



## ارائه مدل پیش‌بینی افزایش غلظت آلاینده با زمان در پارکینگ‌های بسته مسکونی

جواد امنیان<sup>1</sup>، مهدی معرفت<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران  
2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران  
\* تهران، صندوق پستی 143-14115، maerefat@modares.ac.ir

### اطلاعات مقاله

یادداشت پژوهشی  
دریافت: 01 تیر 1395  
پذیرش: 13 تیر 1395  
ارائه در سایت: 16 مرداد 1395  
کلید واژگان:  
پخش آلودگی  
حل عددی  
اندازه‌گیری تجربی  
رابطه افزایش غلظت آلاینده

### چکیده

افزایش شدید آلودگی حاصل از کارکرد ماشین‌ها در پارکینگ‌های بسته مسکونی چالشی با اهمیت است. پیش‌بینی و برآورد حجم آلاینده‌های تولیدی ماشین‌ها می‌تواند در تصمیم‌گیری و طراحی صحیح پارکینگ‌ها کاربرد داشته باشد. در این مقاله اندازه‌گیری تجربی میزان آلاینده در پارکینگ یک مجتمع مسکونی انجام شده و نتایج حاصل از آن برای صحت‌سنجی نتایج حل عددی مورد استفاده قرار گرفته است. در مرحله دوم شبیه‌سازی جریان آلودگی برای چندین پارکینگ متداول انجام شده و رابطه افزایش غلظت آلاینده‌ها با زمان بدست آمده و به صورت رابطه‌ای تحلیلی ارائه شده و با استفاده از رابطه بدست آمده، حد بالای زمان حضور فرد در پارکینگ‌های مسکونی بیان شده است.

## Offering a model for prediction of pollution increasing with time in residential enclosed parking lots

Javad Amnian, Mehdi Maerefat

Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.  
\* P.O.B. 14115-143 Tehran, Iran, maerefat@modares.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Research Note  
Received 21 June 2016  
Accepted 03 July 2016  
Available Online 06 August 2016

**Keywords:**  
Pollution dispersion  
numerical simulation  
experimental measurement  
the relation of pollution incensement

### ABSTRACT

Serious increase of pollution from cars in the enclosed residential parking lots is an important challenge. Forecast and estimation of generated pollution from cars is applicable for proper design of residential car parks. In this article, the pollution concentration in a residential parking lot is measured experimentally and the results are used for validation of numerical solution. In the second part, the pollution is simulated in several parking lots and the equation of pollution incensement with time is proposed and offered in the form of analytical equation. By using this equation, the allowable time of man's presence in these parking lots is offered.

### 1- مقدمه

منوکسیدکربن در پارکینگ دارد [3,2]. قرارگیری فرد در معرض منوکسیدکربن در هر بازه‌ی زمانی با اهمیت است و عواقب خاص خود را دارد [5,4]. در زمینه اندازه‌گیری غلظت آلاینده‌ها در پارکینگ‌های مسکونی به صورت مستقیم هیچ‌گونه پژوهشی موجود نیست. تحقیقات کلی در این زمینه تنها در زمینه شبیه‌سازی پخش آلاینده در پارکینگ‌های بسته بزرگ و به صورت محدود است. آسیماکوپولو و همکاران [7,6] میزان آلودگی را در چندین نقطه از یک پارکینگ متوسط بسته اندازه‌گیری کرده‌اند. کرارتی و همکاران [8] و لوپز و همکاران [9] رابطه‌ای جهت بدست آوردن میزان هوای تهویه با توجه به پارامترهای مختلف پارکینگ پیشنهاد داده‌اند. اشرفی و همکاران [10] میزان غلظت آلاینده‌ها را در یک پارکینگ متوسط بسته اندازه‌گیری کرده و نرخ منوکسیدکربن خروجی از اگزوز ماشین‌ها (همانند پراید و تیبا) را ارائه نموده‌اند. همانگونه که در پژوهش‌های فوق مشاهده شد،

امروزه تقاضا برای استفاده از پارکینگ و به خصوص پارکینگ‌های بسته در مجتمع‌های مسکونی افزایش یافته است. با توجه به حضور افراد در پارکینگ‌های فوق و اتصال این پارکینگ‌ها به فضای مسکونی ساختمان، مدیریت آلودگی و بررسی کیفیت هوا در آن بسیار با اهمیت است. آلودگی ایجاد شده در طبقات مختلف پارکینگ از طریق راهروها و راه‌پله‌ها به بخش‌های مسکونی ساختمان راه یافته و مشکلات اساسی را ایجاد خواهد کرد. پارکینگ‌های بسته مسکونی در دسته پارکینگ‌های کوچک و متوسط قرار گرفته و باید به صورت طبیعی تهویه شوند. مهمترین آلودگی موجود در پارکینگ‌های بسته منوکسیدکربن است [1]. افراد معمولاً در بازه‌ی زمانی بسیار کوتاهی در پارکینگ بسته حضور دارند ولی نحوه استفاده از پارکینگ مسکونی تأثیر زیادی بر عدم قرارگیری آنها در معرض منوکسیدکربن و انتشار

Please cite this article using:

J. Amnian, M. Maerefat, Offering a model for prediction of pollution increasing with time in residential enclosed parking lots, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 7, pp. 399-402, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

### 3- حل عددی و صحت‌سنجی

برای بدست آوردن توزیع آلودگی در پارکینگ مسکونی، معادلات حاکم شامل معادلات بقای جرم، مومنتم، انرژی و گونه آلودگی به همراه مدل آشفستگی  $k-\epsilon$  با استفاده از حلگر ری‌اکتینگ فوم<sup>4</sup> حل شده‌اند. جزئیات معادلات بقا و پارامترهای بکار رفته در آن در مرجع [13] بیان شده است. به منظور حل عددی جریان هوا و آلودگی در پارکینگ فوق، شرایط مرزی درب پله‌ها و بازشدگی جنوبی به صورت فشار خروجی و اگرز ماشین‌ها به صورت منبع تولید آلاینده با دبی 4.4 گرم بر ثانیه [10] با دمای خروجی 70 درجه سانتی‌گراد [14] در نظر گرفته شده است. مقدار دما در پارکینگ و در زمان اولیه برابر با 20 درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. جهت حل عددی، همه پارامترهای سرعت، آشفستگی و دما در دیواره‌های پارکینگ به صورت تابع دیواره<sup>5</sup> در نظر گرفته شده‌اند.

تعداد گره انتخاب شده جهت حل عددی پس از بررسی حساسیت حل به تعداد گره برابر با 140000 گره است. بدین منظور تعداد 90، 105، 130، 140 و 165000 گره جهت حل مورد بررسی قرار گرفت و تعداد 140000 گره جهت حل عددی انتخاب شد.

نتایج حاصل از حل عددی و مقایسه با اندازه‌گیری تجربی در جدول 1 بیان شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، نتایج اندازه‌گیری تجربی و عددی در 6 دقیقه ابتدایی دارای اختلاف نسبتاً زیادی هستند که این مسأله به دلیل غلظت زیاد آلاینده‌های خروجی از اگرز ماشین در حالت استارت سرد است. این پدیده در دیگر مقالات هم مشاهده شده است [6]. بر اساس استاندارد استرالیا، میزان آلاینده خروجی در حالت استارت سرد ماشین دقیق ابتدایی روشن شدن ماشین بیش از حالت کارکرد عادی ماشین است [15]. بعد از زمان 6 دقیقه ابتدایی، تفاوت بین نتایج کاهش یافته است. از طرفی در هر دو حالت اندازه‌گیری تجربی و حل عددی، میزان غلظت منوکسیدکربن اندازه‌گیری شده در محل درب ورودی پله‌ها در محدوده 40 ppm قرار گرفته است. این مسأله بیانگر این است که میزان منوکسیدکربن تولیدی ماشین‌ها و خروجی از پارکینگ به حالت تعادل رسیده و مقدار ورودی آن به پله‌ها و خروجی آن از درب جنوبی پارکینگ ثابت شده است.

### 4- مدل افزایش غلظت آلاینده

با توجه به نتایج بیان شده در جدول 1، می‌توان رابطه بین افزایش غلظت آلاینده و زمان را بیان نمود. بهترین رابطه‌ای که بیانگر نتایج حاصل از اندازه‌گیری تجربی بوده و در بازه زمانی 20 دقیقه‌ای اندازه‌گیری شده دارای دقت مناسبی است، رابطه لگاریتمی (1) است.

$$C = 15.133 \ln t - 65.8 \quad (1)$$

در رابطه (1)،  $C$  بیانگر غلظت منوکسیدکربن (ppm) و  $t$  بیانگر زمان (s) است. رابطه (1) برای حالتی قابل استفاده است که هندسه همانند پارکینگ بیان شده در شکل 1 دارای یک سمت باز باشد (دیواره جنوبی پارکینگ). در صورتی که پارکینگ فوق دارای بازشدگی مطابق با شکل 1 نبوده و دیواره جنوبی آن بسته باشد، افزایش غلظت آلاینده در آن بسیار شدید خواهد بود.

در این صورت تنها مسیر ورودی و خروجی ماشین به پارکینگ درب موجود بر روی دیواره شمالی بوده و در صورتی که درب در هنگام روشن شدن ماشین‌ها بسته باشد، هوا از هیچ مسیری به پارکینگ نرسیده و غلظت منوکسیدکربن در آن به سرعت افزایش خواهد یافت. نتایج حاصل از حل

بررسی مدل افزایش آلودگی در پارکینگ‌های مسکونی بسته تا به حال انجام نشده و پژوهش عددی و تجربی در این زمینه موضوعی کاملاً جدید است. در این مقاله افزایش غلظت آلاینده با استفاده از اندازه‌گیری تجربی و حل عددی در یک پارکینگ بسته مسکونی با استفاده از نرم افزار این‌فوم<sup>1</sup> مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور نتایج حل عددی با استفاده از نتایج اندازه‌گیری تجربی صحت‌سنجی شده، سپس مدلی برای افزایش غلظت منوکسیدکربن در پارکینگ بیان شده و با استفاده از آن مدت زمان مجاز حضور در چندین نوع متداول پارکینگ‌های بسته مسکونی ارائه شده است.

### 2- اندازه‌گیری آلاینده در پارکینگ مسکونی

هندس پارکینگ بررسی شده در شکل 1 نمایش داده شده است. این پارکینگ دارای 11 متر طول، 3 متر ارتفاع و 4 متر عرض است. درب پله‌ها<sup>2</sup> در ابعاد 1.5 متر در 2.5 متر ساخته شده و در فاصله سه متری از قسمت جنوبی پارکینگ است. قسمت شمالی پارکینگ درب ورودی به پارکینگ بوده و در حالت اندازه‌گیری و شبیه‌سازی عددی بسته است. بنابراین در حالت شبیه‌سازی عددی به صورت دیواره در نظر گرفته شده است. قسمت جنوبی پارکینگ دارای دیواره نبوده و به فضای آزاد راه دارد. دو ماشین پراید در پارکینگ قرار داشته و هر دو در ابتدای اندازه‌گیری روشن شده و موتور آنها در حال گرم شدن<sup>3</sup> است.

دستگاه اندازه‌گیری منوکسیدکربن بکار رفته در این پژوهش یک هشدار دهنده گاز منوکسیدکربن است که بر اساس استاندارد موسسه تحقیقات صنعتی ایران [11] و استاندارد بریتانیا برای تجهیزات اندازه‌گیری الکتریکی [12] تأیید شده است. حسگر منوکسیدکربن در دستگاه فوق از نوع الکتروشیمیایی با دو الکترود از جنس پلاتین و الکترولیتی از جنس آب مقطر است. گاز منوکسیدکربن در مجاورت یکی از الکترودها با بخار آب موجود در هوا واکنش داده و به دی‌اکسیدکربن تبدیل شده و یون‌های مثبت هیدروژن وارد الکترولیت شده و در مجاورت الکترود دیگر با اکسیژن هوا واکنش داده و مجدداً تبدیل به بخار آب می‌گردند. واکنشهای صورت گرفته موجب ایجاد جریان الکتریکی در حدود 1 تا 40 نانو آمپر در ازای هر ppm غلظت گاز منوکسیدکربن در مدار بین دو الکترود می‌شوند که مبنای اندازه‌گیری غلظت است. خطای اندازه‌گیری در این دستگاه در حدود 3% بوده و در محدوده 20 تا 1000 ppm کار می‌کند. دستگاه فوق نیازی به کالیبره شدن نداشته و پس از راه‌اندازی قابلیت اندازه‌گیری منوکسیدکربن را دارد.

اندازه‌گیری منوکسیدکربن در پارکینگ در محل درب پله‌ها و در بازه ارتفاع 1.5 تا 2 متری و در یک بازه زمانی 20 دقیقه‌ای و با گام زمانی 2 دقیقه‌ای انجام گرفته است. روش اندازه‌گیری بدین صورت است که در ابتدا ماشین‌ها روشن شده و حسگر منوکسیدکربن در موقعیت درب ورودی پله‌ها و در ارتفاع 1.5 متری قرار دارد. اندازه‌گیری مقدار منوکسیدکربن در بازه زمانی 20 دقیقه و با گام‌های زمانی ذکر شده انجام گرفته و سپس ماشین‌ها خاموش می‌شوند تا موتور آنها سرد شود. در مرحله‌های بعدی اندازه‌گیری در ارتفاع‌های 1.75 و 2 متری همانند حالت اول انجام گرفته و نتایج حاصل از آن ثبت شده است. سپس از مقادیر اندازه‌گیری شده در هر سه ارتفاع و در هر گام زمانی متناظر میانگین‌گیری شده و نتایج در جدول 1 بیان شده است. دلیل انتخاب بازه زمانی فوق، ثابت شدن میزان منوکسیدکربن بعد از 16 دقیقه است.

<sup>1</sup> OpenFoam

<sup>2</sup> Stair's door

<sup>3</sup> Hot Stabilized

<sup>4</sup> reactingFoam

<sup>5</sup> Wall function

میزان منوکسیدکربن در پارکینگ بعد از 140 ثانیه به بیش از 6000 ppm خواهد رسید که حد بالای استنشاق منوکسیدکربن و کشنده است. با توجه به رویکرد بیان شده در این بخش، میزان غلظت آلاینده در دو پارکینگ مدل دیگر بدست آمده و روابط مرتبط با آن به صورت روابط (3,2) بیان شده است. بدین منظور دو پارکینگ مدل همانند شکل‌های 2 و 3 انتخاب شده و شبیه‌سازی عددی پخش آلاینده در آن انجام گرفته و میزان غلظت منوکسیدکربن با زمان در جدول 3 بیان شده است. با توجه به تحلیل حساسیت حل به اندازه شبکه، تعداد 340000 و 850000 گره به ترتیب برای پارکینگ‌های 2 و 3 جهت حل عددی انتخاب شده است. شرایط مرزی و میزان آلودگی خروجی از آگزوز ماشین‌ها هم مطابق با بخش قبلی است. جهت حل بدترین حالت در نظر گرفته شده است، بدین صورت که درب‌های ورودی و خروجی ماشین‌ها بسته بوده و همه ماشین‌ها روشن هستند. بدین ترتیب پارکینگ‌ها دارای هیچگونه تهویه‌ای نبوده و آلودگی یا از درب‌ها خارج می‌شود یا از طریق پله‌ها به سمت بخش‌های مسکونی ساختمان راه می‌یابند. میزان آلاینده در بازه‌ی ارتفاعی 2 تا 3 متر متوسط‌گیری شده است.

همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد، پارکینگ 3 به دلیل وجود ماشین‌های بیشتر دارای کیفیت هوای پایین‌تری نسبت به پارکینگ 2 است. میزان غلظت منوکسیدکربن در دو پارکینگ فوق را می‌توان با استفاده از رابطه توانی همانند معادله (2) بیان نمود. افزایش غلظت با زمان برای دو پارکینگ 2 و 3

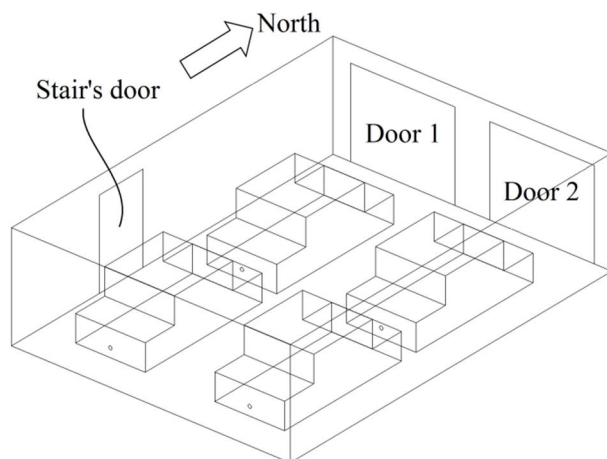


Fig. 2 2nd Car park geometry

شکل 2 هندسه پارکینگ شماره 2

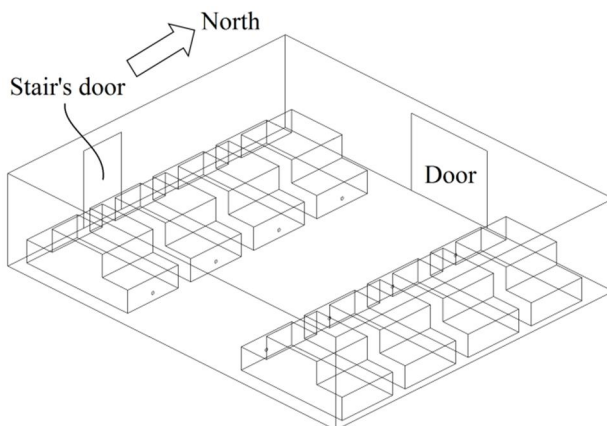


Fig. 3 3rd Car park geometry

شکل 3 هندسه پارکینگ شماره 3

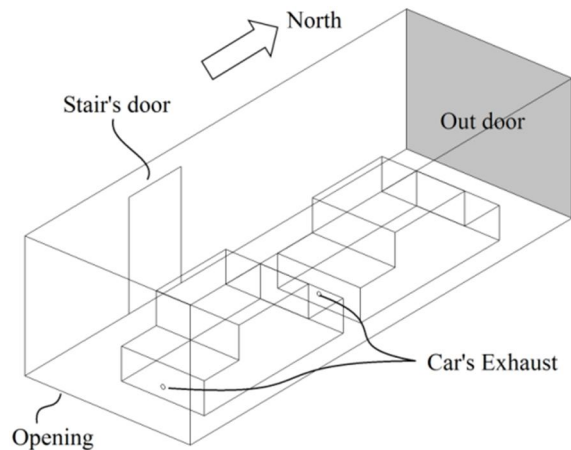


Fig. 1 The studied Car park geometry for validation

شکل 1 هندسه پارکینگ مطالعه شده جهت صحت‌سنجی

جدول 1 مقایسه نتایج اندازه‌گیری تجربی و حل عددی تمرکز منوکسید در پارکینگ

Table 1 Comparison of the numerical and experimental results of CO concentration in parking lot

زمان (s)	اندازه‌گیری تجربی (ppm)	حل عددی (ppm)	تفاوت (%)
0	0	0	0
120	9	6	33
240	15	12	20
360	21	18	14.3
480	27	26	3.7
600	31	30	3.2
720	35	32	8.6
840	38	36	5.3
960	40	41.3	3.25
1080	39.5	42.1	6.6
1200	40	41.8	4.5

عددی در این حالت در جدول 2 بیان شده است. مقادیر غلظت منوکسیدکربن بیان شده در این جدول با توجه به متوسط‌گیری از غلظت منوکسیدکربن در ارتفاع‌های 1 متر تا 2 متر بدست آمده است. همانگونه که در جدول 2 مشاهده می‌شود، افزایش غلظت منوکسیدکربن با زمان در این حالت بسیار شدیدتر از حالت قبل بوده و غلظت منوکسیدکربن در پارکینگ شکل 1 با دیوارهای شمالی و جنوبی بسته به صورت نمایی با زمان (s) افزایش می‌یابد. رابطه‌ای که بیانگر افزایش غلظت منوکسیدکربن با زمان در این حالت است به صورت رابطه (2) می‌باشد.

$$C = 13.05e^{0.0465t} \quad (2)$$

در صورتی که میزان منوکسیدکربن در پارکینگ با همین نرخ افزایش یابد، در 150 ثانیه، غلظت منوکسیدکربن در پارکینگ به حد هشدار مرگ [16] (حدود 7000 ppm) خواهد رسید. با استفاده از بازنویسی رابطه (2) می‌توان تابع زمان بر حسب غلظت منوکسیدکربن در پارکینگ شکل 1 با دیوارهای بسته را بصورت رابطه (3) بدست آورد.

$$t = 21.4 \ln C - 55 \quad (3)$$

با استفاده از رابطه (3) می‌توان مدت زمان افزایش غلظت منوکسیدکربن به حداکثر میزان خود را بدست آورد. در صورتی که میزان غلظت منوکسیدکربن در یک فضای بسته از 1000 ppm بیشتر شود، حتی در بازه‌های زمانی کوتاه مدت هم اثرات بسیار خطرناکی بر فرد خواهد گذاشت [16]. همانگونه که رابطه 3 نشان می‌دهد، مدت زمان لازم برای رسیدن منوکسیدکربن به 1000 ppm در پارکینگ شکل 1 برابر با 100 ثانیه است. همچنین بعد از 112 ثانیه میزان منوکسیدکربن در پارکینگ به 2000 ppm خواهد رسید. همچنین با استفاده از رابطه فوق می‌توان نتیجه گرفت که

## 5- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله شبیه‌سازی عددی جریان در پارکینگ‌های مسکونی انجام شده و با نتایج اندازه‌گیری تجربی صحت‌سنجی شده است. همچنین با استفاده از شبیه‌سازی عددی، مدل افزایش غلظت آلاینده در چندین پارکینگ مسکونی بسته بدست آمده است. مدل بیان شده بیانگر رابطه‌ی نمایی بین زمان و غلظت منوکسیدکربن در پارکینگ‌های بسته بوده و نتایج حاصل از آن بیانگر مدت زمان حداکثر 130 ثانیه برای رسیدن غلظت میانگین منوکسیدکربن در پارکینگ به حد خطر (کشندگی) است. رابطه افزایش غلظت در مقاله حاضر تابعی از چندین پارامتر از جمله تعداد ماشین‌ها، نرخ انتشار منوکسیدکربن از آگروز ماشین‌ها، حجم پارکینگ و زمان مجاز استنشاق حد کشنده منوکسیدکربن است.

## 6- مراجع

- [1] ASHRAE Handbook, HVAC Applications (SI), chapter 15: enclosed vehicular facilities, 2011.
- [2] W. Chow, W. Fung, Survey on the indoor environment of enclosed car parks in Hong Kong, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 10, No. 2, pp. 247-255, 1995.
- [3] A. Chaloulakou, A. Duci, N. Spyrellis, Exposure to carbon monoxide in enclosed multi-level parking garages in the central Athens urban area, *Indoor and Built Environment*, Vol. 11, No. 4, pp. 191-201, 2002.
- [4] J. C. Ho, H. Xue, K. L. Tay, A field study on determination of carbon monoxide level and thermal environment in an underground car park, *Building and Environment*, Vol. 39, No. 1, pp. 67-75, 2004.
- [5] Q. Chen, Z. Zhang, Prediction of particle transport in enclosed environment, *China particulology*, Vol. 3, No. 06, pp. 364-372, 2005.
- [6] E. Asimakopoulou, D. I. Kolaitis, M. A. Founti, CO dispersion in a car-repair shop: An experimental and CFD modelling study, *Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*, Melbourne, Australia, December 9-11, 2009.
- [7] E. Asimakopoulou, D. I. Kolaitis, M. A. Founti, Experimental and computational investigation of CO production and dispersion in an automotive repair shop, *Indoor and Built Environment*, Vol. 22, No. 5, pp. 750-765, 2013.
- [8] M. Krarti, A. Ayari, Ventilation for enclosed parking garages, *ASHRAE Journal*, Vol. 43, No. 2, pp. 52-57, 2001.
- [9] T. Gil-Lopez, A. Sanchez-Sanchez, C. Gimenez-Molina, Energy, environmental and economic analysis of the ventilation system of enclosed parking garages: Discrepancies with the current regulations, *Applied Energy*, Vol. 113, No. 0, pp. 622-630, 2014.
- [10] Kh. Ashrafi, M. S. Mousavi, M. H. Niksokhan, H. R. Vosoughifar, Determining the contribution of gas emissions from cars and estimating the distribution of CO emissions in enclosed parking, *Iranian Journal of Health and Environment*, Vol. 8, No. 4, pp. 447-458, 2016. (in Persian فارسی)
- [11] Institute of Standards and Industrial Research of Iran, Electrical apparatus for the detection of carbon monoxide in domestic premises, Part 1: Test methods and performance requirements, ICS:29.020, ISIRI 13172-1, 1st edition. (in Persian فارسی)
- [12] BRITISH STANDARD, Electrical apparatus for the detection of carbon monoxide in domestic premises — Test methods and performance requirements, BS EN 50291, 2001.
- [13] J. Amnian, M. Maerefat, Gh. Heidarinejad, Investigation on effect of exhaust vents location on reduction of pollution in enclosed car parks, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 5, pp. 70-80, 2016. (in Persian فارسی)
- [14] M. Ehsan, M. Shah, S. Hasan, Study of Temperature profile in automotive exhaust systems for retrofitting catalytic converters, *Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering (ICME2005)*, Dhaka, Bangladesh, December 28-30, 2005.
- [15] Australian Standard, The use of ventilation and airconditioning in buildings, Part 2: Mechanical ventilation in buildings, 2012.
- [16] Final Assessment: Integrated Science Assessment for Carbon Monoxide, United States Environmental Protection Agency (EPA), 2010.

جدول 2 افزایش غلظت منوکسیدکربن در پارکینگ کاملاً بسته با زمان

Table 2 The increasing of CO versus time in enclosed parking lot

حل عددی (ppm)	زمان (s)
6.2	5
40.7	20
162.9	40
345.14	60
621.25	80
1431	100
2772.8	120
6872	140

جدول 3 افزایش غلظت منوکسیدکربن در هندسه 2 و 3

Table 3 The increasing of CO in parking lot of 2 and 3

زمان (s)	پارکینگ 2	پارکینگ 3
5	12	17
20	49.2	78
40	120.4	160
60	360.7	500
80	784.2	950
100	1400	1800
120	3400.8	4680
140	7890	9310

به ترتیب به صورت روابط (5,4) بدست خواهد آمد.

$$C(\text{ppm}) = 15.8e^{0.0466t} \rightarrow C(\text{mg/m}^3) = 18.1e^{0.0466t} \quad (4)$$

$$C(\text{ppm}) = 23e^{0.0455t} \rightarrow C(\text{mg/m}^3) = 26.35e^{0.0455t} \quad (5)$$

روابط (5,4) را می‌توان به صورت رابطه نمایی 6 تخمین زد.

$$C(\text{mg/m}^3) = \alpha e^{t/20} \quad (6)$$

مقدار  $\alpha$  در رابطه (6) را می‌توان بر اساس پارامترهای هندسی و

عملکردی پارکینگ بدست آورد. بدین منظور معادله کلی (6) بصورت رابطه

(7) بدست آمده است.

$$\alpha = 50 \frac{n\dot{m}T}{V} \quad (7)$$

در رابطه (7) پارامترهای  $T$  و  $V$  به ترتیب بیانگر تعداد ماشین-

های روشن، دبی جرمی منوکسیدکربن خروجی از آگروز ماشین‌ها [1] (بر

حساب گرم بر ثانیه)، مدت زمان مجاز استنشاق حد بالای منوکسیدکربن

[16] (معمولاً 120 ثانیه) و حجم پارکینگ (بر حسب مترمکعب) است. با

توجه به موارد فوق، رابطه تحلیلی پیش‌بینی غلظت منوکسیدکربن در

پارکینگ به صورت رابطه (8) بدست آمده است.

$$C(\text{mg/m}^3) = 50 \frac{n\dot{m}T}{V} e^{t/20} \quad (8)$$

با استفاده از رابطه (8) می‌توان مدت زمان لازم برای تولید 6000 ppm

منوکسیدکربن در هر پارکینگ بسته مسکونی را تخمین زد. مقدار بیان شده

6000 ppm میزان منوکسیدکربنی است که انسان تنها برای مدت دو دقیقه

توانایی تحمل آن را دارد و بعد از آن دچار مرگ خواهد شد [16]. با توجه به

رابطه 8 هر کدام از دو پارکینگ 2 و 3 بعد از زمان 119 و 111 ثانیه به حد

فوق خواهند رسید. به عبارتی در صورتی که همه‌ی ماشین‌ها در

پارکینگ‌های بسته 2 و 3 روشن باشند، فرد کمتر از دو دقیقه جهت حضور

در آن فرصت دارد.