuna varılmıştır. Yükselen CO₂ seviyesi, mevcut otobüs havalandırma sistemlerinin, özellikle aşırı doluluk şartlarında, otobüs içerisindeki kirleticileri seyreltmede yetersiz olduğunu göstermiştir. Deneysel çalışmalarda sadece iç hava kalitesi değil ısı konfor şartları da dikkate alınmıştır. Bu kapsamda otobüs iç çevresel şartların tayini için deneyler sırasında havanın sıcaklığı ve nemi ile CO₂, CO, PM₁₀, PM_{2.5} ve çok ince parçacıklar ölçülerek kaydedilmiştir. Kış aylarında yapılan deneylerde kabin iç sıcaklığının zamanla değişimi Şekil 5-a.' da gösterilmiştir. Şekilden de görülebileceği üzere otobüs HVAC sistemlerinin otobüs iç sıcaklıklarını istenilen değerlerde tutmada başarılı olduğu tespit edilmiştir. Otobüs içerisindeki nemin zamanla değişimi de Şekil 5-b.' de sunulmuştur. Otobüs içerisindeki nem oranının dış hava şartlarından ve otobüsün kapılarının açılıp kapanmasından önemli derecede etkilendiği gözlenmiştir. Elde edilen sıcaklık ve nem değerlerinin saatlik ortalamaları tüm deney günleri için ASHRAE Std 55-2004' de

sunulan diyagrama işlenmiş (Şekil 6) ve çoğunlukla konfor aralıklarının içerisinde kaldığı, konfor aralığının dışına çıktığında da ılık hissi tarafında kaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Isıl konfor ile ilgili olarak toplamda ASHRAE Std 55-2004'e uygunluk gözlenirse de özellikle dış ortam neminin düşük olduğu günlerde otobüs iç ortam neminin düşük kaldığı ve hava yolu ile bulaşan grip virüsü için en uygun şartların %17-35 nem aralığında olduğu göz önüne alındığında, otobüs içerisinde bu riskin arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Ölçülen CO₂, CO, PM_{2.5} ve PM₁₀ kirletici konsantrasyonu düzeylerinin değişimi de Şekil 7.'da sunulmuştur. ABD ulusal rehberleri (The Guidelines of the National Institute for Occupational Safety and Health – NIOSH) gereği 1000 ppm üzeri CO₂ konsantrasyonu yetersiz havalandırmanın bir belirtisi olduğu belirtilerek CO₂ konsantrasyonları yorumlanmıştır. Şekil 7-a.'dan da görülebileceği üzere CO₂ konsantrasyonları 2000 ppm seviyelerine ulaşabilmektedir. Yine beklendiği üzere, artan yolcu doluluğu ile CO₂ konsantrasyonunun yükseldiği tespit edilmiştir. ABD ulusal çevre havası kalitesi standartları (US National Ambient Air Quality Standards - NAAQS) gereği olması gereken konsantrasyon değerleri CO için 9 ppm, PM_{2.5} için 35 µg/m³ PM₁₀ için 150 µg/m³ şeklindedir. CO, PM_{2.5} ve PM₁₀ için günlük ortalama değerlerin sınırın çok altında olduğu gözlenirken, bu değerlerin özellikle otobüsün kapılarının açıldığı anlarda dış kaynaklı (trafik gibi) kirleticiler sebebiyle yükseldiği gözlenmiştir (Şekil 7-b-c-d). Sonuç olarak iç hava kalitesi için CO, PM_{2.5} ve PM₁₀ konsantrasyonlarının sadece kapılar açıldığında yükseldiği ve ortalamalarının standartlarda altında kaldığı, fakat CO₂ konsantrasyonu düzeyinin genellikle yüksek ve mevcut standart ve rehberlerde önerilen değerlere uygun olmadığı sonucuna varılmıştır. Bunun sebebinin yetersiz havalandırma olduğu, bu yetersiz havalandırmanın hava yolu ile bulaşan hastalıklar açısından riski arttırdığı vurgusu yapılmıştır. Bu nedenle alternatif havalandırma stratejileri ve filtrasyon sistemleri üzerine ihtiyaç duyulabileceği sonucuna ulaşan araştırmacılar, aşağıda detayları açıklanan ikinci çalışmalarını yapmışlardır.

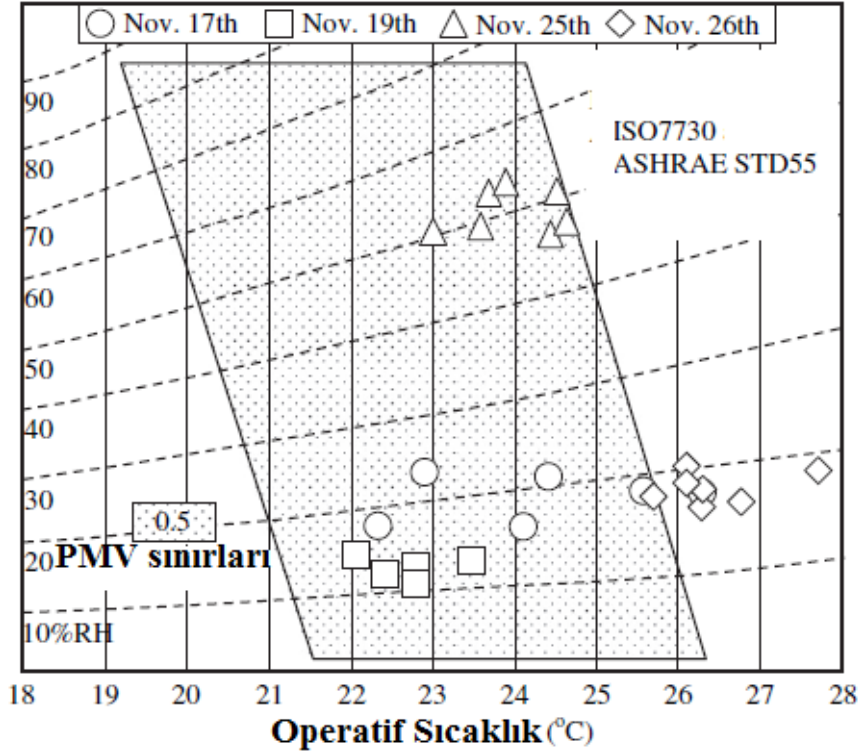


(a)



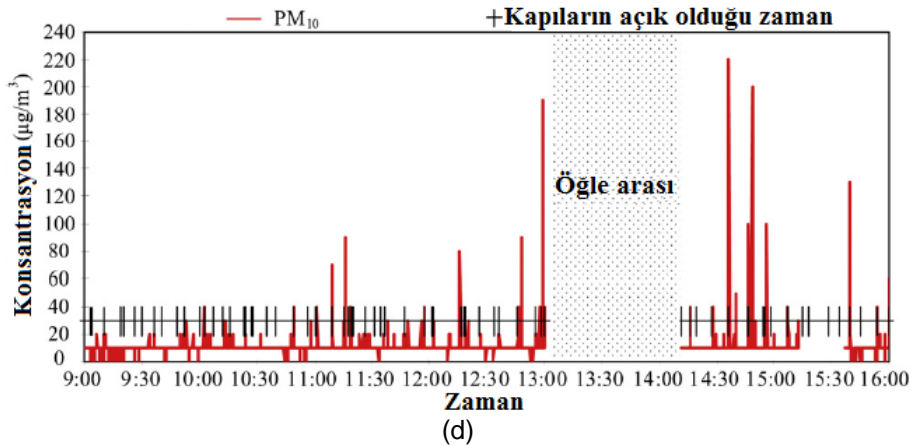
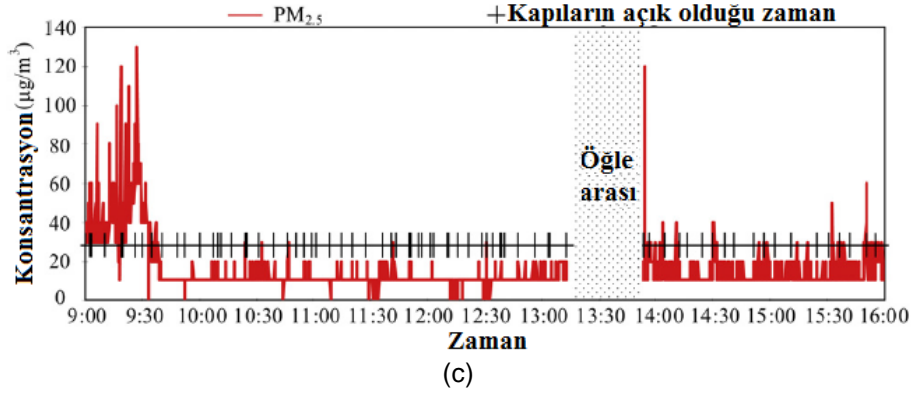
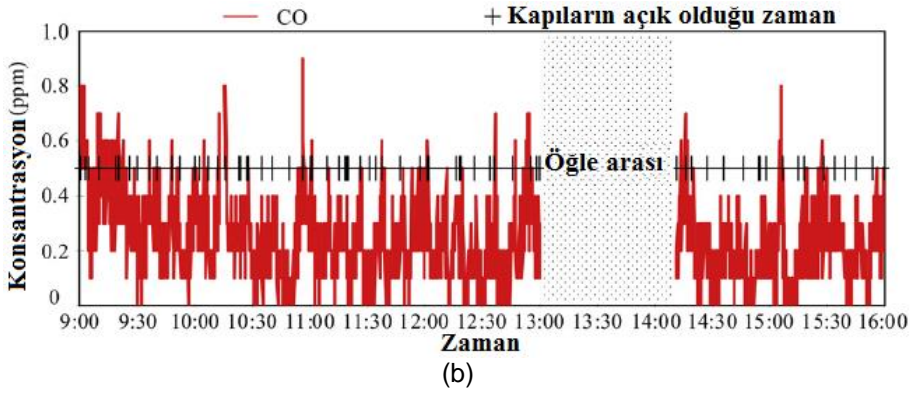
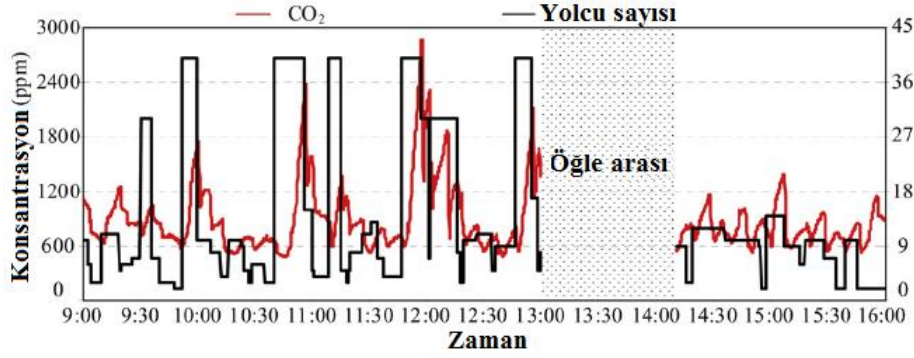
(b)

Şekil 5. Otobüs içerisindeki ısı konfor şartlarının ve doluluk oranının zamana bağlı değişimi, (a) sıcaklık değişimi, (b) bağıl nem değişimi [9].

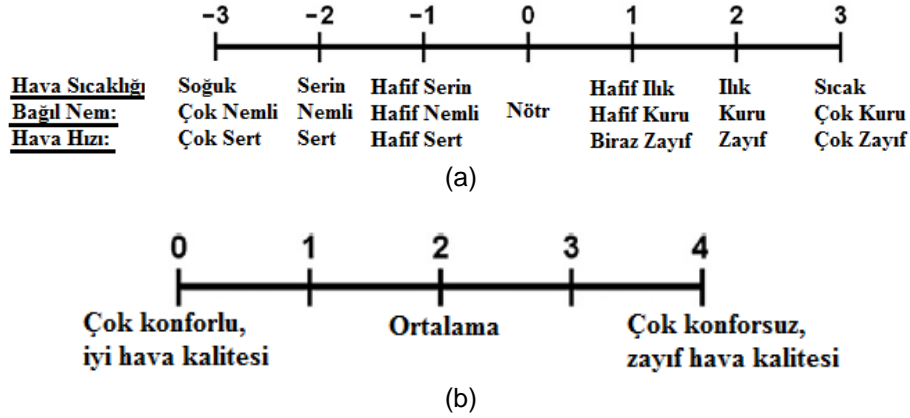


Şekil 6. Otobüs içi ölçüm sonuçlarının ASHRAE 55-2004 standartına göre değerlendirilmesi [9].

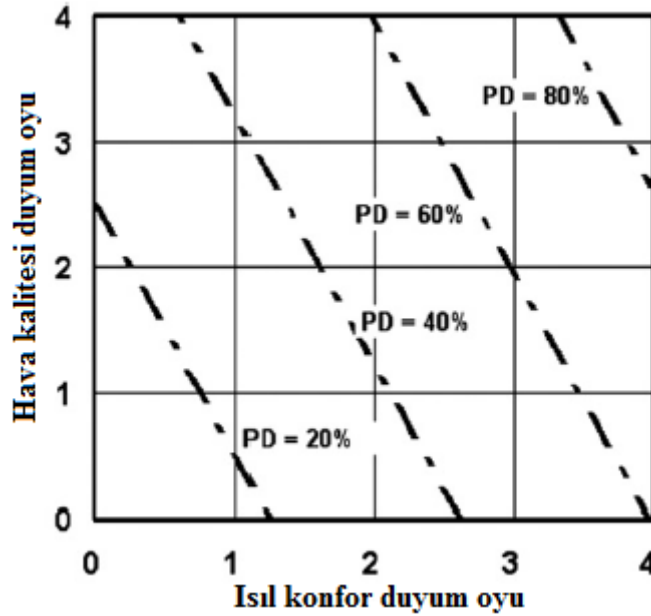
Zhu ve ark. [10] ise otobüs içerisinde gribin hava yoluyla iletiminin değerlendirilmesi için CFD tabanlı bir nümerik model üzerine çalışmışlardır. Çalışmada, otobüs konfigürasyonlarında sıklıkla kullanılan 3 farklı türbülanslı (karışıklı) havalandırma metodu (üstten dağıtım, üstten toplama) ile alternatif deplasmanlı havalandırma metodu (alttan dağıtım, üstten toplama) gribin hava yolu ile bulaşma riskinin sınırlandırılması açısından nümerik olarak değerlendirilmiştir. Bunun yanı sıra hem hava devridaiminin olmadığı (%100 dış hava kaynaklı) hem de filtrasyon ile hava devridaiminin yapıldığı (hava devridaim oranı %25 ve filtre verimi %75) havalandırma modları grip bulaşma olasılığı açısından incelenmiştir. Bahsedilen çalışmada 4 farklı senaryo kullanılmıştır. Kullanılan bu senaryolar Şekil 8.' de gösterilmiştir. Senaryo 1' de orijinal otobüs havalandırma sistemi simüle edilmiştir. Hava, toplam 0.21 m^2 alana sahip lineer hava difüzörleri ile sağlanmış ve dönüş/egzoz açıklıkları orta kapıya yakın tavanın ortasına yerleştirilmiştir. Senaryo 2' de aynı lineer hava difüzörleri ile dağıtılmış, dönüş/egzoz açıklıkları ise arka duvarın ortasına yerleştirilmiştir. Senaryo 3' de lineer hava difüzörleri yerine 0.16 m^2 toplam alana sahip havayı aşağı yönde basan 8 yuvarlak hava difüzörü kullanılmıştır. Bu senaryoda dönüş menfezinin konumu ise senaryo 1 ile aynıdır. Son uygulama olan senaryo 4' de ise diğer senaryolarda kullanılan türbülanslı havalandırma metotları yerine deplasmanlı havalandırma metodu uygulanmıştır. Deplasmanlı havalandırmada Şekil 4-d.' de gösterildiği gibi hava yerden 5 cm yukarıya yerleştirilen lineer hava kaynakları ile sağlanmıştır. Hava yatayla 10° açı yapacak şekilde yukarıya doğru verilmiştir. 1.43 m^2 toplam alana sahip 2 lineer hava dönüş/egzoz açıklığı ise tavanın her iki yanına yerleştirilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre yüksek verimli filtre ile hava devridaimi modu ile %100 dış havanın kullanıldığı hava devridaiminin olmadığı moda enfeksiyon riskinin hemen hemen aynı olduğu sonucuna ulaşılmış ve enfeksiyon riskini azaltmada filtrasyonun potansiyel faydaları belirtilmiştir. Bunlara ek olarak sıklıkla kullanılan türbülanslı havalandırma metotları için, hava dağıtım şekli, dönüş/egzoz ağzının konumu ve koltuk yerleşiminin yolcular arasında gribin hava yoluyla iletimini etkilediği tespit edilmiştir. Deplasmanlı havalandırma metodunun hava yoluyla enfeksiyon riskini sınırlandırmada daha etkin olduğu bulunmuştur. Böylece geliştirilen sayısal model, otobüslerde mikro iç ortam şartlarının hava yolu ile enfeksiyon iletimini nasıl etkilediğinin anlaşılmasını sağlamaktadır.



Şekil 7. Otobüs içerisindeki kirlenici düzeyleri ile doluluk oranı ve kapı işletim şartlarının zamana bağlı değişimi, (a) CO₂, (b) CO, (c) PM_{2.5}, (d) PM₁₀ konsantrasyonları [9].



Şekil 9. Duyum oyları skalası, (a) ısı konforu için, (b) hava kalitesi için [11].



Şekil 10. İklimlendirilmiş otobüsler için birleştirilmiş konfor indeksi [11].

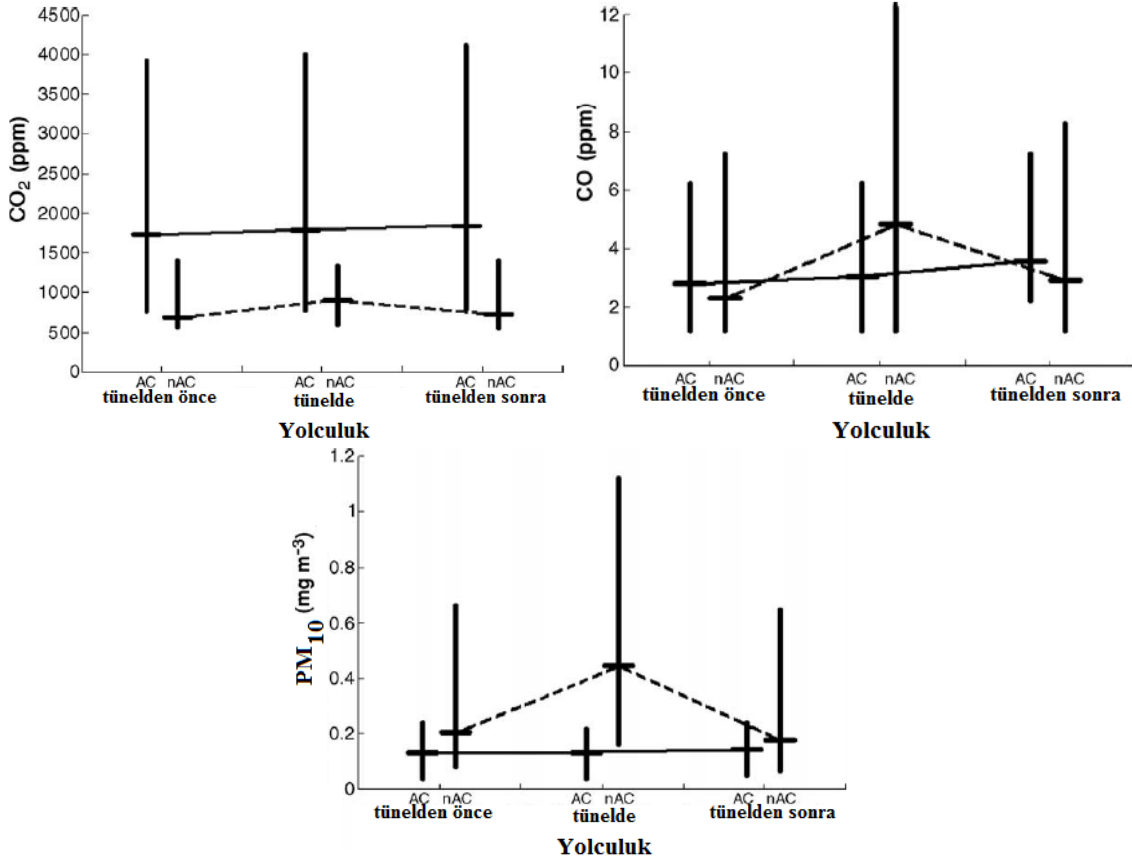
Mui ve Shek [13], Hong Kong' da otobüslerin tünellerden geçişi sırasında, otobüs kullanıcılarının maruz kaldığı önemli hava parametrelerini (CO , CO_2 ve PM_{10}) ve ısı çevreyi (hava sıcaklığı ve bağıl nemini) incelemiştir. CO konsantrasyonu düzeyi kabin içerisinde emisyonuna sebep olabilecek bir kaynak bulunmadığından yolcu kabinine olan hava sızıntısı ile ilgili iken, CO_2 düzeyi, iklimlendirme sistemi solunum ile ortaya çıkan bu emisyonu seyrelttiği için mekanik havalandırma oranı performansı üzerine belirleyici olarak alınmıştır. Solunabilir asılı partiküllerden PM_{10} düzeyi ise kabinin filtrasyon sisteminin verimliliğini göstermektedir. Klimalı otobüslere sabit pencereler takılarak dış havanın pencerelerden kabine sızması engellenmiştir. Dış hava sadece kapılardan sızmış ve taze hava girişi olmuştur. Klimasız otobüslerde ise açılabilir pencereler ile doğal havalandırma sağlanmıştır. Tablo 1.' den de görülebileceği üzere, tünel içerisinde yolculuk sırasında ölçülen otobüs içerisindeki CO konsantrasyonu klimalı otobüslerde 2.9 ppm iken klimasız otobüslerde bu değer en yüksek seviye olarak 12 ppm değerlerine yükselirken, ortalaması 4.6 ppm olarak tespit edilmiştir. Otobüs tünel içerisinden geçerken, CO ve PM_{10} gibi dış hava kaynaklı kirlenmelerin konsantrasyonu klimasız araçlarda daha yüksek olurken, araç ister klimalı ister klimasız olsun tünel içerisinde bu kirlenici konsantrasyonları normal yol koşullarına göre yüksek çıkmıştır. CO_2 konsantrasyonu düzeyleri ise, emisyonun sebebi insan kaynaklı solunum olduğu için tünel içi veya normal yol koşulunda çok fazla

değişiklik göstermemekle birlikte, klimalı araçta aynı havanın resirkülasyonu sebebiyle daha yüksek konsantrasyonların oluştuğu gözlenmiştir. Dış sıcaklığın 28 – 32 °C ve bağıl nemin %70-85 olduğu yaz koşullarında otobüs içi ısı çevre değerlendirildiğinde ise, klimalı otobüslerde sıcaklığın ortalama 24 °C ve bağıl nemin %59 seviyelerinde olduğu ve ısı konforun sağlandığı görülmüştür. Ancak klimasız otobüslerde iç ortam ısı şartları dış şartlara bağlı olarak değişkenlik göstermiştir. Klimasız otobüslerde otobüs içi sıcaklık 29 °C ile 38 °C arasında değişirken ortalama 34 °C sıcaklık ve ortalama %66 bağıl nemde olduğu ölçülerek tespit edilmiştir. Aynı çalışmada tünel öncesi, tünelde ve tünel sonrası yolculuk periyodu boyunca kirletici konsantrasyonlarının değişimi de hem klimalı hem de klimasız otobüsler için incelenmiştir (Şekil 11). İncelenen klimalı otobüslerin dizaynı soğutma yükünü düşürmek için büyük orandaki havanın resirkülasyonuna dayanmaktadır. Sızıntı ile giren hava da sınırlı olduğu için, tünelde yolculuk esnasında sızan hava ile taşınan kirleticiler uzun süre içeride kalmakta ve birikme yapmaktadır. Bunun sonucu olarak da tünelden çıkıştan sonra kirletici konsantrasyonları bir miktar yükselmektedir. Şekil 11.' den CO₂ konsantrasyonları incelenire klimalı otobüsler için yolculuk şartlarının (tünel içi veya dışı) değerleri etkilemediği görülebilmektedir. Ancak klimalı araçlardaki bu konsantrasyonun klimasızlara göre yüksek olduğu açıkça görülebilmektedir. CO ve PM₁₀ konsantrasyon düzeylerinin klimalı otobüslerdeki değişimi ise oldukça dikkat çekicidir. Çünkü bu konsantrasyonlar tünelde yolculuk sırasında en yüksek değerlerine çıkmaktadır. Araç tünelden çıkınca ise değerler eski değerlerine geri dönmektedir. Araştırmacılar bu bulgulardan, otobüslerde klima olmasının, özellikle tünellerde yolculuk sırasında oluşan yüksek kirletici konsantrasyonlarından yolcuların korunması yönünde etkili olduğu sonucunu çıkartmışlardır. Klimalı otobüslerde de tünellerde otobüse sızan hava nedeniyle bir miktar kirleticinin kabinde birikim yaptığı ve tünel çıkışında bir miktar arttığı da unutulmaması gerektiği vurgulanmaktadır.

Tablo 1. Klimalı ve klimasız otobüsler içinde tünel veya normal yol şartlarında ölçülen hava parametrelerinin sonuçları [13].

Otobüs	Yol	Denek Sayısı	CO ₂ (ppm)		CO (ppm)		PM ₁₀ (mg.m ⁻³)	
			Ort.	Aralık	Ort.	Aralık	Ort.	Aralık
Klimalı	Tünelde	55	1722	703-3917	2.9	1.0-6.0	0.113	0.018-0.192
Klimasız	Tünelde	66	820	516-1256	4.6	1.0-12.0	0.423	0.141-1.098
Klimalı	Normal	55	1657	680-3837	2.6	1.0-6.0	0.109	0.019-0.218
Klimasız	Normal	66	611	493-1323	2.1	1.0-7.0	0.181	0.059-0.638

Song ve ark. [14], yolcu hareketlerinin otobüs içerisinde partiküler madde maruziyetine etkisini incelemişlerdir. Çalışmada, otobüs içerisinde partiküler madde maruziyetlerinin yüksek olduğu bilinmesine rağmen bu yüksek maruziyeti etkileyen faktörlerin ve yolcu hareketliliğinin potansiyel rolünün ne olduğunun belirsiz olduğundan bahsedilmektedir. Bu amaç doğrultusunda, otobüs iç ve dış ortamında 0.3 – 15 µm arası partiküler madde konsantrasyonu ölçülerek yolcu hareketliliği faktörünün etkisi araştırılmıştır. Tablo 2.' den de görülebileceği üzere, ölçülen partiküler madde konsantrasyonları otobüs içerisinde otobüs dışına göre oldukça yüksektir ve iç – dış kirletici oranı partikül boyutu yükseldikçe artmaktadır. Araştırmacılar bu bulgulardan, özellikle PM₁₀ gibi kaba kirleticilerin iç – dış oranının yüksek olmasından, hem kirleticinin yolcu hareketleriyle tekrar süspansiyonuna hem de yolcular üzerinde bulunan kalıntıların dağılmasına sebep olarak konsantrasyonlar üzerinde önemli derecede etken olduğu sonucuna varmışlardır. Aynı iç – dış kirletici oranının çeşitli ortamlardaki değerleri de çalışmada sunulmuştur. Otobüslerde bu oranın 7.66 değerlerine çıktığı vurgulanırken, sınıflarda farklı şartlarda 2.4 – 4.8 arasında olduğu, konutlarda ise 1 – 3.9 arasında değiştiği bahsedilerek, kişilerin hareketliliğinin konsantrasyonları önemli derecede etkilediği ve dikkate alınması gerektiği vurgusu yapılmıştır.



Şekil 11. Tünel öncesi, tünelde ve tünel sonrası yolculuk sırasında kirletici konsantrasyonlarının değişimi (AC: klimalı, nAC: Klimasız) [13].

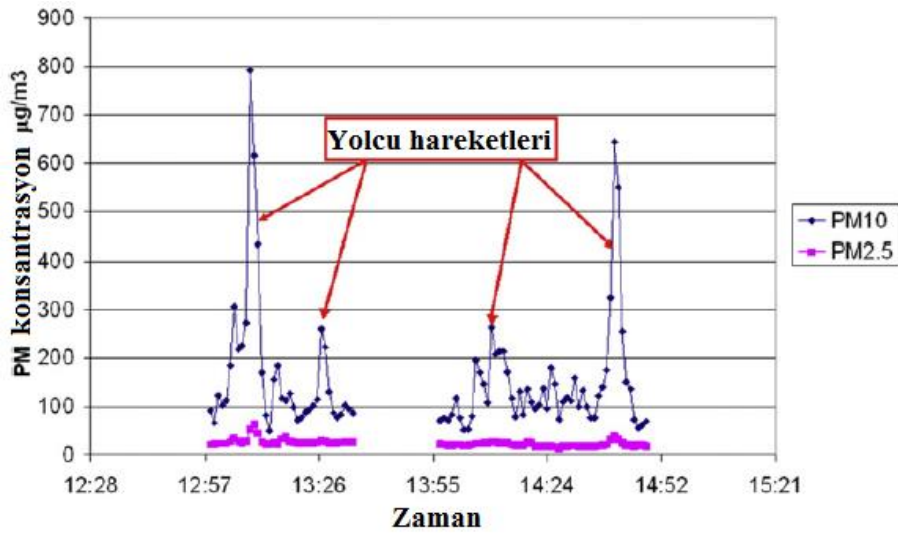
Tablo 2. Çeşitli boyutlarda partiküler maddeler için otobüs içi ve dışı konsantrasyon miktarı oranları [14].

PM boyutu (µm)	İç – dış kirletici oranı	
	Pencere açık	Pencere kapalı
0.75 – 1.0	1.53	2.16
1.0 – 2.0	1.55	2.48
2.0 – 3.5	1.78	3.30
3.5 – 5.0	4.51	8.95
5.0 – 7.5	6.35	12.51
7.5 – 10.	9.89	18.80
10 – 15	24.13	34.49

Zhang ve ark. [15] rölantide çalışan okul otobüsleri içerisinde ve çevresindeki ultra ince partikül (çapı 100 nm den küçük) konsantrasyonları üzerine çalışma yapmışlardır. Rölantide çalışan okul otobüslerinin çocukların dizel yakıt atığına maruziyetini arttırsa da çocukların ultra ince partiküllere maruziyetinin gerek otobüs içerisinde gerekse otobüs çevresinde ne boyutta olduğunun tam anlamıyla bilinmediği esastan yola çıkarak bu çalışmayı yapmışlardır. Çalışmada 9 okul otobüsü ele alınmış ve emisyon kaynaklarının, rüzgar yönünün ve pencere pozisyonunun değiştiği 5 farklı senaryo simüle edilmiştir. Çalışmanın amacı rölantide çalışmanın otobüs içi ve çevresinde hem ultra ince partikül hem de PM_{2.5} konsantrasyonlarına etkisini incelemek olarak tayin edilmiştir. Otobüsün çalışması ile birlikte otobüs çevresindeki toplam partikül sayısı konsantrasyonunun keskin bir şekilde yükseldiği gözlenirken, rölantide çalışmanın okul otobüsleri içerisindeki ultra ince partikül sayısı konsantrasyonu üzerine etkisinin rüzgar yönü ve pencere pozisyonuna bağlı olduğu tespit edilmiştir. Pencere

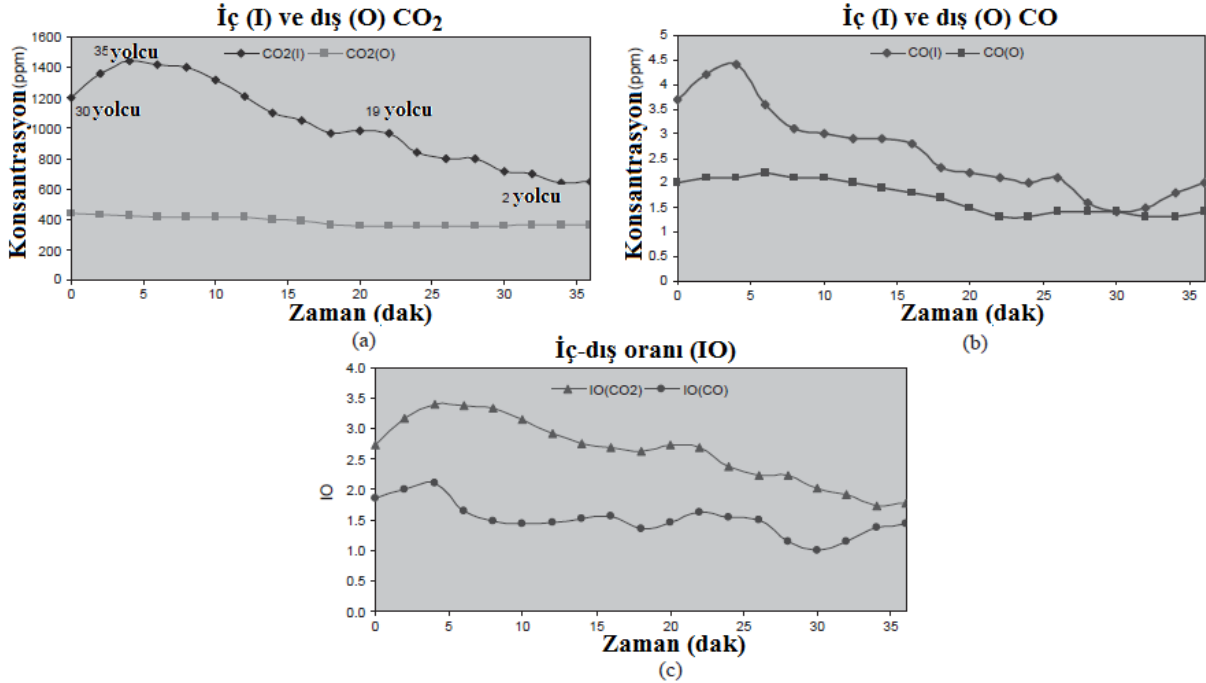
pozisyonun etkisi rüzgarın yönüne bağlı iken, rüzgar yönünün önemli derecede etken olduğu sonucuna varılmıştır. Rölantide çalışmada kabin içerisinde 10 – 30 nm boyutlarında ultra ince partikül konsantrasyonlarının önemli ölçüde yükseldiği ancak PM_{2.5} konsantrasyonlarında önemli bir değişim gözlemlenmemiş ve PM_{2.5} konsantrasyonlarının dizel egzoz partikülleri maruziyeti için önemli bir indikatör olmadığı sonucuna varılmıştır.

Tartakovsky ve ark. [16], araçlar (binek araçlar ve otobüsler) içerisinde partiküler kirlenmeler ve bunların seyreltilmesi üzerine çalışmışlardır. Binek arabalar içerisinde kabin hava temizleyiciler yerleştirip, etkilerini ele almışlardır. Kabin hava temizleyiciler dış havayı alıp, filtreleyen ve içeriye gönderen bir yapıda olup aracın arka tarafına yerleştirilmiştir. Bahsi geçen hava temizleyiciler ultra ince parçacık konsantrasyonlarında %95 - 99 mertebelerinde azalma sağlamış, kabin içi CO₂ değerleri de standartlarda verilen maksimum değerlerin altına düşmüştür. Havanın resirküle edildiği halde çalışmada denenmiş, partiküler konsantrasyonun en düşük seviyede kaldığı tespit edilse de çok kısa sürede CO₂ konsantrasyonunun yükseldiği görülmüştür. Halk otobüslerinde de ölçümler yapılmış, otobüs içi PM₁₀ konsantrasyonlarının binek araçlara nazaran çok yüksek olduğu tespit edilmiştir. PM₁₀ konsantrasyonundaki bu yüksekliğin sebebinin otobüs iç yüzeyleri (özellikle koltuklar) ve yolcular üzerinde kalan birikintilerin yolcu hareketleri esnasındaki tekrar süspansiyonu nedeniyle olduğu da çalışmada vurgulanmıştır. Otobüs içerisinde ölçülen partiküler madde konsantrasyonları Şekil 12.'de sunulmuş olup, yolcu hareketliliği ile kaba parçacıklar olan PM₁₀ konsantrasyonunun yükseldiği görülebilmektedir. Aynı çalışmada araç içerisinde sigara içilmesinin PM_{2.5} konsantrasyonlarını önemli bir biçimde arttırdığı da gözlemlenmiştir.



Şekil 12. Otobüs içerisindeki partiküler madde konsantrasyonunun anlık değişimi [16].

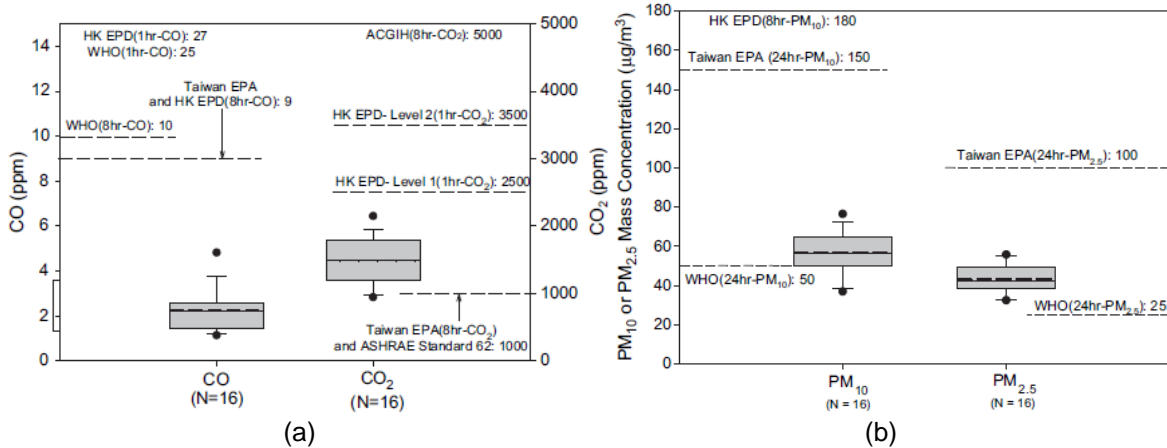
Chan [17] otobüs yolcularının maruz kaldığı CO ve CO₂ konsantrasyonlarını Hong Kong' deki farklı rotalarda (hem şehir içi hem de kırsal kesime doğru) hem klimalı hem de klimasız araçlar için incelemiştir. Hem otobüs içi hem de otobüs dışındaki kirlenici konsantrasyonları tespit edilmiştir. Klimalı otobüslerde maruz kalınan CO₂ seviyesinin otobüsün şehir içi veya kırsalda yol almasından bağımsız olarak sadece otobüsteki yolcu sayısına bağlı olduğu sonucuna varılmıştır. Ölçümler sonucunda CO₂ seviyesinin klimalı otobüsler tamamen dolu olduğu zaman dış ortamdaki konsantrasyonun 10 katına ulaşabildiği ve tehlikeli olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Diğer taraftan klimasız otobüslerde CO ve CO₂ düzeylerinin daha iyi hava değişiminden dolayı düşük kaldığı gözlemlenmiştir. Kırsal kesime yolculuk sırasında elde edilen ölçümler Şekil 13.'de sunulmuştur. Chan ve Chung [18] ise araştırmalarında binek bir aracın 4 farklı güzergâhta (otoyol, kırsal, şehir içi ve tünel içi) 3 farklı havalandırma modu (hava resirkülasyonlu klimalı, taze havalı klimalı ve doğal havalandırma) için kabin içi ve dışı CO ve NO (nitrojen oksit) değişimlerini vermişlerdir. Bu çalışmada otobüslerden bahsedilmediği için burada detaylandırılmamıştır.



Şekil 13. Kırsal rotada seyreden klimalı bir otobüs için kirlenici konsantrasyonlarının değişimi: (a) CO₂, (b) CO ve (c) İç – dış oranı [17].

Hsu ve Huang [19] global olarak çok fazla şehirde halk otobüsleri içerisinde kirlenicilerin incelenmesine rağmen genel olarak otobanlarda seyir halinde olan uzun yol otobüsleri üzerine bu konuda araştırma yapılmadığını vurgulamışlar ve çalışmalarında Tayvan' da uzun yol otobüsleri içerisindeki uçucu organik bileşikler (VOCs), CO, CO₂ ve partiküler madde düzeylerini incelemişlerdir. İncelenen otobüsler 12 m uzunluğunda, 2.4 m genişliğinde ve 3.3 m yükseklikindedir. Yapılan deneysel çalışmalarda ortalama 14 yolcu ile yaklaşık 300 km mesafede ortalama 4 saat 23 dakika süren yolculuklar ele alınmıştır. Yolculuk süresinin yaklaşık %15-20 lik dilimi yerel caddelerde geçmiştir. Yolculuk esnasında iç sıcaklık otomatik olarak klima sistemi ile kontrol edilmiş olup, tüm pencereler kapalı tutulmuştur. Benzen, Tolüen, Etil Benzen, Ksilen (BTEX), formaldehit, CO, CO₂, PM₁₀ ve PM_{2.5} konsantrasyonları yolculuk sırasında sürekli ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar uzun yol otobüslerindeki kirlenici düzeylerinin şehir içi otobüstekilere nazaran genel olarak daha düşük olduğunu göstermiştir. Bu sonuç sürüş hızı ile otobanın coğrafi ve meteorolojik özelliklerine dayandırılmıştır. Otobüs içerisinde ölçülen BTEX düzeylerinin aromatik bileşikler için iç ortam VOC rehberinde önerilenlerden yüksek olduğu tespit edilmiş olup, bunun muhtemel sebebin kabin içindeki iç döşemelere dayandırılabilceği vurgulanmıştır. Yine de ölçülen VOCs düzeylerinin daha önceki çalışmalarda şehir içi otobüsler içinde ölçülen değerlerden düşük olduğu ve bunun sebebinin şehirler içindeki ağır trafik yoğunluğundan veya araç egzozlarının zayıf dispersiyonundan olabileceği çalışmada belirtilmiştir. Uzun yol otobüsünde ölçülen yüksek BTEX oranları ise iç dekorasyon emisyonlarına (boya ve yüzey kaplaması gibi) ve koltuk emisyonlarına (yapay deri koltuklar gibi) dayandırılmıştır. Koltuklarda kullanılan poliüretan köpük, polipropilen plastik, polivinil klorür (PVC) plastik, doğal veya sentetik deri gibi çeşitli malzemelerin Tolüen, Etilbenzen ve Ksilen için emisyon kaynağı olarak belirtilmektedir. Bunun yanı sıra yüksek BTEX oranlarının sebeplerinin birinin de kullanılan temizlik maddeleri kaynaklı olabileceği fakat bununla ilgili yapılan deneysel çalışmada yeterli kanıtın olmadığı ancak daha önceki çalışmalara dayandırılarak bunların etkin bir potansiyel olduğu çalışmada yer almaktadır. Ortalama formaldehit konsantrasyonu da 11.6 ppb olarak ölçülmüş olup, Tayvan için ölçülen ortalama dış ortam formaldehit düzeyi olan 6.0 ppb' nin üzerinde olduğu görülmüştür. Buna sebebin ise temizlik maddeleri, yapıştırıcılar ve yapı malzemeleri gibi iç kaynaklı olabileceğinden bahsedilmiştir. Uzun yol otobüsü için yapılan ölçümler sonucu bulunan ortalama CO ve CO₂ konsantrasyonları ile bunların çeşitli standart ve rehberlere göre durumu ise Şekil 14.- a' da sunulmuştur. Ölçülen CO düzeyi çeşitli rehber ve standartlarda sunulan düzenlemelerin altında olduğu gibi farklı çalışmalarda elde edilen şehir içi otobüsler içinde tespit edilen değerlerin de çok altında olduğu tespit edilmiştir. Bu düşük CO konsantrasyonunun sebebinin de meteorolojik ve yoğun olmayan trafik kaynaklı olduğundan

bahsedilmektedir. Uzun yol otobüsleri içerisinde ölçülen ortalama CO₂ konsantrasyonunu 1493 ppm'dir. Çeşitli standart ve rehberlerdeki düzenlemeler ile karşılaştırıldığında ise bu değer bazı düzenlemelerin üzerinde bazılarının ise altında kalmaktadır. Ölçülen ortalama konsantrasyonun endüstriyel olmayan alanlar için ASHRAE Standart 62' de verilen 1000 ppm değerinin üzerinde olduğu vurgulanarak, insan kaynaklı bu konsantrasyonun sebebi, şehir içi otobüslerden farklı olarak uzun yol otobüslerinin uzun süre kapılarını açmamasına bağlanmakta ve yetersiz havalandırmadan dolayı yolcu solunumu ile birlikte oluşan birikim kaynaklı olduğu belirtilmektedir. Çalışma sonuçlarında, CO₂ düzeyini düşürmek için uzun yol otobüslerinde hava değişim oranının artırılması gerekliliği sonucu önemle vurgulanmaktadır. Otobüs içerisindeki PM₁₀ ve PM_{2,5} partiküler madde ortalama düzeyleri ile bu değerlerin mevcut rehber ve standartlardaki düzenlemeler ile karşılaştırılması da Şekil 14.- b' de verilmiştir. Her iki kirlenici düzeyinin de Dünya Sağlık Örgütü (WHO) hava kalitesi rehberinde önerilen değer üzerinde ancak Tayvan Çevre Koruma Yönetimi hava kalitesi rehberinde önerilen değer altında kaldığı tespit edilmiştir. Hem PM₁₀ hem de PM_{2,5} düzeylerinin uzun yol otobüslerinde şehir içi otobüslerdekine nazaran düşük olduğu, bunun sebebinin ise şehir içi caddelere nazaran otoyollardaki düşük trafik yoğunluğu ve meteorolojik koşullar olduğu bunun yanı sıra uzun yol otobüslerindeki düşük yolcu hareketliliği sonucu kirlenimin yeniden süspansiyonunun minimum düzeyde olduğundan kaynaklandığı çalışmada belirtilmektedir. Ayrıca otoyollardaki yüksek araç hızlarının oluşturduğu hava türbülanslarının da bu sonuçta etken olduğu söylenmektedir. Çalışmada uzun yol otobüslerinde görülen PM boyut dağılımı da incelenmiş ve bu otobüslerdeki PM boyutlarının %99.8' inin 2.5 µm' nin altında olduğu ve uzun yol otobüsleri için bu çok ince partiküler madde dağılımlarını, kaynaklarını ve etkilerini incelemek gerektiği de vurgulanmıştır.



Şekil 14. Çeşitli ortalama kirlenici konsantrasyonları ve mevcut düzenlemeler ile karşılaştırılması: (a) CO ve CO₂, (b) PM₁₀ ve PM_{2,5} [19].

5. PİYASADA MEVCUT OTOBÜS KLİMA SİSTEM ÖZELLİKLERİ

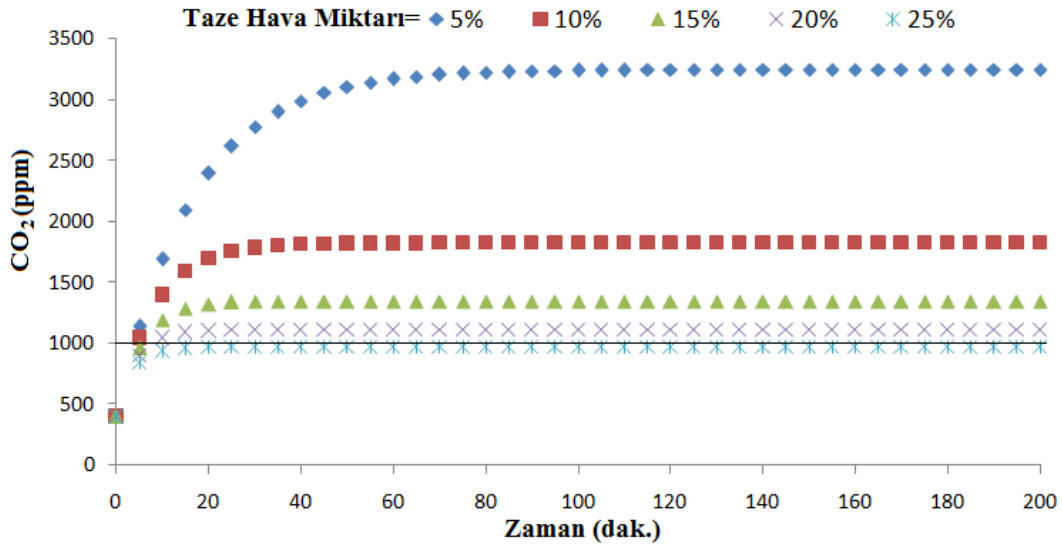
Piyasada mevcut otobüs klima üreticilerinin bir kısmının web sayfalarından yapılan araştırmada boyutları ve kullanılacakları iklim şartları farklı olan çeşitli soğutma / ısıtma kapasitelerine ve hava debilerine sahip otobüs klimalarının üretildiği görülmekle birlikte, kullanılan taze hava miktarlarına yönelik kesin bir bilgiye ulaşılamamıştır. Klimaların soğutma yükleri 35 °C dış sıcaklıkta 24 kW ile 37.5 kW arasında değişirken, 40 °C' nin üzerindeki dış sıcaklıklar için ise yaklaşık 45 kW soğutma kapasiteli cihazlar görülebilmektedir. Cihazlardaki hava debileri düşük dış ortam sıcaklıkları için üretilenlerde 4600 – 6900 m³/ h civarında iken yüksek dış ortam sıcaklıkları için üretilen yüksek kapasiteli cihazlarda 8400 - 17100 m³/h arasındadır [20,21,22]. Bazı tiplerde sıfır taze hava veya %100 taze hava ibareleri mevcut iken, belirli bir oranda % ile taze hava miktarlarının belirtildiği bir kataloga ulaşılamamıştır.

6. ŞEHİRLERARASI OTOBÜSLER İÇİN TAZE HAVANIN ÖNEMİ

Geniş literatür araştırmasından da görüleceği üzere otobüs içerisindeki iç hava kalitesi sıklıkla şehir içi kullanımlar halinde ele alınmış olup, Hsu ve Huang [19] tarafından yapılan uzun yol otobüsleri iç hava kalitesi incelemesi önemli bulguları ortaya koymuştur. Şehirlerarası yolculuklarda gerek coğrafik gerek meteorolojik sebepler ve daha hafif trafik yoğunluğu doğrultusunda dış kirletici kaynakların azalması ile otobüs içinde şehir içlerine nazaran daha düşük BTEX, CO ve PM konsantrasyonlarını ortaya çıkartmaktadır. Bu durumda şehirlerarası otobüslerde iç hava kalitesi için en önemli parametre insan solunumu kaynaklı CO₂ konsantrasyonu olmaktadır. Bu da klimatize edilen araçlarda direkt olarak taze hava miktarına bağlıdır. Bu çalışmada Tablo 3.' de sunulan parametreler ışığında Kalema ve Viot [23] tarafından önerilen metot ile zamana bağlı olarak farklı taze hava girişleri için CO₂ miktarındaki değişimin ne olacağı hesaplanarak Şekil 15.' de verilmiştir. Muhtemel CO₂ konsantrasyonları hesaplanırken taze hava miktarları klima hava debisinin %5 – 25 aralığında %5 artışlar ile tespit edilmiştir. Bu yüzdeler dahilinde elde edilen kişi başına düşen taze hava miktarları da 2 - 10 lt/s-kişi arasında 2 lt ile artış göstermektedir. Şekilden açıkça görüldüğü üzere, otobüslerdeki dar hacimdeki insan yoğunluğu sebebiyle CO₂ konsantrasyonları hızla 1000 ppm değerlerine ulaşmakta ve aşmaktadır. ASHRAE Standart 62'de endüstriyel olmayan ortamlar için önerilen üst sınır olan 1000 ppm değerine göre yorumlandığında şehirlerarasında seyahat eden bir otobüsün 3 – 4 saat de bir mola vereceği düşünülürse en azından %25 taze hava miktarının (10 lt/s-kişi) yeterli olacağı görülmektedir. Yine de otobüsün her zaman tam dolu olmayacağı gerçeği yanı sıra ısı konfor ve enerji verimliliği de düşünüldüğünde %20 taze hava miktarının da (8 lt/s-kişi) kabul edilebilir olduğu Şekil 15.' den açıkça görülebilmektedir.

Tablo 3. Otobüs içerisinde görülebilecek CO₂ konsantrasyonu hesabında kullanılan veriler.

Veri	Değer
Yolcu ortalama vücut ağırlığı	80 kg
Yolcu ortalama boyu	180 cm
Yolcu metabolik aktivite düzeyi	1.2 met
Yolcu sayısı	48 kişi
Otobüs boyutu (boy / en / yükseklik)	12 m / 2.4 m / 3.3 m
Klima hava debisi	6900 m ³ /h



Şekil 15. Farklı taze hava miktarları için otobüs içerisinde görülebilecek CO₂ konsantrasyonu düzeylerinin zamana bağlı değişimi.

SONUÇ

Şehirlerarası otobüs seyahatlerinde yolcuları etkileyen titreşim gibi fiziksel, koltuk konforu gibi ergonomik etmenler var iken ısı konforunun sağlanması ve temiz bir iç ortam havasını temini konforlu bir yolculuk için son derece önemlidir. Bu çalışmada, otobüs içerisinde ısı konforu ve iç hava kalitesi üzerine yapılan literatür taraması ve hesaplar doğrultusunda elde edilen sonuçlar ve yapılabilecek öneriler aşağıda sıralanmıştır:

- 1- Otobüslerde iç hava kalitesinin artırılması amacıyla önerilen deplasmanlı havalandırmanın ısı konforuna etkisi de mutlaka araştırılmalıdır.
- 2- Şehir içinde kullanılan otobüslerde trafik yoğunluğu, yolcu hareketleri, meteorolojik durum gibi çok sayıda etken varlığı nedeniyle otobüs iç ortam hava kalitesini bozan konsantrasyonlar belirlenebilse de bunların sınırlandırılmasının son derece güç olduğu görülmüştür.
- 3- Gerek şehir içi gerekse şehirlerarası otobüs yolculuklarında iç hava kalitesini etkileyen çok sayıda faktörün (otobanda yolculuk, caddede yolculuk, tünel de yolculuk gibi güzergah, trafik yoğunluğu ve meteorolojik durum, otobüs koltuk ve yapı malzemesinde kullanılan farklı malzemelerden emisyonlar, kullanılan temizlik malzemeleri, yolcu hareketliliği gibi) varlığı temiz bir iç ortam havasını temini için otomasyon sistemlerinin kullanılmasını da kısıtlamaktadır.
- 4- Klimatize edilen şehirlerarası otobüsler için iç hava kalitesinin iyileştirilmesinde en önemli parametre insan kaynaklı kirletici olan CO₂ üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu da direkt olarak klima sisteminin temin ettiği taze hava miktarı ile ilişkilidir. %25 taze hava miktarı (10 lt/s-kişi) ideal gibi görünse de enerji verimliliği açısından %20 taze hava miktarı da (8 lt/s-kişi) uygun olabilmektedir.
- 5- Klimatize edilen ortamlarda alınacak taze hava ile temiz bir iç ortam sağlanırken ısı konforunun bozulmaması ve enerji verimliliği sağlanması için otobüslere uygun ısı geri dönüşüm cihazları tasarlanmalı ve kullanılmalıdır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmayı yapmamı teşvik eden Prof. Dr. Macit Toksoy ve solunum CO₂ hesaplama programını kullanmama izin veren Prof. Dr. Sait C. Sofuoğlu Hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

KAYNAKLAR

- [1] ANSI / ASHRAE Standard 55 – 2004, “Thermal environmental conditions for human occupancy”, 2004.
- [2] ERKAN, N., “Ergonomi” , Milli Prodüktivite Merkezi Yayınları No: 373, 1997.
- [3] ASHRAE handbook – Fundamentals, chapter 8., Atlanta: American Society of Heating, Refrigeration and Air-conditioning Engineers. 29p., 1993.
- [4] ASHRAE Standart 62 – 2004, “Ventilation for acceptable indoor air quality”, 2004.
- [5] İSİSAN ÇALIŞMALARI, “Klima Tesisatı”, No.305, 2001.
- [6] MANSOUR, M.K., MUSA, M.N., HASSAN, M.N.W., SAQR, K.M., “Development of novel control strategy for multiple circuit, roof top bus air conditioning system in hot and humid countries”, Energy Conversion and Management, 49: 1455-1468, 2008.
- [7] MEGEP, “Frigorifik araç ve araç kliması montajı”, Milli Eğitim Bakanlığı, 2008.
- [8] VALLARO, R.D.L., EVANGELISTI, L., BATTISTA, G., GORI, P., GUATTARI, C., FANCHIOTTI, A., “Bus for urban public transport: energy performance optimization”, Energy Procedia, 45: 731-738, 2014.
- [9] ZHU, S., DEMOKRITOU, P., SPENGLER, J., “Experimental and numerical investigation of micro-environmental conditions in public transportation buses”, Building and Environment, 45:2077-2088, 2010.

- [10] ZHU, S., SREBRIC, J., SPENGLER, J.D., DEMOKRITOU, P., “An advanced numerical model for the assessment of airborne transmission of influenza in bus microenvironments”, *Building and Environment*, 47: 67-75, 2012.
- [11] SHEK, K.W., CHAN, W.T., “Combined comfort model of thermal comfort and air quality on buses in Hong Kong”, *Science of the Total Environment*, 389: 277-282, 2008.
- [12] CHIO, C.P., CHENG, Y.H., LING, M.P., CHEN, S.C., LIAO, C.M., “Quantitative estimation of excess mortality for drivers and passengers exposed to particulate matters in long-distance buses”, *Atmospheric Environment*, 51: 260-267, 2012.
- [13] MUI, K.W., SHEK, K.W., “Influence of in-tunnel environment to in-bus air quality and thermal condition in Hong Kong”, *Science of the Total Environment*, 347: 163-174, 2005.
- [14] SONG, W.W., ASHMORE, M.R., TERRY, A.C., “The influence of passenger activities on exposure to particles inside buses”, *Atmospheric Environment*, 43: 6271-6278, 2009.
- [15] ZHANG, Q., FISCHER, H.J., WEISS, R.E., ZHU, Y., “Ultrafine particle concentrations in and around idling school buses”, *Atmospheric Environment*, 69: 65-75, 2013.
- [16] TARTAKOVSKY, L., BAIBIKOV, V., CZERWINSKI, J., GUTMAN, M., KASPER, M., POPESCU, D., VEINBLAT, M., “In-vehicle particle air pollution and its mitigation”, *Atmospheric Environment*, 64: 320-328, 2013.
- [17] CHAN, A., “Commuter exposure and indoor-outdoor relationships of carbon oxides in buses in Hong Kong”, *Atmospheric Environment*, 37: 3809-3815, 2003.
- [18] CHAN, A.T., CHUNG, M.W., “Indoor-outdoor air quality relationships in vehicle: effect of driving environment and ventilation modes”, *Atmospheric Environment*, 37: 3795-3808, 2003.
- [19] HSU, D.J., HUANG, H.L., “Concentrations of volatile organic compounds, carbon monoxide, carbon dioxide and particulate matter in buses on highways in Taiwan”, *Atmospheric Environment*, 43: 5723-5730, 2009.
- [20] <http://www.safkar.com.tr/tr/urun/7/otobus-klimalari>
- [21] <http://www.coolertech.com.tr/otobus.php>
- [22] <http://www.spheros.com.tr/Ueruenler/Klima-Sistemleri/12-mt-uestue-Otobues.html>
- [23] KALEMA, T., VIOT, M., “Methods to reduce the CO₂ concentration of educational buildings utilizing internal ventilation by transferred air”, *Indoor Air*, 24: 71-80, 2014.

ÖZGEÇMİŞ

İbrahim ATMACA

1979 yılı Antalya doğumludur. 1999 yılında Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden Lisans, 2002 yılında Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalından yüksek lisans ve 2006 yılında aynı Enstitüden Doktora derecelerini aldı. 2007 yılında Akdeniz Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Termodinamik Anabilim dalına Yardımcı Doçent olarak atandı, 2014 yılında Doçent oldu. Güneş enerjisi destekli absorpsiyonlu soğutma sistemleri, güneş enerjisi destekli ısı pompası sistemleri, iklimlendirilen ortamlarda ısı konfor ve iç hava kalitesi, nanoakışkanların çeşitli ısı uygulama alanları, binalarda ısı yalıtımı ve enerji verimliliği, termoelektrik soğutuculu damıtma sistemleri, evaporatif soğutma ile iklimlendirme sistem verimlerinin iyileştirilmesi konularında çalışmalarını sürdürmektedir. Halen Akdeniz Üniversitesinde bölüm başkan yardımcısı olarak görevini sürdüren İbrahim Atmaca, evli ve bir çocuk babasıdır.