ششمین همایش ملی
فناوریهای نوین در مهندسی برق، کامپیوتر و مکانیک ایران
The 6th National Conference on
New Technologies in Electrical, Computer and Mechanical Engineering of IRAN

به نام خدا

تاثیر سرعت خروجی جت فن‌ها بر حرکت دود در پارکینگ‌های زیرزمینی

۱-مهدی مهرباقرپور ۲- محمد مقیمان ۳- محمد حاتمی

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد تبدیل انرژی دانشگاه فردوسی مشهد
۲- استاد تمام گروه مکانیک، دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد
۳- دانشیار گروه مکانیک، دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

Email: (mehrbagherpour@ferdowsi.um.ac.ir**)**
Email: (moghiman@um.ac.ir)
Email: (m-hatami@um.ac.ir)

چکیده

در دهه‌های گذشته با توسعه‌ی شهرنشینی و گسترش بلندمرتبه سازی و با توجه به کمبود فضای پارکینگ، استفاده از پارکینگ‌های طبقاتی و زیرزمینی گسترش یافته‌است. حریق در پارکینگ‌ها، باعث به وجودآمدن دود و گازهای سمی با دمای بالا می‌شود و عمده تلفات و مرگ‌ومیر در آتش‌سوزی‌ها بر اثر این عوامل است. همچنین دود به علت تیرگی دید و عدم تشخیص مسیرهای خروج موجب تاخیر در تخلیه‌ی ساختمان‌های محروقه می‌شود. در این مقاله اثر تخلیه‌ی دود به کمک جت فن‌ها در پارکینگ‌های زیرزمینی (به کمک شبیه‌سازی عددی) مطالعه شده‌است. حداکثر نرخ حرارت آزاد شده حریق برابر ۴.۵ مگاوات است. تاثیر سرعت خروجی جت فن بر میدان دید و دما در پارکینگ‌های زیرزمینی بررسی شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش سرعت جت فن، به علت اختلاط بیش‌تر دود و هوا و ایجاد جریان‌های چرخشی، میدان دید افراد کاهش می‌یابد. علاوه بر این، با افزایش سرعت خروجی جت فن، دمای پایین‌دست منبع حریق به‌وضوح از دمای بالادست منبع حریق بیش‌تر می‌شود که نشان‌دهنده‌ی هدایت موثر دود به سمت فن‌های تخلیه است.

کلمات کلیدی: جت فن، شبیه‌ساز دینامیک آتش، مدیریت دود

۱. مقدمه

در دهه‌های گذشته، با توسعه شهرنشینی و گسترش بلندمرتبه سازی و فضای محدود برای ساخت‌وساز، استفاده از پارکینگ‌های زیرزمینی در برج‌های تجاری و ساختمان‌های مسکونی رواج یافته‌است. حریق در پارکینگ‌های زیرزمینی بسیار خطرناک است، چراکه دود و گازهای داغ حاصل از حریق به‌سرعت در پارکینگ پخش می‌شود. این نوع پارکینگ‌ها معمولا مساحت زیادی دارند و ارتفاع کم آن‌ها، ارتفاع لایه زیرین عاری از دود (در هنگام آتش‌سوزی) را کاهش می‌دهد. همچنین اطفای حریق در پارکینگ‌های زیرزمینی می‌تواند بسیار دشوار باشد، زیرا دود به راحتی فضای پارکینگ را پر می‌کند و میدان دید را محدود می‌کند [۱].

در پارکینگ‌های زیرزمینی، باید از سیستم‌های تخلیه مکانیکی دود استفاده کرد. سیستم‌های تخلیه هوای مکانیکی در پارکینگ به دو صورت سیستم کانال‌کشی و یا سیستم جت فن انجام می‌شود. هردو سیستم شامل فن‌های هوای تازه و فن‌های تخلیه دود هستند. سیستم کانال‌کشی به عنوان یک روش سنتی برای تخلیه مکانیکی دود شناخته می‌شود. در این روش، دریچه‌های تخلیه دود باید در دو سطح، یکی نزدیک به کف و دیگری نزدیک به سقف اجرا شوند و هرکدام پنجاه درصد دود را تخلیه می‌کنند [۲]. در اثر حریق دود و گازهای داغ به علت چگالی کمتر نسبت به هوا به سمت بالا حرکت می‌کنند و لایه زیرین عاری از دودی در نزدیکی کف پارکینگ ایجاد می‌شود و از این رو، دریچه‌های نزدیک به کف در سیستم کانال‌کشی، بیش‌تر هوای زیرین عاری از دود را تخلیه می‌کنند [۳]. همچنین، دریچه‌های اگزاست تنها تولنایی تخلیه دود از محدوده‌ی کوچکی در اطراف خود را دارند و در برخی نقاط ممکن است، دود تخلیه نشود. به دلیل ایرادات و محدودیت‌های سیستم کانال‌کشی، اخیرا استفاده از سیستم‌های جت فن برای کنترل دود در پارکینگ‌ها رواج یافته‌است. این سامانه مانند سیستم کانال‌کشی دارای فن‌های اصلی تخلیه دود و تزریق هوای تازه است و در آن به جای کانال‌کشی در هر طبقه پارکینگ، از جت فن‌ها برای انتقال دود و هوا در تراز افقی هر طبقه از پارکینگ استفاده می‌شود [۴].

۲. پیشینه پژوهش

ویگاس [۱] به مطالعه برهم‌کنش میان جریان لایه‌ی دود و جریان هوای ناشی از جت فن‌ها پرداخته‌است. ویگاس به صورت عددی اثرات تغییر موقعیت و شدت حریق (نرخ حرارت آزاد شده)، فاصله عرضی بین جت فن‌ها، محدودیت نرخ جریان تخلیه‌ی دود و ابعاد دریچه‌ی تخلیه‌ی دود بر کنترل و مدیریت دود را بررسی کرد. او دریافت که در صورتی که نرخ جریان هوای ایجاد شده توسط جت فن‌ها کم‌تر از نرخ جریان تخلیه‌ی دود باشد، جریان‌های چرخشی در پارکینگ سبب اختلاط بیش‌تر دود و هوا شده و جریان برگشتی در محدوده‌ی وسیع‌تری از پارکینگ و با دمای بالاتری گسترش خواهد یافت. همچنین بر روی اثرات شدت حریق نیز مطالعه کرد و نشان داد که افزایش نرخ حرارت آزاد شده ناشی از حریق سبب افزایش دما و سرعت لایه‌ی دود می‌شود.

ژائو و همکاران [۵] به مطالعه‌ی عددی اثر چیدمان جت فن‌ها بر روی میدان دید و توزیع دما در پارکینگ‌های زیرزمینی پرداخته‌اند. با تحقیق بر روی چیدمان جت فن‌ها، نتیجه گرفتند که چیدمان مناسب جت فن‌ها تخلیه‌ی دود از پارکینگ را تسریع می‌کند، میدان دید در بالادست حریق را بهتر کرده و دما را در محدوده‌ی نزدیک آتش کاهش می‌دهد اما فاصله‌ی بیش از حد جت فن‌ها، منجر به اختلال در تخلیه‌ی دود پارکینگ، میدان دید کم در بالادست حریق و نوسان زیاد دما در نزدیکی آتش می‌شود. همچنین حداقل سرعت مناسب خروجی جت فن‌ها را هشت متر بر ثانیه تعیین کردند.

کیو و همکاران [۶]، به مطالعه‌ی عددی اثر سرعت خروجی جت فن‌ها بر ویژگی‌های دود در تونل‌ها پرداختند. با افزایش سرعت جت فن، دود با سرعت بیش‌تری به سمت خروجی حرکت می‌کند و پیشروی آن به سمت ورودی تونل کاهش می‌یابد. با این حال، افزایش سرعت جت فن، اختلاط دود و هوا و ضخامت لایه‌ی دود را افزایش داده و میدان دید افراد را کاهش می‌دهد.

حقانی و همکاران [۷]، به مطالعه‌ی عددی بر روی اثر استفاده همزمان تهویه‌ی طولی و مکش دود از سقف در آتش‌سوزی داخل تونل‌ها پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از یک سیستم مکش دود در بالادست حریق منجر به افزایش حداکثر دما می‌شود اما استفاده از همین سیستم در پایین‌دست منبع حریق سبب کاهش دما در طول تونل و عدم برگشت دود می‌شود. همچنین سرعت مکش دود باید به گونه‌ای تعیین شود که منجر به پدیده‌ی پلاگ هلدینگ[1] نشود.

[1] Plug holding

دکرس و همکاران [۸] در پژوهشی تجربی در یک پارکینگ، به مطالعه‌ی تاثیر سیستم کنترل دود و حرارت (به‌وسیله‌ی تهویه مکانیکی) بر الگوی دود پرداختند. آن‌ها دریافته‌اند که با افزایش نرخ تخلیه‌ی دود از پارکینگ یا کاهش نرخ حرارت آزاد شده ناشی از حریق، جریان برگشتی و اختلاط دود و هوا در داخل پارکینگ کاهش یافته‌است. در مناطقی که جریان چرخشی و اختلاط دود و هوا رخ داده است، دود و حرارت ناشی از حریق به‌خوبی تخلیه نشده‌است. اثر جت فن‌ها، اثر خنک‌کنندگی و رقیق‌کنندگی ناحیه‌ای بوده و تاثیر قابل‌توجهی بر الگوی جریان دود در پارکینگ نداشته‌است. برای مشاهده اثر خنک‌کنندگی و هدایت مناسب دود به سمت فن‌های تخلیه، نباید جت فن‌ها در محیط پر از دود قرار بگیرند.

۳.معرفی نرم افزار و معادلات حاکم

FDS که مخفف Fire dynamics simulator است، یک مدل CFD است که در سال ۲۰۰۰ توسط موسسه ملی استاندارد و فناوری آمریکا[۲] برای اولین‌بار منتشر شد [۹]. سپس این نرم‌افزار با همکاری مرکز تحقیقات فنی (VTT) فنلاند[۳] توسعه یافت. این مدل را می‌توان به‌صورت رایگان از سایت موسسه ملی استاندارد و فناوری ایالات متحده آمریکا دانلود کرد. نرم‌افزار کاربردی FDS با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه‌سازی حریق و آلاینده‌های ناشی از آن استفاده می‌شود [۱۰]. این نرم‌افزار فرم ویژه‌ای از معادلات ناویر–استوکس[۴] را برای جریان‌هایی با سرعت پایین به‌صورت عددی حل می‌کند. معادلات بقای جرم، بقای مومنتم و انرژی به روش تفاضل محدود[۵] و با دقت زمانی و مکانی مرتبه‌ی دوم گسسته شده و در زمان به‌طور صریح[۶] حل می‌شوند. اما پدیده‌ی تابش به‌صورت حجم کنترل[۷] محاسبه می‌شود.

در نرم‌افزار شبیه‌ساز دینامیک آتش، آشفتگی با روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و مدل زیرشبکه اسمارگورینسکی حل می‌شود. در این نرم‌افزار، معادلات بقای جرم، مومنتم و انرژی به صورت روابط (۱) تا (۳) است [۱۱]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla.(\rho \mathbf{u}) = \dot{m}_b''' \qquad (۱)$$

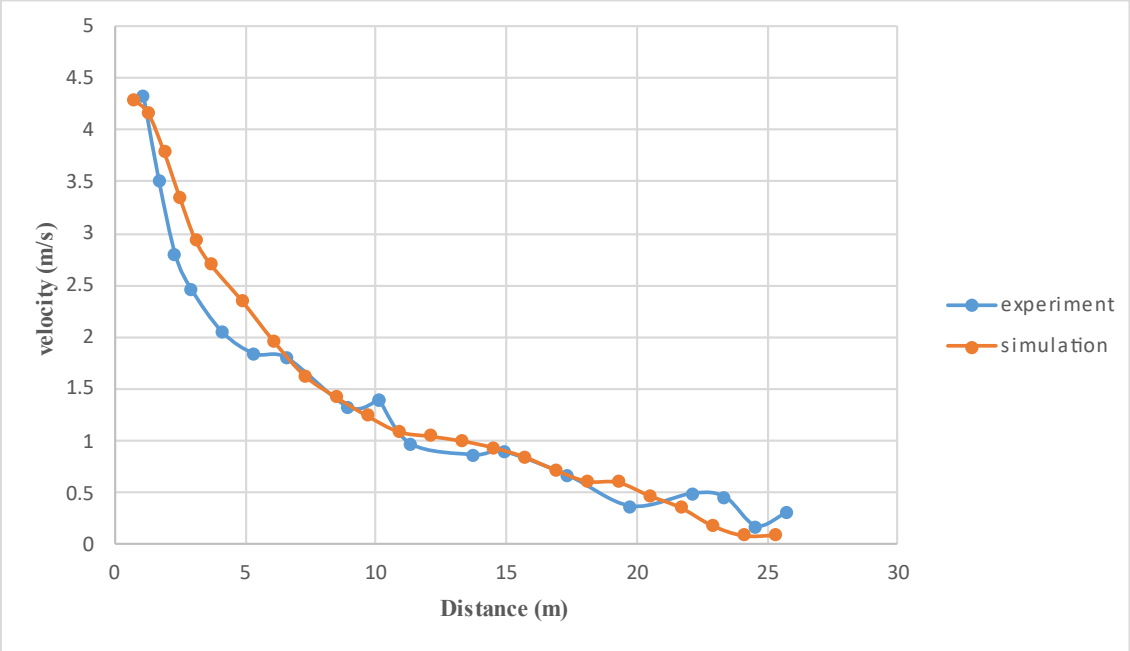
$$\rho\left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u}.\nabla)\mathbf{u}\right) + \nabla \mathbf{P} = \rho \mathbf{g} + \mathbf{f}_b + \nabla.\tau_{ij} \qquad (۲)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h_s) + \nabla.(\rho h_s \mathbf{u}) = \frac{\mathrm{D}\,\overline{p}}{\mathrm{D}t} + \dot{q}''' + \dot{q}_b''' + \nabla.\dot{\mathbf{q}}'' \qquad (۳)$$

۴.اعتبارسنجی

برای اطمینان از مدل‌سازی صحیح جت فن‌ها در نرم‌افزار شبیه‌ساز دینامیک آتش، از مقاله‌ی برژینسکا [۱۲] استفاده می‌کنیم. در آزمایش تجربی انجام شده، از جت فن سری LOW PROFILE 315 شرکت فلاکت‌وود استفاده شده است. دبی عبوری جت فن در این آزمایش ۰.۶۱ مترمکعب بر ثانیه است. سرعت جریان هوای خروجی از جت فن، توسط سه مجموعه حسگر اندازه‌گیری شده است. در شکل ، توزیع سرعت جت فن شبیه‌سازی شده با نرم‌افزار FDS با نتایج تجربی برژینسکا مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج شبیه‌سازی عددی بادقت بالایی به نتایج تجربی نزدیک است.

---
[2] National institute of standards and technology
[3] Technical research centre of finland
[4] Navier-stokes
[5] Finite difference
[6] Explicit
[7] Finite volume



شکل ۱ مقایسه توزیع سرعت خروجی جت فن مدل‌سازی شده با نتایج تجربی [۱۲]

۵.استقلال از شبکه‌ی محاسباتی

در نرم‌افزار FDS، برای شبیه‌سازی حریق به کمک مدل آشفتگی شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES)، نیاز به برآورد اولیه‌ای از ابعاد سلول‌های شبکه‌ی محاسباتی داریم. برای ستون آتش، طول مشخصه برای حریق با نرخ حرارت آزاد شده $\dot{Q}$ به‌صورت رابطه‌ی (۴) تعریف می‌شود. طول مشخصه مشخص‌کننده‌ی اندازه گردابه‌های بزرگ در ستون دود و هم‌چنین ارتفاع شعله است.

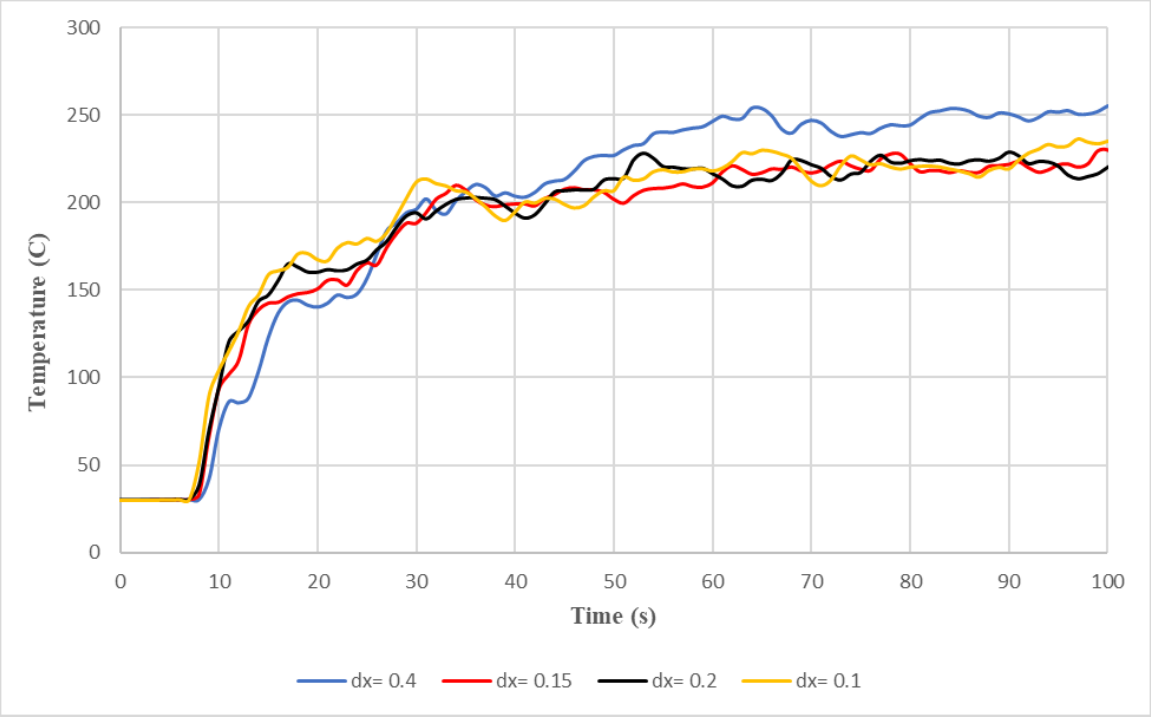
$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_\infty T_\infty c_p \sqrt{g}} \right)^{0.4} \qquad (۴)$$

در رابطه‌ی (۴)، D^* طول مشخصه‌ی آتش، ρ_∞ چگالی هوا، T_∞ دمای محیط و c_p گرمای ویژه‌ی هواست. بنابر پژوهش مک‌گراتن و همکاران [۱۳]، برای دقت کافی در شبیه‌سازی، نسبت طول مشخصه به اندازه‌ی شبکه باید مطابق رابطه‌ی () باشد.

$$4 < \frac{D^*}{\delta x} < 16 \qquad (۵)$$

در این پژوهش طول مشخصه‌ی آتش برابر ۱.۷۲۷ است. بنابراین بزرگ‌ترین اندازه‌ی پیشنهادی سلول برابر ۰.۴۳ متر، اندازه متوسط پیشنهادی ۰.۱۷۵ متر و کوچک‌ترین اندازه‌ی پیشنهادی سلول ۰.۱۰۸ متر است. به منظور انتخاب شبکه‌ی مناسب، علاوه بر معیار فوق، استقلال نتایج از شبکه‌ی محاسباتی نیز انجام می‌شود. استقلال از شبکه، به کمک یک ترموکوپل در قسمت ابتدایی پارکینگ که در نزدیکی سقف قرار دارد، انجام می‌شود. حالت‌های مورد بررسی عبارتند از: شبکه‌ی محاسباتی با سلول‌هایی با ابعاد ۴۰ سانتی‌متر، سلول‌هایی با ابعاد ۲۰ سانتی‌متر، سلول‌هایی با ابعاد ۱۵ سانتی‌متر و در نهایت سلول‌هایی با ابعاد ۱۰ سانتی‌متر. نتایج استقلال حل از شبکه در شکل ۲ آورده شده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود، با کوچک‌تر کردن اندازه‌ی شبکه‌ی محاسباتی از ۲۰ سانتی‌متر به ۱۵

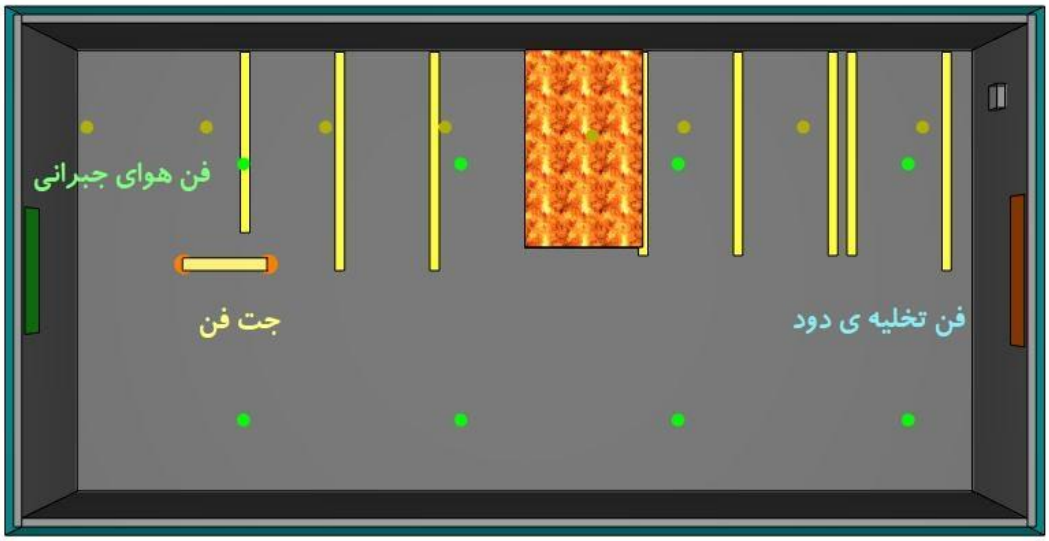
سانتی‌متر، تغییر محسوسی در دمای ترموکوپل ایجاد نمی‌شود. بنابراین از شبکه‌ی محاسباتی با سلول‌هایی با ابعاد ۲۰ سانتی‌متر استفاده می‌شود. اما به جهت محدودیت‌هایی که برای اندازه شبکه‌ی محاسباتی در اطراف جت فن‌ها وجود دارد، در محدوده‌ی اطراف جت فن اندازه‌ی سلول‌های شبکه‌ی محاسباتی ۱۰ سانتی‌متر خواهد بود.



شکل ۲ استقلال نتایج از شبکه‌ی محاسباتی

۶.هندسه‌ی مدل و مشخصات مواد

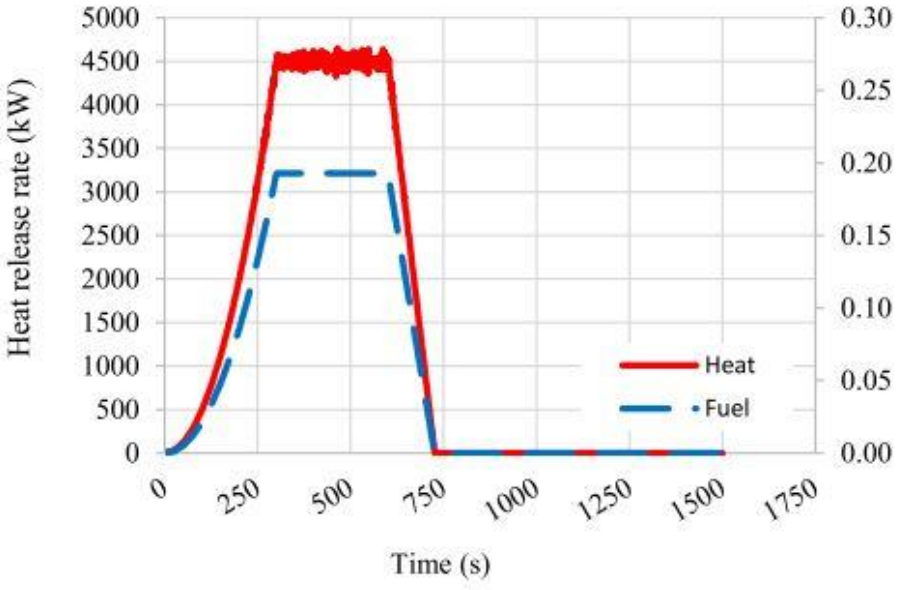
پارکینگ موردنظر دارای ۲۴ متر طول، ۱۲ متر عرض و ارتفاع ۴.۲ متر است. هندسه‌ی پارکینگ زیرزمینی موردنظر در شکل ۳ نمایش داده شده‌است.



شکل ۳ هندسه‌ی پارکینگ از نمای فوقانی

هشت دتکتور دودی از نوع فتوالکتریک در داخل پارکینگ جای‌گذاری شده است، پس از تشخیص حریق توسط دتکتور دود، ابتدا فن تخلیه‌ی دود شروع به کار می‌کند، پس از ۱۰ ثانیه فن هوای جبرانی فعال می‌شود و درنهایت ۲۰ ثانیه پس از تشخیص حریق، جت فن‌ها نیز فعال می‌شوند. دلیل تاخیر در فعال‌سازی جت فن‌ها و فن‌های هوای جبرانی، جلوگیری از اختلاط دود و هوا و تخلیه‌ی ایمن پارکینگ است. همچنین ابعاد حریق ۳ متر در ۵ متر است. ظرفیت فن تخلیه‌ی دود ۱۸ بار تعویض هوا بر ساعت و ظرفیت فن هوای جبرانی ۱۲ بار تعویض هوا بر ساعت در نظر گرفته شده است. درب تخلیه‌ی اضطراری پارکینگ در سمت چپ آن (بخش فن هوای تازه) در نظر گرفته شده است.

برای شبیه‌سازی حریق در پارکینگ‌های زیرزمینی حداقل نرخ حرارت آزادشده ناشی از حریق ۴ مگاوات در نظر گرفته می‌شود. نوع سوخت توصیه‌شده برای شبیه‌سازی حریق نیز پلی‌یورتان شعله‌ور است. از این رو، در این پژوهش سوخت پلی‌یورتان از نوع GM-27 استفاده شد. در شکل ۴، نمودار نرخ حرارت آزاد شده حریق پلی‌یورتان (یا نرخ سوخت مصرفی در حین حریق) نمایش داده شده‌است [۱۴]. اطلاعات موردنیاز برای مدل‌سازی واکنش سوختن پلی‌یورتان در مرجع [۱۵] آورده شده‌است.

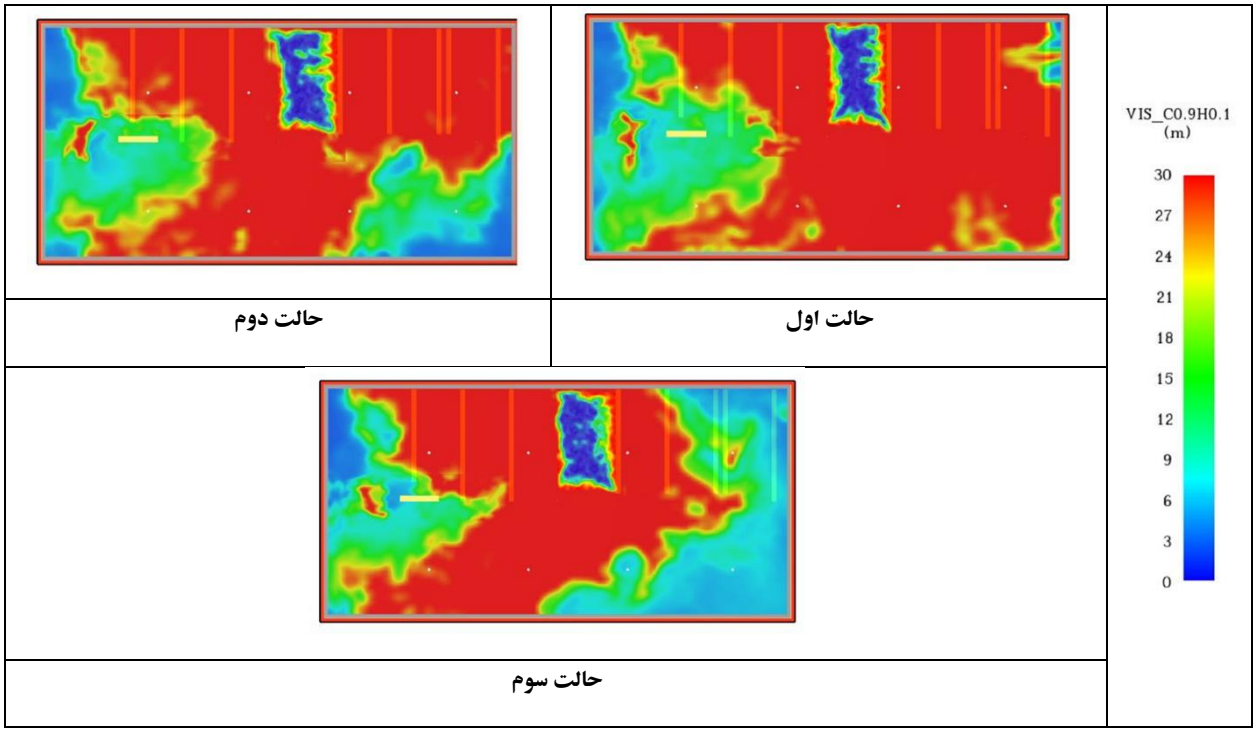


شکل ۴ نمودار نرخ حرارت آزادشده حریق به‌همراه نرخ سوخت مصرفی [۱۴]

۷. نتایج و بحث

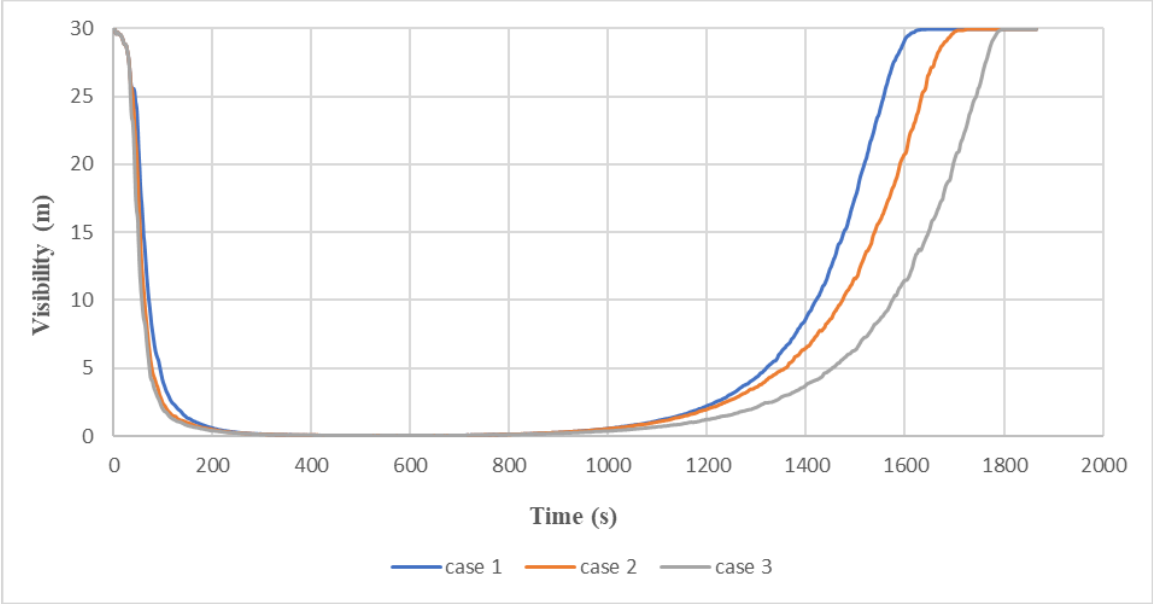
در این بخش، به بررسی اثر تغییر دبی جت فن‌ها بر پارامترهای موثر بر گسترش دود و آتش می‌پردازیم. در حالت‌های اول تا سوم، دبی جت فن‌ها به ترتیب یک، دو و چهار مترمکعب بر ثانیه است. در ابتدا به بررسی اثر تغییر دبی جت فن‌ها بر میدان دید افراد در ارتفاع ۱.۸ متری می‌پردازیم. هنگامی که غلظت دوده افزایش می‌یابد، میدان دید افراد کاهش می‌یابد. در نتیجه سرعت حرکت افراد نیز کاهش می‌یابد. قرارگرفتن طولانی‌مدت افراد در معرض دود و گازهای سمی ناشی از حریق، می‌تواند منجر به کاهش هوشیاری افراد، کاهش توانایی حرکتی فرد، کما و حتی مرگ شود. در شکل ۵، میدان دید افراد در ارتفاع ۱.۸ متری و پنجاه ثانیه پس از شروع حریق نمایش داده شده است.

با افزایش دبی و سرعت خروجی جت فن‌ها، میدان دید افراد (در ثانیه پنجاهم حریق) کاهش می‌یابد. با افزایش سرعت خروجی جت فن‌ها، حجم زیادی از هوا به حرکت درآورده می‌شود؛ اما در سرعت‌های بالای جت فن، جریان هوایی که توسط جت فن هدایت می‌شود، ممکن است از نرخ تخلیه‌ی دود فراتر رود. در این حالت، جریان ایجاد شده توسط جت فن‌ها تغییر جهت می‌دهد و جریان‌های چرخشی را در پارکینگ ایجاد می‌کند که خود سبب اختلاط بیش‌تر دود و هوا می‌شود و میدان دید افراد را در بازه‌ی تخلیه‌ی اضطراری کاهش می‌دهد.



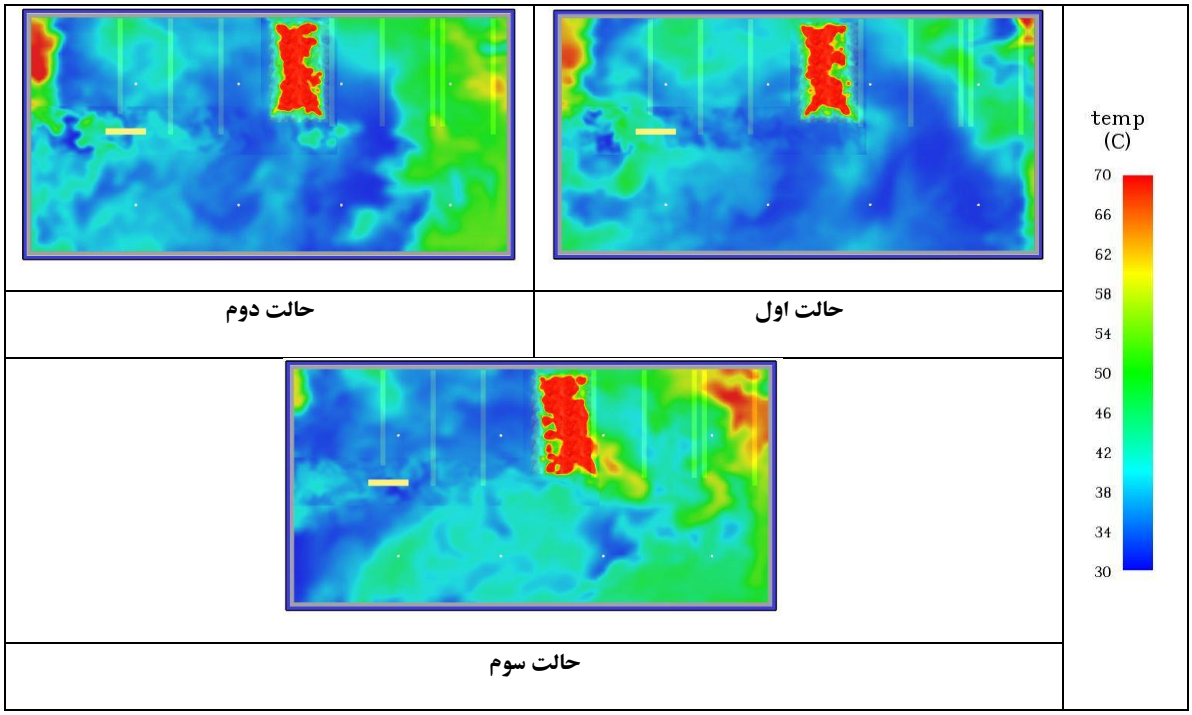
شکل ۵ میدان دید افراد در ارتفاع ۱.۸ متری

در **Error! Reference source not found.**، میانگین میدان دید افراد در ارتفاع ۱.۸ متری در طول فرایند شبیه‌سازی نمایش داده شده است. حالت اول (جت فن با دبی یک مترمکعب بر ثانیه) بهترین عملکرد از منظر تسریع در تخلیه‌ی دود و بهبود میانگین دید دارد. با افزایش دبی جت فن و در نتیجه سرعت خروجی آن، میانگین میدان دید دیرتر افزایش می‌یابد و به محدوده‌ی ۳۰ متر می‌رسد.



شکل ۶ میانگین میدان دید افراد در ارتفاع ۱.۸ متری

در شکل ، کانتور توزیع دما در ارتفاع ۱.۸ متری و پنجاه ثانیه پس از شروع آتش‌سوزی نشان داده شده است. در حالت‌های مختلف شبیه‌سازی، درجه‌ی حرارت در بیش‌تر مناطق پارکینگ (به جز سطح بالای منبع حریق) کم‌تر از ۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد است که الزامات ایمنی استانداردهای مختلف را برآورده می‌کند و افراد به طور ایمن می‌توانند از منطقه‌ی خطر فرار کنند.



شکل ۷ کانتور دما در ارتفاع ۱.۸ متری

بر طبق شکل ، با افزایش سرعت خروجی جت فن‌ها (حالت اول تا سوم)، دمای پایین‌دست منبع حریق نسبت به بالادست حریق بیش‌تر می‌شود که نشان‌دهنده‌ی تخلیه‌ی موثر دود به سمت فن‌های تخلیه‌ی دود (پایین‌دست منبع حریق) است. هرچه سرعت خروجی جت فن بیش‌تر باشد، نیروی تولیدشده توسط جریان هوا بیش‌تر خواهد شد به‌طوری که حجم بیش‌تری از دود به سمت فن‌های تخلیه هل داده می‌شوند.

۸. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر تغییر دبی جت فن‌ها بر میدان دید افراد و توزیع دمای در داخل پارکینگ زیرزمینی مطالعه گردید. جمع‌بندی نتایج به شرح زیر است:

- با افزایش سرعت خروجی جت فن، میدان دید افراد در پارکینگ کاهش می‌یابد و از ایمنی افراد در هنگام تخلیه‌ی پارکینگ کاسته خواهد شد. با افزایش سرعت خروجی جت فن‌ها، حجم زیادی از هوا به حرکت درآورده می‌شود؛ اما در سرعت‌های بالای جت فن، جریان هوایی که توسط جت فن هدایت می‌شود، ممکن است از نرخ تخلیه‌ی دود فراتر رود. در این حالت، جریان ایجاد شده توسط جت فن‌ها تغییر جهت می‌دهد و جریان‌های چرخشی را در پارکینگ ایجاد می‌کند که خود سبب اختلاط بیش‌تر دود و هوا می‌شود و میدان دید افراد را در بازه‌ی تخلیه‌ی اضطراری کاهش می‌دهد.

- با افزایش سرعت خروجی جت فن، دمای پایین‌دست منبع حریق به‌وضوح از دمای بالادست منبع حریق بیش‌تر می‌شود که نشان‌دهنده‌ی هدایت موثر دود به سمت فن‌های تخلیه است. هرچه سرعت خروجی جت فن بیش‌تر باشد، نیروی تولیدشده توسط جریان هوا بیش‌تر خواهد شد به‌طوری که حجم بیش‌تری از دود به سمت فن‌های تخلیه هل داده می‌شوند.

۱۰. مراجع

[۱] J. C. Viegas, The use of impulse ventilation for smoke control in underground car parks, *Tunnelling and Underground Space Technology,* Vol. 25, No. 1, pp. 42-53, 2010.
[۲] B. Standard, Components for smoke and heat control systems, Part, 2006.
[۳] E. E .Khalil and S. M. Gomaa, Smoke clearance in an underground car park using the jet fan system, *Int. J. Therm. Environ. Eng,* Vol. 14, pp. 95-101, 2017.
[٤] d. faraji, *parking ventilation in persian*: yazda, 2020.
[٥] S. Zhao, Y. Li, L. Chang, H. Liu and S .Tian, Numerical Simulation Analysis on Air Supply and Smoke Exhaust Assisted by Jet Fan in Underground Car Park, in *Proceeding of*, IEEE, pp. 1-6.
[٦] H. Thien Khieu, Y. M. Lee, J. T. Kim and H. S. Ryou, Numerical study of the effects of the jet fan speed , heat release rate and aspect ratio on smoke movement in tunnel fires, *Energies,* Vol. 13, No. 5, pp. 1206, 2020.
[۷] S. O. Haghani and E. Barati, Numerical simulation: simultaneous use of longitudinal ventilation and smoke extraction from the ceiling in fires inside tunnels, *Amirkabir journal of mechanical engineering,* Vol. 53, No. 7, pp. e18-e18, 2021.
[۸] X. Deckers, S. Haga, B. Sette and B. Merci, Smoke control in case of fire in a large car park: Full-scale experiments, *Fire Safety Journal,* Vol. 57, pp. 11-21, 2013.
[۹] K. B. McGrattan, H. R. Baum, R. G. Rehm, A. Hamins, G. P. Forney, J. E. Floyd, S. Hostikka and K. Prasad, *Fire dynamics simulator--Technical reference guide*: National Institute of Standards and Technology, Building and Fire Research,2000.
[۱۰] S. Kahrmann, Development of techniques to improve fire dynamics informed loss estimation for cleanrooms in the semiconductor industry, 2010.
[۱۱] K. McGrattan, R. McDermott, C. Weinschenk and K. Overholt, Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical Model, 2014, *NIST Special Publication,* Vol. 1018, 2018.
[۱۲] D. Brzezińska, Practical aspects of jet fan ventilation systems modelling in fire dynamics simulator code, *International Journal of Ventilation,* Vol. 17, No. 4 ,pp. 225-239, 2018.
[۱۳] S. Hostikka and K. B. McGrattan, Large eddy simulation of wood combustion, in *Proceeding of*, 755-762.
[۱٤] M. Kmecová, M. Krajčík and Z. Straková, Designing jet fan ventilation for an underground car park by CFD simulations, *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering,* Vol. 63, No. 1, pp. 39-43, 2019.
[۱٥] M. J. Hurley, D. T. Gottuk, J. R. Hall Jr, K. Harada, E. D. Kuligowski, M. Puchovsky, J. M. Watts Jr and C. J. WIECZOREK, *SFPE handbook of fire protection engineering*: Springer, 2015.