



## ارائه رابطه کاربردی به منظور برآورد میزان آلاینده‌ها در هوای داخل ساختمان

دانیال حکیمی راد<sup>1</sup>، مهدی معرفت<sup>2\*</sup>، بهروز محمد کاری<sup>3</sup>

- 1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران  
 2- استاده، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران  
 3- استادیار، مهندسی عمران، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران  
 \* صندوق پستی 14115-111، maerefat@modares.ac.ir

### چکیده

برآورد میزان آلاینده‌ها در یک فضای مسکونی برای اطمینان از کیفیت هوا بسیار حائز اهمیت است. در تحقیق حاضر، یک فضای مسکونی متداول به منظور بررسی رفتار آلاینده‌ها به روش عددی شبیه‌سازی شده است. با استفاده از نتایج عددی حاصل و نتایج تجربی مراجع دیگر، رابطه‌ای تحلیلی برای برآورد میزان غلظت گاز CO<sub>2</sub> برحسب عواملی چون گاز CO<sub>2</sub> تولید شده توسط تنفس ساکنین و یا وسایل احتراقی، حجم فضای مسکونی و نرخ تهویه پیشنهاد شده است. نتایج رابطه تحلیلی انطباق کاملی با نتایج تجربی و عددی دارد و می‌توان از آن برای برآورد کیفیت هوای داخل ساختمان استفاده نمود. رابطه پیشنهادی در تمام فضاهای مشابه قابل استفاده است.

### اطلاعات مقاله

یادداشت پژوهشی  
 دریافت: 09 آذر 1395  
 پذیرش: 22 دی 1395  
 ارائه در سایت: 13 بهمن 1395  
 کلید واژگان:  
 کیفیت هوای داخل  
 غلظت دی‌اکسید کربن  
 نرخ تهویه  
 آلاینده

## Proposing of a practical relation to estimate amount indoor air pollutants

Danial HakimiRad<sup>1</sup>, Mehdi Maerefat<sup>1\*</sup>, Behrouz Mohammad Kari<sup>2</sup>

- 1- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran  
 2- Energy, Acoustic & Light Department of Road, Housing & Urban Development Research Center (BHRC), Tehran, Iran  
 \* P.O.B. 14115-111, Tehran, Iran, maerefat@modares.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Research Note  
 Received 29 November 2016  
 Accepted 11 January 2017  
 Available Online 01 February 2017

Keywords:  
 Indoor air quality IAQ  
 CO<sub>2</sub> concentration  
 Ventilation rate  
 Pollutant

### ABSTRACT

Estimating indoor air pollutants to ensure the air quality is very important. In this study, a conventional residential space is numerically simulated in order to investigate the behavior of pollutants. Using the numerical results and the experimental results of other references, the analytical relation to estimate the concentration of CO<sub>2</sub> in term of factors such as CO<sub>2</sub> produced by breathing residents or combustion equipment, the volume of space and ventilation rate are proposed. The results of the analytical relation are full compliance with experimental and numerical results and it can be used to estimate indoor air quality. Proposed relation can be used in all similar cases.

### 1- مقدمه

مطالعه‌ی میدانی، نرخ تعویض هوای بهینه از نظر مصرف انرژی و کیفیت هوا را در مطب پزشکان کشور لهستان محاسبه کردند. ماک و ژو [4] روش‌های مختلف تهویه طبیعی برای تأمین کیفیت هوا در زمان خواب ساکنین در ساختمانی در هنگ‌کنگ را بررسی کردند و نتیجه گرفتند چند دقیقه تهویه طبیعی با پنجره باز، کیفیت هوای لازم برای خواب شبانه را فراهم می‌کند. پانتازاراس و همکاران [5] با یک مدل ریاضی و استفاده از نرم‌افزار انرژی پلاس، مدلی برای پیش‌بینی غلظت CO<sub>2</sub> و مصرف انرژی در مکان‌های خاص مانند کتابخانه، اداره و غیره ارائه دادند. محققین پژوهش حاضر در کار قبلی خود [6]، به بررسی و تخمین کیفیت هوای داخل در حالت استفاده از پنجره‌های هوابند در فصول معتدل و بدون کارکرد وسایل احتراقی پرداختند. طبق استانداردهای تهویه مطبوع، کیفیت هوای داخل براساس غلظت گاز CO<sub>2</sub> (دی‌اکسیدکربن) سنجیده می‌شود [7]. استانداردهای مختلف، محدوده

امروزه به دلیل اهمیت صرفه‌جویی در مصرف انرژی، ساختمان‌ها دارای درزبندی مناسب‌تری نسبت به گذشته هستند که باعث کاهش نفوذ هوا می‌شود. این عامل و همچنین استفاده از وسایل احتراقی مانند پکیج، بخاری گازی و اجاق‌گاز در ساختمان، باعث کاهش کیفیت هوا می‌گردد؛ که در صورت نبودن راهکاری برای تأمین هوای تازه، تهدیدی جدی برای سلامتی ساکنین خواهد بود.

نوروزی و همکاران [1] با در نظر گرفتن نیروی شناوری حاصل از وسایل احتراقی (بخاری)، راهکارهایی برای کاهش غلظت گازهای حاصل از احتراق دادند که شامل جانمایی دریچه خروجی هوا می‌شود. یو و همکاران [2] با استفاده از سنسور CO<sub>2</sub>، تعداد تعویض هوای مناسب برای مکان‌های مختلف مانند کتابخانه، خوابگاه و... را تعیین کردند. فیدوروک و همکاران [3] با

Please cite this article using:

D. HakimiRad, M. Maerefat, B. Mohammad Kari, Proposing of a practical relation to estimate amount indoor air pollutants, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 2, pp. 446-450, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

جدول 1 ابعاد و محل قرارگیری جزئیات فضای نمونه

Table 1 Dimensions and location details Model

ابعاد (m)			محل قرارگیری (m)			جزئیات مدل
x	y	z	x	y	z	
3	3	4	0	0	0	اتاق
0.8	2	-	1.1	0	4	در
1	0.8	-	1	1.5	0	پنجره
0.5	0.05	-	1.25	0.1	4	دریچه خروجی هوا
1	0.05	-	1	1.5	0	مجرای ورودی هوا
1.75	0.2	0.5	1.1	0.4	1.75	بدن شخص
0.02	-	0.04	2.63	0.58	1.98	دهان شخص
0.2	0.6	0.6	0.2	0	1.5	بخاری

سایر دیوارها، سقف و کف آدیاباتیکی می‌باشند. در و پنجره نیز ضریب هدایت حرارتی  $0.78 \text{ W/mK}$  دارند. تهویه اتاق از قسمت پایینی پنجره انجام می‌گیرد، که شرط مرزی ورودی سرعت دارد و مقدار سرعت براساس نرخ تهویه اتاق تعیین می‌شود. دما و غلظت  $\text{CO}_2$  هوای ورودی مشابه هوای بیرون است. دریچه خروجی به صورت جریان خروجی، پایین در تعیین شده است.

با کارکرد بخاری (با دودکش)، اکسیژن هوای داخل در اثر احتراق به مرور کاهش یافته و بنابراین درصد حجمی سایر گازهای موجود در هوا و حاصل از احتراق از جمله  $\text{CO}_2$  افزایش می‌یابد که با مدل سازی صورت گرفته طبق مرجع [1] این وسیله به عنوان منبع تولید  $\text{CO}_2$  شبیه سازی می‌شود. بالا و پایین بخاری به ترتیب برای خروج و ورود هوا به بخاری شرط مرزی سرعت قرار گرفته است. دما و غلظت  $\text{CO}_2$  خروجی از بخاری  $50^\circ\text{C}$  و  $2000 \text{ ppm}$  است [1]. نرخ هوای جریان یافته توسط بخاری در بازه  $0.02$  تا  $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$  طوری است که با توجه به نرخ تهویه، دمای اتاق در محدوده آسایش حرارتی باشد. تولید حرارت بدن  $105 \text{ W}$ ، و براساس مرجع [10] نرخ تنفس انسان  $8 \text{ lit/min}$  و نرخ تولید  $\text{CO}_2$  توسط تنفس  $0.23 \text{ lit/min}$  است.

برای ارزیابی کیفیت هوای داخل، معادلات بقای جرم، مومنتم، انرژی و گونه‌ها حل شده‌اند. همچنین به منظور شبیه سازی جریان آشفته، از مدل توربولانسی صفر معادله‌ای داخلی<sup>2</sup> استفاده شده است. جهت مدل سازی مسئله از نرم افزار ایرپک<sup>3</sup> استفاده شده است. معادلات جریان و دما به دلیل ماهیت پایداریشان در مسئله به صورت دائم و معادله گونه به صورت غیردائم حل شده‌اند. به منظور کوپلینگ معادلات مومنتم و فشار، ایرپک از مدل سیمپل<sup>4</sup> استفاده می‌کند. همچنین برای جداسازی متغیرها از روش بالادست مرتبه اول استفاده شده است [6]. مقادیر باقی مانده برای همگرایی معادلات،  $10^{-3}$  برای مومنتم و پیوستگی و  $10^{-6}$  برای انرژی و گونه در نظر گرفته شد.

برای حل عددی، از شبکه‌های شش وجهی منظم استفاده شده است. مسأله با چند شبکه‌ی مختلف با تعداد 150766، 304676، 609346 و 1128516 سلول حل شده که نتایج توزیع  $\text{CO}_2$  در شرایط دائم در مرکز اتاق برحسب ارتفاع از کف در "شکل 2" رسم شده است. از "شکل 2" مشخص است که با افزایش تعداد سلول‌ها، نمودارها بسیار به هم نزدیک می‌شوند که نشان دهنده استقلال نتایج از اندازه شبکه می‌باشد. در این تحقیق از شبکه با 609346 سلول استفاده شده است. نتایج مدل سازی عددی با داده‌های ارائه شده در مرجع [6] انطباق مناسبی دارد که بیانگر صحت نتایج مدل سازی است.

مجاز غلظت  $\text{CO}_2$  در فضای داخل ساختمان را تعیین کرده‌اند. استاندارد اشری 2001-62 حد غلظت  $\text{CO}_2$  در اتاق برای وجود کیفیت هوای مناسب را  $700 \text{ ppm}$  بالاتر از غلظت آن در هوای بیرون ذکر کرده است [7]. غلظت  $\text{CO}_2$  در هوای بیرون بین 330 تا  $370 \text{ ppm}$  است [8]. استاندارد اروپا حداکثر غلظت  $\text{CO}_2$  را  $1500 \text{ ppm}$  اعلام کرده ولی پیشنهاد داده‌است که غلظت  $\text{CO}_2$  فضای داخل کمتر از  $1000 \text{ ppm}$  باشد [9]. استاندارد نیوش<sup>1</sup> با شاخص سلامتی انسان، حد مجاز غلظت  $\text{CO}_2$  در مواجهه 8 ساعت در روز و 40 ساعت در هفته را  $5000 \text{ ppm}$  اعلام کرده است [7]. بنابراین در طراحی تهویه ساختمان‌ها باید به این مقادیر توجه شود تا کیفیت هوا در شرایط مطلوب قرار گیرد. اما یکی از سوالات مطرح در این زمینه، چگونگی تخمین کیفیت هوای داخل می‌باشد که در پژوهش حاضر به آن پرداخته می‌شود. به طور کلی در پژوهش‌های انجام شده، رابطه‌ای برای برآورد میزان آلاینده‌ها یا کیفیت هوای داخل گزارش نشده است. در این پژوهش با شبیه سازی عددی و مقایسه آن با مدل تحلیلی، رابطه‌ای کاربردی و کلی برای تخمین کیفیت هوا ارائه می‌گردد که دست آورد مهم این پژوهش محسوب می‌شود.

## 2- تعریف مسئله و شبیه سازی عددی

فضای نمونه مورد بررسی در این تحقیق در "شکل 1" نشان داده شده است. هندسه کلی این مدل منطبق با مشخصات ارائه شده در مرجع [6] و براساس شرایط یک اتاق معمولی است که نتایج آن قابل تعمیم به سایر موارد می‌باشد. در این مدل، بخاری گازی و تنفس انسان، منابع تولید  $\text{CO}_2$  هستند و تهویه اتاق با نرخ‌های مختلف به وسیله پنجره و دریچه پایین در انجام می‌شود. هدف از این شبیه سازی، بررسی نحوه توزیع و مقدار غلظت  $\text{CO}_2$  در دوره 8 ساعته خواب و در ناحیه سکونت افراد (از کف تا ارتفاع  $1.7 \text{ m}$ ) می‌باشد. ابعاد و محل قرارگیری جزئیات مدل "شکل 1" در جدول 1 آورده شده است.

مدل سازی برای فصول معتدل و سرد سال انجام گرفته است. در فصول سرد دمای هوای بیرون  $5^\circ\text{C}$  است. در فصول معتدل دمای هوای بیرون  $20^\circ\text{C}$  است و بخاری حذف می‌شود. همچنین غلظت  $\text{CO}_2$  در هوای بیرون و شرایط اولیه اتاق  $350 \text{ ppm}$  می‌باشد. دیوار دارای پنجره و دیوار نزدیک بخاری از جنس آجر با ضریب هدایت حرارتی  $0.7 \text{ W/mK}$  و ضخامت  $20 \text{ cm}$  است.

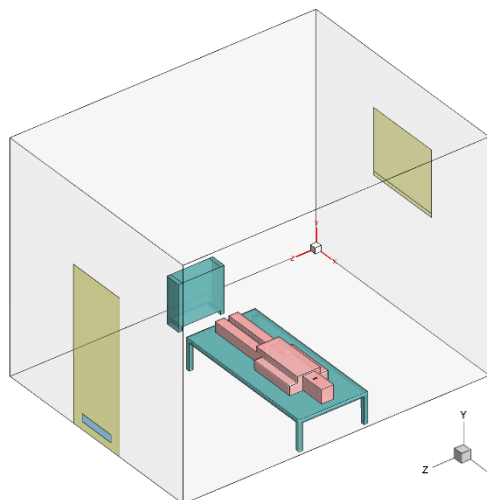


Fig. 1 Overview of simulated sample space

شکل 1 نمای کلی فضای نمونه شبیه سازی شده

<sup>2</sup> Indoor zero equation

<sup>3</sup> Airpak v3

<sup>4</sup> SIMPLE

<sup>1</sup> NIOSH

منابعی است که دمای آن‌ها نسبت به میانگین دمای اتاق بیشتر است. در کل، غلظت موضعی ناحیه تنفس با غلظت متوسط اتاق تفاوت بسیار کمی دارد، طوری که می‌توان توزیع  $CO_2$  در اتاق را تقریباً یکنواخت در نظر گرفت. در سایر نرخ‌های تهویه نیز، الگوی توزیع  $CO_2$  به همین شکل رعایت شده است. در "شکل‌های 5 و 6" نتایج غیردائم غلظت  $CO_2$  مربوط به شبیه‌سازی عددی و رابطه (3) با هم مقایسه شده‌اند. "شکل 5" مربوط به فصول سرد و همزمان با کارکرد بخاری، و "شکل 6" مربوط به فصول معتدل و بدون کارکرد بخاری است. "شکل‌های 5 و 6" نشان می‌دهند که نتایج رابطه (3) به خوبی از نظر رفتار و مقدار، با نتایج شبیه‌سازی عددی مطابقت دارد و می‌توان نتیجه گرفت که فرض توزیع یکنواخت غلظت  $CO_2$  درون اتاق صحیح بوده است. در صورت نبودن تهویه و بدون کارکرد بخاری، پس از 8 ساعت میانگین غلظت  $CO_2$  در ناحیه تنفس به 3000 ppm می‌رسد که بسیار بیشتر از حد مجاز و برای سلامتی مضر است که این نشان دهنده اهمیت تهویه مناسب اتاق است. برای بررسی دقیق‌تر، در جدول 2 حداکثر اختلاف در نمودارهای "شکل 5 و 6" و همچنین عملکرد تهویه در نرخ‌های تهویه مختلف نشان داده شده است.

شبیه‌سازی فضای نمونه طوری انجام شده که هوا از یک سمت اتاق وارد و از سمت مقابل خارج شود (شرایط عدم اختلاط یا تهویه پیستونی) ولی با این حال مقدار  $\varepsilon$  در جدول 2 تا حد زیادی نزدیک به 1 است که نشان می‌دهد تهویه فضا در شرایط مورد بررسی و مسائل مشابه از نوع اختلاطی است. همچنین اختلاف نتایج رابطه (3) و شبیه‌سازی عددی همواره کمتر از 7 درصد است که نشان‌دهنده انطباق بالای نتایج تحلیلی و عددی است.

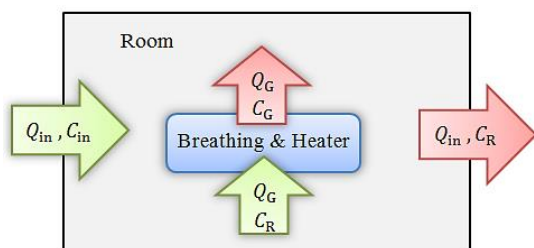


Fig. 3 Schematic of analytical solution model

شکل 3 شماتیک مدل حل تحلیلی

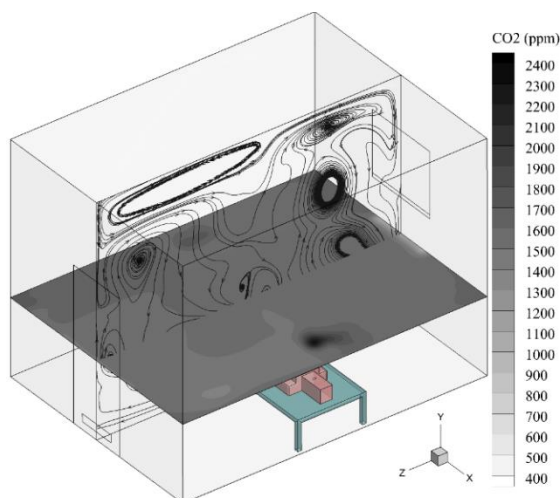


Fig. 4  $CO_2$  distribution after 8 hours and 1 ACH ventilation rate in plane  $y = 1$  m, and stream line in plane  $x = 1.5$  m

شکل 4 توزیع  $CO_2$  پس از 8 ساعت و نرخ تهویه 1 ACH در صفحه  $y = 1$  m و خطوط جریان در صفحه  $x = 1.5$  m

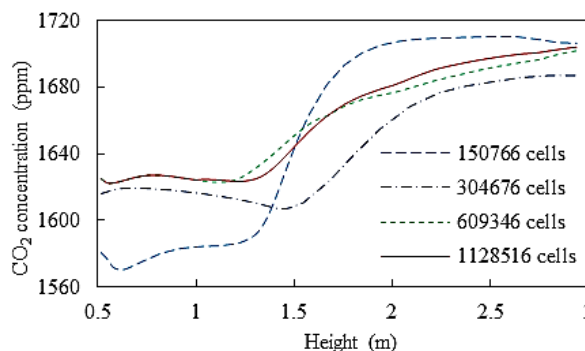


Fig. 2  $CO_2$  concentration on the line ( $x = 1.5, z = 2$ ) in terms of height

شکل 2 غلظت  $CO_2$  روی خط ( $x = 1.5, z = 2$ ) برحسب ارتفاع

### 3- حل تحلیلی

در مسئله حاضر، اگر توزیع غلظت  $CO_2$  درون اتاق به صورت یکنواخت فرض شود، می‌توان از حل تحلیلی برای تخمین کیفیت هوا استفاده کرد. اما این فرض، وابسته به نوع تهویه اتاق است. اگر تهویه فضا به صورت اختلاطی باشد، فرض غلظت یکنواخت  $CO_2$  درون اتاق صحیح است. می‌توان از رابطه (1) برای تعیین میزان اختلاطی بودن تهویه استفاده کرد [11].

$$\varepsilon = \frac{C_{out} - C_{in}}{C_R - C_{in}} \quad (1)$$

در رابطه (1)،  $\varepsilon$  مقداری بین 0 تا 2 دارد و اگر این مقدار به عدد 1 نزدیک باشد، تهویه از نوع اختلاطی است [11]. در حل تحلیلی، با فرض غلظت یکنواخت  $CO_2$  درون اتاق، مسئله برای شرایط مختلف حل شده و در بخش نتایج، با نتایج شبیه‌سازی عددی مقایسه می‌شوند تا میزان صحت و محدوده اعتبار فرض انجام شده مشخص گردد.

با در نظر گرفتن اتاق به عنوان حجم کنترل می‌توان مدلی به صورت "شکل 3" فرض کرد. نرخ ورود و خروج هوا، تنفس و هوای در گردش توسط بخاری معلوم است. همچنین غلظت  $CO_2$  در هوای ورودی، بازدم انسان و خروجی بخاری نیز مشخص است. با فرض یکنواخت بودن توزیع  $CO_2$  در اتاق می‌توان غلظت  $CO_2$  خروجی را برابر با غلظت  $CO_2$  هوای اتاق در نظر گرفت. بنابراین تنها مجهول مسئله غلظت  $CO_2$  در هوای اتاق ( $C_R$ ) است. معادله بالانس جرمی برای غلظت در اتاق به صورت رابطه (2) نوشته می‌شود.

$$V \frac{dC_R}{dt} + C_R(Q_{in} + Q_G) = Q_{in}C_{in} + Q_G C_G \quad (2)$$

که با حل معادله فوق برحسب زمان و قرار دادن شرایط اولیه به صورت

$$C(0) = C_i, \quad \text{رابطه (3) به دست می‌آید.}$$

$$C_R = \frac{(C_i - C_G)Q_G + (C_i - C_{in})Q_{in}}{e^{\frac{\varepsilon(Q_G + Q_{in})}{v}}(Q_G + Q_{in})} + \frac{C_G Q_G + C_{in} Q_{in}}{Q_G + Q_{in}} \quad (3)$$

### 4- نتایج و بحث

برای بررسی و درک مقدار و الگوی توزیع  $CO_2$  در شرایط واقعی، شبیه‌سازی برای چهار نرخ تهویه مختلف شامل 1، 2، 5 و 10 ACH انجام شده است. استفاده از واحد ACH به این دلیل است که پارامتر حجم اتاق را نیز در بر می‌گیرد. نمونه‌ای از توزیع  $CO_2$  و جریان هوا در اتاق همزمان با کارکرد بخاری در "شکل 4" نشان داده شده است. در "شکل 4" مشاهده می‌گردد که غلظت  $CO_2$  در نواحی مختلف اتاق تقریباً یکنواخت است و فقط در ناحیه دهان شخص افزایش محسوسی دارد. همچنین غلظت  $CO_2$  با افزایش ارتفاع در راستای عمودی، کمی افزایش می‌یابد که دلیل این امر، تولید  $CO_2$  توسط

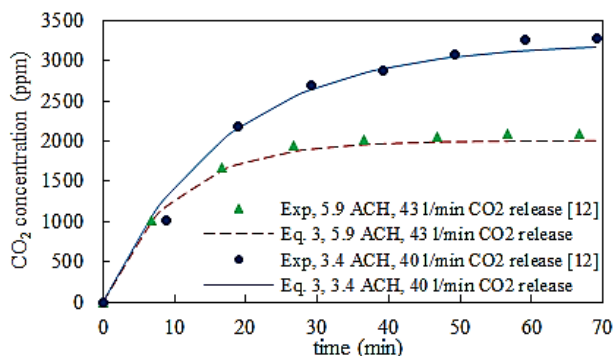


Fig. 8 Comparison the results of Eq.3 and experiment results of ref.[12] for high ventilation rates

شکل 8 مقایسه نتایج رابطه (3) و نتایج تجربی مرجع [12] برای نرخ تهویه بالا

تجربی دارد. میانگین و حداکثر اختلاف نتایج در نمودارهای "شکل 7 و 8" به ترتیب 4.2 و 8.1 درصد است. ضمن این که نتایج تجربی، خود بین 1 تا 3 درصد خطا دارند [12,7]. به طور کلی می توان گفت که نتایج رابطه (3)، هم با نتایج شبیه سازی عددی و هم با نتایج تجربی مطابقت کامل دارد. بنابراین این رابطه برای تمامی فضاهای مشابه و همچنین برای تمام فصول سال از جمله موارد همزمان با کارکرد وسایل احتراقی قابل استفاده است.

### 5- جمع بندی

در پژوهش حاضر بر مبنای نتایج عددی و تجربی، رابطه ای تحلیلی برای پیش بینی و برآورد کیفیت هوای داخل پیشنهاد شده است. با داشتن مقادیر حجم اتاق، نرخ تهویه، نرخ تولید آلاینده (گاز CO<sub>2</sub>) و شرایط اولیه، غلظت متوسط گاز آلاینده (C<sub>R</sub>) از رابطه (4) قابل محاسبه است.

$$C_R = \frac{(C_i - C_G)Q_G + (C_i - C_{in})Q_{in}}{e^{\frac{t(Q_G + Q_{in})}{V}}(Q_G + Q_{in})} + \frac{C_G Q_G + C_{in} Q_{in}}{Q_G + Q_{in}} \quad (4)$$

ضمناً مقادیر متداول برای پارامترهای مذکور، در بخش 2 اشاره شده است.

### 6- فهرست علائم

C	غلظت گونه (ppm)
Q	دبی حجمی (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
t	زمان (s)
V	حجم (m <sup>3</sup> )

### علائم یونانی

ε عملکرد تهویه (برای حذف آلودگی)

### زیر نویس ها

G	تولید (توسط تنفس و وسیله احتراقی)
i	شرایط اولیه
in	ورودی
out	خروجی
R	اتاق

### 7- مراجع

- [1] Ch. Noroozi, M. Maerefat, S. A. Zolfaghari, Effective use of thermal floating combustion heating appliances in order to control indoor air quality, *Sharif Mechanical Engineering*, Vol. 29, No. 1, pp. 103-111, 2011. (in Persian فارسی)
- [2] Y. You, C. Niu, J. Zhou, Y. Liu, Z. Bai, Measurement of air exchange rates in different indoor environments using continuous CO<sub>2</sub> sensors, *Environmental Sciences*, Vol. 24, No. 4, pp. 657-664, 2012.

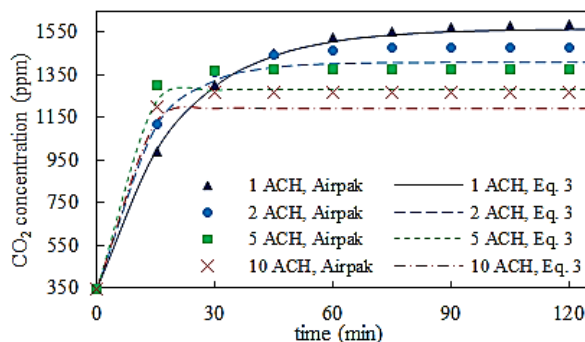


Fig. 5 CO<sub>2</sub> concentration in the breathing zone with the active heater

شکل 5 غلظت CO<sub>2</sub> در ناحیه تنفس با کارکرد بخاری

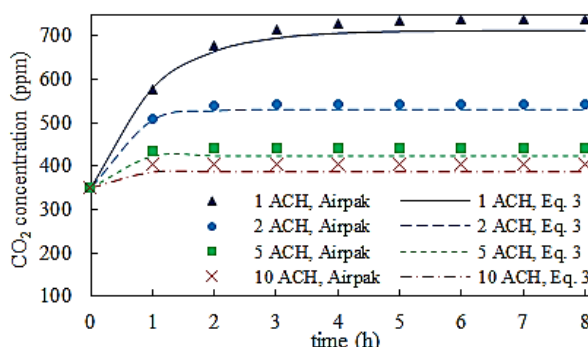


Fig. 6 CO<sub>2</sub> concentration in the breathing zone without heater

شکل 6 غلظت CO<sub>2</sub> در ناحیه تنفس بدون کارکرد بخاری

به دلیل اهمیت بالای این موضوع، برای اطمینان کامل نسبت به صحت و اعتبار رابطه (3)، نتایج حاصل از این رابطه با نتایج تجربی دو مرجع [12,7] در "شکل های 7 و 8" مقایسه شده است. "شکل های 7 و 8" نشان می دهند که برای تنفس ساکنین در ناحیه تنفس در نرخ تهویه کم، و همچنین وجود منبع تولید CO<sub>2</sub> در نرخ تهویه بالا، نتایج رابطه (3) انطباق خوبی با نتایج

جدول 2 مقایسه نتایج رابطه (3) و نتایج شبیه سازی شده

Table 2 Comparison the results of Eq. 3 and simulation results

		نرخ تعویض هوا (ACH)			
		10	5	2	1
با کارکرد بخاری	حداکثر اختلاف نتایج (%)	6.10	7.02	4.75	1.46
	عملکرد تهویه (ε)	0.84	0.87	0.84	0.89
بدون کارکرد بخاری	حداکثر اختلاف نتایج (%)	4.27	4.31	2.44	3.39
	عملکرد تهویه (ε)	0.97	0.97	1.00	0.94

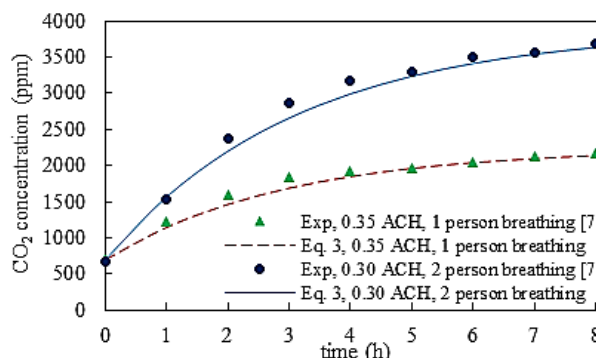


Fig. 7 Comparison the results of Eq. 3 and experiment results of ref. [7] for low ventilation rates

شکل 7 مقایسه نتایج رابطه (3) و نتایج تجربی مرجع [7] برای نرخ تهویه پایین

- bedrooms, *Procedia Engineering*, Vol. 75, pp. 175-182, 2013.
- [8] ASHRAE, *Handbook of fundamentals, Chapter 16: ventilation and infiltration*, USA Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, 2009.
- [9] EN 13779, Ventilation for non-residential buildings – Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems, Brussels: European Committee for Standardization, 2007.
- [10] Y. C. Tung, Y. C. Shih, S. C. Hu, Numerical study on the dispersion of airborne contaminants from an isolation room in the case of door opening, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, No. 8, pp. 1544-1551, 2009.
- [11] C. Guangyu, et al. A review of the performance of different ventilation and airflow distribution systems in buildings, *Building and Environment*, Vol. 73, pp. 171-186, 2014.
- [12] C. Guangyu, S. Kai, K. Simo, Modelling and experimental study of performance of the protected occupied zone ventilation, *Energy and Buildings*, Vol. 68, pp. 515-531, 2014.
- [3] K. Fiedoruk, D. A. Krawczyk, The possibilities of energy consumption reduction and a maintenance of indoor air quality in doctor's offices located in north-eastern Poland, *Energy and Buildings*, Vol. 85, pp. 235-245, 2014.
- [4] Z. T. Ai, C.M. Mak, D. J. Cui, P. Xue, Ventilation of air-conditioned residential buildings: A case study in Hong Kong, *Energy and Buildings*, Vol. 127, pp. 116-127, 2016.
- [5] A. Pantazaras, S. E. Lee, M. santamouris, J. Yang, Predicting the CO<sub>2</sub> levels in buildings using deterministic and identified models, *Energy and Buildings*, Vol. 127, pp. 774-785, 2016.
- [6] D. HakimiRad, B. Mohammad Kari, M. Maerefat, Study the impact of caulking modern windows on air infiltration rate and indoor air quality, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 11, pp. 23-34, 2016. (in Persian)
- [7] P. Batog, M. Badura, Dynamic of changes in carbon dioxide concentration in