



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



Research Article

A Numerical Study of the Effect of the Architectural Design of Different Parking Areas on the Performance of the Smoke Management System Using Jet Fans in Underground Parking Lots

Saeid Hazrati Chakheirloo ^{a,*}, Abdolnaser Omrani ^{a,*}, Behnam Heydari ^a, Roghayeh Motallebzadeh ^a

^a Department of Mechanic, Islamic Azad University of Tabriz, Tabriz, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-04-23

Revised: 2024-12-15

Accepted: 2024-12-21

Keywords:

Jet fan;
Smoke control;
Dead-end areas;
Smoke management system;
Numerical simulation;
OpenFOAM.

ABSTRACT

Jet fans are one of the common equipment in underground car parks that are used to reduce smoke in case of a fire. When sensors detect a fire in a specific area, the jet fans are activated and quickly direct the smoke towards the exit shafts. However, in some cases, jet fans located in dead-end areas redirect the airflow towards the central section of the parking lot resembling a large nozzle. The high-speed airflow generated by these jet fans can disrupt the flow from other jet fans and direct the smoke to smoke-free areas. This research focuses on improving smoke management systems in critical areas of underground car parks, especially near dead-end areas, by introducing innovative jet fan designs. The study uses the OpenFOAM software with the Boussinesq Pimple FOAM solver and incorporates the smoke concentration equation to evaluate the efficiency of this method. In this research, the effects of nozzle diameter and shape, the number of jet fans, and dead-end areas in the parking lot architecture on smoke concentration dispersion inside the parking lot have been investigated. The results show that increasing the nozzle diameter reduces smoke concentration by up to 35%. Increasing the number of jet fans has little effect, and using a new type of nozzle can prevent smoke diffusion to smoke-free areas. The smoke reduction for the newly designed jet fan is around 50%.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.33856.2656>

© 2025 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding author.

E-mail address: STU.HazratiSaeed@iaut.ac.ir and Omrai@iaut.ac.ir

How to cite this article:

S. Hazrati, A. Omrani, B. Heydari and R. Motallebzadeh, "A Numerical Study of the Effect of the Architectural Design of Different Parking Areas on the Performance of the Smoke Management System Using Jet Fans in Underground Parking Lots," Journal of Modeling in Engineering, 23 82 (2025): 253-266, doi: 10.22075/jme.2024.33856.2656

مطالعه عددی تأثیر طراحی معماری نواحی مختلف پارکینگ در عملکرد سیستم مدیریت دود با استفاده از جت فن در پارکینگ های زیرزمینی

سعید حضرتی چاخیرلو^{۱*}، عبدالناصر عمرانی^{۱*}، بهنام حیدری^۱، رقیه مطلب زاده^۱

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۰۴ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۲۵ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۰۱	جت فن ها یکی از تجهیزات متداول در پارکینگ های زیرزمینی هستند که در صورت بروز حریق، برای کاهش دود استفاده می شوند. زمانی که سنسورها حریق را در یک منطقه خاص تشخیص می دهند، جت فن ها فعال شده و دود را به سرعت به سمت شفت های خروجی هدایت می کنند. با این حال، در برخی حالت ها، جت فن های قرار گرفته در نواحی بن بست، جریان هوا را شبیه به یک نازل بزرگ به سمت بخش مرکزی پارکینگ هدایت می کنند. جریان هوای پرسرعت تولید شده توسط این جت فن ها می تواند جریان ناشی از سایر جت فن ها را مختل کرده و دود را به نواحی عاری از دود هدایت کند. این تحقیق به بهبود کنترل سیستم مدیریت دود در مناطق حیاتی پارکینگ های زیرزمینی، به ویژه در نزدیکی نواحی بن بست، با معرفی طرح های نوآورانه جت فن می پردازد. این مطالعه از نرم افزار OpenFOAM با حل گر Boussinesq Pimple و ادغام معادله غلظت دوده برای ارزیابی کارایی این روش استفاده کرده است. در این تحقیق، اثرات قطر و شکل نازل جت فن، تعداد جت فن ها، و نواحی بن بست در معماری پارکینگ بر انتشار غلظت دوده در داخل پارکینگ بررسی شده است. نتایج نشان داده است که افزایش قطر نازل باعث کاهش غلظت دوده تا حدود ۳۵٪ می شود. افزایش تعداد جت فن تأثیر زیادی ندارد و استفاده از نوع جدید نازل می تواند از پخش دوده به نواحی عاری از دود جلوگیری کند. این میزان کاهش دوده برای جت فن جدید طراحی شده در حدود ۵۰٪ است.
واژگان کلیدی: جت فن، کنترل دوده، نواحی بن بست، سیستم مدیریت دود، شبیه سازی عددی، اپنفوم.	
DOI: https://doi.org/10.22075/jme.2024.33856.2656	
© 2025 Published by Semnan University Press. This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)	

۱- مقدمه

استفاده از سیستم های مدیریت دود در اماکن سرپوشیده به دلیل احتمال بالای آتش سوزی و خطر جانی برای افراد، از اهمیت بسزایی برخوردار است. اماکنی مانند پارکینگ ها، تونل ها و ایستگاه های مترو که در معرض بالای آتش سوزی قرار دارند، نیازمند بهره گیری از سیستم های مدیریت دود هستند. بیش از هشتاد درصد از تلفات ناشی از حریق در اماکن سرپوشیده به دلیل استنشاق دود اتفاق می افتد،

بنابراین کنترل دود از جمله ضرورت های حیاتی است. از جمله سیستم های مدیریت دود کارآمد، جت فن ها هستند. این دستگاه ها در سقف اماکن سرپوشیده ای مانند پارکینگ ها قابلیت نصب دارند و با ایجاد سلسله مومنوم پرسرعت، باعث به حرکت در آمدن دوده نزدیک سقف می شوند و میدان دید را برای فرار افراد فراهم می کنند. از دیگر مزایای این سیستم مدیریت دود، فراهم آوردن مسیرهای ایمن و عاری از دود برای حضور موثرتر

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: STU.HazratiSaeed@iaut.ac.ir و Omrai@iaut.ac.ir

۱. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی تبریز، تبریز، ایران

استناد به این مقاله:

سعید حضرتی، عبدالناصر عمرانی، بهنام حیدری و رقیه مطلب زاده، "مطالعه عددی تأثیر طراحی معماری نواحی مختلف پارکینگ در عملکرد سیستم مدیریت دود با استفاده از جت فن در پارکینگ های زیرزمینی"، مدل سازی در مهندسی، ۲۳ (۱۴۰۴): ۲۵۳-۲۶۶، doi: 10.22075/jme.2024.33856.2656

آتش نشان‌ها در داخل پارکینگ و یا تونل ها برای امداد رسانی موثر است [۱-۳].

برای طراحی سیستم مدیریت دود با استفاده از جت فن در پارکینگ‌های زیرزمینی، مطالعه عددی اهمیت زیادی دارد. دلیل اهمیت بالای مطالعه آتش سوزی با استفاده از شبیه سازی‌های عددی، به خاطر کم هزینه بودن این روش‌هاست. این تحقیقات می‌توانند به درک بهتر از تأثیر پارامترهای اساسی در طراحی این سیستم‌ها کمک کنند. برخی از این پارامترهایی که می‌بایست در نظر گرفته شوند، عبارت‌اند از: فشار و جریان هوای ناشی از جت فن: با بهینه‌سازی فشار و جریان هوا از جت فن، عملکرد سیستم دود می‌تواند بهبود یابد و کارایی آن افزایش یابد. اندازه و شکل پارکینگ زیرزمینی (معماری): تعیین ابعاد و شکل مناسب پارکینگ زیرزمینی می‌تواند در پخش دود و تهویه مناسب تأثیرگذار باشد. مکان قرارگیری و تعداد جت فن‌ها: تعیین مکان و تعداد مناسب جت فن‌ها در پارکینگ زیرزمینی می‌تواند به بهبود جریان هوا و کاهش تجمع دود کمک کند. خصوصیات حرارتی محیط: در نظر گرفتن خصوصیات حرارتی محیط اطراف بسیار اهمیت دارد تا از انتخاب مواد و تنظیمات مناسب برای سیستم استفاده شود. با انجام تحقیقات مطالعه عددی و شبیه‌سازی‌های لازم، می‌توان به بهینه‌سازی طراحی سیستم مدیریت دود با استفاده از جت فن در پارکینگ‌های زیرزمینی دست یافت و عملکرد بهینه‌ای را ارائه داد [۴]. در این تحقیق به مطالعه عددی تأثیر طراحی معماری نواحی مختلف پارکینگ در عملکرد سیستم مدیریت دود با استفاده از جت فن در پارکینگ‌های زیرزمینی پرداخته شده است. این تحقیق در حد ممکن با ارائه معلومات کافی در خصوص سیستم‌های مدیریت دود با استفاده از جت فن، سعی بر آن دارد تا با مطالعه پارامتری به اهمیت این موضوع بپردازد.

برخلاف سیستم کانال‌کشی، استفاده از جت فن می‌تواند ارتفاع سقف پارکینگ را کاهش داده و مصالح ساختمانی را صرفه‌جویی کند. در سیستم کانال‌کشی، فن مدام در حال کار است، اما در سیستم جت فن تا زمانی که آلودگی به حد مجاز نرسد، سیستم تهویه عمل نمی‌کند که منجر به صرفه‌جویی در انرژی می‌شود. در مقایسه با سیستم کانال‌کشی، سیستم تهویه جت فن توانایی پوشش دادن تمام فضا را دارد و در صورت حریق، شفت‌های خروجی دارای دمپرهای موتوری هستند که برای نفوذ دود به طبقات دیگر

مورد استفاده قرار می‌گیرند. نصب سیستم تهویه جت فن نسبت به کانال‌کشی سریع‌تر، کم‌هزینه‌تر و با جلوه بصری بیشتری انجام می‌شود. این سیستم با داشتن لوازم جانبی مانند سایلنسر، از تولید صدا جلوگیری می‌کند و در کل از نظر اقتصادی و کارایی بهتر است [۵-۷] در ادامه برخی از مطالعات صورت گرفته در خصوص سیستم مدیریت دود با و یا بدون استفاده جت فن ها آورده شده است.

در یک مطالعه توسط چوی و همکاران [۸]، شبیه‌سازی‌های عددی درباره انتشار هیدروژن در یک پارکینگ زیرزمینی انجام شد. آنها سناریوهایی با و بدون تهویه مکانیکی را مقایسه کردند. در کار آنها از سیستم مدیریت دود با استفاده از جت فن استفاده نشده بود و عمده کار آنها بر اساس شبیه سازی پارکینگ با استفاده از کانال‌کشی صورت پذیرفته بود. در کار آنها نرخ‌های تهویه ۲۰، ۴۰ و ۶۰ متر مکعب در دقیقه شبیه‌سازی شدند که معادل ۱.۷، ۳.۵ و ۵.۲ تعویض هوا در ساعت (ACH) بود. نتایج نشان داد که سیستم تهویه کانال‌کشی به طور قابل‌توجهی حجم توده هیدروژن قابل اشتعال را کاهش می‌دهد، با این تفاوت که سیستم کاملاً وابسته به نرخ تهویه بزرگتر نسبت به نشت هیدروژن باشد و سرعت رها شدن هیدروژن در آن پایین باشد که نشانگر ضعف در سیستم کانال‌کشی است.

در یک مطالعه دیگر، ماتسورا و همکاران [۹] یک مطالعه عددی در مورد تأثیر سرعت تهویه در یک مدل سه‌بعدی راهرو نیمه‌باز را انجام دادند. هدف مطالعه آنها، توسعه یک سیستم کنترل دود برای تهویه محیط بود. آنها تأثیرات مکان‌های دریچه‌های تهویه و نشت هیدروژن، نرخ‌های رها شدن هیدروژن و آرایش دریچه‌های خروجی را بررسی کردند. آنها دریافتند که مکان دریچه‌های تهویه مکانیکی و تعداد دفعات تعویض هوا به طور قابل‌توجهی بر توزیع و گسترش هیدروژن در داخل محفظه تأثیر می‌گذارد. سیستم مدیریت دود آنها، الگو گرفته از سیستم کانال‌کشی و سیستم تهویه طبیعی بود و ضعف‌های سیستم مذکور ناشی از عدم کنترل مناسب بر بخش تهویه طبیعی آن بود.

هانگ و همکاران [۱۰] با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و الگوریتم‌های ژنتیک به بهینه‌سازی سیستم کنترل دود در اماکن سرپوشیده پرداختند و به تأثیرات پارامترهای مختلف در آن محیط و ارائه برخی دستورالعمل‌ها بر پیشگیری از حریق تأکید کردند. ویگاس [۱۱] تعامل جریان سیال بین جت‌فن‌های درگیر در حریق

با سایر جت‌فن‌ها و دریچه‌های توزیع هوا در پارکینگ را با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی بررسی کردند. کار آنها به عنوان گام اولیه برای طراحی سیستم‌های تهویه با استفاده از جت‌فن شناخته شد. آنها پیشنهاد دادند که آرایش جت‌فن‌ها در پارکینگ نباید به صورت تقاطع عمودی در نظر گرفته شوند و می‌بایست هر جت‌فن آزادانه، وظیفه انتقال مومنتوم را انجام دهد. بر اساس کار دیگر ویگاس [۱۲]، اگر نرخ جریان فن‌های جت در یک پارکینگ زیرزمینی کمتر از نرخ جریان خروجی باشد، جریان‌های بازگشتی افزایش می‌یابند و آلاینده‌ها در جهت خروجی پخش می‌شوند. این می‌تواند میدان دید را در حالت‌های اضطراری بهبود بخشد، اما میانگین غلظت آلاینده (CO_2) را نیز افزایش می‌دهد.

اسپینجار و همکاران [۱۳] دریافتند که افزایش تعداد جت-فن به بهبود کارایی سیستم مدیریت دود کمک نمی‌کند. انتخاب تعداد جت‌فن، فاصله آن‌ها و نیروی تراست خروجی باید با استفاده از نرم‌افزارهای دینامیک سیالاتی محاسباتی شبیه‌سازی شود. کموکوا و همکاران [۱۴] بر اهمیت مکان یابی مناسب شفت خروج هوا در سناریوی حریق در داخل پارکینگ زیرزمینی تأکید کردند. نتایج آنها نشان داد که شفت‌های خروج هوا نباید در هر دو بخش از پارکینگ قرار گیرند و می‌بایست برای هر ناحیه شفت خروج هوا مجزا در نظر گرفت.

بارسیم و همکاران [۱۵] توانایی سیستم تخلیه دود با استفاده از جت‌فن را برای اطمینان از خروج ایمن ساکنان و حضور آتش‌نشانان در یک حریق پارکینگ زیرزمینی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها پارامترهایی مانند خودروهای پارک شده، نرخ خروج دوده، تعداد جت‌فن و موقعیت حریق را مورد بررسی قرار دادند. لو و همکاران [۱۶] یک مطالعه عددی در مورد سیستم تخلیه دود با استفاده از جت‌فن برای کنترل دود در یک پارکینگ زیرزمینی را انجام دادند و آن را با سیستم لوله‌کشی مقایسه کردند تا تأثیرات مختلف کنترل دود بین دو سیستم را تعیین کنند. آن‌ها ده سناریو را در یک فضای ۸۰ متر طول، ۴۰ متر عرض و ۳.۲ متر ارتفاع با یک منبع آتش با نرخ حرارتی ۴ مگاوات شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد که سیستم تخلیه دود با استفاده از جت‌فن نه تنها از گسترش دود حریق جلوگیری می‌کند بلکه میدان دید خوبی را فراهم می‌کند که منجر به دسترسی مناسب آتش‌نشانان به داخل پارکینگ می‌گردد.

با بررسی پیشینه تحقیق، می‌توان دریافت که عمده تحقیقات صورت گرفته بر روی ضرورت استفاده از سیستم مدیریت دود با استفاده از جت‌فن استوار است. سیستم مکانیزه تخلیه دود در پارکینگ، از جمله سیستم‌های پیشرو و نوآور در جهان است و مطالعات پایه‌ای بسیار کمی در آن رابطه صورت گرفته است. در ایران نیز این سیستم در سالیان اخیر اغلب مورد توجه طراحان قرار گرفته است به طوری که سازمان آتش‌نشانی تهران برای پارکینگ‌ها با مساحت بالای ۵۰۰ متر را ملزم به استفاده از سیستم مدیریت دود جت‌فن کرده است. با این تفاسیر، این تحقیق می‌تواند به عنوان راهنمای جامع برای طراحان با علم روز دنیا در نظر گرفته شود. نوآوری کار فعلی بر پایه‌ی درنظر داشتن نواحی بن‌بست در معماری پارکینگ و ارائه راه‌کار برای طراحی هرچه مناسب‌تر این سیستم استوار است. مطالعه پارامتری در مورد تعداد جت‌فن‌ها و همچنین طراحی نازل درنظر گرفته شده است که می‌تواند به درک عمیق‌تر فیزیک سیالاتی این تحقیق منجر شود، ساختار شماتیکی کار فعلی در شکل (۲) نشان داده شده است. در بخش دوم معادلات حاکم بر مسئله بیان می‌شود، سپس در بخش سوم نحوه مدل‌سازی و مشخصات هندسی سیستم پیشنهادی بیان شده است. در ادامه نیز صحت سنجی و نتایج بیان گردیده‌اند.

۲- معادلات حاکم

در این تحقیق، معادلات حاکم بر انتشار دود در داخل پارکینگ زیرزمینی، شامل معادلات پیوستگی، مومنتوم، انرژی و معادله غلظت در حالت تراکم‌ناپذیر و ناپایا مورد بررسی قرار گرفتند. برای بررسی گسترش آئروسول کربن دی‌اکسید ایجاد شده از آتش در این محیط، از روش Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) برای مدل‌سازی تعامل بین جریان سیال جت فن و آئروسول کربن دی‌اکسید استفاده شد. اثرات آشفتگی جریان جت فن با استفاده از معادلات میانگین شده Reynolds (RANS) به همراه مدل آشفتگی RSM بررسی شدند. معادلات مرتبط با حرکت شامل معادله پیوستگی، قانون بقای جرم و معادله دما، همگی به شکل تراکم‌ناپذیر خود مدل‌سازی شدند [۱۷ و ۱۸].

$$\text{div}(\bar{u}_i) = 0, \quad (1)$$

برنامه نویسی C++ کدنویسی شده است [۱۷ و ۱۸]. با این تفاوت که معادله انتقال حرارت بدون تغییر باقی مانده است. انتشار حرارتی معادل ضریب انتشار که توسط کتابخانه‌های OpenFOAM تعریف شده‌اند. در شکل (۱) نحوه کدنویسی معادله غلظت نشان داده شده است.

```
{
    Dit = turbulence->nut()/ScT;
    Dit.correctBoundaryConditions();
    volScalarField DiEff ("DiEff", turbulence->nu()/Sc + Dit);
    fvScalarMatrix CEqn
    (
        fvm::ddt(rho,C)
        + fvm::div(phi,C)
        - fvm::laplacian(rho*DiEff,C)
    );
    CEqn.relax();
    CEqn.solve();
    rho=thermo.rho() + beta_C * rho_0 * C;
}
```

شکل ۱: معادله غلظت اضافه شده به حلگر پایه در

OpenFOAM

مدل آشفتگی RSM، به صورت معادله (۵) استفاده شده است. معادله انتقال رینولدز برای تانسور تنش که از معادله Navier-Stokes به دست آمده است به شکل زیر بیان می‌گردد [۱۹ و ۲۰]:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial(\bar{u}_i' \bar{u}_j')}{\partial t} + \rho \frac{\partial(u_k \bar{u}_i' \bar{u}_j')}{\partial x_k} &= - \frac{\partial}{\partial x_k} [\rho \bar{u}_k' \bar{u}_i' \bar{u}_j' + p(\delta_{kj} \bar{u}_i' + \delta_{ik} \bar{u}_j')] \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_k} [\mu \frac{\partial(\bar{u}_i' \bar{u}_j')}{\partial x_k}] - \rho(\bar{u}_k \bar{u}_k' \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_k} + \bar{u}_j' \bar{u}_k' \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k}) \\ &- \rho \beta (g_i \bar{u}_j' \bar{\theta} + g_j \bar{u}_i' \bar{\theta}) + p(\frac{\partial \bar{u}_i'}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j'}{\partial x_i}) - 2\mu \frac{\partial \bar{u}_i'}{\partial x_k} \frac{\partial \bar{u}_j'}{\partial x_k} \\ &- 2\rho \Omega_k (\bar{u}_j' \bar{u}_m' e_{ikm} + \bar{u}_i' \bar{u}_m' e_{jkm}) \end{aligned} \quad (5)$$

C_{ij} نمایانگر عبارت ترم جابه‌جایی است؛ $D_{T,ij}$ نشان‌دهنده عبارت پخش یا ترم نفوذ تنش رینولدز است؛ $D_{L,ij}$ نمایانگر عبارت پخش مولکولی است؛ P_{ij} نشان‌دهنده عبارت تولید تنش است؛ G_{ij} نمایانگر عبارت تولید شناوری است؛ Φ_{ij} عبارت تنش فشاری را نمایش می‌دهد؛ ε_{ij} نشان‌دهنده عبارت تبدیل انرژی به حرارت است؛ و F_{ij} نمایانگر تولید توسط چرخش سیستم است.

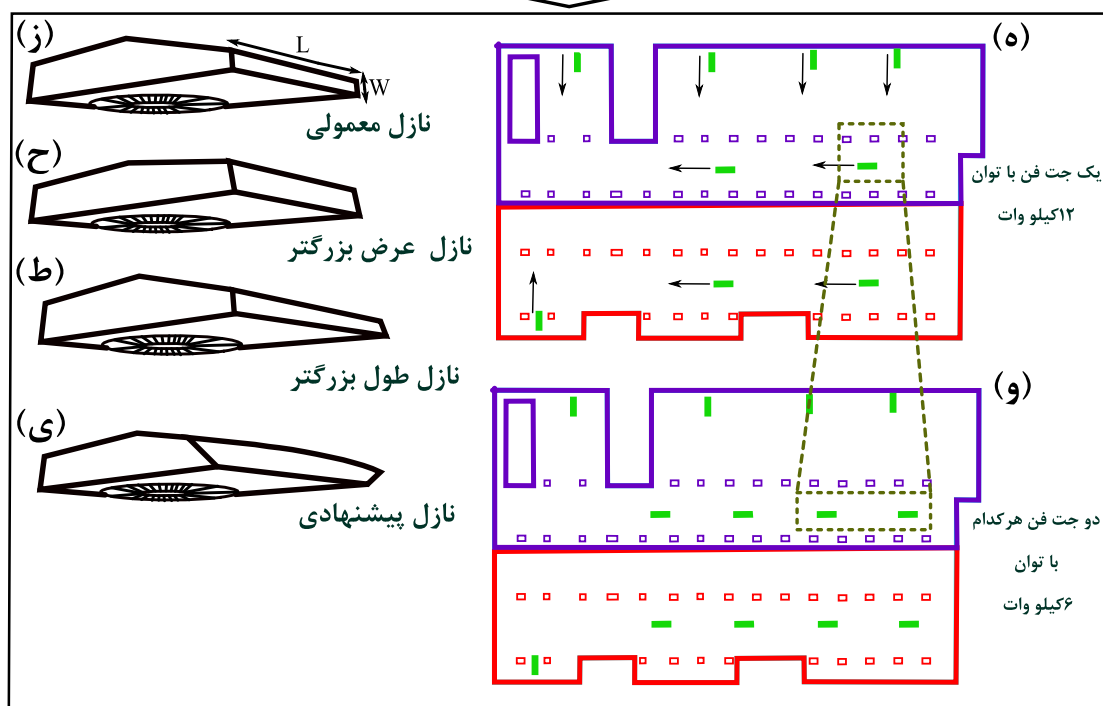
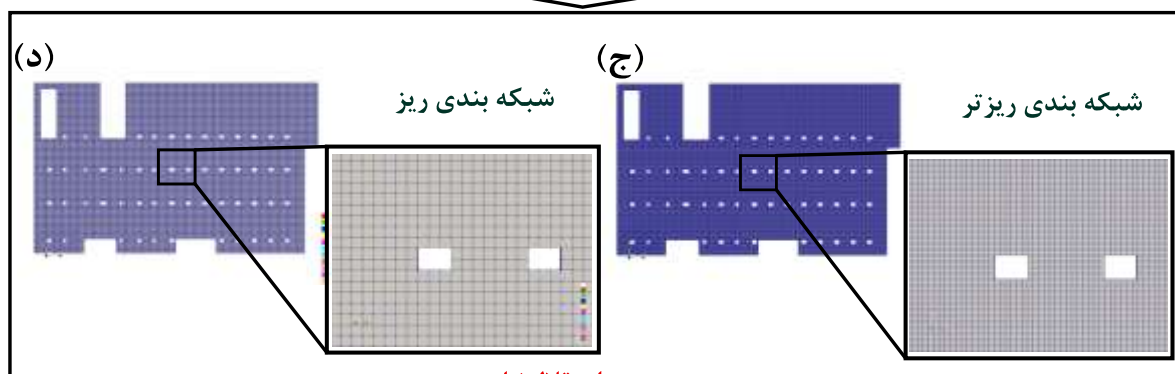
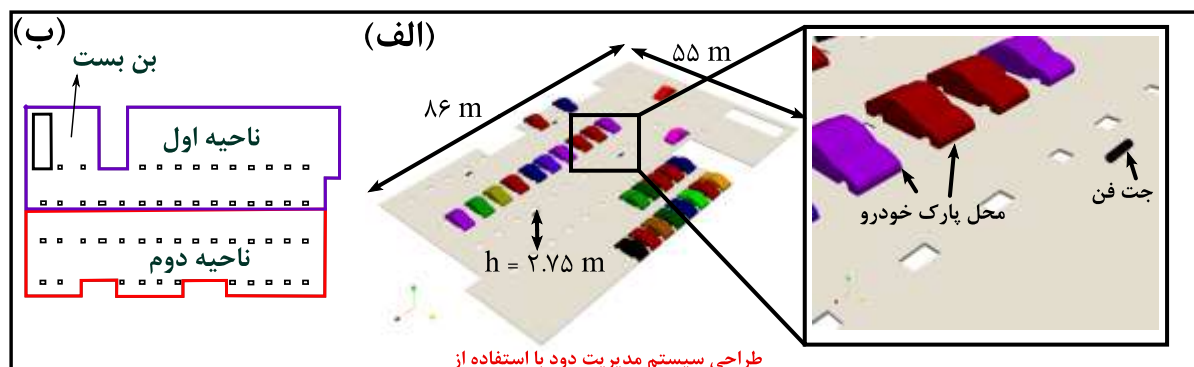
$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial(\bar{u}_i)}{\partial t} + \rho \frac{\partial(\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} &= - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + g_i x \nabla \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_j} [\mu (\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i})] \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \bar{u}_i' \bar{u}_j') \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial(\bar{T})}{\partial t} + \rho c_p (\frac{\partial}{\partial x_j} \bar{u}_i \bar{T}) &= \nabla \cdot (k \nabla \bar{T}) + \frac{1}{2} \tau : (\nabla \bar{u}_i \\ &+ \nabla \bar{u}_j^T) + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \bar{u}_i' \bar{T}) \end{aligned} \quad (3)$$

u ، p و T به ترتیب فشار، سرعت سیال و دمای سیال هستند. برای در نظر گرفتن غلظت آئروسول کربن دی اکسید در داخل پارکینگ زیرزمینی، معادله غلظت به حلگر پیش‌فرض OpenFOAM با نام buoyant Boussinesq Pimple FOA اضافه شده است که در معادله (۴) نشان داده شده است [۱۸].

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial(\bar{C})}{\partial t} + \rho \frac{\partial(\bar{u}_i \bar{C})}{\partial x_j} &= \nabla \cdot (D_{eff} \nabla \bar{C}) \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i' \bar{C}) \end{aligned} \quad (4)$$

C و D_{eff} به ترتیب غلظت آئروسول کربن دی اکسید و پخش‌پذیری یا ضریب نفوذ آن هستند. در معادله (۳)، تقریب Boussinesq برای معادله مومنتوم استفاده شده است که با توجه به تاثیرپذیری حرکت دوده از نیروهای شناوری، می‌بایست در نظر گرفت. علاوه بر این، در معادله (۴)، $D_{eff} = (v_t/Sc_t) + (v/Sc)$ ، که Sc_t و Sc به ترتیب اعداد اشمیت آشفته و آرام هستند، و مقادیر آنها برابر با یک است. برای کد نویسی معادله غلظت در حلگر پایه OpenFOAM، از الگوی معادله انتقال حرارت استفاده شده است. معادلات دیفرانسیل برای انتقال حرارت و انتقال جرم غلظت یکسان است. برای این منظور در نرم افزار OpenFOAM کمیت اسکالر غلظت به جای دما با زبان



شکل ۲- ساختار کلی مقاله

۳- نحوه مدل سازی و مشخصات هندسی

این تحقیق، مطالعه جامع بر روی یک پارکینگ خاص واقع در تبریز، ایران تمرکز دارد که دارای مساحتی حدود ۵۱۰۰ متر مربع است و می تواند حداکثر ۱۸۰ خودرو را جای دهد. این فضای بسته با ارتفاع ۳ متر به دو ناحیه متمایز تقسیم شده است: منطقه ۱ با مساحت ۲۵۱۰ متر مربع و منطقه ۲ با مساحت ۲۵۹۰ متر مربع. در شکل (۲-الف) و (۲-ب) جانمایی این دو ناحیه به همراه ابعاد و اندازه ها نشان داده شده است. ذکر این نکته حائز اهمیت است که سناریوی مورد مطالعه شامل شروع حریق در منطقه ۱ است. با رعایت مقررات مربوط به فضاهای بسته مانند پارکینگ ها، سیستم تهویه جت فن میبایست طوری طراحی گردد که میانگین غلظت مواد مضر، به ویژه CO، در طول یک دوره ۸ ساعته از ۳۰ ppm تجاوز نکند. همچنین حداکثر غلظت در مناطقی مانند خروجی ها، ورودی ها و رمپ ها -جایی که خودروها یا در حال حرکت هستند یا با موتورهای روشن پارک شده اند - نباید از ۹۰ ppm تجاوز کند. دستورالعمل ها همچنین حداقل تعداد دفعات تعویض هوای ۶ بار در هر ساعت برای حالت روزانه و ۱۰ بار در ساعت برای حالت اضطرار را توصیه می کنند. اهمیت دارد که میزان انرژی حریق به درستی تعریف شود و طراحی باید بگونه ای باشد که حداقل انتشار حریق به نواحی دیگر را کاهش دهد. نرخ تولید غلظت دود، که با واحدهای کیلوگرم بر متر مکعب بر ثانیه اندازه گیری می شود، می تواند با استفاده از روش زیر محاسبه شود [۲۳-۲۱].

$$\dot{m}_s = \dot{M}_s / V_s \quad (۶)$$

$\dot{M}_s$ نمایانگر نرخ تولید جرم دود است، در حالی که V_s حجم منبع دود را نشان می دهد. حوادث مربوط به حریق خودروها، نرخ سوزاندن ۲۶۰ کیلووات بر متر مربع برای یک منطقه حریقی به مساحت ۶ متر مربع را تخمین می زنند که معادل سوزاندن ۱۴۵ کیلوگرم چوب است. نرخ مصرف جرم سوخت که با $\dot{m}_f$ نشان داده می شود، به ۰/۶۱ کیلوگرم بر ثانیه تخمین زده شده است. برای تعیین نرخ تولید غلظت دود، نرخ جرم سوخت می تواند با استفاده از ضریب بازده y_p ، به شکل زیر تبدیل شود [۲۳]:

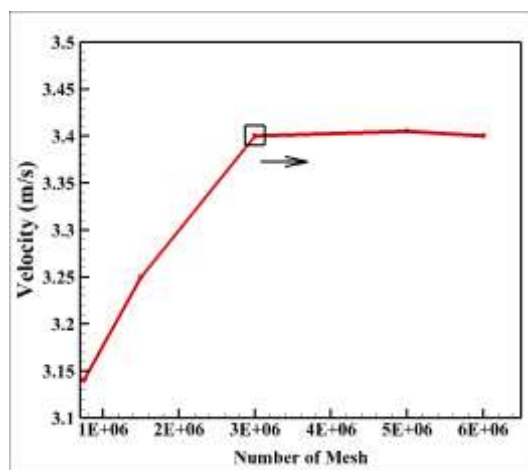
$$\dot{M}_s = y_p \times \dot{m}_f \quad (۷)$$

با ضرب پارامترهای ذکر شده، $\dot{M}_s$ به مقدار ۰/۱۰۹۸ کیلوگرم بر ثانیه محاسبه می شود. طبق

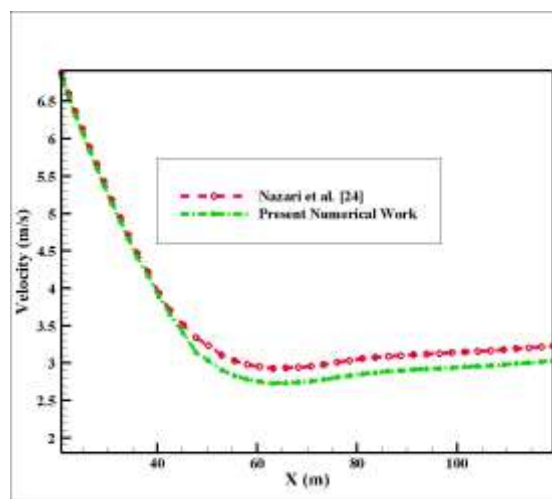
توصیه های استاندارد انگلیس برای یک پارکینگ داخلی بدون سیستم اسپرینکلر، ابعاد پیشنهادی برای منطقه منبع حریق ۵ متر در ۵ متر هستند. ارتفاع منبع دود ناشی از حریق خودرو به ۰/۸ متر اندازه گیری شده است. با استفاده از فرمول (۶)، نرخ تولید غلظت جرم به $10^{-4} \times ۵/۴۹$ کیلوگرم بر متر مکعب بر ثانیه تعیین می شود.

در این مطالعه از نرم افزار متن باز OpenFOAM برای انجام شبیه سازی های عددی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) استفاده شده است. این نرم افزار که به زبان C++ نوشته شده است که از اصول روش عددی حجم محدود برای حل معادلات بقای جرم، انرژی و مومنتوم به همراه معادله حالت در حالت میانگین رینولدز استفاده می نماید. ترم های جابه جایی در معادلات حاکم با استفاده از روش مرتبه دوم آپویند گسسته سازی شدند، همچنین ترم های لاپلاسی (دیفیوژن) با استفاده از رویکرد مرتبه دوم خطی گاوس مورد بررسی قرار گرفتند. این مطالعه از الگوریتم PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators) برای حل هم زمان ترم های فشار و سرعت استفاده کرده است. دلیل استفاده از الگوریتم PISO به جای سایر الگوریتم ها مانند Simple، وابسته بودن شرایط مسئله به زمان و استفاده از الگوریتم اولر برای گسسته سازی ترم زمانی در معادلات حاکم بود. ضرایب زیر تخفیف (Under-relaxation) و مقادیر باقی مانده ها برای ترم های مختلف مشخص شدند. مقادیر زیر تخفیف برای کاهش حداکثری نوسانات نمودارهای مقادیر باقی مانده به هنگام حل مسئله زیر ۰/۲ انتخاب شده اند. شرایط مرزی گرادین فشار صفر در دریچه های هوای تازه اعمال شدند و شرایط مرزی خروجی-ورودی برای دریچه های خروجی استفاده شدند. این تحقیق بر روی مدیریت میزان کربن دی اکسید با استفاده از جت فن در یک پارکینگ زیرزمینی تمرکز دارد و از نازل های جدیدی در این سیستم استفاده شده است، از دیگر نوآوری های کار فعلی، در نظر گرفتن تزریق مقدار بالای هوا از مناطق بن بست پارکینگ و حذف پرده دود با استفاده از رویکردهای تقسیم چند منطقه ای است. هندسه پارکینگ زیرزمینی با استفاده از ابزار blockMesh ایجاد شد و موقعیت هر جت فن با استفاده از ابزار topoSet تعیین شده است. محل این جت-فن ها با استفاده از ابزار FvOption در OpenFOAM برای شبیه سازی آنها در دامنه محاسباتی اعمال شده است. کیفیت مش نزدیک به دیوارها بهبود یافته تا گرادین های فشار و

در حالی که فشار محیطی، p_{∞} ، ۱۰۰ کیلوپاسکال بود. اختلاف نسبی حداکثر سرعت تزریق شده از جت فن برای دو مورد در شکل (۳-الف) تقریباً ۳/۵٪ است. برای محاسبه تعداد مش های بهینه و به دست آوردن نتایج همگرا، یک آزمون استقلال نتایج از شبکه انجام شد. شبیه سازی ها با استفاده از سه نوع مش مختلف با سرعت پایین جت فن ۱۰ متر بر ثانیه انجام شد تا نتایج مستقل از نوع مش به دست آید. شکل (۳-ب) نشان می دهد که سرعت تخلیه تزریق شده از جت فن با استفاده از سه مش درشت، ریز و بسیار ریز مذکور استفاده شده است. مش های ۵۰۰۰۰۰ و ۳۰۰۰۰۰۰ نتایج تقریباً یکسانی برای سرعت تزریق شده از جت فن با خطای نسبی کمتر از ۵٪ تولید کردند. بنابراین، شبکه بندی با ۳۰۰۰۰۰ سلول برای داشتن یک حل همگرا با هزینه محاسباتی بهینه انتخاب شد. خروجی آزمون استقلال نتایج از شبکه در شکل (۳-ب) خلاصه شده است.



ب



الف

شکل ۳- (الف) صحت سنجی نتایج و (ب) استقلال نتایج از شبکه بندی

پارکینگ پرداخته شده است. برای این منظور از یک جت فن با توان مصرفی یکسان استفاده شده و به جای آن از چندین جت فن با توان مصرفی مختلف استفاده شده است. در این قسمت سعی شده است تا مجموع توان های جت فن های جایگزین شده برابر با توان جت فن اصلی باشد. در قسمت بعدی نیز به بررسی موقعیت یک جت فن در یک ناحیه بن بست در داخل پارکینگ پرداخته شده است. نواحی بن بست در داخل پارکینگ هرچقدر دارای عرض کمتری باشند، جت فن موجود در انتهای آن ناحیه قادر است، سیال با سرعت

سرعت را به دقت ضبط کند. در این تحقیق، بررسی تاثیر قطر و شکل نازل جت فن، تعداد جت فن ها، و بررسی نواحی بن بست در معماری پارکینگ ها بر روی انتشار غلظت دوده در داخل پارکینگ صورت پذیرفته است. مجموعه کامل از تاثیر این پارامترها بر روی انتشار دوده ارائه گردیده است که می تواند راه گشای بسیاری از مبهمات مربوط به طراحی سیستم مدیریت دود با استفاده از جت فن گردند.

۴- صحت سنجی نتایج و استقلال نتایج از شبکه

در این قسمت از تحقیق به مقایسه و بررسی نتایج کار فعلی و مقایسه آنها با نتایج سایر مقالات پرداخته شده است. در شکل (۳-الف)، داده های کار فعلی با نتایج تجربی و عددی ارائه شده توسط نظری و همکاران [۲۴] برای شبیه سازی عددی سرعت تخلیه جت فن مقایسه شده اند. دمای جریان هوای تزریق شده از جت فن، ۲۰ درجه سانتی گراد می باشد،

۵- نتایج

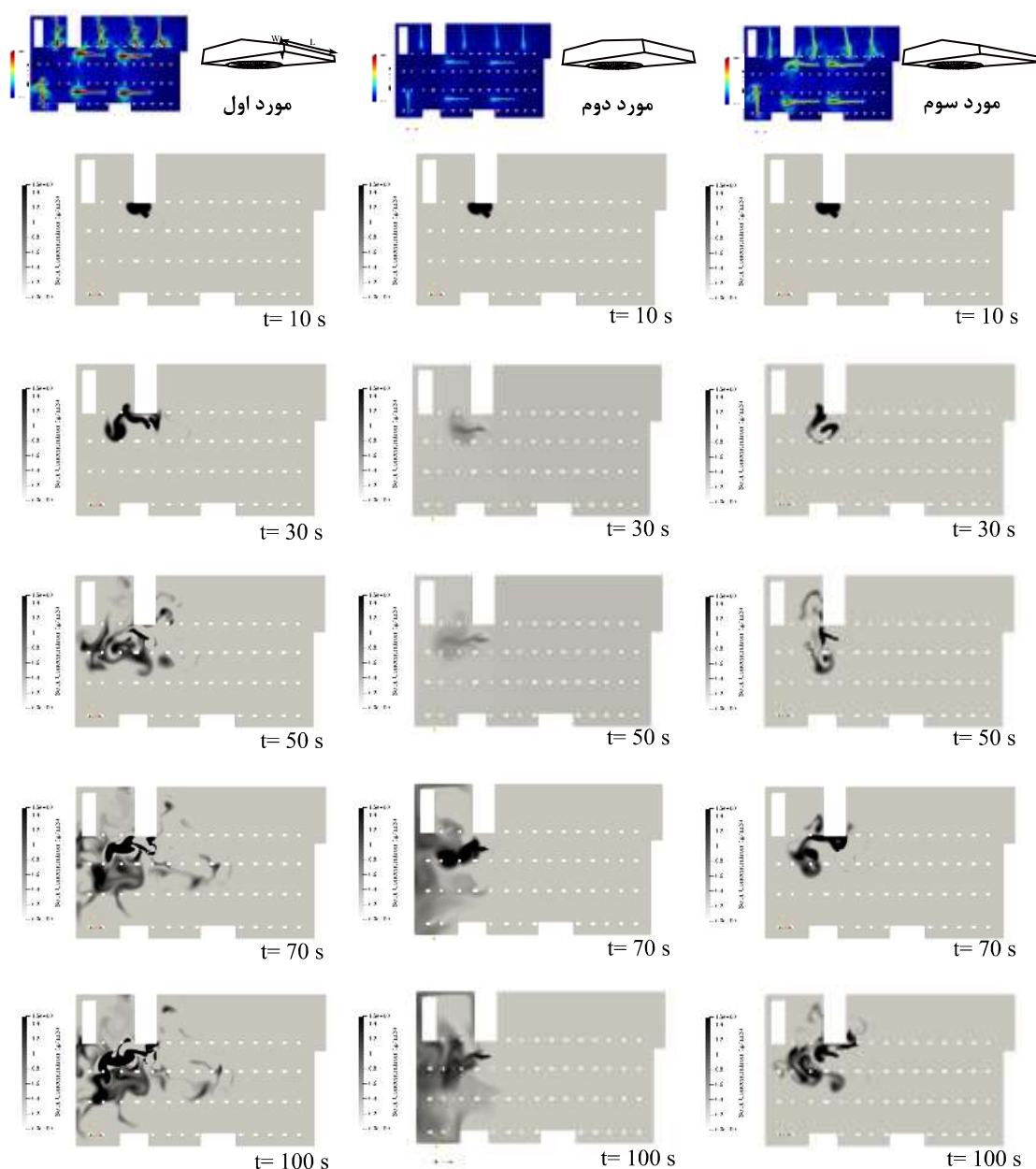
در این قسمت از تحقیق به ارائه و مقایسه نتایج به دست آمده پرداخته شده است. برای این منظور نتایج در سه بخش مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته اند. در ابتدا به بررسی نوع نازل مورد استفاده پرداخته شده است. برای این منظور از سه نوع نازل با قطر هیدرولیکی متفاوت استفاده شده است. هر سه نوع نازل دارای سرعت تزریق سیال یکسانی بودند، به عبارت دیگر دارای توان مصرفی یکسانی هستند. در مورد بعدی به بررسی تعداد جت فن در خروج دوده از داخل

از جت فن، الگوی جریان سیال متفاوت‌تر از حالت پایه خواهد بود. دبی خروجی بالا در نازل با قطر بزرگ‌تر قادر است تا حجم بالایی از سیال را به سمت جت فن دیگر روانه سازد، این حجم بالا باعث کوتاه‌تر شدن هسته جت سیال می‌گردد که می‌تواند باعث به وجود آمدن تاخیر در خروج کل دوده از داخل پارکینگ گردد. بالا رفتن زمان خروج حجم عظیم دوده‌ها می‌تواند باعث کاهش میدان دید وسیع گردد. کانتورهای غلظت کربن دی اکسید در زمان‌های مختلف بر اساس انواع شکل نازل‌های جت فن در شکل (۴) نشان داده شده است.

بالتر و غیرقابل کنترل‌تری را به رمپ اصلی تزریق کند و باعث به هم ریختن الگوی جریان سیال در سایر نواحی مانند رمپ خودرویی گردد.

۵-۱- بررسی تاثیر قطر و شکل نازل جت فن

در این قسمت از تحقیق به بررسی تاثیر قطر نازل جت فن بر روی کنترل غلظت کربن دی اکسید در داخل پارکینگ پرداخته شده است. هر سه نوع نازل دارای سرعت تزریق سیال یکسانی هستند، به عبارت دیگر دارای توان مصرفی یکسانی هستند. با توجه به بزرگتر شدن دهانه خروجی سیال



شکل ۴- کانتورهای غلظت کربن دی اکسید در زمان‌های مختلف بر اساس انواع شکل نازل‌های جت فن

همانطور که از این شکل قابل مشاهده است، با افزایش تعداد جت فن‌ها در رمپ عبور و مرور خودروها، در زمان‌های آخر میزان غلظت نسبتاً کاهش می‌یابد. این میزان تاثیر آنچنانی بر روی الگوی حرکت دوده ندارد و بیشتر با کنترل حجمی از دوده که می‌توانست به ناحیه دوم ورود کند، باعث تقلیل غلظت دوده در ناحیه اول می‌گردد. با کاهش توان جت فن، هسته سیال جت که به منزله نیروی تراست عمل می‌کند کوچک‌تر می‌گردد. این کوچک‌تر شدن هسته سیال باعث می‌گردد تا دوده تعداد جت فن‌های زیادی را طی نماید تا بتواند خود را به شفت خروجی برساند. این تعدد جت فن‌ها، در صورت بروز خرابی در هر کدام از جت فن‌ها می‌تواند باعث افت شدید عملکرد سیستم مدیریت دود گردد. به بیان دیگر افزایش تعداد جت فن‌ها تاثیر آنچنانی بر روی الگوی کاهش غلظت دوده ندارد و از نظر اقتصادی نیز به صرفه نمی‌باشد. دلیل مقرون به صرفه نبودن آن، ناشی از هزینه بالای نصب برای تعداد بالای جت فن و همچنین هزینه ساخت هر کدام از جت فن‌ها است.

۵-۳- بررسی نواحی بن بست در معماری پارکینگ ها (طرح پیشنهادی)

در پارکینگ‌های زیرزمینی با توجه به وجود موتورخانه ها، اتاقک‌های متعدد آسانسور و راه پله و ستون ها، معماری متفاوت می باشد و اصولاً طراحی سیستم مدیریت دود با استفاده از جت فن بعد از اتمام سیستم لوله کشی و تاسیسات پارکینگ صورت می گیرد. وجود دالان های بن بست در این معماری ها، امری اجتناب ناپذیر است و می بایست در انتهای این دالان های بن بست، جت فن های در نظر گرفته شود تا بتواند دوده را از آن ناحیه به سمت شفت های خروجی هدایت کند. این نواحی دالان مانند و وجود جت فن در انتهای آن باعث می گردد تا حجم سیال خروجی از دالان بن بست به منزله خروجی سیال از داخل نازل عمل نماید و باعث به هم ریختن الگوی جریان سیال ناشی از جت فن در سایر نواحی گردد. لذا هدف اصلی این طرح ارائه راه کاری مناسب برای این منظور است تا بتوان به کنترل میزان سرعت سیال خروجی از دالان بن بست پرداخت. در سیستم پیشنهاد شده در کار فعلی از جت فن هایی با خروجی نازل عریض تر استفاده شده است، که الگو گرفته از بررسی پارامتری در بخش های قبل تر است. در این نوع از طراحی هدف به دست آوردن مومنتوم بالا با استفاده از جت فن کتابی با طول دهانه

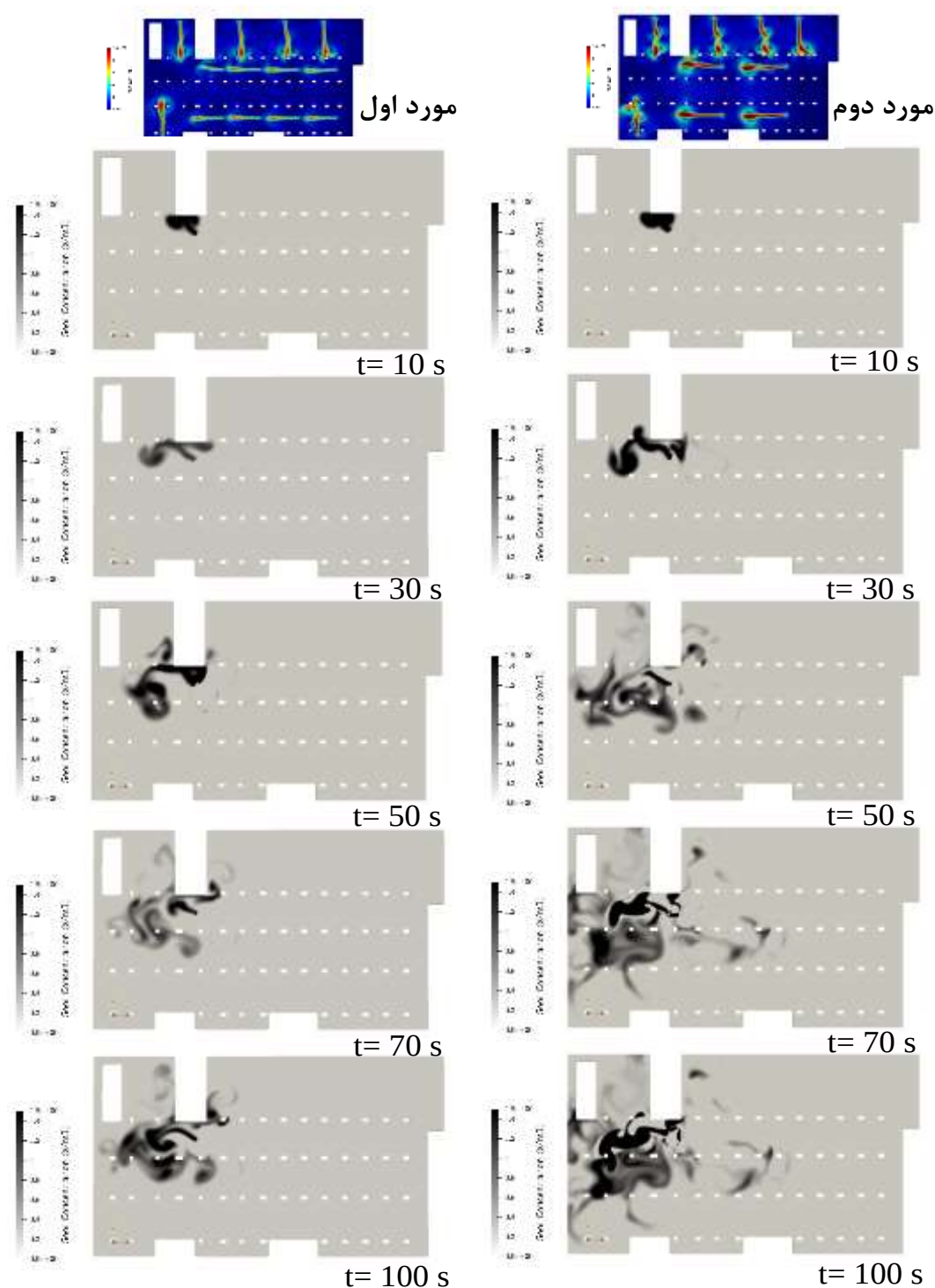
در مورد اول از شکل (۴)، حالت پایه از جت فن نشان داده شده است. این نوع از جت فن ها که با عنوان کتابی نیز شناخته می‌شوند قادر هستند در پارکینگ‌های با ارتفاع نسبتاً کم مورد بهره برداری قرار گیرند. الگوی غلظت کربن دی اکسید برای این نوع از جت فن در این شکل نشان داده شده است. برای بررسی تاثیر قطر نازل این نوع از جت فن ها، از مورد دوم و سوم استفاده شده است. به طوری که در مورد دوم عرض دهانه نازل اندکی افزایش یافته است و در مورد سوم نیز طول آن افزایش یافته است. در هر دو مورد بر اساس نتایج می‌توان دریافت که با افزایش قطر، غلظت دوده در زمان های پایانی، دچار کاهش می‌شود. عمده تفاوت بین مورد دوم و سوم، مناسب بودن طراحی سوم است. به بیان دیگر هرچه بتوان مومنتوم بالایی را با استفاده از جت فن کتابی با طول دهانه بزرگتر به دست آورد، به همان اندازه می‌توان غلظت دوده را در داخل پارکینگ بیشتر کاهش داد. دلیل فیزیکی این مسئله مربوط به جارو کردن مناسب دوده از تمام جهات توسط این حالت می باشد. در مورد سوم جریان خروجی تمایل بالایی به حرکت به سمت پایین از خود نشان می‌دهد و جریان را به سمت اطراف نیز هدایت می‌کند، این حالت باعث به گیر انداختن حجم زیادی از دوده در مسیر سر راه جت هسته سیال می‌گردد. براساس شکل (۴)، می‌توان دریافت که غلظت دوده در حدود ۳۵٪ نسبت به حالت پایه مورد اول کاهش پیدا می‌کند. در حالی که کاهش مورد دوم نسبت به حالت اول در حدود ۱۵٪ می باشد. بخش عمده مزیت مورد سوم، عدم نفوذ دوده به سایر نواحی عاری از دوده (ناحیه دوم) می باشد.

۵-۲- بررسی تاثیر تعداد جت فن ها

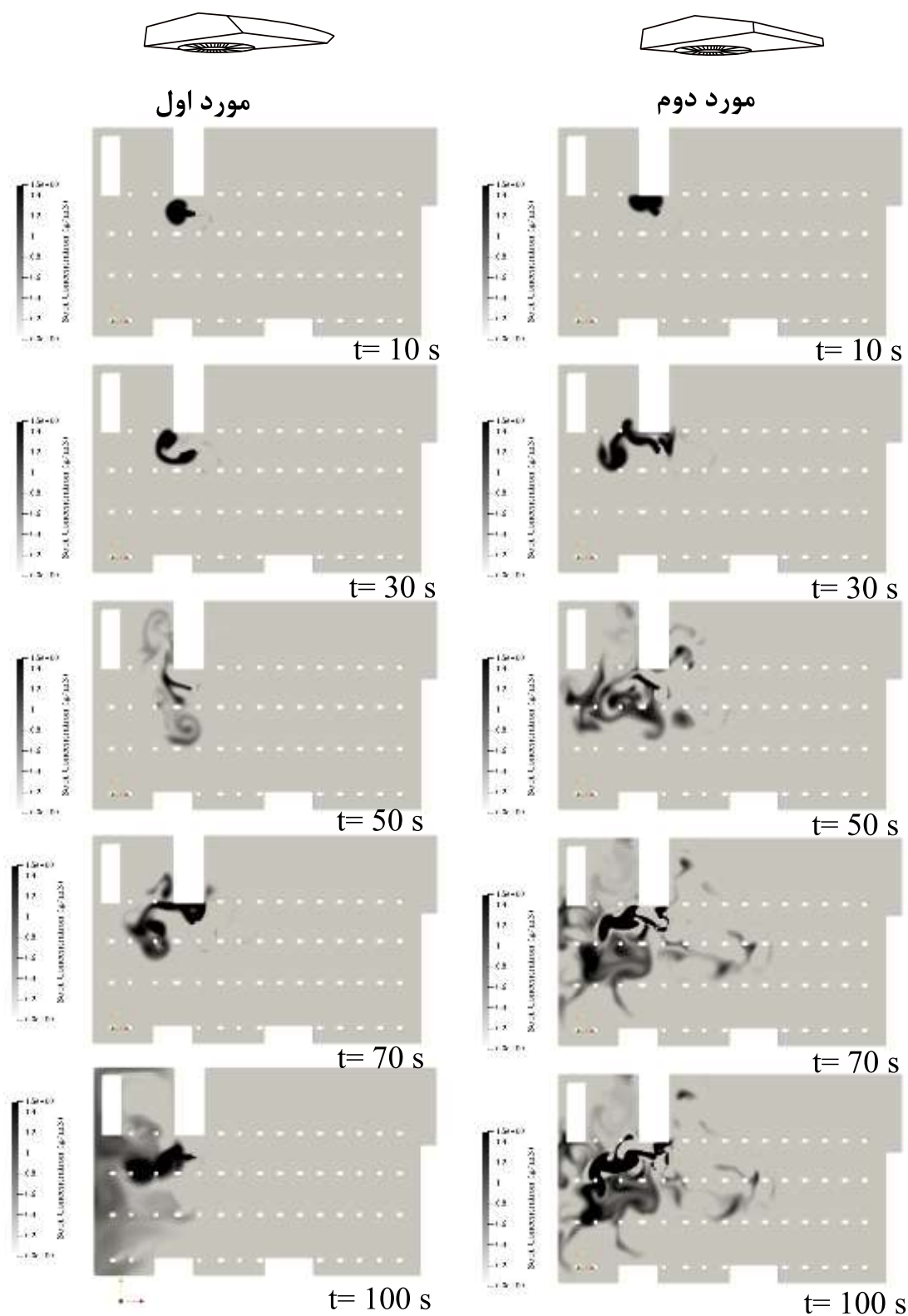
در این قسمت از تحقیق به بررسی تعداد جت فن در خروج دوده از داخل پارکینگ پرداخته شده است. برای این منظور از یک جت فن با توان مصرفی یکسان استفاده شده و به جای آن از چندین جت فن با توان مصرفی مختلف استفاده شده است. در این قسمت سعی شده است تا مجموع توان‌های جت فن‌های جایگزین شده برابر با توان جت فن اصلی باشد. بر اساس طرح اولیه صورت گرفته، در رمپ اصلی حرکت خودروها تعداد ۴ جت فن و هر کدام دارای توان ۱۲ کیلووات هستند. برای بررسی تعداد جت فن‌ها، با حفظ میزان مصرف انرژی، ۸ جت فن با توان ۶ کیلووات جانمایی شده است. در شکل (۵) کانتورهای غلظت کربن دی اکسید در زمان های مختلف بر اساس انواع تعداد جت فن نشان داده شده است.

داد. این تغییرات باعث می شود تا گردابه ای نزدیک ناحیه بن بست و دالان اصلی به وجود آید. به وجود آمدن این ناحیه کم فشار، باعث می شود تا دوده به سمت ناحیه دوم نرود و در همان ناحیه اول به دام افتاده و خارج گردد. کانتورهای غلظت کربن دی اکسید در زمان های مختلف بر شکل نازل نوآورانه جت فن و طرح پیشنهادی برای نواحی بن بست در شکل (۶) نشان داده شده است.

بزرگتر است. طرح پیشنهادی جت فن به این صورت است که با جارو کردن مناسب دوده از تمام جهات و تمایل زیاد به حرکت به سمت پایین، باعث به گیر انداختن حجم زیادی از دوده در مسیر سر راه جت هسته سیال می شود. همچنین در طرح پیشنهادی، برای نواحی بن بست می توان دهانه خروجی نازل جت فن را با زاویه نزدیک به ۱۰ درجه به سمت پایین خم نمود و جهت آن را به سمت دیواره نزدیک به شفت تغییر



شکل ۵- کانتورهای غلظت کربن دی اکسید در زمان های مختلف بر اساس انواع تعداد جت فن



شکل ۶- کانتورهای غلظت کربن دی اکسید در زمان های مختلف بر شکل نازل نوآورانه جت فن و طرح پیشنهادی برای نواحی بن بست

۶- جمع بندی

تحقیق فعلی به بررسی عددی تاثیر طراحی معماری نواحی مختلف پارکینگ در عملکرد سیستم مدیریت دود با استفاده از جت فن در پارکینگ های زیرزمینی پرداخته است. برای این منظور از نرم افزار متن باز OpenFOAM استفاده گردیده است. در این نرم افزار با کد نویسی معادله غلظت برای دوده، حرکت دوده تحت تاثیر جت فن ها بگ نمایش درآمده است. بعد از صحت سنجی نتایج، در ابتدا به بررسی نوع نازل مورد استفاده پرداخته شد. برای این منظور از سه نوع نازل با قطر هیدرولیکی متفاوت استفاده شده است. در قسمت دیگر نتایج به بررسی تاثیر تعداد جت فن پرداخته شد. برای این منظور از یک جت فن با توان مصرفی یکسان استفاده شده و به جای آن از چندین جت فن با توان مصرفی مختلف استفاده شده است. در قسمت بعدی نیز به بررسی موقعیت یک جت فن در یک ناحیه بن بست در داخل پارکینگ پرداخته شده است. نواحی بن بست در داخل پارکینگ هرچقدر دارای عرض کمتری باشند، جت فن موجود در انتهای آن ناحیه قادر است، سیال با سرعت بالاتر و غیرقابل کنترل تری را به رمپ اصلی تزریق کند و باعث به هم ریختن الگوی جریان سیال در سایر نواحی مانند رمپ خودرویی گردد. نتایج این تحقیق به صورت خلاصه وار به صورت زیر بیان می گردد.

۱- با افزایش قطر، غلظت دوده در زمان های پایانی، دچار کاهش می شود.

۲- نازل با دهانه طول بزرگتر، قادر است جریان خروجی را به حرکت به سمت پایین سوق دهد و جریان را به سمت اطراف نیز هدایت کند، این حالت باعث به گیر انداختن حجم زیادی از دوده در مسیر سر راه جت هسته سیال می گردد.

۳- افزایش تعداد جت فن با ثابت نگه داشتن توان

مراجع

- [1] Su, Zhihe, Yanfeng Li, Hua Zhong, Junmei Li, Zhicheng Guo, Xin Yang, and Shi Yang. "Advancements in smoke control strategies for metro tunnel cross-passage: A theoretical and numerical study on critical velocity and driving force." *Tunnelling and Underground Space Technology* 147 (2024): 105734.
- [2] Zhao, Shengzhong, Haoran Yang, Ying Zhen Li, Haukur Ingason, and Fang Liu. "Theoretical and numerical study on smoke descent during tunnel fires under natural ventilation condition." *Tunnelling and Underground Space Technology* 142 (2023): 105414.
- [3] Nematollahi Sarvestani, Amir, and Pierpaolo Oreste. "Effects of the ventilation system by using jet fans during a fire in road tunnels." *Applied Sciences* 13, no. 9 (2023): 5618.

مصرفی، تاثیر آنچنانی در الگوی خروج دوده ندارد و فقط باعث تقلیل جزئی در آن می گردد و از نظر اقتصادی نیز نقرن به صرفه نیست.

۴- در نواحی بن بست معماری، می توان از نوع جدید نازل معرفی شده استفاده کرد و نازل آن را در زاویه حدوداً ۱۰ درجه به سمت پایین خم نمود تا بتوان از پخش دوده به سایر نواحی عاری از دود جلوگیری کرد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان بدین وسیله از حمایت ها و همکاری های تمامی افرادی که در انجام این پژوهش نقش داشتند، صمیمانه قدردانی می کنند.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می کنند که در ارتباط با انتشار این مقاله هیچ گونه تعارض منافع وجود ندارد.

تأییدیه اخلاقی

نویسندگان تأیید می کنند که این مقاله قبلاً در هیچ مجله دیگری ارسال یا منتشر نشده است و تمامی اصول اخلاق پژوهش رعایت شده است.

مشارکت نویسندگان

سعید حضرتی چاخیرلو: طراحی مطالعه و نگارش مقاله
عبدالناصر عمرانی: تحلیل داده ها

بهنام حیدری: بازبینی نهایی مقاله

رقیه مطلب زاده: بازبینی نهایی مقاله

تمامی نویسندگان نسخه نهایی مقاله را خوانده و تأیید کرده اند.

منابع مالی

این پژوهش هیچ گونه حمایت مالی مستقیم از سازمان یا نهادی دریافت نکرده است.

- [4] Chawla, Shriya Kaur, and Vinayak Malhotra. "Jet fans as Stratified Tunnel Fire Suppressants." In *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 2054, no. 1, p. 012001. IOP Publishing, 2021.
- [5] Di Matteo, Silvia. "Fire risk of electric vehicles in confined spaces." PhD diss., Politecnico di Torino, 2023.
- [6] Qian, Chenghao, Hongyuan Ding, Jianghui Xie, Xiaomei Jiang, Qinpei Chen, Yanjun Chen, Changcheng Liu, and Que Huang. "A review on the transport law and control method of fire smoke from energy storage system in tunnels." *Journal of Energy Storage* 73 (2023): 108929.
- [7] Çakir, M., and Ç. Ün. "CFD Analysis of Smoke and Temperature Control System of Car Park Area with Jet Fans." *J. Eng. Res. Rep* 13 (2020): 27-40.
- [8] Choi, Jongrak, Nahmkeon Hur, Seongwon Kang, Eun Dok Lee, and Kwang-Bum Lee. "A CFD simulation of hydrogen dispersion for the hydrogen leakage from a fuel cell vehicle in an underground parking garage." *International Journal of Hydrogen Energy* 38, no. 19 (2013): 8084-8091.
- [9] Matsuura, Kazuo, Masami Nakano, and Jun Ishimoto. "Forced ventilation for sensing-based risk mitigation of leaking hydrogen in a partially open space." *International Journal of Hydrogen Energy* 35, no. 10 (2010): 4776-4786.
- [10] Huang, Hong, Ryoza Ooka, Hong Chen, and Shinsuke Kato. "Optimum design for smoke-control system in buildings considering robustness using CFD and Genetic Algorithms." *Building and Environment* 44, no. 11 (2009): 2218-2227.
- [11] Viegas, João Carlos. "The use of impulse ventilation for smoke control in underground car parks." *Tunnelling and Underground Space Technology* 25, no. 1 (2010): 42-53.
- [12] Viegas, João Carlos. "The use of impulse ventilation to control pollution in underground car parks." *International Journal of Ventilation* 8, no. 1 (2009): 57-74.
- [13] Špiljar, Željko, Miodrag Drakulić, and Daniel Rolph Schneider. "Analysis of jet fan ventilation system installed in an underground car park with partition walls." *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems* 6, no. 2 (2018): 228-239.
- [14] Kmcová, Miroslava, Michal Krajčák, and Zuzana Straková. "Designing jet fan ventilation for an underground car park by CFD simulations." *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering* 63, no. 1 (2019): 39-43.
- [15] Barsim, Mohsen M., Magdy A. Bassily, Hesham M. El-Batsh, Yaser A. Rihan, and Magda M. Sherif. "Performance of impulse ventilation system in an underground car park fire: Case study." *Journal of Building Engineering* 29 (2020): 101162.
- [16] Lu, S., Y. H. Wang, R. F. Zhang, and H. P. Zhang. "Numerical study on impulse ventilation for smoke control in an underground car park." *Procedia Engineering* 11 (2011): 369-378.
- [17] Nazari, Ata, Alireza Anvari, Saeed Hazrati Chakheirlou, and Mohammadreza Abdoli Afnan. "Do ceiling fans in rooms help to reduce or disperse the transmission of breathing aerosols?." *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration* 32, no. 1 (2024): 12.
- [18] Nazari, Ata, Jiarong Hong, Farzad Taghizadeh-Hesary, and Farhad Taghizadeh-Hesary. "Reducing virus transmission from heating, ventilation, and air conditioning systems of urban subways." *Toxics* 10, no. 12 (2022): 796.
- [19] Murthy, B. N., and J. B. Joshi. "Assessment of standard $k-\epsilon$, RSM and LES turbulence models in a baffled stirred vessel agitated by various impeller designs." *Chemical Engineering Science* 63, no. 22 (2008): 5468-5495.
- [20] Sleiti, A. K., and J. S. Kapat. "Comparison between EVM and RSM turbulence models in predicting flow and heat transfer in rib-roughened channels." In *Heat Transfer Summer Conference*, vol. 46911, pp. 531-542. 2004.
- [21] Hao, Huali, Cheuk Lun Chow, and Denvind Lau. "Effect of Heat Flux on Combustion of Different Wood Species." *Fuel* 278 (2020): 118325.
- [22] Martinka, Jozef, Peter Rantuch, Filip Martinka, Igor Wachter, and Tomáš Štefko. "Improvement of heat release rate measurement from woods based on their combustion products temperature rise." *Processes* 11, no. 4 (2023): 1206.
- [23] Kim, Taehoon. "Modeling of wood crib fires using a detailed pyrolysis model." *Thermal Science and Engineering Progress* 47 (2024): 102339.
- [24] Nazari, Ata, Moharram Jafari, Naser Rezaei, Farzad Taghizadeh-Hesary, and Farhad Taghizadeh-Hesary. "Jet fans in the underground car parking areas and virus transmission." *Physics of Fluids* 33, no. 1 (2021).