



## ارائه راهکار کاهش آلودگی و معیار سنجش جریان تهویه در پارکینگ های بسته چندطبقه

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

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 26 اردیبهشت 1395  
پذیرش: 21 تیر 1395  
ارائه در سایت: 02 مرداد 1395

کلید واژگان:

بخش آلودگی

پارکینگ چندطبقه

موقعیت درجه‌های ورودی هوا

موقعیت درجه‌های خروجی‌های آلودگی

جت فن

### چکیده

مدیریت کیفیت هوا در پارکینگ‌های چندطبقه زیرزمینی دارای چالش‌های مهمی است که از جمله آنها می‌توان به افزایش غلظت آلودگی در طبقات مختلف و جابجایی آن بین طبقات اشاره کرد. در مقاله حاضر محاسبات سیستم تهویه در پارکینگ‌های چندطبقه انجام شده و اثر ارتفاع درجه‌های ورودی هوا و خروجی آلاینده بر میزان آلودگی در طبقات و جابجایی آن بین طبقات با استفاده از شبیه‌سازی عددی بررسی شده است. همچنین معیار جدیدی برای شناخت الگوی جریان در پارکینگ‌های بسته بیان شده است. جهت حل عددی، معادلات بقا با استفاده از نرم‌افزار این فوم حل شده‌اند. به منظور اعتبارسنجی حل عددی، جریان آلودگی در یک پارکینگ شبیه‌سازی شده و نتایج حاصل از آن با نتایج اندازه‌گیری تجربی مقایسه شده است. مقایسه نتایج بیانگر دقت خوب روش حل عددی است. پس از صحت‌سنجی، انواع متداول پارکینگ‌های چندطبقه معرفی شده و اثر ارتفاع درجه‌های ورودی هوا و خروجی آلودگی و الگوی جریان بر میزان آلودگی پارکینگ‌ها بررسی شده است. نتایج بیانگر ایجاد بهترین الگوی جریان تهویه در پارکینگ‌های چندطبقه با قرارگیری درجه‌های ورودی هوا در ارتفاع 0.55 تا 0.7 بوده و از طرفی تغییر الگوی جریان باعث کاهش جابجایی آلودگی بین طبقات شده است. همچنین با استفاده از معیار جدید بیان شده در این مقاله، می‌توان سرعت توده‌ای جریان هوای ایده‌آل برای تولید جریان پیستونی در پارکینگ را بدست آورده و با استفاده از بهینه‌سازی موقعیت درجه‌های ورودی و تمیز و خروجی هوای آلوده، جریان هوا در پارکینگ را به جریان پیستونی نزدیک نمود.

## Offering a method for reducing pollution and criterion for evaluation of ventilation flow in multilevel enclosed parking lots

Javad Amnian, Mehdi Maerefat, Ghasem Heidarnejad

Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

\* P.O.B. 14115-143 Tehran, Iran, maerefat@modares.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 15 May 2016  
Accepted 11 July 2016  
Available Online 23 July 2016

#### Keywords:

Pollution dispersion  
numerical simulation  
air in let position  
exhausts position  
jet fan

### ABSTRACT

The management of air quality in enclosed parking lots has many challenges such as increasing pollution concentration and pollution movement between floors. In this article, the complete calculation of ventilation system in multilevel parking lots is presented and the effect of supply and exhaust vents height on pollution concentration and movement is investigated by using numerical simulation. Also, a new criterion for recognition of flow pattern is presented. In the numerical simulation, the conservation equations are solved by using openFoam. For validating the numerical simulation, the results are compared with available experimental results. Comparison of results showed good accuracy of numerical simulation. After that, the common multilevel parking lots are introduced and the effect of supply and exhaust vent heights on the amount of pollution in these parking lots is investigated. The results showed that, if the supply vents are installed on the non-dimensional heights of about 0.55 and exhaust vents are installed on the non-dimensional heights of about 0.55 to 0.7, the best ventilation flow pattern in the multilevel parking lots is obtained. Furthermore, by using the novel method of this paper, the ideal bulk flow velocity for development of piston flow in parking lot is obtained and the flow pattern tends to piston flow by optimizing the supply and exhaust vent heights.

### 1- مقدمه

در این مکان‌ها بسیار با اهمیت است. از طرفی آلودگی ایجاد شده در طبقات مختلف پارکینگ از طریق راهروها و راه‌پله‌ها به بخش‌های دیگر ساختمان راه یافته و مشکلات اساسی را ایجاد خواهد کرد. مطابق با استانداردهای ملی و بین‌المللی [1-4]، با توجه به اینکه پارکینگ‌های زیرزمینی در دسته پارکینگ‌های بسته طبقه‌بندی می‌شوند، نیاز به تهویه مکانیکی دارند. مهم‌ترین آلودگی موجود در پارکینگ‌های زیرزمینی منوکسیدکربن بوده و

در سال‌های اخیر تعداد ماشین‌ها به شدت افزایش یافته و متناسب با آن تقاضا برای استفاده از پارکینگ‌های زیرزمینی هم افزایش یافته است. امروزه پارکینگ‌های چندطبقه زیرزمینی در ساختمان‌های بزرگ همانند فروشگاه‌های زنجیره‌ای و مجتمع‌های تجاری ساخته شده است. با توجه به حضور افراد در پارکینگ‌های زیرزمینی، مدیریت آلودگی و بررسی کیفیت هوا

Please cite this article using:

J. Amnian, M. Maerefat, Gh. Heidarnejad, Offering a method for reducing pollution and criterion for evaluation of ventilation flow in multilevel enclosed parking lots, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 7, pp. 285-296, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

با توجه به پژوهش‌های فوق، بررسی کاهش آلودگی در پارکینگ‌های چندطبقه بسته تا به حال انجام نشده است. پارکینگ‌های چندطبقه بسته قابلیت زیادی در تجمیع آلودگی داشته و با توجه به اتصال طبقات مختلف به هم، آلودگی قابلیت جابجایی بین طبقات را دارد. در این مقاله پخش آلودگی در پارکینگ‌های چندطبقه و راهکار دقیق کاهش آلودگی در آنها مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور ابتدا روش حل با استفاده از نتایج تجربی مرجع [9] صحت‌سنجی شده است. در ادامه دو نوع متداول پارکینگ‌های چندطبقه زیرزمینی معرفی شده و مورد بررسی قرار گرفته و راه کار مناسب برای کاهش آلودگی در آنها بیان شده است.

مؤلفان مقاله در کار قبلی خود [14] با استفاده از حل عددی، بازه ارتفاع بی‌بعد 0.5 تا 0.7 را جهت نصب دریچه‌های خروجی آلاینده برای یک پارکینگ یک طبقه پیشنهاد داده‌اند. با توجه به پژوهش فوق، در صورتی که دریچه‌های خروجی آلاینده در این بازه ارتفاعی قرار گیرند، بهترین شرایط کیفیت هوا در پارکینگ ایجاد خواهد شد.

در ادامه تحقیقات قبلی در مقاله حاضر، پخش آلودگی در پارکینگ‌های چندطبقه بررسی شده و بازه ارتفاع بی‌بعد مناسب دریچه‌های ورودی هوای تمیز و دریچه‌های خروجی آلودگی جهت ایجاد کیفیت هوای مناسب در آنها پیشنهاد شده است. علاوه بر این، بهترین رژیم جریان (جریان پیستونی) برای برقراری کیفیت هوای مناسب در پارکینگ بیان شده و معیار جدیدی جهت ایجاد جریان فوق ارائه شده است. همچنین اثر جریان پیستونی بر جابجایی آلودگی بین طبقات و میزان آلودگی در طبقات مختلف پارکینگ مورد بررسی قرار گرفته است. معیار بیان شده در این مقاله جهت تولید جریان پیستونی در پارکینگ برای اولین بار بیان شده و نتایج بیانگر صحت و دقت مناسب این معیار است.

## 2- معادلات حاکم

معادلات حاکم شامل معادلات بقای جرم، مومنتم، انرژی و گونه آلودگی با استفاده از حلگر ری‌اکتینگ فوم<sup>3</sup> در نرم افزار اپن فوم<sup>4</sup> حل شده‌اند. جریان هوا و آلودگی از نوع جریان‌های آشفته هستند و بدین منظور برای شبیه‌سازی آشفته‌گی از مدل  $k-\epsilon$  استفاده شده که مطابق با پژوهش‌های پیشین است. [16,15,9]. دلیل استفاده از این مدل دقت کافی برای حل جریان تهویه است. همچنین با توجه به عدد اشمیت، مقدار نفوذپذیری جرمی کمتر از نفوذ مومنتم بوده و در نتیجه بین ذرات منوکسیدکربن و ذرات هوا تعادل برقرار است. مدل انتخابی آشفته‌گی تنها باعث تغییراتی در دقت محاسبات شده و بر روی پخش جریان آلودگی در پارکینگ با توجه به دقت مورد انتظار تأثیر عمده ندارد. معادلات بقا با اعمال متوسط‌گیری زمانی به صورت روابط زیر بیان می‌شوند:

معادله بقای جرم:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U_i) = 0 \quad (1)$$

معادله بقای مومنتم:

$$\frac{\partial (\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} [\mu S_{ij} - \rho \overline{u'_i u'_j}] + S_m \quad (2)$$

در رابطه (2) پارامتر  $S_m$  بیانگر جمله منبع بوده و تانسور نرخ کرنش متوسط  $(S_{ij})$  از رابطه (3) بدست می‌آید:

میزان تهویه لازم برای کاهش آن برای رقیق‌سازی دیگر آلاینده‌ها همچون اکسیدهای نیتروژن کافی است [2].

افراد حاضر در پارکینگ در بازه‌های زمانی متفاوتی در معرض منوکسیدکربن منتشره از ماشین‌ها هستند [6,5]. به عنوان مثال کارمندان و نیروهای خدماتی پارکینگ در دوره‌های زمانی تا 12 ساعت در پارکینگ حضور داشته و در بازه‌ی زمانی طولانی‌ای در معرض منوکسیدکربن قرار دارند. همچنین افرادی که به ساختمان مراجعه می‌کنند، در بازه‌های زمانی کم (معمولاً کمتر از 10 دقیقه) در پارکینگ حضور داشته و در بازه‌ی زمانی کوتاهی در معرض منوکسیدکربن قرار دارند. بنابراین قرارگیری فرد در معرض منوکسیدکربن در هر بازه‌ی زمانی با اهمیت بوده و نیاز به طراحی سیستم تهویه مناسب بسیار ضروری است. از طرفی استانداردهای مختلف از میانگین وزنی زمانی  $(TWA^1)$  برای بیان میزان منوکسیدکربن و میزان هوای تهویه استفاده کرده‌اند. این پارامتر بیانگر حداکثر میزان منوکسیدکربنی است که در مدت زمان معلوم اثر نامطلوب بر فرد نمی‌گذارد. در جدول 1 مقدار مجاز آلودگی و مقدار هوای لازم جهت تهویه در استانداردهای مختلف بیان شده است. بررسی مستقیم سیستم تهویه در پارکینگ‌های چندطبقه زیرزمینی در پژوهش‌های موجود انجام نگرفته است. تحقیقات در این زمینه تنها در زمینه شبیه‌سازی پخش آلاینده در پارکینگ‌های بسته و یک طبقه و به صورت محدود موجود است. هو و همکاران [7] یک آزمایش تجربی را برای بدست آوردن رابطه بین الگوی ترافیک و منوکسیدکربن تولیدی در یک پارکینگ بسته انجام داده و میزان منوکسیدکربن را برای اساس حجم ترافیک و زمان حرکت ماشین‌ها در پارکینگ بیان کرده‌اند. رابطه آنها برای تخمین میزان هوای تهویه مناسب است. پاپاکونستانینو و همکاران [8] پیشنهاد داده‌اند که برای پارکینگ‌های زیرزمینی بسته از تهویه مکانیکی استفاده شود. آسیماکوپولو و همکاران [9] میزان آلودگی را در چندین نقطه از یک پارکینگ بسته اندازه‌گیری کرده و ارائه داده‌اند. دومینگو و همکاران [10] با استفاده از شبیه‌سازی عددی به این نتیجه رسیدند که تغییر شکل دریچه‌های ورودی به مستطیلی با نسبت عرض به ارتفاع زیاد باعث هدایت بهتر جریان آلودگی به سمت دلخواه خواهد شد. السافتی و ابوالعظم [11] شبیه‌سازی عددی پخش آلودگی در یک پارکینگ بسته نمونه را انجام داده و اثر موقعیت دریچه‌های خروجی را بررسی کرده‌اند. کراتی و همکاران [12] با استفاده از اندازه‌گیری تجربی میزان منوکسیدکربن در هفت پارکینگ نمونه، رابطه‌ای جهت بدست آوردن میزان هوای تهویه پیشنهاد داده‌اند. لوپز و همکاران [13] با استفاده از اندازه‌گیری تجربی میزان آلودگی در چندین پارکینگ رابطه فوق را بهبود بخشیده و اثر پارامترهایی همچون سرعت ماشین‌ها در پارکینگ، نوع مصرف پارکینگ، تعداد ماشین‌های روشن و شیب مسیر را هم به رابطه کراتی و همکاران اضافه نموده‌اند.

جدول 1 حد مجاز آلودگی و میزان تعویض هوا در استانداردهای مختلف [12]

Table 1 pollution and air change limits in standards [12]

| سازمان           | زمان (ساعت) | آلودگی (ppm) | نرخ تهویه                               |
|------------------|-------------|--------------|---|
| ASHRAE 62-1999   | 8           | 9            | 7.5 lit s <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> |
| ASHRAE 62-1999   | 1           | 35           | 7.5 lit s <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> |
| NIOSH/OSHA       | 8           | 35           | -                                       |
| U.K. Standard    | 8           | 50           | 6-10 ACH                                |
| IMC <sup>2</sup> | -           | -            | 3.8 lit s <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> |

<sup>1</sup> Time weighting average

<sup>2</sup> International mechanical code

<sup>3</sup> reactingFoam

<sup>4</sup> openFoam

صورت فشار خروجی<sup>2</sup> در نظر گرفته شده است. میزان سرعت هوا در درب‌های A1 و A2 مطابق با جدول 2 است [9]. جهت ایجاد سرعت مورد نظر در هر کدام از درب‌های فوق، دامنه‌ی حل به اندازه 10 برابر قطر هیدرولیکی درب‌ها به سمت خارج هندسه امتداد یافته و جریان در ورودی آنها با روش سعی و خطا به گونه‌ای تنظیم شده است که میزان سرعت مطابق با جدول 2 بدست آید. همچنین دریچه‌های ورودی موجود بر کانال‌های S1 و S2 و دریچه‌های خروجی موجود بر کانال‌های E1 تا E3 به صورت ورودی سرعت در نظر گرفته شده‌اند. میزان سرعت در هر کدام از دریچه‌های فوق در جدول‌های 3 و 4 بیان شده است. مقدار سرعت‌های منفی در جدول 4 بیانگر خروج جریان از دریچه مورد نظر است. موقعیت دریچه‌های فوق از شمالی-ترین نقطه هر کدام از کانال‌های S و E اندازه‌گیری شده است. دمای هوای ورودی از دریچه‌های ورودی کانال S و درب A1 برابر با 20 درجه سانتی‌گراد است. در حل عددی میزان پارامترهای  $k$  و  $\epsilon$  در هر کدام از ورودی‌ها و خروجی‌ها با توجه به روابط (12,11) بدست آمده است [18-20].

$$k = \frac{3}{2} (UI)^2 \quad (11)$$

$$\epsilon = \frac{C_\mu^{0.75} k^{1.5}}{l} \quad (12)$$

در روابط (12,11)، پارامترهای  $l$  و  $I$  به ترتیب بیانگر شدت توربولانس<sup>3</sup> (نسبت جزء اغتشاشی سرعت به سرعت متوسط) و طول اختلاطی<sup>4</sup> هستند. برای محاسبه مقدار شرایط مرزی  $k$  و  $\epsilon$  در ورودی‌ها، شدت توربولانس برابر با 5% و طول اختلاطی برابر با 7% قطر هیدرولیکی هر مرز در نظر گرفته شده است ( $l=0.07d_h$ ). همچنین جهت دیواره‌ها از شرط مرزی تابع دیواره<sup>5</sup> برای هر دو پارامتر  $k$  و  $\epsilon$  استفاده شده و در خروجی‌ها هم از شرط مرزی گرایان صفر استفاده شده است. در رابطه (12)، مقدار  $C_\mu$  با توجه به داده‌های تجربی برابر با 0.09 است [19]. دیواره‌های پارکینگ به صورت شرط مرزی عدم لغزش با دمای محیط (20 درجه سانتی‌گراد) در نظر گرفته شده‌اند. در زمان صفر، میزان آلودگی موجود در پارکینگ صفر بوده و فقط هوا با دمای 20 درجه سانتی‌گراد در آن موجود است.

به منظور شبکه‌بندی هندسه شکل 1، شبکه محاسباتی در نزدیکی محدوده ورودی‌ها و خروجی‌ها و محدوده نزدیک به محل منابع آلودگی ریزتر در نظر گرفته شده و در نزدیکی دیواره‌ها هم از شبکه لایه مرزی استفاده شده است. بدین ترتیب پس از بررسی استقلال حل از اندازه شبکه، در حدود 120000 سلول نامنظم برای شبکه‌بندی انتخاب شده است.

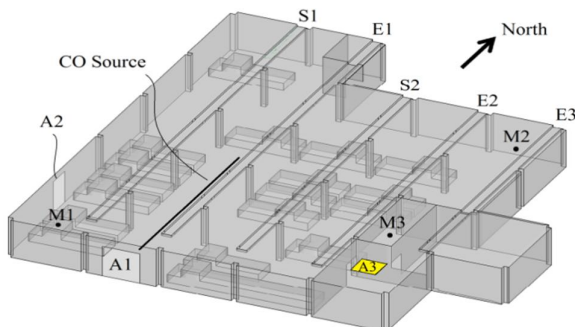


Fig. 1 The studied Car park geometry [9]

شکل 1 هندسه پارکینگ مطالعه شده [9]

<sup>2</sup> Pressure outlet

<sup>3</sup> Turbulence Intensity

<sup>4</sup> Turbulent Mixing Length

<sup>5</sup> kqRWallFunction, epsilonWallFunction

$$S_{ij} = \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \quad (3)$$

همچنین در رابطه (2)، جمله تنش‌های رینولدز به صورت رابطه (4) تعریف می‌شود.

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t S_{ij} - \frac{2}{3} \left( \rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (4)$$

در رابطه (4) پارامتر  $\mu_t$  بیانگر لزجت آشفتگی بوده و با استفاده از ترکیب انرژی جنبشی و نرخ اضمحلال آن مدل شده است:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (5)$$

معادله بقای انرژی محسوس (انتالپی):

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j h)}{\partial x_j} = \frac{DP}{Dt} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho \alpha \frac{\partial h}{\partial x_j} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) + S_h \quad (6)$$

در رابطه (6) پارامتر  $S_h$  بیانگر جمله‌ی منبع و منب  $Pr_t$  بیانگر عدد پرانتل آشفتگی حرارتی بوده و مقدار آن برابر با 0.85 است [17]. معادله بقای گونه:

$$\frac{\partial(\rho C_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j C_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho D \frac{\partial C_i}{\partial x_j} + \frac{\mu_t}{Sch_t} \frac{\partial C_i}{\partial x_j} \right) + S_C \quad (7)$$

در رابطه (7) پارامتر  $S_C$  بیانگر جمله منبع و منب  $Sch_t$  بیانگر عدد اشمیت (نسبت نفوذ مومنتم به نفوذپذیری جرمی) آشفتگی بوده و مقدار آن برابر با 0.7 است [15]. برای شبیه‌سازی آشفتگی، معادلات انتقال  $k$  و  $\epsilon$  به صورت روابط (8,9) بیان شده‌اند:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j \epsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\epsilon}{k} (G_k + G_b) - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k} \quad (9)$$

در معادلات (8,9) دو جمله  $G_b$  و  $G_k$  به ترتیب بیانگر تولید انرژی جنبشی توربولانسی و تولید انرژی جنبشی توربولانسی به دلیل نیروی شناوری هستند. معادلات بیانگر این دو جمله به صورت رابطه (10) است.

$$G_k = -\rho \overline{u_i u_j} \frac{\partial U_j}{\partial x_i}, \quad G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_j} \quad (10)$$

پارامترها و ثوابت موجود در معادلات بقای انرژی جنبشی و اضمحلال به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$C_\mu = 0.09, C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$$

### 3- صحت سنجی

برای صحت‌سنجی حل عددی از هندسه شکل 1 استفاده شده است [9]. دلیل استفاده از این هندسه، وجود نتایج تجربی حاصل از اندازه‌گیری مونوکسیدکربن در چندین نقطه از پارکینگ است [9]. ظرفیت پارکینگ فوق 25 ماشین بوده و دارای سه درب A1 (3x2.85 مترمربع)، A2 (3x2 مترمربع) و A3 (2x2 مترمربع) است. علاوه بر این می‌توان کانال‌های S1، S2 و E1 تا E3 را هم مشاهده نمود. دریچه‌های ورودی هوا و خروجی آلودگی (با ابعاد 0.2 در 0.4 مترمربع) به ترتیب بر روی کانال‌های S و E قرار داشته و در دو سمت کانال‌های فوق مطابق با مرجع [9] پخش شده‌اند.

### 3-1- شرایط مرزی و شبکه بندی

در این مقاله، درب‌های A1 و A2 به صورت ورودی سرعت<sup>1</sup> و درب A3 به

<sup>1</sup> Velocity inlet

شده است. مقدار دبی جرمی متوسط منوکسیدکربن خروجی از منبع آلودگی در بازه زمانی فوق در شکل 2 نمایش داده شده است [22,9]. همان گونه که در شکل فوق مشاهده می شود، برای صحت سنجی در این مقاله از مقدار بیان شده در مقاله مرجع در بازه های زمانی 15 دقیقه ای متوسط گیری شده و مقدار دبی جرمی<sup>1</sup> ثابت در هر بازه زمانی به این فوم داده شده است. همچنین میزان دمای گازهای خارج شده از آگروز در حالت آماده به کار<sup>2</sup> ماشین 70 درجه سانتی گراد است [23]. نتایج حاصل از حل عددی در شکل های 3 و 4 نمایش داده شده است. در هر دو نمودار، غلظت منوکسیدکربن بدست آمده از حل عددی از نظر کمی و کیفی مطابق با نتایج حاصل از اندازه گیری تجربی [9] است. در مقاله حاضر دقت قابل قبول بوده و در حد انتظار برای مسائل طراحی و تهویه است. دلیل تفاوت را می توان به موارد زیر نسبت داد:

1- در حل عددی فرض شده که منوکسیدکربن از یک منبع ثابت وارد فضای پارکینگ شده و مدل سازی حرکت ماشین بدین وسیله انجام شده است در حالی که در عمل، ماشین در طی حرکت در راهرو اصلی پارکینگ شبیه به یک منبع متحرک عمل کرده و در هر لحظه از زمان منبع آلودگی در یک نقطه از راستای یاد شده قرار دارد.

2- موتور ماشین در ابتدای روشن شدن سرد بوده و در نتیجه منوکسیدکربن تولیدی آن بیش از حالت کارکرد عادی بوده و این پدیده هم عاملی برای ایجاد تفاوت بین نتایج اندازه گیری تجربی و شبیه سازی عددی است.

بنابراین وجود اندکی تفاوت بین نتایج حاصل از حل عددی و نتایج تجربی قابل قبول است [24]. لازم به ذکر است که نتایج بدست آمده از این فوم به صورت کسر جرمی بوده و با ضرب آن در  $10^6$ ، به ppm تبدیل شده اند.

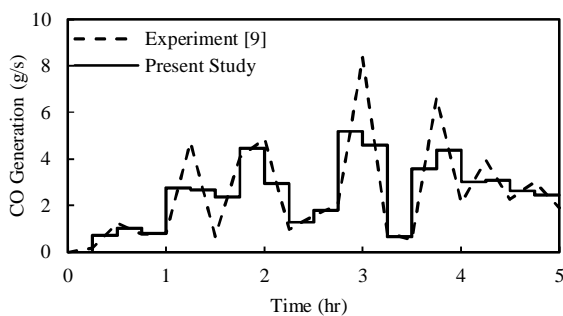


Fig. 2 CO generation in 5 hour  
شکل 2 تولید منوکسیدکربن در بازه زمانی 5 ساعته

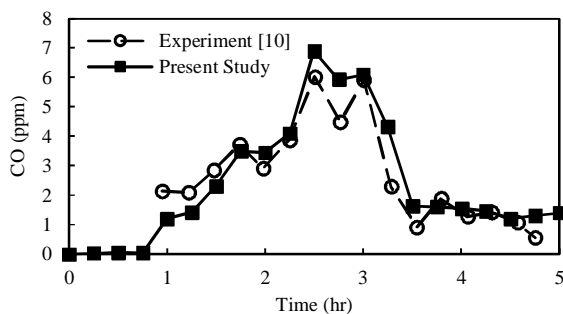


Fig. 3 Comparison of results, position M1  
شکل 3 مقایسه نتایج در موقعیت M1

<sup>1</sup> FlowRate boundary condition

<sup>2</sup> Idle

جدول 2 سرعت هوا در ارتفاع های مختلف درب A1 و A2 [9]

Table 2 Air velocity in different heights of A1 and A2 [9]

| ارتفاع (m) | سرعت درب A1 (m/s) | سرعت درب A2 (m/s) |
|------------|-------------------|-------------------|
| 0.7        | 0.39              | -0.43             |
| 1.35       | 0.24              | -0.49             |
| 2.1        | 0.21              | -0.33             |

جدول 3 سرعت جریان هوای ورودی از دریچه های ورودی هوا [9]

Table 3 Air velocity of inlet vents [9]

| موقعیت (m) | S1 <sub>West</sub> (m/s) | S1 <sub>East</sub> (m/s) | S2 <sub>West</sub> (m/s) | S2 <sub>East</sub> (m/s) |
|------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 3.6        | 0                        | 0                        | 1.5                      | 0                        |
| 9.7        | 1                        | 1                        | 0.9                      | 0                        |
| 16.6       | 1.3                      | 0                        | 1.5                      | 0                        |
| 21         | 1.2                      | 0.8                      | 1.4                      | 1.4                      |
| 27.8       | 2.3                      | 3.6                      | 3.3                      | 3.1                      |

جدول 4 سرعت جریان خروجی از دریچه های خروجی آلودگی [9]

Table 4 Pollution velocity from exhaust vents [9]

| موقعیت (m) | E1 <sub>West</sub> (m/s) | E1 <sub>East</sub> (m/s) | E2 <sub>West</sub> (m/s) | E2 <sub>East</sub> (m/s) | E3 <sub>West</sub> (m/s) | E3 <sub>East</sub> (m/s) |
|------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 3.6        | -4.9                     | -1.4                     | -3.5                     | 0                        | 0                        | 0                        |
| 9.7        | -2.8                     | 0                        | 0                        | 0                        | 0                        | 0                        |
| 16.6       | -4.4                     | 0                        | -5.6                     | 0                        | -4.1                     | -2                       |
| 21         | -3.7                     | -6.7                     | 0                        | 0                        | -1                       | 0                        |
| 27.8       | -4.9                     | -1.9                     | -3.2                     | -5.6                     | 0                        | 0                        |

### 3-2- مدل سازی منابع آلودگی

برای مدل سازی منابع آلودگی متحرک (ماشین های متحرک) در پارکینگ می توان از روش های متفاوتی استفاده نمود. روش شبکه متحرک، روش دیواره متحرک و روش شبکه لغزنده از نمونه روش هایی هستند که برای مدل سازی جسم متحرک مورد استفاده قرار می گیرند [21]. هدف پژوهش حاضر حرکت ماشین نبوده و برآورد پخش آلودگی ناشی از ماشین ها است. بنابراین در این مقاله برای کاهش حجم محاسبات ناشی از مدل سازی حرکت ماشین، اثر آن در نظر گرفته شده است. بدین منظور با توجه به این که ماشین تنها در راهروی اصلی پارکینگ (راهروی مقابل درب A1) حرکت می کند، منابع نشر آلودگی هم در این راهرو قرار گرفته اند. بدین منظور از یک منبع ثابت جهت مدل سازی منبع آلودگی استفاده شده است. منبع فوق استوانه ای به قطر 10 سانتی متر و طول 20 متر است که در ارتفاع 25 سانتی متر (محلی که آگروز ماشین قرار دارد) در راستای حرکت ماشین در نظر گرفته شده و میزان دبی منوکسیدکربن تولیدی ماشین به عنوان شرط مرزی این منبع آلودگی به این فوم داده شده است. به عبارتی دیگر به جای در نظر گرفتن حرکت ماشین و وجود منبع متحرک در دامنه حل، یک منبع حجمی ثابت در راهروی اصلی پارکینگ در نظر گرفته شده است.

### 3-3- اعتبار سنجی

حل عددی توزیع هوا و آلودگی در پارکینگ شکل 1 با شرایط مرزی بیان شده در قسمت قبل و با استفاده از حلگر ری اکتیو فوم انجام شده است. در مقاله حاضر نتایج حاصل از حل عددی به صورت غلظت منوکسیدکربن در دو موقعیت M1 و M2 در پارکینگ بدست آمده و با نتایج اندازه گیری مقایسه شده است. تغییرات غلظت منوکسیدکربن با زمان در دو نقطه M1 و M2 در یک بازه زمانی 5 ساعته در مرجع [9] ارائه شده و جهت صحت سنجی انتخاب

#### 1-4- محاسبات تهویه و پخش آلودگی

برای بدست آوردن میزان هوای تهویه در پارکینگ های چندطبقه شکل 5 باید از روش کرارتی و همکاران [12] استفاده شود. بر اساس این روش برای بدست آوردن میزان هوای تهویه باید تعداد ماشین های روشن ( $N$ )، نرخ انتشار آلاینده از ماشین ها ( $E$ )، سطح پارکینگ ( $A$ )، زمان متوسط حرکت ماشین در پارکینگ ( $T$ ) و میزان آلودگی مجاز در پارکینگ (پارامتر تعیین کننده برای  $C$  [2]) را در رابطه (13) قرار داده و میزان دبی هوای تهویه را بر حسب لیتر بر ثانیه به ازای واحد سطح پارکینگ بدست آورد.

$$q_{vent} = C \cdot T \frac{N \cdot E \times 60}{A \cdot E_0} \times 100 \quad (13)$$

در رابطه (13)،  $E_0$  بیانگر نرخ انتشار آلاینده نرمالیزه شده از ماشین ها است. همچنین میزان هوای ورودی به پارکینگ باید بین 75% تا 90% هوای تهویه (گازاست) باشد [3]. در جدول 5 مقادیر لازم جهت محاسبه هوای تهویه و مقدار بدست آمده از رابطه (13) در هر کدام از دو پارکینگ شکل 5 بیان شده است. در محاسبات هوای تهویه، میزان آلودگی خروجی از هر کدام از ماشین های روشن با توجه به مرجع [12] محاسبه شده است. جهت شبیه سازی عددی بدترین حالت از نظر تولید آلودگی برای پارکینگ در نظر گرفته است. در این حالت فرض شده است که در راهروهای هر کدام از طبقات 20 ماشین روشن قرار داشته و دبی خروجی آلودگی از هر ماشین با توجه به کارکرد عادی ماشین ها (18.97 گرم بر دقیقه [9]) است. بنابراین میزان آلودگی ورودی به هر طبقه از منابع آلودگی برابر با 379.4 گرم بر دقیقه است (20×18.97) (منابع آلودگی در شکل 5 با خطوط مشکی نمایش داده شده اند و دارای 20 متر طول و قطر 10 سانتی متری بوده و در ارتفاع 25 سانتی متری از سطح زمین قرار دارند. همچنین فاصله منابع آلودگی از دو انتهای هر طبقه برابر بوده و در وسط راهروها قرار گرفته اند. از هر کدام از منابع نمایش داده شده در شکل 5 آلودگی ای معادل با 10 ماشین خارج می شود، بنابراین با توجه به اینکه در هر طبقه دو خط مشکی نمایش داده شده، میزان آلودگی ورودی به هر طبقه یا نیم طبقه معادل با آلودگی خارج شده از 20 ماشین است). هر کدام از طبقات و نیم طبقات پارکینگ شکل 5 دارای 60 متر طول، 30 متر عرض و 2.85 متر ارتفاع هستند. همچنین هر طبقه دارای سه دریچه ورودی هوای تمیز به ابعاد 1 متر در 1 متر (1 متر مربع) و سه دریچه خروجی آلودگی به اندازه 1 متر در 1 متر (1 متر مربع) است. هر دریچه خروجی آلودگی دارای یک فن گازاست است که آلودگی را به سمت دودکش خروجی هدایت می کند. همچنین با توجه به اینکه طول پارکینگ در هر طبقه بیش از 54 متر است از فن القایی<sup>2</sup> (نوعی جت فن) جهت جابجایی هوا در پارکینگ استفاده شده است.

جدول 5 مقدار پارامترهای رابطه (13)

| پارامتر       | واحد                        | پارکینگ 1 | پارکینگ 2 |
|---------------|-----------------------------|-----------|-----------|
| $N$           | -                           | 60        | 140       |
| $E$ [2]       | g/min                       | 18.97     | 18.97     |
| $E_0$ [2]     | g/hm <sup>2</sup>           | 26.7      | 26.7      |
| $A$           | m <sup>2</sup>              | 5400      | 12600     |
| $C$ [2]       | (lit/s)/(m <sup>2</sup> /s) | 0.000481  | 0.000481  |
| $T$           | s                           | 120       | 150       |
| $q_{vent}$    | lit/sm <sup>2</sup>         | 2.73      | 3.42      |
| $Q_{inlet}$   | m <sup>3</sup> /s           | 14.75     | 43        |
| $Q_{exhaust}$ | m <sup>3</sup> /s           | 17.36     | 50.6      |

<sup>2</sup> Induced fan

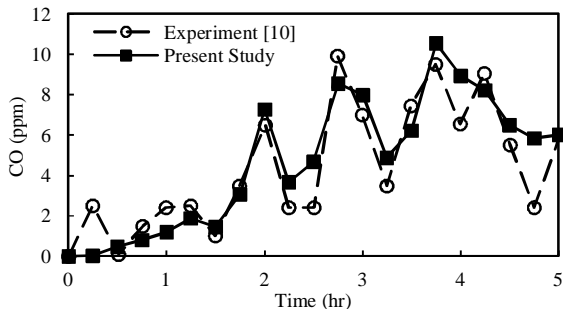


Fig. 4 Comparison of results, position M2

شکل 4 مقایسه نتایج در موقعیت M2

#### 4- نتایج

پارکینگ های چندطبقه دارای پیچیدگی های مختلفی هستند و عامل متمایز کننده آنها نحوه استفاده از رمپ<sup>1</sup> جهت جابجایی ماشین ها بین طبقات است. در حالت کلی یا طبقات پارکینگ به طور کامل از یکدیگر جدا بوده و تنها با رمپ به یکدیگر مرتبط هستند و یا تمام طبقات از راهی به جز رمپ ها هم به یکدیگر راه دارند. دو هندسه متداول پارکینگ های بسته چندطبقه در شکل 5 نمایش داده شده است [25-27]. با توجه به شکل 5 پارکینگ 1 دارای طبقاتی جدا از هم است و آلودگی بین طبقات تنها از طریق رمپ ها قابل انتقال است. در پارکینگ 2 علاوه بر رمپ ها، اتصال بین نیم طبقه ها هم عامل انتقال آلودگی بین بخش های مختلف پارکینگ است. در ادامه ابتدا محاسبات مربوط به تهویه در پارکینگ های بیان شده در شکل 5 انجام شده و سپس راهکار مناسب افزایش کیفیت هوا در آنها بیان شده است.

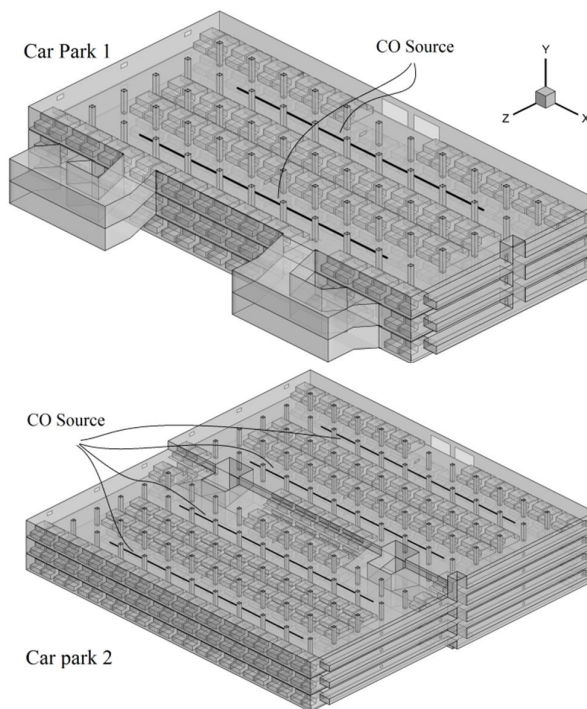


Fig. 5 Common layouts of multi-level car parks

شکل 5 هندسه های متداول پارکینگ های چندطبقه

<sup>1</sup> Ramp

در پارکینگ 2 بعد از 40 دقیقه میزان میانگین آلودگی ثابت شده است. نتایج شکل 6 بیانگر این است که میزان آلودگی در دو طبقه زیرین تقریباً یکسان بوده و میزان آلودگی در طبقه سوم که از طریق درب پارکینگ به بیرون راه دارد، با دو طبقه زیرین تفاوت دارد. میزان میانگین آلودگی در 60 دقیقه در طبقات اول تا سوم به ترتیب برابر با 44.3، 41.3 و 35 ppm است. بنابراین میزان آلودگی در هر سه طبقه بیش از مقدار مجاز اشرفی<sup>5</sup> (مطابق با جدول 1) است. نتایج شکل 7 هم بیانگر کاهش میزان آلودگی از طبقات پایینتر به سمت طبقات بالاتر است. البته تغییرات میزان آلودگی در طبقات مختلف نسبت به حالت قبلی کمتر بوده و دلیل آن هم اتصال طبقات مختلف به یکدیگر است. میانگین غلظت آلودگی یک ساعته در طبقات مختلف پارکینگ 2 از طبقه اول تا هفتم به ترتیب برابر با 49، 46.7، 44.3، 41.7، 39.5 و 37 ppm است. بنابراین به جز طبقه هفتم بقیه طبقات دارای آلودگی بیش از حد مجاز اشرفی هستند.

علاوه بر میزان غلظت منوکسیدکربن که معیاری مستقیم در بیان کیفیت هوا در فضاهای بسته است، کارایی خروج منوکسیدکربن هم بیانگر کیفیت سیستم تهویه است. با استفاده از این پارامتر می توان میزان خروجی آلاینده و نوع جریان موجود در پارکینگ را شناسایی نمود. چنان و چو [28] از رابطه (14) جهت بیان کارایی خروجی منوکسیدکربن در پارکینگ های بسته استفاده نموده اند.

$$\xi = \frac{C_{\text{exit}}}{C_{\text{average}}} \quad (14)$$

در رابطه (14)  $C_{\text{exit}}$ ،  $C_{\text{average}}$  به ترتیب بیانگر غلظت آلاینده در دریچه های خروجی و غلظت متوسط آلاینده در کل فضای پارکینگ هستند. جریان تهویه با توجه به کارایی خروجی منوکسیدکربن به چهار دسته مطابق با جدول 6 تقسیم بندی می شوند. در حالت کلی بهترین حالت برای تهویه، ایجاد جریان پیوستونی است. هر چه جریان از حالت اتصال کوتاه فاصله گرفته و به جریان پیوستونی نزدیک شود، آلودگی ها با کارایی بهتری به سمت دریچه های خروجی آلاینده هدایت شده اند. بنابراین با استفاده از تولید جریان پیوستونی در پارکینگ، میزان آلودگی در فضای داخلی پارکینگ کمتر و کیفیت هوای داخلی پارکینگ بیشتر خواهد بود. البته قرارگیری جریان در دسته جریان اختلاطی و جایجایی هم بیانگر ترکیب مناسب آلودگی ها با هوای ورودی است. در پارکینگ های 1 و 2 میزان میانگین کارایی خروجی منوکسیدکربن به ترتیب برابر با 0.94 و 1.03 بوده و تقریباً از نوع جریان اختلاطی هستند. برای مقابله با حجم زیاد آلودگی موجود در پارکینگ می توان حجم هوای تهویه و اگزاست را افزایش داد. افزایش حجم هوای تهویه یا اگزاست به معنی افزایش مصرف انرژی است، زیرا توان مصرفی انرژی با دبی تهویه به توان 3 رابطه مستقیم داشته و در نتیجه با افزایش میزان هوای تهویه یا اگزاست، میزان مصرف انرژی هم افزایش می یابد. بنابراین افزایش هوای تهویه یا اگزاست، روش مناسبی برای افزایش کیفیت هوای داخلی پارکینگ چند طبقه نیست و باید از راهکاری استفاده کرد که هم مصرف انرژی را افزایش ندهد و هم باعث افزایش کیفیت هوای داخلی پارکینگ شده و جریان تهویه در پارکینگ را به جریان پیوستونی نزدیک کند. معیار جدید جهت بررسی جریان پیوستونی در پارکینگ و دو راهکار مناسب جهت ایجاد آن در پارکینگ بدون تغییر در مصرف انرژی در ادامه بیان شده است.

#### 2-4- بیان معیار تولید جریان پیوستونی در پارکینگ

جهت انتخاب فن القایی و فن اگزاست برای هر کدام از طبقات، از فن های شرکت فن تک<sup>1</sup> استفاده شده است. با توجه به مقادیر اگزاست بدست آمده در جدول 5، برای پارکینگ 1 از فن اگزاستی استفاده شده که حداکثر دبی عبوری از آن 2.2 مترمکعب بر ثانیه است. همچنین برای پارکینگ 2 از فن اگزاستی استفاده شده است که حداکثر دبی عبوری از آن 3 مترمکعب بر ثانیه است. کاربرد هر دو مدل فن اگزاست بیان شده، تهویه هوا در فضاهای بزرگ است. با توجه به هندبوکهای طراحی تهویه پارکینگها [25]، در صورتیکه طول پارکینگ بیش از 54 متر باشد باید از جت فن جهت به جریان انداختن هوا استفاده شود. جهت انتخاب فن القایی باید به روش استاندارد استرالیا عمل نمود. بر اساس این روش هر 100 مترمربع از سطح پارکینگ نیاز به 5 نیوتن نیروی پیشران<sup>2</sup> دارد [3]، بنابراین هر طبقه از پارکینگ های شکل 5 نیاز به 90 نیوتن نیروی پیشران دارند. برای تامین این میزان نیروی پیشران در هر طبقه از دو فن القایی شرکت فن تک استفاده شده است. مدل انتخاب شده مدل مناسبی جهت تهویه در پارکینگ های شکل 5 است زیرا دارای حداکثر نیروی پیشران 47 نیوتن و حداکثر دبی 1.5 مترمکعب بر ثانیه است. همچنین، عرض و ارتفاع دریچه های خروجی هوای فن القایی به ترتیب برابر با 70 و 70 سانتی متر است.

با توجه به اینکه طبقات در هر دو پارکینگ یکسان هستند، تعداد سلول های محاسباتی پس از بررسی استقلال حل از اندازه شبکه برای هر کدام از طبقات حدود 1200000 سلول است. سلول ها در نزدیکی دیواره ها از نوع شبکه لایه مرزی انتخاب شده و در نزدیکی منابع آلودگی، فن های القایی و دریچه های ورودی و خروجی به حد کافی ریز شده است. بنابراین پارکینگ های 1 و 2 به ترتیب دارای 3600000 و 8400000 سلول محاسباتی هستند.

با توجه به محاسبات انجام شده، شرایط مرزی مرتبط با حل عددی جهت هر کدام از پارکینگ های 1 و 2 قابل بیان است. بدین منظور تمام دیواره های پارکینگ دارای شرط مرزی عدم لغزش و دمای محیط (20 درجه سانتی گراد) هستند. همچنین مقادیر پارامترهای توربولانسی هم از نوع تابع دیواره بیان شده در بخش 1-3 است. شرط مرزی دریچه های ورودی از نوع ورودی سرعت با مقدار 1.64 و 2 متر بر ثانیه به ترتیب برای پارکینگ های 1 و 2 با دمای 20 درجه سانتی گراد و پارامترهای توربولانسی مطابق با بخش 1-3 هستند. شرط مرزی هر کدام از دریچه های خروجی از نوع شرط مرزی فن<sup>3</sup> با دبی به ترتیب 1.93 و 2.4 مترمکعب بر ثانیه برای پارکینگ های 1 و 2 است. شرط مرزی فن های القایی از نوع شرط مرزی فن<sup>4</sup> با دبی 1.5 مترمکعب بر ثانیه و فشار 200 Pa است. منابع آلودگی در هر طبقه دارای شرط مرزی دبی ورودی بیان شده بوده و میزان حرارت خروجی از آنها با توجه به دمای 70 درجه سانتی گراد بدست آمده است. همچنین در همه ی خروجی ها مقدار دما و پارامترهای توربولانسی از نوع گرادیان صفر هستند.

با توجه به موارد گفته شده حل عددی جریان هوا و آلودگی در پارکینگ انجام شده است. در صورتی که طبقات پارکینگ 1 از پایین به بالا از 1 تا 3 شماره گذاری شده و نیم طبقات پارکینگ 2 از پایین به بالا از 1 تا 7 شماره گذاری شوند، میزان غلظت منوکسیدکربن متوسط در طبقات مختلف پارکینگ به صورت شکل های 6 و 7 است. نتایج هر دو شکل بیانگر این است که میزان آلودگی در طبقات پایینتر بیش از طبقات بالاتر است. همچنین نتایج هر دو شکل نشان دهنده این است که در پارکینگ 1 بعد از 50 دقیقه و

<sup>1</sup> FANTECH: <http://www.fantech.com.au>

<sup>2</sup> Thrust

<sup>3</sup> Fan boundary condition

<sup>4</sup> Fan boundary condition

<sup>5</sup> ASHRAE

یک پارکینگ مکعب مستطیل شکل به صورت رابطه بی بعد (15) است:

$$U_{cr}^* = 0.78(HRR^*)^{1/4} \quad (15)$$

در رابطه (15) پارامتر  $U_{cr}^*$  بیانگر سرعت بحرانی تهویه بی بعد و  $HRR^*$  بیانگر نرخ رهایش حرارت بی بعد است. رابطه فوق جهت بدست آوردن سرعت بحرانی تهویه در پارکینگ های دارای آتش سوزی است که در این مقاله برای حالت بدون آتش سوزی تغییر و توسعه یافته و مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به اینکه انجام آزمایش در پارکینگ ها هزینه بر و زمان بر است این روش و معادله بدست آمده از آن برای تخمین میزان آلاینده ها در انواع پارکینگ ها قابل قبول است [31]. همچنین نتایج بیانگر این است که استفاده از رابطه فوق در تعیین الگوی جریان در پارکینگ دارای دقت مناسبی است. سرعت تهویه و نرخ رهایش حرارت بی بعد به صورت رابطه (16) تعریف شده اند [30]:

$$U_{cr}^* = U_{bulk} / \sqrt{gD_h} \quad (16)$$

$$HRR^* = HRR / \rho C_p T \sqrt{gD_h^5}$$

در رابطه فوق  $D_h$  بیانگر قطر هیدرولیکی پارکینگ،  $U_{bulk}$  بیانگر سرعت توده ای هوا،  $HRR$  نرخ رهاسازی حرارت از منبع آلودگی و  $T$  دمای هوا است. جهت استفاده از معادله 15 در تهویه عادی پارکینگ نیاز است که تغییراتی در آن اعمال شود. بدین منظور ابتدا نرخ رهاسازی حرارت از منبع آلودگی با استفاده از رابطه (17) به دبی جرمی خروجی آلودگی از منبع تبدیل شده است.

$$HRR = \dot{m}_{CO} C_{p,CO} \Delta T \quad (17)$$

در رابطه (17)،  $\Delta T$  بیانگر اختلاف دمای سیال خروجی از آگزوز و هوای محیط است (50 درجه سانتی گراد) [23]. پس از بدست آوردن نرخ رهاسازی حرارت به صورت تابعی از دبی جرمی خروجی از منبع آتش، مقدار قطر هیدرولیکی تونل (مقطع عمود بر جریان تهویه) با توجه به سطح مقطع تونل بدست آمده و در صورتی که مقادیر موجود در رابطه (16) در رابطه (15) قرار گیرند، سرعت توده ای سیال بدست خواهد آمد که مناسب برای تهویه عادی پارکینگ ها بوده و برای اولین بار در این مقاله ارائه شده است.

$$U_{bulk} = 0.66(\dot{m}_{CO})^{1/4} \left( \frac{W+H}{WH} \right)^{1/8} \quad (18)$$

در رابطه فوق  $W$ ،  $H$  و  $\dot{m}_{CO}$  به ترتیب بیانگر عرض و ارتفاع پارکینگ و دبی خروجی منوکسیدکربن از منابع آلودگی هستند. مقادیر  $W$  و  $H$  با توجه به تعریف قطر هیدرولیکی پارکینگ در رابطه (17) ظاهر شده اند. مقدار سرعت بدست آمده از رابطه (17) بیانگر سرعت توده ای<sup>1</sup> هوا بوده و منظور از آن سرعت هوای ورودی از دریچه های ورودی هوا نیست. به عبارتی سرعت هوای ورودی از دریچه های ورودی باید به گونه ای در نظر گرفته شوند که باعث ایجاد سرعتی معادل با سرعت توده ای هوای بدست آمده از رابطه (17) در مقاطع مختلف پارکینگ شوند. در صورتی که جریان هوای ورودی از دریچه های هوا باعث ایجاد سرعت توده ای هوا به اندازه سرعت بدست آمده از رابطه (17) شود، انتظار می رود که آلودگی ها کاملاً به سمت دریچه های خروجی آلودگی هدایت شده و الگوی جریان در پارکینگ مطابق با تعریف به جریان پیستونی نزدیک شود. در این مقاله رابطه (17) مورد بررسی قرار گرفته و جهت پیش بینی الگوی جریان پیستونی در پارکینگ های بسته اعتبارسنجی شده است. جهت اعتبارسنجی، در ابتدا با استفاده از رابطه (17) سرعت جریان توده ای هوا بدست آمده و سپس پارامترهای عملکردی تهویه در پارکینگ

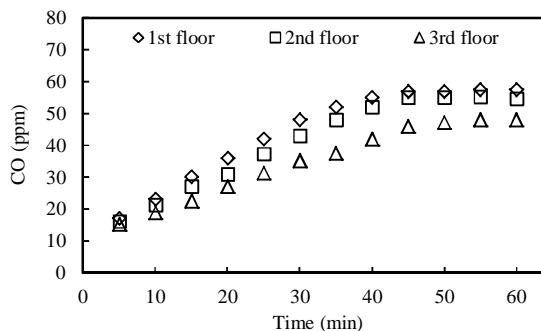


Fig. 6 Comparison average CO in various floors of car park 1

شکل 6 مقایسه منوکسیدکربن میانگین در طبقات مختلف پارکینگ 1

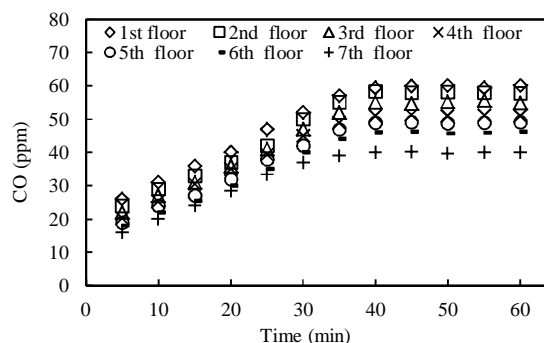


Fig. 7 Comparison average CO in various floors of car park 2

شکل 7 مقایسه منوکسیدکربن میانگین در طبقات مختلف پارکینگ 2

جدول 6 دسته بندی جریان تهویه [29]

Table 6 Ventilation flow categories [29]

| الگوی جریان       | کارایی خروج منوکسیدکربن |
|-------------------|-------------------------|
| جریان اتصال کوتاه | 0 - 1                   |
| جریان اختلاطی     | 1                       |
| جریان جابجایی     | 1 - 2                   |
| جریان پیستونی     | 2                       |

رویکرد استاندارد، قرارگیری دریچه های ورودی هوای تمیز و دریچه های خروجی هوای آلوده در دورترین دیواره های پارکینگ های بسته است [25, 2].  
1. با استفاده از این رویکرد می توان اطمینان داشت که جریان هوای ورودی در همه ی فضای پارکینگ پخش شده و غلظت آلاینده ها را در همه ی نقاط تحت تأثیر قرار می دهد. جریان پیستونی به جریانی گفته می شود که در آن هوا تنها در یک جهت جریان داشته و همه ی حرارت و آلودگی تولید شده را با خود به آن سمت هدایت می کند [5, 28]. با استفاده از ایجاد این الگوی جریان در پارکینگ بسته می توان انتظار داشت آلودگی ها به سمت دلخواه (دریچه های خروجی آلاینده) حرکت کنند. رفتار این الگوی جریان همانند جریان تهویه بحرانی است. در جریان تهویه بحرانی آلاینده ها و حرارت تنها به سمت یک جهت خاص حرکت داده می شوند و در خلاف جهت جریان تهویه حرکتی ندارند [2].

در این مقاله برای ایجاد جریان پیستونی در پارکینگ از رابطه بهبود یافته ی جریان تهویه بحرانی جهت تهویه نرمال استفاده شده است. جریان تهویه بحرانی در پارکینگ ها مطابق با پژوهش هوروات و همکاران [30] برای

<sup>1</sup> Bulk



جدول 7 تغییرات کیفیت هوا با ارتفاع بی بعد در پارکینگ 1

**Table 7** Variation of air quality with  $H_{ND,Supply}$ , car park 1

| $U_{bulk}$ (m/s) | $\xi$ | CO (ppm) | $H_{ND,Supply}$ |
|------------------|-------|----------|-----------------|
| 0.025            | 0.62  | 65       | 0.2             |
| 0.03             | 0.69  | 64.2     | 0.25            |
| 0.037            | 0.75  | 58.27    | 0.3             |
| 0.042            | 0.82  | 53.92    | 0.35            |
| 0.048            | 0.87  | 46.7     | 0.4             |
| 0.049            | 0.93  | 45.4     | 0.45            |
| 0.057            | 1.04  | 39.4     | 0.5             |
| 0.065            | 1.1   | 38.7     | 0.55            |
| 0.055            | 1     | 41.4     | 0.6             |
| 0.052            | 0.96  | 43.2     | 0.65            |
| 0.05             | 0.94  | 44.33    | 0.7             |
| 0.042            | 0.88  | 45.92    | 0.75            |
| 0.038            | 0.79  | 47.5     | 0.8             |

جدول 8 تغییرات کیفیت هوا با ارتفاع بی بعد در پارکینگ 2

**Table 8** Variation of air quality with  $H_{ND,Supply}$ , car park 2

| $U_{bulk}$ (m/s) | $\xi$ | CO (ppm) | $H_{ND,Supply}$ |
|------------------|-------|----------|-----------------|
| 0.03             | 0.69  | 62.1     | 0.2             |
| 0.037            | 0.76  | 58.6     | 0.25            |
| 0.042            | 0.83  | 55       | 0.3             |
| 0.05             | 0.88  | 51       | 0.35            |
| 0.056            | 0.95  | 47.16    | 0.4             |
| 0.06             | 1.011 | 42.45    | 0.45            |
| 0.072            | 1.09  | 37.3     | 0.5             |
| 0.075            | 1.12  | 36       | 0.55            |
| 0.069            | 1.06  | 38.94    | 0.6             |
| 0.065            | 1.04  | 40.05    | 0.65            |
| 0.062            | 1.03  | 41.62    | 0.7             |
| 0.056            | 1     | 42.14    | 0.75            |
| 0.047            | 0.92  | 44.16    | 0.8             |

جهت بدست آوردن سرعت توده‌ای هوا، سرعت در هر طبقه در چندین مقطع عمود بر جریان محاسبه شده و بین این مقادیر متوسط‌گیری شده، سپس از مقدار سرعت بدست آمده برای طبقات مختلف متوسط‌گیری شده است تا مقادیر موجود در جدول‌ها بدست آید.

همان‌گونه که در جدول‌های 7 و 8 مشاهده می‌شود، با افزایش ارتفاع در پارکینگ‌های ورودی هوا به تا ارتفاع بی بعد 0.55، غلظت CO کاهش یافته و کارایی خروجی آلاینده و سرعت توده‌ای افزایش یافته است. این روند بیانگر اثر مثبت افزایش ارتفاع در پارکینگ‌های ورودی هوا تا ارتفاع بی بعد 0.55 است. با افزایش ارتفاع بی بعد فوق به مقادیر بیش از 0.55، کارایی خروجی آلاینده و سرعت توده‌ای هوا کاهش یافته و این کاهش منجر به افزایش غلظت CO شده است. به عبارتی قرارگیری در پارکینگ‌های خروجی آلاینده در ارتفاع‌های بیش از 0.55 مناسب نبوده و منجر به بهبود شرایط هوا در پارکینگ نشده است. در نتیجه قرارگیری در پارکینگ‌های ورودی هوا تمیز در ارتفاع بی بعد 0.5 و 0.55 باعث ایجاد شرایط مناسب‌تری نسبت به بقیه ارتفاع‌های بی بعد شده است.

در دو ارتفاع بی بعد 0.5 و 0.55، میزان غلظت آلاینده‌ها در هر دو پارکینگ در کمترین حالت خود بوده و کارایی خروج منوکسیدکربن هم در بیشترین حالت خود است. همچنین، در این ارتفاع، سرعت جریان تهویه هم در نزدیک‌ترین حالت خود به عدد 0.165 متر بر ثانیه (محاسبه شده بر اساس رابطه (17)) قرار داشته و بنابراین بهترین ارتفاع بی بعد جهت نصب در پارکینگ‌های ورودی هوا تمیز، در محدوده 0.5 تا 0.55 است. همان‌گونه که در جدول‌های فوق قابل مشاهده است، قرارگیری در پارکینگ‌های ورودی هوا تمیز در ارتفاع بی بعد بهینه باعث کاهش غلظت منوکسیدکربن شده است ولی مقدار آن هنوز بیش از مقادیر بیان شده در استانداردها برای بازه زمانی یک

بگونه‌ای تغییر می‌کنند که سرعت توده‌ای هوا در پارکینگ به سرعت جریان توده‌ای تهویه (بدست آمده از رابطه (17)) نزدیک شود. پس از این مرحله میزان آلودگی در پارکینگ و میزان کارایی خروجی منوکسیدکربن در پارکینگ محاسبه شده و الگوی جریان بدست آمده است. پس از این مرحله در صورتی که الگوی جریان بدست آمده به جریان پیوستونی نزدیک باشد می‌توان نتیجه گرفت که رابطه (17) جهت محاسبه تقریبی شرایط ایجاد جریان پیوستونی در پارکینگ مناسب است.

با توجه به رابطه (17) و ابعاد هر طبقه از پارکینگ‌های 1 و 2 (شکل 5) و منوکسیدکربن تولیدی در آن، سرعت جریان بحرانی تهویه برابر با 0.165 متر بر ثانیه بدست آمده است. به عبارتی جریان هوا در پارکینگ‌های ورودی هوا تمیز باید به گونه‌ای تنظیم شود که باعث ایجاد سرعت جریان هوا توده‌ای نزدیک به 0.165 متر بر ثانیه شود. از طرفی بر اساس استاندارد، حداکثر سرعت هوا از در پارکینگ‌های ورودی هوا محدود به 2 متر بر ثانیه است [1]. در حالت پایه بیان شده در بخش قبلی، سرعت هوا ورودی از در پارکینگ‌های هوا در پارکینگ 1 و 2 به ترتیب برابر با 1.64 و 2 متر بر ثانیه و سرعت جریان توده‌ای هوا به ترتیب برابر با 0.05 و 0.062 است. جهت محاسبه سرعت توده‌ای هوا، مقدار سرعت هوا در چندین مقطع عمود بر جریان تهویه (در بازه ارتفاع 1 تا 2.5 متر) بدست آمده و متوسط‌گیری شده است. سرعت جریان توده‌ای هوا در حالت پایه کمتر از مقدار 0.165 بوده و در نتیجه مطابق با نتایج بخش قبلی می‌توان انتظار داشت که جریان پیوستونی در پارکینگ برقرار نشده باشد. مقادیر سرعت هوا ورودی از در پارکینگ‌ها (1.64 و 2 متر بر ثانیه به ترتیب در پارکینگ 1 و 2) بیانگر این است که جهت ایجاد شرایط جریان پیوستونی در پارکینگ نمی‌توان به صورت نامحدود سرعت هوا ورودی را افزایش داد. جهت ایجاد جریان پیوستونی در پارکینگ، ارتفاع در پارکینگ‌های ورودی هوا تمیز و در پارکینگ‌های خروجی آلودگی باید تغییر کند. این تغییرات برای اولین بار در این مقاله بیان شده است.

بدین منظور ابتدا ارتفاع بهینه در پارکینگ‌های ورودی در حالت پایه پارکینگ بدست آمده، سپس در پارکینگ‌های ورودی در ارتفاع بهینه خود قرار گرفته و ارتفاع در پارکینگ‌های خروجی تغییر یافته تا ارتفاع بهینه در پارکینگ‌های خروجی آلودگی هم بدست آید.

#### 1-2-4 - پیشنهاد ارتفاع بهینه در پارکینگ‌های ورودی هوا

موقعیت در پارکینگ‌های ورودی هوا به دلیل اینکه نقش محرک اولیه آلودگی‌ها را دارند، با اهمیت است. برای جلوگیری از محدود شدن نتایج، ارتفاع در پارکینگ‌های ورودی به صورت بی بعد تعریف شده‌اند. بدین منظور، ارتفاع در پارکینگ‌ها از زمین بر ارتفاع سقف پارکینگ تقسیم شده و ارتفاع بی بعد در پارکینگ‌های ورودی بدست آمده است. تغییرات غلظت میانگین منوکسیدکربن، کارایی خروجی آلودگی و سرعت جریان تهویه با ارتفاع بی بعد در پارکینگ‌های ورودی هوا در هر دو پارکینگ 1 و 2 (مطابق با شکل 5) در جدول‌های 7 و 8 بیان شده است. لازم به ذکر است که همگی شرایط مرزی، شرایط محاسباتی و تعداد سلول محاسباتی در این حالت همانند شرایط بیان شده در بخش 4-1 بوده و در آن تنها ارتفاع در پارکینگ‌های ورودی هوا تمیز تغییر کرده است. جهت بدست آوردن غلظت متوسط، غلظت منوکسیدکربن در هر طبقه در همگی ارتفاع‌های بی بعد 0.2 تا 0.8 بدست آمده و متوسط‌گیری شده و سپس از مقادیر بدست آمده برای طبقات مختلف متوسط‌گیری شده تا مقادیر موجود در جدول‌های 7 و 8 حاصل شود. کارایی خروجی منوکسیدکربن هم در حقیقت متوسطی از کارایی خروجی منوکسیدکربن در همگی طبقات است. همچنین



دریچه‌های خروجی آلاینده در موقعیت بیان شده در مقاله حاضر بهترین شرایط کیفیت هوای داخلی در پارکینگ را ایجاد خواهد نمود. نتایج شکل-های 6 و 7 بیانگر این است که در حالت پایه، زمانی در حدود 45 دقیقه لازم است تا میزان غلظت آلاینده در پارکینگ مقداری ثابت شده و با افزایش زمان افزایش نیابد. از طرفی نتایج شکل 8 بیانگر این است که استفاده از الگوی جریان نزدیک به جریان پیستونی در پارکینگ، علاوه بر کاهش غلظت آلاینده‌ها باعث کاهش زمان تعادل بین غلظت آلاینده‌ها و هوای تهویه شده است. بنابراین، علاوه بر این که میزان غلظت میانگین آلاینده در همه‌ی طبقات به مقادیر کمتر از معیار استانداردها کاهش پیدا کرده است، زمان رسیدن به حداکثر غلظت آلاینده هم کاهش یافته است.

جدول 9 تغییرات کیفیت هوا با ارتفاع بی‌بعد دریچه‌های خروجی در پارکینگ 1

**Table 9** Variation of air quality with  $H_{ND,Exhaust}$ , car park 1

| $U_{bulk}$ (m/s) | $\xi$ | CO (ppm) | $H_{ND,Exhaust}$ |
|------------------|-------|----------|------------------|
| 0.27             | 0.97  | 46.45    | 0.2              |
| 0.032            | 1.11  | 41.98    | 0.25             |
| 0.039            | 1.141 | 38.42    | 0.3              |
| 0.043            | 1.2   | 37.61    | 0.35             |
| 0.055            | 1.31  | 36.53    | 0.4              |
| 0.068            | 1.4   | 34.22    | 0.45             |
| 0.079            | 1.5   | 33.71    | 0.5              |
| 0.107            | 1.57  | 31.70    | 0.55             |
| 0.128            | 1.66  | 29.99    | 0.6              |
| 0.141            | 1.7   | 28.63    | 0.65             |
| 0.124            | 1.64  | 30.49    | 0.7              |
| 0.088            | 1.3   | 33.83    | 0.75             |
| 0.65             | 1.11  | 39.28    | 0.8              |

جدول 10 تغییرات کیفیت هوا با ارتفاع بی‌بعد دریچه‌های خروجی در پارکینگ 2

**Table 10** Variation of air quality with  $H_{ND,Exhaust}$ , car park 2

| $U_{bulk}$ (m/s) | $\xi$ | CO (ppm) | $H_{ND,Exhaust}$ |
|------------------|-------|----------|------------------|
| 0.048            | 0.8   | 48.22    | 0.2              |
| 0.054            | 0.91  | 45.48    | 0.25             |
| 0.065            | 1     | 43.20    | 0.3              |
| 0.072            | 1.09  | 41.16    | 0.35             |
| 0.087            | 1.2   | 38.56    | 0.4              |
| 0.103            | 1.38  | 36.40    | 0.45             |
| 0.12             | 1.47  | 32.97    | 0.5              |
| 0.132            | 1.65  | 28.41    | 0.55             |
| 0.136            | 1.68  | 29.39    | 0.6              |
| 0.121            | 1.53  | 31.28    | 0.65             |
| 0.091            | 1.39  | 35.25    | 0.7              |
| 0.076            | 1.27  | 36.98    | 0.75             |
| 0.05             | 1.04  | 38.90    | 0.8              |

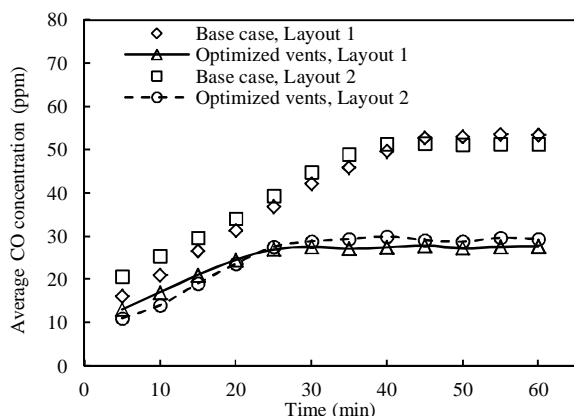


Fig. 8 Comparison of average CO concentration in two pattern of ventilation flow

شکل 8 مقایسه منوکسیدکربن میانگین در دو الگوی مختلف جریان تهویه

ساعته است. همچنین مقدار کارایی خروجی منوکسیدکربن در ارتفاع بهینه افزایش یافته است (درصد افزایش کارایی خروجی آلاینده 17% در پارکینگ 1 و 9% در پارکینگ 2 است)، ولی هنوز در محدوده جریان اختلاطی قرار داشته و فاصله زیادی با مقادیر جریان پیستونی دارد. دلیل این امر این است که قرارگیری دریچه‌های ورودی هوای تمیز در ارتفاع بهینه یک عمل لازم ولی ناکافی برای کاهش آلاینده و افزایش کارایی خروجی آلودگی و افزایش سرعت جریان تهویه است. جهت کاهش آلاینده، افزایش کارایی خروجی آلودگی و افزایش سرعت جریان تهویه لازم است که علاوه بر تغییر ارتفاع دریچه‌های ورودی هوای تمیز، ارتفاع خروجی‌های آلودگی هم تغییر نماید. این پارامتر در بخش 2-2-4 بررسی شده است.

#### 2-2-4- پیشنهاد ارتفاع بهینه دریچه‌های خروجی آلودگی

با توجه به بخش قبلی، قرارگیری دریچه‌های ورودی هوای تازه در ارتفاع بهینه باعث افزایش کارایی خروجی آلاینده به اندازه 17% و 9% به ترتیب در پارکینگ‌های 1 و 2 شده است. از طرفی افزایش کارایی خروجی آلاینده به میزان فوق باعث بهبود نسبی کیفیت هوا در پارکینگ شده ولی هنوز مقدار آلاینده‌ها در پارکینگ بیش از مقدار آلاینده بیان شده در استانداردها است. بنابراین، قرارگیری دریچه‌های ورودی هوای تمیز در ارتفاع بهینه امری لازم و ناکافی برای ایجاد شرایط مناسب در پارکینگ‌های چندطبقه است. یکی از مشکلات اساسی پارکینگ‌های چندطبقه، خروج آلاینده‌ها با کارایی مناسب است. جهت تولید جریان پیستونی در پارکینگ علاوه بر تولید جریان تهویه طولی و تصحیح ارتفاع دریچه‌های ورودی هوای تمیز، ارتفاع دریچه‌های خروجی آلودگی هم باید بهینه شود. دلیل این امر این است که جریان تهویه طولی و تصحیح ارتفاع دریچه‌های ورودی هوای تمیز باعث حرکت آلاینده‌ها به سمت دریچه‌های خروجی آلاینده می‌شود ولی در صورتی که ارتفاع دریچه‌ها بهینه نباشد، آلاینده‌ها از پارکینگ خارج نشده و با انباشتگی در قسمت‌های مختلف پارکینگ باعث کاهش کیفیت هوای داخلی می‌شوند. جهت بررسی اثر ارتفاع دریچه‌های خروجی آلاینده بر کیفیت هوای داخلی و انتخاب بازه بهینه ارتفاع دریچه‌های خروجی، از دو پارکینگ شکل 5 استفاده شده است. در این حالت شرایط مرزی و محاسباتی همانند بخش 1-4 بوده با این تفاوت که دریچه‌های ورودی هوای تمیز در هر طبقه در ارتفاع بهینه بی-بعد 0.55 قرار گرفته و ارتفاع دریچه‌های خروجی آلاینده هم در حال تغییر است. جهت کلی سازی نتایج، ارتفاع دریچه‌های خروجی آلاینده با استفاده از ارتفاع سقف پارکینگ بی‌بعد شده است. نتایج حاصل از حل عددی در جدول‌های 9 و 10 بیان شده است. نتایج جدول 9 بیانگر این است که حداقل غلظت منوکسیدکربن در پارکینگ 1 در ارتفاع بی‌بعد دریچه‌های خروجی بین 0.6 تا 0.7 اتفاق افتاده است. همچنین در این بازه‌ی ارتفاعی حداکثر میزان کارایی خروجی منوکسیدکربن و سرعت جریان توده‌ای سیال هم برقرار است. به عبارتی در صورتی که ارتفاع دریچه‌های ورودی هوای تمیز بهینه بوده (ارتفاع بی‌بعد 0.55) و ارتفاع بی‌بعد دریچه‌های خروجی آلودگی بین 0.6 تا 0.7 باشد، جریان نزدیک‌ترین حالت را به جریان پیستونی دارد. نتایج جدول 10 بیانگر وقوع حداقل غلظت منوکسیدکربن و حداکثر کارایی خروجی منوکسید و حداکثر سرعت توده‌ای سیال در پارکینگ شماره 2 در ارتفاع بی-بعد بین 0.55 تا 0.65 است. تفاوت اندک موجود در بازه‌ی بهینه دو پارکینگ به دلیل تفاوت در نحوه اتصال طبقات مختلف آنها به یکدیگر است. با توجه به پژوهش‌های پیشین [14]، حداکثر میزان آلاینده‌های موجود در پارکینگ‌های بسته یک طبقه در ارتفاع بی‌بعد 0.55 تا 0.7 قرار داشته و در نتیجه قرارگیری

همچنین در شکل 10، غلظت مونوکسیدکربن در قسمت a کمتر از قسمت b بوده و در نتیجه بهینه‌سازی دریچه‌های ورودی و خروجی آلاینده در شرایط یکسان هوای تهویه مشهود است.

#### 4-2-3- مقایسه معیار سرعت جریان تهویه و کارایی خروجی آلودگی

بر اساس یافته‌ی چان و چو [28]، در صورتی که جریان تهویه در پارکینگ از جریان اختلاطی فاصله گرفته و به جریان پیستونی نزدیک شود، آلاینده‌ها در پارکینگ کاهش یافته و کیفیت هوای داخلی افزایش می‌یابد. معیاری که آنها جهت بیان الگوی جریان استفاده نمودند، کارایی خروجی مونوکسیدکربن بود. با استفاده از این معیار و اندازه‌گیری میزان آلودگی در محل دریچه‌های خروجی و کل فضای پارکینگ، الگوی جریان قابل حصول است. در این مقاله همان‌گونه که مشاهده شد، نتایج جدول 7 به بعد بیانگر این است که تغییرات سرعت جریان توده‌ای به خوبی بیانگر نزدیک یا دور شدن جریان هوای درون پارکینگ به جریان پیستونی است و معیار بررسی الگوی جریان ارائه شده در این مقاله به خوبی با نتایج حاصل از اندازه‌گیری و محاسبه کارایی خروجی مونوکسیدکربن همخوانی دارد. به عبارتی علاوه بر کارایی خروجی مونوکسیدکربن، با استفاده از اندازه‌گیری سرعت در مقاطع مختلف پارکینگ و مقایسه آن با سرعت جریان بدست آمده از رابطه (17) می‌توان الگوی جریان را تعیین کرد. ویژگی روش فوق این است که هیچگونه نیازی به دستگاه اندازه‌گیری مونوکسیدکربن (دیگر آلاینده‌ها) ندارد. همچنین این روش تنها نیاز به شبیه‌سازی جریان هوا در پارکینگ داشته و نیازی به افزایش حجم محاسبات با حل معادله اضافی گونه یا گونه‌های آلودگی و معادله انرژی نخواهد بود. در این روش ابتدا تنها نیاز است که ابعاد پارکینگ و میزان آلودگی تولیدی در آن معلوم باشد تا سرعت جریان توده‌ای بدست آید و سپس با استفاده از حل معادله بقای جرم، مومنتم و معادلات آشفستگی، توزیع سرعت در فضای حل بدست آمده و سپس با استفاده از توزیع سرعت، مقدار سرعت توده‌ای جریان بدست آید. در نهایت هر چه سرعت توده‌ای بدست آمده از شبیه‌سازی عددی به مقدار سرعت جریان توده‌ای (ابطه 17)) نزدیکتر باشد، میزان آلودگی در پارکینگ کمتر خواهد بود. جهت مقایسه سرعت محاسبات و دقت حل، معادلات بقای جرم و مومنتم به همراه معادلات آشفستگی (بدون معادلات بقای گونه و انرژی محسوس) در هر دو پارکینگ شکل 4 حل شده و مقدار سرعت توده‌ای جریان تهویه بدست آمده در این حالت با حالت پایه پارکینگ (بخش 1-4) در جدول 11 مقایسه شده است. حالتی که در آن تنها معادلات بقای جرم و مومنتم حل شده‌اند به نام حل سریع نامگذاری شده است. نتایج حاصل از حل بیانگر حداکثر تفاوت 16 درصد بین دو حالت است. از طرفی مدت زمان لازم جهت حل جریان در حالت جدید در حدود 45 درصد زمان حل جریان در حالت پایه است. بنابراین نتایج حاصل از حل سریع دارای دقت نسبتاً خوبی بوده و از طرفی مدت زمان حل هم کاهش یافته است. بنابراین با استفاده از حل سریع می‌توان میزان انحراف الگوی جریان از الگوی جریان پیستونی را در مدت زمان کمتری نسبت به دیگر روش شبیه‌سازی بیان شده در این مقاله محاسبه نمود. به طور خلاصه روش استفاده از معیار جدید اندازه‌گیری شده و هم حجم محاسبات عددی را کاهش داده است. علاوه بر این، نتایج حاصل از جدول‌های 7 تا 10 هم بیانگر همخوانی مناسب این معیار با دیگر معیارهای کیفیت هوا در پارکینگ‌های بسته است. بنابراین می‌توان گفت که استفاده از معیار بیان شده در این مقاله معادل با استفاده از معیار کارایی خروجی آلودگی با سادگی و کاهش حجم

نمایی از نتایج حاصل از حل عددی و مقایسه حالت پایه و حالت بهبود یافته در سه طبقه پارکینگ 1 در شکل‌های 9 و 10 نمایش داده شده است. همان‌گونه که در شکل 9 مشاهده می‌شود، قرارگیری دریچه‌های خروجی آلاینده در ارتفاع بهینه باعث پخش مناسب هوا در ارتفاع‌های پایینتر از نصف ارتفاع سقف شده است. همچنین شکل فوق بیانگر این است که در حالت پایه (قسمت b)، هوای ناشی از فن‌های القایی تنها ارتفاع‌های بالایی پارکینگ را پوشش داده است. مکمل نتایج توزیع هوا، نتایج حاصل از پخش آلودگی در پارکینگ است. همان‌گونه که در شکل 10 مشاهده می‌شود، میزان آلودگی در حالت بهینه شده (a) در ارتفاع‌های میانی پارکینگ که در حدود ارتفاع تنفسی انسان است، در حد مجاز بوده و در نتیجه کیفیت هوای داخلی پارکینگ نسبت به حالت پایه افزایش یافته است. این نتیجه در قسمت (b) از شکل فوق قابل مشاهده نیست و دلیل آن هم همان‌گونه که بیان شد، عدم قرارگیری دریچه‌های ورودی هوا و خروجی آلاینده در ارتفاع بهینه است.

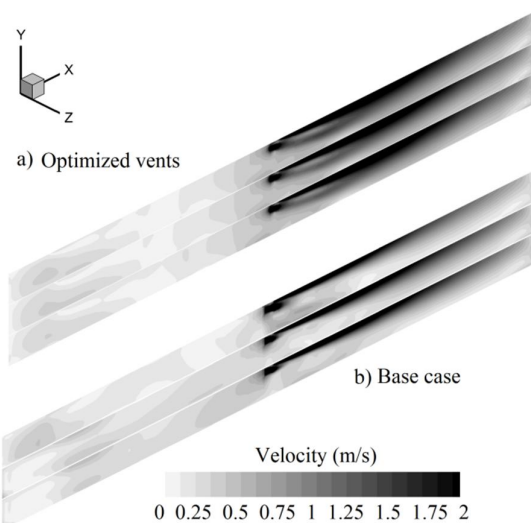


Fig. 9 Velocity distribution in layout 1

شکل 9 توزیع سرعت در پارکینگ 1

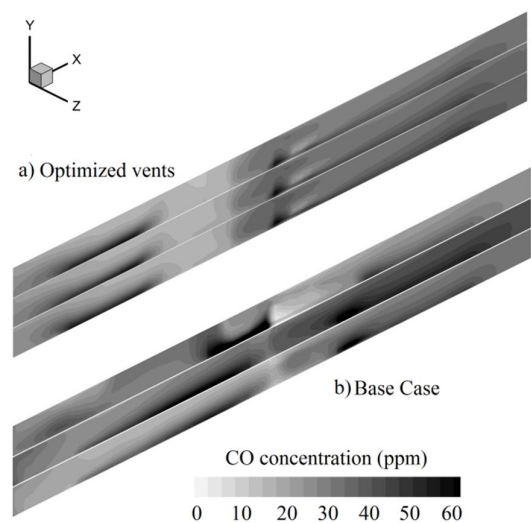


Fig. 10 CO distribution in layout 1

شکل 10 پخش مونوکسیدکربن در پارکینگ 1

محاسبات و اندازه گیری است.

• اثر تغییر الگوی جریان در پارکینگ بر میزان جابجایی آلودگی بین طبقات: با استفاده از تغییر الگوی جریان در پارکینگ از حالت پایه به حالت متمایل به جریان پیستونی، میزان آلودگی جابجا شده بین طبقات در مدت زمان یک ساعت به اندازه 55 تا 60 درصد کاهش یافته است.

#### 4-2-4- اثر تغییر الگوی جریان بر جابجایی آلودگی بین طبقات

مهمترین مشکل پارکینگ های چندطبقه حرکت آلودگی بین طبقات مختلف پارکینگ است. در پارکینگ های با طبقات کاملاً جدا (پارکینگ 1 در شکل 4) آلودگی تنها از طریق رمپ ها قادر به حرکت بین طبقات است. در پارکینگ هایی که به صورت نیم طبقه به هم متصل هستند (پارکینگ 2 در شکل 4) آلودگی به راحتی بین نیم طبقه ها قادر به جابجایی است. از طرفی میل کردن الگوی جریان توده های هوا در پارکینگ به جریان پیستونی باعث کاهش آلودگی ها و افزایش کیفیت هوای پارکینگ شده است. جهت مقایسه، میزان متوسط آلودگی جابجا شده بین طبقات مختلف پارکینگ در حالت پایه و حالت بهینه با یکدیگر مقایسه شده است. لازم به ذکر است که حالت بهینه حالتی است که در آن دریچه های ورود هوا و دریچه های خروجی آلودگی در ارتفاع بهینه خود قرار دارند و الگوی جریان در نزدیک ترین حالت خود به جریان پیستونی است. نتایج حاصل از مقایسه در جدول 12 بیان شده و بیانگر این است که با استفاده از حل در حالت بهینه، میزان آلودگی جابجایی بین طبقات به میزان 54 و 59 درصد در دو پارکینگ 1 و 2 کاهش یافته است. بنابراین قرارگیری دریچه های ورودی هوا و خروجی آلودگی در ارتفاع بهینه علاوه بر افزایش کیفیت هوای داخلی پارکینگ، باعث کاهش میزان جابجایی آلودگی بین طبقات شده است.

#### 5- نتیجه گیری و جمع بندی

در این مقاله اثر پارامترهای با اهمیتی همچون ارتفاع دریچه های ورودی هوا و خروجی آلودگی بر کیفیت هوای داخلی پارکینگ های طبقاتی بررسی شده است. از طرفی معیار جدیدی برای بررسی الگوی جریان هوای تهویه در پارکینگ معرفی شده و با الگوهای دیگر مقایسه شده است. نتایج حاصل از این مقاله بیانگر دقت خوب معیار معرفی شده در بیان الگوی جریان در پارکینگ است. نتایج کاربردی حاصل از این مقاله به صورت زیر است.

• پیشنهاد ارتفاع بهینه دریچه های ورودی هوا و خروجی آلودگی: با استفاده از قرارگیری دریچه های ورودی هوا در ارتفاع بی بعد 0.5 تا 0.55 و دریچه های خروجی آلودگی در ارتفاع بی بعد 0.55 تا 0.7، بهترین شرایط کیفیت هوا در پارکینگ ایجاد شده است.

• طراحی سیستم تهویه: با استفاده از معیار سرعت توده های تهویه می توان سرعت توده های ایده آل در پارکینگ را بدست آورده و سپس با استفاده از تصحیح موقعیت دریچه های ورودی هوا و خروجی آلودگی، سرعت توده های جریان در پارکینگ را به این مقدار نزدیک نمود تا بهترین کیفیت هوای داخلی ممکن در پارکینگ ایجاد شود.

جدول 11 مقایسه سرعت جریان توده های (m/s)

| پارامتر   | حل پایه | حل سریع | تفاوت  |
|-----------|---------|---------|--------|
| پارکینگ 1 | 0.05    | 0.058   | 16 %   |
| پارکینگ 2 | 0.062   | 0.071   | 14.5 % |

جدول 12 مقایسه میانگین جابجایی آلودگی (ppm) بین طبقات مختلف در 1 ساعت

| پارامتر   | حل پایه | حل بهینه | تفاوت |
|-----------|---------|----------|-------|
| پارکینگ 1 | 37      | 17       | 54 %  |
| پارکینگ 2 | 49      | 20       | 59 %  |

#### 6- فهرست علائم

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| A                               | سطح پارکینگ (m <sup>2</sup> )                                     |
| C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub> | ضریب ثابت معادله اضمحلال انرژی جنبشی                              |
| C <sub>average</sub>            | غلظت منوکسیدکربن متوسط (ppm)                                      |
| C <sub>exit</sub>               | غلظت منوکسیدکربن در محل دریچه های خروجی (ppm)                     |
| C <sub>i</sub>                  | گونه آلودگی (mg m <sup>-3</sup> )                                 |
| c <sub>i</sub>                  | مقدار نوسانی گونه در راستای i                                     |
| C <sub>μ</sub>                  | ضریب ثابت لزجت سینماتیک آشفتگی                                    |
| C <sub>P</sub>                  | گرمای ویژه در فشار ثابت (Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )      |
| D                               | ضریب پخش جرمی (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )، مشتق مادی        |
| E, E <sub>0</sub>               | نرخ انتشار آلاینده (gmin <sup>-1</sup> )                          |
| h                               | آنتالپی (Jkg <sup>-1</sup> )، ارتفاع (m)                          |
| H                               | ارتفاع سقف (m)  |
| H <sub>exh</sub>                | ارتفاع بی بعد دریچه های خروجی                                     |
| HRR*                            | نرخ رهایش حرارت بی بعد  |
| k                               | انرژی جنبشی (m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> )                     |
| m <sub>CO</sub>                 | دبی جرمی منوکسیدکربن (kgs <sup>-1</sup> )                         |
| N                               | تعداد ماشین ها  |
| p                               | فشار (kgm <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> )                         |
| Pr <sub>t</sub>                 | عدد پراتل آشفتگی  |
| Q                               | دبی حجمی (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )                        |
| Sc <sub>t</sub>                 | عدد اشمیت   |
| S <sub>G</sub>                  | جمله منبع معادله بقای مومنتم (kg m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> ) |
| S <sub>h</sub>                  | جمله منبع معادله بقای انرژی (kg m <sup>1</sup> s <sup>-3</sup> )  |
| S <sub>ij</sub>                 | تانسور نرخ کرنش (s <sup>-1</sup> )                                |
| T                               | دما (K)، زمان حرکت ماشین در پارکینگ (s)                           |
| t                               | زمان (s)  |
| U <sub>cr</sub> <sup>*</sup>    | سرعت بحرانی تهویه بی بعد  |
| U <sub>cr,bulk</sub>            | سرعت جریان بحرانی تهویه (ms <sup>-1</sup> )                       |
| U <sub>i</sub>                  | سرعت متوسط (ms <sup>-1</sup> )                                    |
| u <sub>i</sub>                  | سرعت نوسانی در راستای i (ms <sup>-1</sup> )                       |
| W                               | عرض پارکینگ (m)   |
| x <sub>i</sub> , x <sub>j</sub> | موقعیت در جهت i و j (m)   |
| علائم یونانی                    |   |
| α <sub>eff</sub>                | ضریب نفوذ حرارتی موثر (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )           |
| Δ                               | گرادیان   |
| ε                               | نرخ اضمحلال انرژی جنبشی (m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup> )         |
| Γ <sub>t</sub>                  | ضریب پخش جرمی (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )                   |
| μ <sub>eff</sub>                | لزجت دینامیکی موثر (kgm <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )           |
| μ <sub>t</sub>                  | لزجت دینامیکی آشفتگی (kgm <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )         |
| v, v <sub>t</sub>               | لزجت سینماتیک آرام و آشفته (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )      |

- [12] M. Krarti, A. Ayari, Ventilation for enclosed parking garages, *ASHRAE Journal*, Vol. 43, No. 2, pp. 52-57, 2001.
- [13] 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.
- [14] 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).
- [15] A. Faghri, Y. Zhang, *Transport phenomena in multiphase systems*, First Edition, pp. 238-330, California, Academic Press, 2006.
- [16] B. Blocken, Y. Tominaga, T. Stathopoulos, CFD simulation of micro-scale pollutant dispersion in the built environment, *Building and Environment*, Vol. 64, No. 0, pp. 225-230, 2013.
- [17] W. Minkowycz, *Advances in numerical heat transfer*, First Edition, London, CRC press, 1996.
- [18] W. Reynolds, Fundamentals of turbulence for turbulence modeling and simulation, *Proceeding of Modern Theoretical and Experimental Approaches to Turbulent Flow Structure and its Modelling*, Stanford university, pp. 1-65, 1987.
- [19] D. C. Wilcox, *Turbulence modeling for CFD*, Third Edition, pp. 240- 290, California, DCW industries, 1998.
- [20] I. B. Celik, *Introductory turbulence modeling*, First Edition, pp. 33-40, Virginia, Western Virginia University, 1999.
- [21] K. Watanabe, K. Matsuno, Moving computational domain method and its application to flow around a high-speed car passing through a hairpin curve, *Journal of computational Science and Technology*, Vol. 3, No. 2, pp. 449-459, 2009.
- [22] E. Asimakopoulou, D. I. Kolaitis, M. A. Founti, CO Dispersion in a Car-Repair Shop: An Experimental and CFD Modelling Study, in *Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*, Melbourne, Australia, 2009.
- [23] M. Ehsan, M. Shah, M. Hasan, 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.
- [24] Y. Tominaga, T. Stathopoulos, Numerical simulation of dispersion around an isolated cubic building: Model evaluation of RANS and LES, *Building and Environment*, Vol. 45, No. 10, pp. 2231-2239, 2010.
- [25] L. R. J. Wissink, T. V. d. Wielen, M. Jansen, R. V. Beek, *Car Park Ventilation Manual*, First Edition, pp. 27- 35, Norway, NOVENCO press, 2003.
- [26] J. Hill, *Car park designers' handbook*, First Edition, pp. 8-20, London, Thomas Telford Ltd, 2005.
- [27] D. Pike, C. Jolly, M. Pundsack, J. Stewart, W. Whapples, *Design recommendations for multi-storey and underground car parks*, Fourth Edition, pp. 58-60, London, Published by the Institution of Structural Engineers, 2011.
- [28] M. Y. Chan, W. K. Chow, Car park ventilation system: performance evaluation, *Building and Environment*, Vol. 39, No. 6, pp. 635-643, 2004.
- [29] O. Seppänen, Ventilation strategies for good indoor air quality and energy efficiency, *International Journal of Ventilation*, Vol. 6, No. 4, pp. 297-306, 2008.
- [30] I. Horváth, J. van Beeck, B. Merci, Full-scale and reduced-scale tests on smoke movement in case of car park fire, *Fire safety journal*, Vol. 57, No. 1, pp. 35-43, 2013.

$\rho$  چگالی ( $\text{kgm}^{-3}$ )

$\sigma_e$  ضریب ثابت معادله اضمحلال انرژی جنبشی

$\sigma_k$  ضریب ثابت معادله بقای انرژی جنبشی

$\xi$  کارایی خروجی منوکسیدکربن

بالانویس ها

- متوسط گیری

زیرنویس ها

average متوسط

exhaust خروجی

exit خروجی

inlet ورودی

ND بی بعد

vent تهویه

### 7- مراجع

- [1] BRITISH Standard, Components for smoke and heat control systems, Part 7: Code of practice on functional recommendations and calculation methods for smoke and heat control systems for covered car parks, BSI, 2006.
- [2] ASHRAE Handbook, HVAC Applications (SI), chapter 15: enclosed vehicular facilities, 2011.
- [3] Australian Standard, The use of ventilation and airconditioning in buildings, Part 2: Mechanical ventilation in buildings, 2012.
- [4] Ministry of Housing and Urban Development of Iran, National building regulations of Iran, XIV issue, thermal installations, air exchange and air conditioning, 2009 (in Persian).
- [5] J. Burnett, M. Chan, Criteria for air quality in enclosed car parks, *Proceedings of the ICE-Transport*, Vol. 123, No. 2, pp. 102-110, 1997.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] K. Papakonstantinou, A. Chaloulakou, A. Duci, N. Vlachakis, N. Markatos, Air quality in an underground garage: Computational and experimental investigation of ventilation effectiveness, *Energy and Buildings*, Vol. 35, No. 9, pp. 933-940, 2003.
- [9] 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.
- [10] J. Domingo, R. Barbero, A. Iranzo, D. Cuadra, J. Servert, M. A. Marcos, Analysis and optimization of ventilation systems for an underground transport interchange building under regular and emergency scenarios, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 26, No. 1, pp. 179-188, 2011.
- [11] A. F. Elsafty, M. M. Abo Elazm, Improving air quality in enclosed parking facilities using ventilation system design with the aid of CFD simulation, *International Review of Mechanical Engineering*, Vol. 3, No. 6, pp. 796-807, 2009.