JOHE
Journal of Occupational Hygiene Engineering
J Occup Hyg Eng, 2025; 11(4): 334-344 Doi: 10.32592/joohe.11.4.334
https://johe.umsha.ac.ir

Original Article

Assessment of Classroom Air Quality using the Carbon Dioxide Index

Kazhal Rostami[1], Sara Bahmanipour[1], Hojjat Sayadi[2], Shiva Souri[3*]

1. Student Research Committee, Ilam University of Medical Sciences, Ilam, Iran
2. Non-Communicable Diseases Research Center, Ilam University of Medical Sciences, Ilam, Iran
3. Department of Occupational Health and Safety Engineering, School of Health, Ilam University of Medical Sciences, Ilam, Iran

Article history:
Received: 11 January 2025
Revised: 10 May 2025
Accepted: 11 May 2025
ePublished: 01 June 2025

*Corresponding author: Shiva Souri, Department of Occupational Health and Safety Engineering, School of Health, Ilam University of Medical Sciences, Ilam, Iran

E-mail: soury-s@medilam.ac.ir

Abstract

Background and Objective: High Carbon Dioxide (CO_2) concentration can adversely affect the concentration and intellectual performance of students and teachers. The present study aimed to assess the air quality of classrooms using the CO_2 index in classrooms at the School of Health.

Materials and Methods: CO_2 concentration was measured using the Aeroqual device at 15, 30, 60, and 90 minutes in nine classes with three groups of students on different days (27 times). The data were analyzed in Stata software (version 18) using the generalized estimating equations technique, and responses were compared with standard values of CO_2 concentration using t-tests.

Results: The results demonstrated that the air exchange rate varied from 0.01 to 1.39 times per hour, which was far from the standard limit. In most cases, the CO_2 concentration exceeded the permissible limit after 15 minutes and continued to increase until the end of the class. Between 30 and 60 minutes, the concentration trend inside the classrooms was almost constant. The increasing trend continued until the end of the class.

Conclusion: The present study indicated that, according to the ASHRAE 62.1 Ventilation Standard and the recommendations of the World Health Organization, the ventilation rate in the classrooms was not sufficient. Therefore, it is recommended to improve the air quality of the classrooms by providing mechanical ventilation plans, especially in the cold seasons of the year.

Keywords: Carbon dioxide concentration, Educational environment, Indoor air quality, Natural ventilation

Please cite this article as follows: Rostami K, Bahmanipour S, Sayadi H, Souri Sh. Assessment of Classroom Air Quality using the Carbon Dioxide Index. J Occup Hyg Eng. 2025; 11(4): 334-344. DOI: 10.32592/joohe.11.4.334

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-05-20]

[DOI: 10.53208/JOHE.11.4.334]

Copyright © 2024 Journal of Occupational Hygiene Engineering. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits copy and redistribute the material just in noncommercial usages, provided the original work is properly cite

Extended Abstract

Background and Objective

Students spend a significant amount of time in classrooms and other indoor environments, where indoor air quality plays a significant role in their exposure to pollutants, concentration, satisfaction, and academic performance. Given that population density in educational settings is approximately four times higher than that in office buildings, the air quality in these environments is typically lower. Factors affecting indoor air quality include ventilation systems, pollutant sources, human activity, humidity, and mold growth. Properly designed heating, ventilation, and air conditioning systems are essential to control temperature, humidity, and fresh air intake. Pollutants may come from inside (e.g., chemicals, dust, mold) or outside (e.g., vehicle exhaust). In many developed countries, half of the schools lack proper ventilation. High humidity can also lead to mold and mildew growth, threatening the health of students. Indoor air pollution can aggravate diseases such as asthma, allergies, and heart, eye, and respiratory diseases. For this reason, international organizations have developed standards for measuring and controlling pollutants. To measure air quality, indicators, such as carbon dioxide (CO_2), carbon monoxide (CO), particulate matter ($PM_{2.5}$), relative humidity, and radon are used. According to EPA standards, CO_2 concentrations should not exceed 1000 ppm. ASHRAE also recommends that this value be no more than 650 ppm higher than outside air. The Iranian national standard also states that the appropriate humidity for a classroom is between 30% and 70%, and the ventilation rate is 6 liters per hour. In classrooms, the number of people, breathing rate, and ventilation system performance can increase CO_2 levels. The classroom air exchange rate should be at least 3 times per hour. Within classroom settings, the total number of occupants, their respiration rates, and the performance of the ventilation system can contribute to rising CO_2 levels. High CO_2 concentrations have a negative effect on concentration and cognitive performance, especially in cold seasons when windows are closed. Measuring CO_2 concentrations is a simple and reliable method for assessing indoor air quality. Therefore, this study aimed to investigate the air quality of classrooms at Ilam University of Medical Sciences, Ilam, Iran, using the CO_2 index.

Materials and Methods

This descriptive-analytical study was conducted using a census method, which included all nine classrooms of the School of Public Health in the fall of 2023. The air quality of the classrooms was examined with three groups of students on different days, and a total of 27 measurements were made. All classrooms used natural ventilation. Initially, the open area of the windows was measured. Subsequently, using a Kimo thermal anemometer, the inlet airflow velocity was measured, and the air exchange rate (ACH) was calculated using the following formula:

Q (m /hr) = V (m/hr) ЧA (m) ACH = Q / V

The CO_2 concentration was measured utilizing an Aeroqual device, which was adjusted to zero calibration before each use. The device's measurement range is from 0 to 5000 ppm, and its accuracy is ±5%. To investigate changes in air quality during the class, CO_2 concentrations were measured at 15, 30, 60, and 90 minutes after the start of the class. Moreover, the amount of CO_2 in the open air was recorded before the start of the class. The data were analyzed using the GEE method in longitudinal models and Stata software (version 18) and compared with standards using a one-sample t-test. According to WHO and EPA standards, CO_2 concentration should not exceed 1000 ppm, and according to ASHRAE 62.1, it should not exceed 650 ppm above the outdoor air. Classroom design guidelines in Iran (capacity: 32 cases, 3 cubic meters of air per person, 3-meter ceiling height, and maximum distance of 9 meters) also indirectly affect indoor air quality, although no specific standard for CO_2 in classrooms has been set.

Results

The School of Public Health's educational building is two stories tall and contains nine classrooms. Airflow velocity at the window openings ranged from 0.2 to 1.96 m/s, while the air exchange rate varied between 0.01 and 1.39 per hour, significantly below the standard minimum of 2 times per hour. The CO_2 concentration in the open air ranged from 306 to 390 ppm. The results showed that in all measurements, except for cases 6 and 23, after 15 minutes of the onset of the class, the CO_2 concentration exceeded the permissible limit (1000 ppm) and continued to increase until the end of the class. A GEE regression model was used to examine the factors affecting the increase in CO_2, such as the number of students, the position of the classroom door, the air exchange rate, and the outdoor air flow rate. The results showed that a larger number of students was directly related to the increase in CO_2. The closed classroom door also increased CO_2 due to insufficient ventilation. In contrast, an increase in the air exchange rate and outdoor air flow rate was associated with a decrease in CO_2 concentration.

Discussion

Given the higher population density in educational settings, compared to residential

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-05-20]

[DOI: 10.53208/JOHE.11.4.334]

and office spaces, the air quality of these spaces is of great importance. Studies have shown that poor air quality, in addition to causing health and concentration problems, reduces cognitive performance in students and professors. Moreover, a statistically significant relationship has been reported between high levels of CO_2 and decreased concentration. In the present study, CO_2 concentration was investigated as an indicator of air quality, and the results showed that this concentration had an increasing trend during the teaching time. The findings are similar to the results of a study by Ramalho et al. in France, in which CO_2 concentrations were reported to be above 1700 ppm in 33% of classrooms. All of the classrooms studied used natural ventilation. While studies have shown that mechanical ventilation is effective in reducing indoor pollutants, naturally ventilated classrooms often have higher concentrations of CO_2. A study in China also found that opening exterior windows was more effective in lowering CO_2 than opening interior windows. The results of this study showed that during most of the class time, CO_2 concentration exceeded the WHO standard limit (1000 ppm) and did not significantly decrease even during a short 10-minute break. Other studies have also identified similar reasons, including high population and inadequate ventilation, as the cause of the increase in CO_2. The study's statistical model showed that the number of students, air exchange rate, outside air flow velocity, and whether the classroom door was closed all affected CO_2 concentrations. Opening the door or window of the classroom during teaching can help improve ventilation. Studies by Heracleous and Teleszewski have also confirmed this finding and have provided models for predicting CO_2 levels and optimally designing classroom ventilation.

Conclusion

The present study showed that classroom ventilation is not adequate according to ASHRAE and WHO standards, especially during cold seasons. It is recommended that mechanical ventilation be designed to achieve an air change rate of at least 2 times per hour and maintain CO_2 concentrations below 1000 ppm.

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-05-20]

[DOI: 10.53208/JOHE.11.4.334]

JOHE
مجله مهندسی بهداشت حرفه‌ای
دوره ۱۱، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۳، صفحات: ۳۴۴-۳۳۴
https://johe.umsha.ac.ir
UMSHA Press

مقاله اصلی

ارزیابی کیفیت هوای کلاس‌های آموزشی براساس شاخص دی اکسید کربن

کژال رستمی[۱]، سارا بهمنی پور[۱]، حجت صیادی[۲]، شیوا سوری[۳*]

۱ کمیته تحقیقات دانشجویی، دانشگاه علوم پزشکی ایلام، ایلام، ایران
۲ مرکز تحقیقات بیماری‌های غیر واگیر، دانشگاه علوم پزشکی ایلام، ایلام، ایران
۳ گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای و ایمنی کار، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایلام، ایلام، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۲۲
تاریخ ویرایش مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۲۰
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۲۱
تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۱۱

تمامی حقوق نشر برای دانشگاه علوم پزشکی همدان محفوظ است.

* **نویسنده مسئول:** شیوا سوری، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای و ایمنی کار، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایلام، ایلام، ایران

ایمیل: soury-s@medilam.ac.ir

چکیده

سابقه و هدف: غلظت بالای Co_2 می‌تواند بر تمرکز، عملکرد فکری دانش‌آموزان و معلمان تأثیر منفی بگذارد. این مطالعه با هدف ارزیابی کیفیت هوای کلاس‌های آموزشی با استفاده از شاخص Co_2 در کلاس‌های آموزشی دانشکده بهداشت انجام گرفت.

مواد و روش‌ها: غلظت Co_2 با استفاده از دستگاه Aeroqual در دقیقه‌های ۱۵، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ در ۹ کلاس با سه گروه از دانشجویان و در روزهای مختلف در مجموع ۲۷ بار اندازه‌گیری شد. داده‌ها با استفاده از روش تحلیل معادلات برآورد تعمیم یافته (GEE) در مدل‌های طولی، با نرم‌افزار Stata نسخه ۱۸ تحلیل و با استفاده از آزمون‌های تی یک نمونه‌ای با مقادیر استاندارد مقایسه شد.

یافته‌ها: نتایج نشان می‌دهد که نرخ تعویض هوا از ۰/۰۱ تا ۱/۳۹ بار در ساعت متغیر بوده است که فاصله‌ی زیادی از حد استاندارد (دو بار در ساعت) داشت. در اکثر موارد، غلظت Co_2 بعد از ۱۵ دقیقه از حد مجاز بالاتر رفته و تا پایان زمان کلاس روند افزایشی ادامه داشت. بین زمان ۳۰ تا ۶۰ دقیقه روند غلظت داخل کلاس‌ها تقریبا ثابت بوده است و مجدد تا پایان کلاس روند افزایشی ادامه داشته است.

نتیجه‌گیری: مطالعه حاضر نشان داد بر اساس شاخص Co_2 و در مقایسه با استاندارد تهویه ASHRAE 62.1 و توصیه‌های سازمان بهداشت جهانی، میزان تهویه در کلاس‌ها از مقدار کافی برخوردار نبوده است. لذا توصیه می‌شود با ارائه طرح‌های تهویه مکانیکی، به ویژه در فصول سرد سال، کیفیت هوای کلاس‌ها بهبود یابد.

واژگان کلیدی: کیفیت هوای داخلی، غلظت دی اکسید کربن، تهویه طبیعی، محیط آموزشی

استناد: رستمی، کژال؛ بهمنی‌پور، سارا؛ صیادی، حجت؛ سوری، شیوا. ارزیابی کیفیت هوای کلاس‌های آموزشی براساس شاخص دی اکسید کربن. مجله مهندسی بهداشت حرفه‌ای، زمستان ۱۴۰۳؛۱۱(۴): ۳۴۴-۳۳۴

مقدمه

دانش‌آموزان و دانشجویان ساعات زیادی از روز را داخل کلاس درس و محیط بسته می‌گذرانند [۱]. کیفیت هوای داخل ساختمان در بروز عوارض آلاینده‌ها، رضایت، تمرکز و پیشرفت تحصیلی دانشجویان موثر بوده و مدتی است که مورد توجه قرار گرفته است [۲]. از آن‌جا که به طور متوسط تراکم جمعیت در محیط‌های آموزشی، چهار برابر محیط‌های اداری است، لذا کیفیت هوای داخلی در مراکز آموزشی نسبت به ساختمان‌های اداری، بسیار پایین‌تر است [۱].

از عوامل موثر بر کیفیت هوای داخلی در محیط‌های آموزشی می‌توان به سیستم‌های تهویه، منابع آلاینده‌ها، فعالیت‌های انسانی، رطوبت و رشد کپک اشاره کرد [۲]. طراحی و نگهداری مناسب سیستم‌های گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع برای کنترل دما، رطوبت نسبی و تامین هوای تازه ضروری است. آلاینده‌ها می‌توانند از داخل ساختمان

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-05-20]
[DOI: 10.53208/JOHE.11.4.334]

(مانند مواد شیمیایی، کپک، گرد و غبار) یا از خارج (مانند دود وسایل نقلیه) وارد شوند. در برخی کشورهای پیشرفته بیش از نیمی از محیط‌های آموزشی سیستم‌های گرمایش و سرمایش مناسبی ندارند که منجر به کاهش کیفیت هوای داخلی مراکز آموزشی می‌شود [۳،۴]. رطوبت بالا می‌تواند منجر به رشد کپک و قارچ شود که برای سلامت دانشجویان و اساتید مضر است. کنترل رطوبت و تعمیر نشت‌ها برای جلوگیری از این مشکل ضروری است [۲،۴].

مواجهه با آلودگی‌های هوای داخل ساختمان می‌تواند بیماری‌هایی مانند آسم یا آلرژی را تشدید کند [۵] و باعث ابتلا به بیماری‌های قلبی و عروقی، بینی، چشم‌ها، سردرد و غیره شود [۶]. به علت اهمیت این موضوع سازمان‌های بین‌المللی توصیه‌ها و دستورالعمل‌هایی را به‌منظور حفاظت از سلامت عمومی در برابر اثرات نامطلوب آلاینده‌های هوا ارائه داده‌اند [۷،۸] و مطالعات متعددی به منظور ساخت سیستم‌ها، فیلترها و جاذب‌های مناسب برای نمونه‌برداری و حذف آلاینده‌های مختلف انجام شده است [۹-۱۱].

برای سنجش کیفیت هوای داخلی، معیارهایی چون دی‌اکسیدکربن (CO_2)، مونوکسیدکربن (CO)، ذرات معلق ریز ($PM_{2.5}$)، رطوبت نسبی و رادون استفاده می‌شود. بر اساس استاندارد EPA، سطح CO_2 نباید بیش از ۱۰۰۰ قسمت در میلیون باشد که نشانگر تهویه مناسب است. غلظت CO نیز نباید از ۳۵ قسمت در میلیون فراتر رود و برای $PM_{2.5}$، استاندارد EPA مقدار ۱۵ میکروگرم در متر مکعب به‌صورت سالانه و ۶۵ میکروگرم در متر مکعب برای ۲۴ ساعت در نظر گرفته است. رطوبت نسبی باید بین ۳۰ تا ۶۰ درصد نگه داشته شود و سطح رادون در مراکز آموزشی نباید از ۴ pCi/L فراتر رود [۲]. همچنین بر اساس استاندارد ASHRAE 62.1 غلظت CO_2 در هوای داخل ساختمان نباید ۶۵۰ قسمت در میلیون بیشتر از غلظت CO_2 محیط بیرون (۵۰۰-۳۸۰ قسمت در میلیون) باشد و نرخ تعویض هوای کلاس باید سه بار در ساعت باشد [۱۲] و به توصیه سازمان بهداشت جهانی، غلظت CO_2 در فضاهای بسته نباید از ۱۰۰۰ قسمت در میلیون بیشتر شود [۱۳] استاندارد ملی ایران نیز به شماره ۲۰۸۶ و تحت عنوان "بهداشت مدارس"، میزان رطوبت نسبی مناسب برای کلاس درس را ۳۰ تا ۷۰ درصد بیان کرده است و نیز انتخاب سیستم تهویه مصنوعی باید به نحوی باشد که در کلاس حداکثر شش لیتر در ساعت هوا جابه‌جا شود [۱۴].

در کلاس‌های آموزشی، تعداد افراد حاضر، میزان تنفس آن‌ها و عملکرد سیستم تهویه می‌تواند باعث افزایش سطح CO_2 شود. غلظت بالای CO_2 می‌تواند بر تمرکز، عملکرد فکری و حتی سلامت دانش‌آموزان و معلمان تاثیر منفی بگذارد [۱۵،۱۶]. محیط‌هایی با تهویه ناکافی، به خصوص در ماه‌های سرد سال که پنجره‌ها و درها غالباً بسته هستند، مستعد افزایش سریع غلظت CO_2 هستند [۱۷]. کیفیت تهویه در یک کلاس آموزشی می‌تواند با اندازه‌گیری غلظت CO_2، سنجش نرخ تعویض هوا ACH (دفعات تعویض هوای کل در هر ساعت)، بررسی سیستم‌های تهویه مکانیکی و بازخورد کاربران تعیین شود.

از آنجا که غلظت CO_2 می‌تواند به عنوان شاخصی ساده در تعیین میزان کیفیت هوای داخل ساختمان استفاده شود [۱۸-۲۰] لذا در این مطالعه کیفیت هوای کلاس‌های آموزشی در دانشگاه علوم پزشکی ایلام با استفاده از شاخص CO_2 ارزیابی شد.

روش کار

مطالعه حاضر از نوع توصیفی-تحلیلی است. از روش سرشماری برای نمونه‌گیری استفاده شد، که شامل تمام ۹ کلاس درس دانشکده بهداشت بود. این مطالعه در فصل پاییز سال ۱۴۰۲ انجام شده است. غلظت CO_2 و سایر پارامترها در هر کلاس با سه گروه از دانشجویان و در روزهای مختلف اندازه‌گیری شد که در مجموع ۲۷ بار کیفیت هوای کلاس‌ها مورد بررسی قرار گرفت. تمام کلاس‌ها از تهویه طبیعی استفاده می‌کردند. در ابتدا مساحت دهانه باز پنجره‌ها اندازه‌گیری و محاسبه شد. سپس سرعت جریان هوا در دهانه باز پنجره‌ها با استفاده از آنمومتر حرارتی مدل Kimo اندازه‌گیری و نرخ تعویض هوای کلاس با استفاده از فرمول زیر محاسبه شد.

$$ACH = \frac{Q\ (m^3/hr)}{V\ (m^3)}$$

در این فرمول:

ACH: نرخ تعویض هوا در ساعت

Q: حجم هوای ورودی در ساعت

V: حجم فضای کلاس

نرخ هوای ورودی به کلاس (Q) از حاصل ضرب مساحت باز پنجره (A) در سرعت جریان هوای ورودی (V) به‌دست آمد.

$$Q\ (m^3/hr) = V\ (m/hr) \times A\ (m^2)$$

غلظت CO_2 در کلاس درس با استفاده از دستگاه مخصوص سنجش CO_2، Aeroqual اندازه‌گیری شد. دستگاه با استفاده از منوی کالیبراسیون (Zero Calibration) قبل از هر اندازه‌گیری کالیبره شد. رنج اندازه

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-05-20]

[DOI: 10.53208/JOHE.11.4.334]

گیری دستگاه ۰ – ۵۰۰۰ قسمت در میلیون و دقت آن ±۵٪ است.

معمولا ۴۵ دقیقه بعد از شروع کلاس، دانشجویان برای استراحت از کلاس خارج شده و درب کلاس باز می‌گردد. به منظور بررسی روند تغییرات کیفیت هوا، غلظت CO_2 در ۱۵، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ دقیقه بعد از شروع کلاس اندازه‌گیری شد. همچنین پیش از شروع کلاس غلظت CO_2 در محیط آزاد اندازه‌گیری شد. سپس داده‌ها با استفاده از روش تحلیل معادلات برآورد تعمیم یافته (GEE) در مدل‌های طولی با نرم‌افزار Stat 18 تحلیل و با استفاده از آزمون‌های تی یک نمونه‌ای با مقادیر استاندارد مقایسه شد. به توصیه سازمان بهداشت جهانی و سازمان EPA غلظت CO_2 در فضاهای بسته نباید از ۱۰۰۰ قسمت در میلیون بیشتر شود [۲، ۱۳] همچنین بر اساس استاندارد ASHRAE 62.1 غلظت CO_2 در هوای داخل ساختمان نباید ۶۵۰ قسمت در میلیون بیشتر از غلظت CO_2 محیط بیرون (۵۰۰-۳۸۰ قسمت در میلیون) باشد [۱۲].

بر اساس دستورالعمل‌های طراحی فضاهای آموزشی در ایران، این موارد توصیه شده‌اند؛ حداکثر ۳۲ نفر دانش‌آموزان در کلاس، حدود ۳ متر مکعب حجم هوای لازم به ازای هر دانش‌آموز، حداقل ۳ متر ارتفاع سقف کلاس، حداکثر ۹ متر فاصله بین تخته و آخرین ردیف دانش‌آموزان، که این مشخصات به‌طور غیرمستقیم بر کیفیت هوای داخلی تاثیر می‌گذارند، اما استانداردهای دقیقی برای پارامترهایی مانند غلظت CO_2 در کلاس‌ها تعیین نشده است [۲۱].

نتایج

ساختمان آموزشی دانشکده بهداشت، دو طبقه و دارای نه کلاس درس است. اطلاعات کلاس‌های آموزشی در جدول ۱ بیان شده است. سرعت جریان اندازه‌گیری شده در دهانه باز پنجره‌ها از ۰/۲ تا ۱/۹۶ متر بر ثانیه و نرخ تعویض هوا از ۰/۰۱ تا ۱/۳۹ بار در ساعت متغیر بود که فاصله‌ی زیادی از حد استاندارد (۲ بار در ساعت) داشت.

غلظت CO_2 هوای داخل کلاس و هوای آزاد در جدول ۲ بیان شده است. غلظت فضای باز از ۳۰۶ تا ۳۹۰ قسمت در میلیون متغیر بود. نتایج نشان می‌دهد که در همه‌ی اندازه‌گیری‌ها به جز دو مورد (۶ و ۲۳)، بعد از ۱۵ دقیقه از شروع کلاس مقدار Co_2 کلاس از حد مجاز بالاتر رفته است و تا پایان کلاس روند افزایشی ادامه داشته است.

روند غلظت Co_2 در کلاس‌ها در طول زمان تدریس، همان‌گونه که در شکل ۱ نشان داده شده است، افزایشی می‌باشد. این روند نشان می‌دهد که بین زمان ۳۰ تا ۶۰ دقیقه، روند غلظت داخل کلاس تقریبا ثابت بوده است و مجدد تا پایان کلاس روند افزایشی ادامه داشته است.

جدول ۱: مشخصات کلاس‌های دانشکده بهداشت

اندازه‌گیری	نام کلاس	مساحت کلاس m^2	حجم کلاس m^3	تعداد دانشجو	مساحت باز پنجره m^2	سرعت جریان هوا در پنجره باز m/s	نرخ تعویض هوا در ساعت
۱				۱۹	۱/۳	۰/۰۴	۱/۰۳
۲	۱۰۵	۶۶/۳۶	۱۸۲	۱۸	۱/۰۲	۲/۳	۰/۹
۳				۲۴	۰/۰۸	۰/۸۸	۱/۳۹
۴				۲۰	۰/۰۶	۰/۷۵	۰/۸۹
۵	۱۰۶	۶۶/۳۶	۱۸۲	۱۴	۰/۰۱۶	۲/۵	۰/۸
۶				۱۳	۰/۷	۰/۰۸	۱/۱۱
۷				۲۵	۰/۰۲۴	۰/۲	۰/۰۹
۸	۱۰۷	۶۶/۳۶	۱۸۲	۲۱	۰/۰۱۲	۰/۳۵	۰/۰۸
۹				۲۳	۰/۰۲۲	۰/۱۵	۰/۰۷
۱۰				۲۰	۰/۰۳	۰/۰۹	۰/۰۹
۱۱	۱۱۱	۴۶/۷۴	۱۲۸	۲۲	۰/۲	۰/۰۵	۰/۳
۱۲				۲۱	۰/۰۳۶	۰/۰۸	۰/۰۸
۱۳				۱۹	۰/۰۲۴	۰/۵۵	۰/۱۸
۱۴	۲۰۱	۷۰/۵۵	۲۵۸	۲۰	۰/۰۹۶	۰/۰۳	۰/۰۴
۱۵				۲۲	۰/۰۷	۰/۰۵	۰/۰۴
۱۶	۲۰۴	۷۰/۵۵	۲۵۸	۲۴	۰/۰۳۶	۰/۲	۰/۱
۱۷				۲۲	۰/۰۳۶	۰/۳	۰/۱۵

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-05-20]

[DOI: 10.53208/JOHE.11.4.334]

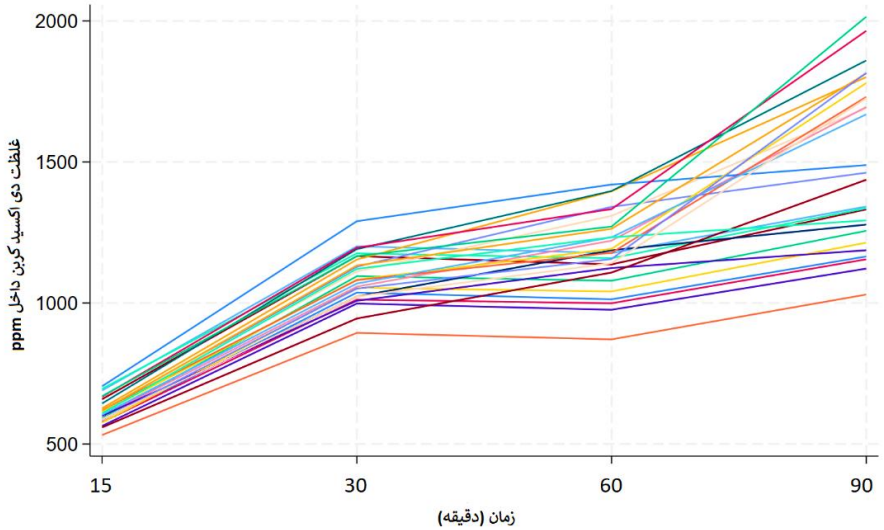
۱۸				۲۱	۰/۰۱	۰/۰۹	۰/۰۱
۱۹				۱۸	۰/۰۴۸	۰/۰۷	۰/۰۳
۲۰	۲۰۵	۷۰/۵۵	۲۵۸	۱۸	۰/۰۸	۰/۸	۰/۸۵
۲۱				۱۸	۰/۰۴۵	۰/۰۴	۰/۰۲
۲۲				۱۷	۰/۰۳۶	۰/۲۲	۰/۱۱
۲۳	۲۰۶	۷۰/۵۵	۲۵۸	۱۴	۰/۰۶	۰/۴۳	۰/۳۳
۲۴				۲۲	۰/۰۷۲	۰/۷۹	۰/۷۹
۲۵				۲۳	۰/۰۹۶	۰/۰۴	۰/۰۵
۲۶	۲۰۷	۷۰/۵۵	۲۵۸	۲۰	۰/۰۱۲	۰/۱۶	۰/۰۳
۲۷				۱۹	۰/۰۳	۰/۱۵	۰/۰۶

جدول ۲: غلظت CO_2 هم‌زمان در بیرون و داخل از کلاس

اندازه‌گیری	نام کلاس	غلظت Co_2 بیرون (قسمت در میلیون)	غلظت Co_2 داخل کلاس (قسمت در میلیون)				غلظت Co_2 استاندارد ASHRAE 62.1 (قسمت در میلیون)
			دقیقه ۱۵	دقیقه ۳۰	دقیقه ۶۰	دقیقه ۹۰	
۱		۳۲۰	۵۷۶	۱۰۳۷	۱۰۱۳	۱۱۶۲	۹۷۰
۲	۱۰۵	۳۳۰	۵۷۸	۱۰۱۲	۹۹۹	۱۱۵۵	۹۸۰
۳		۳۲۰	۵۹۲	۱۰۹۵	۱۰۷۹	۱۲۵۶	۹۷۰
۴		۳۱۵	۵۷۶	۱۰۵۴	۱۰۴۱	۱۲۱۴	۹۶۵
۵	۱۰۶	۳۱۵	۵۶۴	۹۹۸	۹۷۶	۱۱۲۲	۹۶۵
۶		۳۰۶	۵۳۲	۸۹۴	۸۷۱	۱۰۳۰	۹۵۶
۷		۳۹۰	۶۹۰	۱۲۰۱	۱۱۷۷	۱۳۴۲	۱۰۴۰
۸	۱۰۷	۳۹۰	۶۵۹	۱۱۶۶	۱۱۳۷	۱۳۳۲	۱۰۴۰
۹		۳۷۸	۶۹۶	۱۱۷۶	۱۱۵۹	۱۳۳۶	۱۰۲۸
۱۰		۳۳۷	۶۲۷	۱۱۵۴	۱۳۹۶	۱۸۰۱	۹۸۷
۱۱	۱۱۱	۳۳۷	۶۱۷	۱۱۲۹	۱۳۴۱	۱۴۶۲	۹۸۷
۱۲		۳۴۷	۶۲۱	۱۱۱۲	۱۳۰۹	۱۶۹۱	۹۹۷
۱۳		۳۳۸	۵۸۸	۱۰۲۳	۱۱۸۷	۱۲۷۸	۹۸۸
۱۴	۲۰۱	۳۳۸	۵۹۸	۱۰۵۸	۱۲۲۱	۱۶۹۵	۹۸۸
۱۵		۳۴۸	۶۴۴	۱۱۹۱	۱۳۹۷	۱۸۶۰	۹۹۸
۱۶		۳۸۵	۷۰۵	۱۲۹۰	۱۴۲۰	۱۴۸۹	۱۰۳۵
۱۷	۲۰۴	۳۷۳	۶۶۸	۱۱۹۶	۱۳۳۳	۱۹۶۵	۱۰۲۳
۱۸		۳۸۵	۶۷۰	۱۱۶۶	۱۲۷۱	۲۰۱۵	۱۰۳۵
۱۹		۳۴۶	۶۱۲	۱۰۸۳	۱۱۹۲	۱۷۸۰	۹۹۶
۲۰	۲۰۵	۳۵۷	۶۰۰	۱۰۰۸	۱۱۲۴	۱۱۸۷	۱۰۰۷
۲۱		۳۵۷	۶۲۱	۱۰۸۱	۱۱۷۸	۱۷۳۱	۱۰۰۷
۲۲		۳۴۱	۶۰۴	۱۰۶۹	۱۲۳۳	۱۶۶۹	۹۹۱
۲۳	۲۰۶	۳۳۱	۵۵۹	۹۴۵	۱۱۰۸	۱۴۳۷	۹۸۱
۲۴		۳۳۱	۶۰۹	۱۱۲۱	۱۲۳۳	۱۲۹۳	۹۸۱
۲۵		۳۳۸	۶۱۹	۱۱۳۳	۱۲۶۳	۱۸۱۴	۹۸۸
۲۶	۲۰۷	۳۲۸	۵۸۷	۱۰۵۱	۱۱۵۶	۱۸۱۶	۹۷۸
۲۷		۳۳۸	۵۸۸	۱۰۲۳	۱۱۴۱	۱۷۲۶	۹۸۸

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-05-20]

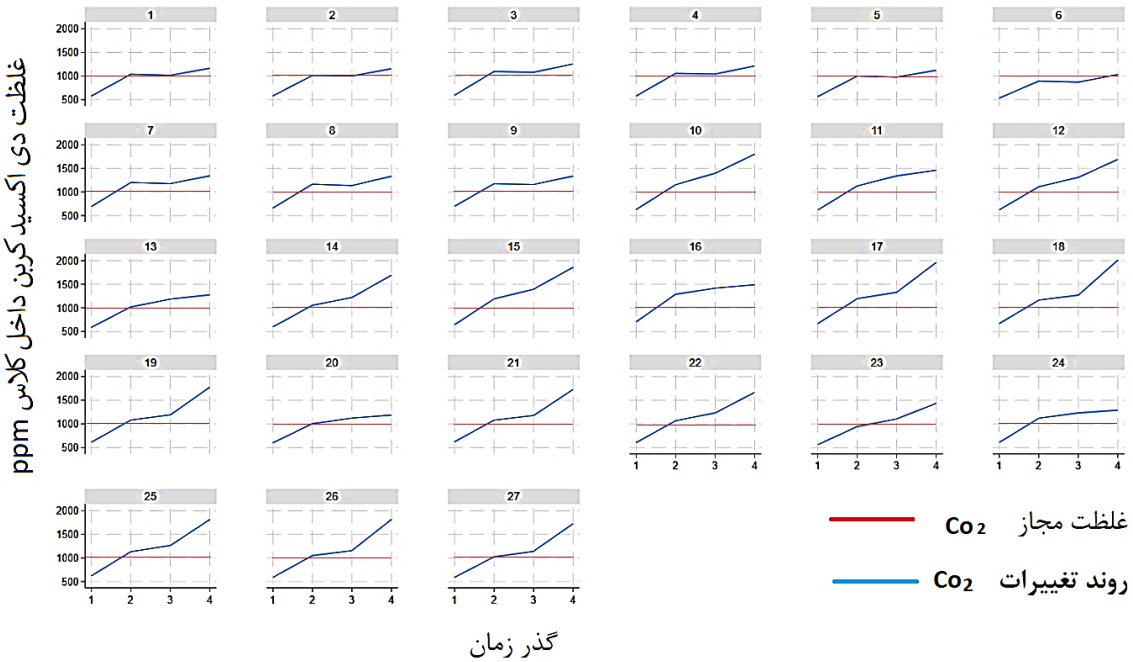
[DOI: 10.53208/JOHE.11.4.334]



شکل ۱: روند تغییرات غلظت Co_2 در طول زمان تدریس

روند تغییرات غلظت Co_2 در طول زمان تدریس به تفکیک کلاس‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است. در این شکل هر سه نمودار مربوط به یک کلاس درس است که در زمان‌ها و شرایط مختلف اندازه‌گیری شده است. خط قرمز رنگ روی نمودارها مقدار استاندارد CO_2 (۱۰۰۰ قسمت در میلیون) بر مبنای استاندارد سازمان بهداشت جهانی را نشان می‌دهد.

برای بررسی رابطه بین عوامل موثر بر افزایش غلظت CO_2 در کلاس‌های آموزشی، از جمله تعداد افراد حاضر در کلاس، بسته بودن درب، تعداد تعویض هوا در ساعت و سرعت جریان هوای بیرون، از مدل رگرسیون معادلات برآورد تعمیم یافته (GEE) استفاده شد (جدول ۳). نتایج نشان داد تعداد دانشجویان با غلظت Co_2 در هوای کلاس رابطه مستقیم دارد و بیشتر شدن تعداد نفرات به معنای افزایش منابع تنفسی و در نتیجه افزایش Co_2 است. بسته بودن درب کلاس به دلیل تهویه ناکافی در کلاس، منجر به افزایش غلظت Co_2 می‌شود. تعداد تعویض هوای کلاس و سرعت جریان هوای بیرون رابطه عکس با مقدار Co_2 دارند.



شکل ۲: مقایسه روند تغییرات غلظت Co2 با حد استاندارد WHO (۱۰۰۰ قسمت در میلیون) در طول زمان تدریس به تفکیک کلاس‌ها

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-05-20]

[DOI: 10.53208/JOHE.11.4.334]

جدول ۳: مدل طولی عوامل موثر بر افزایش غلظت CO_2 در کلاس

	ضرایب استاندارد نشده		ضرایب استاندارد شده	t	P-Value.
	B	Std. Error	Beta		
مقدار ثابت	۹۷۸	۴۲۵		۲/۳	۰/۰۳
تعداد دانشجو	۱۶/۸	۱۶/۶	۰/۱۷۷	۱	۰/۰۲
تعداد تعویض هوا در ساعت	-۴۷۰	۲۳۷	-۰/۳۴۳	-۱/۹	۰/۰۴
سرعت جریان هوای بیرون	-۱۳/۲	۱۱	-۰/۲	-۱/۲	۰/۰۵
درب کلاس بسته	۲۷۰	۱۰۲/۸	۰/۴۴۶	۲/۶	۰/۰۱

بحث

از آن‌جایی که تراکم جمعیت در مکان‌های آموزشی بیشتر از اماکن مسکونی و اداری است، اهمیت کیفیت هوا در این مکان‌ها چندین برابر می‌شود. مطالعات نشان داده‌اند که علاوه بر مشکلات سلامتی و تمرکز، عملکرد دانشجویان و اساتید نیز تحت تاثیر کیفیت ضعیف هوا کاهش می‌یابد [۲،۲۲]. همچنین، مطالعات ارتباط آماری معناداری بین عدم تمرکز افراد و مواجهه با سطوح بالای Co_2 نشان داده‌اند [۲۳]. در مطالعه حاضر غلظت Co_2 در هوای کلاس‌های آموزشی به عنوان یک شاخص کیفیت هوا مورد بررسی قرار گرفت. غلظت Co_2 اندازه‌گیری شده در طول زمان تدریس روند افزایشی را نشان داد. Ramalho و همکاران، میزان غلظت Co_2 در ۴۸۹ کلاس در فرانسه را بررسی کردند که نتایج نشان داد در ۳۳ درصد کلاس‌ها غلظت Co_2 بالاتر از ۱۷۰۰ قسمت در میلیون بود [۲۴].

تمام کلاس‌های مورد مطالعه از سیستم تهویه طبیعی بهره‌مند بودند و بسیاری از مطالعات نشان می‌دهند که سطح Co_2 داخلی در مراکز آموزشی که به سیستم‌های تهویه طبیعی مجهز هستند، بالاتر است. در حالی که سیستم‌های تهویه مکانیکی تاثیر مثبتی بر کاهش سطوح آلاینده‌ها در محیط‌های داخلی داشته‌اند [۱۵،۲۵،۲۶].

در یک مطالعه مرور سیستماتیک از تحقیقات انجام‌شده در ۵۰ سال گذشته در ۴۰ کشور، جنبه‌های مختلف کیفیت هوای داخل مدارس تحلیل شد. در این بررسی جامع، تاثیر کیفیت هوای داخل کلاس‌ها بر سلامت، راحتی حرارتی و عملکرد شناختی دانش‌آموزان تایید شد و راهکارهایی برای بهبود کیفیت هوای محیط‌های آموزشی ارائه شد [۱۵].

در مطالعه‌ای که در دانشگاه تیانجین در کشور چین در چهار کلاس درس انجام شد، نشان داد که باز کردن پنجره‌های بیرونی تاثیر زیادی در کاهش غلظت Co_2 در هوای کلاس دارد ولی باز بودن پنجره‌های داخلی تاثیری چندانی بر بهبود کیفیت هوای کلاس ندارد [۲۷].

نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد؛ کیفیت هوای کلاس‌ها ناکافی است و غلظت Co_2 در طول زمان کلاس افزایش یافته است. به‌طوری‌که حتی در زمان استراحت و باز شدن درب‌های کلاس‌ها، جریان هوای ایجاد شده به دلیل زمان کوتاه استراحت (۱۰ دقیقه) برای کاهش سطح Co_2 کافی نبوده است. چندین مطالعه اخیر نیز، سطوح بالای Co_2 در مدارس را در نتیجه تعداد زیاد دانش‌آموزان و دانشجویان و نیز تهویه ناکافی در کلاس‌ها گزارش کرده است [۲۸-۳۰].

شکل ۱روند تغییرات غلظت CO_2 را نشان می‌دهد. در زمان بین ۳۰ تا ۶۰ دقیقه، غلظت Co_2 به دلیل زمان استراحت و خروج دانشجویان از کلاس و باز ماندن درب کلاس، روند ثابتی داشته و مجدد افزایش یافته است. لذا توصیه می‌شود در زمان استراحت و یا در طول زمان کلاس تا حد امکان درب کلاس‌ها باز یا نیمه باز باشند تا به تهویه طبیعی کمک شود. در تایید این موضوع هراکلئوس وهمکاران در مطالعه‌ای الگوهای باز کردن پنجره جهت تهویه کلاس‌ها و امکان بهبود کیفیت هوا را با حداقل تلفات گرما در فصل سرد ارائه کرده‌اند [۳۱]. نتایج مطالعه تلسزوسکی و همکاران نیز نشان داد که میزان CO_2 به‌صورت خطی در طول کلاس افزایش می‌یابد و میزان این افزایش به تعداد افراد و حجم کلاس بستگی دارد و تهویه طبیعی از طریق باز کردن پنجره‌ها پیش از کلاس، غلظت CO_2 را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد [۳۲].

همان‌گونه که از مقایسه روند تغییرات غلظت Co_2 با حد استاندارد سازمان بهداشت جهانی (۱۰۰۰ قسمت در میلیون) در طول زمان تدریس در تمام کلاس‌ها مشخص است (شکل ۲)، از اواسط زمان کلاس، غلظت CO_2 به بالای حد مجاز افزایش یافته است. نتایج این پژوهش نشان داد که افزایش غلظت CO_2 در کلاس‌ها مشابه یافته‌های مطالعات دیگر از جمله مطالعه دوریزاس در آتن و پریرا در مدارس پرتغال است. در تمامی این مطالعات، در کلاس‌هایی که تهویه مناسبی نداشتند، غلظت CO_2 به‌طور قابل توجهی از حد

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-05-20]

[DOI: 10.53208/JOHE.11.4.334]

استاندارد فراتر رفت [۳۳،۳۴]. ارزیابی کیفیت هوای کلاس‌ها در اقلیم‌های مختلف؛ نتایج مشابهی با مقاله حاضر در خصوص اهمیت تهویه به‌دست‌آوردند [۳۵،۳۶].

مدل عوامل موثر بر افزایش غلظت CO_2 در کلاس (جدول ۳) نشان می‌دهد که تعداد دانشجو در کلاس، تعداد تعویض هوا در ساعت، سرعت جریان هوای بیرون و بسته بودن درب کلاس در میزان غلظت CO_2 در طول زمان تدریس موثر است. تلسزوسکی و همکاران یک مدل خطی ساده برای پیش‌بینی غلظت CO_2 در کلاس درس بر اساس زمان، تعداد افراد و حجم کلاس ارائه کردند که حداکثر خطای آن زیر ۱۰ درصد بود. مدل پیشنهادی برای طراحی سیستم‌های تهویه در کلاس‌ها کاربرد دارد [۳۲].

نتیجه گیری

مطالعه حاضر نشان داد؛ بر اساس استاندارد تهویه ASHRAE و توصیه‌های سازمان بهداشت جهانی، میزان تهویه در کلاس‌ها از مقدار کافی برخوردار نیستند. این مسئله در فصول سرد سال که پنجره‌ها کاملا بسته هستند، می‌تواند مشکلات بیشتری ایجاد نماید. لذا توصیه می‌شود با ارائه طرح‌های تهویه مکانیکی، تعداد تعویض هوای کلاس در ساعت نسبت به مقادیر توصیه شده در کلاس‌های آموزشی (حداقل ۲ بار در ساعت) تامین شود. در حال حاضر، استاندارد ملی مشخصی در ایران که به‌طور مستقیم به حد مجاز غلظت CO_2 در کلاس‌های درس اشاره کند، منتشر نشده است. توصیه می‌شود که برای حفظ کیفیت هوای کلاس‌های درس و سلامت دانش‌آموزان، غلظت CO_2 در این فضاها کمتر از ۱۰۰۰ قسمت در میلیون نگه داشته شود، که مطابق با توصیه‌های استانداردهای بین‌المللی است.

تشکر و قدردانی

پژوهش حاضر برگرفته از طرح تحقیقاتی با شماره ثبت ۱۷۶۱-۱۴۰۱ و کد اخلاق IR.MEDILAM.REC.1401.228 مصوب شورای پژوهشی کمیته پژوهشی دانشجویان دانشگاه علوم پزشکی ایلام می‌باشد. بدین وسیله از کمیته پژوهشی دانشجویان و معاونت تحقیقات و فن‌آوری دانشگاه علوم پزشکی ایلام به جهت حمایت مالی از این مطالعه، تشکر و قدردانی به عمل می‌آید. همچنین، از کلیه اساتید و دانشجویانی که در انجام تحقیق حاضر مساعدت نمودند، سپاسگزاری می‌گردد.

تضاد منافع

نویسندگان این مقاله اظهار می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافعی در ارتباط با این پژوهش وجود ندارد.

ملاحظات اخلاقی

مقاله حاضر نتیجه طرح کمیته تحقیقات دانشجویی دانشگاه علوم پزشکی ایلام است و با رعایت کلیه اصول اخلاق در پژوهش انجام شده است.

سهم نویسندگان

نویسندگان سهم یکسانی در نگارش این مقاله داشته اند. تمامی نویسندگان نسخه نهایی مقاله را مطالعه و تأیید کرده و مسئولیت پاسخگویی در تمام جنبه های پژوهش را پذیرفته‌اند.

حمایت مالی

پژوهش حاضر با حمایت مالی کمیته تحقیقات دانشجویی معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه علوم پزشکی ایلام انجام گرفته است.

REFERENCES

1. Kinshella MR, Van Dyke MV, Douglas KE, Martyny JW. Perceptions of indoor air quality associated with ventilation system types in elementary schools. *Appl Occup Environ Hyg*. 2001;**16**(10):952-60. PMID: 11599544 DOI: 10.1080/104732201300367209
2. United States Environmental Protection Agency. Reference guide for indoor air quality in schools [Internet]. Washington: EPA; 2023. Link
3. Alexander D, Lewis L. Condition of America's public school facilities: 2012-13. National Center for Education Statistics; NCES 2014-022. 2014. Link
4. Golbabaei F, SheikhMozafari MJ, Biganeh J, Shekaftik SO. Teachers' health status about air quality (temperature, relative humidity, and ventilation) in educational centers: a systematic review. *J Health Saf Work*. 2023;**13**(3):645-662. Link
5. Johnson DL, Lynch RA, Floyd EL, Wang J, Bartels JN. Indoor air quality in classrooms: environmental measures and effective ventilation rate modeling in urban elementary schools. *Build Environ*. 2018;**136**:185-97. DOI:10.1016/j.buildenv.2018.03.040
6. Kumar P, Singh AB, Arora T, Singh S, Singh R. Critical review on emerging health effects associated with the indoor air quality and its sustainable management. *Sci Total Environ*. 2023;**872**:162163. PMID: 36781134 DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.162163
7. Vaughn M. ASHRAE research report: 2019-2020. *ASHRAE J*. 2020;**62**(10):73-89. Link
8. American Conference of Governmental Industrial Hygienists A. Industrial ventilation: a manual of recommended practice for design (30th ed). American Conference of Governmental Industrial Hygienists; 2019. Link
9. Soury S, Bahrami A, Alizadeh S, Ghorbani-Shahna F, Nematollahi D. Development of a needle trap device packed with HKUST-1 sorbent for sampling and analysis of BTEX in air. *Chem Chem Technol*. 2022;**16**(2)314-327. DOI:10.23939/chcht16.02.314
10. Paridokht F, Soury S, Karimi Zeverdegani S. The simulation of the emission of iron fumes caused by shielded metal arc welding using a computational fluid dynamics method. *Toxicol Ind Health*. 2023;39(1):36-48. PMID: 36464906 DOI: 10.1177/07482337221144143
11. Soury S, Bahrami A, Alizadeh S, Shahna FG, Nematollahi D. Synthesis and characterization of Zn3 (BTC) 2 nanoporous sorbent for sampling from benzo [a] pyren using needle trap in the air. *J Health Saf Work*. 2020;**10**(2):173-88. Link
12. Engineers A-C. ASHRAE standard ventilation for

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-05-20]

[DOI: 10.53208/JOHE.11.4.334]

acceptable indoor air quality. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc; 1989. Link
13. Organization WH. Air quality guidelines for Europe (2nd ed). World Health Organization. Regional Office for Europe; 2000. Link
14. Institute of Standards and Industrial Research. School Hygiene. Islamic Republic of Iran 2002.
15. Sadrizadeh S, Yao R, Yuan F, Awbi H, Bahnfleth W, Bi Y, et al. Indoor air quality and health in schools: A critical review for developing the roadmap for the future school environment. *J Build Eng*. 2022;**57**:104908. DOI:10.1016/j.jobe.2022.104908
16. Gil-Baez M, Lizana J, Villanueva JB, Molina-Huelva M, Serrano-Jimenez A, Chacartegui R. Natural ventilation in classrooms for healthy schools in the COVID era in Mediterranean climate. *Build Environ*. 2021;**206**:108345. DOI:10.1016/j.buildenv.2021.108345
17. Yuan F, Yao R, Yu W, Sadrizadeh S, Awbi H, Kumar P. Dynamic characteristics of particulate matter resuspension due to human activities in indoor environments: a comprehensive review. *J Build Eng*. 2023;**79**:107914. DOI:10.1016/j.jobe.2023.107914
18. Marques G, Ferreira CR, Pitarma R. Indoor air quality assessment using a CO2 monitoring system based on internet of things. *J Med Syst*. 2019;**43**(3):67. PMID: 30729368 DOI: 10.1007/s10916-019-1184-x
19. Schibuola L, Tambani C. Indoor environmental quality classification of school environments by monitoring PM and CO2 concentration levels. *Atmos Pollut Res*. 2020;**11**(2):332-42. DOI:10.1016/j.apr.2019.11.006
20. Dimitroulopoulou S, Dudzińska MR, Gunnarsen L, Hägerhed L, Maula H, Singh R, et al. Indoor air quality guidelines from across the world: An appraisal considering energy saving, health, productivity, and comfort. *Environ Int*. 2023;**178**:108127. PMID: 37544267 DOI: 10.1016/j.envint.2023.108127
21. Organization for Development, Renovation, and Equipping Schools of Iran. Architectural design regulations for educational buildings (primary and secondary schools) [Internet]. Tehran: Planning and Budget Organization of Iran; Report No.: 697. A; 2016. Link
22. Madureira J, Paciência I, Rufo J, Ramos E, Barros H, Teixeira JP, et al. Indoor air quality in schools and its relationship with children's respiratory symptoms. *Atmos Environ*. 2015;**118**:145-56. DOI:10.1016/j.atmosenv.2015.07.028
23. Ferreira AM, Cardoso M. Indoor air quality and health in schools. *J Bras Pneumol*. 2014;**40**(03):259-68. PMID: 25029649 DOI: 10.1590/s1806-37132014000300009
24. Ramalho O, Mandin C, Ribéron J, Wyart G. Air stuffiness and air exchange rate in French schools and day-care centres. *Int J Vent*. 2013;**12**(2):175-80. DOI:10.1080/14733315.2013.11684013
25. Jacobson TA, Kler JS, Hernke MT, Braun RK, Meyer KC, Funk WE. Direct human health risks of increased atmospheric carbon dioxide. *Nat Sustain*. 2019;**2**:691-701. DOI:10.1038/s41893-019-0323-1
26. Yuan Y, Luo Z, Liu J, Wang Y, Lin Y. Health and economic benefits of building ventilation interventions for reducing indoor $PM_{2.5}$ exposure from both indoor and outdoor origins in urban Beijing, China. *Sci Total Environ*. 2018;**626**:546-54. PMID: 29353793 DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.01.119
27. Yu Y, Wang B, You S, Ye T, Zheng W, Wei S, et al. The effects of manual airing strategies and architectural factors on the indoor air quality in college classrooms: a case study. *Air Qual Atmos Health*. 2022;**15**:1-13. DOI: 10.1007/s11869-021-01074-y
28. Branco PT, Sousa SI, Dudzińska MR, Ruzgar DG, Mutlu M, Panaras G, et al. A review of relevant parameters for assessing indoor air quality in educational facilities. *Environ Res*. 2024;**261**:119713. PMID: 39094896 DOI: 10.1016/j.envres.2024.119713
29. Zhang Z-Y, Yin W, Wang T-W, O'Donovan A. Effect of cross-ventilation channel in classrooms with interior corridor estimated by computational fluid dynamics. *Indoor Built Environ*. 2022;**31**(4):1047-65. DOI:10.1177/1420326X211054341
30. Zhang J, Pang L, Cao X, Wanyan X, Wang X, Liang J, et al. The effects of elevated carbon dioxide concentration and mental workload on task performance in an enclosed environmental chamber. *Build Environ*. 2020;**178**:106938. DOI:10.1016/j.buildenv.2020.106938
31. Heracleous C, Michael A. Experimental assessment of the impact of natural ventilation on indoor air quality and thermal comfort conditions of educational buildings in the Eastern Mediterranean region during the heating period. *J Build Eng*. 2019;**26**:100917. DOI:10.1016/j.jobe.2019.100917
32. Teleszewski T, Gładyszewska-Fiedoruk K. Changes of carbon dioxide concentrations in classrooms: simplified model and experimental verification. *Pol J Environ Stud*. 2018;**27**(5):2397-403. DOI:10.15244/pjoes/77074
33. Dorizas PV, Assimakopoulos M-N, Helmis C, Santamouris M. An integrated evaluation study of the ventilation rate, the exposure and the indoor air quality in naturally ventilated classrooms in the Mediterranean region during spring. *Sci Total Environ*. 2015;**502**:557-70. PMID: 25300020 DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.09.060
34. Pereira LD, Raimondo D, Corgnati SP, da Silva MG. Assessment of indoor air quality and thermal comfort in Portuguese secondary classrooms: methodology and results. *Build Environ*. 2014;**81**:69-80. DOI:10.1016/j.buildenv.2014.06.008
35. Krawczyk D, Gładyszewska-Fiedoruk K, Rodero A. The analysis of microclimate parameters in the classrooms located in different climate zones. *Appl Therm Eng*. 2017;**113**:1088-96. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2016.11.089
36. Krawczyk D, Rodero A, Gładyszewska-Fiedoruk K, Gajewski A. CO2 concentration in naturally ventilated classrooms located in different climates—Measurements and simulations. *Energy Build*. 2016;**129**:491-8. DOI:10.1016/j.enbuild.2016.08.003

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-05-20]

[DOI: 10.53208/JOHE.11.4.334]