

## تأثیر ارتفاع ساختمان‌های متقابل بر جریان هوا و توزیع آلاینده‌ها در خیابان‌های باریک و عمیق شهری در شرایط وقوع پدیده غبار-مه

سید مهدی دیهیم<sup>۱\*</sup>، قنبرعلی شیخزاده<sup>۲</sup>، علیرضا آقایی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، تبدیل انرژی دانشکده پردیس، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

sayedmahdi1365260@gmail.com

<sup>۲</sup> استاد، دانشکده مکانیک و پژوهشکده انرژی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

sheikhz@kashanu.ac.ir

<sup>۳</sup> استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

a.aghaei@kashanu.ac.ir

**چکیده:** در این مقاله، شبیه‌سازی جریان هوای اتمسفری (هوا، ریز ذرات، غبار و آلاینده‌های وسایل نقلیه) به منظور بررسی میدان جریان (حرکت ذرات پخش آلاینده‌ها) و انتقال حرارت (هدایت، جابه‌جایی و تشعشع) درون خیابان‌های باریک و عمیق (دره‌های شهری) انجام شده است. مطالعه عددی برای چهار ساعت مختلف از روز (۱۰ صبح، ۱ بعد از ظهر، ۴ بعد از ظهر و ۸ شب) انجام شده است. هدف این است که وضعیت آب‌وهوایی موجود در دره‌های شهری را مورد بررسی قرار داده و متغیرهای فیزیکی مؤثر بر این واحدها، نظیر جهت‌گیری و هندسه خیابان‌ها، ارتفاع ساختمان‌های متقابل، جریان هوا، انتقال حرارت و سایر موارد را با استفاده از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی مورد ارزیابی قرار داد. با استفاده از نتایج کار حاضر می‌توان به ساختار شهری ایده‌آلی دست یافت که از سازگاری بیشتری با محیط زیست برخوردار باشد. طبق نتایج، در تمامی ساعت‌ها و ماه‌های مورد بررسی، انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی برای جریان سیال در برابر جابه‌جایی اجباری ناچیز بوده و عمده حرکت جریان سیال و آلاینده‌ها به واسطه سرعت باد در ورودی و سرعت پخش آلاینده‌هاست؛ به طوری که هرچه سرعت باد در بالای ساختمان پشت به باد نسبت به سرعت ورود آلاینده‌ها بیشتر باشد، غلظت آلاینده‌ها در ناحیه بین دو ساختمان بیشتر است. دره‌هایی که در آن‌ها ساختمان پشت به باد کوتاه‌تر است و در کل ارتفاع هر دو ساختمان متقابل نسبت به عرض و طول خیابان کم است، کمترین غلظت آلاینده‌ها را در سطح اشغال‌شده عابران پیاده دارا هستند.

**واژه‌های کلیدی:** شبیه‌سازی عددی، حل دو فازی، انتقال حرارت (هدایت، تشعشع، جابه‌جایی)، پدیده غبار-مه، توزیع آلاینده‌ها.

## ۱. مقدمه

فاصله بین دو تقاطع اصلی شناخته می‌شود. بر اساس نسبت طول خیابان به ارتفاع ساختمان، خیابان‌ها به سه دسته کوتاه ( $L/H=3$ )، متوسط ( $L/H=5$ ) و بلند ( $L/H=7$ ) تقسیم‌بندی می‌شوند [۳]. خیابان‌ها بر اساس تقارن نیز دسته‌بندی می‌شوند که عبارت‌اند از خیابان‌های متقارن (خیابان‌هایی که ساختمان‌های دو طرف آن ارتفاع تقریباً یکسانی دارند) و خیابان‌های نامتقارن (خیابان‌هایی که ساختمان‌های دو طرف آن اختلاف ارتفاع قابل توجهی دارند) [۹-۱۰]. جزیره گرمایی شهری<sup>۱</sup>، پدیده‌ای است که در آن مناطق شهری به‌علت فعالیت‌های انسانی، بسیار گرم‌تر از مناطق روستایی و غیرپیشرفته اطراف آن هستند. در این پدیده، تفاوت دما معمولاً در شب، بیشتر از روز است و هنگامی که وزش باد ضعیف است، بیشتر آشکار می‌شود [۱۱].

پدیده جزیره گرمایی نه تنها تقاضای انرژی را برای خنک‌سازی فضا و گرم کردن ساختمان‌ها افزایش می‌دهد، بلکه تأثیر زیادی بر آسایش و سلامتی انسان‌ها در مناطق شهری دارد [۱۲-۱۳].

از مهم‌ترین عوامل ایجاد پدیده جزیره گرمایی می‌توان به اثرات هندسی خیابان‌ها و ساختمان‌ها اشاره کرد. ساختمان‌های بلند در بسیاری از شهرها سطوح متعددی را جهت بازتاب و جذب نور خورشید فراهم می‌کنند که باعث افزایش کارایی حرارتی مناطق شهری می‌شود و با نام اثر کانون شهری شناخته شده است. مسدود کردن باد یکی دیگر از اثرات ساختمان‌هاست که مانع خنک شدن خیابان‌ها و جلوگیری از خروج آلودگی‌ها از طریق عبور باد می‌شود [۱۴-۱۶].

از سوی دیگر، در محیط شهری انتشار گازهای آگروز خودروها منبع اصلی بسیاری از آلاینده‌های هواست. این دوده‌های ایجادشده درون خیابان، توسط جریان گردبادی به سمت مناطق پشت به باد برده شده و در نتیجه غلظت آلاینده‌های سطحی مناطق پشت به باد در مقایسه با مناطق رو به باد افزایش می‌یابد. جریان‌های چرخشی ثانویه در بخش‌های پایین‌تر خیابان به رکود بیشتر آلودگی در پیاده‌روها، به‌ویژه در سمت پشت به باد کمک می‌کنند [۱۷ و ۱۸].

پایداری جوی ناشی از وارونگی<sup>۲</sup> دمایی یکی از مهم‌ترین علل افزایش پتانسیل آلودگی هوا به‌خصوص در کلان‌شهرهاست. به‌طور طبیعی در لایه تحتانی جو (تروپوسفر) با افزایش ارتفاع، دما به‌طور آدیاباتیک خشک (بی‌درو) کاهش می‌یابد. به بیان دیگر، هوای سطح زمین که در مجاورت زیست‌کره واقع شده، گرم‌تر از سطوح بالاتر است. لذا در چنین شرایطی، نوسانات عمودی جو به‌راحتی مهیا شده و هوای سطح زمین با هوای پاک سطوح بالایی، جابه‌جایی طبیعی

در دنیای مدرن امروز، جوامع روستایی رفته‌رفته جای خود را به جوامع شهری داده‌اند. طبق آمار موجود [۱]، در حال حاضر حدود ۵۰٪ جمعیت جهان در شهرها سکونت دارند و روستاهای زیادی خالی از سکنه شده‌اند [۲]. این تغییرات پیامدهای مختلفی را به همراه دارد که مهم‌ترین آن‌ها تغییر آب‌وهوای حاکم بر سطح زمین است. گسترش شهرنشینی و تغییر ساختار شهرها از مهم‌ترین عواملی هستند که به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم می‌توانند بر آب‌وهوای مناطق شهری تأثیر داشته باشند [۳].

پژوهش یولا و سیونگ [۴] نشان می‌دهد که دمای هوا در شهرهای بزرگ و مناطقی که تراکم جمعیت و ساختمان در آن‌ها بیشتر است، نسبت به مناطق روستایی و کم‌تراکم در حدود ۳ تا ۱۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است؛ این افزایش دما، با عنوان پدیده جزیره گرمایی شناخته می‌شود. پدیده جزیره گرمایی علاوه بر تغییر دما، بر کیفیت هوای شهرها نیز مؤثر است و مناطقی که در آن جزیره گرمایی مشاهده می‌شود، به‌مراتب هوای آلوده‌تری دارند [۵].

گام نخست در بررسی تغییرات ایجادشده در شهرها، بررسی واحدهای اصلی شهر یا خیابان‌های باریک و عمیق است که در اصطلاح به آن‌ها دره<sup>۱</sup> گفته می‌شود [۶ و ۷]. با توجه به وجود ارتباط بین پدیده جزیره گرمایی و تغییر ساختار شهری، مطالعه وضعیت آب‌وهوایی شهرها و بررسی عوامل مؤثر بر آن از اهمیت زیادی برخوردار است. از این‌رو هدف کار حاضر این است که وضعیت آب‌وهوایی موجود در خیابان‌های باریک و عمیق را به‌عنوان واحدهای اصلی شهری مورد بررسی قرار داده و متغیرهای فیزیکی مؤثر بر این واحدها، نظیر جهت‌گیری و هندسه خیابان‌ها، ارتفاع ساختمان‌های متقابل، جریان هوا، انتقال حرارت و سایر موارد را با استفاده از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی مورد ارزیابی قرار دهد. امید است که بر اساس نتایج کار حاضر و پژوهش‌های مشابه، بتوان به شکل مؤثرتری، عوامل درگیر در ایجاد پدیده جزیره گرمایی را مورد بررسی قرار داده و به ساختار شهری ایدئالی دست یافت که از سازگاری بیشتری با محیط زیست برخوردار باشد.

چنان‌که گفته شد، یکی از مهم‌ترین عناصر شهری دره است که تراکم جمعیت و ترافیک در آن نسبتاً بالاست [۸]. ابعاد یک دره معمولاً بر اساس نسبت ارتفاع ساختمان ( $H$ ) به عرض (پهنای) خیابان ( $W$ ) تعریف می‌شود. در یک خیابان شهری عمیق نسبت ارتفاع ساختمان به عرض خیابان، بیشتر از ۲ است. طول یک خیابان ( $L$ )،

2. Urban Heat Island (UHI)

3. Inversion

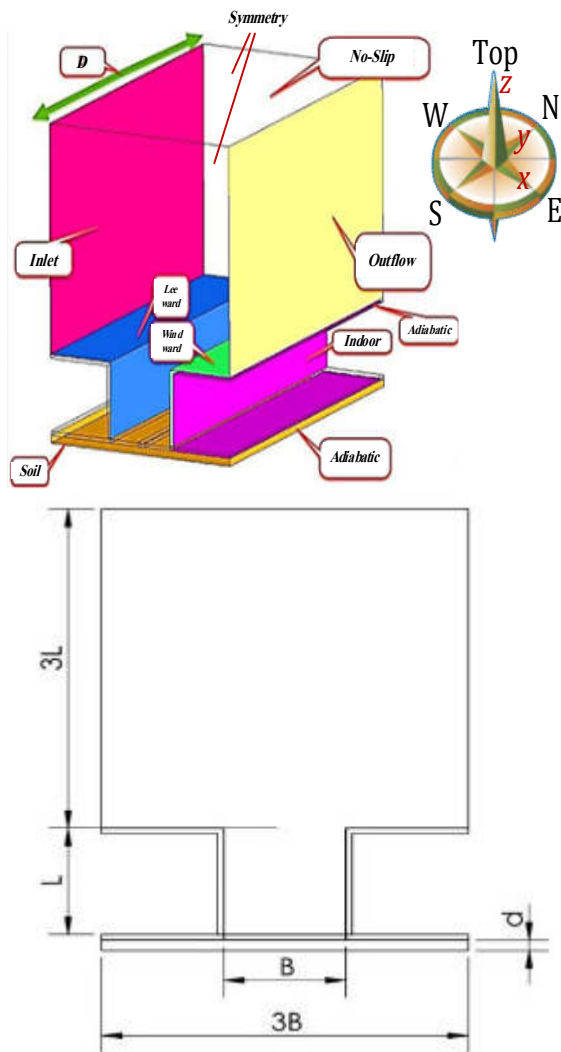
1. Canyon

تشعشع حرارتی نور خورشید پرداختند. لاوانیا [۳۳] از نرم‌افزار فلوئنت برای مدل‌سازی کیفیت هوا در خیابان استفاده کرد. در این پژوهش به منظور بررسی غلظت آلاینده‌های هوا متغیرهایی نظیر دما، سرعت باد و رطوبت مورد مطالعه قرار گرفت. لانگلی و همکاران [۳۴] پراکندگی ذرات معلق آلاینده را در خیابان‌های باریک و عمیق شهری مورد مطالعه قرار دادند. دی‌لیتو و ولارو و همکاران [۳۵] شرایط آب‌وهوایی را در یک خیابان باریک و عمیق مورد مطالعه قرار دادند. تجزیه و تحلیل آب‌وهوا از طریق شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت صورت گرفت و میدان جریان در یک محیط شهری بررسی شد. سولازو و بریتر [۳۶] تغییرات دمای خیابان‌های باریک و عمیق شهری را با توجه به سرعت باد، دمای سطوح و هندسه خیابان با روش CFD، به شکل وسیعی مورد مطالعه قرار دادند. صانعی‌نژاد و همکاران [۳۷] تأثیر ضریب انتقال حرارت در یک دره شهری را مورد بررسی قرار داده و آن را به صورت یک حفره، شبیه‌سازی کردند. گرومکی و همکاران [۳۸] ارتباط بین پراکندگی جریان و مواد منتشرشده حاصل از ترافیک را درون دره‌های شهری با کاشت درختان با استفاده از ابزاری نظیر تونل باد و تحقیقات عددی (ارزیابی داده‌های CFD با داده‌های تجربی)، مورد مطالعه قرار دادند. یوایهارا و همکاران [۳۹] با استفاده از تونل باد و لیزر دوپلری<sup>۲</sup> به بررسی تأثیر چگونگی لایه‌بندی‌های حرارتی جریان در بالای خیابان‌های باریک و عمیق شهری پرداختند. لی و همکاران [۴۰] میدان جریان درون دره‌های شهری را به صورت فیزیکی مورد بررسی قرار داده و خصوصیات جریان را در یک تونل باد مطالعه کردند. یک آزمایش اعتبارسنجی برای پیش‌بینی سرعت باد در خیابان‌های باریک و عمیق شهری توسط آسیماکوپولوس و همکاران [۴۱] انجام شد. آن‌ها از یک مدل عددی برای مجموعه‌ای از ساختمان‌ها استفاده کرده و خیابان‌ها را به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی کردند. لی و همکاران [۴۲] با استفاده از یک حل عددی که ویژگی‌های آن در یک فضای دوبعدی و با استفاده از درجه حرارت سطوح مشخص شده بود، تأثیر گرمایش زمین را بر میدان‌های جریان درون خیابان مورد بررسی قرار دادند. کارپنتیری و همکاران [۴۳] جریان هوا در یک چهارراه شهری را مورد بررسی قرار دادند.

با مرور پژوهش‌های پیشین مشخص شده است که تاکنون تحقیقی درخصوص شرایط آب‌وهوایی و بررسی پدیده‌ی وارونگی دما در خیابان‌های باریک و عمیق شهری در ایران انجام نشده است. بنابراین در این پروژه سعی شده است تا موارد اشاره‌شده به‌دقت بررسی و

صورت داده و تهویه طبیعی به این شکل انجام می‌گیرد. اگر شرایط به‌گونه‌ای باشد که با افزایش ارتفاع، دما نیز افزایش یابد، یعنی هوای مجاور سطح زمین سردتر از سطوح بالایی باشد، در این حالت جابه‌جایی عمودی جو متوقف شده و هوای سطح زمین به حالت پایدار مسکوت می‌ماند. به چنین حالتی وارونگی دمایی گفته می‌شود. از آنجایی که منابع آلاینده هوا به‌طور دائم آلاینده‌های خود را در داخل لایه سطحی تزریق می‌کنند، غلظت آلاینده‌ها در این شرایط به‌شدت افزایش می‌یابد. آلودگی هوا زمانی به شدیدترین حد خود می‌رسد که پدیده وارونگی، با ارتفاع کم و برای مدت طولانی‌تر در هوای شهر باقی بماند. وارونگی هوا به معنای تغییر یا انحراف هوا از وضعیت موجود به حالتی دیگر به‌علت ارتفاع است که در بیشتر موارد به وارونگی دمایی مربوط بوده و منجر به تهدید سلامتی انسان‌ها می‌شود [۱۹-۲۷].

تاکنون پژوهش‌های بسیاری در زمینه طراحی و مدل‌سازی دره‌های شهری صورت گرفته و از روش‌های گوناگونی برای شبیه‌سازی خیابان‌ها استفاده شده است. پارک و همکاران [۲] اثر خنک‌کنندگی سقف‌های درخت‌کاری شده بر جریان و توزیع آلاینده‌ها را در یک دره شهری ایدنال که به صورت سه‌بعدی و با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۱</sup> مدل‌سازی شده بود، بررسی کردند. یولا و سیانگ [۴] تأثیر تابش خورشیدی و باد را در دره‌های شهری در مناطق گرم و مرطوب مورد مطالعه قرار دادند. بوتیلو و همکاران [۹] به بررسی شرایط آب‌وهوایی در یک خیابان با ساختار معمولی پرداختند. در این پژوهش با استفاده از روش CFD، یک خیابان شمالی جنوبی، با نسبت مشخص H/W مطالعه شد. آفرلی و همکاران [۲۷] به مطالعه ارتباط بین گرم شدن سطوح با متغیرهایی نظیر دمای هوا، باد و جریان مغشوش در خیابان‌های باریک و عمیق شهری پرداختند. ناکامورا و اوکی [۲۸] به مطالعه باد، دما و شرایط پایدار در یک خیابان شهری غربی شرقی پرداختند. آلگرنی و همکاران [۲۹] به بررسی انتقال حرارت جابه‌جایی نمای ساختمان‌ها در دره‌های شهری و اثر آن در پیش‌بینی تقاضا برای خنک کردن فضای ساختمان‌ها پرداختند. کووار و همکاران [۳۰] با استفاده از یک تونل باد، تأثیر گرم شدن دیواره‌ها بر رژیم جریان در یک خیابان باریک و عمیق شهری و ارتباط آن با توزیع آلاینده‌ها را مورد مطالعه قرار دادند. دی‌سابتینو و همکاران [۳۱] به بررسی توزیع جریان و آلاینده‌ها با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت پرداختند. نظریان و کلیسل [۳۲] به شبیه‌سازی های عددی جریان سیال و انتقال حرارت یک محیط شهری ایدنال سه‌بعدی تحت تأثیر



شکل (۱): طرح‌واره هندسه سه‌بعدی مسئله و ابعاد دره شهری

جدول (۱): خواص حوزه‌های حل جامد [۴۵]

مکان	$\alpha$	$\varepsilon$	$c_p$ (J/kg·K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$k$ (W/m·K)
خیابان	۰/۲	۰/۹۵	۸۸۰	۲۶۰۰	۱/۶
دیواره	۰/۶	۰/۹۵	۸۰۰	۲۰۰۰	۰/۹
خاک	-	-	۱۵۰۰	۱۴۴۰	۱/۰

شکل (۲) یک نمونه تصویر از وقوع پدیده غبار-مه در شهر کرج را نشان می‌دهد. بر اساس بررسی‌های انجام‌شده [۴۶-۴۸]، میزان آلاینده‌های موجود در هوای کرج در جدول (۲) ارائه شده است. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، در حدود ۹۰٪ از آلاینده‌های ناکس (NOx)، نیتروژن مونو اکسید بوده و مابقی آن سایر اکسیدهای نیتروژن هستند. بنابراین در این قسمت فرض شده که تمامی آلاینده‌های ناکس موجود در هوای کرج، نیتروژن مونو اکسید است. جدول (۳) مشخصات متغیرهای هندسی مدل‌های مورد بررسی در کار حاضر را نشان می‌دهد.

تحلیل گردند. در این تحقیق با استفاده از روش‌های عددی، رفتار جریان هوا و انتقال حرارت درون خیابان‌های باریک و عمیق شهری در شهرستان کرج مدل‌سازی شده است تا دید وسیع‌تری نسبت به وضعیت جدید و تغییرات ایجادشده درون آن به دست آید.

## ۲. الگوسازی عددی

### ۱. مدل فیزیکی

هندسه سه‌بعدی خیابان باریک و عمیق مورد مطالعه که در آن ارتفاع ساختمان‌های متقابل یکسان هستند در شکل (۱) نشان داده شده است. هندسه مورد مطالعه شامل چهار قسمت خاک در زیر ساختمان‌ها و خیابان، آسفالت خیابان، ساختمان‌های اطراف خیابان و همچنین سیال هوا و ذرات معلق خروجی از آگزوز خودروها (به‌عنوان آلاینده) است. مطابق شکل (۱)، نسبت ارتفاع ساختمان به عرض خیابان (L/B) برابر ۱ در نظر گرفته شده است؛ هرچند سایر نسبت‌ها نیز بررسی می‌شوند. همچنین محور خیابان در راستای شمال‌جنوب بوده و ناحیه سیال دارای طول (D=5L) و عرض 3L و ارتفاع 3L می‌باشد. ضخامت خاک برابر با d=0.1L است. خاک، آسفالت خیابان و دیواره‌های ساختمان‌ها به‌صورت جامد در نظر گرفته می‌شوند و به این ترتیب حوزه حل این مناطق، حوزه حل جامد تعریف می‌شود. جدول (۱) خواص مربوط به این سطوح را ارائه می‌دهد. در فضای اطراف خیابان‌های باریک و عمیق، هوا به‌عنوان سیال پیش‌زمینه به همراه ذرات آلاینده خروجی از آگزوز وسایل نقلیه جریان دارد. پس محیط اطراف خیابان یک محیط یکدست سیال است و حوزه حل این فضا، حوزه حل سیال است. شایان ذکر است که به‌منظور شبیه‌سازی آلاینده‌های خروجی از آگزوز وسایل نقلیه، از مدل انتقال گونه‌های نرم‌افزار فلونت<sup>۱</sup> استفاده شده و فرض شده است که ذرات از صفحه‌ای بسیار باریک در راستای طول خیابان، به داخل محیط تزریق می‌شوند. برای شبیه‌سازی پراکندگی ذرات معلق، از مدل فاز گسسته<sup>۲</sup> استفاده می‌شود. همچنین علاوه بر ذرات آلاینده‌های خروجی از آگزوز خودروها، پدیده غبار-مه نیز به‌صورت یکنواخت با در نظر گرفتن ذرات غبار به‌صورت فاز جامد و رطوبت مشخص بر سیال پایه (هوا) بر محیط حل اعمال می‌شود.

در پژوهش حاضر، پدیده غبار-مه در دو حالت  $Kex=0$  و  $Kex=2.51 \cdot 10^{-3}/m$  بر میدان حل اعمال می‌شوند که این دو مقدار به ترتیب کمترین و بیشترین مقادیر ثبت‌شده ضریب تخریب روشنایی (Kex) در پدیده غبار-مه برای شهر کرج هستند [۴۷].

1. Species Transport
2. Discrete Phase Model (DPM)

جدول (۲): آلاینده‌های هوای کرج [۵۰ و ۵۱]

نوع آلاینده	CO	CO <sub>2</sub>	NO	SO <sub>2</sub>	Pb	HC
مقدار	٪۷۰	٪۱۰	٪۶	٪۲	٪۲	٪۱۰

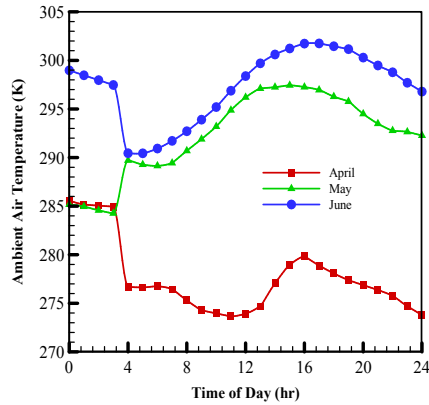


شکل (۲): تصویری از وقوع پدیده غبار- مه در شهر کرج

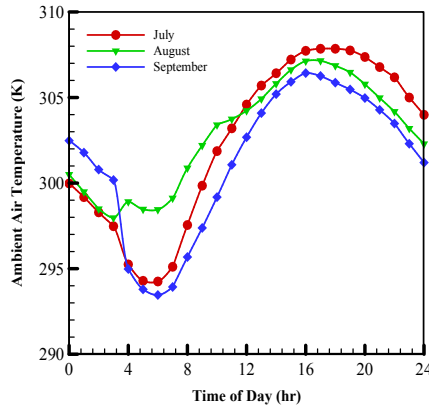
جدول (۳): مشخصات متغیرهای هندسی مدل‌های مورد بررسی

مدل	ارتفاع ساختمان شرقی	ارتفاع ساختمان غربی
W1.0:E1.0	1L	1L
W1.0:E1.5	1.5L	1L
W1.0:E2.0	2L	1L
W1.5:E1.0	1L	1.5L
W2.0:E1.0	1L	2L
W1.5:E1.5	1.5L	1.5L
W2.0:E2.0	2L	2L
W1.5:E2.0	2L	1.5L
W2.0:E1.5	1.5L	2L

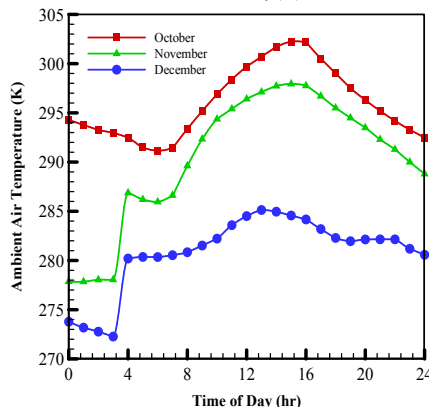
به منظور شبیه‌سازی انتقال حرارت و جریان پخش آلودگی هوا در دره‌های شهری و اعمال شرایط مرزی برای حل عددی مسئله، لازم است اطلاعات آب‌وهوایی منطقه مورد نظر موجود باشد. بدین منظور برای بررسی این پدیده در شهر کرج، اطلاعات هواشناسی میانگین ۱۰ ساله برای ایستگاه مهرآباد شامل دمای هوا، دمای مؤثر آسمان، سرعت باد و تشعشع خورشیدی کل و مستقیم در ساعات مختلف روز، از سازمان هواشناسی تهران بزرگ استخراج شده و شکل‌های (۳) تا (۶) به ترتیب توزیع دمای محیط، دمای مؤثر آسمان، تشعشع خورشیدی کل و مستقیم را در ساعات مختلف اولین روز هر ماه میلادی به تصویر می‌کشند. شایان ذکر است که برای بررسی عددی جریان هوا و پخش آلاینده‌ها درون خیابان در پژوهش پیش رو، اولین روز از اولین ماه میلادی در هر فصل شامل روز اول ماه ژانویه، روز اول ماه آوریل، روز اول ماه جولای و روز اول ماه اکتبر و در ساعات‌های ۱۰ صبح، ۱ ظهر، ۴ بعدازظهر و ۸ شب انتخاب شده‌اند.



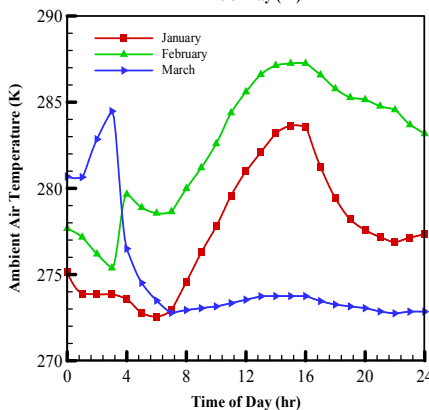
(الف)



(ب)



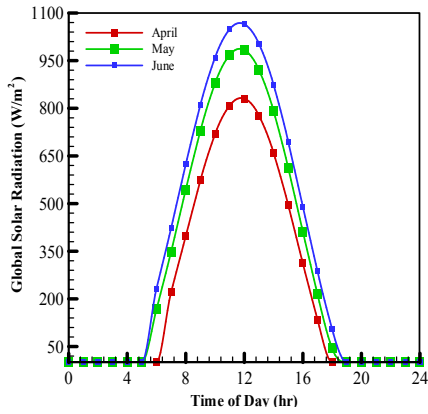
(ج)



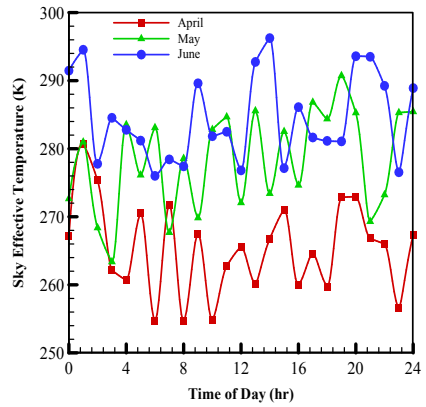
(د)

شکل (۳): توزیع ساعتی دمای هوای کرج در روز اول ماه‌های مختلف

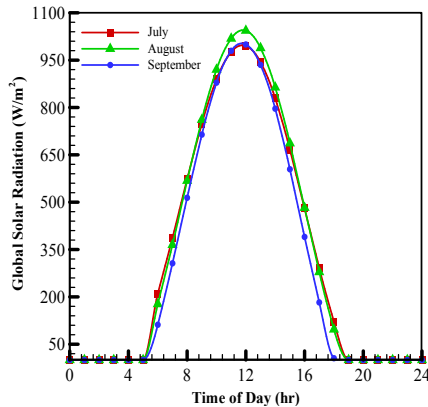
میلادی. (الف) بهار، (ب) تابستان، (ج) پاییز و (د) زمستان



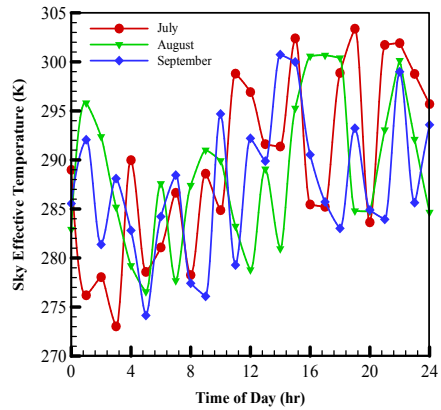
(الف)



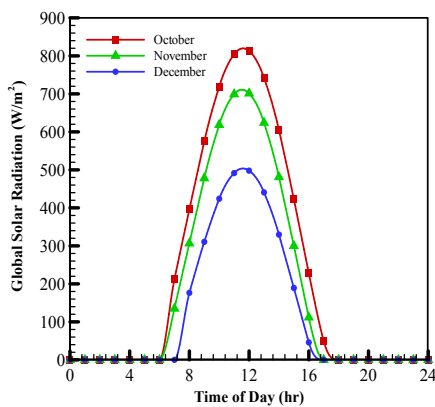
(الف)



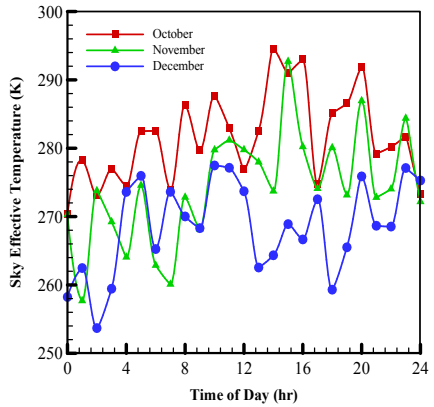
(ب)



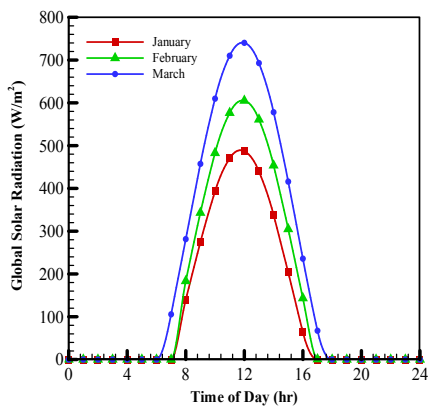
(ب)



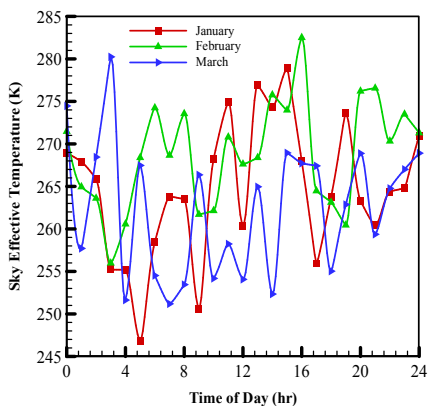
(ج)



(ج)



(د)



(د)

شکل (۵): توزیع ساعتی تشعشع خورشیدی کل در روز اول ماه‌های مختلف میلادی در کرج. (الف) بهار، (ب) تابستان، (ج) پاییز و (د) زمستان

شکل (۴): توزیع ساعتی دمای مؤثر آسمان در روز اول ماه‌های مختلف میلادی در کرج. (الف) بهار، (ب) تابستان، (ج) پاییز و (د) زمستان



همچنین جدول (۴) مقادیر متوسط سرعت باد را در روز اول هر فصل نشان داده است. در ورودی مسئله باد در دمای محیط وارد حوزه حل شده و در خروجی شرط فشار استاتیک نسبی برقرار است. دیواره پایینی خاک و دیواره‌های داخلی ساختمان در شرایط دمایی ثابت قرار داشته و دیواره‌های جانبی این دو قسمت، آدیاباتیک است. در این قسمت فرض شده که دمای خاک برابر با میانگین دمای هوای روزانه است. مقادیر دمای خاک و دمای دیواره‌های داخلی ساختمان در جدول (۴) ارائه شده است. همچنین میزان تشعشع مستقیم صادرشده از خورشید بر روی دیواره‌ها در ساعات مختلف روز، لحاظ شده و به این صورت است که در ساعت ۱۰ صبح تشعشع خورشیدی به دیواره پشت به باد، در ساعت ۱ ظهر به تمامی دیواره‌ها و در ساعت ۴ بعدازظهر به دیواره رو به باد برخورد کرده و در ساعت ۸ شب هیچ‌گونه تشعشعی از جانب خورشید وجود نخواهد داشت. برای حل و بررسی مدل ترکیبی میدان جریان و انتقال حرارت یک شبیه‌سازی عددی پایا از میدان جریان و حل بر مبنای فشار با استفاده از نرم‌افزار تجاری انسیس فلونت ۱۸/۲ در نظر گرفته شده است. مطابق توضیحات ارائه‌شده در بخش‌های قبل، برای مدل‌سازی اغتشاش از مدل دومعادله‌ای  $k-\epsilon$  (RNG) استفاده شده است. همچنین برای مدل‌سازی تابش از مدل قائم گسسته (DO) و برای شبیه‌سازی تشعشع خورشیدی ورودی روی دیواره‌ها، الگوریتم ترسیم اشعه خورشیدی<sup>۲</sup> انتخاب شده است. تمامی معادلات حاکم با استفاده از روش آپ‌ویند مرتبه دو منفصل شده است. ارتباط فشار-سرعت با استفاده از الگوریتم تکراری سیمپل و معیار همگرایی برای تمامی معادلات برابر با  $10^{-4}$  در نظر گرفته شده است.

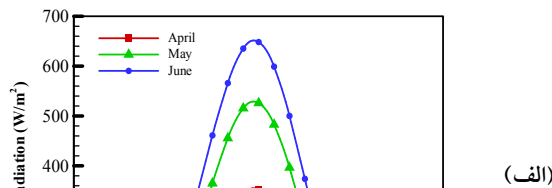
جدول (۴): مقادیر سرعت باد، دمای خاک و دمای دیواره‌های داخلی

[۵۲ و ۵۳] در فصول مختلف

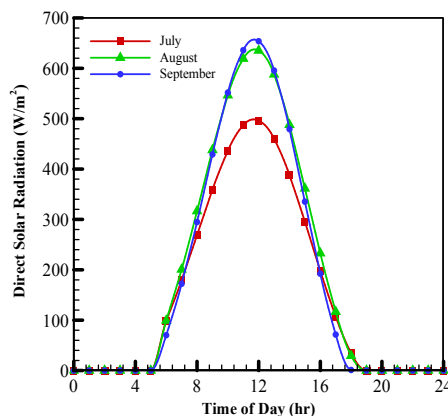
عنوان	بهار	تابستان	پاییز	زمستان
دمای دیواره‌های داخلی (K)	۲۹۷/۰۰	۲۹۹/۰۰	۲۹۶/۰۰	۲۹۳/۰۰
دمای خاک (K)	۲۷۷/۶۳	۳۰۲/۴۳	۲۹۵/۹۹	۲۷۷/۴۱
سرعت باد (m/s)	۵/۲۱	۶/۷۷	۸/۰۳	۷/۴۶

## ۲.۲. معادلات حاکم

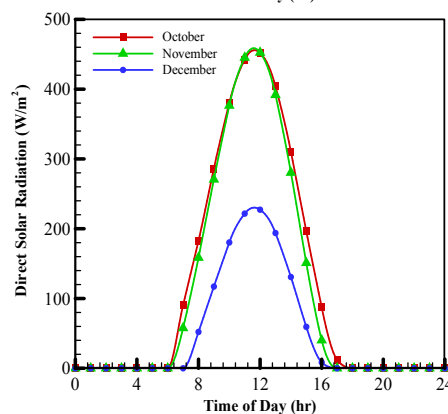
معادلات حاکم شامل معادله پیوستگی، مومنتوم و انرژی به ترتیب در روابط (۱) تا (۳) ارائه شده‌اند [۵۴]. همچنین روابط (۴) تا (۸) به منظور مدل‌سازی آشفستگی از مدل  $k-\epsilon$  استاندارد استفاده می‌شوند [۵۴-۶۵].



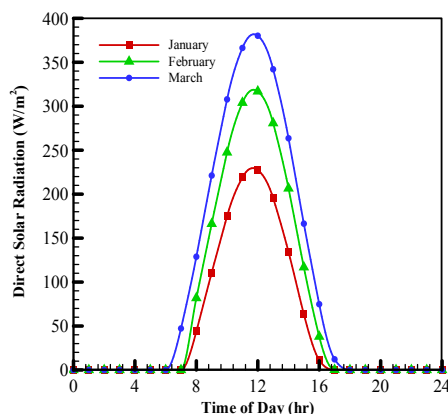
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل (۶): توزیع ساعتی تشعشع خورشیدی مستقیم در روز اول ماه‌های

مختلف میلادی در کرج. (الف) بهار، (ب) تابستان، (ج) پاییز و (د)

زمستان

1. Discrete Ordinates (DO)  
2. Solar Ray Tracing Algorithm

و برابر سرعت متناسب هر ماه در جدول (۴) در نظر گرفته می‌شود. همچنین دمای جریان هوای ورودی به میدان حل مطابق شکل (۳) انتخاب می‌شود. از سوی دیگر، دمای آسمان و همچنین میزان و جهت تشعشع دریافتی توسط دیواره‌های ساختمان و کف خیابان، بسته به روز سال و ساعت مورد بررسی (صبح، ظهر، بعد از ظهر و شب) از شکل‌های (۵) و (۶) انتخاب می‌شوند. همچنین با توجه به اینکه معادله هدایت حرارتی در ضخامت دیواره‌های ساختمان و ضخامت خیابان حل می‌شوند، دمای دیواره‌های داخلی ساختمان و کف خیابان نیز از جدول (۴) و خواص ترموفیزیکی آن‌ها از جدول (۱) انتخاب می‌شوند. توزیع دما در دیواره‌های جامد (دیواره‌های ساختمان‌ها و کف خیابان) مطابق معادله (۱۳) با استفاده از رابطه انتقال انرژی محاسبه می‌شود. در این رابطه،  $\rho$  چگالی جداره مورد نظر،  $h$  آنتالپی محسوس جداره،  $\kappa$  ضریب هدایت حرارتی جداره،  $T$  دمای جداره و  $S_h$  چشمه حرارتی داخل جداره است که در کار حاضر برابر صفر می‌باشد.

به منظور در نظر گرفتن تشعشع خورشیدی دریافتی توسط سطوح و در ادامه انتقال حرارت تشعشعی بین سطوح مختلف، سطح بالایی میدان حل (آسمان) و همچنین سطوح ورود و خروج جریان هوا به‌عنوان جسم شفاف با ضریب عبور ۱ در نظر گرفته می‌شوند. از سوی دیگر برای لحاظ کردن تشعشع خارجی سه سطح مذکور با توجه به اطلاعات شکل (۴) برای آن‌ها دمای مؤثر آسمان اعمال می‌شود. تشعشع خورشیدی روی سطوح مختلف با استفاده از قانون بوگوتز [۴۴] و مطابق رابطه (۱۴) اعمال می‌شود. در این رابطه، منظور از  $I_{\lambda,0}$  شدت نور در طول موج  $\lambda$  در ستون مورد نظر و در فاصله ارتفاع کل میدان حل است. فرض شده است که تمامی سطوح جامد دارای بازتاب تشعشعی هستند.

همچنین  $K_{ex}$  ضریب تخریب روشنایی در پدیده غبار-مه است. در حقیقت این ضریب با جذب و پخش نور در اثر پدیده غبار-مه رابطه مستقیم دارد. در کار حاضر، اثرات جذب و پخش تشعشعی ناشی از پدیده غبار-مه در تمامی میدان حل به صورت یکنواخت در نظر گرفته شده است. جرم هریک از ذرات جامد ناشی از آلاینده‌های آگروز خودروهای موجود در میدان حل برابر  $1 \cdot 10^{-20} \text{kg}$  با چگالی متوسط  $1.9 \cdot 10^{-24} \text{kg/m}^3$  در نظر گرفته شده است. همچنین ذرات جامد ناشی از پدیده غبار-مه ( $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{NO}_x$  و  $\text{SO}_2$ ) در پس‌زمینه میدان حل با چگالی متوسط  $4.6 \cdot 10^{-7} \text{kg/m}^3$  در نظر گرفته شده‌اند. برای شبیه‌سازی پراکندگی ذرات معلق از مدل فاز گسسته (DPM) استفاده می‌شود. معادلات حاکم بر میدان جریان ذرات جامد در روابط (۱۵) تا

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u_i' u_j'}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$

$$-\rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

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

$$\frac{\partial}{\partial x_i}[\rho k u_i] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}[\rho \varepsilon u_i] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k + C_{1\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

$$G_k = -\rho \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (8)$$

در روابط فوق،  $\rho$  چگالی،  $u$  سرعت در راستای مشخص و  $\mu$  ویسکوزیته دینامیکی سیال است. همچنین در رابطه‌های بالا  $C_\mu=0.09$ ،  $\text{Pr}=0.85$ ،  $\sigma_k=1.0$ ،  $C_{2\varepsilon}=1.44$ ،  $C_{1\varepsilon}=1.44$  ثابت‌های تجربی در معادله‌های انتقال آشفتگی انتخاب شده‌اند [۳]. چنان‌که در شکل (۱) نیز اشاره شد، برای شبیه‌سازی مرزهای جلویی و پشتی هندسه سه‌بعدی از شرط مرزی تقارن<sup>۱</sup>، برای سمت ورود جریان هوا از غرب شرط مرزی سرعت ورودی<sup>۲</sup>، برای سمت خروج هوا در شرق از شرط مرزی جریان خروجی<sup>۳</sup> و برای سایر دیواره‌های جامد میدان حل از شرط عدم لغزش استفاده شده است. جریان هوای محیطی شامل ریز ذرات (aerosol) و نه هوای خالص (air)، در راستای غرب به شرق وارد میدان حل می‌شود. پروفیل جریان ورودی به صورت لگاریتمی در روابط (۹) تا (۱۲) ارائه شده است.

$$\text{Re} = \frac{\rho V D}{\mu} u(z) = \frac{u_{ABL}^*}{\kappa} \ln \left( \frac{z+z_0}{z_0} \right) \quad (9)$$

$$k = \frac{u_{ABL}^{*2}}{\sqrt{C_\mu}} \quad (10)$$

$$\varepsilon = \frac{u_{ABL}^{*3}}{\kappa(z+z_0)} \quad (11)$$

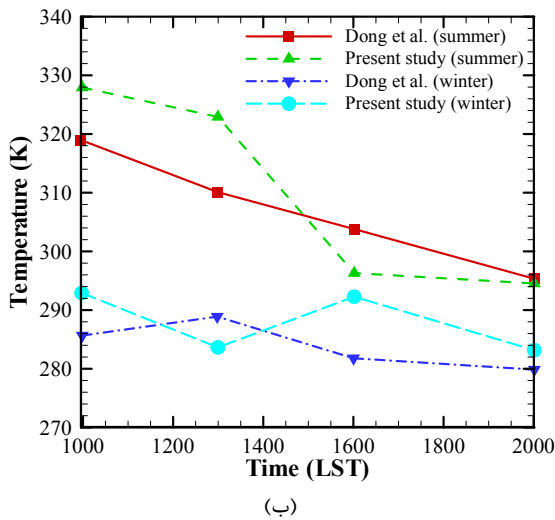
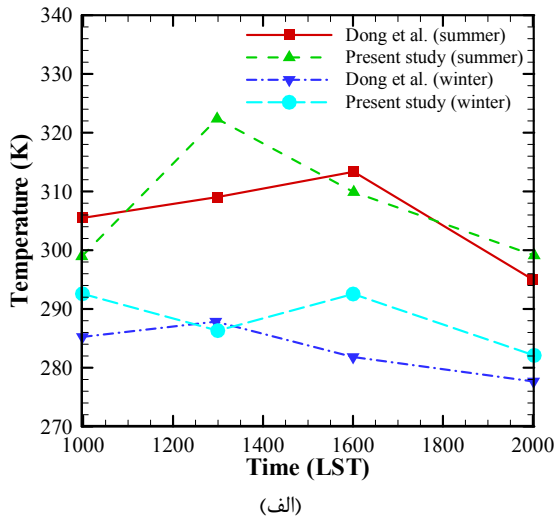
$$u_{ABL}^* = \kappa u_{10} \ln^{-1} \left( \frac{10+z_0}{z_0} \right) \quad (12)$$

در این روابط،  $z$  ارتفاع مدل‌سازی شدهٔ اتمسفر بالای خیابان،  $z_0=0.03\text{m}$  ارتفاع زیری آیرودینامیکی [۳]،  $u_{ABL}^*$  سرعت اصطکاکی لایهٔ مرزی اتمسفر (ABL)<sup>۴</sup> و  $\kappa=0.41$  ثابت فن کارمن است [۳]. همچنین  $U_{10}$  سرعت افقی مرجع در ارتفاع ۱۰ متری سطح زمین است

1. Symmetry
2. Velocity Inlet
3. Outlet Flow
4. Atmospheric Boundary Layer



باد<sup>۲</sup> برای چهار دوره زمانی در یک روز شامل صبح، ظهر، بعد از ظهر و شب در فصول تابستان و زمستان، انطباق خوب جوابها مشاهده شد.



شکل (۷): نتایج مربوط به اعتبارسنجی دمای دیواره‌ها: (الف) دیواره رو به باد و (ب) دیواره پشت به باد

علت تشکیل گردابه پادساعتگرد در نزدیکی دیواره پشت به باد آن است که جریان هوا به کمک باد از چپ به راست در حرکت است و به محض رسیدن جریان باد به فضای بین خیابان و ساختمان، هوا وارد این میدان می‌شود. اما حرکت آلاینده از کف خیابان، این حرکت را محدود کرده؛ به گونه‌ای که سیال در مجاورت حرکت رو به بالای آلاینده، به سمت بالا رانده شده و از آنجایی که جریان تراکم‌ناپذیر است، باید سیال جای خالی هوا را پر کند و لذا سیال مجاور دیواره به سمت پایین حرکت می‌کند. در سمت مقابل نیز همین اتفاق رخ داده و سیال در مجاورت آلاینده‌ها به سمت بالا حرکت کرده و در مجاورت دیواره رو به باد به سمت پایین حرکت می‌نماید که این امر موجب ایجاد یک چرخه ساعتگرد در نزدیکی این دیواره می‌شود. از طرف دیگر در

(۱۷) ارائه شده است. در این روابط،  $F_x$  نیروی جرم ذرات و  $F_D(u-u_p)$  نیروی پسا (درگ) بر واحد جرم هر ذره است. همچنین  $u$  سرعت فاز سیال و  $u_p$  سرعت ذرات آلاینده یا غبار (فاز جامد) در میدان حل است. از سوی دیگر،  $\mu$  ویسکوزیته دینامیکی فاز سیال،  $\rho$  چگالی فاز سیال،  $\rho_p$  چگالی ذرات جامد و  $d_p$  قطر ذرات جامد است [۵۵].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot (\vec{v} \rho h) = \nabla \cdot (\kappa \cdot \nabla T) + S_h \quad (13)$$

$$\frac{I_\lambda}{I_{\lambda,0}} = e^{-K_{\alpha,\lambda} L} \quad (14)$$

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} g_x + F_x \quad (15)$$

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \cdot \frac{C_D \text{Re}}{24} \quad (16)$$

$$\text{Re} = \frac{\rho_p D_p |u_p - u|}{\mu} \quad (17)$$

### ۳.۲. اعتبارسنجی

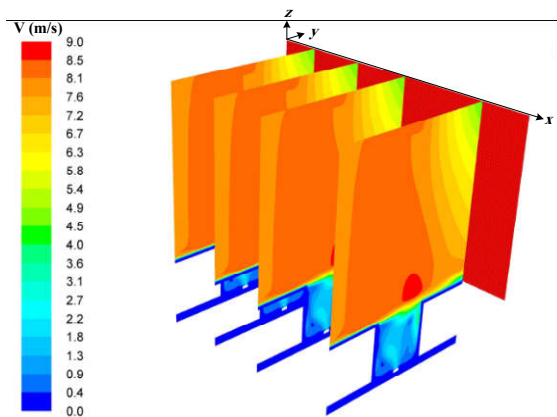
شبکه تولیدشده به صورت سه‌بعدی است. شبکه از ۸۹۳۶۵۱ سلول تشکیل شده است. تمرکز شبکه بیشتر در بخش‌هایی بود که در آنجا انتظار پدیده‌های معنادار می‌رفت. به منظور مشاهده بهتر تغییرات متغیرهای جریان در نزدیکی دیواره‌ها از شبکه‌بندی لایه مرزی با تراکم مناسب استفاده شده است. به منظور یافتن تعداد المان مناسبی که منجر به استقلال حل از شبکه شود، دما روی دیواره پشت به باد در صبح تابستان برای هندسه با تعداد المان مختلف به دست آمده و در جدول (۵) ارائه شده است. مطابق شکل (۷)، درصد خطا برای تمامی موارد کوچک‌تر مساوی با ۵٪ است.

جدول (۵): نتایج استقلال حل شبکه

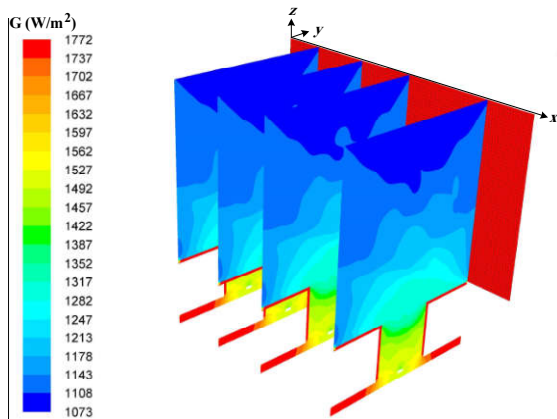
ردیف	تعداد المان	دمای دیواره پشت به باد (K)	خطا (%)
۱	۶۹۹۲۱	۳۰۴/۱۳	۸/۶۶۶
۲	۱۸۵۴۶۲	۳۰۶/۰۱	۵/۹۸۵
۳	۴۲۱۳۱۲	۳۰۷/۱۹	۱/۳۵۲
۴	۸۹۳۶۵۱	۳۰۸/۴۱	۰/۰۳۳
۵	۱۰۲۰۸۴۱	۳۰۸/۴۱	-

با توجه به تغییرات دما مشاهده می‌شود که هندسه با تعداد المان ۸۹۳۶۵۱ مناسب است. اعتبارسنجی پروژه حاضر بر اساس هندسه و شرایط مرزی تحقیق دانگ و همکاران [۴۹] انجام شده است. آن‌ها به صورت عددی و با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت، اثرات تغییر فصلی روی جریان هوا و انتشار آلاینده‌ها در دره‌های شهری در کلان‌شهر پکن در کشور چین را مورد بررسی قرار دارند. مطابق شکل (۶) و با مقایسه نتایج کار حاضر و مرجع [۴۹] در مورد دمای دیواره‌های پشت به باد<sup>۱</sup> و رو به

تحلیلی مشابه، نبود انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی که تقریباً در تمامی کانتورهای ارائه‌شده در شکل (۸) مشاهده می‌شود، توجیه‌پذیر است. از طرفی در ماه ژانویه به دلیل آنکه سرعت باد نسبت به سرعت انتشار آلاینده‌ها در تمامی ساعت‌ها (به‌جز ساعت ۱۳) ناچیز است، مشاهده می‌شود که جریان سیال عمدتاً ناشی از حرکت ذرات آلاینده می‌باشد. همچنین توزیع دما برای ساعت‌های ۱۶ و ۲۰ از ماه‌های جولای و اکتبر نشان می‌دهد که دمای دیواره‌های پشت به باد و رو به باد و کف خیابان در مقایسه با جریان سیال بالای ساختمان‌ها پایین‌تر بوده و انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی بین سیال در مجاورت این سه دیواره و لایه‌های سیال در بالای ساختمان اتفاق نخواهد افتاد. در شکل (۹)، بردارهای سرعت جریان (در حوزه حل سیال) در ساعت‌های مختلف روز و برای روز اول ماه آوریل، به تصویر کشیده شده است. آنچه از مشاهده بردارهای سرعت مشخص است، آن است که در تمامی ساعت‌های شبانه‌روز با توجه به شرایط مرزی اعمال‌شده، آلودگی ناشی از تردد وسایل نقلیه داخل خیابان از قسمت کف به سمت بالا حرکت می‌کند. از طرف دیگر، جریان باد که از بالای ساختمان‌ها در حرکت است، بر روی حرکت ذرات آلاینده و نحوه انتشار آن اثر می‌گذارد؛ به‌گونه‌ای که در فضای بین خیابان و ساختمان‌ها دو گردابه تشکیل می‌شود.



کانتور سرعت جریان سیال در فضای بین دو ساختمان



کانتور تشعشع دریافتی خورشیدی توسط سطوح و ذرات معلق

شکل (۸-الف): کانتورهای سه‌بعدی

ساعت‌های مختلف مقدار سرعت باد متفاوت است. چنانچه مشاهده می‌شود در ماه آوریل سرعت باد به قدری زیاد است که میزان کمی از آلاینده‌هایی که از کف خیابان بالا آمده است از فضای بین خیابان و ساختمان خارج می‌شود.

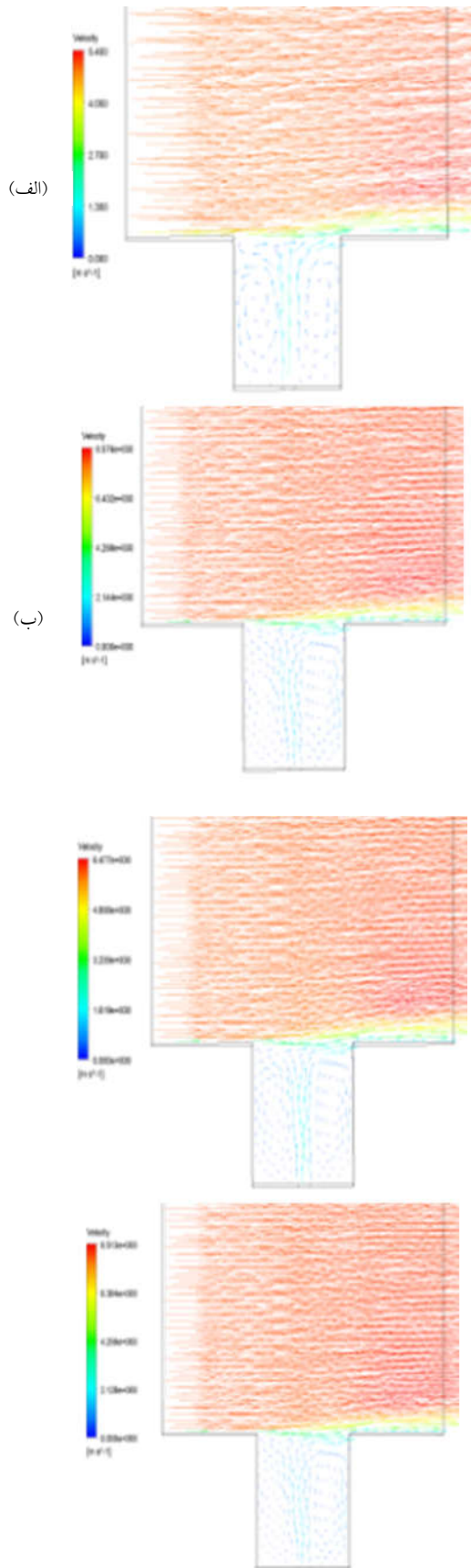
همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، از عوامل مهم آلودگی هوای شهر کرج پدیده وارونگی دمایی است. طبق آماری که در طول ۵ سال از ایستگاه مهرآباد کرج گرفته شده است [۵۰]، میانگین مدت زمان وارونگی دما ۲۳۹ روز بوده که در بهار، ۵۷ روز، در تابستان و زمستان حدود ۶۱ روز و در پاییز، ۵۸ روز می‌باشد. علاوه بر این، عوامل ایجاد وارونگی دمایی که باعث بالارفتن غلظت آلاینده‌ها در محیط شده و آلودگی هوا را در پی دارد، شامل مواردی از قبیل سرعت باد، هوای سرد لایه‌های بالایی هوای جو و دریافت تشعشع جزئی حرارت زمین و همچنین عدم وجود انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی در محیط می‌باشد. لذا در این مرحله با توجه به انتشار آلاینده‌ها، بروز یا عدم بروز پدیده وارونگی دمایی با توجه به عوامل ایجاد آن، بررسی شده است.

### ۳. نتایج و بحث

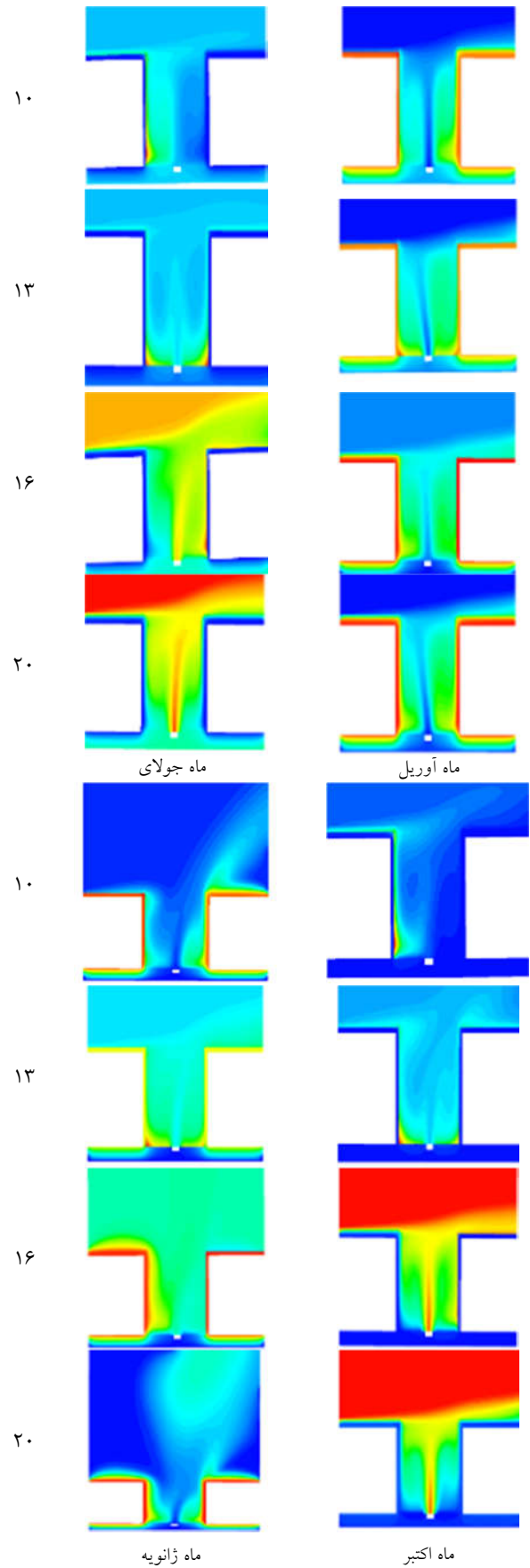
#### ۳.۱. ساختمان‌های متقابل با ارتفاع یکسان

شکل (۸-الف) کانتورهای سه‌بعدی برای سرعت جریان سیال در فضای بین دو ساختمان و همچنین تشعشع دریافتی خورشیدی توسط سطوح و ذرات معلق را نشان می‌دهد. اما در ادامه برای سهولت ارائه نتایج تنها از کانتور میانی خیابان استفاده می‌شود.

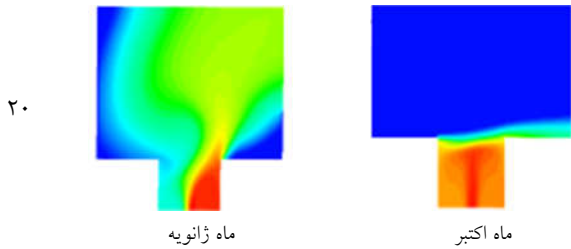
به‌منظور تحلیل نتایج این قسمت، کانتورهای دما برای بررسی نحوه انتقال حرارت در سیال داخل خیابان و دیواره‌های جامد در ساعت‌های مختلف و در روز اول از ماه‌های آوریل، جولای، اکتبر و ژانویه در صفحه‌ای فرضی در وسط خیابان و عمود بر راستای آن، در شکل (۸-ب) ارائه شده است. به‌منظور بررسی کانتورهای دما باید توجه داشت که حرکت جریان تحت تأثیر انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی (به‌میزان ناچیز)، حرکت آلاینده‌ها و سرعت باد است. در ماه آوریل و در تمامی ساعت‌ها به دلیل تشعشع دریافتی از خورشید (به‌جز ساعت ۲۰)، دمای یک دیواره (خواه دیواره پشت به باد، رو به باد و یا کف خیابان) از دمای دو دیواره دیگر بیشتر بوده و انتظار می‌رود که در اثر جابه‌جایی طبیعی، سیال در مجاورت دیواره گرم‌تر به دلیل چگالی کمتر به سمت بالا حرکت کند. اما آنچه مشاهده می‌شود، مغایر با انتظارات از رفتار سیال است. دلیل این امر را می‌توان به ضعیف بودن جابه‌جایی طبیعی در برابر جابه‌جایی اجباری (سرعت ذرات آلاینده و سرعت بسیار زیاد باد) نسبت داد که باعث می‌شود حرکت جریان تحت تأثیر سرعت این پارامترها باشد. در نتیجه با



شکل (۹): بردارهای سرعت برای روز اول ماه آوریل در ساعت‌های (الف) ۱۰، (ب) ۱۳، (ج) ۱۶ و (د) ۲۰ همان طور که از شکل (۱۰) مشخص است و پیش‌تر نیز مورد



شکل (۸-ب): کانتورهای دما در ساعت‌های مختلف و برای روز اول از ماه‌های آوریل، جولای، اکتبر و ژانویه



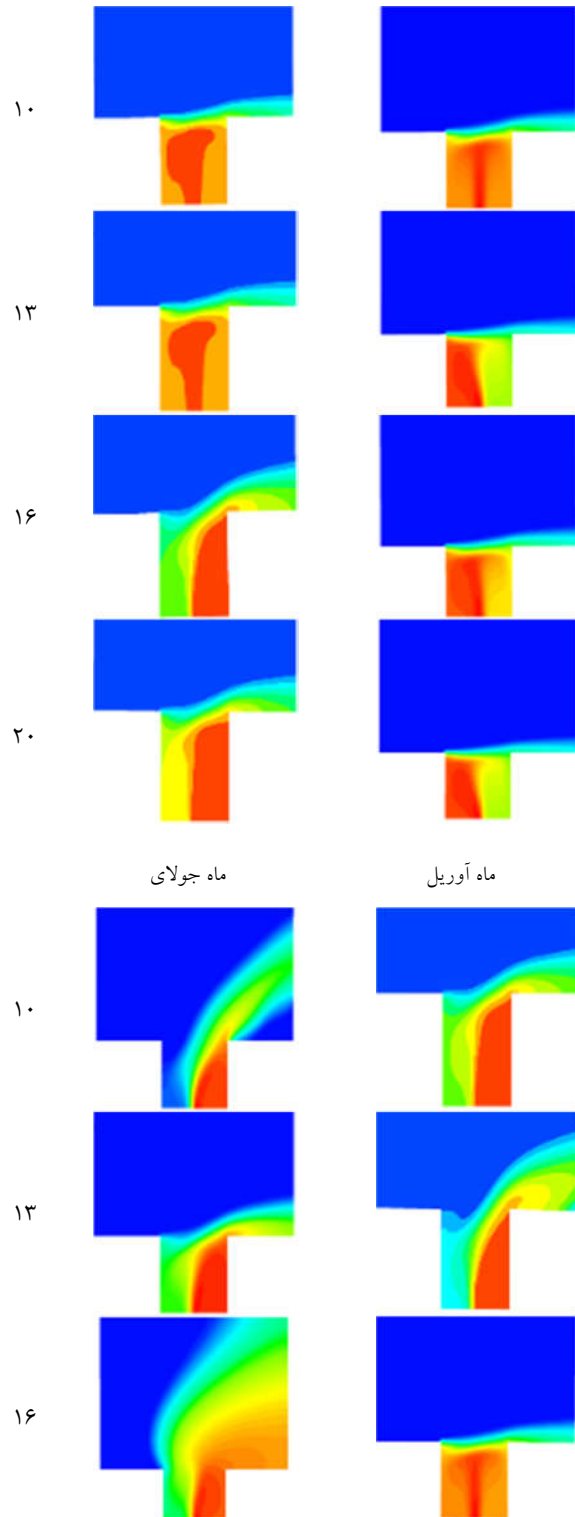
شکل (۱۰): نحوه انتشار آلاینده‌ها در فضا در ساعات مختلف و برای روز اول از ماه‌های آوریل، جولای، اکتبر و ژانویه

### ۲.۳. ساختمان‌های متقابل با ارتفاع متفاوت

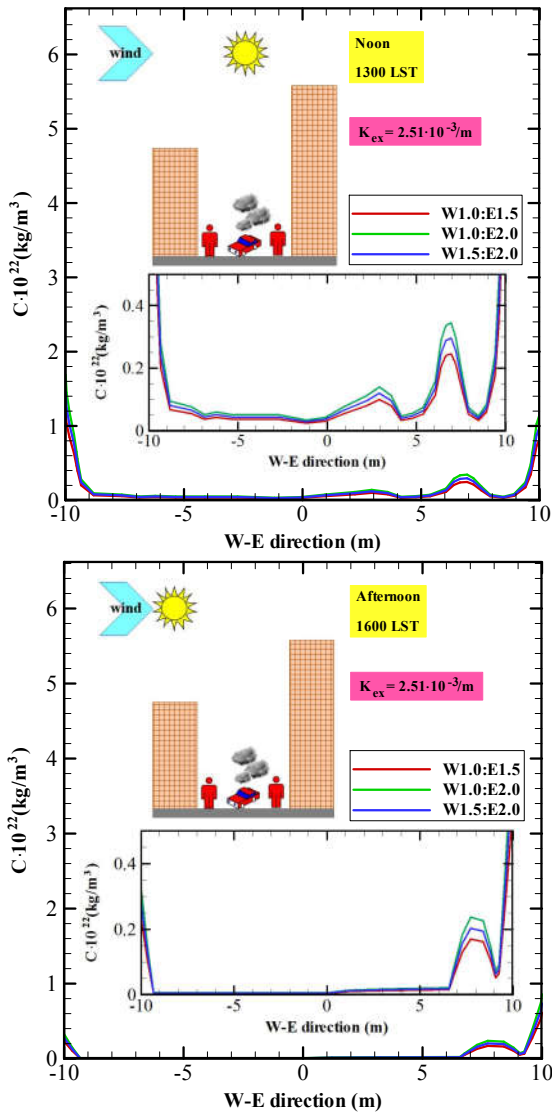
تأمین شرایط مطلوب در سطح میکرواقليمی عابران پیاده<sup>۱</sup> (PLMC) در دره‌های شهری از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی طراحان شهری است. از این رو در این قسمت، تأثیر وقوع پدیده غبار-مه و همچنین وارونگی دمایی احتمالی بر غلظت آلاینده‌ها در ارتفاع اشغال‌شده توسط عابران پیاده مورد مطالعه قرار می‌گیرد. شکل (۱۱) تغییرات غلظت آلاینده‌ها برای ارتفاع‌های متفاوت ساختمان‌های متقابل در ارتفاع اشغال‌شده توسط عابران پیاده در شرایط صبحگاهی وقوع پدیده غبار-مه در صفحه مرکزی میدان سه‌بعدی حل را نشان می‌دهد. چنان‌که مشاهده می‌شود در شرایطی که ارتفاع ساختمان پشت به باد کمتر از ساختمان متقابل (گروه  $W < E$ ) خود باشد، سالم‌ترین شرایط اتفاق می‌افتد و بدترین شرایط در مورد دره‌هایی است که در آن‌ها ارتفاع ساختمان‌های پشت به باد بیشتر از آن ساختمان متقابل خود باشد (گروه  $W > E$ ). مشاهده می‌شود که در این حالت ساختمان‌های گروه  $W < E$  تا ۴۷٪ غلظت آلاینده‌ها کمتری نسبت به ساختمان‌های گروه  $W > E$  دارند. از سوی دیگر در شکل (۱۱) برای هر حالت قرارگیری ساختمان‌ها سه دسته ارتفاعی مختلف نیز بررسی شده است. برای مثال برای گروه ساختمان‌های  $W < E$  مدل کمترین غلظت آلاینده‌ها در سطح PLMC را در مقایسه با دیگر مدل‌ها دارد. به عبارت بهتر از این نمودار این مهم به دست می‌آید که دره‌هایی که در آن‌ها ساختمان پشت به باد کوتاه‌تر است و در کل ارتفاع هر دو ساختمان متقابل نسبت به عرض و طول خیابان کم است و تفاوت ارتفاعی دو ساختمان هم زیاد نیست، کمترین غلظت آلاینده‌ها را در سطح PLMC دارا هستند. شکل (۱۲) تغییرات غلظت آلاینده‌ها برای گروه  $W < E$  در سطح PLMC در شرایط وقوع ظهرگاهی و عصرگاهی پدیده غبار-مه نشان می‌دهد.

شایان ذکر است که پروفیل سرعت و دمای جریان باد برای تمامی حالت‌های شبیه‌سازی شده گروه  $W > E$  در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) یکسان است. در این شکل‌ها مشاهده می‌شود که برای تمامی ساعات روز

بحث قرار گرفت، به دلیل هندسه خاص این نوع خیابان‌ها، در حالتی که سرعت باد ورودی در بالای دیواره پشت به باد بیشتر از سرعت ذرات آلاینده‌ها باشد، عمدتاً آلاینده‌ها در فضای بین دو دیواره ساختمان منتشر شده و درصد ناچیزی از آن به جو منتقل می‌شود. این حالت در اکثر کانتورهای غلظت آلاینده، قابل مشاهده است.



(د)



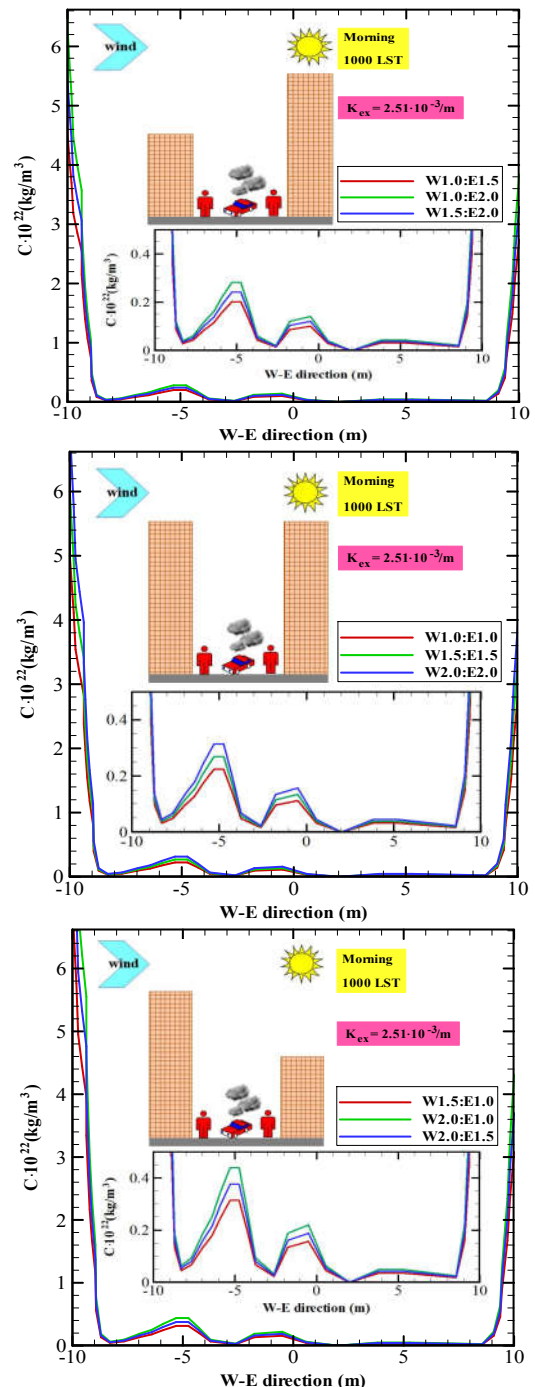
شکل (۱۲): تغییرات غلظت آلاینده‌گی‌ها برای مدل‌های بهینه در ارتفاع اشغال‌شده توسط عابرین پیاده در شرایط وقوع ظهرگاهی و عصرگاهی پدیده غبار- مه در صفحه مرکزی میدان سه‌بعدی حل

#### ۴. نتیجه گیری

در این قسمت، خلاصه نتایج مربوط به کار حاضر ارائه شده است:

- روند تغییرات دمای کف خیابان در ماه‌های مختلف یکسان و بیشینه مقدار آن همواره در ساعت ۱۳ اتفاق می‌افتد.
- در تمامی ساعت‌ها و ماه‌های مورد بررسی در کار حاضر، انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی برای جریان سیال در برابر جابه‌جایی اجباری ناچیز بوده و عمده حرکت جریان سیال و آلاینده‌ها به‌واسطه سرعت باد در ورودی و سرعت پخش آلاینده‌هاست.
- جریان باد گذرنده از بالای ساختمان‌ها بر حرکت ذرات آلاینده و نحوه انتشار آن‌ها اثرگذار است و در فضای دره شهری دو گردابه تشکیل می‌دهد. یک گردابه به‌صورت ساعتگرد در نزدیکی دیواره رو

دره‌های W1.0:E1.5 کمترین غلظت آلاینده‌گی‌ها را در سطح PLMC به ترتیب نسبت به دره‌های W1.5:E2.0 و W1.0:E2.0 دارند. همچنین مشاهده می‌شود که با تغییر زمان روز از صبح به عصر، تمرکز غلظت آلاینده‌گی‌ها از سمت دیوار پشت به باد به طرف مقابل تغییر می‌کند؛ دلیل این امر می‌تواند افزایش دمای دیواره پشت به باد بر اثر جذب تشعشع خورشیدی در ساعات ابتدایی و میانی روز باشد که باعث افزایش قدرت انتقال حرارت جابه‌جایی در سمت دیواره پشت به باد می‌شود.



شکل (۱۱): تغییرات غلظت آلاینده‌گی‌ها برای ارتفاع‌های متفاوت ساختمان‌های متقابل در ارتفاع اشغال‌شده توسط عابران پیاده در شرایط صبحگاهی وقوع پدیده غبار- مه در صفحه مرکزی میدان سه‌بعدی حل



آلاینده‌گی را در سطح PLMC دارا هستند.

- با تغییر زمان روز از صبح به عصر، تمرکز غلظت آلاینده‌گی‌ها از سمت دیوار پشت به باد به طرف مقابل تغییر می‌کند.
- امروزه مصرف بالای انرژی در شهرها تبعات زیست‌محیطی زیادی داشته است؛ از جمله موارد مرتبط با آلودگی هوای شهرها، رشد مصرف روزافزون انرژی ضرورت طراحی خیابان‌ها را به گونه‌ای که مشکلات آلودگی هوای کمتری به همراه داشته باشند، فراهم کرده است.

به باد و دیگری پادساعتگرد در نزدیکی دیواره پشت به باد.

- در شرایطی که ارتفاع ساختمان پشت به باد کمتر از ساختمان متقابل خود باشد، سالم‌ترین شرایط اتفاق می‌افتد و بدترین شرایط در مورد دره‌هایی است که در آن‌ها ارتفاع ساختمان‌های پشت به باد بیشتر از ارتفاع ساختمان متقابل خود باشد.
- دره‌هایی که در آن‌ها ساختمان پشت به باد کوتاه‌تر است و در کل ارتفاع هر دو ساختمان متقابل نسبت به عرض و طول خیابان کم است و تفاوت ارتفاعی دو ساختمان هم زیاد نیست، کمترین غلظت

## مراجع

- [1] Molina, M.J. and Molina, L.T., "Megacities and atmospheric pollution", Journal of the Air & Waste Management Association, Vol. 54, pp. 644-680, 2004.
- [2] Park, S.-J., Choi, W., Kim, J.-J., Kim, M.J., Park, R.J., Han, K.-S. and Kang, G., "Effects of building-roof cooling on the flow and dispersion of reactive pollutants in an idealized urban street canyon", Building and Environment, Vol. 109, pp. 175-189, 2016.
- [3] Giannopoulou, K., Santamouris, M., Livada, I., Georgakis, C. and Caouris, Y., "The impact of canyon geometry on intra urban and urban: suburban night temperature differences under warm weather conditions", Pure and Applied Geophysics, Vol. 167, pp. 1433-1449, 2010.
- [4] Yola, L. and Siong, H.C., "Solar radiation and urban wind effect on urban canyon in hot, humid regions", Environment-Behavior-Proceedings Journal, Vol. 1, pp. 220-229, 2016.
- [5] Fernando, H.J., Handbook of Environmental Fluid Dynamics, Volume Two: Systems, Pollution, Modeling, and Measurements. CRC press, 2012.
- [6] Hu, L., Huo, R. and Yang, D., "Large eddy simulation of fire-induced buoyancy driven plume dispersion in an urban street canyon under peculiar wind flow", Journal of Hazardous Materials, Vol. 166, pp. 394-406, 2009.
- [7] Vardoulakis, S., Fisher, B.E., Pericleous, K., Gonzalez-Flesca, N., "Modelling air quality in street canyons": a review, Atmospheric Environment, Vol. 37, pp. 155-182, 2003.
- [8] Green, N., Etheridge, D. and Riffat, S., "Location of air intakes to avoid contamination of indoor air: a wind tunnel investigation", Building and Environment, Vol. 36, pp. 1-14, 2001.
- [9] Bottillo, S., Vollaro, A.D.L., Galli, G. and Vallati, A., "Fluid dynamic and heat transfer parameters in an urban canyon", Solar Energy, Vol. 99, pp. 1-10, 2014.
- [10] Lien, F., Yee, E. and Cheng, Y., "Simulation of mean flow and turbulence over a 2D building array using high-resolution CFD and a distributed drag force approach", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 92, pp. 117-158, 2004.
- [11] Solecki, W.D., Rosenzweig, C., Parshall, L., Pope, G., Clark, M., Cox, J. and Wiencke, M., "Mitigation of the heat island effect in urban New Jersey", Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards, Vol. 6, pp. 39-49, 2005.
- [12] Klinenberg, E., Heat wave: A social autopsy of disaster in Chicago. University of Chicago Press, 2015.
- [13] Van Wijngaarden, W. and Mouraviev, A., "Seasonal and annual trends in Australian minimum/maximum daily temperatures", The Open Atmospheric Science Journal, Vol. 10, 2016.
- [14] Chen, F., Kusaka, H., Bornstein, R., Ching, J., Grimmond, C., Grossman-Clarke, S., Loridan, T., Manning, K.W., Martilli, A. and Miao, S., "The integrated WRF/urban modelling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems", International Journal of Climatology, Vol. 31, pp. 273-288, 2011.
- [15] Gago, E.J., Roldan, J., Pacheco-Torres, R. and Ordóñez, J., "The city and urban heat islands: A review of strategies to mitigate adverse effects", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 25, pp. 749-758, 2013.
- [16] Addepalli, B. and Pardyjak, E.R., "Investigation of the flow structure in step-up street canyons": mean flow and turbulence statistics. Boundary layer meteorology, Vol. 148, pp. 133-155, 2013.
- [17] Pirjola, L., Lähde, T., Niemi, J., Kousa, A., Rönkkö, T., Karjalainen, P., Keskinen, J., Frey, A. and Hillamo, R., "Spatial and temporal characterization of traffic emissions in urban microenvironments with a mobile laboratory", Atmospheric Environment, Vol. 63, pp. 156-167, 2012.
- [18] Krzyzanowski, M. and Cohen, A., "Update of WHO air quality guidelines", Air Quality, Atmosphere & Health, Vol. 1, pp. 7-13, 2008.
- [19] Oke, T.R., Boundary layer climates. Routledge, 2002.
- [20] Masson, V., Grimmond, C.S.B. and Oke, T.R., "Evaluation of the Town Energy Balance (TEB) scheme with direct measurements from dry districts in two cities", Journal of Applied Meteorology, Vol. 41, pp. 1011-1026, 2002.
- [21] Louka, P., Vachon, G., Sini, J.-F., Mestayer, P. and Rosant, J.-M., "Thermal effects on the airflow in a street canyon-Nantes' 99 experimental results and model simulations", Water, Air and Soil Pollution: Focus, Vol. 2, pp. 351-364, 2002.
- [22] Harman, I.N., Best, M.J. and Belcher, S.E., "Radiative exchange in an urban street canyon", Boundary Layer Meteorology, Vol. 110, pp. 301-316, 2004.
- [23] Salmond, J., Oke, T.R., Grimmond, C., Roberts, S. and Offerle, B., "Venting of heat and carbon dioxide from urban canyons at night", Journal of Applied Meteorology, Vol. 44, pp. 1180-1194, 2005.
- [24] Offerle, B., Grimmond, C.S.B., Fortuniak, K., Klysiak, K. and Oke, T.R., "Temporal variations in heat fluxes over a



- central European city centre", Theoretical and Applied Climatology, Vol. 84, pp. 103-115, 2006.
- [25] Sini, J.-F., Anquetin, S. and Mestayer, P.G., "Pollutant dispersion and thermal effects in urban street canyons", Atmospheric Environment, Vol. 30, pp. 2659-2677, 1996.
- [26] Li, X.-X., Britter, R.E., Norford, L.K., Koh, T.-Y. and Entekhabi, D., "Flow and pollutant transport in urban street canyons of different aspect ratios with ground heating: large-eddy simulation", Boundary Layer Meteorology, Vol. 142, pp. 289-304, 2012.
- [27] Offerle, B., Eliasson, I., Grimmond, C. and Holmer, B., "Surface heating in relation to air temperature, wind and turbulence in an urban street canyon", Boundary Layer Meteorology, Vol. 122, pp. 273-292, 2007.
- [28] Nakamura, Y., Oke, T.R. and Wind, "Temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon", Atmospheric Environment, Vol. 22, pp. 2691-2700, 1988.
- [29] Allegrini, J., Dorer, V. and Carmeliet, J., "Analysis of convective heat transfer at building façades in street canyons and its influence on the predictions of space cooling demand in buildings", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 104, pp. 464-473, 2012.
- [30] Kovar-Panskus, A., Moulinneuf, L., Savory, E., Abdelqari, A., Sini, J.-F., Rosant, J.-M., Robins, A. and Toy, N., "A wind tunnel investigation of the influence of solar-induced wall-heating on the flow regime within a simulated urban street canyon", Water, Air, & Soil Pollution: Focus, Vol. 2, pp. 555-571, 2002.
- [31] Di Sabatino, S., Buccolieri, R., Pulvirenti, B. and Britter, R., "Flow and pollutant dispersion in street canyons using FLUENT and ADMS-Urban", Environmental Modeling & Assessment, Vol. 13, pp. 369-381, 2008.
- [32] Nazarian, N. and Kleissl, J., "Realistic solar heating in urban areas: air exchange and street-canyon ventilation", Building and Environment, Vol. 95, pp. 75-93, 2016.
- [33] Lavanya, G., "Air Quality Modeling of Santhepet Street Canyon of Mysore City Using FLUENT", International Journal of Science and Engineering Applications, Vol. 2, pp. 191-196, 2013.
- [34] Longley, I., Gallagher, M., Dorsey, J., Flynn, M., Allan, J., Alfara, M. and Inglis, D., "A case study of aerosol ( $4.6 \text{ nm} < D_p < 10 \mu\text{m}$ ) number and mass size distribution measurements in a busy street canyon in Manchester, UK", Atmospheric Environment, Vol. 37, pp. 1563-1571, 2003.
- [35] De Lieto Vollaro, A., De Simone, G., Romagnoli, R., Vallati, A. and Botillo, S., "Numerical study of urban canyon microclimate related to geometrical parameters", Sustainability, Vol. 6, pp. 7894-7905, 2014.
- [36] Solazzo, E. and Britter, R., "Transfer processes in a simulated urban street canyon", Boundary Layer Meteorology, Vol. 124, pp. 43-60, 2007.
- [37] Saneinejad, S., Moonen, P., Defraeye, T. and Carmeliet, J., "Analysis of convective heat and mass transfer at the vertical walls of a street canyon", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 99, pp. 424-433, 2011.
- [38] Gromke, C., Buccolieri, R., Di Sabatino, S. and Ruck, B., "Dispersion study in a street canyon with tree planting by means of wind tunnel and numerical investigations: evaluation of CFD data with experimental data", Atmospheric Environment, Vol. 42, pp. 8640-8650, 2008.
- [39] Uehara, K., Murakami, S., Oikawa, S. and Wakamatsu, S., "Wind tunnel experiments on how thermal stratification affects flow in and above urban street canyons", Atmospheric Environment, Vol. 34, pp. 1553-1562, 2000.
- [40] Li, X.-X., Leung, D.Y., Liu, C.-H. and Lam, K., "Physical modeling of flow field inside urban street canyons", Journal of Applied Meteorology and Climatology, Vol. 47, pp. 2058-2067, 2008.
- [41] Assimakopoulos, V., Georgakis, C. and Santamouris, M., "Experimental validation of a computational fluid dynamics code to predict the wind speed in street canyons for passive cooling purposes", Solar Energy, Vol. 80, pp. 423-434, 2006.
- [42] Li, L., Yang, L., Zhang, L.-J. and Jiang, Y., "Numerical study on the impact of ground heating and ambient wind speed on flow fields in street canyons", Advances in Atmospheric Sciences, Vol. 29, pp. 1227-1237, 2012.
- [43] Carpentieri, M., Robins, A.G. and Baldi, S., "Three-dimensional mapping of air flow at an urban canyon intersection", Boundary Layer Meteorology, Vol. 133, pp. 277-296, 2009.
- [44] Ye, S.-H., Zhou, W., Song, J., Peng, B.-C., Yuan, D., Lu, Y.-M. and Qi, P.-P., "Toxicity and health effects of vehicle emissions in Shanghai", Atmospheric Environment, Vol. 34, pp. 419-429, 2000.
- [45] Kim, J.-J. and Baik, J.-J., "A numerical study of thermal effects on flow and pollutant dispersion in urban street canyons", Journal of Applied Meteorology, Vol. 38, pp. 1249-1261, 1999.
- [46] Etminan-Farooji, V., Ebrahimnia-Bajestan, E., Niazmand, H. and Wongwises, S., "Unconfined laminar nanofluid flow and heat transfer around a square cylinder", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 55, pp. 1475-85, 2012.
- [47] Dousset, V. and Pothérat, A., "Numerical simulations of a cylinder wake under a strong axial magnetic field", Journal of Physics Fluids, Vol. 20, pp. 017104, 2008.
- [48] Idczak, M., Groleau, D., Mestayer, P., Rosant, J.-M. and Sini, J.-F., "An application of the thermo-radiative model SOLENE for the evaluation of street canyon energy balance", Build. Environ, Vol. 45, pp. 1262-1275, 2010.
- [49] Dong, J., Tan, Z., Xiao, Y. and Tu, J., "Seasonal changing effect on airflow and pollutant dispersion characteristics in urban street canyons", Atmosphere Journal, Vol. 8, No. 43, 2017.
- [۵۰] بیات، رضا، پایان نامه کارشناسی ارشد، سهم‌بندی منابع تولید آلودگی هوای شهر کرج، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۳.
- [51] Dastgoshadeh, F., Tooni, O., Moghadam Sheikhjan, S., Taghinejad, G., Hemmatian, N. and Hatami, R., "Contamination assessment of heavy metals in dust of selected roads in Karaj, Iran", Journal of Environmental Studies, Vol. 40, pp. 331-344, 2014.
- [52] Stazi, F., Mastrucci, A. and di Perna, C., "The behaviour of solar walls in residential buildings with different insulation levels: An experimental and numerical study", Energy Build, Vol. 47, pp. 217-229, 2012.
- [53] [www.aftabir.com/article/view/social/environment/c4-129412124085p1.php/](http://www.aftabir.com/article/view/social/environment/c4-129412124085p1.php/)
- [54] Patankar, S.V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Taylor & Francis Group, 1980.
- [55] Sadripour, S., "3D numerical analysis of atmospheric-aerosol/carbon-black nanofluid flow within a solar air heater located in shiraz, iran", International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow, Vol. 29, No. 4, pp. 1378-1402, 2019.

- [56] Sadripour, S., Mollamahdi, M., Sheikhzadeh, G.A. and Adibi, M., "Providing thermal comfort and saving energy inside the buildings by using a ceiling fan in heating systems", Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Vol. 39, No. 10, pp. 4219–4230, 2017.
- [57] Sadripour, S., Estajloo, M., Hashemi, S.A., Chamkha, A.J. and Abbaszadeh, M., "Optimization of four models flatbread bakery machines in Iran: an experimental investigation aided by energy and exergy analysis", International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow, Article in Press, 2019.
- [58] Sadripour, S., Estajloo, M., Hashemi, S.A. and Adibi, M., "Experimental and numerical investigation of two different traditional hand-baking flatbread bakery units located in kashan, Iran", International Journal of Engineering Transactions B: Applications, Vol. 31, No. 8, pp. 1292–1301, 2018.
- [59] Ashoori, M., Sheikhzadeh, G.A. and Sadripour, S., "The effects of using ceiling fans on human thermal comfort in a three-dimensional room with centralized heating including an occupant", International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow, <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/HFF-05-2018-0200/full/html>, 2019.
- [60] Ka-Ming, W., Tanya, Z., Tan, T.E., Morakinyo, T. and Alan, Lai., *Reduced effectiveness of tree planting on micro-climate cooling due to ozone pollution—A modeling study*, Sustainable Cities and Society, Vol. 52, 2020.
- [61] Maesano, C.N., Morel, G., Matynia, A., Ratsombath, N., Bonnetty, J., Legros, G., Da Costa, P., Prud'homme, J. and Annesi-Maesano, I., *Impacts on human mortality due to reductions in PM10 concentrations through different traffic scenarios in Paris, France*, Science of The Total Environment, Vol. 698, 2020.
- [62] Walter, K. and Dodds, M. R. W., *Chapter 16-Responses to Stress, Toxic Chemicals, and Other Pollutants in Aquatic Ecosystems*, Editor(s): Walter K. Dodds, Matt R. Whiles, *In Aquatic Ecology*, Freshwater Ecology (Third Edition), Academic Press, pp. 453-502, 2020.
- [63] Walter, K., Dodds, Matt R. W., *Chapter 18 - Trophic State and Eutrophication*, Editor(s): Walter K. Dodds, Matt R. Whiles, *In Aquatic Ecology*, Freshwater Ecology (Third Edition), Academic Press, pp. 537-581, 2020.
- [64] Walter, K., Dodds, Matt R. W., *Chapter 24 - Freshwater Ecosystems*, Editor(s): Walter K. Dodds, Matt R. Whiles, *In Aquatic Ecology*, Freshwater Ecology (Third Edition), Academic Press, pp. 723-764, 2020.
- [65] Paulina, P.Y., Wong Poh-Chin, L., Ryan, A., Wei Cheng, M., Lee, A., Tsui, R., Tang, T., Thach, L., Tian, M. B. and Benjamin, B., *Vertical monitoring of traffic-related air pollution (TRAP) in urban street canyons of Hong Kong*, Science of The Total Environment, Vol. 670, pp. 696-703, 2019.
- [66] Iveta, S., Liene, S., Janis, B., Janis Bikse, J. and Janis, K., *Traffic induced air pollution modeling: scenario analysis for air quality management in street canyon*, Procedia Computer Science, Vol. 149, pp. 384-389, 2019.
- [67] Thouron, L., Kim, Y., Carissimo, B., Seigneur, C. and Bruge, B. *Intercomparison of two modeling approaches for traffic air pollution in street canyons*, Urban Climate, Vol. 27, pp. 163-178, 2019.
- [68] Shuo-Jun, M., Zhiwen, L., Fu-Yun, Z. and Han-Qing, W., *Street canyon ventilation and airborne pollutant dispersion: 2-D versus 3-d CFD simulations*, Sustainable Cities and Society, Vol. 50, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101700>.
- [69] Shuo, D., Yuandong, H., Pengyi, C., Jian, W., Mengzhen, L. and Dantong, L., *Impact of viaduct on flow reversion and pollutant dispersion in 2D urban street canyon with different roof shapes - Numerical simulation and wind tunnel experiment*, Science of The Total Environment, Vol. 671, pp. 976-991, 2019.