مجله مهندسی مکانیک مدرس، مرداد 1395، دوره 16، شماره 5، ص‌ص 70-80

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی اثر موقعیت دریچه‌های خروجی آلودگی بر کاهش آلاینده در پارکینگ‌های بسته

جواد امنیان[1]، مهدی معرفت[2*]، قاسم حیدری نژاد[2]

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: 25 بهمن 1394
پذیرش: 30 فروردین 1395
ارائه در سایت: 18 اردیبهشت 1395

کلید واژگان:
پخش آلودگی
شبیه‌سازی عددی
موقعیت دریچه‌های ورودی هوا
موقعیت دریچه‌های خروجی‌های آلودگی
جت‌فن

چکیده

قرارگیری صحیح دریچه‌های خروجی آلاینده، نقش مهمی در افزایش کیفیت هوا و کاهش میزان آلودگی در پارکینگ‌های بسته دارد. در مقاله حاضر، اثر موقعیت و ارتفاع دریچه‌های خروجی آلودگی و ابعاد پارکینگ بر کیفیت هوای داخلی با استفاده از شبیه‌سازی عددی بررسی شده است. معادلات بقا با استفاده از حلگر ری‌اکتینگ فوم در نرم‌افزار اپن‌فوم حل شده‌اند. در مرحله اول به منظور اعتبارسنجی روش حل، جریان آلودگی در یک پارکینگ شبیه‌سازی شده و نتایج حل با نتایج اندازه‌گیری تجربی مقایسه شده است. در مرحله بعد اثر موقعیت دریچه‌های خروجی آلودگی بر افزایش کیفیت هوای داخلی پارکینگ مورد بررسی قرار گرفته و با دیگر روش‌های افزایش کیفیت هوای داخلی پارکینگ مقایسه شده است. نتایج حاصل از حل عددی بیانگر این است که قرارگیری دریچه‌های ورودی هوا و خروجی آلودگی در دورترین فاصله از هم در پارکینگ و قرارگیری دریچه‌های خروجی آلودگی در بازه ارتفاعی بهینه باعث افزایش کیفیت هوای داخلی پارکینگ شده است. در این مقاله، نمودار غلظت منوکسیدکربن در ارتفاع‌های مختلف بیان شده و با استفاده از آن بازه‌ی بهینه برای ارتفاع دریچه‌های خروجی آلاینده پیشنهاد شده است. همچنین اثر ابعاد پارکینگ برای استفاده از جت‌فن بررسی شده و نتایج بیانگر این است که جهت تهویه آلودگی در پارکینگ‌های با طول بیش از اندازه معیار، جت‌فن موردنیاز است.

Investigation on effect of exhaust vents location on reduction of pollution in enclosed car parks

Javad Amnian, Mehdi Maerefat*, Ghasem Heidarinejad

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

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 14 February 2016
Accepted 18 April 2016
Available Online 07 May 2016

Keywords:
Pollution dispersion
numerical simulation
air inlet position
exhausts position
jet fan

ABSTRACT

The correct placement of supply air inlets and pollution extraction outlets plays an important role in increasing indoor air quality and reducing the amount of pollution in enclosed car parks. In this paper the effect of exhaust locations, exhaust height and parking dimensions on indoor air quality of car park is investigated with numerical simulation. For this purpose conservation equations are solved with openFoam. For validation, air flow and pollution are simulated in a simple car park and compared with experimental results. In the next section, the effect of exhaust vent locations on increasing indoor air quality is investigated and compared with other solutions. The result of numerical simulation indicates that, if inlets and exhausts are located in end sides of car park and if exhaust vent locations are in the optimized height, the indoor air quality in the car park is increased. In this paper, the graph of CO concentration in different heights is explained and by using it, the optimum range for exhaust vent locations is proposed. Moreover, the standard criteria for using jet fans is expressed and the results showed that, for ventilation of car parks with length more than criterion, jet fans should be used.

1- مقدمه

از جمله آلودگی‌های صنعتی که تاثیر زیادی بر سلامت افراد گذاشته و نیاز به تحقیقات گسترده جهت شناخت دقیق دارد، آلودگی هوا است. آلودگی هوا به دو دسته آلودگی‌های موجود در هوای آزاد و آلودگی‌های داخل ساختمان و فضاهای بسته تقسیم‌بندی می‌شوند. پارکینگ‌های بسته از جمله فضاهایی هستند که مدیریت آلودگی در آن‌ها بااهمیت است. پارکینگ‌های بسته به دلیل حرکت و توقف ماشین‌های روشن در آن و گازهای خروجی از اگزوز، دارای مشکلاتی همچون تمرکز آلودگی و کمبود اکسیژن هستند. منوکسیدکربن و اکسیدهای نیتروژن خطرناک‌ترین گازهای منتشر شده از ماشین می‌باشند که در مدت زمان کم می‌توانند اثرات خطرناکی بر افراد حاضر در پارکینگ بگذارند. برای کاهش آلودگی در پارکینگ باید تجهیزات مورد استفاده در موقعیت بهینه قرار گرفته باشند. در حالت معمول نرخ تهویه لازم برای رقیق کردن منوکسیدکربن به میزان قابل قبول برای کنترل حد دیگر آلاینده‌ها هم کافی است [1]. لازمه‌ی داشتن کیفیت هوای خوب داخلی در پارکینگ، ممانعت از افزایش غلظت منوکسیدکربن در قسمت‌های مختلف پارکینگ بوده [2] و بدین منظور باید از هواکش‌ها[1] و دودکش‌هایی[2] استفاده

[1] Supply Shaft
[2] Exhaust Shaft

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
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)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-18]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.5.13.4]

نمود که به ترتیب هوا را از دریچه‌های تامین هوا[1] به داخل پارکینگ هدایت کرده و آلودگی را از دریچه‌های خروجی[2] پارکینگ، خارج می‌کنند. در صورتی که دریچه‌های خروجی دارای کارآیی مناسب نباشند، میزان غلظت آلاینده در کل فضای پارکینگ افزایش پیدا کرده و در نتیجه کیفیت هوای داخلی پارکینگ کاهش می‌یابد. علاوه بر این، دریچه‌های ورودی هم باید به گونه‌ای باشند که جریان هوای تمیز را در ارتفاع و سرعت مناسب به فضای داخلی پارکینگ هدایت کنند. عوامل دیگری همچون هندسه پارکینگ هم بر پخش آلودگی در فضای داخلی پارکینگ موثر هستند. استانداردهای مختلف مقادیر مجاز را برای میزان منوکسیدکربن در پارکینگ پیشنهاد داده‌اند [1-4]. به عنوان مثال استاندارد اشری[3] میزان منوکسیدکربن مجاز در پارکینگ را برای یک دوره‌ی 8 ساعته حداکثر 9 ppm و برای یک دوره‌ی 9 ساعته حداکثر 35 ppm پیشنهاد کرده است [1]. از طرفی ویرایش‌های قدیمی این استاندارد میزان هوای مورد نیاز برای رسیدن به حد مجاز آلودگی را 7.5 لیتر بر ثانیه به ازای هر متر مربع از مساحت کف پارکینگ در نظر گرفته‌اند [5,1]. در ویرایش‌های جدید با توجه به افزایش کیفیت ماشین‌ها، مقدار ثابتی برای هوای تهویه پیشنهاد نشده بلکه از یک روند برای بدست آوردن آن استفاده شده است. مقادیر حاصل از این روش با توجه به پارامترهایی همچون میزان آلودگی خروجی از ماشین‌ها، زمان حرکت ماشین در پارکینگ و حد مجاز آلاینده بدست می‌آید و مقدار مناسب‌تری نسبت به مقادیر ثابت پیشنهاد می‌کند [1].

پژوهش‌های محدودی در زمینه مطالعه پخش جریان آلودگی در پارکینگ انجام گرفته است. از جمله این پژوهش‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

هو و همکاران [6] یک مطالعه تجربی را برای بدست آوردن رابطه‌ای بین الگوی ترافیک و منوکسیدکربن تولید شده انجام داده‌اند. آن‌ها با استفاده از حجم ترافیک و زمان انتظار ماشین در پارکینگ، رابطه‌ای جهت پیش‌بینی میزان منوکسیدکربن ارائه داده‌اند که می‌تواند به‌عنوان پایه‌ای جهت انتخاب میزان هوای تهویه مورد استفاده قرار گیرد. پاپاکونستانتینو و همکاران [7] شبیه‌سازی پخش جریان هوا را در یک پارکینگ کوچک در دو حالت بدون تهویه و با تهویه مکانیکی انجام داده‌اند. نتایج آن‌ها بیانگر این است که با استفاده از تهویه مکانیکی، میزان آلودگی موجود در پارکینگ در حد مجاز توصیه شده توسط استانداردها قرار گرفته و بدون استفاده از تهویه مکانیکی، آلودگی موجود در پارکینگ از حد مجاز استانداردها فراتر می‌رود. السافتی و ابوالعظم [8] با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت[4] شبیه‌سازی جریان آلودگی را در پارکینگ انجام داده و تاثیر ارتفاع خروجی بر تهویه در پارکینگ را بررسی کرده‌اند. نتایج حاصل از بررسی آن‌ها بیانگر این است که نزدیک بودن خروجی‌ها به سقف باعث تخلیه بهتر آلودگی شده است. پارکینگ بیان شده در مقاله فوق یک طبقه بوده و ارتفاع آن بیش از 5 متر می‌باشد که متناسب با مقادیر بیان شده توسط استانداردها نبوده و نحوه تهویه آلودگی در آن متفاوت است. آسیماکوپولو و همکاران [10,9] به بررسی توزیع آلودگی در یک گاراژ بسته پرداخته‌اند. آن‌ها اندازه‌گیری میزان آلودگی را در گاراژ انجام داده و نتایج حاصل از این اندازه‌گیری را برای چند نقطه مختلف از گاراژ بیان کرده‌اند. با توجه به مقالات موجود، اثر هندسه خروجی‌ها و دیگر پارامترهای موثر بر پخش آلودگی در پارکینگ تنها در مرجع [8] بیان شده است. نتایج مرجع فوق قابل کاربرد برای دیگر پارکینگ‌های مورد بررسی نیست زیرا پارکینگ در نظر گرفته شده در آن دارای ارتفاع بیش از 5 متر است و نحوه تهویه آلودگی در آن متفاوت است.

همان‌گونه که در پژوهش‌های پیشین مشاهده شد، مطالعه پخش آلودگی در پارکینگ‌های زیرزمینی بسیار محدود بوده و موضوعات با اهمیتی همچون روش‌های افزایش کیفیت هوای داخلی در پارکینگ مورد مطالعه قرار نگرفته و پژوهشی در این زمینه منتشر نشده است. نوآوری موجود در این مقاله شامل مدل‌سازی حرکت ماشین، بدست آوردن بازه‌ی ارتفاع بی‌بعد بهینه جهت دریچه‌های خروجی و بیان نمودار تغییرات منوکسیدکربن در محدوده ارتفاع تنفسی انسان با توجه به تغییرات ارتفاع دریچه‌های خروجی می‌باشد. در این مقاله ابتدا مدل‌سازی حرکت ماشین با استفاده از روشی جدید انجام شده و سپس نتایج حاصل از پخش آلودگی در این مدل‌سازی با استفاده از نتایج اندازه‌گیری تجربی مرجع [9] صحت‌سنجی شده است. در مرحله بعد با استفاده از تغییر موقعیت ورودی‌ها و خروجی‌ها، کیفیت هوای داخلی پارکینگ بهبود یافته است. نتایج بیانگر دقت خوب مدل‌سازی حرکت ماشین بوده و همچنین بیانگر این است که با استفاده از تغییر موقعیت ورودی‌ها و خروجی‌ها علاوه بر افزایش کیفیت هوای داخلی، مصرف انرژی هم کاهش یافته است. در ادامه اثر ارتفاع نقاط خروجی آلاینده بر تمرکز و پخش آلودگی و اثر ابعاد پارکینگ بررسی شده است.

2- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر این مسئله شامل معادلات بقای جرم، مومنتوم، انرژی و گونه آلودگی هستند که با استفاده از حلگر ری‌اکتینگ فوم[5] در نرم افزار اپن‌فوم[6] حل شده‌اند. جریان هوا و آلودگی از نوع جریان‌های آشفته هستند و برای شبیه‌سازی آشفتگی از مدل k-ε استفاده شده است. معادلات بقای جرم، مومنتوم، انرژی و گونه آلودگی با اعمال متوسط‌گیری زمانی به صورت معادلات (1) تا (7) بیان می‌شوند [11]:

معادله بقای جرم:

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

معادله بقای مومنتوم:

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu S_{ij} - \rho\overline{u_i' u_j'}\right] + S_m \qquad (2)$$

در معادله‌ی فوق S_m بیانگر جمله‌ی منبع است. تانسور نرخ کرنش متوسط از رابطه (3) بدست می‌آید:

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

همچنین در معادله‌ی (2)، جمله‌ی تنش‌های رینولدز به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$-\rho\overline{u_i' u_j'} = \mu_t S_{ij} - \frac{2}{3}\left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_K}{\partial x_K}\right)\delta_{ij} \qquad (4)$$

در معادله فوق μ_t بیانگر لزجت آشفتگی بوده و با استفاده از ترکیب انرژی جنبشی و نرخ اضمحلال آن مدل شده است:

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

معادله بقای انرژی محسوس (آنتالپی):

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j h)}{\partial x_j} = \frac{DP}{Dt} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho\alpha \frac{\partial h}{\partial x_j} + \frac{\mu_t}{\mathrm{Pr}_t}\frac{\partial h}{\partial x_j}\right) + S_h \qquad (6)$$

[1] Supply air inlet
[2] Exhaust
[3] ASHRAE
[4] Fluent
[5] reactingFoam
[6] OpenFoam

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-18]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.5.13.4]

در معادله‌ی فوق S_h بیانگر جمله‌ی منبع و Pr_t بیانگر عدد پرانتل آشفتگی بوده و مقدار آن برابر با 0.85 است.

معادله بقای گونه:

$$\frac{\partial(\rho C_i)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho U_j C_i)}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho D\frac{\partial C_i}{\partial x_j}+\frac{\mu_t}{\mathrm{Sch}_t}\frac{\partial C_i}{\partial x_j}\right)+S_C \qquad (7)$$

در رابطه‌ی فوق S_C بیانگر جمله منبع و Sch_t بیانگر عدد اشمیت (نسبت نفوذ مومنتوم به نفوذپذیری جرمی) آشفتگی است [12]. برای شبیه‌سازی آشفتگی، معادلات انتقال k و ε به صورت زیر بیان شده‌اند:

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

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho U_j \varepsilon)}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right]$$

$$+C_1\frac{\varepsilon}{k}(G_k+G_b)-\rho C_2\frac{\varepsilon^2}{k} \qquad (9)$$

در معادلات فوق دو جمله G_k و G_b به ترتیب بیانگر جمله تولید انرژی جنبشی توربولانسی و جمله تولید انرژی جنبشی توربولانسی به دلیل نیروی شناوری هستند. معادلات بیانگر این دو جمله به صورت زیر است.

$$G_k=-\rho\overline{u_i'u_j'}\frac{\partial U_j}{\partial x_i}$$

$$G_b=\beta g_i\frac{\mu_t}{\mathrm{Pr}_t}\frac{\partial T}{\partial x_j} \qquad (10)$$

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

$$C_\mu=0.09,\ C_1=1.44,\ C_2=1.92,\sigma_k=1.0,\ \sigma_\varepsilon=1.3 \qquad (11)$$

3- مطالعه پارکینگ مورد بررسی

جهت بررسی حل عددی و پخش آلودگی در پارکینگ از هندسه شکل 1 استفاده شده است. دلیل استفاده از این هندسه وجود نتایج تجربی حاصل از اندازه‌گیری منوکسیدکربن 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 درب‌های فوق می‌توان کانال‌های S1، S2 و E1 تا E3 را هم مشاهده کرد. 14 دریچه ورودی هوا بر روی کانال‌های S و 15 دریچه خروجی آلودگی بر روی کانال‌های E قرار داشته و در دو سمت کانال‌های فوق مطابق با [9,8] پخش شده‌اند. ابعاد دریچه‌ها 0.2 در 0.4 مترمربع است و به فاصله‌ی 5.6 متری از یکدیگر قرار گرفته‌اند.

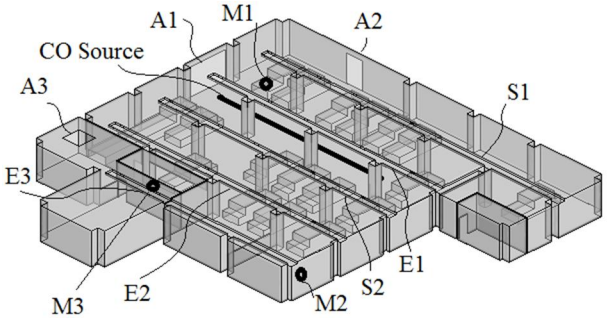

Fig. 1 The studied Car park geometry [9]

شکل 1 هندسه پارکینگ مطالعه شده [9]

3-1- شرایط مرزی

در این مقاله، درب‌های A1 و A2 به صورت ورودی سرعت[1] به ترتیب با دبی هوای 2.4 و 2.5- مترمکعب بر ثانیه در نظر گرفته‌شده‌اند (دبی هوای منفی در درب A2 به دلیل خروج جریان از این درب می‌باشد). همچنین درب A3 به صورت فشار خروجی[2] در نظر گرفته شده است (تغییرات فشار در راستای عمود بر سطح A2 برابر صفر است). 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. جهت ایجاد دبی موردنظر در هر کدام از درب‌های A1 تا A3، دامنه‌ی حل به اندازه 10 برابر قطر هیدرولیکی درب‌ها به سمت خارج هندسه امتداد یافته و سرعت در ورودی آن‌ها با روش سعی و خطا به گونه‌ای تنظیم شده است که میزان دبی موردنظر وارد پارکینگ شده یا از آن خارج شود. همچنین میزان پارامترهای k و ε در هر کدام از ورودی‌ها و خروجی‌ها برابر با مقدار پیش‌فرض اپن‌فوم است. مجموع دبی ورودی از دریچه‌های ورودی هوا برابر با 1.95 مترمکعب بر ثانیه و مجموع دبی خروجی از دریچه‌های خروجی آلودگی برابر با 4.45- مترمکعب بر ثانیه است (دبی هوای منفی به دلیل خروج جریان از این دریچه‌ها می‌باشد). میزان دبی هوا با توجه به 5 تعویض هوا در ساعت در نظر گرفته شده است [9]. دیواره‌های پارکینگ به‌صورت 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 وجود دارد.

3-2- شبکه بندی

شبکه‌بندی هندسه شکل 1 با استفاده از نرم‌افزار گمبیت انجام شده است. در این مقاله، شبکه‌ی محاسباتی در نزدیکی محدوده‌ی ورودی‌ها و خروجی‌ها، محدوده نزدیک به محل منابع آلودگی و نزدیک دیواره‌ها کوچکتر در نظر گرفته شده و در نزدیکی دیواره‌ها هم از شبکه لایه مرزی استفاده شده است. با استفاده از موارد گفته شده و پس از بررسی استقلال حل از اندازه شبکه، در حدود 1200000 سلول نامنظم برای شبکه‌بندی انتخاب شده است. نمودار بیان شده در شکل 2، بیانگر میزان سرعت در نقطه‌ی M1 برای تعداد سلول‌های متفاوت می‌باشد. همان‌گونه که در شکل 2 مشاهده می‌شود، میزان سرعت در مقادیر بیش از 1200000 تغییر چندانی نمی‌کند و نمودار سرعت مربوط به تعداد سلول‌های بیشتر هم بر روی آن قرار دارند. در مقادیر کمتر از 1200000 سلول، تغییرات در نمودار سرعت محسوس است.

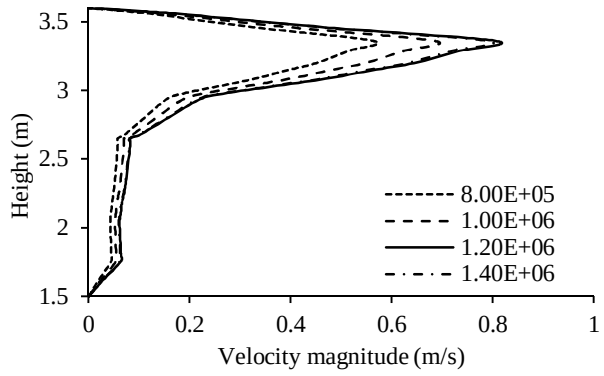

Fig. 2 Grid size independency

شکل 2 استقلال حل از اندازه شبکه

[1] Velocity Inlet
[2] Pressure Outlet

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-18]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.5.13.4]

3-3- مدل‌سازی حرکت ماشین

ماشین‌ها در پارکینگ ثابت هستند و یا سرعت زیادی ندارند (با توجه به استاندارد استرالیا، سرعت میانگین ماشین‌ها در پارکینگ 6 کیلومتر بر ساعت است [4])، همچنین نسبت سطح مقطع ماشین به پارکینگ در پژوهش حاضر اندک بوده ($A_{car}/A_{carpark} = 2 \times 1.5/30.8 \times 3.6 = 0.027$) و بنابراین حرکت ماشین‌ها باعث ایجاد جریان پیستونی نخواهد شد. برای مدل‌سازی حرکت ماشین در پارکینگ می‌توان از روش‌های متفاوتی استفاده کرد. روش شبکه متحرک، روش دیواره متحرک و روش شبکه لغزنده از نمونه روش‌هایی هستند که برای مدل‌سازی حرکت ماشین مورد استفاده قرار می‌گیرند [13]. در پژوهش حاضر حرکت ماشین نتیجه‌ی طراحی تهویه نیست و هدف برآورد میزان آلودگی پخش شده در پارکینگ از ماشین‌های روشن و تهویه‌ی آن می‌باشد. بنابراین در این مقاله برای مدل‌سازی حرکت ماشین، اثر آن در نظر گرفته شده است. برای نیل به این مقصود فرض می‌شود که ماشین تنها در راهروی اصلی پارکینگ (راهروی مقابل درب A1) حرکت می‌کند و منابع انتشار آلودگی در این راهرو قرار دارند. جهت مدل‌سازی انتشار آلاینده از ماشین در حال حرکت در راهروی اصلی، یک منبع استوانه‌ای به قطر 10 سانتی‌متر و طول 20 متر و ارتفاع 25 سانتی‌متر (محلی که اگزوز ماشین قرار دارد) در راستای حرکت ماشین در نظر گرفته شده و میزان دبی منوکسیدکربن تولیدی ماشین در طی حرکت و حرارت خارج شده از اگزوز ماشین به عنوان شرط مرزی این منبع به اپن‌فوم داده شده است. به عبارتی دیگر به‌جای در نظر گرفتن حرکت ماشین و وجود منبع متحرک در دامنه حل، یک منبع ثابت در راهروی اصلی پارکینگ در نظر گرفته شده و آلودگی تنها از این منبع خارج می‌شود. نمودار تغییرات منوکسیدکربن تولیدی در پارکینگ و غلظت منوکسیدکربن در چندین نقطه از پارکینگ اندازه‌گیری شده و گزارش شده است [9]. جهت صحت‌سنجی، در مقاله حاضر غلظت منوکسیدکربن در نقاط مختلف با توجه به میزان منوکسیدکربن تولیدی در پارکینگ بدست آمده و با نتایج مرجع فوق مقایسه شده است.

4-3- اعتبارسنجی

حل عددی توزیع هوا و آلودگی در پارکینگ شکل 1 با شرایط مرزی بیان شده در قسمت قبل و با استفاده از حلگر ری‌اکتینگ‌فوم انجام گردیده است. در مقاله حاضر نتایج حاصل از حل عددی به صورت غلظت منوکسیدکربن در سه موقعیت M1، M2 و M3 با توجه به میزان منوکسیدکربن تولیدی در پارکینگ بدست آمده و با نتایج اندازه‌گیری مقایسه شده است.

1-4-3- اعتبارسنجی در نقاط M1 و M2

غلظت منواکسیدکربن در دو نقطه M1 و M2 با زمان در یک بازه زمانی 20 دقیقه‌ای (1200 ثانیه) در مرجع [9] ارائه شده است. جهت صحت‌سنجی، بازه‌ی زمانی فوق در این مقاله شبیه‌سازی شده است. مقدار دبی جرمی متوسط منوکسیدکربن خروجی از منبع آلودگی در بازه زمانی 0 تا 1200 ثانیه در شکل 3 نمایش داده شده است. جهت بدست آوردن این نمودار، از مقادیر بیان شده در مرجع [9] در بازه‌های زمانی مختلف متوسط‌گیری شده است. همچنین میزان دمای گازهای خارج شده از اگزوز در حالت آماده به کار[1] ماشین در حدود 70 درجه سانتی‌گراد بوده [14] و در این مقاله، میزان حرارت خارج شده از اگزوز ماشین با توجه به مقدار فوق بدست آمده است. نتایج حاصل از حل عددی در شکل‌های 4 و 5 نمایش داده شده است. در دو نمودار فوق نقاط توپر بیانگر نتایج حاصل از اندازه‌گیری [9] و نقاط تو خالی بیانگر نتایج حاصل از حل عددی مقاله حاضر هستند. در هر دو نمودار، غلظت منوکسیدکربن بدست آمده از حل عددی به خوبی با نتایج حاصل از اندازه‌گیری تطابق دارد و در هر دو نمودار، غلظت منوکسیدکربن از رفتار منوکسیدکربن تولیدی در منبع آلودگی تبعیت می‌کند. با توجه به پژوهش‌های پیشین [15]، استفاده از مدل‌سازی عددی باعث ایجاد اندکی تفاوت در مقایسه با نتایج تجربی شده است. البته دقت قابل قبول است و در حد انتظار برای مسائل طراحی و تهویه است. دلیل تفاوت این است که در حل عددی فرض شده است که منوکسیدکربن از یک منبع وارد فضای پارکینگ شده و مدل‌سازی حرکت ماشین بدین وسیله انجام شده است. در عمل، ماشین در طی حرکت در راهرو اصلی پارکینگ شبیه به یک منبع متحرک عمل کرده و در هر لحظه از زمان منبع دود در یک نقطه از راستای یاد شده قرار دارد. بنابراین وجود اندکی تفاوت بین نتایج حاصل از حل عددی و نتایج تجربی ناشی از تفاوت در ورودی‌های مسئله است.

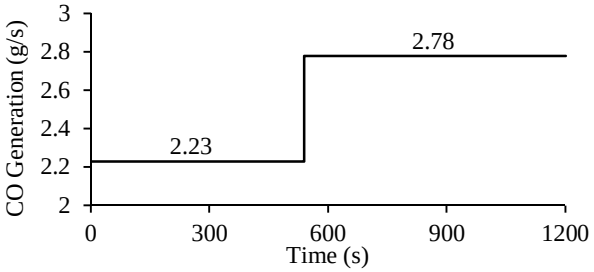

Fig. 3 CO generation in car park

شکل 3 تولید منوکسیدکربن در پارکینگ

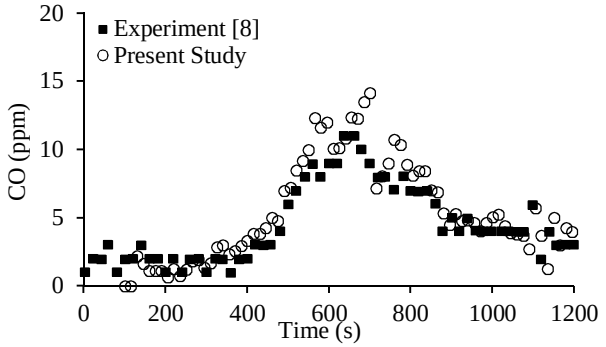

Fig. 4 Comparison of numerical simulation and measurement results, position M1

شکل 4 مقایسه حل عددی و نتایج اندازه‌گیری در موقعیت M1

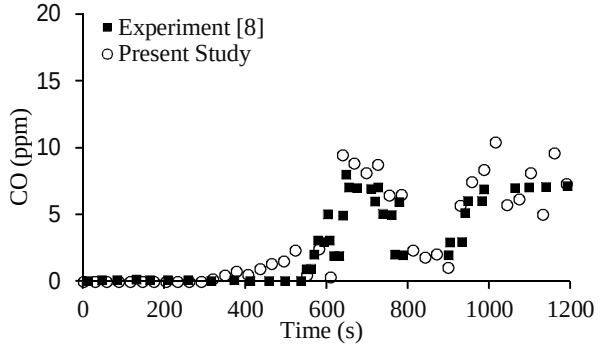

Fig. 5 Comparison of numerical simulation and measurement results, position M2

شکل 5 مقایسه حل عددی و نتایج اندازه‌گیری در موقعیت M2

[1] Idle

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-18]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.5.13.4]

3-4-2- اعتبارسنجی در نقطه M3

در مرجع [9] میزان تمرکز منوکسیدکربن در نقطه‌ی M3 (شکل 1) در یک بازه 2 ساعته (7200 ثانیه‌ای) در دو حالت 5 و 8 تعویض هوا بیان شده است. در این بازه‌ی 2 ساعته، میزان منوکسیدکربن ورودی از منبع آلودگی طولی مطابق با شکل 6 و وابسته به زمان است. جهت بدست آوردن این نمودار، از مقادیر بیان شده در مرجع [9] در بازه‌های زمانی 300 ثانیه‌ای متوسط‌گیری شده است. همان‌گونه که در شکل فوق مشاهده می‌شود، میزان منوکسیدکربن خروجی از منبع آلودگی در بازه‌های زمانی 900 ثانیه‌ای (15 دقیقه‌ای) متوسط گیری شده و بیان شده است. در حل عددی مقاله حاضر هم از همین مقادیر در بازه‌های زمانی مختلف استفاده شده است. در دو حالت 5 و 8 تعویض هوا، میزان هوای ورودی و خروجی از دریچه‌ها و درب‌های مختلف پارکینگ، مطابق جدول 1 است. مقایسه بین نتایج حل عددی در مقاله حاضر و مرجع [9] در شکل 7 نمایش داده شده است. همان‌گونه که در شکل فوق مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از حل عددی مقاله حاضر هم از نظر مقدار و هم از نظر رفتار بسیار مشابه به مقادیر بیان شده در مرجع [9] هستند. همچنین مقدار منوکسیدکربن به‌دست آمده در هر دو حالت از منوکسیدکربن تولیدی از منبع (مطابق با شکل 6) تبعیت کرده است.

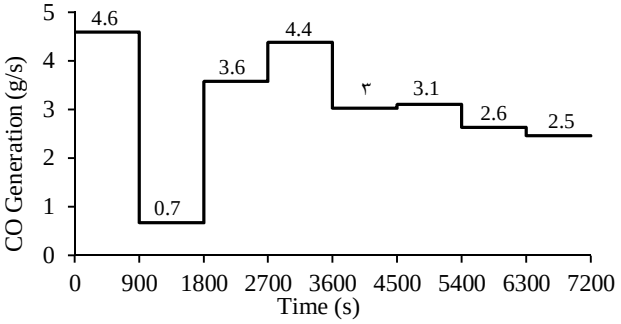

Fig. 6 CO generation in car park base geometry

شکل 6 تولید منوکسیدکربن در هندسه پایه پارکینگ

جدول 1 دبی هوای ورودی به پارکینگ در حالت‌های مختلف

Table 1 Air mass flow rate to the car park in different modes

ورودی/ خروجی	5 تعویض هوا	8 تعویض هوا
درب A1	2.4 m^3/s	2.4 m^3/s
درب A2	-2.5 m^3/s	-2.5 m^3/s
دریچه‌های ورودی هوا	1.95 m^3/s	3.84 m^3/s
دریچه‌های خروجی آلودگی	-4.45 m^3/s	-7.6 m^3/s

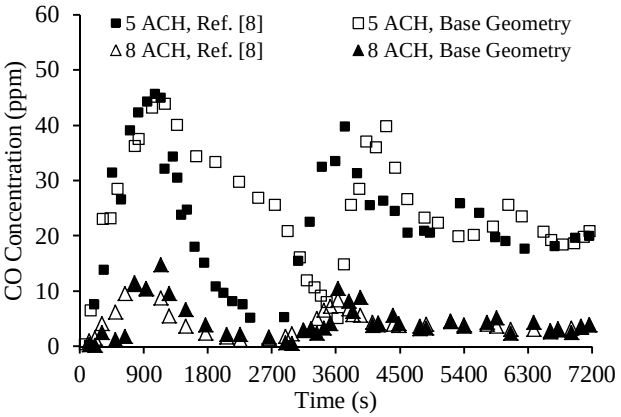

Fig. 7 Comparison of numerical results and ref. [9], Position M3

شکل 7 مقایسه نتایج حل عددی و مرجع [9]، موقعیت M3

4- نتایج

هدف اصلی نتایج بدست آمده در این مقاله معرفی روش‌های بهبود کیفیت هوای داخلی پارکینگ‌های بسته است. بنابراین نتایج به گونه‌ای بیان شده‌اند که بدون افزایش مصرف انرژی، میزان آلودگی در پارکینگ کاهش یافته و کیفیت هوای داخلی افزایش یابد.

1-4- ارزیابی روش‌های افزایش کیفیت هوای داخلی پارکینگ پایه

در طراحی سیستم تهویه در پارکینگ شکل 1 از روش کانال‌های هوا استفاده شده که از نوع تهویه موضعی[1] است [16]. از جمله خصوصیت‌های این روش تهویه می‌توان به ایجاد نواحی با هوای بدون حرکت و تمرکز زیاد منوکسیدکربن در کل فضای پارکینگ اشاره کرد. برای افزایش کیفیت هوای داخلی پارکینگ می‌توان از دو روش استفاده کرد که شامل افزایش تعداد تعویض هوا و تغییر موقعیت و بهبود دریچه‌های خروجی آلودگی است.

الف- افزایش تعداد تعویض هوا: در استانداردهای موجود، معمولا تعداد تعویض هوا به عنوان یک متغیر جهت رسیدن به حد مجاز منوکسیدکربن معرفی شده است. مطابق با جدول 2، استانداردهای مختلف مقادیر متفاوتی را جهت تعداد تعویض هوا بیان کرده‌اند که با استفاده از آنها باید حد مجاز آلاینده‌ها تامین گردد. همان‌گونه که در شکل 7 مشاهده می‌شود، تمرکز منوکسیدکربن در حالت 5 تعویض هوا بسیار بیشتر از حالت 8 تعویض هوا است. همچنین با توجه به جدول 1، افزایش تعداد تعویض هوا معادل با افزایش دبی از دریچه‌های ورودی هوا و خروجی آلودگی است، بنابراین میزان مصرف انرژی هم افزایش یافته است. از طرفی افزایش میزان دبی جریان ورودی و خروجی معادل با افزایش میزان افت فشار در کانال‌های تامین هوای تمیز و خروجی هوای آلوده بوده و بنابراین میزان مصرف انرژی باز هم دچار افزایش شده است. در صورتی که میزان افت فشار ناشی از افزایش دبی جریان در کانال‌ها را در نظر نگیریم، میزان افزایش مصرف انرژی ناشی از افزایش دبی جریان ورودی و خروجی به صورت نسبت دبی حجمی جریان در دو حالت به توان 3 است (میزان دبی کلی هوای تهویه در دو حالت 5 و 8 تعویض هوا به ترتیب برابر با 7 و 10 مترمکعب بر ثانیه است). بنابراین نسبت میزان مصرف انرژی در دو حالت برابر با $P_2/P_1 = (10/7)^3 = 2.91$ است. بنابراین همان‌گونه که در رابطه فوق بیان شد، میزان توان (انرژی) مصرفی در حالت 8 تعویض هوا حدودا سه برابر حالت 5 تعویض هوا است که نشان از افزایش زیاد مصرف انرژی دارد و در درازمدت دارای صرفه اقتصادی نیست.

ب- بهبود موقعیت ورودی‌ها و خروجی‌ها: امروزه طراحی سیستم تهویه به گونه‌ای انجام می‌شود که آلودگی در یک جهت خاص حرکت داده شده و از خروجی‌ها به سمت دودکش خروجی و فضای آزاد هدایت شود [16][2].

جدول 2 حد مجاز آلودگی و میزان تعویض هوا در استانداردهای مختلف [1, 17,3]

Table 2 pollution and air change limits in standards [1,3,17]

سازمان	زمان (ساعت)	آلودگی (ppm)	نرخ تهویه
اشری	8 (1)	9 (35)	7.5 lit $s^{-1}m^2$
اوشا	8	35	-
مقررات ملی بریتانیا	8	50	6-10 ACH
مقررات ملی ساختمان	8	25	7.5 lit $s^{-1}m^2$
کد بین المللی مکانیک	-	-	3.8 lit $s^{-1}m^2$

[1] Local Ventilation
[2] Fully mixed flow

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-18]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.5.13.4]

این نوع تهویه را تهویه طولی[1] یا جابجایی[2] می‌نامند. با استفاده از این روش می‌توان جریان آلودگی را به سمتی حرکت داد که تردد افراد در آن کمتر بوده و در نتیجه تماس افراد با منوکسیدکربن کاهش یابد. این روش نسبت به روش تهویه موضعی دارای مزایایی همچون مصرف انرژی کمتر است [19,18]. برای بررسی اثر ایجاد جریان هوا در یک جهت خاص در مقاله حاضر، موقعیت ورودی‌های هوا و خروجی‌های آلودگی در هندسه شکل 1 تغییر یافته‌اند (شکل). در حالت جدید (خروجی بهبود یافته) خروجی‌های آلودگی در منتهی‌الیه غربی پارکینگ قرار گرفته و ورودی‌ها، جریان هوا را به سمت آن‌ها هدایت می‌کنند. در این حالت کانال‌های S1، E1 و E2 حذف شده و دو کانال E3 و S2 جریان هوا را به سمت دیواره‌ی غربی پارکینگ (محل دریچه‌های خروجی) می‌دمند. از طرفی درب A2 که به عنوان محل خروجی آلودگی مورد استفاده قرار می‌گرفت به چهار دریچه خروجی تقسیم شده و در روی دیواره غربی توزیع شده‌اند. میزان دبی ورودی و خروجی به پارکینگ از ورودی A1 برابر با 2.4 مترمکعب بر ثانیه، از ورودی A2 برابر با - 7 مترمکعب بر ثانیه، از دریچه‌های ورودی برابر با 1.96 مترمکعب بر ثانیه و از خروجی‌ها برابر با صفر است. بنابراین میزان دبی هوای ورودی از دریچه‌های خروجی آلودگی حذف شده و همه‌ی حجم آلودگی از دریچه‌های خروجی بهبود یافته (معادل درب) خارج شده‌اند. در این حالت، خروج آلودگی با استفاده از 5 تعویض هوا انجام گرفته است. همچنین میزان آلودگی ورودی به پارکینگ همانند نمودار بیان شده در شکل 6 و متغیر با زمان است. تغییرات تمرکز منوکسیدکربن با زمان در نقطه‌ی M3 محاسبه شده و با مقدار بدست آمده در حالت پایه‌ی پارکینگ (شکل) و استاندارد اشری مقایسه شده و نتایج در شکل 9 نمایش داده شده است. در شکل فوق، نقاط توپر بیانگر میزان آلاینده حاصل از حل عددی در حالت هندسه پایه با 5 تعویض هوا در نقطه M3 و نقطه‌های تو خالی هم بیانگر میزان آلاینده در نقطه M3 در حالت خروجی بهبود یافته است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، با استفاده از تغییر موقعیت خروجی‌ها، میزان غلظت آلاینده‌ها بسیار کمتر از حد مجاز بدست آمده است. بنابراین استفاده از تغییر موقعیت خروجی‌ها (حتی با ثابت ماندن تعداد تعویض هوا) باعث افزایش کیفیت هوای داخلی پارکینگ شده است و می‌توان از این روش (تهویه جابجایی یا طولی) به عنوان یک راهکار مناسب جهت تهویه آلودگی در پارکینگ استفاده نمود. در شکل 10 نمایی از توزیع منوکسیدکربن در پارکینگ در حالت پایه با 5 و 8 تعویض هوا و خروجی‌های بهبود یافته (هندسه شکل) در ارتفاع تنفسی انسان نمایش داده شده است. کانتور توزیع منوکسیدکربن در شکل فوق در ارتفاع

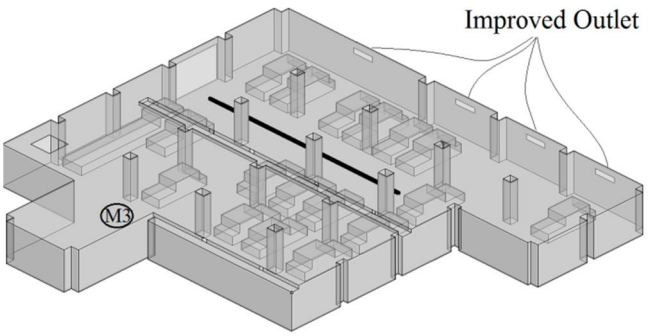

Fig. 8 Car park with improved outlet

شکل 8 نمایی از پارکینگ با خروجی بهبود یافته

[1] Longitudinal Ventilation
[2] Displacement Ventilation

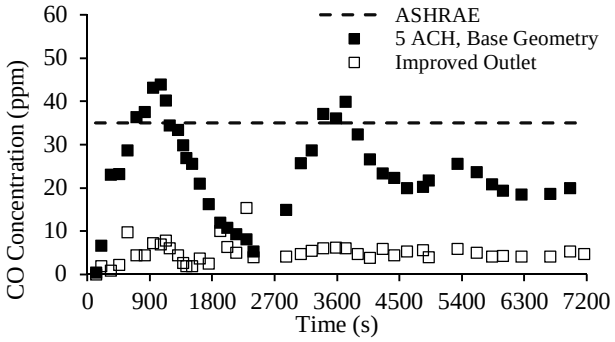

Fig. 9 Comparison of base and modified outlet results, Position M3

شکل 9 مقایسه نتایج حالت پایه با حالت خروجی بهبود یافته، موقعیت M3

1.75 متری پارکینگ و در انتهای زمان حل عددی (t=2 hour) نمایش داده شده است. میانگین آلاینده در کل فضای پارکینگ در سه حالت 5 تعویض هوا، 8 تعویض هوا و خروجی‌های بهبود یافته به ترتیب برابر با 40، 26 و 20 ppm است. همان‌گونه که در بخش‌های a و b مشاهده می‌شود، منوکسیدکربن خروجی از منبع در فضای پارکینگ پخش شده و غلظت آن در قسمت شمالی پارکینگ بیش از قسمت جنوبی آن است. غلظت میانگین منوکسیدکربن در قسمت شمالی پارکینگ برای دو حالت 5 و 8 تعویض هوا به ترتیب برابر با 50 و 33 ppm است. بنابراین افزایش تعداد تعویض هوا و دبی تهویه در حالت تهویه موضعی علاوه بر این‌که مصرف انرژی را افزایش می‌دهد، لزوما باعث کاهش چشمگیر آلاینده نخواهد شد. همان‌گونه که اشاره شد، راه حل دیگری که برای کاهش آلودگی می‌توان مورد استفاده قرار داد، تغییر موقعیت خروجی‌های آلودگی است. در شکل 10 نمونه‌ای از کانتور توزیع منوکسیدکربن در حالتی که خروجی‌ها بر روی دیواره غربی پخش شده‌اند (هندسه شکل 8)، نمایش داده شده است. با توجه به پژوهش هو و همکاران [6] استفاده از تهویه جابجایی باعث هدایت آلودگی به سمت دریچه‌های خروجی آلاینده شده و در صورتی که خروجی‌ها دارای موقعیت بهینه نباشند، غلظت منوکسیدکربن در محل خروجی‌ها افزایش یافته و عدم توانایی دریچه‌های خروجی در خارج کردن آلاینده باعث پخش مجدد آلودگی در فضای داخلی پارکینگ پخش می‌شود. در این مقاله، دریچه‌های خروجی آلاینده در ارتفاع بهینه قرار گرفته و در نتیجه افزایش تعداد خروجی‌ها باعث کاهش آلاینده در کل فضای پارکینگ شده است (حدود 35% در کل فضای پارکینگ نسبت به حالت پایه).

علاوه بر کانتورهای پخش منوکسیدکربن، پارامترهای دیگری همچون کارایی خروج منوکسیدکربن[3] (رابطه 12) و راندمان تهویه منوکسیدکربن[4] (رابطه 13) جهت بیان کیفیت سیستم تهویه مورد استفاده قرار می‌گیرند [20,6].

$$\xi = \frac{C_{\text{exit}}}{C_{\text{average}}} \qquad (12)$$

$$\eta = \frac{C_{\text{exit}} - C_{\text{min}}}{C_{\text{max}} - C_{\text{min}}} \qquad (13)$$

در رابطه‌های فوق، C_{exit}، C_{average}، C_{max} و C_{min} به ترتیب بیانگر غلظت متوسط منوکسید در خروجی، غلظت متوسط منوکسید در کل فضای پارکینگ، غلظت ماکزیمم و غلظت مینیمم است.

[3] CO removal effectiveness
[4] CO removal efficiency

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-18]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.5.13.4]

جریان تهویه با توجه به کارایی و راندمان تهویه منوکسیدکربن به چهار دسته مطابق با جدول 3 تقسیم‌بندی می‌شوند. در حالت کلی بهترین حالت برای تهویه، ایجاد جریان پیستونی در فضا است. هر چه جریان از حالت اتصال کوتاه فاصله گرفته و به جریان پیستونی نزدیک شود، میزان آلودگی در فضای داخلی پارکینگ کمتر و کیفیت هوای داخلی پارکینگ بیشتر خواهد بود. در این مقاله محاسبات مربوط به کارآیی خروجی و راندمان تهویه انجام گرفته و نتایج آن در جدول 4 بیان شده است. نتایج حاصل از حل بیانگر این است که جریان در دو حالت 5 و 8 تعویض هوا از نوع اتصال کوتاه و در حالت خروجی بهبود یافته از نوع جریان جابجایی است. افزایش دبی جریان هوا به 8 تعویض هوا باعث افزایش کارآیی خروجی و راندمان تهویه شده و حالت جریان به جریان اختلاطی نزدیک شده است.

4-2- پیشنهاد بازه بهینه ارتفاع خروجی آلاینده جهت بهبود کیفیت هوا

ارتفاع دریچه‌های خروجی پارامتری با اهمیت در خروج آلودگی از پارکینگ است. با استفاده از تنظیم موقعیت صحیح دریچه‌های خروجی آلودگی در پارکینگ می‌توان الگوی جریان را به جریان پیستونی نزدیک کرد. اگزوز ماشین در ارتفاع‌های پایین پارکینگ قرار داشته و در نتیجه آلودگی از این ناحیه وارد فضای تنفسی انسان می‌شود. همان‌گونه که قبلا اشاره شد، آلودگی خروجی از اگزوز دارای دمایی بیش از دمای محیط پارکینگ بوده و به دلیل نیروی شناوری به سمت بالا حرکت می‌کند و در طی حرکت با محیط اطراف خود انتقال حرارت دارد. بنابراین آلودگی‌ها لزوما در بالاترین ارتفاع پارکینگ قرار ندارند. نمودار غلظت منوکسیدکربن موجود در پارکینگ شکل 1 و شکل 8 برحسب ارتفاع بی‌بعد در شکل 11 نمایش داده شده است. در شکل 11 ، ارتفاع بی‌بعد اندازه‌گیری غلظت منوکسیدکربن به صورت $H_{ND} = h/H$ در نظر گرفته شده است که در آن h ارتفاع اندازه‌گیری غلظت آلودگی، H ارتفاع سقف و H_{ND} ارتفاع بی‌بعد اندازه‌گیری است. ارتفاع اندازه‌گیری غلظت منوکسیدکربن در محدوده 1 تا 2.5 متر در نظر گرفته شده است (ارتفاع بی-بعد H_{ND} بین 0.27 تا 0.7) تا در محدوده تنفسی انسان قرار گیرد. غلظت منوکسیدکربن در هر ارتفاع از میانگین غلظت منوکسیدکربن در نقاط 1 تا 16 (مطابق با شکل 12) محاسبه شده است (نقاط موجود بر روی نمودار شکل 11 برابر با میانگین غلظت منوکسیدکربن در 16 نقطه موجود در شکل12 در ارتفاع موردنظر هستند). با توجه به نقاط توخالی موجود در

جدول 3 دسته بندی جریان تهویه [20]

Table 3 Ventilation flow categories [20]

الگوی جریان	کارآیی خروج منوکسیدکربن	راندمان تهویه منوکسیدکربن
جریان اتصال کوتاه	0-1	0- 50%
جریان اختلاطی	1	50%
جریان جابجایی	1-2	50- 100%
جریان پیستونی	2	100%

جدول 4 کارآیی خروجی و راندمان تهویه منوکسیدکربن

Table 4 CO removal effectiveness and removal efficiency

حالت حل	کارآیی خروج منوکسیدکربن	راندمان تهویه منوکسیدکربن
5 تعویض هوا	0.56	27.3%
8 تعویض هوا	0.88	41.5%
خروجی بهبود یافته	1.72	83%

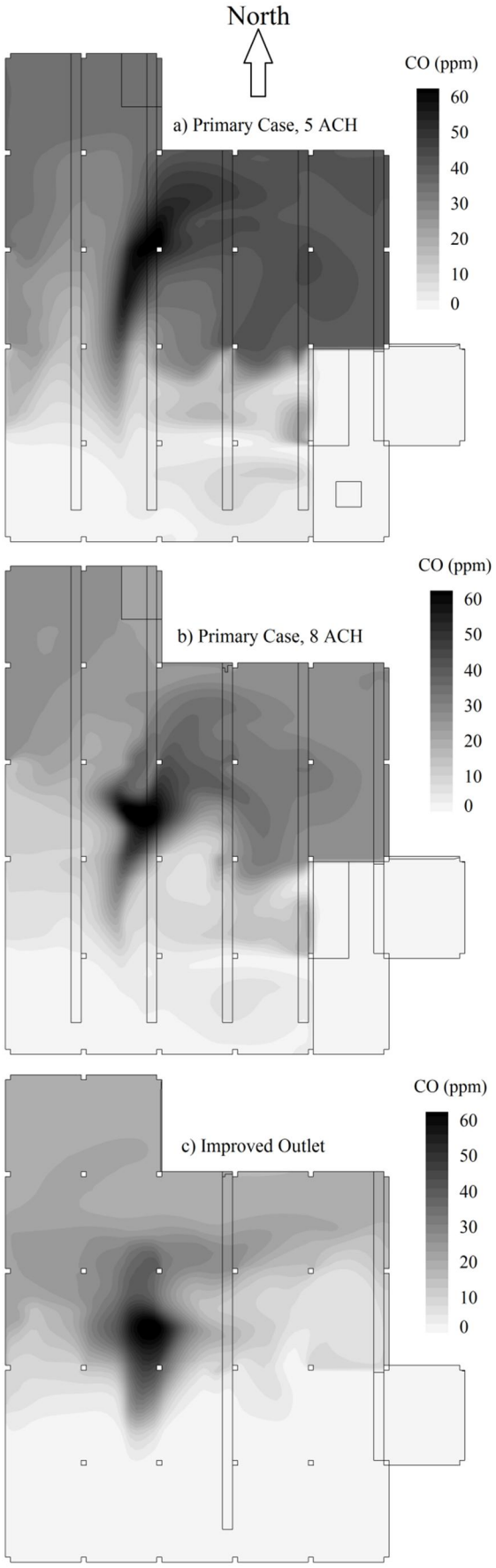

Fig. 10 CO distribution, height= 1.75 m, time= 2 hour

شکل 10 پخش منوکسیدکربن، ارتفاع 1.75 متر، t=2 hour

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-18]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.5.13.4]

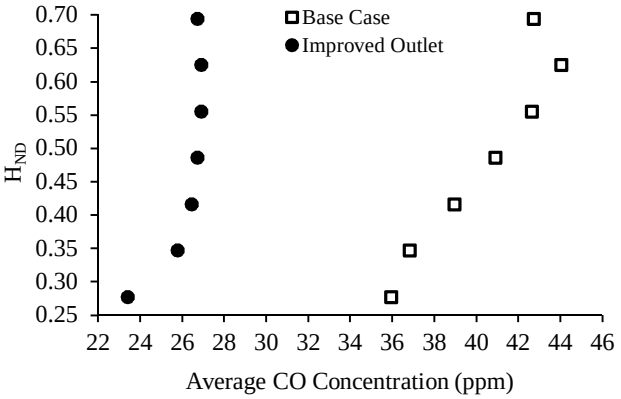

Fig. 11 CO concentration versus non dimensional height

شکل 11 غلظت منوکسیدکربن برحسب ارتفاع بی‌بعد

نمودار شکل ، غلظت منوکسیدکربن در محدوده ارتفاع بی‌بعد 0.6 تا 0.65 دارای بیشترین مقدار است. از طرفی با توجه به نقاط توپر موجود در نمودار شکل 11، بهبود موقعیت خروجی‌ها باعث کاهش چشمگیر غلظت آلاینده در ارتفاع‌های مختلف شده است.

بنابراین نیاز است تا با تغییر موقعیت دریچه‌های خروجی آلاینده، میزان منوکسیدکربن در ارتفاع‌های مختلف اندازه‌گیری شده و حساسیت پخش منوکسیدکربن به ارتفاع بی‌بعد خروجی‌ها بررسی شود. در این مقاله، اثر ارتفاع دریچه خروجی بر غلظت منوکسیدکربن مورد بررسی قرار گرفته است. جهت بررسی این پارامتر، پارکینگ شکل 8 در نظر گرفته شده و ارتفاع دریچه‌های خروجی آلودگی در آن از کف تا سقف تغییر کرده است. ارتفاع دریچه‌های خروجی آلودگی با استفاده از ارتفاع سقف پارکینگ بی‌بعد شده است. در صورتی که ارتفاع دریچه‌های خروجی آلودگی را با h_{vent} و ارتفاع سقف را با H نشان دهیم، ارتفاع بی‌بعد خروجی‌های آلودگی با $H_{exh} = h_{vent}/H$ نمایش داده می‌شود. میزان آلودگی در هر ارتفاع در 16 نقطه مشخص شده در شکل 12 محاسبه شده و متوسط‌گیری شده است. همان‌گونه که در قسمت‌های مختلف شکل 10 مشاهده شد، نواحی موجود در قسمت جنوبی پارکینگ دارای غلظت منوکسیدکربن بسیار اندکی هستند و در نتیجه از روند متوسط‌گیری حذف شده‌اند. بنابراین محاسبه غلظت منوکسیدکربن در نقاط دارای آلودگی بیشتر پارکینگ و در محدوده ارتفاع تنفسی انسان انجام گرفته است. نتایج حاصل از حل عددی در شکل 13 نمایش داده شده است. نتایج بیانگر این است که در بازه‌ی ارتفاع بی‌بعد (H_{exh}) 0.5 تا 0.7، کمترین میزان غلظت منوکسیدکربن در همه‌ی ارتفاع‌های اندازه‌گیری شده به‌دست آمده است. به عبارتی در صورتی که دریچه‌های خروجی آلاینده در ارتفاع بی‌بعد 0.5 تا 0.7 قرار داشته باشند، بهترین کیفیت هوای داخلی در پارکینگ برقرار خواهد بود و آلودگی هدایت شده به سمت خروجی‌ها در بهترین حالت از پارکینگ خارج خواهند شد. همچنین نتایج بیانگر این است که در صورتی که دریچه‌های خروجی آلاینده در ارتفاع‌های پایین پارکینگ قرار داشته باشند، غلظت آلاینده‌ها بیشترین مقدار خود را خواهد داشت. اثر ارتفاع بی‌بعد دریچه‌های خروجی بر غلظت متوسط منوکسیدکربن در کل پارکینگ در شکل 14 نمایش داده شده است. با توجه به این شکل، محدوده ارتفاع بی‌بعد 0.5 تا 0.7 یک بازه مناسب جهت قرارگیری دریچه‌های خروجی آلاینده است. در صورتی که دریچه‌های خروجی آلاینده در بالاترین و پایین ارتفاع پارکینگ قرار داشته باشند، جریان به ترتیب از نوع اتصال کوتاه و کاملا اختلاطی خواهد بود. جریان اتصال کوتاه به جریانی گفته می‌شود که در آن همه‌ی هوای تهویه از ورودی مستقیما به سمت خروجی حرکت کرده و اثری اندک بر روی آلودگی‌های موجود در پارکینگ دارد.

همچنین جریان اختلاطی جریانی است که در آن هوای ورودی به خوبی به همه‌ی فضای پارکینگ رسیده و با آلودگی موجود در پارکینگ مخلوط می‌شود. جریان اختلاطی تنها در صورتی مناسب است که غلظت منوکسیدکربن در پارکینگ به کمتر از حد مجاز بیان شده توسط استانداردها برسد و دریچه‌های خروجی آلاینده در موقعیت مناسبی قرار داشته باشند، در غیر این‌صورت غلظت آلاینده در همه‌ی فضای داخلی پارکینگ افزایش یافته و عملا جریان تهویه باعث کاهش غلظت منوکسیدکربن نخواهد شد. در مقاله حاضر قرارگیری دریچه‌های خروجی آلاینده در پایین ترین ارتفاع باعث ایجاد شرایط مساعد نشده و غلظت میانگین منوکسیدکربن در آن به 52 ppm رسیده است. همچنین اثر ارتفاع بی‌بعد دریچه‌های خروجی بر راندمان و کارآیی خروجی منوکسید کربن در شکل 15 نمایش داده شده است. نقاط موجود بر روی نمودار بیانگر این هستند که با افزایش ارتفاع بی‌بعد خروجی‌ها، جریان به محدوده اتصال کوتاه نزدیک شده است.

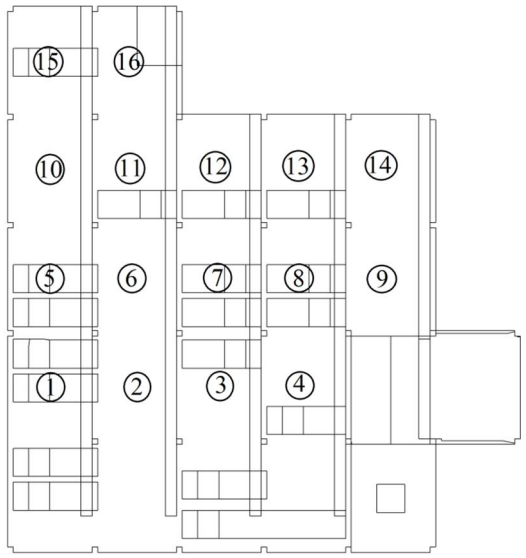

Fig. 12 CO measurement points

شکل 12 نقاط اندازه‌گیری منوکسیدکربن

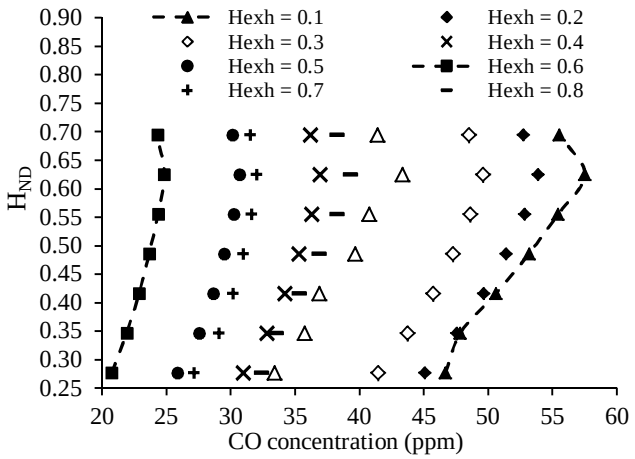

Fig. 13 CO concentration in different heights

شکل 13 غلظت منوکسیدکربن در ارتفاع‌های مختلف

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-18]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.5.13.4]

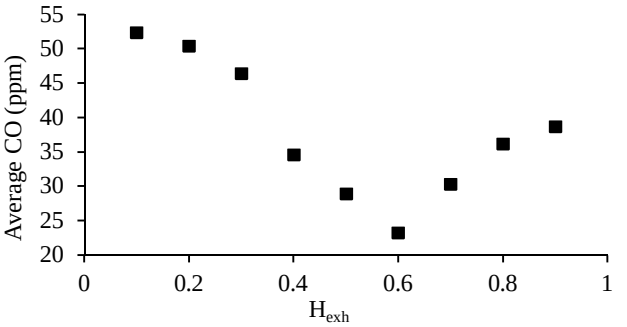

Fig. 14 Effect of exhaust height on average CO concentration

شکل 14 اثر ارتفاع دریچه خروجی بر تمرکز متوسط منوکسید کربن

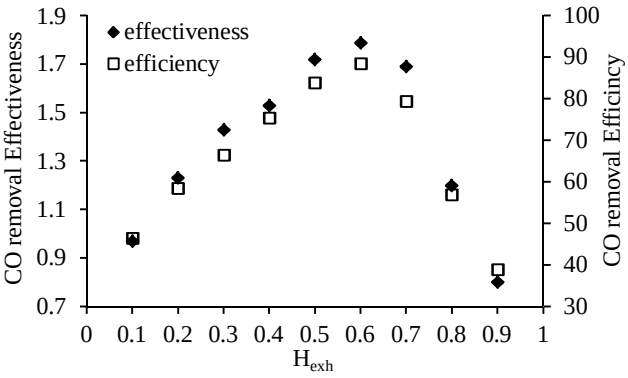

Fig. 15 Effect of exhaust height on CO removal efficiency and effectiveness

شکل 15 اثر ارتفاع دریچه خروجی بر راندمان و کارآیی خروج منوکسیدکربن

4-3- بررسی ابعاد تعیین شده در استانداردها

مهمترین پارامتری که نیاز پارکینگ به وجود تهویه مکانیکی را تعیین می‌کند، اندازه و ظرفیت پارکینگ است. مرجع [21] حداکثر طول پارکینگ برای عدم نیاز به تهویه مکانیکی را برابر با 54 متر بیان کرده است. با توجه به مرجع فوق، برای پارکینگ‌های با طول کمتر از 54 متر می‌توان با استفاده از تهویه طبیعی آلودگی را خارج نمود. پارکینگ‌های با طول بیش از 54 متر بسته به شرایطی که دارند (وجود یا عدم وجود گشودگی در دیواره‌های مختلف)، نیاز به تهویه مکانیکی و در صورت لزوم تهویه با جت‌فن دارند (استاندارد استرالیا [4] مقدار طول لازم و کافی برای استفاده از جت‌فن و دیگر تجهیزات مکانیکی در پارکینگ را برابر با 75 متر در نظر گرفته است). جهت بررسی اثر ابعاد پارکینگ بر نوع تهویه، از نمونه‌ای از پارکینگ‌های متداول مکعب مستطیلی [21] به طول 60 متر، عرض 30 متر و ارتفاع 2.85 متر استفاده شده و توزیع منوکسیدکربن در آن برای دو حالت دارای جت‌فن و بدون جت‌فن بدست آمده است (شکل 16). پارکینگ فوق ظرفیت 80 ماشین داشته و فرض می‌شود که 25% از ماشین‌های موجود در پارکینگ روشن هستند (20 ماشین) [17,4]. همچنین پارکینگ فوق دارای 6 ورودی هوای تمیز به ابعاد 0.4 در 1 متر و 6 خروجی هوای آلوده به ابعاد 0.8 در 1.4 متر است که مطابق با شکل 16 در دو انتهای پارکینگ قرار گرفته‌اند. میزان دبی هوای تهویه در پارکینگ با توجه به روش اشری [1] بدست آمده است. براساس این روش برای بدست آوردن میزان هوای تهویه باید تعداد ماشین‌های روشن (N)، نرخ انتشار آلاینده از ماشین‌ها (E)، سطح پارکینگ (A)، زمان متوسط حرکت ماشین در پارکینگ (T) و میزان آلودگی مجاز در پارکینگ (پارامتر تعیین کننده برای C) را در رابطه‌ی (14) قرار داده و میزان دبی هوای تهویه را برحسب لیتر بر ثانیه به ازای واحد سطح پارکینگ بدست آورد.

$$q_{vent} = C \cdot T \frac{N \cdot E \times 60}{A \cdot E_0} \times 100 \qquad (14)$$

همچنین میزان هوای ورودی به پارکینگ باید بین 75% تا 90% هوای تهویه (اگزاست) باشد [4]. در پارکینگ بیان شده در این مقاله، مقدار هر کدام از پارامترها و میزان هوای مورد نیاز تهویه در جدول 5 بیان شده است. میزان منوکسیدکربن خروجی از هر ماشین برابر با 18.96 گرم بر دقیقه در نظر گرفته شده است [1]. با توجه به شکل 16، ماشین‌های روشن در راهروهای پارکینگ قرار گرفته (خط مشکی) و منبع آلودگی همانند بخش‌های قبلی به صورت یک منبع استوانه‌ای به طول 20 متر، قطر 0.1 متر و ارتفاع 0.25 متری در نظر گرفته شده و منوکسیدکربن خروجی از هر کدام از دو منبع طولی برابر با 3.16 گرم بر ثانیه و دارای دمای 70 درجه سانتی‌گراد است (فرض شده است که ده ماشین در هر کدام از راهروهای اصلی پارکینگ قرار دارند). با استفاده از این مشخصات، توزیع آلودگی در ارتفاع 2 متر به صورت شکل 16 بدست آمده است. همان‌گونه که در شکل فوق مشاهده می‌شود، دبی هوای ورودی به پارکینگ به تنهایی قادر به جابجایی آلودگی موجود در پارکینگ نبوده و در قسمت‌های میانی تا انتهای پارکینگ، غلظت میانگین منوکسیدکربن برابر با 54 ppm است. هنچنین در قسمت ابتدایی تا میانی پارکینگ غلظت میانگین منوکسیدکربن برابر با 42 ppm است (در شکل 16 به دلیل نمایش بهتر، غلظت‌های بیش از 60 ppm حذف شده‌اند). در این حالت بیشترین غلظت موضعی منوکسیدکربن در محل منابع آلودگی بدست آمده است. بنابراین نتایج بیانگر این است که در همه‌ی پارکینگ شرایط نامساعد از نظر کیفیت هوای داخلی برقرار است. جهت مقابله با این پدیده، می‌توان از چندین روش استفاده کرد که شامل استفاده از دودکش‌های میانی در پارکینگ، افزایش دبی هوای ورودی‌ها و استفاده از جت‌فن در قسمت میانی پارکینگ است. در عمل استفاده از روش اول امکان‌پذیر نیست، زیرا شرایط معماری و ساختمانی معمولا اجازه استفاده از دودکش‌های میانی را نمی‌دهد و از طرفی افزایش دبی هوای ورودی‌ها هم عملا امکان‌پذیر نیست، زیرا با افزایش دبی هوای ورودی سرعت هوا افزایش می‌یابد و از محدوده استاندارد (حداکثر سرعت ورودی 2 متر بر ثانیه [3]) خارج می‌شود (در شبیه‌سازی انجام شده، میزان سرعت هوای ورودی برابر با 1.75 متر بر ثانیه است). با توجه به موارد بیان شده، در این مقاله از راه حل سوم استفاده شده است. بدین منظور در دو راهروی اصلی پارکینگ دو جت‌فن قرار گرفته که جریان را از سمت ورودی‌ها به سمت خروجی‌ها هدایت می‌کنند.

جدول 5 مقدار پارامترهای مختلف رابطه (14)

Table 5 Amount of parameters of equation 14

پارامتر	واحد	مقدار
N (تعداد ماشین‌ها)	-	20
E (نرخ انتشار آلاینده)	g/min	18.96
E_0 (نرخ انتشار آلاینده نرمالیزه)	$g/(h.m^2)$	26.7
A (سطح پارکینگ)	m^2	1800
C (پارامتر تعیین کننده منوکسیدکربن مجاز)	$(lit/s)/(m^2/s)$	0.000481
T (زمان حرکت ماشین در پارکینگ)	s	120
q_{vent} (نرخ تهویه بر واحد سطح)	$lit/(s.m^2)$	2.73
ACH (تعداد تعویض هوا)	-	3.45
$q_{exhaust}$ (نرخ هوای اگزاست)	m^3/s	5.8

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-18]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.5.13.4]

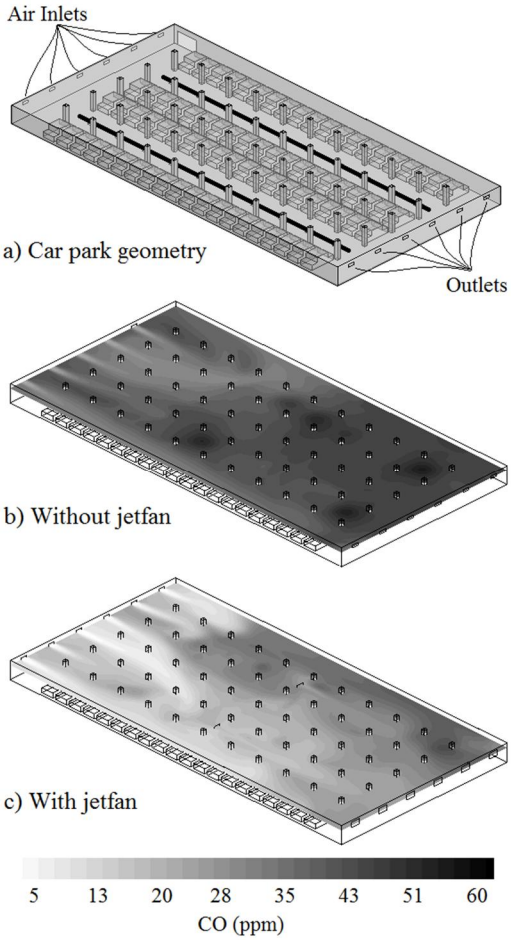

Fig. 16 CO distribution in car park, h=2 m, t=60 min

شکل 16 توزیع آلودگی در ارتفاع 2 متری پارکینگ، t=60 min

با استفاده از پارامترهای بیان شده در جدول 5 در رابطه‌ی 14، مقدار دبی هوای تهویه بدست آمده است. برای محاسبه تعداد جت فن‌ها از روش بیان شده در استاندارد استرالیا استفاده شده است [22]. در این روش فرض می‌شود که برای هر 100 مترمربع از سطح پارکینگ 5 نیوتن نیروی تراست مورد نیاز است. بنابراین در صورتی که سطح پارکینگ در عدد 0.05 ضرب شود، میزان نیروی تراست لازم جهت جابجایی هوا در پارکینگ بدست خواهد آمد. در پارکینگ بیان شده در این بخش مقدار نیروی تراست با توجه به روند فوق برابر با 90 نیوتن است. با توجه به کاتالوگ‌های فن‌های القایی[1]، تعداد دو فن القایی انتخاب شده است که مقدار دبی خروجی از هر کدام از آنها برابر با 2.2 مترمکعب بر ثانیه و میزان فشار آن‌ها برابر با 200 پاسکال است. همچنین با توجه به کاتالوگ مورد نظر، سطح مقطع خروجی جت‌فن القایی فوق به صورت مستطیلی بوده و دارای 1 متر عرض و 0.4 متر ارتفاع است. جهت اعمال شرایط مرزی در اپن فوم از یک مستطیل با ابعاد بیان شده استفاده شده و میزان دبی و پرش فشار[2] به آن با استفاده از شرط مرزی فن[3] داده شده است.

توزیع منوکسیدکربن در پارکینگ در این حالت در قسمت سوم شکل 16 نمایش داده شده است. با توجه به شکل فوق، استفاده از جت‌فن کیفیت هوای داخلی را به میزان زیادی افزایش داده است. در این حالت غلظت میانگین منوکسیدکربن از ورودی‌ها تا محل جت‌فن‌ها برابر با 20 ppm و غلظت میانگین منوکسیدکربن از محل جت‌فن‌ها تا خروجی‌ها برابر با 31 ppm است. بنابراین استفاده از جت‌فن باعث افزایش کیفیت هوای داخلی پارکینگ شده است. استفاده از جت‌فن باعث افزایش میزان کارآیی خروجی منوکسیدکربن از 1.04 به 1.65 شده است. همچنین میزان راندمان تهویه منوکسیدکربن هم از 49% به 80% رسیده و جریان به جریان پیستونی نزدیک شده است.

5- نتیجه گیری و جمع‌بندی

در این مقاله معادلات پیوستگی، مومنتوم، انرژی و گونه با استفاده از مدل آشفتگی k-ε و کد متن باز اپن‌فوم حل شده و توزیع منوکسیدکربن در پارکینگ بسته بدست آمده است. در این مقاله برای اولین بار از یک منبع تولید آلودگی ثابت در مسیر حرکت ماشین‌ها به جای استفاده از منبع متحرک استفاده شده و نتایج حاصل از آن به خوبی با نتایج حاصل از اندازه-گیری مطابقت دارد. وجود تفاوت اندک بین نتایج به دلیل استفاده از منبع ثابت آلودگی به‌جای شبیه‌سازی منبع‌های متحرک است. همچنین در این مقاله برای اولین بار توزیع منوکسیدکربن در ارتفاع‌های مختلف پارکینگ و بر اساس ارتفاع‌های مختلف دریچه‌های خروجی آلاینده بیان شده و بازه بی‌بعد بهینه جهت قرارگیری دریچه‌های خروجی معرفی شده است. نتایج کاربردی حاصل از مقاله حاضر به شرح زیر است:

- **کاهش هزینه محاسباتی با حفظ دقت:** استفاده از منبع ثابت به جای منبع متحرک در پارکینگ باعث کاهش هزینه محاسباتی و ایجاد دقت مناسبی در نتایج بدست آمده شده است.
- **عملکرد سیستم تهویه با افزایش دبی هوا:** افزایش دبی هوای تهویه در پارکینگ‌های دارای سیستم کانال‌کشی، باعث افزایش شدید مصرف انرژی می‌شود. در نمونه بررسی شده در مقاله حاضر، افزایش دبی هوا باعث افزایش مصرف انرژی به اندازه 2.91 برابر شده است.
- **کاهش میزان متوسط منوکسیدکربن با تغییر الگوی جریان:** ایجاد جریان هوای تهویه متناظر با حالت پیستونی و بهبود موقعیت دریچه-های خروجی آلاینده باعث کاهش میزان متوسط منوکسیدکربن به اندازه 35% در کل فضای پارکینگ شده است.
- **معرفی محدوده بهینه ارتفاع دریچه‌های خروجی آلاینده:** در پارکینگ‌های بسته، دریچه‌های خروجی آلاینده باید در محدود ارتفاع بی‌بعد 0.5 تا 0.7 قرار گیرند تا بهترین شرایط کیفیت هوای داخلی در پارکینگ ایجاد شود.
- **بررسی طول معیار جهت استفاده از جت فن:** پارکینگ‌های با طول بیش از 54 متر نیاز به جت فن جهت تهویه هوا دارند. در نمونه حل شده حاضر در این مقاله، استفاده از جت‌فن باعث افزایش راندمان تهویه منوکسیدکربن از 49% به 80% شده و کیفیت هوای داخلی بهبود یافته است.

6- فهرست علائم

A	سطح پارکینگ (m^2)
$C1$, $C2$	ضریب ثابت معادله اضمحلال انرژی جنبشی
C_i	گونه آلودگی
c'_i	مقدار نوسانی گونه در راستای i
C_μ	ضریب ثابت لزجت سینماتیک آشفتگی
C_P	گرمای ویژه در فشار ثابت ($J.kg^{-1}K^{-1}$)

[1] Induced fan
[2] Pressure jump
[3] Fan boundary condition

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-18]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.5.13.4]

D	ضریب پخش جرمی (m^2s^{-1})، مشتق مادی
E, E_0	نرخ انتشار آلاینده ($gmin^{-1}$)
h	آنتالپی (Jkg^{-1})، ارتفاع (m)
H	ارتفاع سقف (m)
H_{exh}	ارتفاع بی‌بعد دریچه‌های خروجی
k	انرژی جنبشی (m^2s^{-2})
$\dot{m}_{CO}$	دبی جرمی منوکسیدکربن (kgs^{-1})
N	تعداد ماشین‌ها
P	توان ($J.s^{-1}$)
p	فشار ($kgm^{-1}s^{-2}$)
Pr_t	عدد پرانتل آشفتگی
Q	دبی حجمی (m^3s^{-1})
Sch_t	عدد اشمیت
S_G	جمله منبع معادله بقای مومنتوم ($kg\ m^{-2}s^{-2}$)
S_h	جمله منبع معادله بقای انرژی ($kg\ m^{-1}s^{-3}$)
S_{ij}	تانسور نرخ کرنش (s^{-1})
T	دما (K)، زمان حرکت ماشین در پارکینگ
t	زمان (s)، مقدار نوسانی دما
U_i	سرعت متوسط (ms^{-1})
u'_i	سرعت نوسانی در راستای i (ms^{-1})
x_i	موقعیت در جهت i (m)
x_j	موقعیت در جهت j (m)

علایم یونانی

α_{eff}	ضریب نفوذ حرارتی موثر (m^2s^{-1})
Δ	گرادیان
ε	نرخ اضمحلال انرژی جنبشی (m^2s^{-3})
Γ_t	ضریب پخش جرمی (m^2s^{-1})
μ_{eff}	لزجت دینامیکی موثر ($kgm^{-1}s^{-1}$)
μ_t	لزجت دینامیکی آشفتگی ($kgm^{-1}s^{-1}$)
ν	لزجت سینماتیک (m^2s^{-1})
ν_t	لزجت سینماتیک آشفتگی (m^2s^{-1})
ρ	چگالی (kgm^{-3})
σ_ε	ضریب ثابت معادله اضمحلال انرژی جنبشی
σ_k	ضریب ثابت معادله بقای انرژی جنبشی
ξ	کارآیی خروجی منوکسیدکربن

بالانویس‌ها

‘	پارامتر نوسانی
¯	متوسط گیری

زیرنویس‌ها

average	متوسط
exhaust	خروجی
exit	خروجی
inlet	ورودی
max	ماکزیمم
min	مینیمم
ND	بی‌بعد
vent	تهویه

7- مراجع

[1] *ASHRAE Handbook, HVAC Applications (SI), chapter 15*, 2011.

[2] *U.S. EPA. 2010, Final Assessment: Integrated Science Assessment for Carbon Monoxide*, U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 2010.

[3] *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*, BS 7346-7, 2006.

[4] S. Wilbur, M. Williams, R. Williams, F. Scinicariello, J. M. Klotzbach, G. L. Diamond, M. Citra, Toxicological profile for carbon monoxide, 2012.

[5] M. Krarti, A. Ayari, Ventilation for enclosed parking garages, *ASHRAE Journal*, Vol. 43, No. 2, pp. 52-57, 2001.

[6] 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.

[7] 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.

[8] A. F. Elsafty, Abo Elazm, M. M. , 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.

[9] E. Asimakopoulou, D. I. KOLAITIS, M. A. FOUNTI, CO dispersion in a car-repair shop: An experimental and CFD modelling study, *Proceeding of the Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*. Melbourne, Australia, 2009.

[10] E. K. 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.

[11] Q. Chen, Z. Zhang, Prediction of particle transport in enclosed environment, *China particuology*, Vol. 3, No. 06, pp. 364-372, 2005.

[12] A. Faghri, Y. Zhang, *Transport phenomena in multiphase systems*: Academic Press, 2006.

[13] 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.

[14] 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)*, 2005.

[15] 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.

[16] M. Y. Chan, W. K. Chow, Car park ventilation system: performance evaluation, *Building and Environment*, Vol. 39, No. 6, pp. 635-643, 2004.

[17] *International mechanical code*, IMC 2012, 2012.

[18] D. Chen, Periodically reversible supply/exhaust ventilation strategy, *Building and Environment*, Vol. 46, No. 12, pp. 2590-2597, 2011.

[19] 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. 1, pp. 622-630, 2014.

[20] O. Seppänen, Ventilation strategies for good indoor air quality and energy efficiency, *International Journal of Ventilation*, Vol. 6, No. 4, pp. 297-306, 2008.

[21] J. Wissink, L. Rasmussen, T. v. d. Wielen, M. Jansen, R. v. Beek, *Car Park Ventilation Manual*, 1st edition., NOVENCO, 2003.

[22] *Australian Standard, The use of ventilation and airconditioning in buildings, Part 2: Mechanical ventilation in buildings*, 2012.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-18]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.5.13.4]