

شبیه‌سازی عددی انتقال حرارت و جریان هوا درون خیابان‌های باریک و عمیق شهری در شهر اصفهان

احمدرضا رحمتی^{۱*}، محسن درودی^۲

^۱استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان

^۲دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان

*مسئول مکاتبات: ar_rahmati@kashanu.ac.ir

واژگان کلیدی

خیابان‌های باریک و عمیق شهری
تشعشع
انتقال حرارت
شبیه‌سازی عددی

تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۷/۰۴
تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۰۱/۱۹

چکیده

در کار حاضر به شبیه‌سازی جریان هوا و انتقال حرارت درون خیابان‌های باریک و عمیق شهری در اصفهان پرداخته شده و مسیر حرکت جریان و تبدلات حرارتی بین دیواره‌های درون آن بررسی شده است. محاسبات برای ساعت ۱۰ صبح و برای روز اول از ماه‌های آوریل، جولای، اکتبر و ژانویه در نظر گرفته شد. بدین منظور از روش دینامیک سیالات محاسباتی و شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار تجاری انسیس فلونت استفاذه و مشخصه‌های دینامیکی جریان هوا و انتقال حرارت به دست آورده شد. نتایج بررسی توزیع دما روی دیواره‌های پشت به باد، رو به باد و کف خیابان نشان داد که روند تغییرات دمای کف خیابان در ماه‌های مختلف یکسان است. علاوه بر این در تمامی ساعت‌ها و ماه‌های مورد بررسی در کار حاضر، انتقال حرارت جابجایی طبیعی برای جریان سیال در برابر جابجایی اجباری ناچیز بوده و عمده حرکت جریان سیال به واسطه سرعت باد در عرض خیابان‌ها است.

۱ مقدمه

در دنیای مدرن امروز جوامع روستایی رفته‌رفته جای خود را به جوامع شهری داده‌اند. طبق آمار موجود [۱]، در حال حاضر حدود ۵۰ درصد از جمعیت جهان در شهرها سکونت دارند. روستاها نیز خالی از سکنه شده‌اند و اراضی کشاورزی تغییر کاربری داده‌اند [۲]. این تغییرات پیامدهای مختلفی را به همراه دارد که مهم‌ترین آن‌ها تغییر آب و هوای حاکم بر سطح زمین است. گسترش شهرنشینی و تغییر ساختار شهرها از مهم‌ترین عواملی هستند که به صورت مستقیم و غیرمستقیم می‌توانند بر آب و هوای مناطق شهری تاثیر داشته باشند [۳].

مطالعات اخیر [۴] نشان داده است که دمای هوا در شهرهای بزرگ و مناطقی که تراکم جمعیت و ساختمان در آن بیشتر است، نسبت به مناطق روستایی و کم‌تراکم در حدود ۳ الی ۱۰ درجه افزایش یافته است، که این افزایش دما، با عنوان پدیده جزیره گرمایی شناخته شده است. پارک و همکاران [۲] اثر خنک‌کنندگی سقف‌های درخت‌کاری شده بر جریان هوا را در یک خیابان باریک و عمیق شهری ایده‌آل که به صورت سه‌بعدی مدل‌سازی شده بود، بررسی کردند. فرمول شیمیایی آلاینده‌ها با استفاده از یک مدل جفت‌شده شیمی - CFD شبیه‌سازی شده بود. نتایج نشان داد که در حضور خنک‌کننده‌های سقف ساختمان، باد و میدان‌های دمایی در درون ساختمان خیابان‌های باریک و عمیق شهری به شکل قابل توجهی اصلاح شدند.

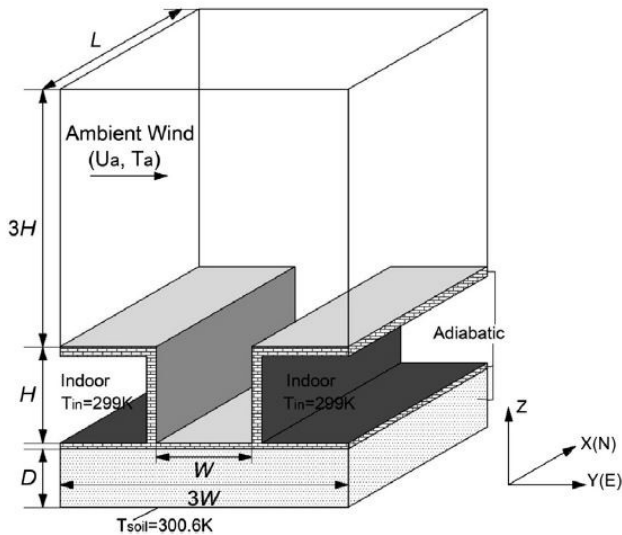
خنک‌کننده‌های ساختمان قدرت گردباد درون خیابان را تشدید کرده و منجر به کاهش دمای هوای درون خیابان‌های باریک و عمیق شهری از طریق

تأمین هوای خنک‌تر در نزدیک سقف ساختمان می‌شوند. تغییرات ایجادشده در توزیع آلاینده‌های اولیه ناکس (NO_x)، ترکیبات آلی فرار (VOCs)^۱ و مونواکسید کربن (CO) در حالت استفاده از خنک‌کننده‌های سقف ساختمان، عمدتاً ناشی از جریان متوسط اصلاح‌شده است تا واکنش‌های شیمیایی.

یولا و سیانگ [۴] تأثیر تابش خورشیدی و باد را بر روی خیابان‌های باریک و عمیق شهری در مناطق گرم و مرطوب مورد مطالعه قرار دادند. آنها دریافتند که اصلاح پیکربندی شهری می‌تواند در کاهش اثر پدیده جزیره گرمایی مؤثر باشد؛ به طوری که خیابان‌هایی که در جهت شرقی - غربی هستند، بدترین سطح دمای هوا را نسبت به زمانی که خیابان‌ها در جهت جریان باد قرار دارند (شمالی - جنوبی) به دست می‌آورند. پدیده جزیره گرمایی علاوه بر تغییر دما، بر کیفیت هوای شهرها نیز موثر است. مناطقی که در آن این پدیده مشاهده می‌شود به مراتب از هوای آلوده‌تری نسبت به سایر مناطق برخوردار هستند. غلظت آلاینده‌ها در شهرهای پرتراکم بسیار بالا می‌رود و شرایط فیزیکی ساختارهای شهری آن را تشدید میکند. بنابراین حضور این پدیده در شهرها سلامت انسان‌ها و تمامی موجودات زنده را تحت تأثیر قرار میدهد [۵]. از این رو بررسی این تغییرات حائز اهمیت می‌باشد. گام نخست در بررسی تغییرات ایجادشده در شهرها، بررسی واحدهای اصلی شهر یا خیابان‌های باریک و عمیق است که در اصطلاح به آن دره^۲ می‌گویند [۶].

با توجه به وجود ارتباط بین پدیده جزیره گرمایی و تغییر ساختار شهری، مطالعه وضعیت آب و هوایی شهرها و بررسی عوامل مؤثر بر آن از اهمیت

^۱Volatile Organic Compounds ^۲Canyon



شکل ۱: هندسه و ابعاد خیابان باریک و عمیق شهری

مطابق شکل، نسبت ارتفاع ساختمان به عرض خیابان (L/B) برابر ۱ در نظر گرفته شده است. همچنین محور خیابان در راستای شمال-جنوب بوده و ناحیه سیال دارای طول $D = 5L$ ، عرض $3L$ و ارتفاع $4L$ است. همچنین ضخامت خاک برابر با $d = 0.1L$ است. برای حل و بررسی مدل ترکیبی میدان جریان و انتقال حرارت یک شبیه‌سازی عددی پایا از میدان جریان و حل بر مبنای فشار در نظر گرفته شده است. مطابق توضیحات ارائه شده در بخش‌های قبل، برای مدل‌سازی اغتشاش از مدل دو معادله‌ای $k - \epsilon$ (RNG) استفاده شده است. همچنین برای مدل‌سازی تابش از مدل تشعشعی جهت‌های تفکیک شده (DO) و برای شبیه‌سازی تشعشع خورشیدی ورودی روی دیواره‌ها، الگوریتم ترسیم اشعه خورشیدی 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. معادلات (۱) تا (۴) معادلات گذرای حاکم بر میدان جریان و انتقال حرارت و معادلات آشفنگی $k - \epsilon$ را نشان می‌دهد.

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

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

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} [\rho h t_i] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (3)$$

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

$$G_k = -\rho \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (4)$$

بالایی برخوردار است. از این‌رو در این مطالعه قصد داریم وضعیت آب و هوایی موجود در خیابان‌های باریک و بلند را که در اصطلاح به آن‌ها دره می‌گویند به‌عنوان واحدهای اصلی شهری بررسی کرده و متغیرهای فیزیکی مؤثر بر این واحدها، نظیر جهت‌گیری و هندسه خیابان‌ها، جریان هوا، انتقال حرارت و سایر موارد را با استفاده از علم مکانیک و روش‌های دینامیک سیالات مورد ارزیابی قرار داده و شبیه‌سازی کنیم.

همان‌طور که اشاره شد، خیابان‌های باریک و عمیق شهری را در اصطلاح دره مینامند. واژه دره به‌صورت ایده‌آل، به یک خیابان تقریباً باریک با ساختمان‌های بلندی که در طول خیابان و در دو طرف آن قرار گرفته، اشاره دارد. اگرچه این واژه برای خیابان‌های بزرگ‌تر هم استفاده می‌شود [۷].

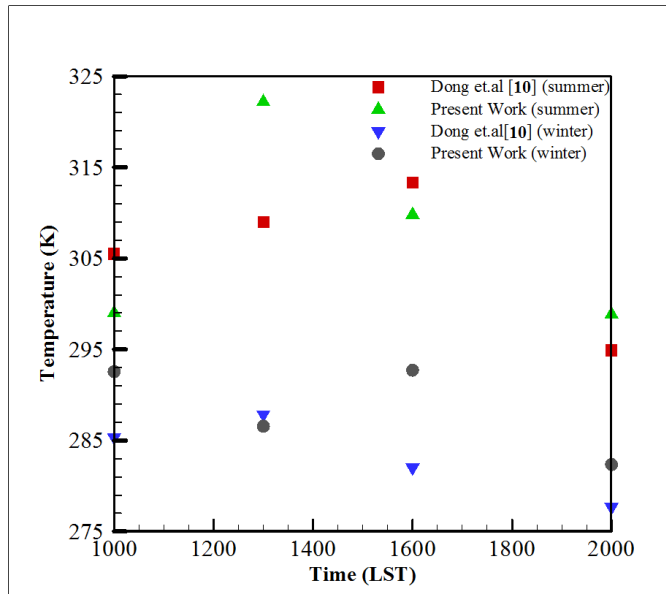
دره یکی از مهم‌ترین عناصر شهری محسوب شده و ویژگی آن این است که تراکم جمعیت و ترافیک در آن نسبتاً بالا است. انتظار می‌رود که قرار گرفتن انسان‌ها در معرض مواد خطرناک در خیابان‌های باریک که توسط ساختمان‌های بلند احاطه شده به شکل قابل‌توجهی افزایش یابد [۸]. بوتیلو و همکاران [۹] به بررسی شرایط آب و هوایی 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. مدل جریان استاندارد اغتشاشی $k - \epsilon$ جهت شبیه‌سازی یک میدان جریان سه‌بعدی و محاسبه پارامترهای دینامیک حرارتی که توصیف‌کننده ویژگی‌های یک خیابان هستند، مورد استفاده قرار گرفت.

هدف از این مقاله بررسی اثر تابش خورشیدی بر میدان جریان و پارامترهای حرارتی درون یک خیابان باریک و عمیق شهری است.

۲ مدل‌سازی

به‌منظور تحلیل نتایج مربوط به توزیع دما و انتقال حرارت در خیابان‌های باریک و عمیق شهری در اصفهان، از نرم‌افزار تجاری ANSYS-FLUENT 18.2 جهت مدل‌سازی خیابان و شبیه‌سازی عددی استفاده شده است. در این بخش ابتدا مدل فیزیکی مساله و معادلات حاکم در حوزه‌های حل سیال و جامد بررسی شده و شکل کلی معادلات پیوستگی، اندازه حرکت و انرژی بیان می‌شوند. سپس انواع رژیم‌های جریان، مدل‌های انتقال حرارت تشعشعی، مدل‌سازی جریان دوفازی، انتخاب روش‌های حل و غیره در نرم‌افزار تجاری ANSYS-FLUENT مورد بررسی قرار گرفته است. در پایان نیز ضمن معرفی هندسه مساله و بررسی استقلال شبکه از حل و اعتبارسنجی تحقیق حاضر، پروژه معرفی شده و روش حل عددی آن ارائه شده است.

در این بخش ابتدا به تشریح مسئله و معرفی متغیرهای انتخابی در نرم‌افزار فلونت پرداخته شده است. پروژه حاضر برای چهار فصل مختلف و روز اول از ماه اول میلادی برای فصل مربوطه و در ساعت ۱۰ صبح برای شهر اصفهان، انجام شده است. هندسه سه‌بعدی خیابان‌های باریک و عمیق در شکل ۱ نشان داده شده است که شامل ۴ قسمت خاک در زیر ساختمان‌ها و خیابان، آسفالت خیابان، ساختمان‌های اطراف خیابان و همچنین سیال هوا است.



شکل ۲: نتایج مربوط به اعتبارسنجی دمای دیواره رو به باد

۳ نتایج

در این بخش تغییرات روزانه دمای دیواره‌های خیابان شامل دیواره پشت به باد، دیواره رو به باد و کف خیابان برای ماه‌های آوریل، جولای، اکتبر و ژانویه، در ساعت‌های مختل روز بررسی و در شکل ۳ ارائه شده است.

همان‌طور که از شکل ۳ مشخص است، برای دمای کف خیابان روند تغییرات دمای روزانه در فصل‌های مختلف یکسان بوده که بیشینه مقدار آن همواره در ساعت ۱۳ اتفاق می‌افتد. دلیل این امر را می‌توان به وجود تابش خورشیدی مستقیم بر روی این ناحیه، نسبت داد. همچنین به دلیل آنکه بیشینه میزان تشعشع در ساعت ۱۳ به ترتیب برای ماه‌های جولای، اکتبر، آوریل و ژانویه است، در نتیجه بیشینه دمای کف خیابان نیز به ترتیب در ماه‌های اشاره شده، رخ داده است. در مقابل، برای دیواره‌های پشت به باد و رو به باد، تغییرات فصلی قابل ملاحظه‌ای رخ داده است. بیشینه مقدار دمای دیواره پشت به باد در ماه آوریل در ساعت ۱۰ صبح و برابر با $297/66 K$ ، در ماه جولای در ساعت ۱۳ و برابر با $313/33 K$ ، در ماه اکتبر در ساعت ۱۳ و برابر با $309/67 K$ و در ماه ژانویه در ساعت ۱۰ صبح و برابر با $293/39 K$ است. همچنین بیشینه مقدار دمای دیواره رو به باد در تمامی ماه‌ها در ساعت ۱۳ بوده و مقادیر آن در ماه آوریل برابر با $66/297 K$ ، در ماه جولای برابر با $313/545 K$ ، در ماه اکتبر برابر با $208/24 K$ و در ماه ژانویه برابر با $293/30 K$ است. از طرفی همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، دیواره‌های پشت به باد و رو به باد در ساعت‌های مختلف روز تحت تأثیر تشعشع خورشیدی است. از طرفی این دیواره‌ها در حال انتقال حرارت با دیواره‌های داخلی ساختمان که در شرایط آسایش حرارتی است، قرار دارد.

در ماه‌های جولای و اکتبر دمای دیواره‌های داخلی ساختمان به دلیل استفاده از وسایل سرمایشی از دمای محیط کم‌تر است و تشعشع خورشیدی که مقدار آن در این دو ماه بسیار زیاد است، توزیع دمای دیواره‌ها را به‌طور قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر قرار می‌دهد و دمای دیواره‌ها به‌صورت عمده

مقادیر مرزی برای مقادیر آشفته‌گی در نزدیکی دیواره با استفاده از روش افزایشی دیواره مشخص شده‌اند. بدین ترتیب

$$C_{\mu} = 0/09, C_{1\varepsilon} = 1/44, C_{2\varepsilon} = 1/92, \sigma_k = 1/00, \sigma_{\varepsilon} = 1/30$$

و $Pr_t = 0/90$ به‌عنوان ثابت‌های تجربی (آزمایشگاهی) در معادلات انتقال آشفته‌گی انتخاب شده‌اند [۹]. معادله تشعشع طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{dI_v(r,s)}{ds} = -(K_{av} + K_{sv}) I_v(r,s) + K_{av} I_b(v,T) + \frac{K_{sv}}{4\pi} \int_{4\pi} dI_v(r,s') \cdot \phi(s,s') d\Omega' + S$$

در رابطه بالا I_v با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۹]:

$$I_v(r,s) = \varepsilon_v(r_w) I_b(v,T) + \frac{\rho_w(r_w)}{\pi} \int_{n \cdot s' < 0} I_v(r,s') \cdot |ns'| d\Omega'$$

شبکه تولیدشده به‌صورت سه بعدی است. شبکه از 893651 سلول تشکیل شده است. تمرکز شبکه بیش‌تر در بخش‌هایی بود که در آنجا انتظار پدیده‌های معنادار می‌رفت. به‌منظور مشاهده بهتر تغییرات متغیرهای جریان در نزدیکی دیواره‌ها از شبکه بندی 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 به‌دست آمده و در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به تغییرات دما مشاهده می‌شود که هندسه با تعداد المان 893651 مناسب است.

اعتبارسنجی پروژه حاضر براساس هندسه و شرایط مرزی تحقیق دانگ و همکاران [۱۰] انجام شده است. آن‌ها به صورت عددی و با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت، اثرات تغییر فصلی روی جریان هوا در خیابان‌های باریک و عمیق شهری در شهر پکن را مورد بررسی قرار دارند. مطابق شکل ۲ و با مقایسه نتایج کار حاضر و مرجع [۱۰] در مورد دمای دیواره‌ی رو به باد^۱ برای چهار دوره زمانی در یک روز شامل صبح (LST ۱۰۰۰)، ظهر (LST ۱۳۰۰)، بعدازظهر (LST ۱۶۰۰) و شب (LST ۲۰۰۰) در فصول تابستان و زمستان، انطباق خوب جواب‌ها مشاهده شد.

همچنین ذکر این نکته ضروری است که اصولاً درصد خطای قابل قبول برای اعتبارسنجی مسائل عددی، در بهترین حالت در حدود ۵% است. اگرچه در بعضی موارد میزان خطا تا ۱۰% نیز قابل قبول خواهد بود. لذا در پروژه حاضر و مطابق شکل ۲، با محاسبات ساده می‌توان به این نتیجه رسید که درصد خطا برای تمامی موارد کوچک‌تر مساوی با ۵% است.

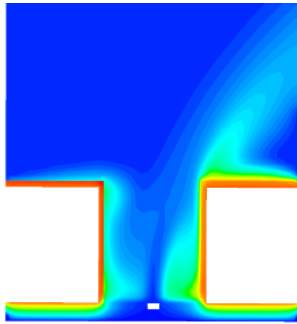
جدول ۱: نتایج استقلال شبکه از حل

ردیف	تعداد المان	دمای دیواره پشت به باد (K)
۱	۶۹۹۲۱	۳۴۱/۱۲۵
۲	۱۸۵۴۶۲	۳۰۶/۰۱
۳	۴۲۱۳۱۲	۳۰۷/۱۹
۴	۸۹۳۶۵۱	۳۰۸/۴۰۵
۵	۱۰۲۰۸۴۱	۳۰۸/۴۰۷

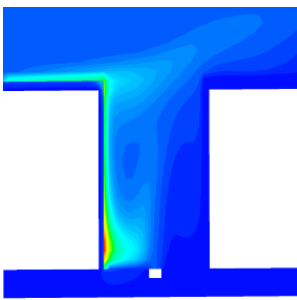
^۱Windward Wall

اکتبر، به دلیل آن که دمای دیواره‌های داخلی ساختمان کم‌تر از دمای دیواره‌های خارجی است، رنج تغییرات دمای هر سه سطح تقریباً ثابت است. این در حالی است که در ماه‌های آوریل و ژانویه به دلیل گرم‌بودن دیواره‌های داخلی ساختمان و انتقال حرارت به دیواره خارجی، دمای دیواره‌های پشت و رو به باد از دمای کف خیابان بیش‌تر است.

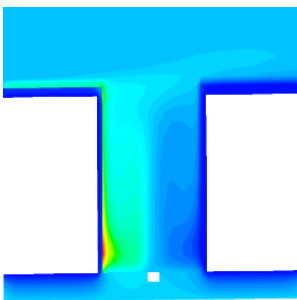
به منظور تحلیل نتایج این قسمت، کانتورهای دما برای بررسی نحوه انتقال حرارت در سیال داخل خیابان و دیواره‌های جامد در ساعت‌های مختلف و در روز اول از ماه‌های آوریل، جولای، اکتبر و ژانویه در صفحه‌ای فرضی در وسط خیابان و عمود بر راستای آن، در شکل ۴ ارائه شده است.



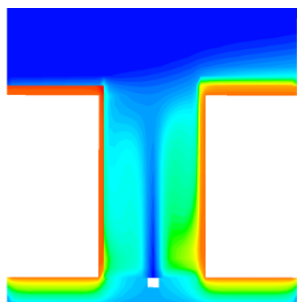
(الف) آوریل



(ب) جولای



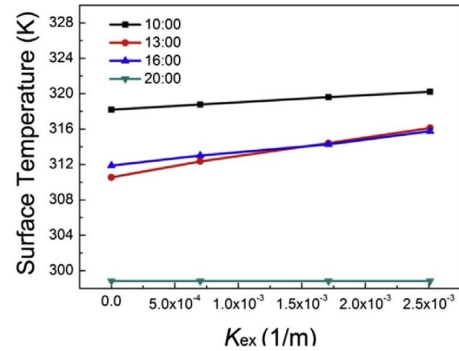
(ج) اکتبر



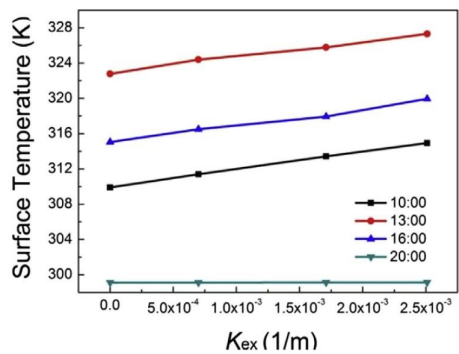
(د) ژانویه

شکل ۴: کانتورهای دما در ساعت ۱۰ صبح و برای روز اول از ماه‌های مختلف

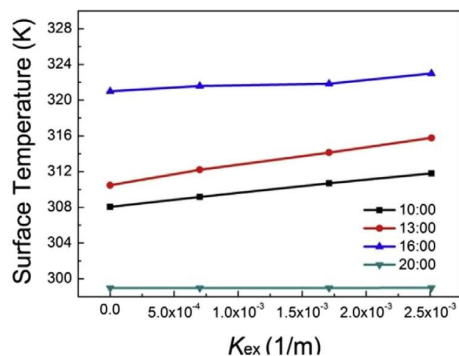
وایسته به اثرات آن است. در نتیجه نوسانات دمایی در طول روز برای این دو ماه زیاد بوده و بیشینه مقدار آن در ماه جولای برای دیواره پشت به باد و رو به باد به ترتیب برابر با $12/88K$ و $14/36K$ و برای ماه اکتبر برای دو دیواره اشاره شده به ترتیب برابر با $13/67K$ و $12/25K$ است. اما در ماه‌های آوریل و ژانویه، به دلیل آن که دمای دیواره‌های داخلی ساختمان از دمای محیط بیش‌تر است؛ لذا توزیع دما در دیواره‌ها تحت تأثیر همزمان دمای دیواره‌های داخلی و تشعشع خورشیدی است که در مقایسه با شرایط آسایش حرارتی ساختمان، اثرات تشعشع خورشیدی ناچیز است.



(الف) دیواره رو به باد.



(ب) دیواره پشت به باد.



(ج) کف خیابان

شکل ۳: نتایج مربوط به اعتبارسنجی دمای دیواره‌ها.

بنابراین توزیع دما روی این دو دیواره در ماه‌های آوریل و ژانویه، تقریباً در شرایط یکسان قرار داشته و اختلاف آن‌ها ناچیز است. علاوه بر این دمای کف خیابان در ساعت ۱۳ در ماه‌های جولای و اکتبر از دمای دیواره‌ها بیشتر بوده اما در تمامی ساعت‌های آوریل و ژانویه، دمای آن کم‌تر از دمای دیواره‌های ساختمان است. همچنین در ساعت ۲۰ برای ماه‌های جولای و

مراجع

- [1] Molina, Mario J and Molina, Luisa T. Megacities and atmospheric pollution. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 54(6):644-680, 2004.
- [2] Park, Soo-Jin, Choi, Wonsik, Kim, Jae-Jin, Kim, Min-joong J, Park, Rokjin J, Han, Kyung-Soo, and Kang, Geon. Effects of building-roof cooling on the flow and dispersion of reactive pollutants in an idealized urban street canyon. *Building and Environment*, 109:175-189, 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*, 167(11):1433-1449, 2010.
- [4] Yola, Lin and Siong, Ho Chin. Solar radiation and urban wind effect on urban canyon in hot, humid regions. *Environment-Behaviour Proceedings Journal*, 1(4):220-229, 2016.
- [5] Fernando, Harindra Joseph. *Handbook of Environmental Fluid Dynamics, Volume Two: Systems, Pollution, Modeling, and Measurements*. CRC press, 2012.
- [6] Hu, LH, Huo, R, and Yang, D. Large eddy simulation of fire-induced buoyancy driven plume dispersion in an urban street canyon under perpendicular wind flow. *Journal of hazardous materials*, 166(1):394-406, 2009.
- [7] Vardoulakis, Sotiris, Fisher, Bernard EA, Pericleous, Koulis, and Gonzalez-Flesca, Norbert. Modelling air quality in street canyons: a review. *Atmospheric environment*, 37(2):155-182, 2003.
- [8] Green, NE, Etheridge, DW, and Riffat, SB. Location of air intakes to avoid contamination of indoor air: a wind tunnel investigation. *Building and Environment*, 36(1):1-14, 2001.
- [9] Bottillo, S, Vollaro, A De Lieto, Galli, G, and Vallati, A. Fluid dynamic and heat transfer parameters in an urban canyon. *Solar Energy*, 99:1-10, 2014.
- [10] Dong, Jingliang, Tan, Zijing, Xiao, Yimin, and Tu, Jiyuan. Seasonal changing effect on airflow and pollutant dispersion characteristics in urban street canyons. *Atmosphere*, 8(3):43, 2017.

به منظور بررسی کانتورهای دما باید توجه داشت که حرکت جریان تحت تأثیر انتقال حرارت جابجایی طبیعی (به میزان ناچیز)، سرعت باد است. در ماه آوریل و در تمامی ساعاتها به دلیل تشعشع دریافتی از خورشید (به جز 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 می رود که در اثر جابجایی طبیعی، سیال در مجاورت دیواره گرم تر به دلیل چگالی کم تر به سمت بالا حرکت کند.

اما آنچه که مشاهده می شود، مغایر با انتظارات از رفتار سیال است. دلیل این امر را می توان به ضعیف بودن جابجایی طبیعی در برابر جابجایی اجباری (سرعت بسیار زیاد باد) نسبت داد که باعث می شود حرکت جریان تحت تأثیر سرعت این پارامترها باشد. در نتیجه با تحلیلی مشابه، نبود انتقال حرارت جابجایی طبیعی که تقریباً در تمامی کانتورهای ارائه شده در شکل ۴ مشاهده می شود، توجیه پذیر است.

توزیع دما برای ساعات های ۱۶ و ۲۰ از ماه های جولای و اکتبر نشان می دهد که دمای دیواره های پشت به باد و رو به باد و کف خیابان در مقایسه با جریان سیال بالای ساختمان ها پایین تر بوده و انتقال حرارت جابجایی طبیعی بین سیال در مجاورت این سه دیواره و لایه های سیال در بالای ساختمان اتفاق نخواهد افتاد.

۴ نتیجه گیری

در این قسمت خلاصه نتایج مربوط به توزیع دما روی دیواره های ساختمان و کف خیابان ارائه شده است که مهم ترین آن ها عبارتست از:

۱. روند تغییرات دمای کف خیابان در ماه های مختلف یکسان و بیشینه مقدار آن همواره در ساعت ۱۳ اتفاق می افتد.
۲. دمای کف خیابان در ساعت ۱۳ برای ماه های جولای و اکتبر از دمای دیواره های ساختمان بیشتر و در ماه های آوریل و ژانویه، کم تر است. دلیل این امر را می توان در شرایط آسایش حرارتی داخل ساختمان و میزان تشعشع خورشیدی ساطع شده بر روی این سطح در ماه های مختلف در نظر گرفت.
۳. نوسانات دمایی در طول روز برای ماه های جولای و اکتبر زیاد بوده و بیشینه مقدار آن در ماه جولای برای دیواره پشت به باد و رو به باد به ترتیب برابر با $12/88K$ و $14/36K$ و برای ماه اکتبر برای دو دیواره اشاره شده به ترتیب برابر با $13/67K$ و $12/25K$ است.
۴. برای نوسانات دمایی در ماه های آوریل و ژانویه، به دلیل آن که دمای دیواره های داخلی ساختمان از دمای محیط بیش تر است؛ لذا توزیع دما در دیواره ها تحت تأثیر همزمان دمای دیواره های داخلی و تشعشع خورشیدی است که در مقایسه با شرایط آسایش حرارتی ساختمان، اثرات تشعشع خورشیدی ناچیز است. بنابراین توزیع دما روی این دو دیواره در ماه های آوریل و ژانویه، تقریباً در شرایط یکسان قرار داشته و اختلاف آن ها ناچیز است.