



t m m o b
m a k i n a
m ü h e n d i s l e r i
o d a s ı

KARBONDİOKSİT ve SINIFLAR

Macit TOKSOY

Sait Cemil SOFUOĞLU

MMO/736



t m m o b
m a k i n a
m ü h e n d i s l e r i
o d a s ı

KARBONDİOKSİT ve SINIFLAR

Macit TOKSOY
Sait Cemil SOFUOĞLU

Ekim - 2022

YAYIN NO: MMO/736
E-ISBN: 978-605-01-1547-5

tmmob
makina mühendisleri odası
Meşrutiyet Mah. Meşrutiyet Cad. No: 19 Kat: 6-7
Kızılay / ANKARA
Tel: (0312) 425 21 41 Faks: (0312) 417 86 21
e-posta: mmo@mmo.org.tr
<http://www.mmo.org.tr>

YAYIN NO: MMO/736
E-ISBN: 978-605-01-1547-5

Bu yapının yayın hakkı Makina Mühendisleri Odası'na aittir. Kitabın hiçbir bölümü değiştirilemez. MMO'nun izni olmadan kitabın hiçbir bölümü elektronik, mekanik vb. yollarla kopya edilip kullanılamaz. Kaynak gösterilmek kaydı ile alıntı yapılabilir.

Ekim 2022, İzmir

SUNUŞ

Makina Mühendisleri Odası olarak meslektaşlarımızın yararına, meslek alanlarının gelişimine katkıda bulunmanın yanı sıra can ve mal güvenliğini ilgilendiren konularda halkımızı bilinçlendirme amacıyla birçok yayının basımını gerçekleştirmek için çalışmalar yapmaktayız. Bunun yanında çalışmalarımızı, Odamızın temel ilkelelerinden hareketle toplum sorunlarını meslektaş sorunlarından ayırmadan, meslek alanımızla ilişkili sorunlara çözüm bulmak doğrultusunda da devam ettirmekteyiz.

İç çevre kalitesinin insan hayatındaki önemi birçok akademik bulgu ile ortaya konmuş olsa da geniş kitlelerin bu konuyu gündelik yaşamlarında yüksek önem sırasına yerleştirmeleri ancak COVID-19 salgını ile birlikte mümkün olmuştur. Bu konudaki hassasiyetimiz, kaçınılmaz şekilde diğer insanlarla bir arada olmamız gereken toplu ulaşım araçları, hastaneler, okullar, devlet daireleri vb. kamusal alanlar söz konusu olduğunda en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Buna paralel olarak salgının yavaşlatılması için ilk alınan önlemlerden biri okullarda yüz yüze eğitimin durdurulması olmuştur. Biyolojik risklerin de değerlendirildiği yeni araştırmalar, dersliklerin havalandırılmasının önemini ve mevcut sistemlerin okullarda iç hava kalitesini sağlamada başarısız kaldıklarını bir kez daha ve daha güçlü şekilde göstermiştir.

Odamız tarafında geçmiş dönemlerde basılmış olan “Okullarda İç Çevre Kalitesi Rehberi”nin devamı olarak nitelendirilebilecek “Karbondioksit ve Sınıflar” isimli bu kitapta, hem sağlık ve konfor üzerinde doğrudan olumsuz etkileri olan hem de iç çevre kalitesini ölçmek için temel bir gösterge olarak kullanılan karbondioksitin keşfinden başlayarak, insan vücudu üzerinde yarattığı fizyolojik değişimler ve etkiler, daha özel olarak öğrencilerin sağlığına ve akademik başarısına etkileri, sınıflardaki karbondioksit seviyesine ilişkin standartlar ve karbondioksit seviyesinin düşürülmesi için gerekli havalandırma sistemi tasarımına dair öneriler sunulmuştur. Kitabın yazarları Macit Toksoy ve Sait Cemil Sofuoğluna Odamız adına teşekkür ederiz. Kitabın öğretmenlerimiz, velilerimiz ve çocuklarımızın yanı sıra meslek ve meslektaşlarımıza katkı sağlaması, çalışmalarında rehber olması dileğimizle saygılar sunarız.

TMMOB MAKİNA MÜHENDİSLERİ ODASI

ÖNSÖZ ve ÖZET

Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği (TOBB), İklimlendirme Meclisi (İM) tarafından kurulan İç Hava Kalitesi Komisyonu, Türkiye için geliştirilecek iç hava kalitesi yönetmeliğine öneri geliştirmek üzere bir İHK - Yönetmelik Limit Değerler Çalışma Grubu oluşturmuştur. Çeşitli üniversitelerden akademisyenlerin ve uzmanların oluşturduğu Çalışma Grubu ilk olarak, okullarda/sınıflarda iç hava kirleticilerinin öğrenci sağlığını etkilemeyecek limit değerlerini önermeyi, ilk hedef olarak belirlemiş ve kendi içinde iç hava kirleticileri için iş bölümü yapmıştır. Bu kitap, Çalışma Grubu içinde yer alan Macit Toksoy ve Sait Cemil Sofuoğlu tarafından sınıf - karbon dioksit – öğrenci arakesiti üzerinde, mevcut literatürün değerlendirilmesi ile yapılan çalışmanın ürünüdür. Çalışma hem sınıflardaki müsaade edilebilir karbon dioksit konsantrasyonları ile ilgili önerileri geliştirmek hem de sınıflarda yapılacak havalandırma sistemleri tasarımı kriterleri için bir referans doküman oluşturmak hedefiyle gerçekleştirilmiştir.

Giderek yoğunlaşan araştırmalar, tüm dünyadaki okullarda büyük bir çoğunlukla yeterli havalandırmanın yapılmadığını, sınıflardaki iç hava kalitesinin çocukların fiziksel ve zihinsel (bilişsel) sağlığını ve performansını etkiler durumda olduğunu göstermektedir. COVID-19 salgını ile birlikte çocukların maruz kaldıkları gaz ve partikül kirliliklerinin yanında, havada asılı hastalık yapan biyolojik partikülleri (patojenlerin) iç hava kirliliğine, havalandırma tasarımı ve uygulaması perspektifinden yeni bir boyut değil ama bu boyuta ciddi bir derinlik kazandırmıştır. Yapılan araştırmalar, yeni yapılmış veya yeniden düzenlenmiş okullarda bile havalandırma sistemlerinin istenilen iç hava kalitesini sağlamada başarısız kaldıklarını göstermiştir. Bu başarısızlığın sebepleri tasarımda yetersizlik, uygun olmayan işletme, okul ve bina topluluklarında iç hava kalitesi konusunda eğitimsizlik olarak belirtilmiştir. Günümüzde gelinen nokta itibarıyla, en başta mühendislik pratiği açısından tasarıma, uygulamaya ve denetime daha geniş bir perspektifte rehberlik edecek şekilde bir havalandırma tanımı yapmayı gerektirmektedir. Bu çalışmada dış ve iç havada (sınıflarda) karbondioksit konsantrasyonları, insan ve öğrenci sağlığı üzerine etkileri incelenmiş, havalandırma tanımı yapılmış ve karbon dioksitin havalandırma tasarımı açısından önemi üzerinde durulmuştur. Nihai olarak da, göz önüne alınan ve değerlendirilen literatürün ışığında sınıflarda, çocukların fizyolojik sağlığı, bilişsel performansı ve akademik başarısı için, antropolojik metrikler göz önünde tutularak, CO₂ konsantrasyonunu ortalama 800 ppm'de tutacak havalandırma debisi sağlanması, dış hava CO₂ konsantrasyonu göz önüne alınarak ve sınıfta konsantrasyonunun 1000 ppm'in üzerine çıkmaması ölçütleriyle havalandırma sistem tasarımının yapılması önerilmiştir. Bu tasarımın tam olarak yapılabilmesi için de özellikle okulların çevresinde, zamana bağlı CO₂ dahil dış hava kirlilik haritalarının çıkarılması çok önemlidir. Önerilen 800 ppm – 1000 ppm değeri mutlak değerlerdir ve havalandırma sistemi tasarımı yapılırken okulun bulunduğu bölgenin CO₂ konsantrasyonu değişimleri göz önüne alınmalıdır.

İÇİNDEKİLER

| | |
|---|----|
| 1. Giriş..... | 11 |
| 2. Karbondioksit (CO ₂) – Tarihsel..... | 19 |
| 3. Dış ve İç Ortamlarda Karbondioksit Kaynakları | 21 |
| Vücut Yüzey Alanı – Dubois ve Dubois Eşitliği | |
| Solunum Katsayısı (R) | |
| Metabolizma Hızı (M) | |
| İnsanların Karbondioksit Emisyonu | |
| 4. Sınıflarda Karbondioksit Seviyeleri..... | 25 |
| 5. İç Ortamlarda Karbondioksitin İnsan Sağlığına ve Performansına Etkisi | 31 |
| 6. Sınıflarda Karbondioksitin Öğrenci Sağlığına ve Akademik Başarısına Etkisi | 43 |
| 7. Havalandırma, Standartlar, Limitler | 51 |
| 7A. Havalandırmanın Tanımı | 52 |
| 7B. Havalandırma Sistemi Tasarımında Karbondioksitin Önemi | 54 |
| 7C. Sınıf İç Hava Kalitesi Standartlarında ve Kodlarında Karbondioksit Konsantrasyonunun Limit Değerleri | 60 |
| 7D. Havalandırma Sistem Tasarım Yöntemleri ve Standartları Üzerine | 68 |
| 8. Tartışma ve Okullarda Karbondioksit İçin Limit Değer Önerisi..... | 73 |

BÖLÜM 1 GİRİŞ

“Kanat çok açık: Okul binaları, çocukların sağlıklarını, düşüncelerini ve performanslarını etkiler. Okul Binalarına yatırım, bizlerin kolektif geleceğimize yatırımdır. Şimdi hareket zamanı. Şimdi okullarda sağlık zamanı”.

“How School Buildings Influence Student Health, Thinking”
HARVARD, T.C.CHAN School of Public Health. 2018.

İç hava kalitesinin insanların sağlığı ve kendilerini iyi hissetmeleri ile ilgili önemi nedeniyle WHO Avrupa, 2010 yılında, insan hakları, biyomedikal etik ve ekolojik sürdürülebilirlik temel prensiplerinden sağlıklı iç hava hakkı üzerine, hakların, kişisel ve kurumsal sorumlulukların ifade edildiği dokuz adet prensip türetmiş ve yayımlamıştır. Bu prensiplerin ilki, “insanların sağlıklı olma hakkı altında, herkesin sağlıklı iç hava solumaya hakkı vardır” şeklinde ifade edilmiştir [1]. Sağlıklı iç havaya en fazla hakkı olanlar ise çocuklardır. Büyükler çocukların bu haklarına sahip çıkmalıdır. Okullar, evlerinden sonra çocukların büyük zaman geçirerek, zihinsel gelişimlerini gerçekleştirdikleri, sağlıklı iç havanın en öncelikli olarak sağlanması gereken binalardır.

10-12 Mart 2010 tarihlerinde İtalya'nın Parma kentinde, içlerinde Türkiye'nin de olduğu tüm Avrupa'dan 57 ülkenin temsilcileri, yine Dünya Sağlık Örgütü'nün Avrupa Bölümü^a şemsiyesi altında bir araya gelerek “**Bizler, zamanımızın temel çevre ve sağlık tehditlerine karşı hareket etmeye kararlıyız**” diyerek başladıkları bir deklarasyona imza atmışlar, takip eden on yılda, çevresel tehditlerin sağlık üzerine olumsuz etkisini azaltmak için söz vermişlerdir [2,3]. Deklarasyona imza atan ülkeler 2020 itibarıyla, tüm çocuklara güvenli su ve temizlik, sağlık, beslenme ve fiziksel aktivite imkanı, iyileştirilmiş iç hava kalitesi ve zehirli kimyasallardan arındırılmış bir çevre sağlamada eşit fırsat yaratma konusunda, ulusal programlar yürütme konusunda anlaşmışlardır. Bu deklarasyon bağlamında Avrupa ülkelerinde pek çok ülkede ulusal ve ülkelerin bir araya gelerek birlikte yürüttüğü uluslararası projeler gerçekleştirilmiştir [4,5].

WHO'nun iç hava kalitesi konusundaki hassasiyetinin haklılığı, farklı sekiz ülkede^b toplam 554 okuldaki 1105 sınıfta yapılan araştırma sonuçlarıyla görülmektedir. Araştırmanın yapıldığı ABD'deki okulların büyük çoğunluğunda (%87)'sinde, İngiltere, Fransa ve Çin'deki okulların tamamında uygun havalandırma söz konusu değildir [5]; üstelik ABD'de araştırmanın yapıldığı okulların tamamında mekanik havalandırma söz konusudur.

İç hava kalitesi havanın, bir hacimde yaşayan insanların fiziksel ve bilişsel sağlığı, konforu ve üretkenliği ile ilintili olan fiziksel, kimyasal ve biyolojik karakteristikleri olarak tanımlamıştır [6]. Bu çalışmanın çıkış noktası da, sınıflardaki iç hava kalitesini etkileyen bileşenlerden biri olan karbondioksitin (CO₂) öğrencilerin sağlığını etkileyen en küçük konsantrasyon seviyesini (limit değerini), mevcut literatür ışığında ve ülkeler pratiğinde önermektir. Böylelikle Türkiye'de sınıfların havalandırılması ilgili tasarım kriterlerinden birisinin tanımlanması hedeflenmektedir.

Herhangi bir binayı yaşayanlar için sağlıklı kılan dokuz özellikten^c biri havalandırmadır [7]. Havalandırma kısaca, bina içindeki havada çeşitli emisyonlar yoluyla biriken kirletici konsantrasyonlarının, ki kirleticilerden biri de insanların solunum yoluyla ortama verdikleri karbondioksittir, bina içine uygun dış havanın basılarak sağlıklı olma limit değerlerinin altına

^a European Region of the World Health Organization (WHO).

^b ABD, İngiltere, Fransa, Danimarka, Hollanda, Finlandiya, İtalya, Çin

^c Hava Kalitesi, Havalandırma, Aydınlatma ve Görüş, Gürültü, Su Kalitesi, Güvenlik, Toz ve Biyolojik Zararlılar, Nem, Isıl Sağlık

düşürülmesidir. Sağlıklı olma hali, farklı disiplinler ve otoritelerce farklı anlamlarda tanımlanabilir. ASHRAE çalışma grubu MTG.HWBE^d, Dünya Sağlık Örgütü (WHO)'nun "Sağlık sadece bir hastalığın veya sakatlığın olmaması değil, fiziksel, zihinsel ve sosyal olarak iyi olma halidir" şeklinde verilen "sağlık (Health)" tanımını benimsemiştir. Bu tanımın konfor, esenlik (wellness), iyi olma (well-being) terimleri için de aynen geçerli olduğu kabul edilerek, ASHRAE'nin tüm dokümanlarında "sağlık" kelimesinin WHO'nun bu tanımını taşıyacağı vurgulanmıştır [8]. Bu çalışmanın yazarları olarak, bizler de, bu çalışmada MTG.HWBE'nin yaklaşımını benimsiyoruz.

İç yaşam hacimlerindeki havanın, dış hava ile havalandırma yoluyla değiştirilerek sağlıklı hale getirilmesi, dış havanın sağlıklı olması ile doğrudan ilgilidir. Dış havanın sağlıklı, uygun olması ise, özel durumları nedeniyle havadaki bazı kirleticilerin bazı etkilerine duyarlı insan grupları da düşünülerek tanımlanmış Hava Kalitesi İndeksi (AQI^e) ile belirlenmektedir. Hava Kalitesi İndeksi yaygın hava kirleticileri (Ozon, PM10, PM2.5, NO, CO, SO₂) için ayrı ayrı, sayısal olarak belirlenmekte ve pratik uygulamalar için renk kodlu olarak ifade edilmektedir [9,10]. Hava Kalitesi İndeksi içinde CO₂ yer almamaktadır. Özel haller dışında, dış havadaki CO₂ konsantrasyonunun tipik olarak 300 ppm - 400 ppm aralığında olduğu, metropollerde ise 600 ppm - 900 ppm arasındaki yüksek değerlere ulaşabileceği izlenmektedir. Ortalama atmosferik konsantrasyon Mart 2022 'de 417 ppm değerine ulaşmıştır. 2060 yılında 600 ppm'in, 21. yüzyılın sonunda 1000 ppm'in üzerine çıkacağı öngörülmektedir [11,12]. Son yıllarda CO₂'in insan sağlığı üzerine etkisi üzerindeki araştırmalar giderek artmakta, 750 ppm üzerindeki konsantrasyonların insanların bilişsel performansını etkilediği üzerine sonuçlara rastlanmaktadır [13]. Günümüz itibarıyla sağlıklı dış hava için CO₂'in maksimum değerinin 750 ppm olması öngörülebilir. Ortalama atmosferik konsantrasyonunun giderek artması, özellikle kentlerimizde, CO₂'in sağlıklı yaşamı tehdit edeceğini göstermektedir. Ancak daha sonraki bölümlerde detaylı inceleneceği üzere, CO₂'in sağlık limit değeri için henüz üzerinde anlaşılabilir değer yoktur.

1950 yılında iki bilim insanı, Ernst L.Wyndner ve Evarts A. Graham, akciğer kanseri olanların %96.5 oranında bir kısmının, orta ve ağır sigara içen insanlar olduğunu yayımlamışlardır. Çalışma alanlarında ve kamusal kapalı alanlarda tütün ürünlerinin içilmesi, ilk defa 1995'de California Eyalatında, 1998'de Amerika'da, 2.1.2008'de de tüm kapalı mekanlarda Türkiye'de yasaklanmıştır. Binlerce iç hava kirleticisinin emisyon kaynağı olan tütün kullanımının, zararı neredeyse mutlak olarak gösterildikten 50 yıl sonra yasaklanması sağlanabilmiştir. CO₂'in 1000 ppm konsantrasyonu, en azından insan kaynaklı organik bileşenlerden oluşan koku konforu için bir ölçüt olarak 170 yıldır bilinmesine, 1960'lardan bu yana 1000 ppm üstü CO₂'in kendisinin insan sağlığı üzerinde etkili olduğu araştırmalarda belirlenmesine rağmen, 1000 ppm CO₂ konsantrasyonu (Pettenkofer Sayısı), ASHRAE tarafından bir sınır-limit değer olarak henüz önerilmemekte ve dile getirilmesinden de kaçınılmaktadır [14,15].

İç hava kalitesinin insan sağlığının üzerinde etkileri alanında en önemli oyuncu havalandırma değildir. Havalandırma terimine de farklı içerikte anlamlar yüklenilmektedir. Bu çalışmada havalandırma için, Bölüm 7A'a da verildiği üzere, aşağıdaki tanım önerilmektedir:

Havalandırma, yaşam hacimlerindeki diğer iç çevre konfor şartlarından (özellikle ısı ve akustik konfor) vazgeçmeden, biyolojik, kimyasal ve partikül kirliliğini, yaşayanların fiziksel ve bilişsel sağlığını ve performansını etkilemeyecek konsantrasyona, dış havanın ortama entegrasyonu ile düşürmek olarak tanımlanabilir. Bu tanımdaki entegrasyon iç ortamda bulunan insanların tümü için, kirlilik kaynağının iç ortamdaki yerine bağlı olmaksızın, bireyler arasında özel enfeksiyon, gaz ve partikül tünelleri yaratmadan, biyolojik, kimyasal ve partikül kirlilik konsantrasyonlarının, dış havanın insanlar için

^d Multidisciplinary Task Group (MTG) on the Effects on Health and Wellness of the Built Environment (MTG.HWBE) in 2018.

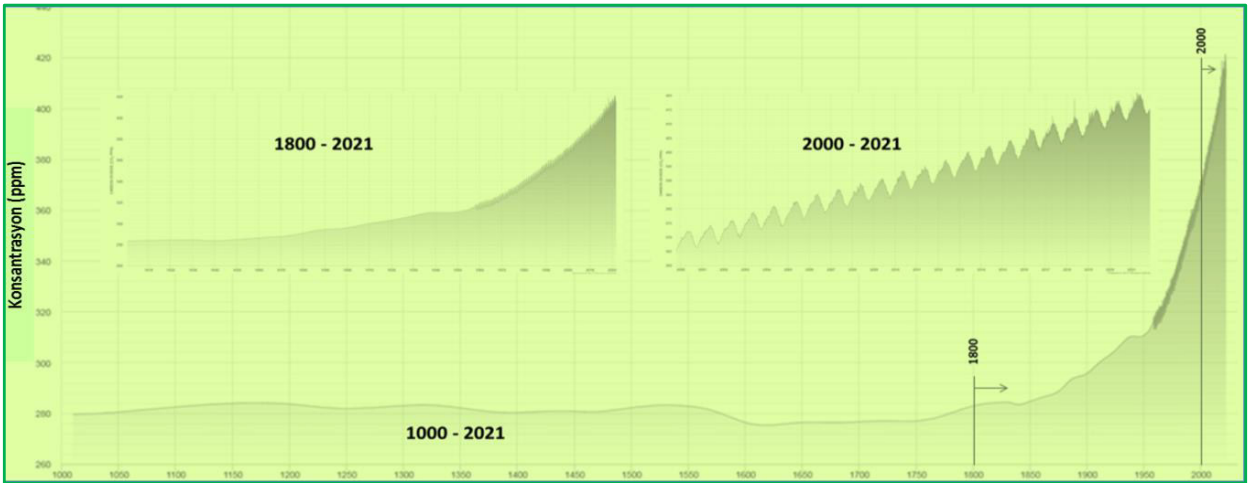
^e Air Quality Index

zararlı seviyede herhangi bir kirletici içermeyecek şekilde kullanılarak sağlık riski yaratmayacak şekilde düşürülmesidir. Entegrasyon havalandırma terminolojisiyle yüksek havalandırma etkinliği, düşük hava yaşı sağlamak demektir.

EPA ve Bilimsel Danışma Kurulunun yaptığı karşılaştırmalı risk çalışmaları sonucunda, iç hava kirliliği toplum sağlığı için 5 çevre riskinden biri olarak belirlenmiştir [16]. Son çeyrek yüzyılda, dış ve iç hava kalitesinin insan sağlığı ve performansına etkisi üzerine yoğunluğu gittikçe artan araştırmalar, hava kirliliğinin neden olduğu küresel çevre sorunları yanında, tüm dünyada özellikle kentlerde ve endüstriyel bölgelerde yaşayan insanların, COVID-19 gibi zaman zaman karşılaştığı patolojik salgınlardan daha yaygın sağlık tehditleriyle karşı karşıya kaldıklarını göstermektedir. Hava kirliliğinin genelde görünmez oluşu, insan vücuduna etkisinin yavaş ama progresif oluşu, hava kirliliğinin sebep olabildiği kanser gibi hastalıkların kök nedenlerin bulunmasının güç oluşu, bu araştırmalardan çıkan sonuçların genel olarak toplum ve toplum yöneticileri tarafından yeterince algılanmamasına neden olmaktadır. COVID-19, bu algılanmamada, görünür sonuçlarıyla bir kırılma yaratmış gibidir; Beyaz Saray Bilim ve Teknoloji Politikaları Ofisi, havada asılı patojenler yoluyla bulaşıcı hastalıkların önlenmesinde, havalandırmanın önemi üzerine ulusal ve uluslararası genişlikte, çevrim içi bir seminer yapmıştır. Bu çaba önemlidir. Çünkü:

- COVID-19 öncesi zamanın ABD Başkanı, Paris İklim Antlaşmasından ülkesinin çekildiğini ilk icraatlarından biri olarak ilan etmiştir [17];
- COVID-19 öncesinde de, sonrasında da tüm dünyada okullardaki iç hava kirliliği nedeniyle çocuklar sağlık ve performans sorunları yaşamaktaydılar;
- iç hava kirliliğinin temelini oluşturan dış hava kirliliği insanlar için sigara gibi zararlıdır.

İnsanlar genel olarak yaşamlarının büyük bir kısmını kapalı yaşam ortamlarından geçirirler. Bu kapalı hacimlerden biri de bir kısmı zorunlu olan eğitim kurumlarıdır. Bu çalışmanın öznesi özel olarak okullardaki/sınıflardaki karbondioksit kirliliğidir. Karbondioksit küresel ısınmaya neden olan bir sera gazıdır. Ancak burada göz önüne alınan karbondioksit, endüstriyel veya evsel proseslerden ortaya çıkan karbondioksit değil, metabolizmanın sonucu insanların solunum yoluyla iç ortamlara verdiği karbondioksittir. İç ortamlardaki karbondioksitin önemi, o ortamlarda bulunan insanların ürettikleri karbondioksitin dış ortamdaki karbondioksit seviyesinin üzerine eklenmesi ile konsantrasyonunun artmasından kaynaklanmaktadır. 19. yüzyılın ortalarına kadar ortalama atmosferik karbondioksit 280 ppm etrafında dalgalanırken, ikinci yarısından itibaren düzenli olarak artmaya başlamış, günümüzde yaklaşık 420 ppm seviyesine ulaşmıştır (Şekil 1.1) [18]. Dış hava CO₂ konsantrasyonu ortalama olarak 420 ppm seviyesinde iken kentlerdeki ve endüstri bölgelerindeki yerel değerleri bu düzeyin çok üzerinde olmaktadır.



Şekil 1.1. Küresel atmosferik karbondioksit konsantrasyonunun tarihsel değişimi [18].

İç ortamlarda karbondioksit konsantrasyonunun artması, genel olarak dış ortam karbondioksit seviyesine, iç ortamın büyüklüğüne, iç ortamın doğal veya mekanik olarak gerçekleşen havalandırma debisine, iç ortamda bulunan insanların sayısına – yaşlarına – cinslerine – aktivitelerine – beslenme alışkanlıklarına, iç ortamdaki plantasyona bağlıdır. Hiç şüphesiz bacasız ısınma ve mutfak araçları da hacim içinde karbondioksit birikimine önemli miktarda katkı koyarlar.

Yaşadığımız iç ortamlardaki karbondioksit dört farklı nedenle ilgi konusudur. (1) Karbondioksitin kendisi bir hava kirleticisidir. Aşırı yüksek karbondioksit konsantrasyonu insanların sağlığını, üretkenliklerini, bilişsel performanslarını, uyku kalitelerini etkiler. Bu nedenle aşırı karbondioksit birikiminin önlenmesi için yaşadığımız kapalı hacimler havalandırılmalıdır. (2) Karbondioksit ölçümü ve buna bağlı olarak havalandırma kontrolü teknolojisi gelişmiştir ve ekonomik boyutlardadır, yaygın olarak kullanılmaktadır. (3) Karbondioksit konsantrasyonu aynı zamanda iç hava kalitesini etkileyen diğer kirleticiler olan partikül ve gaz kirliliğini izleme aracı olarak kullanılmaktadır. İnsanların yoğun oldukları kapalı hacimlerde karbondioksitin belli değerlerin üzerinde olması diğer kirleticilerin de konsantrasyonlarının artarak emisyon kaynaklarının şiddetine bağlı olarak sağlığı etkileme seviyelerini aşabileceğine işaret etmektedir. (4) Havada asılı bulaşıcı hastalıklara ait mikroorganizmaların (patojenlerin) yarattığı hastalanma riskinin sayısal olarak belirlenmesi de kolay ölçülebilen karbondioksit konsantrasyonu ile tahmin edilebilmektedir; bu tahmin kapalı yaşam hacimlerindeki hava yoluyla hastalıkların bulaşma riskini sayısal olarak gösterdiği gibi, bulaşma riskinin azaltılması için alınan tedbirlerin etkisinin de ölçülmesine imkan vermektedir [19–22].

Karbondioksit konsantrasyonu, her türlü iç ortamda (konut, ofis, okul iş yeri, endüstriyel tesisler, spor ve eğlence mekanları, vs) ve her yaşta ve durumda (bebek, çocuk, yetişkin yaşlı; sağlıklı, hasta) önemlidir. Bu çalışma okullardaki (sınıflardaki) iç hava kalitesinin bir bileşeni olan karbondioksit konsantrasyonunun sağlık, performans ve bulaşıcı hastalık riski açısından limit değerinin/değerlerinin, var olan araştırmalara göre gözden geçirilerek değerlendirilmesi ve bu değerlendirmelerin sonucu olarak limit değer önerisinde bulunma amacını taşımaktadır. ASHRAE, 1989 tarihinde ilk versiyonu yayınlanan Kabul Edilebilir İç Hava Kalitesi için Havalandırma adlı standardında [23], karbondioksit limit değeri için 1000 ppm vermiş, ancak yanlış anlaşılardan ötürü bu değeri hemen standardın sonraki versiyonunda kaldırmış, daha sonra da bu standardın hiçbir versiyonunda yer vermemiştir. Ancak 1000 ppm ASHRAE Kriteri olarak yerleşmiştir. Pek çok çalışmada ve uygulamada ASHRAE 62 – 1989, ASHRAE 62.1-2010, 2016 kaynak gösterilerek veya ASHRAE Kriteri olarak anılarak, 1000 ppm limit olarak verilmektedir [7,24–30]. Hatta bilgi anlamında (informative) bile 1000 ppm ve ilgili bilgilere yer verilmese de ASHRAE 62.1-2019 versiyonun referans verildiği görülmektedir [31]. Ayrıca pek çok ülkede 800 ppm ve 1000 ppm gibi değerler standard değerler olarak belirlenmiştir. Duruma açıklık getirmek, yanlış anlamayı önlemek, 1000 ppm'in limit olarak her durumda kullanılmasını önlemek amacıyla yayımlar [15,14,32] yapılmaktadır. Ancak belirtmek gerekir ki, güncel ASHRAE standardındaki havalandırma debilerinin belirlenmesi CO₂ kirliliği ile de yakından ilgilidir; bir çalışmada [33], ASHRAE 62.1- 2007 [34] ve EN 16798 -1 [35] standartlarında tanımlanan havalandırma gereksinimlerinin temelini teşkil ettiği belirtilen iki araştırmanın sonuçlarının [36,37], CO₂ ölçümlerine dayalı havalandırma analizleri olduğu görülmektedir. ASHRAE son yayınladığı Durum Dokümanı [14] ile 1000 ppm'in kullanılması ile ilgili temel oluşturacak bir analiz vermiştir. Çok güncel bir çalışmada, “700 ppm + Dış hava konsantrasyonu” yaklaşımının artık geçerli olmadığı, 1000 ppm CO₂ konsantrasyonunun mutlak değer olarak özellikle havalandırma kontrolünde kontrol parametresi olarak kullanılması gerektiği, mutlak değer böylece giderek artan dış hava CO₂ konsantrasyonunun negatif etkisini ortadan kaldıracığı, RESET Bina Standardı ve Sertifikasyonu uygulamasında kabul edilebilir havalandırma performansı için 1000 ppm, yüksek performans için 600 ppm olarak alındığı belirtilmiştir [12]. Başka örnekler de vermek mümkündür:

- Bir çalışmada tanımlanan “Temel (base)”, havalandırma debisi olan kişi başı 4 l/s değerinin 1500 ppm CO₂ konsantrasyonuna karşılık geldiği işaret edilmiştir [38].

- BB101 Rehberinde de [39] kişi başına 5 l/s.kişi dış hava debisi kararlı halde 1500 ppm CO₂ konsantrasyonuna karşılık gelmektedir denilmektedir [39].
- HANNINEN [40], ASHRAE tarafından önerilen 7.5 l/s.kişi havalandırma debisinin (ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2007), sakin bir aktivite içinde olan yetişkinlerin karbondioksit üretimi ile kararlı halde ulaşılan 700 ppm konsantrasyona karşılık geldiğini vermiştir.

İç hava kalitesi ile karbondioksitin ilgisi yeni değildir. Literatürde iç ortamlardaki karbondioksitin insan sağlığı ve havalandırma ile ilişkisinin ve havalandırma için bir ölçüt olması yaklaşımının öncüleri olarak, 19. yüzyılda hemen hemen aynı yıllarda yaşamış olan üç bilim insanı ile karşılaşılmaktadır. Max von PETTENKOFER (1818- 1901), Robert August SMITH (1817-1884) ve Francis Stephen Bennet Francois de CHAUMONT (1883-1888).

Max von PETTENKOFER, tıp alanındaki uzmanlığını fizik, kimya, teknoloji, fizyoloji ve istatistik ile birleştirerek hijyen biliminin ilk interdisipliner bir tıp alanı olmasını sağlamış, modern hijyen bilminde çığır açan bir öncü olarak kabul edilen bir bilim insanıdır [41]. “Doğru bir bilim insanı temel olarak her zaman gerçek ile ilgilenir” diyen, Papalığın yanılmazlık dogmasına, düşünmenin ve araştırmanın özgürlüğüne zararlı olduğu için Roma Katolik Klisesinden ayrılan Pettenkofer [41], “1858’de karbondioksit konsantrasyonunun çok yüksek değerlerde olmamak şartıyla zararsız olduğunu bilmesine karşılık, kapalı hacimlerde karbondioksit konsantrasyonunun dış havadan 1000 ppm daha yüksek olduğu hallerde havanın kötü koktuğunu belirtmiş bu değer için bir ölçüt olduğunu açıklamıştır” [42,43]. Her ne kadar CO₂’in bir indikatör olarak kullanılabileceğinin 1980’lerde yapılan araştırmalara dayandığı işaret edilse de [36], sonuç olarak bu kredi PETTENKOFER’a ait olmalıdır.

Asit yamurunu keşfeden ve asit yağmurunun babası olarak anılan August SMITH, kimyasal İklim Bilimi (Chemical Climatology) terimini de öneren bilim insanıdır. EYLER [44] tarafından çalışılan bilimsel biyografisine göre, sanayileşme ve kentsel büyüme ile bağlantılı çevre sorunlarının incelenmesi ve kontrolü için bilimsel analizin uygunluğunu ilk fark eden; “hastalığı önleme politikaları, hijyene, kanalizasyona, iyileştirilmiş havalandırmaya ve insan yoğunluğunun azaltılmasına önem vermelidir” diyerek, havalandırmayı 19. yüzyılda gündemde tutan bilim insanlarından biridir. Yaptığı çalışmalar sonucunda insan nefesi ile kirlenen iç ortamlarda, hava içindeki diğer bileşenlerden daha kolay ölçülebildiği için, “karbonik asitin” havalandırma için en iyi kimyasal test olduğu ortaya çıkmış, SMITH dikkatini karbondioksitin ölçülmesine yöneltmiştir [44].

CHAUMONT 1885 yılında Sivastopol’da Kırım Savaşına katılmış ve Türklerden Madalya almış bir İngiliz tıp subayıdır. Orduda hijyen konusunda eğitim ve laboratuvar çalışmaları yapmış, hastanelerle askeri barakalar üzerine araştırmalar ve sağlık üzerine bilimsel yayınlar yapmıştır. 1879’da Kraliyet Bilimler Akademisine seçilmiştir [45]. Pettenkofer’un 1858’deki açıklamasından az zaman sonra CHAUMONT, yine koku temelli yaklaşımla, yaptığı deneyler ve gözlemlerle, havanın içindeki organik bileşenlerin belirlenmesindeki güçlük ve güvensizlik nedeniyle, insanların yaşadıkları hacimde havalandırma miktarının pratik olarak belirlenmesinin imkansız olmadığını ifade ederek, organik bileşenlerin konsantrasyonunun karbondioksit^f konsantrasyonu ile orantılı olduğunu gözlediğini belirtmiş ve kolayca ölçülebilen karbondioksit konsantrasyonunun belli bir limit değerinin altında tutulmasını sağlayacak havalandırma miktarını belirleyecek bir yöntem geliştirmiştir [46].

Aradan geçen yaklaşık 150 yılda, iç hava kirliliğinin bileşenleri konusunda 19. yüzyıla göre önemli farklılıklar belirlense de, yine hava içindeki diğer kirlilik bileşenlerinin kolay ölçülebilir olmamasından ötürü, insan kaynaklı karbondioksit konsantrasyonu, havalandırma miktarının belirlenmesi ve iç hava kalitesinin kontrolü amacıyla bir ölçüt olarak kullanılmaktadır.

^f CHAUMONT makalesinde “karbonik asit” olarak ifade ediyor.

Bu çalışmada, sırasıyla dış ve iç ortamlardaki karbondioksit kaynakları, araştırmalarda gözlenen sınıflardaki karbondioksit konsantrasyonları, karbondioksitin insanların ve çocukların sağlığına etkileri, iç ortamlarda karbondioksit limit değerleri ile ilgili standartlar ve uygulamalar, karbondioksitin havalandırma açısından önemi alanları literatür ışığında incelenmiş ve okullarda olması gereken karbondioksit limit değeri için öneri getirilmiştir.

KAYNAKLAR”

- [1]. “The Right to Healty Indoor Air” Report on a WHO Meeting, Netherland, 15-17 May 2000.
- [2]. <https://deputyprimeminister.gov.mt/en/environmental/Pages/Policy-Coordinating-Unit/Parma-Declaration.aspx>
- [3]. WHO, “Parma Declaration for Environment and Health”. Ministers and Representatives of Member States in the European Region of the World Health Organization, 2010.
- [4]. TOKSOY, M. “Okullarda İç Hava Kalitesi ve Yönetimi: Günümüz Bilgi ve Pratiği”. 12. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, TESKON, 8-11 Nisan 2015.
- [5]. DING, E. vd. "Ventilation Regimes of School Classrooms Against Airborne Transmission of Infectious Respiratory Droplets: A Review". Building and Environment, 207, 108484, 2022.
- [6]. McLEOD, R.S. vd. “An Investigation of Indoor Air Quality in a Recently Refurbished Educational Building”. Front. Built Environ. 7:769761, 2022. doi: 10.3389/fbuil.2021.769761
- [7]. JONES,E. vd. “Healthy Schools: Risk Reduction Strategies for Reopening Schools”. Harvard T.H. Chan School of Public Health Healthy Buildings program. June, 2020.
- [8]. HORNER, E., vd. "Effects on the Health and Wellness of the Built Environment". ASHRAE Journal June 2022.
- [9]. EPA, " Air Quality Index - A Guide to Air Quality and Your Health", 2014.
- [10]. EPA. "Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality – the Air Quality Index (AQI)", 2018.
- [11]. KELLY, B. “Outdoor CO₂ Pollution”. August 2019. <https://www.the-ies.org/analysis/outdoor-co2-pollution>.
- [12]. STUMM, R.E. "Revisiting the 1,000 ppm CO₂". ASHRAE Journal, June, 2022.
- [13]. SEKHAR, C. vd. “Bedroom ventilation: Review of Existing Evidence and Current Standards”. Building and Environment, 184, 107229, 2020
- [14]. "ASHRAE Position Document on Indoor Carbon Dioxide". February 2, 2022, February 2, 2022, Expires February 2, 2025.
- [15]. PERSILY, A.K. "Don’t Blame Standard 62.1 for 1,000 ppm CO₂". ASHRAE Journal, February 2021.
- [16]. US EPA Targeting Indoor Air Pollution, EPA’s Approach and Progress, 1993.
- [17]. White House Virtual Event “Let’s Clear Air on COVI+: An OSTP Discussion on Clean Indoor Air”. 22 March 2022. <https://www.youtube.com/watch?v=QBSQumZ4PsY>.
- [18]. <https://www.co2levels.org/>
- [19]. TO, G.N.S. ve CHAO C.Y.H. “Review and Comparison Between the Wells–Riley and Dose-Response Approaches to Risk Assessment of Infectious Respiratory Diseases”. Indoor Air, 20: 2–16, 2010.
- [20]. BAZANT, M.Z. vd. “Monitoring Carbon Dioxide to Quantify the Risk of Indoor Airborne Transmission of COVID-19”. Flow, 1 E10, 2021. doi:10.1017/flo.2021.10
- [21]. PENG, Z. ve JIMENEZ, J.L. “Exhaled CO₂ as a COVID-19 Infection Risk Proxy for Different Indoor Environments and Activities”. Environ. Sci. Technology Lett., 8, 392-397, 2021.
- [22]. PENG, Z. vd. “Practical Indicators for Risk of Airborne Transmission in Shared Indoor Environments and Their Application to COVID-19 Outbreaks”. Environ. Sci. Technology, 56, 1125-1137, 2022.
- [23]. ASHRAE Standard 62: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. 1989.
- [24]. https://content.greenheck.com/public/DAMProd/Original/10002/ERVAppManual_catalog.pdf
- [25]. FISK, W.J. “Is CO₂ an Indoor Pollutant, Higher Levels of CO₂ May Diminish Decision Making Performance”, Indoor Environment Group, Lawrence Berkeley National Laboratory, March 2013.
- [26]. SIREESHA, N.L. "Correlation Amongst Indoor Air Quality, Ventilation and Carbon Dioxide". Journal of Scientific Resarch, 9(2), 179-192, 2017.
- [27]. KORSAVI, S.S. ve MONTAZAMI, A. “Developing a Valid Method to Study Adaptive Behaviours with Regard to IEQ in Primary Schools”. Building and Environment ,153, 1–16, 2019.

- [28]. HADDAD, S. vd. "On the Potential of Demand-Controlled Ventilation System to Enhance Indoor Air Quality and Thermal Condition in Australian School Classrooms". *Energy & Buildings*, 238, 110838, 2021.
- [29]. PERSILY, K. "Quit Blaming ASHRAE Standard 62.1 for 1000 ppm CO₂". 2020.
<https://www.nist.gov/publications/quit-blaming-ashrae-standard-621-1000-ppm-co2>
- [30]. RANJBAR, A. "Analysing the Effects of Thermal Comfort and Indoor Air Quality in Design Studios and Classrooms on student Performance". *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 609 042086, 2019. doi:10.1088/1757-899X/609/4/042086
- [31]. "Education and Indoor Climate - Air Quality and Ventilation in Schools", Research Paper, Swegon, 2021.
<https://blog.swegon.com/en/knowledge-is-the-first-step-read-our-white-paper-on-education-and-indoor-climate>
- [32]. HERRMANN, D. "Understanding CO₂ and Standard 62". *AQ Applications/Summer* 2000.
- [33]. WARGOCKI, P. "What We Know and Should Know about Ventilation". *REHVA Journal*, April 2021.
- [34]. ASHRAE, Standard. "62.1. 2007, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality." American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA, 2019.
- [35]. EN, CEN Standard. "16798-1. Energy Performance of Buildings—Ventilation for Buildings—Part 1: Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings Addressing Indoor Air Quality." *Thermal Environment, Lighting and Acoustics—Module M1-6*, 2019.
- [36]. BERG-MUNCH B, vd. "Ventilation Requirements for the Control of Body Odour in Spaces Occupied by Women". *Environment International*, Vol 12, pp 195-199, 1986,
- [37]. GUNNARSEN, L. ve FANGER, P.O. "Adaptation to Indoor Air Pollution". *Environment International*, Vol. 18, pp. 43 - 54, 1992.
- [38]. CARRER, P. vd. "On the Development of Health-Based Ventilation Guidelines: Principles and Framework *Int. J. Environ. Res. Public Health* 15, 1360, 2018.
doi:10.3390/ijerph15071360www.mdpi.com/journal/ijerph
- [39]. "Guidelines on Ventilation, Thermal Comfort and Indoor Air Quality in Schools" *Building Bulletin* 101, Version 1, (Appendix A). August 2018.
- [40]. HANNINEN, O. vd. "Analysis of CO₂ Monitoring Data Demonstrates Poor Ventilation Rates in Albanian Schools During the Cold Season". *Air Qual. Atmos. Health*, 10:773–782, 2017.
- [41]. LOCHER, W.G. "Max von Pettenkofer (1818–1901) as a Pioneer of Modern Hygiene and Preventive Medicine". *Environmental Health and Preventive Medicine*, 12, 238–245, November 2007.
- [42]. <https://www.swegonairacademy.com/2015/12/30/history-of-ventilation-carbon-dioxide-as-an-indicator-of-indoor-air-pollution-in-1858/>
- [43]. de GIDS, W.F. ve WOUTERS .P "CO₂ as Indicator for the Indoor Air Quality General Principles". AIVC, Ventilation Information Paper No: 33, July 2010.
- [44]. EYLER, J.M. "The Conversion of Angus Smith: The Changing Role of Chemistry and Biology in Sanitary Science, 1850-1880". *Bulletin of the History of Medicine*, Vol. 54, No. 2, pp. 216-234, Summer 1980.
- [45]. <https://www.maltaramc.com/regsurg/c/chaumontfsbfd.html>
- [46]. CHAUMONT, F.D. "An Attempt to Establish a Positive Basis for the Calculation of the Amount of Fresh Air Required for an Inhabited Air-Space", In the *Theory of Ventilation*, Proceedings of the Royal Society of London, Vol. 23 (1874 - 1875), 1875].

BÖLÜM 2

KARBONDİOKSİT: TARİHSEL

Karbondioksit, canlıların yaşamındaki önemli rolü nedeniyle, tarih boyunca önceleri bir gaz olduğu bilinmeksizin, havanın farklı bir hali gibi algılanarak, bilim insanlarının dikkatini çekmiştir. Karbondioksitin ayrı bir madde olarak ilk keşfinin 17. yüzyılın başlarında gerçekleştiği görülmektedir.

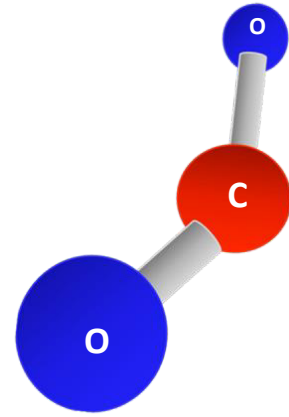
Karbondioksitin bir gaz olduğu Hollandalı Bilim insanı Jan Baptist van Helmont (1580-1644) tarafından 1630 yılında keşfedilmiştir. Gaz tanımını keşfeden Helmont, odunun yanmasıyla ortaya çıktığı için, bu gaza “odunsu gaz (gas sylvester)” adını vermiştir. Helmont bu gazın şarap fermantasyonunda da ortaya çıktığını farketmiştir [1].

Karbondioksit üzerine olan araştırmalar 18. yüzyılda da devam etmiş, 1754 yılında, doktora tezi için magnezyum karbonat kimyası üzerine çalışırken Joseph Black (1728–1799) tarafından hava içinde keşfedilmiş ve “sabit hava (fixed air)” olarak adlandırılmıştır [2]. Black’in zamanına kadar, atmosferik hava farklı saf halleri olan bir madde-element kabul edilirken, Black tarafından içinde karbondioksitin de olduğu farklı gazlardan oluşan bir ortam olarak tanımlanmıştır. Black, karbondioksitin solunum içinde olduğunu havadan daha ağır olduğunu ve kimyasal karakterini de zayıf asit olarak belirlemiştir. Black’a göre, karbondioksit alevin ve canlı yaşamının sürmesine engel olmaktadır [3]; bir kavanoz içinde fareler ve mum ile yaptığı deneylerde, mumum söndüğünü, farelerin yaşamlarını yitirdiklerini gözlemiştir [3].

Yaşam ile karbondioksit arasındaki ilişkileri inceleyen, oksijeni keşfeden, bir başka bilim insanı çok yönlülüğüyle ünlü^a, Benjamin Franklin’in yakın arkadaşı, Fransız ihtilalini desteklediği için tehdit edildiğinden ve hayati tehlikeye girdiğinden ABD’ye giden Joseph Priestley’dir (1733-1804). 1772 senesinde İngiltere Kraliyet Akademisinde sunduğu “Observations on Different Kinds of Air” adlı çalışmasında, bitkilerin şimdi karbondioksit olarak bilinen zararlı bir maddeyi (effluvium) temizlediğini deneysel çalışmalarına dayanarak sunmuştur [4].

Karbon, element olarak keşfedilmesinden sonra ilk defa karbon (carbon) olarak 1789’da Lavosier tarafından önerilmiştir [5].

Karbondioksit ismi bir karbon iki oksijen atomundan oluştuğu için, 1869’dan itibaren kullanılmaya başlanmıştır [6].



KAYNAKLAR

- [1]. <https://science.jrank.org/pages/1209/Carbon-Dioxide.html>
- [2]. <http://www.chem.gla.ac.uk/~alanc/dept/black.htm>
- [3]. <https://www.undiscoveredscotland.co.uk/usbiography/b/josephblack.html>
- [4]. <https://founders.archives.gov/documents/Franklin/01-19-02-0147>
- [5]. <http://science.marshall.edu/castella/chm448/elements2.pdf>
- [6]. <https://www.etymonline.com/word/carbon%20dioxide>

^a Kimyager, Doğa Filozofu, Ayrılıkçı, İlahiyatçı, Dilbilgisi Uzmanı, Çok Konulu Eğitimci ve Liberal Siyaset Kuramcısı.

BÖLÜM 3

DIŞ ve İÇ ORTAMLARDA KARBONDİOKSİT KAYNAKLARI

Atmosferde ısı kapanı görevi yaparak ortalama çevre sıcaklığının artmasına neden olan gazlar, en başta karbondioksit (CO₂) olmak üzere metan (CH₄), azot oksitler(N₂O) ve florlu gazlardır. Karbondioksit atmosfere fosil yakıtların (kömür, doğal gaz, petrol ürünleri) her türlü (elektrik üretimi, ulaşım, endüstriyel prosesler, ısıtma) yanmasından, katı atıkların bozunmasından, biyolojik malzemelerden ve çimento imalatı gibi kimyasal reaksiyonlardan atmosfere ulaşmaktadır [1]. Atmosferdeki karbondioksitin bir kısmı biyolojik karbon çevriminin bir parçası olarak bitkiler tarafından kullanılmakta, bir kısmı da okyanuslar ve diğer yüzeysel sularda çözünmekte ve toprakta depolanmaktadır. Ancak atmosferik sıcaklığın artması sudaki çözünmeyi de azaltmaktadır.

Günümüzden önceki 800.000 yılda yaklaşık olarak 175 ile 300 ppm arasında salınan atmosferik karbondioksit konsantrasyonu, 1910 senesinde 300 ppm’i aşmış ve bu tarihten sonra sürekli artarak geçmişte hiç görülmemeyen rekor bir seviyeye, 23 Mart 2022 tarihinde 417 ppm değerine ulaşmıştır [2]. Bu artışın nedeni 1750 yıllarında başlayan ve giderek yoğunluğu artan sanayileşme ve buna bağlı faaliyetlerdir. 417 ppm değeri atmosferdeki ortalama konsantrasyondur. Karbondioksit konsantrasyonu yere ve zaman bağlı olarak, bu değerin çok üzerine de çıkmaktadır [3÷5].

Yere ve zamana bağlı atmosferik karbondioksit konsantrasyonu, insanların yaşamlarının büyük bir kısmını geçirdikleri iç ortamlardaki karbondioksit konsantrasyonunun temel kaynağını / alt limitini oluşturduğu için çok önemlidir. İç ortamdaki kaynaklarının emisyonu ile iç ortam karbondioksit konsantrasyonu bu değerin üzerine çıkmaktadır.

Endüstriyel tesislerdeki özel proseslerin dışında kapalı yaşam hacimlerindeki karbondioksit kaynakları,

- fosil gaz yakıtlı (Doğal gaz ve LPG) mutfak ocakları,
- sıvı yakıtların (gaz yağı - kerozen) kullanıldığı bacasız ısıtıcılar (sobalar)
- gazlı sıvı içecekler,
- ve nihayet vücutta doğal metabolik işlemler sonucu bir yan ürün olarak ortaya çıkan ve solunum yoluyla ortam havasına karbon dioksit veren canlılardır.

İnsanlar iç ortamlardaki ana karbondioksit kaynağıdır. Bir hacimde insan yoğunluğu arttıkça, insan kaynaklı diğer biyolojik emisyonlar (biyoeffluentler) ile birlikte karbondioksit kirliliği de artar. İnsanların solunum yoluyla karbondioksit emisyonu aşağıda tanımlanan solunum katsayısına, metabolizma hızına ve vücut (deri) yüzey alanına bağlıdır.

Vücut yüzey alanı – DuBOIS ve DuBOIS eşitliği

Vücut yüzey alanı A_D, “DuBOIS ve DuBOIS” eşitliği [6] ile ağırlığa (m; kg) ve boya (L; m) göre aşağıdaki eşitlikle hesaplanır.

$$A_D = 0,202473 m^{0.425} L^{0.725} \quad (3.1)$$

Metabolizma hızı ile vücut yüzey alanı arasındaki ilişkinin gelişimi, tarihsel perspektif içinde TOKSOY [6] tarafında verilmiştir.

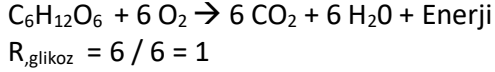
Solunum Katsayısı^a (R)

^a Respiratory Quotient

Solunum katsayısı (R), insan vücudunda besinlerin oksidasyonu esnasında açığa çıkan karbondioksitin, oksidasyonda kullanılan oksijene oranıdır.

$$R = \frac{V_{CO_2}}{V_{O_2}} \quad (3.2)$$

Örneğin 1 mol şeker (glikoz- $C_6H_{12}O_6$) 6 mol oksijen ile ($6O_2$) oksitlenir; reaksiyon sonucunda 6 mol karbondioksit ($6CO_2$), 6 mol su ($6 H_2O$) ve enerji açığa çıkar. Böylelikle şeker glikoz için solunum katsayısı 1 'dir:



İnsanların aldıkları besinler sosyo-ekonomik şartlara, coğrafi geleneklere, öğüne, yaşa ve cinslerine bağlı olarak değişir. Genel olarak besinleri farklı oranlarda karbonhidratlar, yağlar ve proteinler oluşturur. Bu besinler için solunum katsayıları literatürde [7÷13] aşağıdaki gibi verilmiştir:

| | |
|--------------------------|---------------|
| Etanol | : 0,67 |
| Yağ/lipit | : 0,67 - 0,71 |
| Protein, Amino Asit | : 0,8 – 0,9 |
| Karbonhidrat, Glikoz | : 1,0 |
| Lipogenesis ^b | : 1,0 – 1,2 |

Görülebileceği üzere farklı bileşimlerdeki besinlerin tüketilmesi ile fizyolojik olarak insanların solunum katsayıları 0,67 ile 1,2 aralığında değişmektedir [13]. Solunum katsayısının 0,67 – 0,69 arası yetersiz beslenme ve yağ oksidasyonunu, 0,81 ile 0,82 arasındaki değerleri protein oksidasyonunu, büyük değerler ise (1,0 – 1,2) aşırı beslenme ve yağlanma (lipogenesis) halindeki oksidasyonu göstermektedir [8].

'Orta seviyedeki fiziksel etkinlikler'de bir yetişkin için solunum katsayısının uygun hassasiyette değeri 0,83 olarak verilmiştir [14,15] ve simülasyonlarda da bu değer kullanılmaktadır [16]. Karbonhidrat ağırlıklı besin tüketen toplumlarda solunum katsayısının daha büyük olması gerekir.

Metabolizma hızı (M)

Bir kişinin gerçekleştirdiği etkinlik sırasında, kişiye, yapılan etkinliğe ve etkinliğin gerçekleştirildiği şartlara bağlı olarak değişen, birim insan yüzeyine indirgenmiş birim zamanda üretilen enerji (W/m^2) metabolizma hızıdır. Sakin olarak oturma pozisyonunda bir insanın metabolizma hızı olan $58.2 W/m^2$, metabolizma birimi olarak 1 met şeklinde tanımlanmıştır. Farklı etkinlikler için metabolizma hızları ASHRAE Fundamentals 2021 içinde (F9.6) tablo halinde verilmiştir; metabolizma hızı uyku halindeki $40 W/m^2$ 'den güreş müsabakalarındaki $505 W/m^2$ 'ye kadar değişmektedir.

ASHRAE Fundamentals 1981'de, referans verilmeden, metabolizma hızı (M, W/m^2) solunum katsayısı (R), vücut yüzey alanı (A_D , m) ve tüketilen oksijen (V_{O_2} , L/dak) arasındaki ilişki aşağıdaki eşitlikle verilmiştir:

$$M = (0.23 R + 0.77) (5.87) \frac{V_{O_2}}{A_D} (60) \quad (3.3)$$

Bu eşitlik, katsayıların çarpımı ile ($5.87 \times 60 = 352.2$)

^b Yağ oluşumu

$$M = 352.2 (0.23 R + 0.77) \frac{V_{O_2}}{A_D} \quad (3.4)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu eşitlik ise

$$M = 352 (0.23 R + 0.77) \frac{V_{O_2}}{A_D} \quad (3.5)$$

şekliyle, katsayısı yuvarlanarak, ASHRAE Fundamentals 1997'de NISHI kaynak [17] gösterilerek alıntılanmıştır. ASHRAE Fundamentals'ın 2001 – 2021 versiyonlarında yine NISHI [17] kaynak gösterilerek, ancak birim değişikliği yapılarak ve katsayı yuvarlatılarak (21.132 →21), (3.5) eşitliği,

$$M = 21 (0.23 R + 0.77) \frac{V_{O_2}}{A_D} \quad (3.6)$$

şeklinde verilmiştir. Bu eşitlikte V_{O_2} için ml/s birimi öngörülmüştür. Metabolizma met^c birimi ile, V_{O_2} l/s ifade edilmek istenirse (2.4) eşitliği,

$$M = 363.09 (0.23 R + 0.77) \frac{V_{O_2}}{A_D} \quad (3.7)$$

şeklinde yazılabilir.

İnsanların karbondioksit emisyonu

(3.1) ve (3.7) eşitliklerinin kullanılmasıyla, bir insanın solunum esnasında tükettiği oksijen ve ürettiği CO₂ sırasıyla aşağıdaki eşitliklerle elde edilir:

$$V_{O_2} = \frac{A_D M}{363,09 (0,23 \cdot R + 0,77)} \quad ; (L/s) \quad (3.8)$$

$$V_{CO_2} = R \cdot V_{O_2} = R \cdot \frac{A_D M}{363,09 (0,23 \cdot R + 0,77)} \quad ; (L/s) \quad (3.9)$$

Her iki eşitlikte Metabolizma hızı (M) birimi met 'dir. Bu eşitliklerde metabolizma birimi olarak (W/m²) kullanılmak istenirse eşitlikler sırasıyla,

$$V_{O_2} = 4,732 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{A_D M}{(0,23 R + 0,77)} \quad ; (L/s) \quad (3.10)$$

$$V_{CO_2} = R \cdot V_{O_2} = 4,732 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{R A_D M}{(0,23 R + 0,77)} \quad ; (L/s) \quad (3.11)$$

şeklinde düzenlenir. (3.3) – (3.6) eşitliklerinde oksijen tüketim ve karbondioksit üretim hacimsel debileri standart atmosfer şartlarındadır (0°C ve 101.325 kPa)

Sonuç olarak (3.10) ve (3.11) eşitliklerinden görüleceği üzere, insanların solunum yoluyla oksijen tüketimi (V_{O_2}) ve bağlı karbondioksit emisyonu (V_{CO_2}), aktivite^d seviyesine bağlı metabolizma hızına (M, W/m²), kilosuna (m) ve boyuna (L) bağlı vücut yüzey alanına [A_D] ve tükettiği yiyeceklerin cinsine bağlı olarak belirlenen solunum katsayısına (R) bağlıdır.

^c 1 Met =58.2 W/m² değerindedir. Birçok tabloda 60 W/m² olarak gösterilmektedir.

^d Uyku hali, uzanma oturma, yürüme, koşma, ağır kaldırma vs

KAYNAKLAR

- [1]. <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>
- [2]. <https://www.co2levels.org/>
- [3]. MITCHELL, L. vd. "Long-Term Urban Carbon Dioxide Observations Reveal Spatial and Temporal Dynamics Related to Urban Characteristics and Growth". PNAS, 20 March 2018.
- [4]. LIU, M. "Spatial Variation of Near-Surface CO₂ Concentration During Spring in Shanghai". Atmospheric Pollution Research, 7, 31-39, 2016.
- [5]. LIN, J.C. vd "CO₂ and Carbon Emissions From Cities". American Meteorological Society, November 2018
- [6]. TOKSOY, M. "DuBOIS ve DuBOIS Eşitliği: İnsanların Vücut Yüzey Alanlarının Hesaplanması". TTMD Dergisi: Ocak – Mart, 2022
- [7]. MATARESE, L.E. "Indirect Calorimetry: Technical Aspects". American Dietetic Association. Journal of the American Dietetic Association, 97/10, Oct 1997.
- [8]. PEREIRA-DA-SILVA, I. "Evolution of Resting Energy Expenditure, Respiratory Quotient, and Adiposity in Infants Recovering from Corrective Surgery of Major Congenital Gastrointestinal Tract Anomalies: A Cohort Study", Nutrients, 11 October 2020.
- [9]. <https://slidetodoc.com/anaerobic-respiration-learning-objectives-explain-why-anaerobic-respiration/>
- [10]. <https://www.embibe.com/exams/respiratory-quotient/>
- [11]. Yakın Doğu Üniversitesi "Solunum Fizyolojisi".
http://docs.neu.edu.tr/staff/vedat.sagmanligil/Solunum%20Fizyolojisi_8.pdf
- [12]. SAKA, M. vd "Solunum Fonksiyonları ve Beslenme". Tüberküloz ve Toraks Dergisi, 51(4): 461-466, 2003.
- [13]. HAUGEN, H.A. "Indirect Calorimetry: A Practical Guide for Clinicians". Nutrition in Clinical Practice 22:377–388, August 2007.
- [14]. ASHRAE Fundamentals, (9.7), 2021.
- [15]. ALFANO, F.R.A. vd "Indoor Environment and Energy Efficiency in Schools". REHVA Guidebook No:13, 2009.
- [16]. KALEMA, T. ve VIOT, M. "Methods to Reduce the CO₂ Concentration of Educational Buildings Utilizing Internal Ventilation by Transferred Air". Indoor Air, 24: 71–80, 2014.
- [17]. NISHI, Y. "Measurment of Thermal Balance of Man". Bioengineering, Thermal Physiology and Comfort (edited by K. Cena and J.A. Clark), 1981.

BÖLÜM 4

SINIFLARDA KARBONDİOKSİT SEVİYESİ

Sınıflardaki karbondioksit, solunum yoluyla oluşan insan kaynaklı emisyonlardan bir tanesidir. CO₂ öğrenci fizyolojik sağlığını ve bilişsel performansını etkileyen bir iç hava kirleticisi olduğu gibi, iç hava kirliliğinin karakterize edilmesinde ve kontrolunda bir gösterge-iz elemanı olması nedeniyle, sınıflarda ve genel olarak insan yoğun tüm yaşam hacimlerindeki CO₂ seviyesi önemlidir

Sınıflarda karbondioksit seviyesi üzerine olan ilk araştırmanın Karolinska Enstitüsünden Elias HEYMAN (1829–1889) tarafından yapıldığı, havalandırmanın söz konusu olmadığı okullarda, konsantrasyonun 5000 ppm'e kadar çıktığı, bir çeşit havalandırma olan okullarda 1500 ile 3000 ppm arasında ölçüldüğü not edilmiştir [1]. Okullardaki karbondioksit ölçümleri ve bu ölçümlere bağlı araştırmalar artan bir hızla 21. Yüzyılda da devam etmektedir.

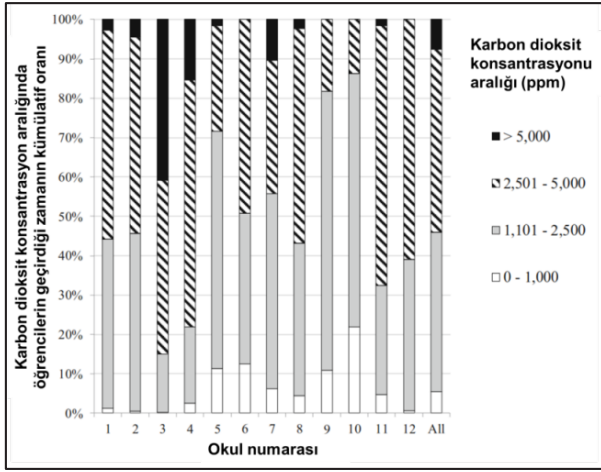
2015 yılına kadar, Türkiye de dahil, dünyada 30 ülkede sınıflardaki iç hava kirliliği üzerine yapılan araştırmalar ve bu araştırmaların değerlendirildiği çalışmalar [2,3,4] incelendiğinde, her ülkede farklı seviyede okullardaki sınıflarda karbondioksit konsantrasyonunun, özellikle kış aylarında uygun havalandırma olmadığında, 1000 ppm değerinin çok üzerinde olduğu görülmektedir. Türkiye'de ve Dünyada 2015 yılından sonra yapılan araştırmalardan elde edilen sonuçlar da bu gözlemi desteklemektedir.

1995 – 2016 yılları arasında yayınlanmış araştırmalara ait en kapsamlı review çalışmadan biri FISK tarafından yapılmıştır [5]. FISK bu çalışmasında 14 ülkede^a 3470 sınıfta yapılmış ve hakemli dergilerde yayınlanmış 28 araştırmayı değerlendirmiştir. Araştırma ortamı olan 3470 sınıftan 2794 sınıfta CO₂ ölçümleri yapılmış bunların 2642'sinde (%94.6) ortalama konsantrasyon 1000 ppm'in üzerinde çıkmıştır.

Arnavutluk'ta, 24'ü kentlerdeki 8 okulda, 12'si kırsal kesimdeki 4 okulda olan toplam 36 sınıfta iç hava kalitesi (CO₂) ve ısı konfor (iç sıcaklık, izafi nem) ölçümleri yapılmıştır [6]. Bu çalışma Parma'da (İtalya) yapılan ve WHO Avrupa Bölgesinde çocukların çevresel faktörlerin istenilmeyen etkilerinden korunması için bir dizi hedefi içeren Parma Deklasrasyonunun [7] yapıldığı Beşinci Çevre ve Sağlık Üzerine Bakanlıklar Konferansı^b doğrultusunda, kısmen WHO'nun Avrupa'daki okullardaki iç hava kalitesi ve diğer çevre faktörlerinin belirlenmesi çalışmaları içinde, SIMPHONIE Projesi [3] ile uyumlu olarak gerçekleştirilmiştir; sınıflarda öğrenci başına düşen hava hacmi medyanı 3.9 m³/öğrencidir. 12 okulda 36 sınıfta yapılan CO₂ konsantrasyonlarına çocukların maruz kaldıkları kümülatif zaman oranı Şekil 4.1'de verilmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre, Avrupadaki diğer ülkelere oranla, ortalama CO₂ konsantrasyonu ve ortalama izafi nemi en yüksek, ortalama hava sıcaklıkları da (ortalama 9.1°C - 14.4°C, median 11.7°C) en düşük sınıflar, merkezi iklimlendirmenin olmadığı, bir kısmı odun ve gaz sobaları ile bir kısmı elektrikli küçük ısıtıcılarla ısıtılan Arnavutluk'taki sınıflardır. 12 Okulda öğrenciler zamanlarının %94,5'inde 1000 ppm üstünde, %7,6'sında 5000 ppm üstünde karbondioksit konsantrasyonuna maruz kalmaktadırlar.

^a Fransa, Portekiz, Almanya, İskoçya, Hollanda, ABD, Kore, Danimarka, Çin, İsveç, İtalya, Yunanistan, Avrupa, Singapur.

^b Bu konferansa Türkiye de katılmış, deklarasyondaki sınır aşan sular ve kirlilikler ile ilişkili maddelere katılmamıştır.



Şekil 4.1. Çocukların okulda geçirdikleri zaman içinde, farklı CO₂ konsantrasyonu aralıklarında kaldıkları toplam zamanların yüzdeleri [6].

2015 yılından sonra yapılan araştırmalar içinde yer alan önemli bir çalışma [8] 2002-2017 yılları arasında 27 tanesi yeni yapılmış, 10'u çok kapsamlı yenileme geçirmiş 37 okuldaki 147 sınıfta, iç hava kalitesi ve havalandırma debisi değerlendirilmesi üzerinedir. Binaların 21'i çok katlı, 16'sı tek katlıdır. 37 okulun 10 tanesi konvansiyonel binalardır. 15 tanesi Energy Star (ES), 12 tanesi de LEED sertifikalıdır. Farklı sınıflarda bir yıl boyunca farklı zamanlarda CO₂, sıcaklık, bağıl nem ölçülmüştür. Okullarda çeşitli (merkezi iklimlendirme, sınıf bazında bireysel) mekanik havalandırma sistemleri vardır. Bu sınıflarda yapılan ölçümlerde günlük medyan karbondioksit konsantrasyonu sınıfların %28'inde 1000 ppm, %9'unda 1500 ppm, %4'ünde 2000 ppm düzeylerinin üzerinde çıkmıştır. 15 dakikalık ortalamalarda ise %55 sınıfta 1400 ppm üzerindedir. LEED ve ES sertifikalı binalardaki CO₂ konsantrasyonu konvansiyonel binalara göre çok belirgin olmamakla beraber biraz daha fazladır. Sonuç olarak araştırmacılar, 37 okulun çoğunluğunda havalandırmayı yetersiz bulmuşlardır. Bu sonucun sebepleri (1) tasarımda yetersizlik, (2) uygun olmayan işletme ve (3) okul ve bina topluluklarında iç hava kalitesi konusunda eğitimsizlik olarak belirtilmiştir. Bu araştırma, uzun senelerdir okullarda iç hava kalitesinin geliştirilmesi konusunda programlar geliştiren EPA'nın bulunduğu ABD'de sınıfların, iç hava kalitesi açısından, üstelik yeni veya bütünüyle yenilenmiş okullarda bile, çoğunlukla "öğrenci dostu" olmadığını göstermektedir. Bu sonuç muhtemelen ABD'deki diğer ve Dünyanın diğer ülkelerindeki okullar için de iyimser olmayı zorlamaktadır.

Çevre duyarlılığı ve beraberinde çevre koruma tedbirlerinin yüksekliği açısından bir üst-kültür olan Kaliforniya'da, LBNL^c İç Çevre Grubu ve UC-Davis WCEC^d 'den üyelerin katılımıyla, çok yakın bir zamanda bir araştırma gerçekleştirilmiştir [9]. Bu araştırmada hepsi K-12^e grubunda yer alan 11 okuldaki 194 sınıfta dört hafta boyunca CO₂ ve sıcaklıklar ölçülmüştür. Çalışmanın amacı, mekanik havalandırma sistemleri beş farklı grupta sınıflandırılabilir, 2013-2016 yıllarında yenilenmiş olan bu sınıflardaki havalandırma debilerinin, yeterli olup olmadığının incelenmesidir. Araştırma sonuçlarına göre, ASHRAE 62.1-2016 standardında önerilen minimum havalandırma debisinden (7 l/s-öğrenci) hareketle, 7. ve 8. sınıf öğrencilerinin karbondioksit üretimine dayanarak kararlı denge hali için hesaplanan karbondioksit limit değeri kullanılarak belirlenen sınır değeriyle (1100 ppm = 700 ppm + 400 ppm), veri kaydı yapılabilen 11 okulun 9'unda karbondioksit konsantrasyonunun 1100 ppm üzerinde olduğu zaman dilimi yüzdesi, daha az olduğu zaman dilimi yüzdesinden daha fazladır (Şekil 4.2).

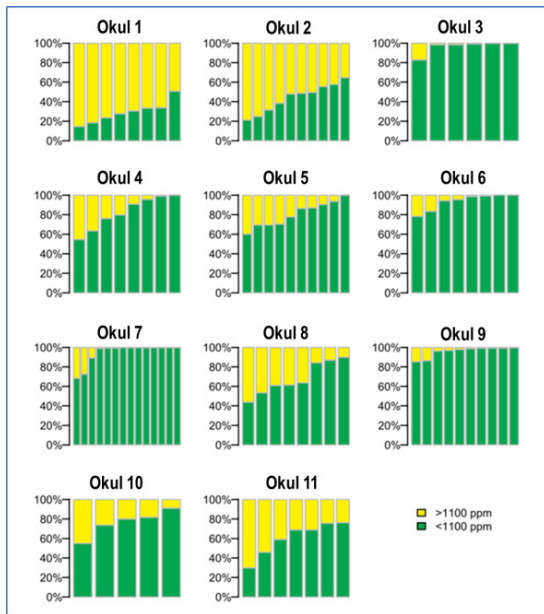
[^c]. Indoor Environment Group, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, USA.

[^d]. Western Cooling Efficiency Center, University of California-Davis, Davis, CA, USA.

[^e]. 12 yıllık eğitim veren, üniversite – kolej öncesi okullar.

Bu çalışma [9] okullarda havalandırma sistemlerinin yapılması veya yenilenmesi açısından önemli öneriler getirmektedir:

- Okullarda yetersiz havalandırmanın sebepleri olarak aşağıdaki hususlar belirlenmiştir.
 - Yanlış veya eksik seçilmiş ekipmanlar
 - Hatalı uygulamalar
 - Kötü iletişim
 - Kötü bakım
- Yapılan incelemeye göre, eskimiş ekipmanların yenileri ile değiştirilmesi, söz konusu okullardaki havalandırma problemlerine çözüm getirmemiştir.
- Talep kontrollü (DCV) olan sistemlerde yeterli havalandırma olduğu görülmektedir.
- CO₂ konsantrasyonunun termostat üzerinde gerçek zamanlı olarak görüntülenmesi havalandırmanın takibi açısından önemlidir.
- Okullardaki HVAC sistemlerinin periyodik kontrolü yapılmalıdır.



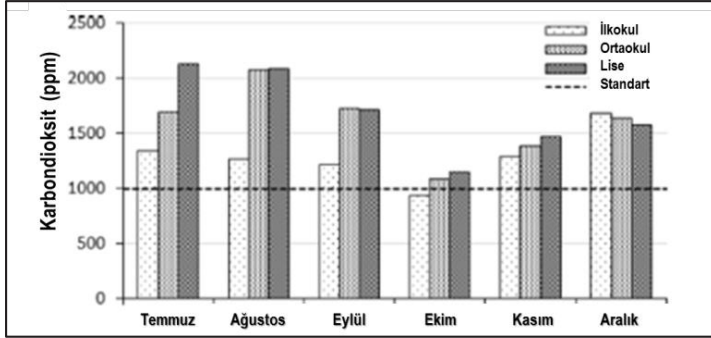
Şekil 4.2. Karbondioksit konsantrasyonunun 1100 ppm'i geçtiği zaman yüzdeleri. Diyagramlardaki her bir çubuk bir sınıfı temsil etmektedir [9].

Bu çalışmada dikkati çeken önemli bir konu , Kaliforniya eyaletinde sınıflarda CO₂ konsantrasyonu için sınır-limit değerin önerilmemesi ve yetersiz havalandırma sebebinin, ASHRAE 62.1-2016'da önerilen minimum havalandırma debisine (7 l/s-öğrenci)^f ve sınıftaki öğrencilerin fizyolojik özelliklerine (7. ve 8. Sınıftaki öğrenciler) göre ürettikleri karbondioksit debisine (0.005 l/s.öğrenci) bağlı olarak oluşacak konsantrasyonunun (1100 ppm) havalandırma için kontrol parametresi olarak kullanılmasıdır. Bir başka deyişle önce minimum 7 l/s.öğrenci havalandırma debisi en düşük uygun hava debisi kabul edilmiş, daha sonra bu debiye bağlı olarak maksimum CO₂ konsantrasyonu bulunmuş ve sınıflarda ölçülen CO₂ konsantrasyonuna göre (1100 ppm ile karşılaştırılarak) havalandırmanın uygun olup olmadığı belirlenmiştir. Göz önüne alınan limit karşılaştırma değerinin (1100 ppm) fizyo-patolojik bir gereksesi olmayıp, gerekçe ASHRAE 62.1-2016'daki kombine havalandırma debisi (öğrenci başına ve birim alan için belirlenen debileri birlikte temsil eden) 7 l/s.öğrenci değerinin uygun havalandırma debisi kabul edilmesidir.

Kaliforniadaki okullardaki gibi İsveç'te de talep kontrollü (DCV) havalandırma sistemli sınıflarda yapılan bir çalışmada da, CO₂ seviyesi standarda (EN) uygun çıkmıştır [10]

^f Böyle bir debi değeri ilgili standartta yoktur. 9 yaş ve üzeri için verilen 6.7 l/sn.öğrenci değeri tam sayıya çevrilmiş olabilir.

Kore’de, karbondioksit konsantrasyonu ile havalandırma arasındaki ilişkinin arandığı bir araştırmada, ilk okul, orta okul ve lise seviyesinde eşit sayıda olmak üzere toplam 15 okulda yapılan ölçümlerde, sınıfların çoğunda ortalama CO₂ konsantrasyonu 1000 ppm değerinin üzerinde (Şekil 4.3) ve havalandırma debileri de önerilen debinin (4.9 ACH) altında bulunmuştur [11]. Sınıflarda öğrenci başına düşen hacim 7.0 m³/öğrenci değeriyle, özellikle Türkiye’deki okullardan [12÷14] daha yüksek görülmektedir. 2015 yılında yayınlanan mimari kılavuza göre öğrenci başına düşen minimum hacimler 7.0 m³/öğrenci değerine yaklaşmakla birlikte [15], özel okullar yönergesine göre çok daha düşük olabilmektedir [16]. Öğrenci başına düşen hacim, IHK ve havalandırma açısından önemli bir büyüklüktür. Özellikle saatte hava değişimi sayısı (ACH) veya Havalandırma Miktarı Prosedürü yaklaşımı ile havalandırma tasarımında, sınıflardaki öğrenci başına düşen hacim, iç hava kalitesini önemli derecede etkiler.



Şekil 4.3. Aylara göre sınıflarda ortalama CO₂ konsantrasyonu [11].

Okullardaki havalandırma hızları üzerine yapılan, bu nedenle CO₂ konsantrasyonunun da değerlendirildiği son çalışmalardan biri İngiltere’de gerçekleştirilmiştir [17]. Pencereler aracılığıyla doğal havalandırmanın öngörüldüğü ve İngiltere için ılıman sayılan bölgelerde seçilmiş 29 sınıfta yapılan CO₂ ölçümlerinin, %55’i 1000 ppm değerinin üzerindedir. Polonya’da yapılan bir çalışmada da sınıflardaki CO₂ konsantrasyonunun farklı kapasite ve büyüklükteki sınıflarda, 45 dakikalık ders içinde maksimum müsaade edilebilir 1000 ppm değerini geçtiği gözlenmiştir [18].

Türkiye’de son yıllarda okullarda iç hava kalitesi üzerine yapılan bir araştırmada, Kastamonu’daki bir ortaokulun 22 dersliğinde, öğretmenler odasında ve kantininde, 2016-2017 eğitim öğretim yılında 9 ay boyunca CO₂ ölçümleri yapılmıştır [14]. Tüm sınıflarda aylık ortalamalar ölçüm yapılan sınıflarda, 40 dakika sonra CO₂ konsantrasyonu, Haziran ayı hariç diğer aylarda 1000 ppm’in çok üstünde ölçülmüştür. Öğrenci başına düşen alanın küçük olduğu sınıflarda 40 dakikalık ders sonunda, Şubat ayında, CO₂ konsantrasyonu 4436 ppm ile tepe yapmıştır. Ekim – Nisan ayı ortalamaları da 3000 ppm’in üzerindedir. Göreceli olarak daha az yoğun sınıflarda CO₂ konsantrasyonu 1000 ppm’in çok üstündedir. Tüm aylarda kantindeki CO₂ konsantrasyonu 1000 ppm’den büyüktür. Öğretmenler odasında da Aralık – Mart aylarında 1000 ppm üzerindedir. Mekanik havalandırmanın olmadığı okulda havanın güzel olduğu aylarda (özellikle Haziran) pencerelerin açık tutulmasıyla CO₂ konsantrasyonunun düştüğü görülmektedir. Okul dışında dış ortamdaki CO₂ konsantrasyonunun, ölçme zaman diliminde, Ekim ayında minimum 462 ppm, Ocak ayında ise 582 ppm olarak ölçüldüğü görülmektedir. Google Earth’de okulunun çok katlı binalar arasında olduğu görülmektedir. Kış aylarında ısıtma sistemlerinin emisyonu nedeniyle CO₂ konsantrasyonunun ortalama atmosferik konsantrasyonun çok üstünde değerlere ulaştığı düşünülmektedir. Söz konusu okul Türkiye’de soğuk kara ikliminin olduğu bölgelerdeki kış aylarında pencerelerin açılmadığı okullardaki CO₂ kirliliği için tipik bir örnek olarak öngörülebilir.

Kastamonu’ya göre daha sıcak bir bölgede olan Şanlıurfa’da, mekanik havalandırma olmayan 5 okulda, 9-11 yaşlarındaki öğrencilerin bulunduğu 26 sınıfta yapılan güncel bir araştırmada da [19] bir

yıl, iki sezon boyunca diğer kirleticilerin yanında CO₂ konsantrasyonu da ölçülmüştür. İki sezon boyunca medyan CO₂ konsantrasyonunun 1000 ppm'den büyük, ısıtma sezonunda ise 2000 ppm ile 3000 ppm arasında olduğu izlenmiştir.

Yine Türkiye'de bir üniversitenin üç fakültesine ait 86 derslikte yapılan ölçümlerde, 78 derslikteki (%91) ortalama CO₂ konsantrasyonunun 1000 ppm üzerinde olduğu belirlenmiş, bir sınıfta ani değer olarak 4806 ppm değerine ulaştığı görülmüştür [20].

DING vd. [21], üç tanesi 2018 yılında olmak üzere, 2011-2018 yılları arasında yayımlanmış, 8 ülkedeki⁸ toplam 554 okulda 1105 sınıfta yapılmış araştırmaları içeren 8 çalışmayı değerlendirmişlerdir. Aktarılan sonuçlardan, göz önüne alınan okulların tamamında mekanik havalandırmanın olduğu ABD'deki okulların %87.7 'sinde ve farklı havalandırma sistemine sahip Fransa, İngiltere ve Çin'de okulların tamamında, CO₂ konsantrasyonlarının öngörülen maksimum değer (1000 ppm) üstünde ölçülmesiyle, uygun havalandırmanın söz konusu olmadığı görülmektedir.

Yukarıda özetlenen araştırmalardan, tüm dünyada sınıfların yoğunluğunda havalandırma sisteminin olmadığı, olan havalandırma sistemlerinin yoğunluğunun da uygun olmadığı görülmektedir. Özellikle COVID-19 salgınında, okula dönüş sürecinde okulların havalandırma sistemlerinin yetersizliği çarpıcı olarak algılanmıştır.

Havalandırmanın olmadığı, gözlenen mevcut yaygın öğrenci yoğunluğundaki sınıflarda, özellikle ısı konforu korumak amacıyla pencere ve kapıların açılmadığı kış aylarında, bir ders saatinde solunum yoluyla karbondioksit konsantrasyonunun genel kabul görmüş 1000 ppm değerinin çok üzerine çıkacağına görülmesi için okullarda test yapılmasına gerek yoktur. Sınıfta geometrik ve öğrenci demografik özelliklerine bağlı olarak CO₂ konsantrasyonunun zamanla değişiminin ne olacağı kolayca hesaplanabilir [22] veya bu amaçla yapılmış simülasyonlardan biriyle [23] görülebilir.

Mekanik havalandırmanın olmadığı sınıflarda, pencere ve kapıların olduğu kış aylarında CO₂ birikimini, öğrenci sağlığını ve başarısının etkilemeyecek seviyeye getirmek için yeterli olmasa da azaltacak tek mekanizma infiltrasyondur. Günümüz yapı pencere – kapı doğrama teknolojisi, özellikle ısı konforu koruyarak enerji tasarrufu sağlamak amacıyla infiltrasyonla olan hava değişimini çok düşürmüştür. Sonuç olarak Türkiye'deki sınıflarda, belirtilen sınır koşullarında (mimari özellikler, öğrenci yoğunlukları, ısı konforu koruma ve enerji tasarrufu) CO₂ konsantrasyonunun genel olarak sağlık ve başarı limitlerinin üzerinde birikimlere ulaşması olağan bir sonuçtur. Şüphesiz bu sonuç karbondioksitin gösterge olduğu diğer iç hava kirlilik bileşenlerinin birikimi için de geçerlidir.

KAYNAKLAR

- [1]. SUNDELL, J. "On the History of Indoor Air Quality and Health". *Indoor Air*, 14 (Suppl 7): 51–58, 2004.
- [2]. SANTAMOURIS, M. "Experimental Investigation of the Air flow and Indoor Carbon Dioxide Concentration in Classrooms with Intermittent Natural Ventilation". *Energy and Buildings*, 40, 1833–1843, 2008.
- [3]. TOKSOY, M. "Okullarda İç Hava Kalitesi ve Yönetimi: Günümüz Bilgi ve Pratiği". 12. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, TESKON, 8-11 Nisan 2015. <http://www.iccevrekalitesi.net/pdf/seminer/2015-02.pdf>
- [4]. GÜLLÜ, G. "İlköğretim Okullarında İç Ortam Hava Kalitesi ve Sağlık Etkileşimi". 12. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, TESKON, 8-11 Nisan 2015. <http://www.iccevrekalitesi.net/pdf/seminer/2015-03.pdf>
- [5]. FISK, W.J. "The Ventilation Problem in Schools: Literature Review". *Indoor Air*, 27, 1039–1051, 2017.
- [6]. HANNINEN, O. vd. "Analysis of CO₂ Monitoring Data Demonstrates Poor Ventilation Rates in Albanian Schools During the Cold Season". *Air Qual. Atmos. Health*. 10, 773–782, 2017.

⁸ ABD, İngiltere, Fransa, İtalya, Danimarka, Hollanda, Finlandiya, Çin.

- [7]. WHO, "Parma Declaration for Environment and Health". Ministers and Representatives of Member States in the European Region of the World Health Organization, 2010.
- [8]. BATTERMAN, S. vd. "Ventilation Rates in Recently Constructed U.S. School Classrooms". *Indoor Air*; 27: 880–890, 2017.
- [9]. CHAN, W.R. vd. "Ventilation Rates in California Classrooms: Why Many Recent HVAC Retrofits are not Delivering Sufficient Ventilation". *Building and Environment*, 167, 106426, 2020.
- [10]. SIMANEC, B. vd. "Indoor Air Temperatures, CO₂ Concentrations and Ventilation Rates: Longterm Measurements in Newly Built Low-Energy Schools in Sweden". *Journal of Building Engineering*, 25, 2019
- [11]. CHOE, Y. vd. "Evaluation of Carbon Dioxide Concentrations and Ventilation Rates in Elementary, Middle, and High Schools" *J Environ Health Sci*; 46(3): 344-352, 2020.
- [12]. "Kırşehir'de Okulların İç Ortam Hava Kalitesinin Sağlık Üzerine Etkisi" Projesi. (Proje Yürütücüsü: Öğr. Üyesi Dr. Ü.T. BABAOĞLU). TÜBİTAK, Program Kodu: 3001, Proje No: 216S805, Aralık 2018.
- [13]. EKREN, O. vd. "Okullarda İç Hava Kalitesinin Geliştirilmesi: Örnek Uygulama", 12. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, TESKON, 8-11 Nisan 2015. <http://www.iccevrekalitesi.net/pdf/seminer/2015-07.pdf>
- [14]. KUŞÇU, E. "Sınıflarda Hava Kalitesinin Öğrenme Üzerine Etkisi". Yüksek Lisan Tezi. Kastamonu Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, 2018.
- [15]. MEB, "Eğitim Yapıları Asgari Tasarım Standartları Kılavuzu". 2015
- [16]. MEB, "Özel Öğretim Kurumları Standartlar Yönergesi". 11 Mar 2020
- [17]. KORSAVI, S.S. ve MONTAZAMI, A. "Developing a Valid Method to Study Adaptive Behaviours with Regard to IEQ in Primary Schools". *Building and Environment*, 153, 1–16, 2019.
- [18]. KRAWCZYK, D.A. vd. "CO₂ Concentration in Naturally Ventilated Classrooms Located in Different Climates—Measurements and Simulations". *Energy and Buildings* 129, 491–498, 2016.
- [19]. ŞAHİN, C. vd. "Indoor Environmental Quality in Naturally Ventilated Schools of a Dusty Region: Excess Health Risks and Effect of Heating and Desert Dust Transport". *Indoor Air*, (basımda), 2022. doi: 10.1111/ina.13068
- [20]. YURDAKUL, S. vd. "Süleyman Demirel Üniversitesi Seçili Dersliklerinin İç Çevre Kalitesi Açısından İncelenmesi" *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7(4), 811 – 818, 2019.
- [21]. DING, E. vd. "Ventilation Regimes of School Classrooms Against Airborne Transmission of Infectious Respiratory Droplets: A Review". *Building and Environment*, 207, 108484, 2022.
- [22]. PERSILY, A. ve JONGE, L. "Carbon Dioxide Generation Rates for Building Occupants". *Indoor Air*, 27:868–879, 2017.
- [23]. <http://www.iccevrekalitesi.net/co2.htm>

BÖLÜM 5

İÇ ORTAMLARDA KARBONDİOKSİTİN İNSAN SAĞLIĞINA VE PERFORMANSINA ETKİSİ

“Kapalı bir odada sık sık solunan... ve değiştirilmeyen hava kadar sağlıksız bir hava olmadığına eminim”.

Benjamin Franklin [1]

En son revizyonu 5 Ocak 2022 de yapılan EPA'nın sayısı 188 olan tehlikeli hava kirleticileri veya havayı zehirli yapan maddeler [2] listesinde ve dış hava sınır değerleri getirilmiş olan altı yaygın hava kirleticisi arasında karbondioksit yer almamaktadır. EPA'nın tanımında “tehlikeli hava kirleticileri” veya “hava zehirleri^a”, kansere veya ciddi sağlık sorunlarına sebep olan kirleticiler olarak tanımlanmakta, yaygın hava kirleticileri de belirli sınır değerlerin altında konsantrasyonlarda bulunduğu takdirde sağlık etkilerine önemli düzeyde yol açmadıkları değerlendirilmektedir [3]. Endüstriyel ortamlar ve olasılığı çok düşük de olsa olağan dışı (kaza vs) hallerde sıradan yaşam hacimlerinde görülebilecek tehlikeleri işaret eden bu tanım göz önüne alınarak olsa gerek, sıradan günlük kapalı yaşam hacimlerindeki 5000 ppm'den az CO₂ sağlığımızı etkileyecek düzeylerde tehlikeli kabul edilmemektedir. Ancak, yapılan araştırmalara göre insanların fizyolojik ve psikolojik sağlığını, bilişsel performanslarını, konfor ve üretkenliklerini etkileyen iç hava kirliliği bileşen seviyeleri için, gerekli duyarlılığı ve hassasiyeti sağlayacak bir başka tanıma - terime ihtiyaç olsa gerektir. ABD Yüksek Mahkemesi (Supreme Court) 2007 yılında CO₂'in bir kirletici ve EPA'nın da yeni araçların CO₂ emisyonunu kontrol etmeye hakkı olduğuna karar vermiştir [4]. Ancak buradaki kirleticilik iç hava kalitesinden çok küresel ısınmaya neden olan CO₂ emisyonlarının kontrolü ile ilgili olsa gerektir.

Bu çalışmada göz önüne alınan karbondioksit seviyeleri, endüstriyel tesislerde veya sıradışı kazalarda oluşabilecek 5.000 ppm üzerindeki konsantrasyonlar değil, sıradan yaşam hacimlerindeki (ev, okul, ofis, AVM, vs) insan (solunum) kaynaklı (metabolik) emisyon konsantrasyonlarıdır. Bu çalışmanın konusu olmayan çok yüksek seviyelerdeki CO₂ konsantrasyonlarının insan sağlığı üzerindeki etkileri literatürde yer almaktadır [5,6].

İç hava kalitesinin insanlar üzerindeki etkisi ile ilişkili değerlendirmeler milattan öncesine, Hippocrates'a (460-377 B.C.) [7] ve VITRIVUS'a (MÖ 90-20) kadar uzanmaktadır [8]: “Önce, zemin kattaki bölmeleri ele alırsak, kum yerine fırınlanmış tuğla ile karıştırılmış ilk sıva tabakasını yerden üç ayak kadar yüksekliğe uygulayınız; sonra da rutubetten bozulmaması için o kısımlara sıvayı uygulayınız. Ancak, bir duvar, bütünüyle nemli bir ortamda ise, koşullara uygun bir uzaklıkta iç tarafa ince bir ikinci duvar inşa ediniz; iki duvar arasındaki bu aralığa, bölme kotundan daha altta ve açık havaya delikleri olan bir kanal açınız. Aynı şekilde, duvar o noktaya yükseldiğinde tepesinde de hava delikleri bırakınız. Çünkü, nemin alttaki veya üstteki deliklerden çıkma olanağı yoksa, yeni duvarın her tarafına yayılacaktır. Bu yapıldıktan sonra, duvarı fırınlanmış tuğladan yapılmış harçla sıvayıp, cilalayınız” [8]. İncil'de de (Leiticus 14:34-57) cüzzam ile ilgili olarak nem konusunda metinler yer almaktadır [9].

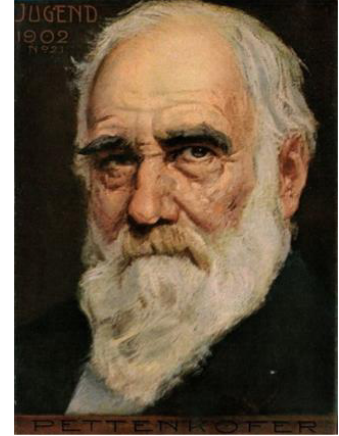
İnsan metabolizmasındaki rolünün önemi ile kapalı yaşam ortamlarındaki karbondioksit, kolay ölçülebilir olması nedeniyle de, 18. yüzyıldan bu yana hijyen, tıp ve mühendislik disiplinlerinin ilgi duyduğu iç çevre kalitesi araştırmalarının öznesidir. Koku kirliliği ile bir gösterge olarak karbondioksit arasındaki ilişkinin tanımlanmasına yönelik hijyen ve tıp alanındaki araştırmalar, iç ortamlarda yaygın olarak oluşan karbondioksit birikiminin sağlık fizyolojik ve bilişsel performans ile ilişkisi alanlarına evrilmiştir. Mühendislik alanında ise hijyen ve tıp alanlarında yapılan araştırma sonuçlarına dayalı olarak, iç ortamların etkin bir şekilde havalandırılması araştırmalarına ve uygulamalarına

^a Air toxic

yönelinmiştir. Havalandırma debilerinin tarihsel değişimi ve havalandırmanın dayandığı teoriler WARGOCKI tarafından [7] verilmiştir.

17. yüzyıldan günümüze kadar olan, bilim insanlarının ilgisini çok çektiği görülen iç hava kalitesi, havalandırma ve sağlık arasındaki ilişkilerle ilgili yaklaşık 2100 adet konferans bildirisi ve Web of Science da yer alan yaklaşık 27000 adet yayın, çok geniş bir çerçevede SUNDELL [9, 10] tarafından değerlendirilmiştir. Yapılan araştırmalar iç hava kalitesinin insan sağlığı üzerine etkisinin dış havadan daha fazla olduğunu göstermiştir [10]. Havalandırma ve iç ortamlardaki karbondioksit konsantrasyonu ile ortamdaki insanların iç hava kalitesi algıları arasındaki ilişkinin tanımlanmasının tarihi ise modern hijyen bilimini başlatan PETTENKOFER'in (1818-1901) çağına, 19. Yüzyılın ortasına kadar uzanmaktadır.

1842'de Münih'te hijyen üzerine dersler vermeye başlayan, 1853'de "First Professor of Hygiene"^b olarak atanan PETTENKOFER, iç hava kalitesinden tatminsizliğin, solunum ve deri yoluyla havaya aktarılan organik malzemelerden olduğunu açıklamış, kötü iç hava kalitesinin hastalık yapmadığını ama insanların hastalık ajanlarına karşı direncini zayıflattığını ifade etmiştir [9]. PETTENKOFER'a göre CO₂ insanlar tarafından üretilen zehirli emisyonların bir göstergesidir. Eğer CO₂ kaynağı sadece insanlar ise bir ortamda 1000 ppm (%0.1) üzerinde CO₂ içeren hava solunum için iyi değildir. PETTENKOFER ve çağdaş hijyenistler, yatak odalarında 700 ppm, diğer yaşam hacimlerinde 1000 ppm konsantrasyonun üzerine çıkılmamasını, havalandırma için bir ölçüt olarak kabul etmişlerdir. 1887'de yayınlanan bir çalışmada, yüksek seviyede mikroplu ve uçucu organik bileşiklerin yanında, yüksek CO₂ konsantrasyonu olan ortamlarda yaşamak ve uyumak, pekçok hastalıktan ölmenin ve kazaların nedeni olarak verilmiştir [10].



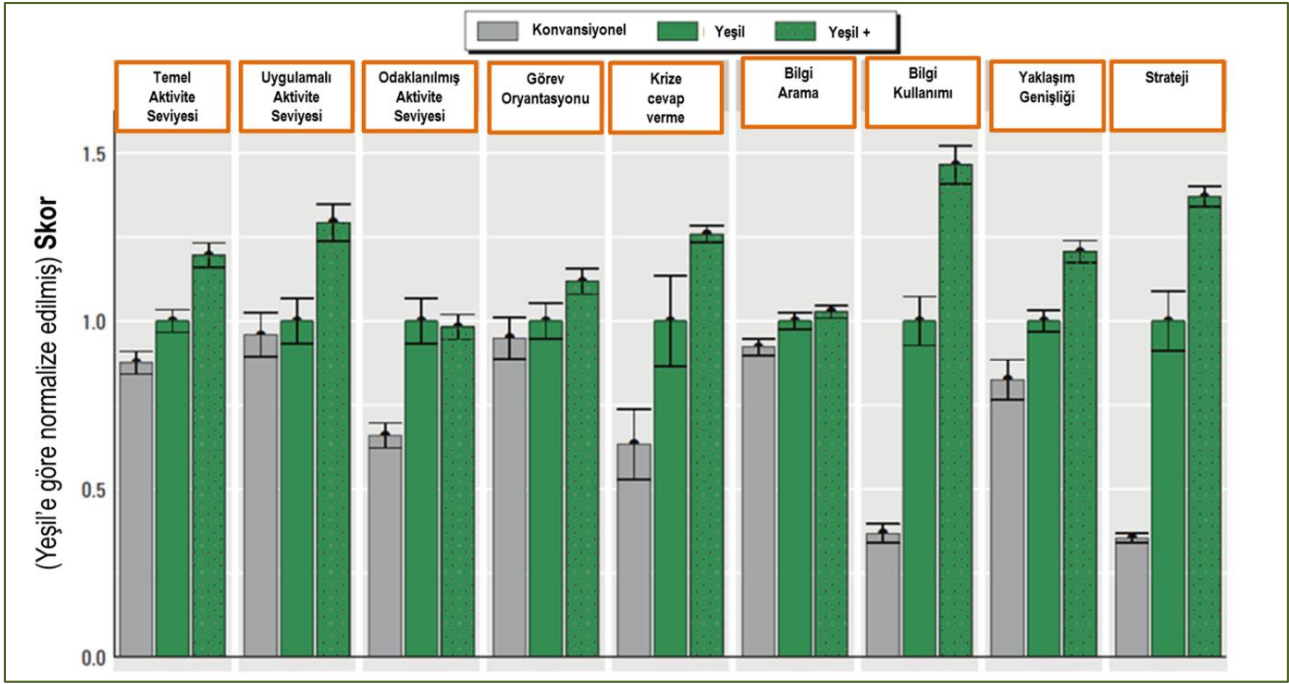
Joseph Max von Pettenkofer
(1818 – 1901)

Nobel Ödüllü Ünlü Fizikçi Niels Bohr'un babası Christian Bohr 1904 yılında, Bohr Etkisi (Bohr Effect) olarak anılan fizyolojik olguyu açıklamıştır [11]: Kanın (Hemoglobinin) oksijen bağlama afinitesi, karbondioksit konsantrasyonu ile ters orantılıdır. CO₂ konsantrasyonunun arttığı ortamlarda kandaki CO₂ konsantrasyonu da artmaktadır. Bohr Etkisine göre kandaki CO₂ konsantrasyonunun artması demek, kanın daha az oksijen taşıması ve böylece beyne daha az oksijen gitmesi demek de beynin bilişsel fonksiyonlarının azalması demektir ve bu etki vücut küçüldükçe artmaktadır ki doğal olarak çocuklarda daha etkili olmaktadır [12]. ALLEN vd'nin [13] yaptığı çalışmanın sonuçları da artan CO₂ konsantrasyonu ile bilişsel performans değişiminin gözlendiği bir çalışmadır (Şekil 5.1)

CO₂ seviyesi ile insan sağlığı arasındaki öncül çalışmaları değerlendiren bir başka araştırmacıya göre [14], 1960'a kadar karbondioksitin sağlık üzerindeki etkisinin araştırılmasında iki kriter söz konusudur. İlki 5000 ppm'in üzerindeki CO₂ solunum hızını arttırmakta, solunum sistemine ek yük getirmektedir. İkincisi ise PETTENKOFER ile FLUGGE^c'nin önerdiği 700 -1000 ppm aralığının atmosferik karbondioksit için uygun olduğudur. Ancak GOROMOSOV'a [14] göre "ikinci kriterin fizyolojik bir temeli yoktur, hava içindeki kirliliklerin dolaylı indeksleri gibi pratik değerlere dayanmaktadır". Ancak 1960'larda yapılan araştırmalara göre 1000 ppm karbondioksit konsantrasyonu, kan dolaşımında ve elektriksel beyin faaliyetlerinde değişikliğe sebep olmaktadır. ELISEEVA tarafından yapılan bu çalışmalara göre 1000 ppm CO₂ konsantrasyonunun insan üzerinde zararlı etkileri vardır ve ortalama karbondioksit 500 ppm'den az olmalı, 1000 ppm değeri aşılmamalıdır; dış havadaki CO₂ konsantrasyonu 300 ppm kabul edilerek, 500 ppm değerini aşmamak üzere 32 m³/saat.kişi (8.9 l/s) havalandırma yapılmalıdır [14].

^b Birinci Hijyen Profesörü

^c Carl Georg Friedrich Wilhelm Flügge (12 September 1847 – 10 December 1923)



Şekil 5.1. Farklı CO₂ konsantrasyonlarının (Konvansiyonel seviye - 1400 ppm; Yeşil seviye - 800 ppm; Yeşil+ - 500 ppm) bilişsel fonksiyonlara etkisinin, (Yeşil) 800 ppm konsantrasyonundaki performansa göre normalize edilmiş ortalama değerleri [13].

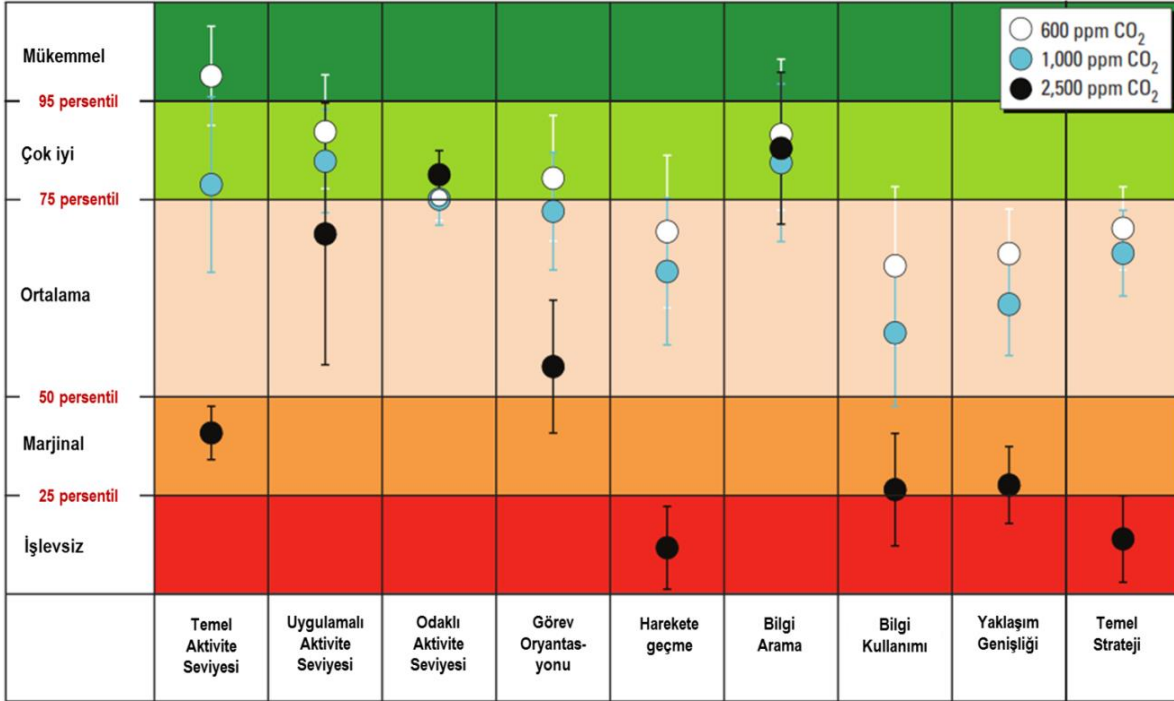
GOROMOSOV'un referans verdiği ve 1000 ppm üstündeki CO₂ konsantrasyonunun beyin faaliyetlerini etkilediği araştırmadan sonra, LBNL^d ve Syracuse üniversitesinden bilim insanlarının oluşturduğu bir grubun yaptığı araştırma [15,16], zihinsel faaliyetler üzerine sadece CO₂ etkisinin gözlenmesi açısından önemli bir çalışma olmuştur. Bu araştırmada yaşama alanlarına uygun test odalarında, diğer parametreler (havalandırma, sıcaklık vs) sabit tutularak sadece CO₂ konsantrasyonu üç farklı değerde (600 ppm, 1000 ppm ve 2500 ppm) tutulmuş ve bu değerlerde deneklerin zihinsel faaliyetleri değerlendirilmiştir. 600 ppm'e göre 1000 ppm de, dokuz farklı zihinsel karar verme performans faktörlerinin altısında istatistik olarak belirgin ve anlamlı şekilde düşme olmuş, benzeri etkiler 2500 ppm'de ise dokuz mekanizmanın yedisinde görülmüş, bir etkide ise (odaklanma etkinliği) küçük bir artma belirlenmiştir (Şekil 5.2).

FISK vd [16], ASHRAE 62.1-2010 standardında 1000 ppm CO₂ konsantrasyonuna karşılık gelen minimum havalandırma debisinde bile CO₂ konsantrasyonunun 1000 ppm'in üzerine çıktığını belirterek, enerji tasarrufu nedeniyle havalandırma debisinin daha da düşürülmek istenmesine karşılık, diğer kirleticiler sabit kalsa bile sadece CO₂ konsantrasyonunun yüksekliğinden karar verme performansının kötü etkileneceğini not etmişlerdir [16].

İç hava kalitesi ve bir bileşeni olarak karbondioksit, uyku kalitesini ve ertesi günü performansını da etkilemektedir. İç hava kalitesinin uyku kalitesi üzerine etkisi üzerine yapılan saygın hakemli dergilerde yayınlanmış objektif yöntemlerle yapılmış 46 çalışma SEKHAR vd [17] tarafından 2020 yılında ve dokuz çalışma AKIMOTO vd [18] tarafından 2021 yılında yayınlanmış iki "review" makalede değerlendirilmiştir. Hemen hemen aynı araştırma grubu tarafından yayınlanan bu iki makalenin TOKSOY [19] tarafından yapılan karşılaştırılması ve değerlendirilmesi aşağıda verilmiştir.

^d Lawrence Berkeley National Laboratory

SEKHAR vd'nin yaptığı ilk çalışmada [17], CO₂ konsantrasyonu ile uyku kalitesi arasında verilen ve doğrulanması gerektiği belirtilen geçici (henüz kesinlik kazanmamış) ilişkiler Tablo 5.1'de gösterilmiştir.



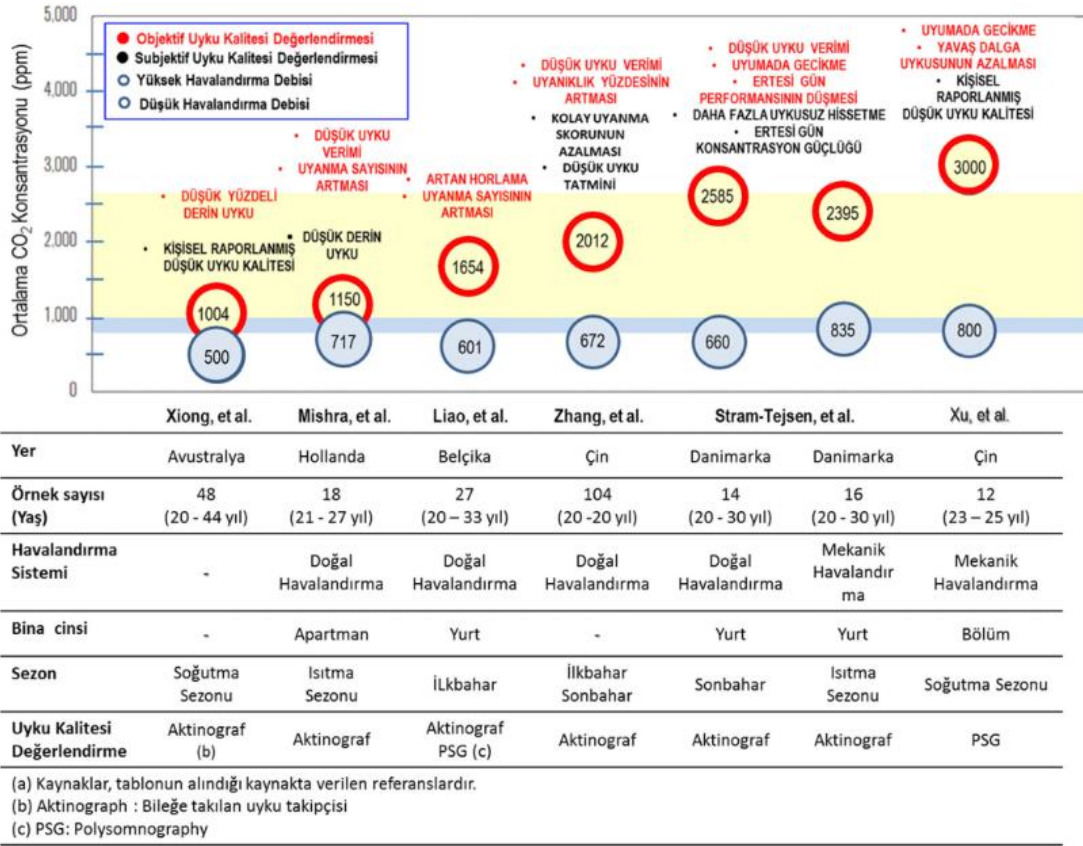
Şekil 5.2. Karbondioksit konsantrasyonunun insanların karar verme performansına etkisi (Hata çizgileri bir standard sapmayı göstermektedir) [15].

Tablo 5.1. CO₂ konsantrasyonunun uyku kalitesini etkileme seviyeleri [17].

| CO ₂ konsantrasyonu aralığı (ppm) | Değerlendirme |
|--|---|
| < 750 | Uyku kalitesinin etkilenmediği aralık |
| 750 – 1150 | Uyku kalitesinin muhtemelen etkilendiği aralık |
| 1150 – 2600 | Uyku kalitesinin etkilendiği aralık |
| <2600 | Uyku kalitesinin ve muhtemelen ertesi gün performansının da etkilendiği aralık. |

“AKIMOTO vd [18] düşük ve yüksek havalandırma debilerini temsil eden ortalama CO₂ konsantrasyonları ölçeği ile iç hava kalitesinin uyku verimi, uyku evreleri ve ertesi gün performansı üzerine etkilerini kolay izlenebilir bir formda sunmuşlardır (Şekil 5.3). Bu şekilde temel olarak göz önüne alınan araştırmalardan özetlenen, uyku çevresindeki ortalama 800 -1000 ppm üzerindeki CO₂ konsantrasyonunun, büyüklüğüne bağlı olarak, (1) uyku verimini, (2) uyku evresinde uyanma sıklığını, (3) uyku evrelerini ve nihayet (4) ertesi gün zihinsel performansı etkilemesidir. Grup bir önceki çalışmalarında [17], her ne kadar kesinlik kazanmamış bir sonuç olarak belirtilse de, öneri olarak <750 ppm CO₂ aralığını, uyku kalitesinin etkilenmediği aralık olarak önermesine karşılık bu çalışmada [18], <800 ppm aralığını vermişlerdir. 800 ppm CO₂ konsantrasyonu Danimarka'da yatak odaları havalandırması için standart üst sınırdır [20]”.

Grubun ikinci çalışmasında [18] ulaşılan sonuçlar, bir yıl önceki çalışmasının aksine, “günümüze kadar yapılmış sınırlı sayıda çalışma, birbiriyle uyumlu olarak kötü havalandırmanın, uyku kalitesi ve ertesi günü performansına etkisini göstermektedir” şeklinde yorumlanmıştır.



Şekil 5.3. Yatak odası havalandırmasının (iç hava kalitesinin) uyku üzerine etkisi üzerine yapılmış çalışmaların özeti [18].

CO₂'in tek başına insanların sağlığına (fizyolojik sağlığına, bilişsel performansına ve üretkenliğine) olan etkisi konusunda yukarıda örneklenen çelişkili sonuçların ve yorumların sebebi, hem bu alanda yapılan çalışmalarda değişkenlerin çokluğu, ölçme ve kontrollerindeki zorluklar, hem de araştırmalarda kullanılan yöntemlerdir ve bu araştırmaların pek çoğunda elde edilen bilgileri araştırmanın yapıldığı test ortamına özgü kılmaktadır. CO₂ ve havalandırmanın etkisinin araştırılmasında kullanılan, sonuçları genellikle birbiriyle ilintili temel olarak dört yaklaşım vardır. Bu dört yaklaşım aşağıda açıklanmıştır.

CO₂'in etkisinin araştırılması.

1. Farklı seviyelerde CO₂ konsantrasyonunun etkisinin araştırılması için kontrol hacmi (test odası, bir bina bölümü, vs) içindeki CO₂, kontrol hacmi içinde bulunanların antropojenik karbondioksit üretimi ile artar. Bu artışa paralel olarak, sağlık değişimleri subjektif ve/veya objektif olarak gözlenir. Bu türlü bir deneyde, CO₂ seviyesinin değişimi ile sağlık değişimi arasında pozitif bir ilişki görülüyorsa, bunun sebebinin doğrudan CO₂'a atfedilmesi mümkün değildir. Çünkü CO₂'in seviyesinin yükselmesi aynı kontrol hacminde diğer emisyonların (bio-emisyonlar, kimyasal yüzey emisyonları) seviyesinin de yükselmesi anlamındadır. Sağlık değişimi söz konusu emisyonların tümünün veya bir kısmının kümülatif etkisiyle olabilir.

2. Kontrol hacmindeki diğer emisyonların etkisinin önlenmesi ve sadece farklı seviyelerde CO₂ konsantrasyonunun etkisinin araştırılması için, kontrol hacminde CO₂ seviyesini atmosferik CO₂ konsantrasyonuna yakın seviyede tutacak miktarda havalandırma yapılan kontrol hacmine, farklı yöntemlerle elde edilmiş saf CO₂ verilerek konsantrasyon artırılır. Yine farklı CO₂ seviyelerinde sağlık değişimleri gözlenir. Bu test koşullarında, diğer emisyonları etkisi önlenmiş olduğundan sağlık değişimi söz konusu ise bunun nedeni, diğer değişkenler (diğer kirlenmeler, sıcaklık, nem, havalandırma debisi, hacimdeki insan sayısı) sabit tutulduğundan, CO₂ konsantrasyonu olacaktır.

Havalandırma debisinin etkisinin araştırılması.

3. Bu araştırmaların öncüleri, kontrol hacimlerdeki insanlardan kaynaklanan biyolojik temelli kokuların giderilmesi için gerekli havalandırma debisinin bulunmasına yönelik çalışmalardır. Kontrol hacminde uzun zaman bulunmanın sebep olduğu adaptasyonun yarattığı uygunluk algısından kaçınmak için, kokunun havalandırma yoluyla giderilmesine yönelik subjektif testler deneklerin kontrol hacmine girişte yapılmaktadır. Bu araştırmalarda hava debisi, çoğunlukla kontrol hacmindeki ölçülen CO₂ konsantrasyonuna, kontrol hacminin geometrik özelliklerine ve kontrol hacminde bulunan insanlara (cins, sayı, kilo, boy, diyet vs) bağlı olarak hesaplanan karbondioksit üretim hızı kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu tür hesaplamada kullanılan değişkenler, kontrol hacminde CO₂ konsantrasyonunun uniform dağıldığı kabulü de göz önüne alınırsa, sonuçlardaki belirsizliğin de yüksek olması doğaldır. Havalandırma tesisatlarında önerilen havalandırma debilerinin çıkış noktası bu tür araştırmalara dayanmaktadır ki, konsantrasyonun 1000 ppm'de tutulması verisine bağlı olarak bu tür araştırmalarla belirlenen verilere bağlı olarak hesaplanan havalandırma debisinin sağlandığı ortamlarda CO₂ konsantrasyonunun, daha önce belirtildiği gibi, 1000 ppm'in üstüne çıktığı görülmektedir.
4. Havalandırma debisinin doğrudan ölçüldüğü araştırmalar da söz konusudur. Bu tür araştırmalar daha çok özel tasarlanmış test odalarında gerçekleştirilmektedir.

Yukarıda verilen yöntemlerin kullanılarak, CO₂'in veya havalandırma debisinin sağlık üzerine etkisinin incelendiği araştırmaların karşılaştırmalı sonuçları, yakın zamanda yapılan review çalışmalarla [7,21÷23] ve yeni yapılan bazı araştırmalarda [24,25] detaylı olarak incelenmiştir. WARGOCKI, havalandırma debisinin tarihsel gelişimini de verdiği çalışmada [7], farklı yöntemlerle yapılmış, 1000 ppm üzerindeki CO₂'in sağlığı ve özellikle bilişsel performansı etkilediği sonucuna ulaşmış araştırmaları [13,15,26÷29], etkilemediği sonucuna varmış araştırmalarla [24,25] karşılaştırmış, kendisinden daha önce yakın zamanda yapılmış iki review çalışmayı da [21,22] dikkate alarak, aşağıdaki sonuçlara varmıştır:

- Yukarıda verilen 1. yöntemle göre yapılmış araştırma sonuçlarına göre, CO₂'in kendisinin 5000 ppm altındaki konsantrasyonları, etkilediği konusunda daha fazla araştırma olmasına rağmen, sağlık ve bilişsel performansı etkilememektedir.
- Yukarıda verilen 2. yöntemle göre yapılmış araştırmalar sonucunda elde edilen, 1000 ppm üzerindeki araştırmalardaki CO₂ ile sağlık arasındaki pozitif ilişkilerin sebebinin, CO₂'in kendisinden değil, kontrol hacmindeki diğer diğer kirlenmelerinde CO₂ ile birlikte birikiminin neden olduğu sonucu paylaşılmaktadır.
- Review çalışmalara göre [21,22], 5000 ppm altındaki CO₂ konsantrasyonunda fizyolojik sağlık açısından bir etki görülmemiş, bilişsel performans açısından bir etki beklenmemektedir.

Ancak, WARGOCKI'nin [7] referans verdiği, kendisinin de yazarları arasında olduğu FISK vd. çalışmasında [21] göz önüne alınan 10 araştırmanın değerlendirilmesinde,

- bir çalışma hariç diğerlerinde 5000 ppm'in altında CO₂'in akut sağlık ve hissedilir hava kalitesi problemlerine neden olmadığı,
- 1000 ppm üzerindeki CO₂'in bilişsel performansı etkilemesi doğrultusunda zıt sonuçların olduğu,
- 1000 ppm üzerindeki CO₂'in karar verme mekanizması etkilediği ama bunun mekanizmasının bilinmediği gözlemleri yapılmıştır.

WARGOCKI'nin referans gösterdiği ikinci "review" 'de [22], CO₂ konsantrasyonunun etkisinin araştırıldığı ve objektif bilimsel yöntemlerin kullanıldığı 37 deneysel çalışma değerlendirilmiştir. Bu çalışmaya göre:

- CO₂ konsantrasyonuna bağlı olarak tanımlanmış mevcut havalandırma standartları, bilişsel fonksiyonların korunması için yeterli değildir.
- CO₂'in etkisinin araştırıldığı çalışmaların bulguları, test koşullarına özel sonuçlar olabilir.
- Havalandırma debisinin artırılması ile bilişsel fonksiyonlar geliştirilebilir ancak sadece CO₂'in azaltılması sınırlı fayda sağlar.
- Yüksek – seviyeli karar verme performansını etkileyen CO₂ seviyesi için (beyin görüntüleme gibi) daha farklı tekniklerle araştırmalar önerilmektedir.

Yukarıda verilen yeni iki review [21, 22] ve bir deneysel çalışma [30] içindeki değerlendirme, WARGOCKI'nin [7] ulaştığı, 1000 ppm - 5000 ppm aralığındaki CO₂ konsantrasyonunun bilişsel fonksiyonları etkilemediği sonucunu, yukarıda özetlenen açık sonuçlarla, desteklememektedir.

Atmosferdeki ve kapalı yaşam hacimlerindeki CO₂ seviyesinin insan sağlığına etkisi üzerine yapılan araştırmaların, çok kapsamlı güncel dördüncü bir incelenmesi ve değerlendirmesi, Avustralya Ulusal üniversitesinden Prof. Phil BIERWIRTH tarafından yapılmıştır [23]. Çalışmanın temel amaçlarından biri yirmi beş milyon yıl boyunca 300 ppm'den daha az ortalama atmosferik CO₂ konsantrasyonunun 19. yüzyılın ilk çeyreğinden itibaren, endüstrileşme ile hızla artmaya başlamasıyla gelecekte ulaşacağı seviyenin insan sağlığı açısından yaratacağı sorunları incelemektir. IPCC^e 'nin senaryolarına göre (SRES^f) [31] farklı modellerle 2100 yılında ortalama atmosferik CO₂, 540 ppm ile 970 ppm arasında öngörülmektedir [32]. CO₂ konsantrasyonunun coğrafi farklılıkları göz önüne alınırsa, kentlerde ve endüstri merkezlerinde konsantrasyonun çok yüksek değerlere çıkabileceği kolayca tahmin edilebilir.

Yüksek CO₂ seviyelerinin yaratacağı sorunların ne olacağının belirlenmesi ise günümüzde kapalı yaşam hacimlerinde görülen yüksek CO₂ konsantrasyonlarının insanların sağlık ve bilişsel performanslarına etkisini üzerine yapılan çalışmaların incelenmesiyle görülebilir. BIERWIRTH [23] çalışmasında saygın dergilerde yapılmış ilgili 117 makale ve yayını incelemiştir. Bu çalışmanın benzeri "review" çalışmalardan önemli farkı ise 117 makalenin yaklaşık 60 tanesinin biyoloji ve tıp alanlarında^g yapılmış ve yayımlanmış çalışmalar olmasıdır. Uzay istasyonundan, denizaltılardan, uçak kabinlerine, motorsiklet başlıklarına, ofislere, okullara kadar olan alanlarda yapılmış çalışmalar BIERWIRTH tarafından değerlendirilmiştir. Makalesinde yer alan bilgiler Tablo 5.2'de kısaltılarak verilmiştir.

^e IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change (İklim Değişikliği Hükümetler Arası Paneli)

^f Special Report on Emission Scenarios Reports.

^g Biyolojik Kimya, Bio-Med, Tıbbi Kimya, Fizyoloji, Toksikoloji, Üroloji, Hijyen, Üroloji, Nöroloji, Pediatri...

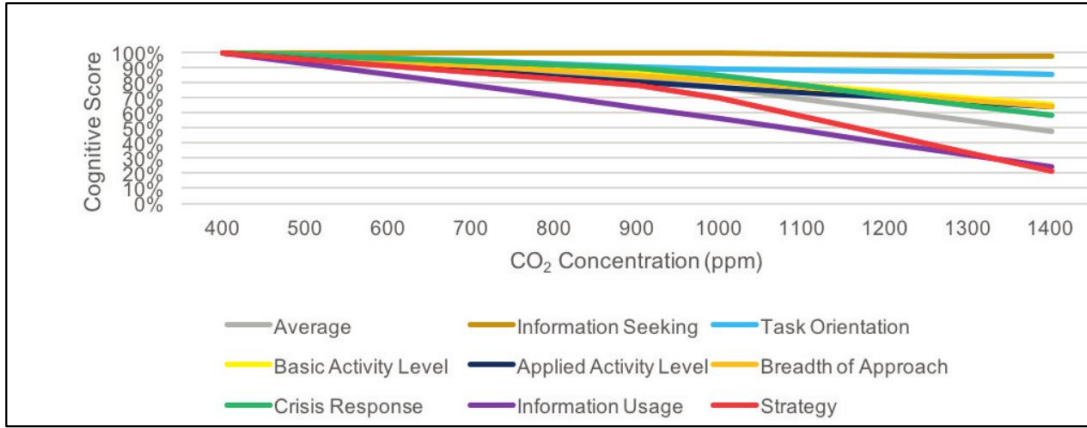
Table 5.2. 10.000 ppm (%1) değerinde veya altında CO₂ konsantrasyonunda sağlık etkileri (2021-BIERWIRTH [23], Tablo 1’den düzenlenmiştir. Makalede yer alan hayvanlarla ilgili bulgular bu tabloya alınmamıştır).

| CO ₂ konsantrasyonu (ppm) | Sağlık etkisi | Maruziyet süresi |
|--------------------------------------|---|-------------------|
| 10000 | Böbreklerde taş oluşumu (calcification), zihinsel etkileşim, diastolik kan basıncının (tansiyon üst değerinin) yükselmesi | 6 Hafta |
| 10000 | Zihinsel etkileşim, diastolik kan basıncının (tansiyon üst değerinin) yükselmesi | 75 dakika |
| 8500 | Akciğerlerde ölü hacmin artması | 20 gün |
| 7000 | Beyine giden kan debisinde %35 azalma (Bazı çalışmalarda zihinsel performans etkieri de görülmüştür). | 23 gün |
| 5000-6000 | Baş ağrısı, uyuşukluk-yavaşlama, huysuzluk, mental yavaşlama, duygusal hassaslık, uyku bozukluğu | Kısa süre |
| 5000 | Böbrek taşlanması (calcification) | 8 hafta |
| 5000 | Astronotlarda kandaki CO ₂ seviyesinin yükselmesi | 4 ay |
| 5000 | Denizaltı ve uzay araçlarında üst limit (Uluslararası Uzay Merkezinde 4000 ppm’e düşürülmüştür) | Sürekli operasyon |
| 5000 | Bir iş gününde İzin Verilen Limit (İVL) | 8 saat |
| 5000 | Kan dolaşım ve nörolojik sistemlerde değişim | 1,5 dakika |
| 4000 | Kalp atışında yükselme, uyarılma seviyesinde azalma, uykusuzluk ve yorgunlukta artma | 17 dakika |
| 3500 | Bilişsel bozukluk, uyanıklığın azalması | 4 saat |
| 3000 | Bilişsel bozukluk, sinirlilik, sinirsel hasar | 38 gün |
| 2700 | EEG ile ölçümlenen uykulu olma hali | 9-13 gün |
| 2700 | Kalp atışında hızlanma | 10 dakika |
| 2000 - 4000 | Normal seviyenin %15 üzerinde sağlıksız kan CO ₂ seviyesi, uykusuzluk, baş ağrısı ve kalp atışında düzensizlik | 4 saat |
| 2000 - 3000 | Akciğer davranışında kısıtlamalar ve kanda yüksek CO ₂ | 3 saat |
| 1900 | Uyku kalitesinin azalması, uyku hali | 8 saat |
| 1400 - 3000 | Yorgunluk dahil bilişsel fonksiyonlarda ^h önemli bozukluklar | 2,5 – 8 saat |
| 1200 | Bilişsel fonksiyonlarda düşüş | 2,5 saat |
| 1000 | Nefes almada, kan dolaşımında, beyin zarında zararlı değişiklikler | Kısa süre |
| 1000 | Radikallerin kontrol edilememesi ve bakterilerin DNA’sında hasar (insanlarda kanser etkisi) | 3 saat |
| 1000 | Solunum hastalıkları seviyesi, baş ağrısı, yorgunluk, sınıflarda odaklanmada zorluklar | Kısa süre |
| 950 - 1400 | Sağlık semptomları (solunum, deri, göz, baş ağrısı, bilişsel, baş dönmesi, duyumsal), kalp atışında artma | 30 dakika |
| 950 - 1000 | Bilişsel fonksiyonlarda orta dercede bozukluklar | 2,5 – 8 saat |
| 800 | Hasta Bina Sendromuna yol açan seviye – baş ağrısı, baş dönmesi, yorgunluk, solunum sorunları, gözde, burun ve mukoza zarında semptomlar. | Kısa süre |
| 400 | Bilinen etkisi olmayan güncel atmosferik ortalama konsantrasyon | Hayat boyu |
| 280-300 | Bilinen etkisi olmayan 1820 den önceki 25 milyon yıldaki konsantrasyon | Hayat boyu |

BIERWIRTH tarafından çalışmasına dahil edilmeyen, yakın dönemde sonuçları yayınlanmış araştırmalar söz konusudur. Bu çalışmalardan biri 36 Denizaltı personelinin, The Naval Submarine

^h Bellek yeteneği, dikkat, dil kullanma ve anlama, öğrenme, muhakeme, problem çözme, karar verme, oryantasyon.

Medical Research Laboratory's (NSMRL)ⁱ Genesis Hypo/Hyperbaric test odasında yaratılan kontrollu atmosferde, 45 dakikalık test periyotlarında 600, 2500 ve 15000 ppm konsantrasyonlarında tutulması ve test esnasında ve sonrasında Strategic Management Simulation (SMS) testlerine tabi tutulması ile gerçekleştirilmiştir [33]. Test şartları gözlemlendiğinde test odası sıcaklıklarının ve neminin farklı konsantrasyonlarda yapılan testlerde farklı olduğu görülmektedir. Araştırmacılara [33] göre yapılan testler sonucunda ulaşılan bulgular, küçük ve orta (600 ppm ve 2500 ppm) konsantrasyonlarda bazı araştırmaların [13,15] ulaştığı sonuçları desteklememektedir. Sonuçları karşılaştırılan araştırmalarla [13,15], RODEHEFFER vd'nin [34] çalışması arasındaki temel fark, deneklerin test şartlarına maruziyet sürelerinin dikkat çekici olarak farklı olmasıdır. Sonuçları farklı bir grafik gösterimi **Şekil 5.4'de** verilmiş olan ALLEN vd'nin [13] çalışmasında denekler test şartlarında 09:00 – 17:00 zaman diliminde bulunmuşlardır. SATISH vd'nin [15] çalışmalarında ise test koşullarına 2,5 saat maruz kalmışlardır.



Şekil 5.4. Karbondioksitin çalışanların bilişsel yetenekleri üzerindeki etkisi [33].

Pekçok çalışmaya rağmen CO₂'in fizyolojik sağlık ve bilişsel performans üzerindeki etkisi alanında önceki sonuçlar ile çelişen bulgulara erişilen yeni çalışmalar söz konusudur. Bunlardan bir tanesi de, biri normal (770 ppm ± 41v ppm) diğeri çok yüksek (19900 ppm ± 280 ppm) seviyede iki farklı CO₂ konsantrasyonundaki ortamda 8'i madenci 23 denek ile yapılmış subjektif ve objektif ölçme yöntemlerinin kullanıldığı araştırmadır [35]. Denekler 770 ppm ve 20000 ppm ortamlarda 240'ar dakika tutulmuşlardır. Ölçümler sonucu elde edilen bulgulara göre yüksek CO₂ konsantrasyonunda kanın pH'ı ve kandaki CO₂ kısmi basıncı, düşük konsantrasyona (770 ppm) göre belirgin derecede artmıştır. Benzeri olarak solunum hızı, düşük konsantrasyona göre yüksek CO₂ konsantrasyonunda küçük ama belirgin olarak artmıştır. Kalp atış hızında bir değişme gözlenmemiştir. 240 dakikalık test sonucunda yüksek CO₂ konsantrasyonu asit-baz dengesinde ve nefes almada istatistik olarak ciddi değişikliklere neden olmuştur. Ancak test tamamlandıktan sonra hemen normal seviyeye geriye dönüşüm söz konusudur ve bu değişimler adaptif değişimler olarak tanımlanmıştır. Düşük ve yüksek konsantrasyon etkilerinin karşılaştırmalı olarak incelendiği bu araştırmanın sonucunda yüksek CO₂ seviyesinin (20000 ppm) fizyolojik ve bilişsel olarak bir etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır. Diğer araştırmalarla çelişkili görülen bu sonuç için, sağlık ve bilişsel etkilerin gözlemlendiği diğer araştırmalardaki olumsuz etkilerin yüksek CO₂'den değil, ortamda bulunan diğer insan kaynaklı kirleticilerin ve çevresel parametrelerin neden olabileceği yorumu getirilmiştir. Bu çalışmada yüksek (20000 ppm) konsantrasyonda yapılan testlere ait sonuçların, 770 ppm yerine daha düşük (300-400 ppm) karşılaştırılmasının farklı sonuçlar yaratıp yaratmayacağına incelenmesinin ilginç olacağı düşünülmektedir. Yüksek CO₂ seviyesindeki değişimlerin adaptive olmasının zamandan bağımsız olduğu konusunda bir veri yoktur; sürekli yüksek CO₂ konsantrasyonunda çalışanların asit-baz

ⁱ ABD Deniz Kuvvetleri Denizaltı Tıbbi Araştırma Merkezi

dengeindeki, solunum hızındaki, kanın pH ve karbondioksit kısmi basıncındaki değişim çevrimlerinin uzun zamanlı etkilerinin ne olacağını araştırılması da önemli görülmektedir.

Tablo 5.2 ve sonuçları bu tablo'da yer almayan diğer çalışmalardan [6,34,36,37] görüleceği üzere, günümüze kadar yapılmış sayısız araştırma ve sonucunda yayımlanmış makaleler, kapalı yaşam hacimlerindeki CO₂ konsantrasyonunun 800 ppm'den başlayarak artan değerlerinde giderek ağırlaşan fizyolojik ve zihinsel performans sorunlarına neden olduğunu vermektedirler. Bu sonuçları desteklemeyen araştırmalar da söz konusudur. Bu durumda, 800 ppm - 1000 ppm üzerindeki CO₂ seviyesinin koku konforu, sağlık, bilişsel performansa etkisini pozitif bulan ve CO₂'in bu seviyedeki yoğunluğunun aynı zamanda yaşam hacimlerindeki diğer kirleticilerin de yoğunluğunu gösterdiğini belirten araştırma sonuçları mı dikkate alınmalıdır, yoksa söz konusu etkilerin ve indikatör görevinin geçerli olmadığını göz önüne alıp havalandırma ve kontrolü konusunda yeni yapılacak araştırmalarının sonuçları mı beklenmelidir? Benzer yaklaşımla uçuş simülatörlerinde yapılan testlerde karar verme mekanizmasının 1000 ppm CO₂ konsantrasyonunun üzerinde etkilendiğini belirten araştırmaların [38] sonuçları, performans düşüklüğünün mekanizması bilinmediği için yok mu sayılacaktır? Kokpitlerinde maksimum 1000 ppm konsantrasyonun sağlandığı uçakları mı tercih etmeliyiz, yoksa yeni araştırma sonuçlarını bekleyip, CO₂ konsantrasyonu ne olursa olsun mu demeliyiz. Dünyanın pek çok ülkesindeki otoritelerin kabul ettiği üzere, bu çalışmanın yazarları, fonksiyonel, fiziksel, insan yoğunluğu ve kullanım sıklığına bağlı olarak 800 ppm - 1000 ppm CO₂ konsantrasyonunun sağlık, bilişsel performans ve kirlilik kontrolü için bir gösterge olarak kullanılmasını, söz konusu araştırmaların ışığında öngörmektedir. Ayrıca günümüzde kapalı hacimlerdeki CO₂ miktarı, gelecekte atmosferik karbondioksitin artması nedeniyle daha da artacağından, yaşam hacimlerindeki CO₂'in sebep olduğu sağlık ve performans sorunları daha da derinleşecektir. Günümüzde 350 ppm ile 450 ppm arasında değiştiği öngörülen atmosferik karbondioksit konsantrasyonunun sadece bir genel değerlendirme anlamını taşıdığı, kentlerde, endüstriyel bölgelerde konsantrasyonun bu değerlerin çok üstünde olduğu dünyanın her şehrinde görülmektedir [39]

CO₂ sağlık ve zihinsel performans üzerinde etkileri konusunda burada verilen sonuçların dışında çok yeni olarak geliştirilen bir hipotez, CO₂ konsantrasyonuna çok farklı bir bakış önermektedir: Yüksek CO₂'in insan Proteomi ve ve sağlığı üzerine sistemik etki potansiyeli yaratmaktadır. Bu hipoteze göre, günümüzde içinde yaşadığımız, 5000 ppm'e kadar sıklıkla görülen CO₂ konsantrasyonları, memelilerin ve insanların (insan proteome^j'inin) geliştiği Birinci Endüstri Devriminden önceki bir milyon yıl içinde olan konsantrasyonlarından (135 ppm - 280 ppm) çok farklı ve yüksektir; bu nedenle insan kanındaki pH seviyesinin düşmesi ile pH aralığı, insan proteome'nın optimal performans aralığının dışına çıkmaktadır [40]. Hipotez, bu değişimle obezite, diyabet, solunum hastalıkları, kemik erimesi, kanser ve sinirsel düzensizlikler gibi modern yaşam tarzının semptomlarının yaygınlığının açıklanabileceğini öne sürmektedir [40].

1850'li yıllarda PETTENKOFER ve FLUGGE kapalı ortamlardaki CO₂'in 1000 ppm (Pettenkofer Sayısı) üzerindeki konsantrasyonu ile insanların eş zamanlı reaksiyonlarını işaret etmişlerdir [9]. Yaklaşık 50 yıl sonra 1904'de Christian BOHR, yüksek CO₂ konsantrasyonunun kandaki oksijen taşıma kapasitesini etkilediğini (Bohr Etkisi) göstermiş, yine yaklaşık elli yıl sonra GROMOSOV tarafından çalışmaları özetlenen ELISEEVA [14], yüksek (>1000 ppm) CO₂'in cerebral cortex'in fonksiyonel durumunu etkileyebileceğini ve beyin dalgalarının genliğini düşürebileceğini yayınlamış (1964) ve yine yaklaşık elli yıl sonra DUARTE ve meslektaşları [40] 1000 ppm üzerindeki CO₂'in insan genetiğini etkileyebileceği tezini öne sürmüştür. PETTENKOFER sayısı güncel araştırmaların önemli bir

^j Zaman, mekân, doku veya organizma düzeyinde proteinlerin yapı, fonksiyon ve etkileşimlerini inceleyen bilim dalına "proteomiks" denilmektedir. Proteom, genom tarafından sentezlenen peptit /protein tabanlı tüm gen ürünlerini kapsayan bir terim olup, genomun protein karşılığı olarak tanımlanmaktadır (<https://genkok.erciyes.edu.tr/proteomiks-birimi-2/>).

oyuncusudur. BOHR Etkisi'nin, ELISEEVA'nın bulgularının ve DUARTE ve Meslektaşlarının hipotezinin gelecekte önemli araştırma alanları olacağı pek muhtemeldir.

KAYNAKLAR

- [1]. <https://homedocbox.com/Appliances/81992399-Ventilation-and-indoor-air-quality.html>
- [2]. <https://www.epa.gov/haps/initial-list-hazardous-air-pollutants-modifications>
- [3]. <https://www.epa.gov/haps>
- [4]. <https://dieselnet.com/news/2007/04epa.php>
- [5]. EPA. "Appendix B - Overview of Acute Health Effects". 2015. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/co2appendixb.pdf>
- [6]. SIREESHA, N.L. "Correlation Amongst Indoor Air Quality, Ventilation and Carbon Dioxide". Journal of Scientific Resarch, 9(2), 179-192, 2017.
- [7]. WARGOCKI, P. "What We Know and Should Know about Ventilation". REHVA Journal, April 2021
- [8]. De Achitectura MÖ 24. <https://docplayer.biz.tr/74472-Mimarlik-uzerine-on-kitap-vitruvius-saygilarimla-cengiz-akyol-25-12-2012.html>
- [9]. SUNDELL, J. "On the History of Indoor Air Quality and Health". Indoor Air, 14 (Suppl 7): 51–58, 2004.
- [10]. SUNDELL, J. "Reflections on the History of Indoor Air Science, Focusing on the Last 50 Years". Indoor Air, 27:708–724, 2017.
- [11]. WEST, J. B. "Three Classical Papers in Respiratory Physiology by Christian Bohr (1855–1911) Whose Work is Frequently Cited but Seldom Read". Am. J. Physiol. Lung Cell Mol. Physiol. 316: L585–L588, 2019.
- [12]. "The Impact of CO₂ Emissions on Children Learning". [https://www.sav-systems.com/wp-content/uploads/2020/11/The-Impact-of-CO₂-on-Childrens-Learning.pdf](https://www.sav-systems.com/wp-content/uploads/2020/11/The-Impact-of-CO2-on-Childrens-Learning.pdf)
- [13]. ALLEN, J.G. vd. "Associations of Cognitive Function Scores with Carbon Dioxide, Ventilation, and Volatile Organic Compound Exposures in Office Workers: A Controlled Exposure Study of Green and Conventional Office Environments". Environmental Health Perspectives, 124(6), June 2016.
- [14]. GOROMOSOV, M. S. "The Physiological Basis of Health Standards for Dwellings". World Health Organization (WHO), 1968.
- [15]. SATISH, U. vd. "Is CO₂ an Indoor Pollutant? Direct Effects of Low-to-Moderate CO₂ Concentrations on Human Decision-Making Performance". Environmental Health Perspectives, 120(12), December 2012.
- [16]. FISK, W.J. "Is CO₂ an Indoor Pollutant, Higher Levels of CO₂ May Diminish Decision Making Performance", Indoor Environment Group Lawrence Berkeley National Laboratory, March 2013.
- [17]. SEKHAR, C. vd. "Bedroom Ventilation: Review of Existing Evidence and Current Standards". Building and Environment, 184, 107229, 2020.
- [18]. AKIMOTO, M. vd. "Reviewing How Bedroom Ventilation Affects IAQ And Sleep Quality". ASHRAE Journal, April, 2021.
- [19]. TOKSOY, M. "İç Hava Kalitesinin Uyku Kalitesine ve Ertesi Gün Performansına Etkisi". TTMD İç Çevre Kalitesi ve Uyku (Ed. MacitToksoy ve Ziya Haktan Karadeniz), Yayın No: 41. 2021.
- [20]. BRAUN, G.J. ve ZEILER, W. "The CO₂ Conditions within the Baby Cots of Day Care Centres" E3S Web of Conferences 111, 02045 (2019) Clima 2019. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20191110209>
- [21]. FISK, W. vd. "Do Indoor CO₂ Levels Directly Affect Perceived Air Quality, Health, or Work Performance?" ASHRAE Journal, September 2019.
- [22]. DU, B. vd. "Indoor CO₂ Concentrations and Cognitive Function: A Critical Review". Indoor Air, 30, 1067–1082. 2020.
- [23]. BIERWIRTH, P.N. "Carbon Dioxide Toxicity and Climate Change: a Major Unapprehended Risk for Human Health". Australian National Universty, Working Paper, March 2021. doi:10.13140/RG.2.2.16787.48168
- [24]. ZHANG, X. vd. "Physiological Responses During Exposure to Carbon Dioxide and Bioeffluents at Levels Typically Occurring Indoors. Indoor Air, 27(1), 65-77, 2017.
- [25]. ZHANG, X. vd. "Effects of Exposure to Carbon Dioxide and Bioeffluents on Perceived Air Quality, Self-Assessed Acute Health Symptoms, and Cognitive Performance". Indoor Air, 27, 47–64, 2017.
- [26]. SEPPANEN, O.A. vd. "Association of Ventilation Rates and CO₂ Concentrations with Health and Other Responses in Commercial and Institutional Buildings". Indoor Air, 9, 226-252, 1999.
- [27]. RUDNICK, S. N. ve MILTON, D. K. "Risk of Indoor Airborne Infection Transmission Estimated from Carbon Dioxide Concentration". Indoor Air, 13, 237–245, 2003.

- [28]. KAJTÁR, L. ve HERCZEG, L. "Influence of Carbon-Dioxide Concentration on Human Well-Being and Intensity of Mental Work". *IDOJÁRÁS*; Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service, Vol. 116, No. 2, pp. 145-169, April–June 2012.
- [29]. ALLEN, J.G. vd. "Airplane Pilot flight Performance on 21 Maneuvers in a flight Simulator under Varying Carbon Dioxide Concentrations". *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 29,457–468, 2019.
- [30]. ZHANG, J. vd. "The Effects of Elevated Carbon Dioxide Concentration and Mental Workload on Task Performance in an Enclosed Environmental Chamber". *Building and Environment*, 178, 106938, 2020.
- [31]. WMO ve UNEP. "Emissions Scenarios". A Special Report of IPCC Working Group III, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2000.
- [32]. PRENTICE, I.C. (Co-ordinating Lead Author). "The Carbon Cycle and Atmospheric Carbon Dioxide". 2018. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/TAR-03.pdf>
- [33]. "Good Indoor Air Quality Leads to Good Decisions". VAISALA Application Note. <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/VIM-G-HVAC-Good-Indoor-Air-Quality-Application-note-B211681EN.pdf>
- [34]. RODEHEFFER, C.D. vd. "Acute Exposure to Low-to-Moderate Carbon Dioxide Levels and Submariner Decision Making". *Aerospace Medicine and Human Performance*, Vol. 89, No. 6, June 2018.
- [35]. MANISCALCO, J. vd. "Physiological Responses, Self- Reported Health Effects, and Cognitive Performance During Exposure to Carbon Dioxide at 20 000 ppm". *Indoor Air*, 32, 12939, 2022.
- [36]. KAPOLO, P. vd. "Influence of Indoor Climate on Employees in Office Buildings—A Case Study". *Sustainability*, 12, 5569, 2020.
- [37]. LAURENT, J. G. C. vd. "Associations Between Acute Exposures to PM2.5 and Carbon Dioxide Indoors and Cognitive Function In Office Workers: a Multicountry Longitudinal Prospective Observational Study". *Environ. Res. Lett.*, 16, 094047, 2021.
- [38]. CAO, X. vd. "Heart Rate Variability and Performance of Commercial Airline Pilots during Flight Simulations". *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 16, 237, 2019.
- [39]. OKOBIA, L.E. vd. "Increase in Outdoor Carbon Dioxide and its Effects on the Environment and Human Health in Kuje FCT Nigeria". *EHR*, Vol. 60(4), 104–112, 2017.
- [40]. DUARTE, C.M. vd. "Hypothesis: Potentially Systemic Impacts of Elevated CO₂ on the Human Proteome and Health". *Front. Public Health*, 16 November 2020.

BÖLÜM 6

KARBONDİOKSİTİN ÖĞRENCİ SAĞLIĞINA VE AKADEMİK BAŞARISINA ETKİSİ.

Hemen hemen tüm ülkelerde^a, sınıflarda yapılan iç hava kalitesi ile ilgili mevcut durum analizine yönelik araştırmaların çıkış noktası olarak, iç hava kalitesinin Tablo 6.1 'de verilen potansiyel etkilerinden biri veya birkaçı sayılmaktadır. Ancak iç hava kalitesi bileşenlerinin tümü için, bileşenlerden biri veya bileşenlerin tamamı veya bir grubu ile söz konusu etkiler arasında, yaygın olarak kabul görmüş ve standartlarda yer almış niceliksel tanımlarının eksiksiz olarak var olduğunu söylemek tartışma konusudur.

Tablo 6.1. Uygun olmayan iç hava kalitesinin potansiyel negatif etkileri.

| Solunuma negatif etki | Okula devamsızlık | Konforsuzluk | Yorgunluk |
|-------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| Bilişsel performans zayıflığı | Öğrenme yeteneğinin etkilenmesi | Konsantrasyonun zayıflaması | Psikososyal problemlerin doğması |
| Baş ağrısı | Gribe yakalanmak | Kan değerlerinin değişmesi | Burun iltihabı |
| Mukoz zarının tahrip olması | Üst-alt solunum yolları riskleri | Astımı alevlendirme, tetikleme | Öğretmen tatminsizliği |
| Taşikardi | Bulanık görme | Hafıza karışıklığı | Mide bulantısı |
| Huzursuzluk | Kusma | Cilt kızarması | Panik atak |

CO₂ iç hava kalitesinin bileşenlerinden birisidir. Yetişkinlerde olduğu gibi, yüksek seviyelerde CO₂'in (>800 ppm) çocukların da fizyolojik sağlığını, bilişsel performansını etkilediği, son otuz yılda yapılan yoğun araştırmalarla belirlenmiştir. Bu etkilenmenin mekanizması önceki bölümde sınıflandırılan araştırma yöntemlerine bağlıdır. Eğer sınıflardaki testler, öğrencilerin solunumlarına dayalı CO₂ birikimine bağlı gözlemleri içeriyorsa, bu çalışmalarda ölçülen etkilerin, tek başına CO₂'e bağlanmasından ziyade, sınıftaki CO₂ ve diğer kirleticilerin toplamına atfedilmesi uygun görülmektedir. Eğer diğer kirleticiler sabit tutulup sadece saf CO₂ ile yapılan testler söz konusu ise, CO₂'in bizzatıhi kendi etkisinden söz edilebilir.

Okullarda CO₂ ile birlikte iç hava kalitesi bileşenlerinin, çocukların fizyolojik sağlığı ve bilişsel performansına etkileri üzerine, 2015 yılına kadar yapılan çalışmalar GÜLLÜ [1], KESKİN [2], SOFUOĞLU [3] ve TOKSOY [4] tarafından değerlendirilmiştir. Bu çalışmada ise 2015 ve daha sonraki yıllarda yapılan araştırmalar ve review (derleme) çalışmaları göz önüne alınmıştır.

2015 yılından sonra, yayınlandıkları tarihlere kadar içerikleri itibarıyla CO₂ konsantrasyonunun tek başına veya diğer kirleticiler ile birlikte öğrenci sağlığı üzerine etkisinin araştırıldığı, farklı kriterlerle seçilmiş makaleleri değerlendiren dört review makale [5-8] vardır. Bu dört makaleden 2017 yılında yayınlanan ilki [5], 2020 yılında yayınlanan makalenin [7] yazarlarının üçü tarafından gerçekleştirilmiştir. WARGOCKI vd (2017)[5]'de incelenen çalışmaların tamamı WARGOCKI vd

^a WHO'nun Parma Declaration on Environment and Health dokümanına [WHO, "Parma declaration for Environment and Health". Ministers and Representatives of Member States in the European Region of the World Health Organization, 2010] imza atan Türkiye dahil tüm Avrupa ülkeleri, ABD, Kanada, Brezilya, Meksika, Kosta Rika, Şili, Avustralya, İran, Kanada, Kore, Hindistan, Japonya, Çin, Kore, Mısır, Lübnan, Ürdün, Moğolistan, Endonezya, Güney Afrika, Belarus, Ukrayna.

(2020)[7]'de tekrar değerlendirildiğinden, bu çalışmada sadece üç review makalenin [6,7,8] sonuçları özetlenmiştir.

4. Bölümde verilen ve sınıflardaki CO₂ seviyelerinin değerlendirilmesini içeren FISK'in [6] çalışmasında, 25 makale kapsamlı olarak değerlendirilerek, sınıflardaki havalandırma debilerinin öğrencilerin ve öğretmenlerin sağlıkları üzerine etkisi özetlenmiş, havalandırma debisi ile enerji kayıpları arasındaki ters orantının yarattığı enerji maliyeti endişesi yorumlanmıştır. 25 makalenin 7 tanesi havalandırma parametreleri (kişi başına hava debisi, saatte hava değişim sayısı) ile doğrudan, 18 tanesi de CO₂ konsantrasyonu üzerinden dolaylı olarak havalandırma debisi ile sağlık arasındaki ilişkilerin araştırılması üzerinedir. Değerlendirmeye alınan 25 araştırma ile WARGOCKI vd. [7] ve BIERWIRTH'ün [8] değerlendirmeye aldıkları araştırmalar arasında arakesitler, sırasıyla 9/25 ve 5/25 olmak üzere sınırlıdır. FISK'in çalışması, kendisinden sonra yapılan iki review makalede göz önüne alınmayan çalışmaları değerlendirmesi açısından önemli bulunmuştur.

FISK [6], bu çalışmasında göz önüne aldığı CO₂ verili 18 makaleye göre, havalandırmanın sınıflardaki CO₂'i ve diğer insan kaynaklı emisyonların birikimini etkilediğini, diğer faktörler sabit kaldığında, CO₂ konsantrasyonunun azalması halinde de bilişsel performansın iyileştiği yorumunu yapmıştır. Öğrencilerin performansındaki ve sağlığındaki iyileşmenin, devamsızlıklarının azalmasının niceliksel olarak maliyetinin kolayca yapılamayacağını ancak uygun havalandırma yapıldığı takdirde oluşacak işletme maliyetlerinin öğrenci başına olan yıllık maliyetinin %0.1'den az olacağını ifade etmiştir.

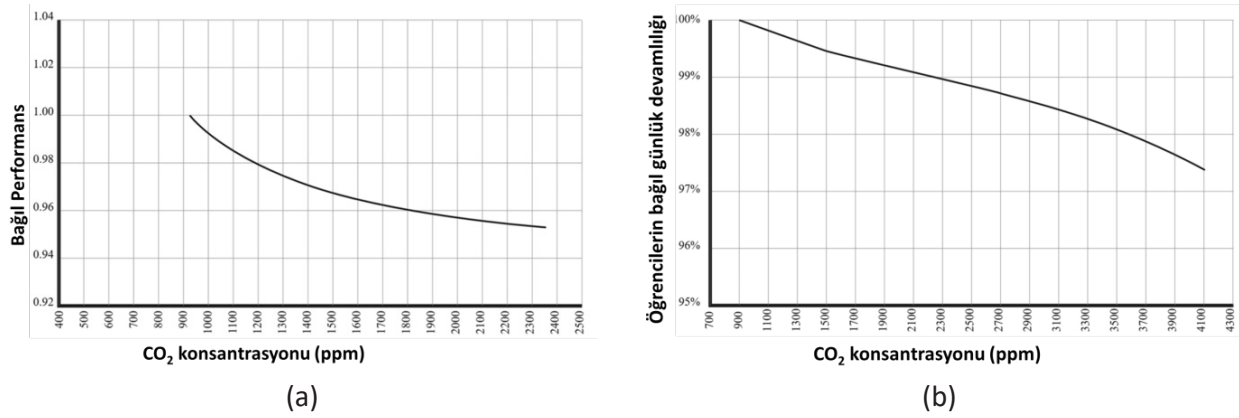
2015 öncesi zaman dilimindeki "arşiv"^b dergilerinde yayımlanmış, uygun verilere sahip 17 makale, 2020 yılında, etkilerin mertebelerini belirlemek üzere WARGOCKI vd [7] tarafından değerlendirilerek bir veri tabanı oluşturulmuş ve CO₂'in bir metrik olarak kullanılmasıyla aşağıdaki sonuçlar varılmıştır:

- CO₂'in 2100 ppm'den 900 ppm' konsantrasyona (havalandırma ile) indirilmesiyle okul ödevlerindeki ve bilişsel yeteneklerinin belirlendiği testlerdeki performans hızını %12, doğruluğu %2 artıracaktır.
- CO₂'i 2400 ppm'den 900 ppm'e indirmek ulusal sınavlardaki ve okul bitirme sınavlarındaki başarıları %5 artıracaktır.
- CO₂'i 4200 ppm'den 1000 ppm'e indirmek öğrencilerin günlük devamlılığını %2.5 artıracaktır.

WARGOCKI vd [7], yukarıda verilen etkilerin, benzer şartlardaki ofis çalışanlarında da daha küçük mertebelerde olduğunu belirterek, sınıflarda öğrenme performansını artıracak yatırımların yapılmasında bu sonuçların göz önüne alınmasını, ilk ve orta öğrenim sınıflarındaki olumsuz iç hava kalitesinin iyileştirilmesinin, öğrencilerin hayat kalitelerini yükselteceğini ve önemli sosyo ekonomik sonuçları olacağını vurgulamıştır. Başarı oranlarındaki artımlar ve Türkiye'de ulusal çapta yapılan sınavlara giren öğrenci sayısı göz önüne alınırsa, sınıflardaki uygun havalandırmanın sınav başarı sıralamasındaki önemi kolayca görülür.

Şekil 6.1 'de, öğrencilerin performanslarının ve okula devamsızlıklarının CO₂ ile ilişkisi gösterilmiştir.

^b Bu tanım, "archival journal" olarak WARGOCKI [7] tarafından kullanılmıştır. Ne yazık ki günümüzde bilimsel çalışmaların değerlendirilmesi ve paylaşılması mekanizmalarında, "hakem – referee - refereed " kelimeleri anlamını oldukça yitirmiş, yayınların kolay yayınlanabilir olması, çalışmaların kalitesinde beklenen güveni azaltmış, şüpheyi artırmıştır. Bu yüzden de özellikle "review" çalışmalarda göz önüne alınan makalelerin "arşiv", "saygın" vs gibi sıfatlarla anılmasına gerek duyulduğu gözlenmektedir.



Şekil 6.1. CO₂ konsantrasyonunun, öğrencilerin ulusal testlerde ve yetenek testlerindeki performansına etkisi (a) ve günlük devama etkisi (b) [7].

BIERWIRTH de [8], biri WARGOCKI'nin değerlendirme kümesinde yer alan, 2014 ve 2015 yıllarında tıp araştırmaları dergilerinde yayınlanmış üç, biri Indoor Air dergisinde yayınlanmış ve tamamı tıp ve biyoistatistik alanında çalışan araştırmacıların çalışmalarını içeren toplam dört makaleyi göz önüne alarak, okullardaki CO₂'in etkileri olarak aşağıdaki değerlendirmeyi yapmıştır.

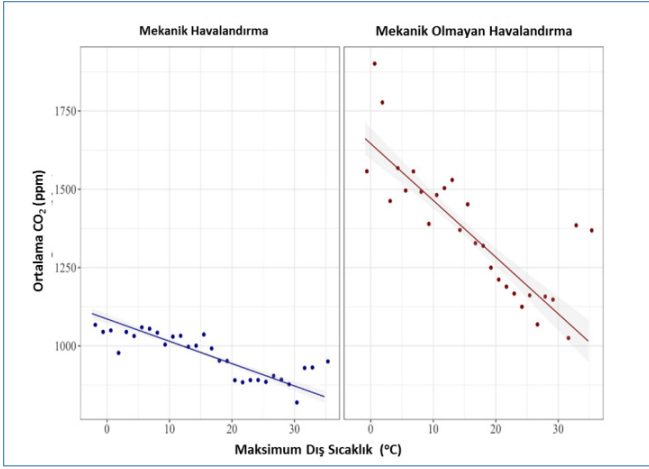
“Sınıfların %20 - %50 aralığında^c bir kısmında yaygın olarak CO₂ konsantrasyonunun 1000 ppm değerini aştığı, sık sık daha büyük olduğu bazan da 6000 ppm değerine ulaştığı genel olarak kabul edilmektedir. Çok sayıda çalışma ile, CO₂ ile ilişkili semtomlar (hapşırma, hırıltı, burun akıntısı, astım, öksürük, baş ağrısı, mukoza zarının tahriş olması gibi) tanımlanmıştır. CO₂ konsantrasyonunun 1000 ppm'in üzerinde olması halinde, okula devamlılık da azalmakta, öğretmenlerde de baş ağrısı, yorgunluk ve odaklanmada zorluk gibi nörofizyolojik semtomlar gözlenmektedir” [8].

2015 yılından sonrasında yayınlanan ve söz konusu üç review içinde yer almayan araştırmalarla [9÷12], 2014 yılında yayınlanan ve CO₂'in öğrenme performansına etkisi üzerine Türkiye'de yapılmış bir araştırmanın [13] sonuçları ile, HARVARD T.C.CHAN School of Public Health'in, okul binalarının öğrencilerin sağlığı, düşünmesi ve performansı üzerine yayınladığı bir dokümanda [14] yer alan CO₂ etkisi aşağıda özetlenmiştir.

Şimdiye kadar yapılan araştırmaların içinde yaklaşık olarak en büyük genişlikte öğrenci sayısı ve çok uzun bir sürede yapılan gözlemlere dayalı bir çalışma, çevre koşullarının ulusal standart testlerdeki öğrenci başarısına etkisini araştırmak üzere yapılmıştır [9]. 2021 yılında yayımlanan bu çalışmada, Hollanda'da 27 okuldaki, 6-12 yaş aralığında bulunan öğrencilerin bulunduğu 235 sınıfta, 2018-2019 ve 2019-2020 eğitim öğretim yıllarındaki 3 yarıyıld, sürekli olarak CO₂, PM₁₀, sıcaklık, nem, gürültü ve ışık ölçümleri ile öğrencilerin 3 yarıyıl boyunca beşeri sermaye birikimlerini (human capital accumulation) ölçmek üzere matematik, okuma, heceleme ve kelime bilgisi testleri gerçekleştirilmiştir. Her öğrenci ortalama olarak 3 yarıyıl boyunca 9 test sınavına girmiştir. Standart testleri, Hollanda Ulusal Test Merkezi hazırlanmıştır ve senede iki defa öğrencilere uygulanmaktadır. Test sonuçları iç çevre kalitesi bileşenleri arasındaki ilişki araştırılmıştır. DURAN vd'nin bu çalışmasında [9], mekanik havalandırma yapılmayan pencere açılarak havalandırılan sınıflarda dış sıcaklığa bağlı olarak CO₂ konsantrasyonunun, mekanik havalandırma olan sınıflara göre yüksek olduğu (Şekil 6.2) ve yüksek CO₂ konsantrasyonunun standart test sonuçlarını olumsuz etkilediği izlenmiştir. Sınıflardaki CO₂ konsantrasyonundaki bir standart sapma, test sonuçlarının standart sapmasında 0,14'lik düşmeye karşılık gelmiştir. Ancak bu ilişkinin non-lineer olduğu görülmüş ve 1500 ppm'in üstünde CO₂ konsantrasyonunda, test sonuçlarındaki standart sapmadaki düşüş artmış,

^c Bu aralığın coğrafyaya ve sosyo ekonomik şartlara bağlı olarak değişeceği ve daha yüksek seviyelere ulaşması beklenebilir.

0,4 olmuştur. CO₂'in öğrencilerin matematik ve özellikle okuma performanslarını etkilediği görülmekte, dersler esnasında yüksek CO₂ seviyesinin veya yüksek sıcaklığın öğretmenlerin ve öğrencilerin, %15 ile %20 arasında daha fazla ara verdiği gözlenmektedir (Şekil 6.3).



Şekil 6.2. Mekanik havalandırma olan ve olmayan sınıflarda farklı dış sıcaklıklara göre CO₂ değişimi [9].

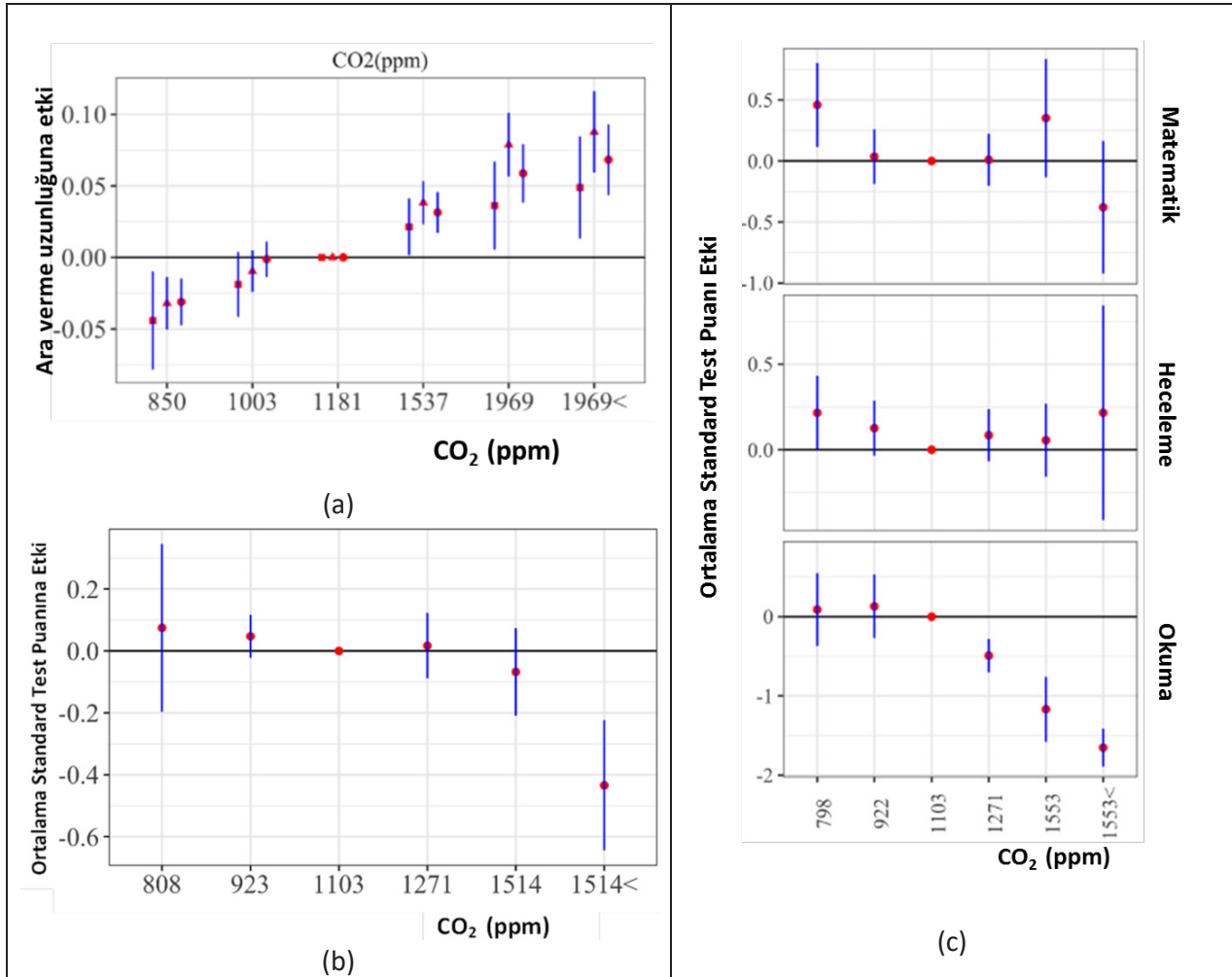
İç hava kalitesinin, öğrenci sağlığına olan etkisinin araştırıldığı uzun dönemli gözlemlere dayalı bir çalışma da HADDAD vd [10] tarafından Avustralya'da gerçekleştirilmiştir. Benzer konuma ve karakteristiklere sahip, 12-17 yaşları arasında, derslere göre 7 ile 25 aralığında öğrencilerin olduğu iki sınıfta, bir yıl boyunca (Nisan 2018 – Mayıs 2019) gözlem yapılmıştır. Sınıflardan biri talep kontrollü mekanik egzoz havaandırmasına sahiptir. Bir yıl boyunca sınıflarda hava sıcaklığı, bağıl nem ve CO₂ ölçülmüştür. Sınıflarda aralıklı olarak da PM₁₀, PM_{2.5} ve Formaldehit ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca iki günde de sınıflardaki Uçucu Organik Bileşikler (UOB-VOC^d) ölçülmüştür. Araştırma süresince yapılan anketlerden elde edilen bilgilerin değerlendirilmesi sonucunda CO₂ konsantrasyonunun 850 ppm'in altından 1400 ppm'in üstüne çıktığında, kendisini yorgun ve uykulu hissedenden öğrencilerin sayısında artma olduğu belirlenmiştir (Şekil 6.4). Sınırlı ölçüde yapılan ölçümlerden, mekanik egzoz havalandırmasının olduğu sınıfta ve tahta kalemlerinin kullanılmadığı derslerde UOB'in değerleri ulusal limitlerin altında çıkmıştır. İzopropil alkol konsantrasyonunu etkileyen tahta kalemlerinin, kısa ve uzun dönemli olarak sağlık etkilerine neden olabileceği belirtilmiştir. Sınıflarda tanımlanamayan bir bileşenin de gözlemlendiği not edilmiştir. HADDAD vd'nin CO₂ seviyesi ile yorgunluk arasında ulaştığı pozitif ilişki, KORSAVI ve MONTAZAMI tarafından daha önce yapılan benzer bir araştırmanın sonuçlarını desteklemektedir; 1000 ppm'den daha yüksek konsantrasyonlarda kendilerini daha yorgun ve konforsuz hissetmektedirler [12].

CO₂'in 3000 ppm'e kadar artan konsantrasyonu ile yorgunluk ve baş ağrısı üzerinde negatif olarak etkili olduğu, öğrencilerin testlerindeki başarıyı düşürdüğünün farkedildiği ancak CO₂ konsantrasyonu ile etkiler arasındaki ilişkinin (düşük korelasyon katsayısı ile) deterministik olmadığı gözlemlendiği bir araştırma Leton'da yapılmıştır [11]. Çalışmanın genişletilerek devam etmesini öngören araştırmacılar, ders aralarındaki 10 dakikalık zaman diliminde, doğal havalandırma ile CO₂ konsantrasyonunun değişiminin gözlemine dayanarak, İHK sınır değerlerinin altına inilemeyeceğini not etmişlerdir.

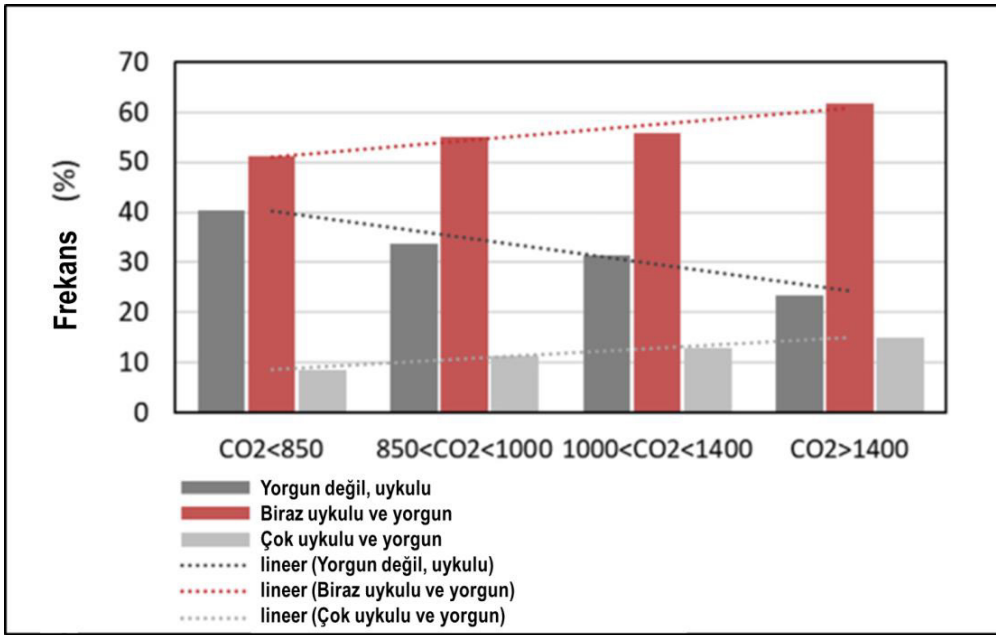
Türkiye'de yapılmış ve 2019 yılında yayımlanmış bir araştırma sonucuna göre [13], bir üniversite dersliğinde doğal havalandırmanın mümkün olmadığı kış aylarında, mekanik havalandırma ile CO₂ konsantrasyonunun 800 ppm olduğu zaman aralığında mimarlık öğrencilerinin performansının

^d Volatile Organic Compounds

(aritmetik test ve görsel dikkat), havalandırmanın sadece kapı ve pencere açılarak doğal havalandırma ile sağlanmaya çalışıldığında ulaşılan ve CO₂ konsantrasyonunun 1440 ppm olduğu zaman dilimine göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir.



Şekil 6.3. CO₂'in ara verme uzunluğuna etkisi (c) ve CO₂ değişiminin beşeri sermaye birikimine etkisi (b) Öğrenme performansına ortalama etki, (c) matematik, heceleme ve okuma performanslarına etki [9].



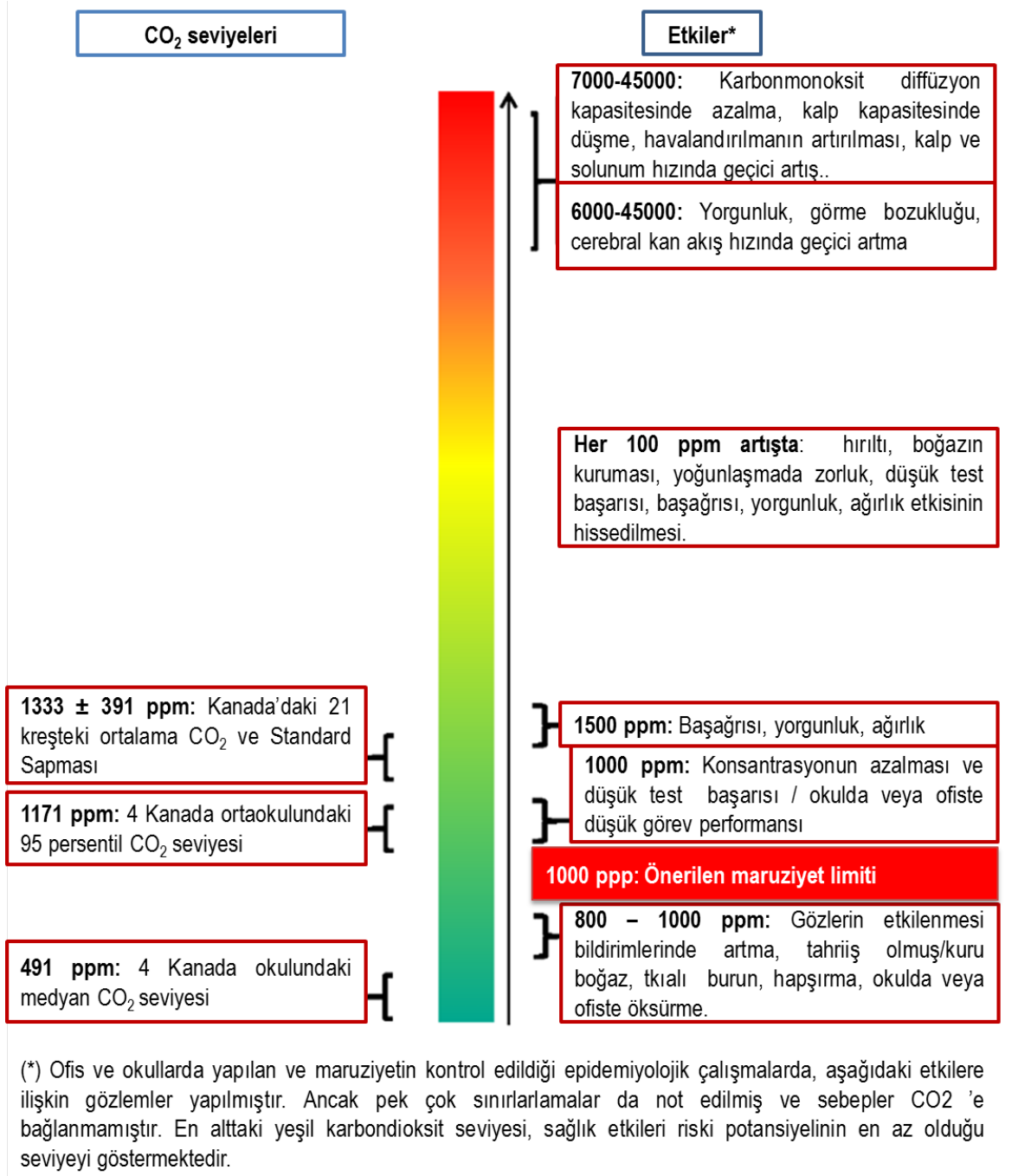
Şekil 6.4. CO₂ gözlemine dayalı iç hava kirliliğinin yorgunluk ve uykusuzluk üzerine etkisi [10]. İngiltere’de 805 öğrencinin katıldığı bir araştırma [12], 31 sınıfta objektif (fiziksel parametrelerin ölçülmesi) ve subjektif (öğrencilere olan etkilerin anketlerle belirlenmesi) yöntemlerle CO₂ konsantrasyonunun temsil ettiği iç hava kirliliği ile etkileri arasındaki ilişkiler araştırılmış ve konsantrasyonun 1000 ppm den 1300 ppm’e kadar olan değişiminde öğrencilerin yorgunluğunun, konforsuzluğun arttığı ve hava kalitesinin ağırlaştığı değerlendirilmiştir.

Harvard T.H.CHAN School of Public Health tarafından yayınlanan bir dokümanda [14], kabul edilebilir bir iç hava kalitesinin, ASHRAE 62.1 – 2016 referans verilerek, karbondioksit konsantrasyonunu 1000 ppm veya altında tutulmasının önerildiği belirtilerek ve ilgili referanslar verilerek yüksek CO₂ seviyelerinde öğrenci devamsızlığının, hava kalitesinden tatminsizliğin, solunum yolları enfeksiyonlarının, hasta bina sendromu vakalarının, astım semptomlarının, havada asılı patojenlerin sebep olduğu grip, suçiçeği, kızamık gibi viral enfeksiyonların arttığı aktarılmıştır.

Kanada’da halk sağlığı ile ilgili federal bir kurum olan Health Canada tarafından 4 okul ve 21 anaokulunda yapılan bir çalışmada [15], Şekil 6.5 ’de verilen sağlık etkilerine eşlik eden CO₂ seviyeleri gözlenmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre okullarda ve anaokullarında önerilen 1000 ppm CO₂ konsantrasyonu aşılmaktadır ve CO₂ seviyesi önerilen maruziyet limitinin altına çekilirse, yüksek konsantrasyona eşlik eden sağlık etkilerinin azalacağı belirtilmektedir.

Sınıflardaki “havalandırma – CO₂ – öğrenci sağlığı” üçgenindeki ilişkiler üzerine araştırmalar, 1990’lı yıllardan itibaren gittikçe artan hızda sürmektedir. Bu araştırmalarda kontrol edilmesi gereken bağımsız değişkenler çok fazla olduğu için sonuçlar çoğunlukla araştırmanın yapıldığı yere ve şartlara özel olmakta, bu sonuçlardan bilimsel genellemelere gidilmesi zorlaşmaktadır. Diğer kirleticilerin sabit tutularak CO₂ seviyesinin 600 ppm ile 3000 ppm arasında değiştirildiği araştırmalarda, CO₂ ile öğrenci sağlığı arasındaki ilişki ile ilgili çelişkili araştırma sonuçları söz konusudur. Ancak bu çelişkili sonuçlardan ilişkinin olmadığını söylemek sağlık güvenliği açısından uygun değildir. Antropojenik (insan kaynaklı) CO₂ birikimi ile öğrenci sağlığı arasında, çok farklı coğrafyalarda ve çok farklı kültürlerde yapılan araştırmalar, 800 ppm’den sonraki CO₂ birikimi arttıkça öğrenci sağlığının etkilendiğini göstermektedir. Bu araştırmalarda, CO₂’in yanında sınıflarda insan ve çevre kaynaklı diğer kirletici birikimlerinin birleşik etkisinin söz konusu olduğu konusunda uzmanlar benzer görüşlere sahiptirler. Sonuç olarak yukarıda özetlenen araştırmalar ışığında, CO₂’in kendisinin de dahil olduğu iç hava kirleticilerinin birleşik etkisinin bir göstergesi olarak, 800 ppm üzerinde CO₂ konsantrasyonu olan sınıf ortamlarının, konsantrasyonun büyüklüğü ile orantılı olarak öğrencilerin ve öğretmenlerin,

fizyolojik ve bilişsel sağlığı ile öğrenme/öğretme performansını etkilediğini göstermektedir. Unutulmamalıdır ki, insan milyonlarca yıl süren evrimini 300 ppm'den düşük atmosferik CO₂ konsantrasyonunda geçirmiştir. Günümüzde deneylediğimiz iç ve dış ortam şartları evrim şartlarından çok uzaktır.



Şekil 6.5. Sınırlı sayıda Kanada anaokullarında ve okullarında gözlenen CO₂ konsantrasyonları ve CO₂ konsantrasyonları yanında gözlenen sağlık etkileri [15].

KAYNAKLAR

- [1]. GÜLLÜ, G. "İlköğretim Okullarında İç Otam Hava Kalitesi ve Sağlık Etkileşimi". 12. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, TESKON, 8-11 Nisan 2015. <http://www.iccevrekalitesi.net/pdf/seminer/2015-03.pdf>
- [2]. KESKİN, B. S. "Kreş Ve Ana Okullarında İç Hava Kalitesi Çalışmaları". 12. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, TESKON, 8-11 Nisan 2015. <http://www.iccevrekalitesi.net/pdf/seminer/2015-04.pdf>
- [3]. SOFUOĞLU, S. C. "İç Hava Kirleticileri ve İnsan Sağlığına Etkisi". 12. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, TESKON, 8-11 Nisan 2015. <http://www.iccevrekalitesi.net/pdf/seminer/2015-09.pdf>
- [4]. TOKSOY, M. "Okullarda İç Hava Kalitesi ve Yönetimi: Günümüz Bilgi ve Pratiği". 12. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, TESKON, 8-11 Nisan 2015. <http://www.iccevrekalitesi.net/pdf/seminer/2015-02.pdf>
- [5]. WARGOCKI, P. vd. "Quantitative Relationships Between Classroom CO2 Concentration and Learning in Elementary Schools" 2017. <https://www.aivc.org/resource/quantitative-relationships-between-classroom-co2-concentration-and-learning-elementary>
- [6]. FISK, W.J. "The Ventilation Problem in Schools: Literature Review". *Indoor Air*, 27:1039–1051, 2017.
- [7]. WARGOCKI, P. vd. "The Relationships Between Classroom Air Quality And Children's Performance in School". *Building and Environment*, 173, 106749, 2020.
- [8]. BIERWIRTH, P.N. "Carbon Dioxide Toxicity and Climate Change: a Major Unapprehended Risk for Human Health". Australian National Universty, Working Paper, March 2021 doi:10.13140/RG.2.2.16787.48168
- [9]. DURAN, N. vd. "Indoor Air Quality and Student Performance: Evidence from A Large Scale Field Study in Primary Schools". 2021. https://conference.iza.org/conference_files/enviro_2021/palacios_j24419.pdf
- [10]. HADDAD, S. vd. "On the Potential of Demand-Controlled Ventilation System to Enhance Indoor Air Quality and Thermal Condition in Australian School Classrooms". *Energy & Buildings*, 238, 110838, 2021
- [11]. BOGDANOVIĆA, S. vd. "The Effect of CO2 Concentration on Children's Well-Being during the Process of Learning". *Energies* 13, 6099, 2020. doi:10.3390/en13226099
- [12]. KORSAVI, S.S. ve MONTAZAMI, A. "Developing a Valid Method to Study Adaptive Behaviours with Regard to IEQ in Primary Schools". *Building and Environment*, 153, 1–16, 2019.
- [13]. RANJBAR, A. "Analysing the Effects of Thermal Comfort and Indoor Air Quality in Design Studios and Classrooms on student Performance". *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 609 042086, 2019. doi:10.1088/1757-899X/609/4/042086
- [14]. EITLAND, E., vd. "Foundations for Student Success How School Buildings Influence Student Health, Thining And Performance", Harvard T.H.CHAN School of Public Health, 2017.
- [15]. Health Canada. "Residential Indoor Air Quality Guidelines, CARBON DOXIDE for Public Consutation", Water and Air Quality Bureau Health Canada, October 2021.

BÖLÜM 7:

HAVALANDIRMA, STANDARTLAR, LİMİTLER

Yaklaşık iki yüzyıllık yoğun bilimsel ve teknolojik gelişmeler sonucunda temiz doğal dış hava ile havalandırma, insanların fizyolojik ve zihinsel sağlığı ile bilişsel performansı açılarından giderek önem kazanmış, son iki yıldır yaşanan COVID-19 salgını pratiğinde hayati bir konuma yükselmiştir. Isıtma Havalandırma İklimlendirme (HVAC^a) pratiğinde, yaşam hacimlerindeki çeşitli emisyonlarla kirlenmiş olan iç ortam havasının temiz olduğu kabul edilen dış hava ile değiştirilmesi anlamında algılanan havalandırma için bu basit tanımın ötesinde bir tanım ve değerlendirme gerektiği görülmektedir. Bu bölümde havalandırma için daha açık bir tanım önerilmektedir. Bu tanımlama ve değerlendirme aslında mevcut teknolojinin havalandırma için öngördüğü özelliklerin öne çıkarılmasından başka bir şey değildir. Ancak mühendislik pratiği açısından tasarımlara, uygulamalara ve denetime daha geniş bir perspektifte rehberlik edecek çerçeveyi çizmektedir.

Bu bölümde ikinci olarak havalandırma tasarımında karbon dioksitin önemi üzerinde durulmuştur. ASHRAE 62.1 – 2019 standardındaki İç Hava Kalitesi Prosedürüne göre bir iç ortama verilecek dış hava debisi ve belirlenecek diğer tasarım parametreleri, iç ortamdaki kirlilik kaynaklarına, kirlilik konsantrasyon limitlerine ve kabul edilebilir iç hava kalitesi seviyesine bağlı olarak belirlenir. Karbon dioksit, okullar gibi özellikle insan yoğun iç ortamlarda, önemli bir kirleticidir ancak ASHRAE 62.1-2019 açısından diğer kirleticilere göre bir ayrıcalığı yoktur. Hal böyleyken karbon dioksit kaynağının sadece insanlar olduğu ortamlarda, karbon dioksit konsantrasyonunun, aynı zamanda iç ortamdaki diğer sıradan kaynaklardan (yüzeylerden vs) oluşan emisyonların konsantrasyonu için de bir gösterge olabileceği yaklaşımıyla, havalandırma sistemi tasarımında ve **Talep Kontrollü Havalandırmada (TKH - DCV)^b** bir parametre olarak kullanılmaktadır.

Havalandırma sistemleri tasarımının başlangıç noktası, binalardaki hacimlere, basılacak temiz-dış hava debisinin belirlenmesidir. Bu amaçla belirlenen iki temel algoritma vardır. Bunlardan ilki (Havalandırma Miktarı Prosedürü - HMP) hacimlerin fonksiyonu (ofis, sınıf, yatak odası, vs) ve büyüklüğü (alanı), insan yoğunluğu göz önüne alınarak hava debisinin belirlenmesidir. Bu yöntem havalandırma teknolojisinde kullanılan ilk yöntemdir. İkincisi ise (İç Hava Kalitesi Prosedürü- İHKP) iç hava kirliliğinin her bir bileşeninin konsantrasyonunu sağlık limitlerinin altına indirecek şekilde, kirlilik ve emisyon hızlarına bağlı olarak dış hava debisinin belirlenmesidir. Bu yöntem ise giderek gelişmekte ve önem kazanmaktadır. Bu bölümde söz konusu iki algoritmanın (prosedürün) kritik bir değerlendirilmesi verilmiştir.

^a HVAC: Heating Ventilating Air Conditioning

^b DCV: Demand Controlled Ventilation

BÖLÜM 7A

HAVALANDIRMANIN TANIMI

Dış hava kirliliği ve doğal olarak dış hava kirliliğinin başlangıç seviyesi olduğu iç hava kirliliğinin, insan sağlığı ile çalışma ve öğrenme performanslarına olan etkisi, bilim insanlarının son otuz yılda giderek artan bir hızla ilgisini çekmektedir. Günümüzde dış hava kirliliği, insan sağlığı açısından sigara ile aynı tehlike sınıfında yani kanserojenik sayılmaktadır. 2019 yılında başlayan ve 2022 yılında sürmekte devam eden COVID-19 salgınında, enfekte insanlardan yayılan havada asılı (airborne) virüslerin rolü, havalandırmada hedef olarak şimdiye kadar çok önem verilmeyen bir boyutu, biyolojik kirliliği, çok öne çıkarmıştır. 2020 yılının başından itibaren ölümcül bu salgına karşı, havalandırma açısından karmaşa görünümü içinde farklı yaklaşımlar geliştirilmiş, bu dönem iyi yönetilememiştir. Salgın dinamiğinin transdisipliner bir alan olmasına karşın, havalandırma yoluyla salgın riskin azaltılmasına ilişkin öneriler, mevcut havalandırma tasarım algoritmalarıyla geliştirilmeye çalışılmıştır. Kapalı yaşam hacimlerinde, partikül ve gaz kirliliğine maruziyet ile biyolojik (patojen) kirliliğine maruziyet arasında, insan sağlığına etkileri açısından önemli bir fark vardır. Günümüz hava kirliliği etkileri metriklerine göre partikül ve gaz kirliliklerinin, zaman ortalama maruziyet değerleri önemlidir; biyolojik kirliliğin ise kaynaktan vektörel dağılımı diğerlerinden daha önemli olduğu gibi, belli bir doz düzeyinin üzerinde maruziyeti, kısa zamanda ve etkin hatta bazı insanlar için ölümcül sağlık sorunlarına sebep olmaktadır. Amerika'da 17 Mart 2020'de, Skagit (Washington) kasabasında, bir klise koro çalışmasına katılan 61 kişiden birinin, 2,5 saat süren koro çalışması esnasında yaydığı virüsler nedeniyle toplam 52 kişi enfekte olmuş, hastalananlardan ikisi vefat etmiştir [1]. Benzeri bir yayılma profili, Ocak 2020 'de Çin'in Guangzhou şehrindeki bir restoranda, müşteriler arasındaki enfekte bir kişi, dokuz diğer müşterinin enfeksiyonuna neden olmuştur [2]. Söz konusu enfeksiyon yayılımının olduğu insan yoğunluğu yüksek iç ortamlarda ve benzeri yerlerde, partikül ve gaz kirliliğinin kısa zamanda neden olduğu ciddi hastalıklara ve ölümlere, 20 Mart 1995'de Tokyo metrosundaki sarin gazı terörizmi dışında, literatürde rastlanmamaktadır. COVID-19 örneğinde olduğu üzere biyolojik kirliliğin diğer iç ortam kirliliklerine göre göreceli ani ve şiddetli etkileri, havalandırma sistemlerinin, gelecekteki böylesine kirliliklere karşı "resilient - uyumlu" sistemler olması gerektiğini göstermektedir. Bu bağlamda geliştirilecek olan havalandırma sistemleri için havalandırmanın yeniden daha açık (explicit) tanımlanmasında yarar görülmektedir.

1980'li yıllarda, ASHRAE (Handbooks) el kitaplarında "havalandırma dış havanın planlanmış olarak veya infiltrasyon veya exfiltrasyon olarak kendiliğinden bina içinden geçmesidir ve iki nedenle^a önemlidir" şeklinde bir tanımlanmış [3,4] ve daha sonra havalandırma doğal (natural) veya zorlanmış (forced) olarak iki gruba, doğal havalandırma da infiltrasyon ve kontrollü doğal havalandırma olarak iki sınıfa ayrılmıştır; kontrol, açılır kapanır pencere ve kapıların, el ile açılıp kapatılmasıdır. Doksanlı yıllarda tanım ve sınıflandırmalar aynı kalmış, zorlanmış havalandırma için "mekanik havalandırma" ismi de literatüre kazandırılmıştır [5]. İki binli yıllarda tanımlara başkaca bir ekleme olmamıştır.

Havalandırmanın ASHRAE 62.1 (2010 ve sonrası) standardında tanımı ise "havalandırma, kirletici seviyesini, nemi veya sıcaklığı kontrol etmek amacıyla bir hacme hava verilmesi veya hacimdeki havanın alınmasıdır" şeklindedir. Standart formatı içinde yer alan tanımlar bölümünde infiltrasyon, mekanik havalandırma ve doğal havalandırma ayrıca tanımlanmıştır. Dış hava için standart içinde bir bölüm olmasına karşılık, ASHRAE Fundamentals'da olduğu gibi havalandırma tanımı içinde, iç hacimdeki havanın dış hava ile yer değiştirmesi kavramına yer verilmemiştir. Şüphesiz standartın bütünü göz önüne alındığında iç hava değişiminin dış hava ile yer değiştirmesi anlamında kullanıldığı görülmektedir. Hava temizleyicileri (air cleaners), hava temizleme (air cleaning) gibi terimler standart içinde sınırlı sayıda yer alsa da partikül filtrelenmesi, ultraviyole ışınım ve (öngörülmeyen) ozon ile

^a Nedenlerden biri iç havanın dış hava ile seyreltilmesi, diğeri ise enerji

dezenfeksiyon ilgili paragraflarda geçmektedir. Taşınabilir hava temizlicileri tanımlamasında kullanılan (portable) kelimesi standart içinde yer almamaktadır.

Makina mühendisliği eğitimi alanlar, tesisat mühendisliğinin pratiği içinde olanlar ve hatta yetişkinlerin tamamı için havalandırmanın, iç hacimdeki havanın dış hava ile yer değiştirmesini mümkün kılan doğal veya yapay süreçler olduğu açıktır. Ancak, görüldüğü üzere, gerek ASHRAE Fundamentals ve gerek ASHRAE Standard 62.1'de yapılan havalandırma tanımları, İlk Prensipte (First Principle) ile havalandırma bilim ve teknolojisinin başlangıç noktası olarak, biyolojik kirlilik açısından da ışık tutucu değildir. Bu nedenle özellikle COVID-19 salgınında kapalı yaşam hacimlerinde risk azaltan bir araç olarak da havalandırma için aşağıdaki tanım yazarlar tarafından önerilmektedir:

Havalandırma, yaşam hacimlerindeki diğer iç çevre konfor şartlarından (özellikle ısı ve akustik konfor) vazgeçmeden, biyolojik, kimyasal ve partikül kirliliğini, yaşayanların fiziksel ve bilişsel sağlığını ve performansını etkilemeyecek konsantrasyona, dış havanın ortama entegrasyonu ile düşürmek olarak tanımlanır. Bu tanımdaki entegrasyon iç ortamda bulunan insanların tümü için, kirlilik kaynağının iç ortamdaki yerine bağlı olmaksızın, bireyler arasında özel enfeksiyon, gaz ve partikül tünelleri yaratmadan, biyolojik, kimyasal ve partikül kirlilik konsantrasyonlarının, insanlar için zararlı seviyede herhangi bir kirletici içermeyen dış hava kullanılarak, sağlık riski yaratmayacak şekilde düşürülmesidir. Entegrasyon havalandırma terminolojisiyle, yüksek havalandırma etkinliği, düşük hava yaşı sağlamak demektir.

Ana teması CO₂ olan bu çalışmada havalandırma ve tanımı üzerinde durulmasının nedeni, kendisi de bir kirletici olan CO₂'in, havalandırma teknolojisinde bir gözlem ve kontrol parametresi olarak kullanılmasıdır.

KAYNAKLAR

- [1]. HAMMER, L. vd. "High SARS-CoV-2 Attack Rate Following Exposure at a Choir Practice — Skagit County, Washington, March 2020", CDC Morbidity and Mortality Weekly Report (MMWR), Vol.69, No.19, 15 May 2020.
- [2]. LU, J. vd. "COVID-19 Outbreak Associated with Air Conditioning in Restaurant, Guangzhou, China, 2020". CDC EID Journal Vol. 26, No.7, July 2020. DOI: 10.3201/eid2607.200764, April 02, 2020.
- [3]. ASHRAE Fundamentals 1981.
- [4]. ASHRAE Fundamentals 1985.
- [5]. ASHRAE Fundamentals 1997.

BÖLÜM 7B

HAVALANDIRMA SİSTEMİ TASARIMINDA KARBONDİOKSİTİN ÖNEMİ

Günümüz Avrupa ve Kuzey Amerika standartları^a, yaşam hacimlerindeki insan kökenli (bioeffluent) hava kirleticilerinin yarattığı konforsuzluğu gidermek üzere gerekli minimum havalandırma debileri temelinde formüle edilmişlerdir ve iç hava içindeki gaz kirleticileri seyreltmek üzere eşik konsantrasyon değerlerini tanımlamaktadırlar [1]. Bunun sonucu olarak da, modern mekanik havalandırma binalarda iç hava kalitesi kontrol stratejisi, hacim içerisindeki CO₂ eşik değerine göre ayarlanan Talep Kontrollü Havalandırmaya (THK) dayanmaktadır [2].

Daha geniş olarak, özel bir fonksiyonu olmayan sıradan yaşam hacimlerindeki karbondioksit konsantrasyonu, sağlık, çevre ve havalandırma alanlarında ortak bir iç hava kalitesi bileşenidir. Yaşam hacimlerindeki karbondioksit konsantrasyonu günümüz havalandırma pratiğinde aşağıdaki işlemlerde kullanılmaktadır.

- Havalandırma tasarımında.
- Havalandırma yeterliğinin ve veriminin kontrolünde.
- İç hava kalitesinin sağlık riskinin değerlendirilmesinde.
- Kendisinin yaratacağı sağlık riskinin değerlendirilmesinde.
- Karbondioksit de dahil olmak üzere, karbondioksitin temsil ettiği iç hava kirliliğinin yaratacağı sağlık riskinin değerlendirilmesinde.
- İç hava kalitesi bileşenlerinden biyolojik kirliliğinin yaratacağı sağlık riskinin değerlendirilmesinde.

Havalandırma tasarımında bir kapalı hacim içerisinde bulunan insanların temiz hava gereksiniminin karşılanmasında ASHRAE tarafından, üçüncüsü ilk ikisi ile ilintili, 3 yöntem (procedure) verilmektedir:

- HMP – Havalandırma Miktarı Prosedürü (VRP - Ventilation Rate Procedure).
- İHKP – İç Hava Kalitesi Prosedürü (IAQP- Indoor Air Quality Procedure)
- DHP – Doğal Havalandırma Prosedürü (NVP – Natural Ventilation Procedure)

Önceki yüzyılın sonundaki ASHRAE Fundamentals rehberinde Havalandırma Miktarı Prosedürü ön planda iken, diğer iki prosedür zamanla gelişerek bugün önerilen algoritmalara ulaşmışlardır. Elbette HMP de, hacimlerin fonksiyonlarına göre giderek geliştirilmiştir. ASHRAE Standard 62-1999'da sınıflar için tek bir havalandırma değeri verilirken, ASHRAE 62-2019'da sınıflar 2-8 yaş arası, 9 ve daha büyük, yoğunluğun daha yüksek olduğu sınıflar (lecture classroom), konferans salonları, sanat sınıfları vs gibi alt kırılımlara ayrılmıştır (Tablo 7B1).

Tablo 7B1, havalandırmada gerekli hava debisinin ve yönteminin değişimini gösterirken, IAQ üzerine son otuz yılda yapılan araştırmaların değişim üzerindeki etkisini de göstermektedir. ASHRAE Mevcut Durum dokümanında [2] vurgulandığı üzere daha çok araştırmalara gereksinim vardır. İç hava kalitesini belirleyen faktörler arasında (iklim, mimari özellikler, metabolik alışkanlıklar, vs gibi) yerel parametrelerin de mevcut olması, söz konusu çalışmaların farklı coğrafyalar için de yapılması gerektiğini göstermektedir.

ASHRAE 62.1-2019'dan alınan ve Tablo 7B1'de gösterilen değerler, günümüzde Havalandırma Miktarı Prosedürüne (HMP) göre, kapalı hacimlerde insan ve kapalı hacim taban büyüklüğüne bağlı olarak havalandırma debisinin belirlenmesinde kullanılan büyüklüklerdir. Bu büyüklüklerin belirlenmesinde

^a EN16798 (CEN, 2019), ADF (HM Government, 2015), Building Bulletin (BB)101 (Education and Skills Funding Agency, 2018), ASHRAE 62.1 (ASHRAE, 2019) ve the International WELL Building Standard (International WELL Building Institute, 2020a).

hacim içerisinde kararlı halde karbondioksitin belli bir eşik değerin altında tutulması öngörüsü söz konusudur. Örneğin EN16798-1:2019’da yer alan I., II. ve III. Kategori mahaller için, dış hava CO₂ konsantrasyonunun üzerinde öngörülen limit 550 ppm, 800 ppm ve 1350 ppm değerleri, sırasıyla 10 l/s.kişi, 7 l/s.kişi ve 4 l/s.kişi havalandırma debilerine karşılık gelmektedir [3]. Tablodaki hacim fonksiyonlarına bağlı farklılıklar göz önünde tutulursa, hesaplanan her hava debisi için hacim içinde metabolik karbondioksit emisyonuna bağlı farklı bir karbondioksit - zaman ilişkisi doğar. Bu ilişkinin belirlediği zaman ortalama ve maksimum konsantrasyon değerleri, hem karbondioksit açısından hem de, karbondioksitin temsil ettiği diğer kirleticilerin tümü için, kapalı hacimdeki iç hava kalitesinin orada yaşayanlar için uygun olup olmadığının ölçüsü olarak kullanılmaktadır.

Tablo 7 B1. Eğitim kurumlarında solunum bölgesinde minimum havalandırma debisi karşılaştırılması (ASHRAE 62- 1999, 2019).

| EĞİTİM ORTAMI (FONKSİYON) | | Tahmini yoğunluk insan/100 m ² | | Dış Hava Gereklinimi | | | |
|---------------------------|---------------------------------|--|------|----------------------|------|--------------------|------|
| | | | | L/s.kişi | | L/s.m ² | |
| | | 1999 | 2019 | 1999 | 2019 | 199 | 2019 |
| SINIFLAR | Sınıf | 50 | | 8 | | | |
| | Sanat sınıfı | | 20 | | 5 | | 0,9 |
| | (5 - 8) yaş arası sınıflar | | 25 | | 5 | | 0,6 |
| | (9 yaş ve daha büyük) sınıflar | | 35 | | 5 | | 0,6 |
| | Kreş hasta odası | | 25 | | 5 | | 0,9 |
| | Kreş (4 yaşa kadar) | | 25 | | 5 | | 0,9 |
| | Konferans dersliği | | 65 | | 3,8 | | 0,3 |
| | Sabit koltuklu konferans salonu | | 150 | | 3,8 | | 0,3 |
| | Atölyeler /Marangoz-Metal | 30 | 20 | 10 | 5 | | 0,9 |
| LABORA - TUVARLAR | Laboratuvarlar (1) | 30 | | 10 | | | |
| | Bilim Laboratuvarları | | 25 | | 5 | | 0,9 |
| | Ünivesite /Meslek Okulu Lab | | 25 | | 5 | | 0,9 |
| | Bilgisayar laboratuvarı | | 25 | | 5 | | 0,6 |
| | Müzik odaları | 50 | | 8 | | | |
| | Müzik/Tiyatro/Dans odaları | | 35 | | 5 | | 0,3 |
| | Kütüphaneler | 20 | 10 | 8 | 2,5 | | 0,6 |
| | Soyunma odaları | | | | | 2,50 | |
| | Koridorlar | | | | | 0,50 | |
| | Auditorium | 150 | 150 | 8 | 2,5 | | 0,3 |
| | Sigara salonları (2) | 70 | | 30 | | | |
| | Medya Merkezi | | 25 | | 5 | | 0,6 |
| | Çok amaçlı toplantı salonu | | 100 | | 3,8 | | 0,3 |
| | | (1) Bazı prosesler ve hayvanların bulunduğu laboratuvarlar için özel kirlilik kontrol sistemleri gerekebilir (<i>Kimya laboratuvarlarında çeker ocakların olması gibi – mt/scs</i>). | | | | | |
| | | (2) Normal olarak havanın transferi ile sağlanır. | | | | | |

İster mekanik havalandırma, ister doğal havalandırma, ister mekanik havalandırma ile doğal havalandırmanın birlikte kullanıldığı kapalı ortamlarda, karbondioksit konsantrasyonunun limit değerlerinin altında tutulması, havalandırmanın temel hedefi olmaktadır. DING [3] tarafından yapılan çalışmada görüleceği üzere Amerika, İngiltere, Fransa, Danimarka, Hollanda, Finlandiya, İtalya, Çin’de yüzlerce okulda yapılan havalandırma seviyelerinin değerlendirilmesi ile ilgili çalışmalarda, sınıflardaki havalandırma debilerinin yeterliliği ölçülen CO₂ konsantrasyonlarına göre belirlenmiştir. Metabolik karbondioksit dışında özel bir karbondioksit kaynağının olmadığı sınıf gibi kapalı hacimlerde, CO₂’in limit konsantrasyon değerinin altında tutulmasının, geleneksel – kültürel yapı elemanları ve

fonksiyonel donanımların diğer kirleticilere ait emisyonlarının da birikime yol açmayacağı öngörülmektedir. İnşaat ve donanım kodlarına ve standartlarına bağlı olarak kapalı hacimlerde kullanılan her türlü malzemenin kirletici emisyon değerleri de farklı olacaktır. Her türlü hacimde olduğu gibi sınıflarda kullanılan her türlü malzemenin emisyonlarından oluşan konsantrasyonların değişiminin karbondioksit konsantrasyonu değişimi ile ilişkisi incelenmelidir. Ancak bu tür çalışmalardan sonra karbondioksitin limit değerinin bir gözlem elemanı olarak kullanılıp kullanılmayacağına, ya da önerilen karbondioksit limit değerlerinin diğer kirleticilerinin seviyesine gerekli limit değerlerin altında tutup tutmayacağına karar verilmelidir. Şüphesiz bu noktada diğer kirleticilerin kolay ve ekonomik ölçülmesine ait teknolojilerin de gelişmesi önemlidir.

COVID-19 ile karbondioksitin gözlem aracılığı ve limit değerinin bir kontrol parametresi olması bir başka boyut kazanmıştır. Bu boyut kapalı ortamdaki karbondioksit konsantrasyonu, kapalı hacimde enfekte insanların yaydığı biyo-aerosollerden diğer insanlar için oluşacak bulaşma (enfeksiyon) riski arasındaki ilişkidir. Bulaşma riskinin hesaplanması, bulaşıcı hastalıkların yayılma dinamiğinin anlaşılması ve toplum için bulaşma riskinin tahmini açısından önemlidir. Sayısal risk değerlendirmesi, hastalığın yayılmasının ve alınan önlemlerin etkinliğinin sayısal olarak analizine de imkan verir [4].

Bir kapalı hacimde havada asılı patojenler ile enfeksiyonun yayılma riskini etkileyen faktörler aşağıda verilmiştir [4]:

- Havada asıl patojenin dağıtımı ve dağılımı
- Havalandırma stratejisi
- Patojenin yaşam süresi
- Patojeni taşıyan partikül (Aerosol) büyüklüğü
- Solunum ile biriken miktar (Respiratory deposition)
- Heterojen bulaşıcılık (Heterogeneous infectivity)
- Havadaki türbülans
- Patojen – taşıyan (host) ilişkisi
- Kontrol tedbirleri

En genel halde bir kapalı hacimdeki enfeksiyon riskinin hesaplanmasında bu faktörlerin göz önüne alınması gerekir. Ancak henüz bu faktörlerin tümüne göz önüne alan bir model geliştirilmemiştir. Şimdilik gittikçe geliştirilen, hem deterministik hem de olasılıksal (probabilistik) risk simülasyonlarında kullanılan iki model vardır [4,5]. Bunlardan ilki, Wells-Riley eşitliği olarak anılan modeldir. Wells – Riley olarak anılan eşitliğin geliştirilmesine sebep olan projenin ilgi çekebilecek hikayesi Riley tarafından 2001 tarihinde, okunmaya değer önemli bir belge olarak yayınlanmış, çalışmaya çok önemli katkı koyan araştırmacılar ve kurumsal katkılar anılmıştır [6]. Diğer model ise kimyasalların, ilaçların, biyo-ajanların ve diğer stres etkenlerinin, organizmalar üzerindeki etkilerini tanımlamak için kullanılan, HAAS-1993 tarafından geliştirilen ve daha çok tehlikeli kimyasalların risk değerlendirmesinde kullanılan Doz-Tepki Modelidir [4]. Her iki modelde yapılan çalışmaların değerlendirmeleri TO ve CHAO [4] ile BRENT [7] tarafından verilmiştir. Son zamanlarda Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği (Computational Fluid Mechanics) araçlarının da risk analizinde kullanıldığı görülmektedir [8].

Literatür incelendiğinde havalandırmanın önemli rol oynadığı, havada asılı patojenlerin yayılması ile gelişen bulaşıcı hastalıkların ilgili risk analizlerinde, Wells – Riley Eşitliği ve modifiye edilmiş varyantları günümüze kadar pekçok çalışmada kullanılmış [5,9÷17] ve söz konusu modellerin algoritmalarını kullanan simülatörler geliştirilmiştir [12,15]. Doz-Tepki Modeli için geliştirilmiş simülatörler de söz konusudur [18,19]. Bu modelin havalandırma ile arakesiti, risk analizinde (ister mekanik ister doğal olsun) havalandırma debisinin kullanılmasıdır. Pratikte bir hacimdeki havalandırma debisinin belirlenmesi, zamanla değişimi de göz önüne alınırsa, çok güçtür. Havalandırma debisinin belirlenmesindeki belirsizlik aralığı hiç şüphesiz hesaplanan risk değerindeki hassasiyeti de tartışılır hale getirecektir. Zamana bağlı havalandırma debileri olması halinde Wells –

Riley eşitliğinin geçerli olmadığı belirtilerek, risk analizlerinde havalandırma debisine dayalı dezavantajdan kaçınmak için havalandırma debisi yerine, kolay ölçülebilir kendisi de bir kirletici olan ve iz elamanı olarak kullanılan karbondioksitin kullanılması öngörülerek, öncülüğünü RUDNICK ve MILTON'ın [20] yaptığı risk modelleri kullanılmaya başlamıştır [11,21÷27]. Karbondioksit temelli risk analizleri, iç ortamlardaki karbondioksit konsantrasyonunu daha da önemli hale getirmiştir. Böylelikle biyolojik kirliliğin söz konusu olduğu hallerde, karbondioksit ve diğer kirleticiler için belirlenen karbondioksit limit değerinin bulaşma riskini hangi seviyeye getirdiği veya bulaşma riskini çok düşürmek için olması gereken karbondioksit konsantrasyonunun ne olması gerektiği gibi analizleri yapmak mümkün olacaktır. Bu bağlamda, karbondioksit konsantrasyonunun değişimi ile quanta^b konsantrasyonunun değişimi arasındaki ilişki ve quanta konsantrasyonunun Wells – Riley modeline göre tahmin edilen bulaşma riski'ne etkisi üzerine yapılan bir çalışma ve değerlendirilmesi literatürde yer almaktadır [12].

COVID-19'un yayılma riskinin azaltılması amacıyla 1000 ppm eşik değeri ile CO₂'in sürekli izlenerek havalandırmanın kontrol edilmesi önerilmektedir [28,29]. Araştırmacılar COVID-19 ve grip gibi hava yoluyla yayılan hastalıkların bir iç ortamdaki bulaşma riskinin, CO₂'in izlenmesi yoluyla gerçek zamanlı olarak takip edilebileceğini göstermektedirler [22,27,30÷32]. Ancak mutlak CO₂ konsantrasyonunun hava yoluyla bulaşma riskinin tek göstergesi olmadığı [33] ve özellikle insan yoğunluğu düşük olduğu büyük kapalı hacimlerde düşük karbondioksit seviyesinin, enfeksiyonun hava yoluyla bulaşmasının önlenmesi için yeterli olmadığı not edilmiştir [34].

Sonuç olarak günümüzde kapalı hacimlerdeki CO₂ konsantrasyonu, en başta insan kaynaklı kirleticiler nedeniyle oluşan iç hava kalitesi (koku) konforsuzluğunun göstergesidir. Yine günümüzde, genel olarak 1000 ppm, daha hassas uygulamalarda 800 ppm eşik değerleri ile hem fizyolojik hem bilişsel sağlıklı yaşam ortamları yaratmak üzere, İç Hava Kalitesi Prosedürü ile havalandırma debisinin belirlenmesinde ve kontrolünde, bulaşıcı hastalıkların yayılmasında riskin hesaplanması, riskin azaltılması ve nihayet riskin takibinde CO₂ kullanılmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1]. McLEOD, R.S. vd. "An Investigation of Indoor Air Quality in a Recently Refurbished Educational Building". *Front. Built Environ.* 7:769761, 2022. doi: 10.3389/fbuil.2021.769761
- [2]. "ASHRAE Position Document on Indoor Carbon Dioxide". February 2, 2022, February 2, 2022, Expires February 2, 2025.
- [3]. DING, E. vd. "Ventilation Regimes of School Classrooms Against Airborne Transmission of Infectious Respiratory Droplets: A Review". *Building and Environment*, 207, 108484, 2022.
- [4]. TO, G.N.S. ve CHAO C.Y.H. "Review and Comparison between the Wells–Riley and Dose-Response Approaches to Risk Assessment of Infectious Respiratory Diseases". *Indoor Air*, 20: 2–16, 2010.
- [5]. NOAKES, C.J. ve SLEIGH, P.A. "Applying the Wells-Riley Equation to the Risk of Airborne Infection in Hospital Environments: The importance of Stochastic and Proximity Effects". In: *Indoor Air, 2008 : The 11th International Conference on Indoor Air Quality and Cl. Indoor Air 2008, Copenhagen, Denmark, 17-22nd August 2008.*

^b Enfeksiyonun quantumu, enfeksiyona sebep olan solunum ile alınan partikül ölçüsüdür [35]. Havada asılı (aerosol) enfeksiyon yeteneği olan partiküller (damlalar, damlacık çekirdekleri) quanta olarak tanımlanmaktadır [7]. Wells, havada asılı olup solunum ile alınan her enfekte damlanın/aerosol'ün enfeksiyon yapmayacağını kabul etmiştir. Kararlı, iyi karıştırılmış (well mixed - izotropik) bir kapalı ortamda bulunanların %63'ünü (=1-1/e) enfekte edecek, minimum quanta sayısı bir quantum olarak tanımlamıştır. Bu sayı virüs tipi gibi parametrelere bağlıdır [7, 12]. Fiziksel bir birim olmayıp hipotetik bir doz birimidir ve epidemiyolojik çalışmalardan tanımlanmaktadır [7].

- [6]. RILEY, R.L. "What Nobody Needs to Know About Airborne Infection". American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, Vol. 163, 2001.
- [7]. STEPHENS, B. "HVAC Filtration and the Wells-Riley Approach to Assessing Risks of Infectious Airborne Diseases". Final Report, NAFA Foundation Report, 2012.
- [8]. FOSTER, A. ve KINZEL, M. "Estimating COVID-19 Exposure in a Classroom Setting: A Comparison between Mathematical and Numerical Models". Phys. Fluids 33, 021904, 2021. <https://doi.org/10.1063/5.0040755>
- [9]. ESCOMBE, A.R. vd. "Natural Ventilation for the Prevention of Airborne Contagion". PLoS Med 4(2): e68. 2007. doi:10.1371/journal.pmed.0040068
- [10]. FURUYA, H. "Risk of Transmission of Airborne Infection during Train Commute Based on Mathematical Model". Environmental Health and Preventive Medicine, 12, 78–83, March 2007.
- [11]. BUONANNO, G. vd. "Quantitative Assessment of the Risk of Airborne Transmission of SARS-CoV-2 Infection: Prospective and Retrospective Applications". Environment International, 145, 106112, 2020.
- [12]. LOOMANS, M. vd. "Calculating the Risk of Infection". REHVA Journal, October 2020.
- [13]. LI, J. vd. "Evaluation of Infection Risk for SARS-CoV-2 Transmission on University Campuses". Science and Technology for the Built Environment, 27:9, 1165-1180, 2021. doi:10.1080/23744731.2021.1948762
- [14]. NORDSIEK, F. vd. "Risk Assessment for Airborne Disease Transmission by Poly-Pathogen Aerosols". 2021. doi.org/10.1101/2020.11.30.20241083
- [15]. YILMAZOĞLU, M.Z. ve DEMİRCAN, A. "Covid-19 Sürecinde Mevcut Hastanelerde Mekanik Sistemlerinde Alınması Gereken Önlemler ve Tecrübeler", Politeknik Dergisi, Cilt, Sayı, 1 - 1, .2021 <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>
- [16]. LI, X, vd. "A Spatiotemporally Resolved Infection Risk Model for Airborne Transmission of COVID-19 Variants in Indoor Spaces". Science of the Total Environment, 812, 152592, 2022.
- [17]. YANG, Y. vd. "Effects of Purifiers on the Airborne Transmission of Droplets Inside a Bus". Phys. Fluids, 34, 017108, 2022. doi.org/10.1063/5.0081230
- [18]. HENRIQUES, A. vd. "Modelling Airborne Transmission of SARS-CoV-2 Using CARA: Risk Assessment for Enclosed Spaces". Interface Focus 12: 20210076. 2022. doi.org/10.1098/rsfs.2021.0076
- [19]. AZIMI, P. vd. "Mechanistic Transmission Modeling of COVID-19 on the Diamond Princess Cruise Ship Demonstrates the Importance of Aerosol Transmission". PNAS, Vol. 118, No. 8, 2021.
- [20]. RUDNICK, S. N. ve MILTON, D. K. "Risk of Indoor Airborne Infection Transmission Estimated from Carbon Dioxide Concentration". Indoor Air, 13, 237–245, 2003.
- [21]. TAYLOR, J.G. vd. "Measuring Ventilation and Modelling M. Tuberculosis Transmission in Indoor Congregate Settings, Rural KwaZulu-Natal". INT. J. TUBERC. LUNG. DIS. 20(9):1155–1161, 2016. doi.org/10.5588/ijtld.16.0085
- [22]. PENG, Z. ve JIMENEZ, J.L. "Exhaled CO₂ as a COVID-19 Infection Risk Proxy for Different Indoor Environments and Activities". Environ. Sci. Technology Lett., 8, 392-397, 2021.
- [23]. PENG, Z. vd. "Practical Indicators for Risk of Airborne Transmission in Shared Indoor Environments and Their Application to COVID-19 Outbreaks". Environ. Sci. Technology, 56, 1125-1137, 2022.
- [24]. VOURIOT, C.V.M. vd. "Seasonal Variation in Airborne Infection Risk in Schools Due to Changes in Ventilation Inferred From Monitored Carbon Dioxide". Indoor Air, 31:1154–1163, 2021.
- [25]. BURRIDGE, H.C. vd. "Predictive and Retrospective Modelling of Airborne Infection Risk Using Monitored Carbon Dioxide". Indoor and Built Environment, 0(0) 1–18, 2021. doi: 10.1177/1420326X211043564
- [26]. GOSMANN, A.K. vd. "Reducing Infection Risk and optimization of Airing Concepts for indoor Air Quality by Accurate Aerosol and CO₂ Measurement". Healthy Buildings 2021 – Europe, 2021.
- [27]. BAZANT, M.Z. vd. "Monitoring Carbon Dioxide to Quantify the Risk of Indoor Airborne Transmission of COVID-19". Flow, 1 E10, 2021. doi:10.1017/flo.2021.10
- [28]. ESTRELLA, P. vd. "Should Carbon Dioxide (CO₂) Monitors be Used to Reduce Transmission of COVID-19?". Philippine COVID-19 Living Clinical Practice Guideline. Institute of Clinical Epidemiology, National Institutes of Health, UP Manila. 5 November 2021.
- [29]. EYKELBOSH, A. "Can CO₂ Sensors be Used to Assess COVID-19 Transmission Risk?". Vancouver, BC: National Collaborating Centre for Environmental Health; Jan 15, 2021.
- [30]. TANG, H. vd. "Tempo-Spatial Infection Risk Assessment of Airborne Virus via CO₂ Concentration Field Monitoring in Built Environment". Building and Environment, 217, 109067, 2022.
- [31]. CIRES, Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences at the University of Colorado Boulder. "Carbon Dioxide Levels Reflect COVID Risk". April 7, 2021.
- [32]. ZIVELONGHI, A. ve LAI, M. "Mitigating Aerosol Infection Risk in School Buildings: The Role Of Natural Ventilation, Volume, Occupancy and CO₂ Monitoring". Building and Environment, 204. 108139, 2021.

- [33]. STABILE, L. vd. "Ventilation Procedures to Minimize the Airborne Transmission of Viruses in Classrooms". Building and Environment, 202, 108042, 2021.
- [34]. EMG: "Role of Ventilation In Controlling SARS-CoV-2 Transmission", 30 September 2020. <https://www.gov.uk/government/publications/emg-role-of-ventilation-in-controlling-sars-cov-2-transmission-30-september-2020>.
- [35]. BURKETT, J. "Airborne Transmission And Distribution". ASHRAE Journal, April 2021.

BÖLÜM 7C

SINIFLARDA İÇ HAVA KALİTESİ STANDARTLARINDA ve KODLARINDA KARBON DİOKSİT KONSANTRASYONU LİMİT DEĞERLERİ

Sınıflar, insan yoğun kapalı ortamlardan birisidir. Bu nedenle öğrenciler ve öğretmenler, solunum yoluyla oksijen tüketmeleri ve ortama en başta CO₂ olmak üzere sınıf hacmine biyolojik katkılar (bioeffluent) yapmaları nedeniyle iç ortamdaki hava kalitesini değiştiren ana kaynaklardır. Bundan önceki bölümlerde incelenen CO₂'in insan sağlığı ve bilişsel performansı üzerine etkileri ışığında, uluslararası ve ulusal standartlar, kodlar olarak kapalı hacimlerde havalandırmaya esas olacak limit CO₂ konsantrasyonları belirlenmiştir. Bu bölümde uluslararası ve ulusal standartların, kodların belirlediği sınıflardaki limit CO₂ değerleri, mevcut literatürün ışığında incelenmiştir. Göz önüne alınan limit değerler için mümkün olduğunca güncel standartlar ve güncel araştırmalarda referans verilen değerler göz önüne alınmıştır. Bazı araştırmaların, daha önce örneklendiği üzere, güncel olmayan standart ve kodları referans verdikleri bilindiğinden, bazı limit değerlerin güncel olmadığı düşünülebilir. Ancak yapılan çalışma sonunda sınıflar için öngörülen limit CO₂ konsantrasyonlarının morfolojisi, bazı limit değerlerin olası güncel olmama hatasının etkisini göz ardı ettirecek bir görünümde değildir.

Bir kapalı ortamdaki CO₂ konsantrasyonu için Pettenkoffer Sayısı olarak adlandırılan 1000 ppm değeri, 1858 yılında Max Von Pettenkofer tarafından, "Ueber den Luftwechsel in Wohngebäuden" (Konutlarda Hava Değişimi Hakkında) adlı makalesinde önerilmiştir [1]. Bu sayının belirlenmesindeki temel, dışarıdan kapalı hacimlere girişte hissedilen insan kaynaklı emisyonların yarattığı koku konforsuzluğunun giderilmesidir [2]. İç ortamlardaki hava kalitesindeki koku konforu için öngörülen söz konusu limit değer, Pettenkofer'dan bu yana yapılan araştırmaların ışığında, sıradan ve insan kaynaklı emisyonların başat olduğu iç yaşam hacimlerindeki CO₂ ile birlikte diğer organik ve inorganik emisyonların da sağlık seviyesinin altında olmasını karşılar görülmektedir.

Uluslararası kurumlar ve ülkeler tarafından, diğer kirleticiler ile birlikte CO₂ için kabul edilen limit değerler, ABDUL-WAHAP vd [3, Tablo 3] tarafından, 2015 yılında çok kapsamlı bir çalışma ile yayınlanmıştır. Bu çalışmada, benzeri review makaleler ve günümüzden geriye doğru bir tarihte yayınlanmış makaleler de göz önüne alınarak, çeşitli ülke standartlarında, kurumlarda ve yaygın uygulamalarda, sınıflar için önerilen limit değerler güncel yayınlarda verilen son değerleriyle göz önüne alınmıştır. Bazı standartlarda ve kodlarda, sınıflardaki CO₂ konsantrasyonu için ayrı bir limit değer verilmemiş, iç ortamlar için tek veya endüstriyel ve endüstriyel olmayan sınıflandırılmasıyla ayrı ayrı değerler verilmiştir. Bazı standartlarda ise CO₂ konsantrasyonunu hiç dikkate alınmamış, ASHRAE 62.1-2019 olduğu gibi, sadece havalandırma debilerine yer verilmiştir.

ABD

Günümüzde standart koyan ve standartları yaygın olarak kullanılan iki kurumdan bir tanesi ASHRAE, diğeri Avrupa Topluluğudur. ASHRAE CO₂ limit değeri için, ASHRAE 62-1989 Standardı Ek E, Bölüm 6.1.3'de, 1000 ppm konsantrasyonunu, "Bu seviye, bir sağlık riski olarak değil, insan (koku) konforu için bir gösterge (surrogate) olarak kabul edilmektedir" notuyla vermiştir. 1000 ppm değerinin çıkış noktası, iç ortam CO₂ konsantrasyonunun bir mutlak değer olarak değil, dış ortam konsantrasyonunun 700 ppm üstü olarak, kararlı kütle dengesi ile hesaplanan çok anlamlı olmayan bir tanımlamasından gelmektedir ve havalandırma debilerinin rasyonalizasyonunda kullanılmaktadır [2,4]. ASHRAE, standartının yayınlanmasından kısa bir süre sonra bu değeri zorunlu (normativ) standarttan çıkarmasına rağmen, tesisat mühendisliğinde ve akademiada bu değer, bir ASHRAE standardı olarak algılanmaya ve anılmaya devam etmiştir. CO₂ için sınır değerini yer almadığı, 1000 ppm konsantrasyonunun insan kaynaklı emisyonlar için koku konforu limiti olarak belirtildiği ANSI/ASHRAE 62 -1999'da yayınlanmasına rağmen, ANSI/ASHRAE 62-1989 referans vermeye devam edilmiştir.

2017 yılında yayınlanan HARVARD T.CHAN School of Public Health'in bir yayınında "ASHRAE'nin sınıflar için önerdiği minimum kişi başına 5 l/s havalandırma debisi, sınıf içindeki CO₂ konsantrasyonunu 1000 ppm veya altında tutmak içindir" denilmekte [5] ve bunun içinde ASHRAE 2016 standardı [6] kaynak gösterilmektedir. 1000 ppm değerinin bir limit değer olarak anılmasında ASHRAE'nin bir rolü olmadığı üzerine yayınlar yapılsa da 1000 ppm değeri pek çok ülke ve kurum tarafından limit değer olarak kullanılmaktadır. Standartların dışında ASHRAE'nin 1000 ppm CO₂ konsantrasyonu için resmi bir görüşü yoktur ancak, ASHRAE journal da yayınlanan makalelere [3,7,8] bakıldığında ve "yaşam hacimlerindeki 1000 ppm'in altındaki konsantrasyonun her zaman iyi olmadığı gibi, üstündeki konsantrasyonlarında kötü olmadığı" gibi bir bakış açısının benimsendiği görülmektedir. Bu bakış açısı The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) tarafından da benimsenmiştir [9]: "ANSI/ASHRAE 62.1-2016 Standardı bilgi eki D'de şu not yer almıştır: Dış hava CO₂ konsantrasyonunun 700 ppm'in altında olan iç hava CO₂ konsantrasyonu içerde bulunan insanların önemli bir oranını (%80 civarında) tatmin edecektir. Bu değer dış hava CO₂ konsantrasyonu yaygın olarak 375 ile 500 ppm arasında olduğu için iç havadaki 1200 ppm konsantrasyonun altına karşılık gelmektedir. Ancak, CO₂ ölçümü havalandırılan alanda olması gereken^a insan yoğunluğunun olmadığı bir zamanda yapılmış ise havalandırmanın yeterliliği konusunda etkin bir gösterge değildir. Yüksek CO₂ konsantrasyonu, diğer kirlenmelerin de konsantrasyonlarının arttığına işaret edebilir. Eğer CO₂ konsantrasyonu yüksekse, iç hacme verilen dış hava miktarı artırılmalıdır"[9].

ABD'de okullardaki iç hava kalitesi konusunda yoğun çalışmalar yapan EPA'nın^b Okullarda İç Hava Kalitesi için Rehber'inde [10], ASHRAE 62.2001 standardı referans verilerek koku konforu için iç hava CO₂ konsantrasyonu üst limitinin dış havanın 700 ppm üzerinde olmasını, bunun da yaklaşık olarak 1000 ppm olduğu bilgisi verilmiştir. Gerek ASHRAE 62'nin önceki (<2019) versiyonları, gerekse kurumlar tarafından referans kurum olarak görülen EPA'nın yayınları nedeniyle, pek çok kurum ve kuruluş 1000 ppm limitine kendi kodları içinde yer vermektedirler.

HARVARD T.H. Chan Toplum Sağlığı Okulu^c tarafından yayınlanan "Sağlıklı Okullar: Okulların Tekrar Açılmasında Risk Azaltıcı Stratejiler" adlı yayında [11] sınıflarda CO₂ konsantrasyonunun 1000 ppm altında tutulması önerilmektedir.

EPA, ABD'de eyaletlerinde ilgili kurulların/organizasyonların önemli bir referans kurumudur. Illinois Eyaleti toplum Sağlığı Departmanı, iç ortamlarda CO₂ seviyesinin 600 ppm ile 1000 ppm arasında olmasını öngörerek kapalı da olsa yeni bir isteğe bağlı üst limit (600 ppm) getirmiş gibidir [12]. Uygun sıcaklık ve nem ile birlikte konsantrasyonun 800 ppm altında tutulması halinde iç hava kalitesi ile ilgili şikayetlerin minimum olacağını, 1000 ppm'in üstünde şikayet olacağını not ederek üst limit olarak 1000 ppm değerini, EPA önerisine uygun olarak sınır değer olarak belirlemiştir. Rehberde 1000 ppm değerinin üstünün hayatı tehdit eden veya sağlıksız bir ortam olarak anlaşılmasını, 1000 ppm altının yeterli taze dış havanın iç ortama girdiğinin bir ölçüsü olarak kabul edilmesi de ayrıca not edilmiştir. Ortamda insanların dışında bir CO₂ kaynağı varsa limit değer kullanılmayacağı da belirtilmektedir.

Yeşil Bina kavramı içinde de 800 ppm CO₂ konsantrasyonu bir üst limit olarak kullanılmaktadır. Bir ABD organizasyonu olan ve US Green Building Council'ün desteklediği kar gütmeyen bir kuruluş olan Green Building Certification Institute tarafından onaylanan International WELL Building Institute [13] standardına göre iç hacimlerde öngörülen limit CO₂ değeri 800 ppm'dir [14,15].

^a Olması gereken insan yoğunluğu (usual occupant density) aslında tasarım için öngörülen insan yoğunluğu olarak düşünülmelidir.

^b Environmental Protection Agency

^c Harvard T.H. Chan School of Public Health

Avrupa

Avrupa standardı EN 16798-1:2019'a göre iç çevreden beklenti seviyeleri dört kategoride sınıflandırılmıştır (Tablo 7C.1) ve yüksek beklenti kategorisi, özel gereksinimleri olan gruplar için (çocuklar, yaşlılar, engelliler, vs) orta seviye de normal seviyedir [16]. Beklenti kategorilerinin TS EN 15251-2008:01 deki daha geniş tanımları Tablo 7C.2'de, Uluslararası ISO 17772, Avrupa Standardı EN 16798-1:2019 a göre dört beklenti seviyesindeki CO₂ konsantrasyonları Tablo 7C.3'de verilmiştir. CO₂'ye göre bu sınıflandırma, CO₂ üretimin temel olarak insan metabolizmasının sonucunda olduğu iç hacimler için yapılmıştır [17].

Tablo 7C.1. EN 16798-1:2019 göre iç çevreden beklenti kategorileri [16].

| Kategori | Beklenti seviyesi |
|---|-------------------|
| IEQ I | Yüksek |
| IEQ II | Orta |
| IEQ III | Kabul edilebilir |
| IEQ IV | Düşük |
| Tablolarda IEQ sembolleri kullanmadan gösterilmektedir. | |

Tablo 7C.2 .TS EN 15251-2008:01 de beklenti kategorilerinin tanımları

| Kategori | Açıklama |
|----------|--|
| IEQ I | Yüksek seviyede beklenti-engelli, hasta, çok genç çocuklar gibi özel ihtiyaçları olan, çok hassas ve kırılgan insanlar tarafından kullanılan mekanlar için tavsiye edilir. |
| IEQ II | Normal seviyede beklenti – yeni binalar ve bakım, onarım için kullanılmalı. |
| IEQ III | Kabul edilebilir, orta seviyeli beklenti – var olan binalar için kullanılabilir. |
| IEQ IV | Yukarıdaki kategoriler için, kriterlerin dışında kalan değerler. Bu kategori, sadece yılın sınırlı bir zaman dilimi için kabul edilir olmalıdır. |

KHOVALYG vd'nin ısı konfor ve iç hava kalitesi standartlarını gözden geçirdikleri çalışmada [18], Avrupa normları içindeki kategoriler için farklı limit değerler öneren bir standart ve Singapur ile Hindistan standartları vardır (Tablo 7C.4). KAPOOR vd.'nin [19] daha güncel çalışmasında ISHRAE 10001:2019 referans verilerek okullarda III. Kategori için 700 ppm üst limiti verilmiştir. KHOVALYG vd'nin verdiği limit değerler yanında KAPOOR vd'nin verdiği değer de Tablo 7C.4'de gösterilmiştir.

Tablo 7C.3. ISO 1772 ve EN 16798-1:2019'a göre iç ortamlarda kabul edilebilir maksimum CO₂ konsantrasyonları [17,18, 20,21].

| | Kategoriler | | | |
|---|-------------|------|------|-------|
| | I | II | III | IV |
| Dış ortam CO ₂ konsantrasyonunun üzerinde kabul edilebilir seviye (ppm). | 550 | 850 | 1350 | >1350 |
| Dış ortam CO ₂ konsantrasyonu 480 ppm olduğunda kabul edilebilir limit değerler (ppm). | 1030 | 1280 | 1830 | >1830 |

Tablo 7C.4. İç çevre kabul edilebilir CO₂ konsantrasyonları [18,19].

| Standartlar | Kaynaklar | Kategoriler | | | |
|-----------------------------|-----------|--|-----|-----|------|
| | | Dış ortam CO ₂ konsantrasyonunun üzerinde kabul edilebilir seviye (ppm) | | | |
| | | I | II | III | IV |
| EN 15251 | [18] | 350 | 500 | 800 | >800 |
| Singapur Standardı 553, 554 | | 700 | | | |
| ISHRAE 10001:2016 | | 350 | 500 | 800 | |
| ISHRAE 10001:2019 | [19] | 350 | 500 | 700 | |

Tablo 7C.3 ve 7C.4 göz önüne alınırsa, Avrupa, Hindistan ve Singapore Standardlarında I. Kategoride yer alan ve çocuklar için de öngörülen limit değerlerin, 480 ppm dış hava konsantrasyonu için yaklaşık olarak 800 ppm ile 1000 ppm arasında olduğu izleniyor.

Avrupa, Isıtma Havalandırma İklimlendirme Derneklerinin Federasyonu olan REHVA genel olarak yaşam hacimlerinde havalandırma debisinin CO₂ konsantrasyonunu 800 ppm veya altında tutacak şekilde sağlanmasını önermektedir [22].

Ülkeler ve Standartlar

Güncel araştırmalarda, bağımsız standartlarda ve ülke okul standartlarında yer alan diğer CO₂ limit değerleri Tablo 7C.5’de verilmiştir. Değerler incelendiğinde genel olarak sınıflarda CO₂ konsantrasyonu için 1000 ppm limitinin zorunlu olduğu veya önerildiği, 800 ppm – 1000 ppm aralığının iyi havalandırma olarak tanımlandığı görülmektedir. Fransa’da 900 ppm, Avustralya’da 850 ppm limit değerinin olduğu, RESET standardında ise 600 ppm değerinin yüksek performanslı havalandırmaya karşılık geldiği görülmektedir. İngiltere’de yaygın ve etkin standart olan BB 101’de [17] CO₂ limit değerleri doğal ve mekanik havalandırma için ayrı ayrı verilmiş, ancak iki sistem arasındaki farklılığın açıklaması çok rasyonel bulunmamıştır; doğal havalandırmadaki kısıtlamalar, limit değerinin yükseltilmesine gerekçe olmamalıdır. İngiltere’deki bazı kurumlar da [15, 23,÷26], 800 ppm- 1000 ppm aralığında bir değeri limit değer olarak önermektedir.

Tablo 7C.5. Farklı ülkelerde sınıflar veya genel olarak iç hava kalitesi için önerilen CO₂ limit değerleri.

| Ülke | Limit CO ₂ konsantrasyonu (ppm) | | | [Kaynak] - Tarih |
|---------------------|--|---|----------------------|-------------------------|
| Finlandiya | 1000 | Maksimum kabul edilebilir limit değer | | [27] - 2020 |
| Norveç | | | | |
| Danimarka | | | | |
| Hollanda | | | | |
| Almanya | | | | |
| Fransa | 900 | | | |
| Portekiz | 1000 | RSECE 2006 | | [28] - 2011 |
| Hollanda | 800/950/1200 | Netherland Enterprise Agency | | [29] - 2022 |
| İspanya | 500 + CO _{2,dış} | Spanish RITE (CO _{2,dış} bilinmiyorsa 400 ppm) | | [30] – 2022 |
| İsveç | 1000 | | | [31] – 2019 |
| | 800 | Bazı firmalar personeleinin maksimum performansı için limit değerler | | [32] -2022 |
| İngiltere BB 101 | 1500 | Günlük ortalama | Doğal havalandırma | [17] – 2018 |
| | 2000 | Maksimum (20 dakikadan az) | | |
| | 1000 | Günlük ortalama | Mekanik havalandırma | |
| | 1500 | Maksimum (20 dakikadan az) | | |
| İngiltere | 800 | Sürekli olarak aşıldığında okul yönetimi haberdar edilmelidir. | | [23*,24] 2022 – 2020 |
| | 1500 | Aşıldığında sınıf havası dış hava ile yenilenmelidir. | | |
| İngiltere | 800-1000 | Chartered Institute of Building Service Engineer (CIBSE) Guide B2 (2016) tarafından önerilen aralık | | [15] – 2022 |
| İngiltere | <800 | İyi havalandırma ve enfeksiyon yayılmasının önlenmesi için*** | | [25**,26] - 2022 |
| | >1500 | Kötü havalandırma | | |
| İsviçre | 2000 | Swiss Standard SN 520180 (2014) | | [33] – 2021 |
| İtalya | 1000 | | | [34] - 2020 |
| Latvia | 1000 | Gebe kabul gören limit | | [35] - 2921 |
| Kanada | 1000 | Konutlarda ve okullarda | | [36] – 2022 |
| | | | | [37] - 2020 |
| Kanada - Qubec | 1000 | Hedef | | [38] – 2022 |

| Tablo 7C.5. (devamı) | | | |
|--|-------------|---|----------------|
| Kanada - Toronto | <800 | İyi | [39] – 2021 |
| | <1100 | Kabul edilebilir | |
| | >1200 | Sorgulanmalı | |
| Avustralya | 850 | Australia's National Construction Code | [40] - 2022 |
| Yeni Zelanda | <800 | İyi havalandırılmış | [41] – 2017 *4 |
| | <1000 | İdeal - Standards New Zealand NZS 4303:1990. | |
| | 1200 - 1600 | Yeterli havalandırma yok | |
| | 1800 - 2200 | Çok yetersiz havalandırma | |
| Tayvan | 1000 | | [42] – 2020 |
| | | | [43] - 2015 |
| Hong Kong | 800 | 8 saat ortalama – Mükemmel sınıf (Veri tarihi 2002) | [3] – 2015 |
| | 1000 | 8 saat ortalama – İyi sınıf (Veri tarihi 2003) | |
| Japonya | 1000 | (Veri tarihi 2005) | |
| Malezya | 1000 | (Veri tarihi 2012) | |
| Çin | 1000 | 24 saat ortalama | |
| Filipinler | 1000 | | |
| Güney Kore | 1000 | Kamu alanları | [44]- 2020 |
| RESET Standard | <600 | Yüksek performans havalandırma | [46,4] |
| | <1000 | Kabul edilebilir havalandırma | 2022 |
| <p>(*) Bu değerler ve şartlar İngiltere Kadın Öğretmenler Sendikası Okul Yöneticileri Ulusal Birliği tarafından belirlenmiştir. İnternet sayfasından 6 Haziran 2022'de alınmıştır.</p> <p>(**)Engineering and Physical Sciences Research Council (EPSRC) tarafından desteklenen, Imperial College, Cambridge ve Surrey üniversitelerinin işbirliğiyle, okullarda COVID-19'un yayılmasını azaltmak ve alınan tedbirleri değerlendirmek amacıyla yürütülen CO-TRACE projesi sonuçları.</p> <p>(***) İngiltere Sağlık ve İş Yönetimi de (The Health and Work Executive) 800 ppm'i öneriyor.</p> <p>(*4) Yeni Zelanda Eğitim bakanlığı 2007 dokümanlarından alınmış.</p> | | | |

Sınıflardaki havanın içindeki doğal kirleticilerden biri olan CO₂ konsantrasyonunun, öğrencilerin olduğu kadar tüm kapalı hacimlerde yaşayanların sağlığı açısından, günümüze kadar yapılan araştırmaların ışığında, belli bir limit değerine çıkmaması ve bu sınırın havalandırma yoluyla sağlanması günümüz tesisat mühendisliğinin tartışma konularından biridir. Konunun sağlıkla ve koku konforu ile ilgisi üzerinde yaklaşık beş yüz yıl öncesinden başlayan bir bilimsel merak, giderek artan bir yoğunlukta sürse de, CO₂ konsantrasyonunun, sağlık kelimesini sadece fizyolojik sağlık anlamında almak şartıyla, kısa süreli yüksek konsantrasyon maruziyetlerinin etkileri konusunda henüz negatif bir etki görülmediği not edilmektedir. Ancak burada yer verilen yüksek CO₂ konsantrasyonunun, literatürde endüstriyel olmayan, genel ve yaygın yaşam hacimlerinde karşılaşılan yüksek konsantrasyonları temsil etmekte olduğu anlaşılrsa da niceliksel olarak tanımlanmamaktadır. Halbuki BIERWIRT [47] tarafından yapılan güncel çalışmadaki verilere göre fizyolojik etkiler 800 ppm üzerindeki CO₂ konsantrasyonunda da görülmektedir. Sonuç olarak yapılan araştırmalar ve ülkeler tarafından kabul edilen limit değerler göz önüne alındığında sınıflarda 1000 ppm limitinin aşılmamasının, en azında bilişsel performans açısından, tüm dünyada yaygın olarak kabul gördüğü anlaşılmaktadır.

Hiç şüphesiz karbondioksit limitinin ya da hava içindeki insan sağlığına etkili olan herhangi bir bileşenin tek başına limit değerinin sağlanması, söz konusu ortamın sağlık açısından güvenli olduğu anlamına gelmez. Önemli olan bir ortamdaki havanın tüm bileşenlerinin insan sağlığını etkilemeyecek seviyelerde olmasıdır.

Bu çalışmanın yazarları olarak, şimdiye kadar yapılan araştırmalarla ortaya çıkan bulgular ışığında, CO₂ seviyesinin niteliksel tanımlarında da standart dilinde daha niceliksel bir sınıflandırmanın yararlı olacağı düşünülmüş ve Tablo 7C.6 deki kategorik tanımlar öneri olarak yapılmıştır.

Tablo 7C.6. İç hava kalitesi literatürü için CO₂ konsantrasyonları kategorileri

| Kategori | Konsantrasyon (C) | Açıklama |
|--------------------------------|---------------------|--|
| Doğal | $C \leq 300$ | İnsan evrimin tamamladığı jeolojik çaplardaki üst CO ₂ konsantrasyonu |
| Normal | $300 < C \leq 800$ | fizyolojik ve bilişsel etkilerin gözlenmediği CO ₂ konsantrasyon aralığı |
| Yüksek | $800 < C \leq 1000$ | Bilişsel etkilerin gözlendiği CO ₂ konsantrasyon aralığı |
| Çok yüksek (Kabul edilemez) | $C > 1000$ | Bilişsel etkilerin yoğun olarak gözlendiği ve fizyolojik sağlık etkileri CO ₂ aralığı |

KAYNAKLAR

- [1]. GIDS, W.F. "CO₂ as Indicator for the Indoor Air Quality: General Principles". AIVC, Ventilation Information Paper, No 33, July 2010.
- [2]. HERRMANN, D.C. "Understanding CO₂ and Standard 62". Comments/Letters: iaq@ashrae.org, IAQ Applications/Summer 2000.
- [3]. ABDULWAHAP, S.A. "A Review of Standards and Guidelines Set by International Bodies for the Parameters of Indoor Air Quality". Atmospheric Pollution Research 6, 751767, 2015.
- [4]. STUMM, R.E. "Revisiting the 1,000 ppm CO₂". ASHRAE Journal, June, 2022
- [5]. EITLAND, E., vd. "Foundations for Student Success How School Buildings Influence Student Health, Thinking and Performance", Harvard T.H.CHAN School of Public Health, 2017. (Bu kaynağın yayım tarihi verilmemiştir. Kaynaklarında yer alan makalele tarihlerinden en erken olarak 2017 olabileceği tahmin edilmiştir.)
- [6]. ASHRAE (2016). ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2013. Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. Accessed March 3, 2016.
- [7]. PERSILY, A.K. "Don't Blame Standard 62.1 for 1,000 ppm CO₂". ASHRAE Journal, February 2021.
- [8]. ASHRAE "ASHRAE Position Document on Indoor Carbon Dioxide". February 2, 2022, February 2, 2022, Expires February 2, 2025.
- [9]. NIOSH. "Indoor Environmental Quality: HVAC Management for Better IEQ". [https://www.cdc.gov/niosh/topics/indoorenv/hvac.html#:~:text=ASHRAE%20notes%20in%20informative%20Appendix,about%2080%25\)%20of%20occupants.](https://www.cdc.gov/niosh/topics/indoorenv/hvac.html#:~:text=ASHRAE%20notes%20in%20informative%20Appendix,about%2080%25)%20of%20occupants.) 9 Haziran 2022 de alındı.
- [10]. Reference Guide for Indoor Air Quality in Schools. [https://www.epa.gov/iaq-schools/reference-guide-indoor-air-quality-schools#IAQRG_Appendix C.](https://www.epa.gov/iaq-schools/reference-guide-indoor-air-quality-schools#IAQRG_Appendix_C) 9 Haziran 2022'de alındı.
- [11]. JONES, E. "Healthy Schools: Risk Reduction Strategies for Reopening Schools". Harvard T.H. Chan School of Public Health Healthy Buildings program. June, 2020.
- [12]. <https://dph.illinois.gov/topics-services/environmental-health-protection/toxicology/indoor-air-quality-healthy-homes/idph-guidelines-indoor-air-quality.html> 9 Haziran 2022'de alındı
- [13]. [https://en.everybodywiki.com/WELL_Building_Standard.](https://en.everybodywiki.com/WELL_Building_Standard) 9 Haziran 2022'de alındı
- [14]. [https://standard.wellcertified.com/air/ventilation-effectiveness.](https://standard.wellcertified.com/air/ventilation-effectiveness) 9 Haziran 2022'de alındı
- [15]. McLEOD, R.S. vd. "An Investigation of Indoor Air Quality in a Recently Refurbished Educational Building". Front. Built Environ., 7:769761, 2022.doi: 10.3389/fbuil.2021.769761
- [16]. JENKINS, M. "What Is EN 16798-1:2019? Basics of Thermal Comfort". 14 April, 2021. <https://www.simscale.com/blog/2019/10/what-is-en-16798/>
- [17]. "Guidelines on Ventilation, Thermal Comfort and Indoor Air Quality in Schools" Building Bulletin 101, Version 1, August 2018.
- [18]. KHOVALYG, D. vd. "Critical Review of Standards for Indoor Thermal Environment and Air Quality". Energy & Buildings 213, 109819, 2020.
- [19]. KAPOOR, N.R. vd. "A Review on Indoor Environment Quality of Indian School Classrooms". Sustainability, 13, 11855, 2021.
- [20]. "Education and Indoor Climate - Air Quality and Ventilation in Schools", Research Paper, Swegon, 2021. <https://blog.swegon.com/en/knowledge-is-the-first-step-read-our-white-paper-on-education-and-indoor-climate>

- [21]. BOGDANOVIĆA, S. vd. "The Effect of CO₂ Concentration on Children's Well-Being during the Process of Learning". *Energies* 13, 6099, 2020. doi:10.3390/en13226099
- [22]. WARGOCKI, P. "What We Know and Should Know about Ventilation". *REHVA Journal*, April 2021.
- [23]. NASUWT (National Association of Schoolmasters Union of Women Teachers). "Ventilation and Covid-19". <https://www.nasuwat.org.uk/advice/health-safety/coronavirus-guidance/full-reopening-of-schools/ventilation-and-covid-19.html>. 9 Haziran 2022'de alındı.
- [24]. SAGE - EMG. "Role of Ventilation in Controlling SARS-CoV-2 Transmission". Scientific Advisory Group for Emergencies - Environmental Modelling Group. <https://www.gov.uk/government/publications/emg-role-of-ventilation-in-controlling-sars-cov-2-transmission-30-september-2020>.
- [25]. BROGAN, C. "Curbing COVID-19 in Schools: Imperial Scientists Support CO₂ Monitor Rollout". Imperial College, London, 2022. <https://www.imperial.ac.uk/news/233154/curbing-covid-19-schools-imperial-scientists-support/>
- [26]. CARR, J. "Classroom Carbon Dioxide Levels Up To Three Times above Watchdog Guidelines". 2021. <https://schoolsweek.co.uk/classroom-carbon-dioxide-levels-three-times-above-watchdog-guidelines/>
- [27]. "The Impact of CO₂ on Children's Learning" SAV, 2020. [https://www.sav-systems.com/wp-content/uploads/2020/11/The-Impact-of-CO₂-on-Childrens-Learning.pdf](https://www.sav-systems.com/wp-content/uploads/2020/11/The-Impact-of-CO2-on-Childrens-Learning.pdf)
- [28]. CANHA, N. vd. "Winter Ventilation Rates at Primary Schools: Comparison between Portugal and Finland". *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 76:6, 400-408, 2013. doi: 10.1080/15287394.2013.76537
- [29]. DING, E. vd. "Ventilation Regimes of School Classrooms Against Airborne Transmission of Infectious Respiratory Droplets: A review". *Building and Environment*, 207, 108484, 2022.
- [30]. MONGE-BARIO, A. vd. "Encouraging Natural Ventilation to Improve Indoor Environmental Conditions at Schools. Case studies in the North of Spain Before and During COVID". *Energy & Buildings*, 254, 111567, 2022.
- [31]. SIMANEC, B. vd. "Indoor Air Temperatures, CO₂ Concentrations and Ventilation Rates: Long-term Measurements in Newly Built Low-Energy Schools in Sweden". *Journal of Building Engineering*, 25, 2019.
- [32]. SWEDEN <https://www.geminidataloggers.com/info/carbon-dioxide-air-quality-data-logger>. 9 Haziran 2022 de alındı.
- [33]. VASSELLA, C. vd. "From Spontaneous to Strategic Natural Window Ventilation: Improving Indoor Air Quality in Swiss Schools". *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 234, 113746, 2021.
- [34]. PULIMENO, M. vd. "Indoor Air Quality at School and Students' Performance: Recommendations of the UNESCO Chair on Health Education and Sustainable Development & the Italian Society of Environmental Medicine (SIMA)". *Health Promotion Perspectives*, 10(3), 2020.
- [35]. ZEMITIS, J. vd. "The Study of CO₂ Concentration in a Classroom during the COVID-19 Safety Measures". *E3S Web of Conferences* 246, 01004 (2021) Cold Climate HVAC & Energy 2021.
- [36]. <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/air-quality/residential-indoor-air-quality-guidelines.html>. 10 Haziran 2022'de alındı.
- [37]. Health Canada. "Residential Indoor Air Quality Guidelines, CARBON DOXIDE for Public Consultation", October 2021.
- [38]. 2022 - QUBEC <https://www.quebec.ca/en/education/preschool-elementary-and-secondary-schools/air-quality-schools#c138570>. 10 Haziran 2022 de alındı.
- [39]. CABRINI, M. vd "Investigation of Indoor Quality: Three School Ventilation Study". Prepared by for Toronto Catholic District School Board. February 12, 2021.
- [40]. VAICEKONYTE, R. "4 Indoor Air Quality Issues in Australian Schools and Ways to Address Them". 2022. <https://delos.com/resources/blog/4-indoor-air-quality-issues-in-australian-schools-and-ways-to-address-them/>
- [41]. LOH, J. Y. S. and ANDAMON, M.M. LOH, J. Y. S. and ANDAMON, M.M. "A Review of IAQ Standards and Guidelines for Australian and New Zealand School Classrooms". M.A. Schnabel (ed), *Back to Future: Next 50 Years*, 51st International Conference of the Architectural Science Associations (ANZAScA), pp. 695-702, 2017.
- [42]. CHENG, S.Y. vd. "How to Safely Reopen Colleges and Universities during COVID-19: Experiences from Taiwan". *Annals of Internal Medicine* · July 2020.
- [43]. LIU, K.F.R. "Health Risk Analysis of Indoor Air Pollution". *International Journal of Environmental Science and Development*, Vol. 6, No. 6, June 2015.

- [44]. ESTRELLA, E.P. vd. "Should Carbon Dioxide (CO₂) Monitors be Used to Reduce Transmission of COVID-19?". Philippine COVID-19 Living Clinical Practice Guidelines, CO₂ Monitors to Reduce COVID-19 Transmission, 5 Novamber 2021.
- [45]. HWANG, S.H. ve PARK, W.M. "Indoor Air Concentrations of Carbon Dioxide (CO₂), Nitrogen Dioxide (NO₂), and Ozone (O₃) in Multiple Healthcare Facilities". Environ. Geochem. Health, 42:1487–1496, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00441-0>
- [46]. <https://www.reset.build/standard/air>. 9 Haziran 2022'de alındı.
- [47]. BIERWIRTH, P.N. "Carbon Dioxide Toxicity and Climate Change: a Major Unapprehended Risk for Human Health". Working Paper · March 2021. doi:10.13140/RG.2.2.16787.48168

Not: Limit değerlerin zamanla değiştiği bilindiğinden, bu bölümde kaynak olarak gösterilen internet adreslerinin incelendiği ve değişimin gözlenmediği son tarihler belirtilmiştir.

BÖLÜM 7D

HAVALANDIRMA TASARIM YÖNTEMLERİ ve STANDARTLAR ÜZERİNE

Bilimsel ve teknik araştırmaların amacı, özne her neyse, ilgili alanlardaki uygulamalar için, tasarımdan kullanıcıya sunulan nihai faydalara kadar geniş bir yelpazede, birbirini destekleyerek gelişen temel özelliklerin belirlenmesidir. Bu bağlamda, COVID-19 salgını ile temel bilimler, tıp, mimarlık ve mühendislik alanlarının içinde olduğu transdisipliner özelliği öne çıkan havalandırma alanındaki araştırmaların amacı da, insanların yaşadığı kapalı ortamlardaki iç hava kalitesini ve onu oluşturan şartları, o ortamda kısa veya uzun süre bulunan insanların sağlığı için, “sağlık” kelimesinin içerdiği en geniş anlamda (fizyolojik sağlık, zihinsel sağlık, bilişsel sağlık ve performans, üretkenlik, kendini iyi hissetme, vs) tanımlamaktır. Bilimsel denetimlerin filtrelerinden geçen bu tanımlar nihayet söz konusu insanlar için sağlıklı iç hava kalitesini yaratacak sistem tasarımı ve sistem uygulamalarının gerçekleştirilmesine ve hizmete sunulmasına rehberlik edecek zorunlu kurallar, standartlar haline dönüşür.

Standartlar, şüphesiz kutsal kelimeler (sacrosanct) değildirler. Yeni teknolojilerin de kullanılmasıyla araştırmalar geliştikçe ve derinleştikçe, standartlar da hava kalitesinin ve şartlarının “sağlık” içeriğini daha geliştirecek yapılar için gelişmektedirler. Bu bağlamda, literatürde de örneklendiği [1,2] üzere bu standartlar sürekli gözden geçirilmeli ve geliştirilmelidir. Havalandırma Miktarı Prosedürüne (HMP - Ventilation Rate Procedure) [3] göre tasarımda kullanılan, havalandırma standartlarının üzerinde en çok çalışılan ve bir o kadar da tartışılan [4,5] yıldızı, kapalı yaşam hacimlerine kişi başına ve ayrıca göz önüne alınıyorsa birim alan başına verilecek dış hava miktarıdır. Standartların gelişmesi ve geliştirilmesi anlamında havalandırma debileri tarihsel perspektifte incelendiğinde [6,4], kapalı hacme kişi başına verilmesi gereken dış hava miktarının 1825 yılından bu yana kolay izah edilemeyen bir değişim içinde olduğu görülmektedir. Bu durumun özgün bir yorumu PERSILY [7] tarafından yapılmıştır: **“Sorumlu komiteler hava debilerinin belirlenmesinde mevcut araştırma sonuçlarını, havalandırma sistemlerinin tasarımında ve işletmesindeki önceki deneyimleri ve hiç şüphesiz çeşitli politik ve organizasyonel faktörleri göz önünde tutmuşlardır”.... “Standart (62-1973) insanların sağlığını, güvenliğini ve kendilerini iyi hissetmelerini sağlayacak minimum ve önerilen hava debilerini içermektedir (standartın minimum ve tavsiye edilen havalandırma gereksinimlerinin arkasındaki amaç ve kriterleri tanımlamadığı not edilmelidir)”**.

İç Hava Kalitesi Kalitesi Prosedürüne (İHKP - Indoor Air Quality Procedure) [3] göre ise önemli parametre kapalı ortamlarda aşılması önerilen/öngörülen CO₂ konsantrasyonudur. Havalandırma alanındaki ASHRAE ve EN standartları ile bu standartların baskın olarak yönlendiği ulusal standartlarda da iç hava kalitesinin metrikleri konusunda da farklılıklar ve uyumsuzluklar söz konudur. Bu farklılıkları göstermek üzere, ısı konfor ile birlikte iç hava kalitesi alanındaki uluslararası ve bazı ulusal standartların karşılaştırılmalı simülasyonların yapıldığı KHOVALYG vd.’nin çalışmasında [8] yer alan konut dışı binalarda çeşitli standartlara göre aşılması gereken CO₂ konsantrasyonları için verilen tablo geliştirilerek Tablo 7D.1 oluşturulmuştur.

Tanımları göz önüne alındığında [5], anaokulu ve ilkokul sınıflarındaki CO₂ konsantrasyonu I. Kategoride yer almalıdır. Tablo 7D.1’deki bu kategori için verilen konsantrasyonlar arasında farklılıklar hemen göze çarparacaktır. Üstelik kentlerdeki dış havadaki CO₂ konsantrasyonları göz önüne alınırsa, bu tablodaki farklı değerlere göre yapılacak sistem tasarımları sonucunda iç hava kalitesi açısından farklı konfor değerlendirmeleri ile karşılaşmak mümkündür. Havalandırma sistem tasarımında hangi fark değerinin ve hangi dış hava konsantrasyonunun kullanılması konusu üzerinde durulmalıdır.

Tasarım parametrelerinin farklılıkları yanında, binalarda iç hava kalitesi farklılıkları doğurabilecek nedenlerden biri de yukarıda anılan (HMP ve İHKP) tasarım yöntemleridir. ASHRAE 62.1-2019’da yer alan üçüncü bir tasarım yöntemi, Doğal Havalandırma Prosedürü (DHP - Natural Ventilation

Procedure) daha vardır ancak bu yöntemle göre tasarım diğer iki yöntemden birisine bağlı olarak geliştirilmektedir.

Tablo 7D.1. Konut dışı binalarda önerilen dış havaya göre fark limit CO₂ konsantrasyonları (Δ CO₂).

| Beklenti kategorileri → Seviye → | | JENKİNS 2019 | Kategori I Yüksek | Kategori II Orta (Normal) | Kategori III Kabul edilebilir | Kategori IV Düşük | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|--------------------------------|--------------------------|----------------------|------------------------------|----------------------------------|----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Ülkeler | Standartlar | Referanslar ↓↑ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Uluslararası | EN 15251 -2007 | 2020 KHOVALYG | 350 | 500 | 800 | >800 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Uluslararası | EN16798 - 2019 | | 550 | 800 | 1350 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Uluslararası | ISO 17772 - 2017 | | 550 | 800 | 1350 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Singapur | SS 553, 554 - 2016 | | 700 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Hindistan | ISHRAE -2016 | | 350 | 500 | 800 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Hindistan | ISHRAE - 2019 | | 2020 - KAPOOR | 350 | 500 | 700 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ABD | ASHRAE 62.1-2016 (Inf. App. D) | 700 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ABD | ASHRAE 62.1-2019 | bir değer verilmemiştir. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 450 | 500 | 550 | 600 | 650 | 700 | 750 | 800 | 850 | 900 | 950 | 1000 | 1050 | 1100 | 1150 | 1200 | 1250 | 1300 | 1350 | 1400 |

HMP'ne göre, daha önce verildiği üzere, farklı fonksiyonlardaki bina hacimleri için geniş bir listeden (ASHRAE 62.1 – 2019: Tablo 6.1) kişi başına ve birim alan başına havalandırma debisi seçilerek tasarım başlamaktadır. En yaygın olarak kullanılan yöntem bu yöntemdir. Ancak, bu yöntemde, hacim içindeki insan yoğunluklarına bağlı şartlar söz konusudur. Bu şartlar göz önüne alınmadığı takdirde, tasarımın başarılı olması mümkün olmayacaktır. Örneğin 5-8 yaşları arasındaki çocukların okuduğu sınıflarda hava debisi öğrenci başına 5 l/s, birim alan başına da 0.6 l/s.m² 'dir. Ancak bu değerler için öngörülen öğrenci yoğunluğu 0.25 ögr./m² 'dir. Bir sınıftaki öğrenci yoğunluğu bu yoğunluğun üstüne çıktığında tasarlanan havalandırma sistemi, öngörülen iç hava kalitesini sağlayamayacaktır.

Havalandırma debileri tasarım prosedürlerinin tarihsel gelişimi incelendiğinde, kapalı ortamlardaki kirlenici konsantrasyonlarına dayalı havalandırma debisi tasarımını amaçlayan İHKP, 1989'dan bu yana gelişerek HMP'ne karşı bir alternatif olmuştur. Kapalı mekandaki CO₂ konsantrasyonu eşik değeri bu prosedürün uygulanmasında ve sistemin kontrolünde (Talep Kontrollü Havalandırma) bir parametre olarak öngörülmesine karşılık, bu yaklaşımın da kapalı hacimdeki insan yoğunluğu, kirlenici kaynakları, kirlenici emisyon hızları açılarından uygun olmayabilir. İnsan yoğunluğu az diğer kirlenici emisyon hızlarının yüksek olduğu hacimlerde havalandırma debileri, insan kaynaklı koku konforsuzluğu açısından istenilen kaliteyi sağlayabilir ancak hacim içindeki insanlar diğer kirlenicilerin etkisine açık hale gelebilirler. ASHRAE 62.1-2019 bu yüzden, daha önceki versiyonlarda yer alan koku konforu ile ilgili 1000 ppm CO₂ eşik konsantrasyonunu içermemekte, bu prosedürün uygulanmasını hacim içindeki kirlenici kaynaklarının, kirlenici emisyon hızlarının, hacim içinde çalışan insan ve ziyaretçi yoğunluğuna bağlı olarak, sadece CO₂'in değil kirlenicilerin tamamının göz önüne alınmasıyla yapılmasını öngörmekte, kirlenici eşik değerleri için de uzman kuruluşlarının kabul ettiği değerlerin dikkate alınmasına işaret etmektedir.

İç Hava Kalitesi Prosedürü, Havalandırma Miktarı Kalitesi Prosedürüne göre, hacimlerdeki kirlenici kaynaklarını ve emisyon hızlarını, insan yoğunluğunu, hacim geometrik büyüklüklerini doğrudan göz önüne aldığı, işletmede (değişen kirlenici yüklerine göre) daha rasyonel debi kontrol imkanı sağladığı için havalandırma sistem tasarımı için daha uygun bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır.

PERSILY [7] havalandırma ve iç hava kalitesi standartlarının gelişimini incelediği makalesinde, "Performans Başlığı altında" İHKP'nün gelişiminin ve bu prosedüre karşı olan itirazları incelemiş ve değerlendirmiştir. Makalesi İHKP'ne olan gereksinimin açıklanması açısından çok faydalı, literatürde öncü bir çalışma olmuştur. HMP'ne karşılık daha fazla bir mühendislik bilgisi ve çabası gerektiren bu prosedürün tasarımda yaygın uygulanması ve iç hava kalitesinin kontrol yöntemi olarak yaygın olarak kullanılması zaman alacak, basit HMP yöntemi pek haklı görülmeyen argümanlarla savunulmaya

devam edecek gibi gözükmektedir. PERSILY [7] İHKP'nün tasarım teknolojisi içine dahil olmasını incelerken aşağıda özetlenen notları düşmüştür:

- İHKP, HMP'nde önerilen tablolaradaki reçete değerlerin kullanılması yerine kirlilik konsantrasyonunun kontrol edildiği performans temelli tasarım yaklaşımıdır.
- İHKP, teknolojiyi geliştirmenin yanında inovatif bina ve sistem tasarımını cesaretlendirmek için geliştirilmiştir.
- İHKP, HMP ile minimum gereksinimlerin yerine tasarımcının yüksek performanslı iç hava kalitesi hedefini gerçekleştirmesine imkan tanımaktadır.
- İHKP'nün uygulanmasında, tasarımın temeli olacak kirleticilerin, bu kirleticilerin konsantrasyonlarına ait limit değerlerin ve emisyon kaynaklarının gücünün belirlenmesi, koku ve hissedilmesi gibi, subjektif yaklaşımlardan iç hava kalitesinin değerlendirmesine yönelik bir yaklaşım oluşturulması gibi, aşılması gereken önemli zorluklar vardır.
- İHKP, emisyon kaynaklarının gücü ve emisyonların limit değerleri ile ilgili verilerin olmaması nedeniyle eleştirilmiştir. Ayrıca, tasarımda öngörülmeyen ve sağlıksız iç hava kalitesi koşulları doğurabilecek kirlilik bileşenleri olasılığı dile getirilmiştir. Böyle bir olasılık vardır. Ancak HMP uygulamasında kirlilik bileşenleri göz önüne alınmamaktadır ve iç hava kalitesi açısından göz önüne alınmayan ve sıradışı bir kirleticinin sebep olacağı iç hava kalitesi problemi HMP uygulamasında da aynen vardır. Tasarım dışı kirlilik bileşenleri her iki yöntemde de söz konusudur.
- Pek çok çalışma, HMP'ne göre hesaplanmış dış hava debisini azaltmaya yöneliktir. Düşük havalandırma debisi enerji tüketimi, yatırım maliyeti ve performans yaklaşımı açısından bir anahtar motivasyondur. İHKP uygulamasında havalandırma debisi, göz önüne alınan kirletici limit değerine sıkı sıkıya bağlıdır. İHKP'ne göre hesaplanmış hava debisinin bir çalışmada HMP ile belirlenen değer dördte biri, bir çalışma da üç katı olduğu görülmektedir.
- LEED ve Standart 189.1'in [ANSI/ASHRAE/USGBC/IES Standard 189.1-2011] her ikisinin de HMP'nin kullanılmasını öngörmesinin bir değeri yoktur. LEED test aşamasında olan alternatif bir İHKP'ne sahiptir.
- Havalandırma ve iç hava kalitesi standartları, 1946 tarihli ASA standardından bu yana geliştirilmesine karşılık, pek çok alanda gelişmeye ihtiyaç vardır. Bulardan biri de var olan İHKP'den, binalar arasındaki farklılığı, emisyon kaynaklarını ve tasarım amacını dikkate alan daha pratik bir performans yaklaşımına olan ihtiyaçtır.

Türkiye'de, havalandırma tasarımı için ulusal bir standart veya kod yoktur. Makina Mühendisleri Odası tarafından Klima Tesisatı Mühendis Yetkilendirme Eğitimlerine katılmak için zorunlu Havalandırma Tesisat Mühendis Yetkilendirme Eğitiminde kullanılan eğitim materyalinde [9], karbondioksitin "15000 ppm üzerindeki derişiklikleri zihinsel aktivite kayıplarına neden olabilir ve dikkat edilmelidir" denilmekte ve artık geçerli olmayan ASHRAE 62-1989 standardındaki 1000 ppm üst sınırı "okullar için kullanılabilir ve aşılmaması gerekir" önerisi yapılmaktadır. Aynı kaynakta okullardaki iç hava kalitesinin olumsuzlukları vurgulanmakta ve öneriler yer almaktadır. Okullardaki havalandırma debileri için de, birkaç defa revize edilmiş olan ASHRAE 62-2001 referans verilmektedir.

KAYNAKLAR

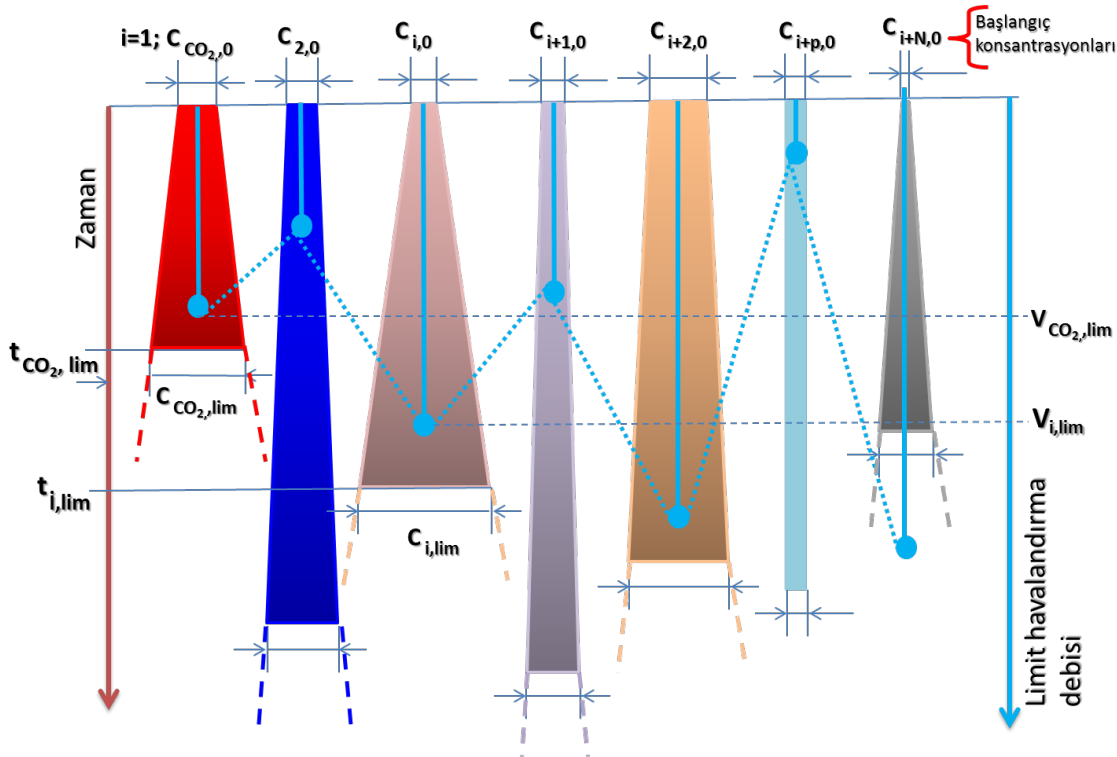
1. OLESEN, B. W. vd. "New Danish Standard for Mechanical, Natural and Hybrid Ventilation Systems". The REHVA European HVAC Journal, April 2022.
2. OLSSON D. Vd. "Status of Ventilation in Sweden". REHVA Journal, April 2022
3. ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2019 : Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, 2019.

4. WARGOCKI, P. "What We Know and Should Know about Ventilation". REHVA Journal, April 2021. OLESEN , B. W. "Do European Standards for indoor Air Quality Take into Account Outdoor Air Quality" <https://pdf4pro.com/amp/view/do-european-standards-for-indoor-air-quality-take-229ff2.html>
5. JANSSEN, J.E. "The History of Ventilation and Temperature Control", ASHRAE Journal September 1999.
6. PERSILY, A. "Challenges in Developing Ventilation and Indoor Air Quality Standards: The Story of ASHRAE Standard 62". Building and Environment, Vol 91, pages 61-69, 2015.
7. KHOVALYG, D. vd. "Critical Review of Standards for Indoor Thermal Environment and Air Quality". Energy & Buildings 213, 109819, 2020.
8. "Havalandırma Tesisatı" (ed. Hüseyin Bulgurcu). MMO Yayın No: 650, 2015.

BÖLÜM 8

TARTIŞMA ve OKULLARDA KARBONDİOKSİT için LİMİT DEĞER ÖNERİSİ

Periyodik olarak kullanılan ve kullanılmadığı zamanlarda, farklı hava değişimi mekanizmalarıyla (infiltrasyon, doğal havalandırma, vs) dış hava ile iletişim halinde olan bir kapalı ortamdaki iç hava kirlilik bileşenleri, iç kirlilik kaynaklarının emisyon hızlarına bağlı olarak kullanım öncesinde başlangıç konsantrasyonlarına $[C_{i,0} \{i=1,N\}]$ sahip olacaktırlar (Şekil 8.1). Eğer söz konusu kapalı hacim, kullanım öncesi çok yüksek debide havalandırılırsa, bileşenlerin konsantrasyonları dış hava ile aynı olacaktır. Sınıflar dersler başlamadan önce, mekanik havalandırma sistemleri ile yüksek debilerde havalandırılırlarsa veya (yeterince pencere ve kapı olduğu kabulüyle) tüm kapı ve pencereleri uzun bir zaman açık bırakılırsa, ders başlangıcında sınıflardaki iç hava kalitesinin dış hava ile yaklaşık olarak aynı konuma geldiği söylenebilir.



Şekil 8.1. Kapalı hacimde iç kirlilik bileşenleri karakteristikleri (Şekilde herhangi bir ölçük kullanılmamıştır. Karakteristiklerin tanımlamaları için çizilmiştir).

Kapalı hacim kullanılmaya başladıktan sonra, iç kirlilik kaynaklarından yapılan emisyonlar nedeniyle, bileşen konsantrasyonları, doğal veya mekanik havalandırma debisine bağlı olarak giderek artar. Eğer hiç havalandırma söz konusu değil ise tüm bileşenler için ayrı ayrı olmak şartıyla farklı zamanlarda $[t_{i,lim} \{i=1,N\}]$, kapalı ortamda bulunan insanlar için sağlık etkisi yaratabilecek limit değerlere kadar $[C_{i,lim} \{i=1, N\}]$ artarlar ve artışlar bu değerlerin üstünde de devam eder. Her kirlilik bileşeni için, kararlı halde sağlık etkisi yaratmayacak limit değerlerde $[C_{i,lim} \{i=1, N\}]$ tutabilecek bir havalandırma debisi $[V_{i,lim} \{i=1, N\}]$ vardır.

Kapalı hacimde tek bir kirletici olması halinde, o hacmin ilgili bileşene ait limit havalandırma debisi ile havalandırılması, kapalı hacmin iç hava kalitesi ve sağlık açısından uygun olmasını sağlayacaktır. Örneğin kapalı hacimde sadece insan kaynaklı CO₂ kirliliği söz konusu olsaydı, kararlı halde CO₂'e ait limit hava debisi ($V_{CO_2, lim}$) ile havalandırmak, söz konusu kapalı hacmi güvenli ve konforlu hale getirmeye yetecektir. Ancak tüm kapalı hacimlerde, birden fazla kaynaktan kirletici emisyonu söz konusudur ve hacimlerin sağlık açısından güvenli ve konforlu tutulması için gerekli hava debisi,

kirletici sayısı ve emisyonlarına bağlı olarak yapılacak çok ölçütlü optimizasyon ile belirlenmelidir. Bu analiz ASHRAE 62.1-2019^a 'da önerilen yöntemlerden biri ile basitleştirilmiştir.

ASHRAE Havalandırma Miktarı Prosedürüne (Air Flow rate Procedure) göre, bir kapalı hacme verilecek dış hava debisinin (V_{bz}) iki bileşeni vardır. Bunlardan bir tanesi İnsanların biyoatıkları için (V_p), diğeri de kapalı ortamdaki kaynakların emisyonları için öngörülen dış hava debileridir(V_a):

Dış Hava Debisi = İnsan biyoartıklarının konsantrasyonlarının azaltılması için gerekli debi (V_p) + Ortamdaki diğer kaynakların emisyonlarının konsantrasyonunu azaltmak için gerekli debi (V_a)

$$V_{bz} = V_p + V_a \quad (8.1)$$

$$V_{bz} = R_p \times P_z + R_a \times A_z \quad (8.2)$$

P_z = Ortamdaki insan sayısı

R_p = Kişi başına öngörülen dış hava debisi, l/s.kişi

A_z = İç - kapalı ortam taban alanı, m².

R_a = İç alan birim alanı başına hava debisi, l/s.m²

ASHRAE 62.1 - 2019 Standardı Tablo 6.1'de, Havalandırma Miktarı göre yapılacak havalandırma tasarımları için, farklı fonksiyonlara sahip eğitim alanları (sanat sınıfı, bilgisayar laboratuvarı, derslikler, sabit koltuklu konferans salonları vs) ve farklı yaşlardaki öğrenciler (5-8 yaş arası, 9 yaş üstü gibi) için, varsayılan (default) öğrenci yoğunluğu ile birlikte değerler verilmiştir. Varsayılan alan ve bağlı öğrenci yoğunluğu göz önüne alınarak yapılacak hesaplamalar sonucunda bulunan havalandırma debilerinin, hacim içindeki öğrenci yoğunluğu göz önüne alınarak kararlı durum için yapılan hesaplamaya göre, bazı eğitim alanları için, yaklaşık 1000 ppm karbondioksit konsantrasyonunu koruyacak debiye karşılık geldiği görülebilir. Ancak sınıflardaki diğer kirleticiler ayrı ayrı ele alınmamış, tümü için birim alan başına bir havalandırma debisi diğer kirleticilere karşı güvenlik için yeterli bulunmuştur ki üzerinde tartışılmalıdır.

ASHRAE 62.1-2019 standardında hesaplanacak minimum havalandırma değerleri, (a) standartta varsayılan (default) öğrenci yoğunluğu şartı sağlanmadıkça, (b) birim alan başına öngörülen hava debisi için varsayılan sınıf donanım özellikleri aynı tutulmadıkça, varsayılan öğrenci yoğunluğundan daha yüksek yoğunluklu ve farklı fiziko-kimyasal çevrenin yaratıldığı sınıflarda, hemen hemen tüm dünyada sınıflar için öngörülen CO₂ konsantrasyonunun 1000 ppm'in veya 800 ppm'in altında tutulmasının mümkün olmadığı kolayca görülebilir. Tablo 8.1'den görüleceği üzere, 35 öğrencinin olduğu 100 metrekare bir sınıfta ASHRAE standardına göre kişi başına 6,67 l/s hava debisi, 4 saat boyunca ortalama konsantrasyonu 1000 ppm'in altında tutmakta, maksimum konsantrasyon ise 1074 ppm olmaktadır. Ancak yaklaşık 40 (6,3x6,3) metrekarelik ve 30 öğrencinin olduğu bir sınıfta yine ASHRAE standartlarına göre kişi başına hesaplanan debi 4,97 l/sn olmakta, bu halde CO₂ konsantrasyonu ortalama 1208 ppm, maksimum ise 1307 ppm olmaktadır. Bu sınıfa ancak kişi başına 7,14 l/s havalandırma sağlanırsa (standartta göre hesaplanandan %43.7 büyük) CO₂ konsantrasyonu 1000 ppm değerine kadar azaltılabilmektedir. Yukarıdaki analizde iki sınıfın öğrencilerinin sosyo-kültürel, sınıfların fiziko-kimyasal yapılarının farklılıkları göz önüne alınmamıştır ki bu farklılıklar sonucu daha olumsuz yönde etkileyebilir.

Sonuç olarak ASHRAE 62.1-2019 da verilen Havalandırma Miktarı Prosedürüne göre havalandırma sistemi tasarımında, sınıflar için metrekare başına önerilen havalandırma debisi bileşenlerinin (R_p ve R_a) sınıflardaki kirleticilerinin tümünü ders saatleri boyunca limit değerlerinin altında tutacağı

^a ASHRAE 62.1-2019'un referans verilmesinin nedeni, en son versiyonu dikkate almaktır. Burada verilen yöntem önceki versiyonlarda da yer almaktadır.

varsayılmaktadır. Yapılan analiz geometrik şartlar açısından, en azından gözlenen CO₂ varsayımının, öğrenci yoğunluğuna getirilen varsayım unutulmamak şartıyla, bazı eğitim alanlarında uygun olduğunu göstermektedir. Kapalı hacimlerde emisyonların tümünü göz önüne alarak çok ölçütlü optimizasyonla havalandırma debisi tasarımını yapmak için uygun yöntem yine ASHRAE 62.1-2019 içinde verilen İç Hava Kalitesi Prpoedürüdür (Indoor Air Quality Procedure). Bu yöntemin geniş bir değerlendirmesi PERSILY'nin görüşleri ile birlikte Bölüm 7D 'de verilmiştir. Yöntemin geliştirilerek "Tasarımcı Dostu" bir yapıya getirilmesi, tasarım yöntemi olarak tercih edilmesi açısından önemlidir. Ayrıca iç hava kirleticilerinin emisyon karakteristiklerinin detaylı olarak bilinmesi önemli olan bir diğer konudur. Daha sağlıklı ve konforlu kapalı yaşam hacimleri yaratılması açısından bu yöntemin, tasarımcı dostu olarak geliştirilmesi, teknolojik bir kilometre taşı olarak görülmektedir. ASHRAE 62.1 standardının bu yönetime tarihsel olarak verdiği önemin artması da bu gerekliliği göstermektedir.

Tablo 8.1. İki farklı sınıfta ASHRAE 61.-2018 Tablo 6.1 'e göre havalandırma debileri ve CO₂ konsantrasyonları.

| Tasarım değerleri | Sınıf A | Sınıf B |
|---|-------------|---|
| Öğrenci sayısı | 35 (*) | 31 (4*) |
| Öğretmen sayısı | 1 | 1 |
| Taban alanı (m ²) | 100 | 40 |
| Tavan yüksekliği (m) | 2.9 | 2.9 |
| Öğrenci yoğunluğu (m ² /öğrenci) (5*) | 2.78 | 1.16 |
| Öğrenci yoğunluğu (m ³ /öğrenci) (5*) | 8.05 | 3.37 |
| ASHRAE 62.1-2019'a göre hava debisi (2*) (l/s) | 240 | 178.914 |
| Kişi başına entegre havalandırma debisi (l/s.kişi) | 6.67 | 4.97 |
| 4 ders süresinde ortalama CO ₂ konsantrasyonu (3*) | 990 | 1228 |
| 4 ders süresinde maksimum CO ₂ konsantrasyonu (3*) | 1074 | 1307 |
| Sınıf B'de, Sınıf A daki konsantrasyonlara inilebilmesi için uygun hava debisi (l/s.kişi) | | 7.14 Ort. : 990 ppm Mak.: 1032 ppm |
| (*) ASHRAE 62.1-2019 daki varsayılan öğrenci yoğunluğuna (35 öğrenci /100 m ²) uygun (2*) Öğretmen sayısı öğrenci sayısına eklenerek hesaplanmış (2*) Kullanılan yazılım: http://www.iccevrekalitesi.net/co2yazdir.asp (4*) Gerçek sınıftaki öğrenci sayısı (5*) Öğretmen sayısı öğrenci sayısına eklenmiştir. | | |

İç Hava Kalitesi Prosedürüne göre havalandırma debisinin tanımlanması için, CO₂ konsantrasyonunun belli bir değer altında tutulmasının, diğer kirletici konsantrasyonlarının da limit değerlerinin altında kalacağı varsayımına dayanmaktadır. Bu varsayımı destekleyen ise günümüze kadar yapılan araştırmaların ışığında, Bölüm 7C'de özetlendiği üzere, CO₂ konsantrasyonunun 1000 ppm altında tutulmasının, kapalı hacme ilk defa girenlerin koku konforunu sağladığının kanıtlanması ve araştırmalarda değerlendirmeye tabi tutulan subjektif bazı koşulların gözlenmesi söz konusu olsa da, 800 ppm'in altında fizyolojik sağlık ve bilişsel performans etkilerinin görülmemesi ya da etkilerin 800 ppm'den sonra başlamasıdır.

Bu çalışmada göz önüne alınan ve bundan önceki bölümlerde değerlendirilen literatürün ışığında sınıflarda, çocukların fizyolojik sağlığı, bilişsel performansı ve akademik başarısı için, antropolojik metriklerin göz önünde tutularak, CO₂ konsantrasyonunu ortalama 800 ppm'de tutacak havalandırma debisi sağlanmasını, dış hava CO₂ konsantrasyonu göz önüne alınarak ve sınıfta konsantrasyonunun 1000 ppm'in üzerine çıkmaması ölçütleriyle sistem tasarımının gerçekleştirilmesini öneriyoruz. Bu tasarımın tam olarak yapılabilmesi için de özellikle okullarımız çevresinde zamana bağlı CO₂ dahil dış hava kirlilik haritalarının çıkarılmasının çok önemli olduğunu belirtiyoruz. Önerilen 800 ppm – 1000 ppm değeri mutlak değerlerdir. Havalandırma sistemi tasarımı yapılırken okulun bulunduğu bölgenin

CO₂ konsantrasyonu değişimleri göz önüne alınmalıdır. Eğer herhangi bir değer yoksa, şehrin en kirli bölgesine göre tasarım yapılmalıdır. Bu da bilinmiyorsa benzeri şehirlerdeki kirlilik konsantrasyonları göz önüne alınmalıdır. Dış hava CO₂ konsantrasyonunun yüksek tutulması yatırımı çok fazla etkilemez. Ancak eğer dış CO₂ seviyesi öngörülen seviyeden düşük ise sistem daha düşük hızda çalışabilir. Bu durumda da akustik konfor olumlu yönde etkilenir.

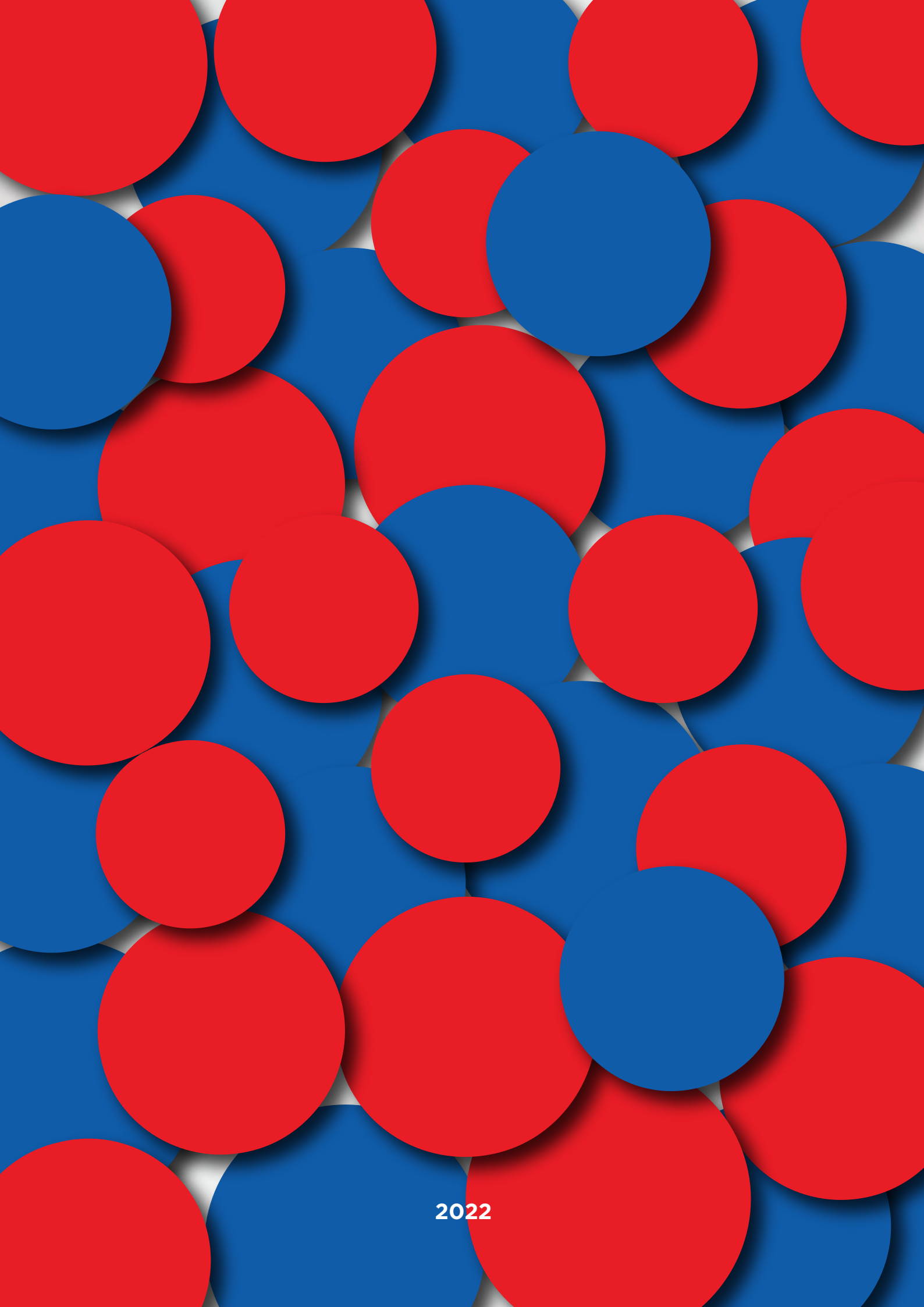
800 ppm ve 1000 ppm değerleri üzerinde, örnekleri görüldüğü üzere tarttışmalar olabilir. Birincisi, yapılan inceleme dünyadaki hemen her ülkede artık bu değerlerin standart koşullar olduğunu göstermektedir.

İkincisi ise güvenlikçi bakış açısı altında bu değerlerin kullanılması gereğidir. Uçuş simülatörlerinde yapılan testlerde, karar verme mekanizmasının 1000 ppm CO₂ konsantrasyonunun üzerinde etkilendiğini belirten araştırmanın [1] sonuçları, performans düşüklüğünün mekanizması bilinmediği için (ki bu nokta eleştirilmektedir) yok mu sayılacaktır? Kokpitlerinde maksimum 1000 ppm konsantrasyonun sağlandığı uçakları mı tercih etmeliyiz, yoksa yeni araştırma sonuçlarını bekleyip, CO₂ konsantrasyonu ne olursa olsun, uçaklar uçsun mu demeliyiz? Ya da araştırmalarda yerel şartlar söz konusu diyerek, çocuklarımızın akademik başarılarının % 12 daha az olması ihtimalini göz ardı mı etmeliyiz?

800 ppm ve 1000 ppm değerlerini şimdilik kaydıyla önerdiğimizi de belirtmeliyiz. Metabolik karbondioksit dışında özel bir karbondioksit kaynağının olmadığı sınıf gibi kapalı hacimlerde, CO₂'in limit konsantrasyon değerinin altında tutulmasının, geleneksel – kültürel yapı elemanları ve fonksiyonel donanımların diğer kirleticilere ait emisyonlarının da kendilerine ait sınır değerlerinin altında kalacağı kabulünün yapıldığı unutulmamalıdır. İnşaat ve donanım kodlarına ve standartlarına bağlı olarak kapalı hacimlerde kullanılan her türlü malzemenin kirletici emisyon değerleri de farklı olacaktır. Her türlü hacimde olduğu gibi sınıflarda kullanılan her türlü malzemenin emisyonlarından oluşan konsantrasyonlarının değişiminin karbondioksit konsantrasyonu değişimi ile ilişkisi incelenmelidir. Ancak bu tür çalışmalardan sonra karbondioksitin limit değerinin bir gözlem elemanı olarak kullanılıp kullanılmayacağına ya da önerilen karbondioksit limit değerlerinin diğer kirleticilerinin seviyesine gerekli limit değerlerin altında tutup tutmayacağına nihai olarak karar verilmelidir. Şüphesiz bu noktada diğer kirleticilerin kolay ve ekonomik ölçülmesine ait teknolojilerin de gelişmesi önemlidir.

KAYNAKLAR

1. CAO, X. vd. "Heart Rate Variability and Performance of Commercial Airline Pilots during Flight Simulations". Int. J. Environ. Res. Public Health, 16, 237, 2019.



2022