مجله ژئوفیزیک ایران، جلد ۱۴، شماره ۲، ۱۳۹۹، صفحه ۳۳ – ۴۸ DOI: 10.30499/ijg.2020.105320

مقایسه موردی عملکرد تابستانه راهبردهای توسعه بام سبز و بام خنک بر کیفیت هوا در کلان‌شهر تهران

حسین ملکوتی[1*]، سمیه ارغوانی[2] و ولی الله شیخی[2]

[1]دانشیار، گروه علوم جوی و اقیانوسی (غیرزیستی)، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران
[2]دانشجوی دکتری رشته هواشناسی، گروه علوم جوی و اقیانوسی (غیرزیستی)، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۱۵، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۰۶)

چکیده

پیامدهای نامطلوب گسترش کلان‌شهرها ازجمله جزیره گرمایی شهری و آلودگی هوا توجه مدیران شهری را به اتخاذ راهکارهای بهبود شرایط محیطی جلب کرده است. با توجه به مساحت زیاد بام‌ها در مناطق شهری، به‌کارگیری فناوری‌های نوین و سازگار با محیط زیست ازجمله توسعه بام سبز و خنک با تعدیل جزیره گرمایی می‌تواند نقش مثبتی در کاهش مصرف انرژی سرمایشی و بهبود کیفیت هوا ایفا کند. به‌منظور بررسی بازخورد متقابل پارامترهای هواشناسی و تغییر در ساختار شهری و مطالعه اثرهای محتمل جانبی آن بر کیفیت هوا، شبیه‌سازی عددی راهبردهای بام سبز و بام خنک با استفاده از مدل کنوپی شهری جفت‌شده هواشناسی– شیمی جو (WRF/Chem/SLUCM) در بازه زمانی ۱۵ تا ۳۰ ژوئن سال ۲۰۱۶ در کلان‌شهر تهران انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که توسعه بام خنک با میانگین شبانه‌روزی کاهش دما (۰/۶۵ $^{\circ}$C–) و کاهش شار گرمای محسوس (۵۷ W/m^2–) نقش مثبتی در تعدیل جزیره گرمایی تهران دارد. همچنین کاهش غلظت سطحی آلاینده‌های جوی نشان می‌دهد که کاهش ارتفاع لایه مرزی و تلاطم در نتیجه کاهش دما تغییر محسوسی در وضعیت کیفیت هوا ایجاد نکرده است. توسعه بام سبز، کاهش (افزایش) روزانه (شبانه) دمای هوا را به همراه داشته است. افزایش دما در طول شب محسوس (۰/۵۳ $^{\circ}$C+) و نتیجه گسیلندگی بالای پوشش گیاهی و همچنین کاهش سرعت باد در مجاورت سطح بام سبز است که روند تهویه طبیعی شهر را کندتر می‌کند. مقایسه عملکرد این راهبردها نشان می‌دهد که بام خنک اثر سرمایشی محسوس‌تری نسبت به بام سبز ایجاد می‌کند و روند کاهش آلاینده‌ها به‌ویژه در طول شب در راهبرد بام خنک مطلوب‌تر ارزیابی می‌شود؛ بنابراین با توجه به وابستگی اثربخشی سرمایشی بام سبز به میزان رطوبت خاک و مقایسه هزینه‌های احداث بام خنک و نیاز نداشتن آن به زیرساخت‌های خاص، توسعه بام خنک در کلان‌شهر تهران توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: کیفیت هوا، بام سبز، بام خنک، WRF/Chem/SLUCM، کلان‌شهر تهران

* نگارنده رابط: malakooti@hormozgan.ac.ir

۱ مقدمه

در سالیان اخیر، رشد جمعیت و مصرف بالای انرژی در مصارف خانگی و صنعتی، ترافیک سنگین و همچنین مصالح ساختمانی که جایگزین سطوح نفوذپذیر و فضاهای سبز شهری شده است، به همراه موج‌های گرمایی ناشی از تغییرات اقلیمی، پدیده جزیره گرمایی را در کلان‌شهر تهران تشدید کرده است. انتشار آلاینده‌های شیمیایی ناشی از ترافیک شهری و مصارف خانگی و صنعتی، وضعیت کیفیت هوا را به یک بحران زیست‌محیطی تبدیل کرده است. طبق گزارش کیفیت هوای شهر تهران در سال ۱۳۹۶، به‌علت جمعیت بیش از ظرفیت شهر و جغرافیای آن و همچنین افزایش بی‌رویه وسایل نقلیه، کیفیت هوا در بسیاری از روزها در این کلان‌شهر به شرایط نامطلوب می‌رسد. بیشترین عامل این امر در سالیان گذشته، انتشار آلودگی وسایل نقلیه موتوری بوده است و در سال‌های اخیر، پدیده گرد و غبار و ذرات معلق ورودی از دیگر نقاط نیز بر شدت مشکل آلودگی هوا افزوده است. خسارات سالانه آلودگی هوا در کلان‌شهر تهران ۲/۶ میلیارد دلار برآورد شده است (شرکت کنترل کیفیت هوای تهران، ۱۳۹۷). شرایط اقلیمی و کوهساری خاص این منطقه و کم بودن نسبی سرعت باد نیز اثری منفی برکیفیت هوا در این شهر داشته است (ملکوتی و بیدختی، ۲۰۱۴ و بیدختی و همکاران، ۲۰۱۶).

کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و بهبود کیفیت سوخت، استفاده از انرژی‌های سبز و سازگار با محیط زیست، به‌روزرسانی سامانه حمل و نقل شهری، اجرای طرح‌های ترافیکی و همچنین پروژه‌های توسعه فضای سبز شهری ازجمله پارک‌ها و بوستان‌ها وکمربند سبز برای جلوگیری از گسترش محدوده شهرها و از طرفی، استفاده از مصالح ساختمانی با ضریب بازتابندگی بالا راهکارهایی متداول برای تعدیل جزیره گرمایی و بهبود کیفیت هوا هستند. با توجه به تراکم زیاد ساختمان‌ها در مناطق شهری و درنتیجه، مساحت زیاد بام ساختمان‌ها، توسعه بام سبز (Green Roof) و بام خنک (Cool Roof) ازجمله راهکارهای اقتصادی، کارآمد و قابل‌اجرا در این کلان‌شهر است.

بام سبز به هر نوع سازه پیش‌ساخته با پوشش گیاهی اطلاق می‌شود که با بام ساختمان یک سامانه واحد را تشکیل می‌دهد. این سازه یکی از رویکردهای نوین معماری و شهرسازی است و با توجه به محدودیت‌های توسعه فضای سبز سطحی در محدوده شهرهای پرتراکم، می‌توان از آن در جهت افزایش سرانه فضای سبز بهره برد. باغ‌بام‌های زیگورات‌های بین‌النهرین در تمدن ایران باستان بین هزاره چهارم تا سال ۶۰۰ پیش از میلاد و باغ‌های معلق بابل که قدمت آن به ۵۰۰ سال قبل از میلاد مسیح می‌رسد، اولین سامانه‌های سبز عمودی و بام سبز در تاریخ هستند (مگیل و همکاران، ۲۰۱۱). استفاده از بام سبز به‌ویژه در بریتانیا و اروپای مرکزی در قرن‌های هفده و هجده میلادی توسعه یافت. شکل نوین این نوع بام‌ها در دهه ۱۹۶۰ در آلمان توسعه یافته است. به‌طور کلی بام‌های سبز براساس وزن و ضخامت سازه، شرایط نگهداری، سامانه آبیاری و نوع پوشش گیاهی به سه نوع گسترده (Extensive)، نیمه-فشرده (Semi-Intensive) و فشرده (Intensive) تقسیم می‌شوند. مشخصات کلی این سازه‌های سبز در جدول ۱ ارائه شده است (ویجایاراقوان، ۲۰۱۶). در سال‌های اخیر، به‌دلیل حذف فضای سبز شهری و محدودیت برای احداث پارک‌ها و باغ‌ها در قلمرو شهر و پیامدهای مخرب زیست محیطی آن، احداث بام‌های سبز مورد توجه زیادی قرار گرفته است. ازآنجایی‌که بام سبز نقش عایق حرارتی را در ساختمان ایفا می‌کند، باعث صرفه‌جویی در مصرف انرژی می‌شود و به افزایش سطح آسایش دمایی در محیط داخلی ساختمان و کاهش آلودگی‌های زیستی کمک می‌کند (جورجسکو و همکاران، ۲۰۱۴). علاوه بر

این، استفاده از پوشش گیاهی به جای سطوح بام ساختمان با سپیدایی کم، نقش مهمی در تعدیل جزیره گرمایی شهری ایفا می‌کند (تیان و همکاران، ۲۰۱۷). کمک به بهبود کیفیت آب، جلوگیری از هدررفت آب، کنترل رواناب‌ها و کاهش سطح آلاینده‌های شهری به‌دلیل افزایش میزان نهشت خشک آلاینده‌ها از دیگر منافع اثبات‌شده این ساختار سبز است (شفیق و همکاران، ۲۰۱۸). درحالی‌که در کشورهای اروپایی پیشرو در این حوزه، انگیزه‌های زیست‌محیطی ارجحیت دارد، متأسفانه رویکرد توسعه بام سبز در ایران، زیباسازی فضا و کارکردی است و بام سبز را در ایران به فضایی نمادین تبدیل کرده است که با طراحی نوین با اثرهای مثبت زیستی فاصله زیادی دارد (پورصفری و همکاران، ۱۳۹۴). مطالعات میدانی و عددی در این باره بسیار محدود است؛ برای مثال، کاهش دمای میانگین سطح بام بین ۱/۴ تا ۶/۱ درجه سانتی‌گراد، کاهش غلظت دی‌اکسید کربن بین ۲۰ ppm تا ۳۴ ppm و افزایش رطوبت نسبی بین ۱۰ تا ۱۷/۵ درصد در مطالعه میدانی توسعه بام سبز با طراحی مدرن در شهر تهران گزارش شده است (مقبل و همکاران، ۱۳۹۶). از طرفی، مطالعه عددی کریمیان (۱۳۹۴) که با استفاده از مدل دینامیک شاره Envi-met در شهر یزد انجام گرفته است، حداکثر کاهش دمای بام تا ۰/۸۴ درجه سانتی‌گراد و همچنین افزایش سطح رطوبت نسبی را در مجاورت بام سبز فشرده شبیه‌سازی کرده است؛ بااین‌حال، توسعه بام سبز (فشرده و گسترده) تأثیر زیادی بر بهبود آسایش محیطی در این شهر با اقلیم گرم و خشک نداشته است.

بام خنک نوعی از سطح با ضریب بازتابندگی زیاد و اغلب به رنگ سفید است. در نوع مدرن، بام‌ها با شیب مشخص و با استفاده از مواد مصنوعی با ضریب بازتاب زیاد ساخته می‌شوند. استفاده از پوشش‌هایی با ضریب سپیدایی (Albedo) زیاد روی بام و دیوار ساختمان، سبب کاهش ۱۰ تا ۴۰ درصدی مصرف انرژی سرمایشی می‌شود که به بهبود کیفیت هوا در شهرها کمک می‌کند (اکبری و همکاران، ۲۰۰۵). مطالعات پیشین نشان داده‌اند که افزایش ضریب بازتاب سطوح ساختمانی کاهش چشمگیر دما را در محیط‌های شهری به همراه دارد و راهکاری مؤثر در تعدیل جزیره گرمایی به‌شمارمی‌رود (سالاماناکا و مارتیلی، ۲۰۱۲ و جورجسکو و همکاران، ۲۰۱۴).

نمونه‌های اجرایی متنوع و همچنین راهنمای کامل برای اجرای بام‌ها و پوشش‌های خنک را می‌توان در اتحادیه جهانی شهرهای خنک (Global Cool Cities Alliance, GCCA) یافت. این سازمان با شهرها، مناطق و کشورهای مختلف همکاری می‌کند و بر آن است تا سرعت انتقال جهانی به شهرهایی با بازتابندگی زیاد، خنک‌تر و سالم‌تر را ارتقاء دهد. مأموریت این سازمان پیشبرد را ارتقاء دهد. مأموریت این سازمان پیشبرد سیاست‌ها و برنامه‌هایی است

جدول ۱. مشخصات کلی انواع بام سبز (ویجایاراقوان، ۲۰۱۶).

نوع بام سبز	گسترده	نیمه‌فشرده	فشرده
شرایط نگهداری	نگهداری کم	دوره‌ای	مداوم
آبیاری	–	دوره‌ای	مداوم
نوع گیاهان	خزه، گیاهان علفی و چمن	چمن، بوته، درختچه	چمن، درختچه و درخت
هزینه احداث و نگهداری	کم	متوسط	زیاد
وزن (کیلوگرم در هر متر مربع)	۶۰–۱۵۰	۱۲۰–۲۰۰	۱۸۰–۵۰۰
ارتفاع سازه (سانتی‌متر)	۶–۲۰	۱۲–۲۵	۱۵–۱۰۰

شکل۱. نمونه اجرای راهبرد بام خنک در مناطق شهری هاوایی (تصویر سمت راست) و کشور چین (تصویر سمت چپ) (برگرفته از: https://globalcoolcities.org).

که تأثیرگذاری مثبت سطوح خنک بر بهبود عمکرد ساختمان‌ها در مناطق شهری و همچنین کاهش اثرهای تغییرات اقلیمی با خنک‌سازی جهانی را به دنبال دارد (https://globalcoolcities.org). شکل ۱ نمونه‌ای از اجرای بام خنک در مناطق شهری را نشان می‌دهد.

مطالعه عددی انجام‌شده در شهر تهران نیز نشان داده است که میزان اثرگذاری استفاده از فناوری بام خنک در فصول مختلف سال و ساعات مختلف شبانه‌روز به‌دلیل متغیر بودن انرژی تابشی خورشید متفاوت است. نتایج این مطالعه که با استفاده از مدل جفت‌شده WRF-UCM انجام شده است، میزان کاهش دما در فصل تابستان و دوره زمانی دهم تا سیزدهم اوت را در مختصات جغرافیایی ایستگاه هواشناسی مهرآباد، ۰/۶۴ کلوین برآورد کرده است و از طرفی، کاهش دمای بیشتری در رویه بام ساختمان‌ها نسبت به دمای تراز ۲ متری گزارش شده است. این مسئله باعث کاهش نیاز به استفاده از انرژی جهت سرمایش ساختمان‌ها می‌شود. با توجه به این مسئله و به‌دلیل اهمیت صرفه‌جویی در مصرف انرژی، استفاده از سطوح انعکاسی به‌صورت گسترده توصیه شده است (اصلانی، ۱۳۹۲).

مقایسه بام سبز و بام خنک در مطالعه لی و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از مدل عددی WRF نشان داده است که راهبردهای نامبرده اثرهای سرمایشی یکسانی دارند و با کاهش سرعت باد و کاهش انتقال هوای حومه شهر، افزایش سطح رطوبت نسبی در هر دو سناریو شبیه‌سازی شده است. بااین‌حال، اثر سرمایشی بام سبز تابع آبیاری و میزان رطوبت خاک است؛ ازاین‌رو، با توجه به نیاز آبی بام‌های سبز، نیاز به زیرساخت‌های ویژه و هزینه احداث، در مطالعه مذکور توسعه بام خنک به‌منظور تعدیل جزیره گرمایی در کلان‌شهر بالتیمور پیشنهاد شده است. کاهش دمای هوا و همچنین افزایش رطوبت نسبی در مطالعه عددی ژانگ و همکاران (۲۰۱۷) نیز گزارش شده است. نتایج همچنین نشان دادند که افزایش ضریب سپیدایی بام به میزان ۰/۵(۰/۷)، اثربخشی مشابهی با توسعه بام سبز به میزان ۲۵ درصد (۵۰ درصد) دارد. در تحقیقی مشابه، ایمران و همکاران (۲۰۱۸) نشان دادند افزایش مساحت بام سبز از ۳۰ به ۹۰ درصد، باعث کاهش دما بین ۱ تا ۳ درجه سانتی‌گراد شده و افزایش سپیدایی بام از ۰/۵ به ۰/۸۵ منجر به کاهش دمای ۲/۲ تا ۵/۲ درجه سانتی‌گراد در شهر ملبورن در زمان وقوع یک موج گرمایی شده است. نتایج این تحقیق همچنین نشان داده است که بام خنک (بام سبز) شاخص آسایش محیطی را به میزان ۲/۴°C (۱/۵°C) بهبود بخشیده است؛ بنابراین، در این مطالعه نیز بام خنک در مقایسه با بام سبز راهکاری مؤثرتر

در تعدیل جزیره گرمایی معرفی شده است.

همان‌طور که اشاره شد، توسعه بام خنک و بام سبز، کاهش دما و درنتیجه، کاهش مصرف انرژی و کاهش آلاینده‌های شیمیایی انسان‌ساخت را به همراه دارد. با این‌حال، تغییرات دمایی یادشده با تغییر ساختار لایه مرزی شهری و همچنین روند فعل و انفعالات شیمیایی جو، نقش مهمی در توزیع غلظت آلاینده‌های شهری به‌ویژه آلاینده‌های ثانویه مانند ازن دارند؛ برای مثال، تأثیر کاهش دما بر کاهش غلظت ازن سطحی در نتیجه اجرای راهبرد بام خنک در مطالعه تاها (۲۰۰۸) گزارش شده است، درحالی‌که فالمن و همکاران (۲۰۱۶)، روند افزایش غلظت ازن را گزارش کرده‌اند. نتایج این مطالعه نشان داده است که تابش بازتاب‌شده از بام ساختمان روند واکنش‌های فتوشیمیایی تولید ازن را تسریع می‌کند. در مطالعه جندقیان و اکبری (۲۰۱۸) نیزکاهش غلظت ازن و ذرات معلق و آلاینده NO_2 در نتیجه افزایش سپیدایی بام‌ها گزارش شده که نتیجه کاهش فعل و انفعالات فتوشیمیایی جوی به دلیل کاهش دما است.

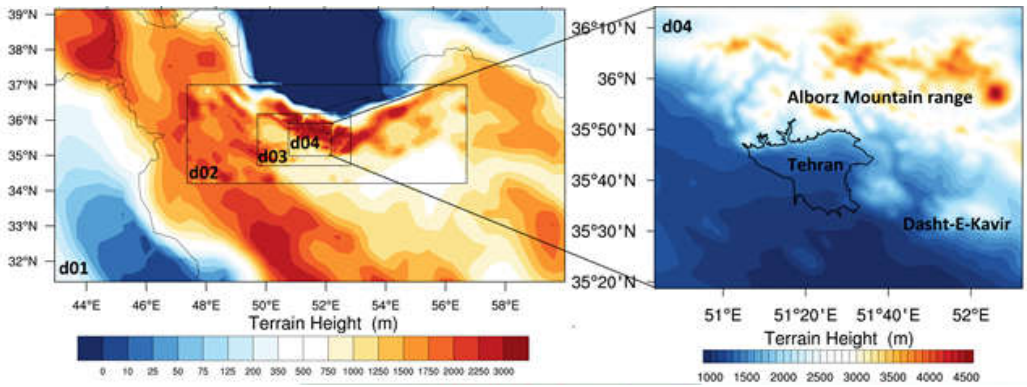
بام سبز با افزایش سطح نهشت، نقش مثبتی در حذف آلاینده‌های شیمیایی دارد (بسیر و سوسه، ۲۰۱۸). با این‌حال، بام سبز فشرده و نیمه‌فشرده با افزایش نسبی رطوبت هوا به‌ویژه در اقلیم‌های گرم و مرطوب باعث کاهش سطح آسایش محیطی می‌شوند. تغییر در طول زبری سطح نیز می‌تواند عاملی در جهت کاهش سرعت باد و تلاطم (به‌ویژه در طول شب) باشد که روند تهویه طبیعی در مناطق شهری را کندتر و وضعیت جزیره گرمایی و کیفیت هوا را در مرکز و مناطق پرتردد شهری وخیم‌تر می‌کند. همچنین کاهش دما در نتیجه اجرای راهبردهای بام سبز و بام خنک، لایه مرزی پایدارتر،کاهش ارتفاع لایه مرزی و اختلاط قائم را به همراه دارد که اثری نامطلوب بر کیفیت هوا به‌ویژه در کلان‌شهرها ارزیابی می‌شود و در مطالعات شارما و همکاران (۲۰۱۶)، ژانگ و همکاران (۲۰۱۷) و ایمران و همکاران (۲۰۱۸) گزارش شده است.

مرور مطالعات پیشین لزوم بررسی بازخورد متقابل تغییرات ساختار شهری، پارامترهای هواشناسی و تغییرات ساختار لایه مرزی سیاره‌ای را در پژوهش‌های مرتبط با کیفیت هوا به‌منظور کاهش اثرهای نامطلوب جانبی این فناوری‌های کنترل جزیره گرمایی اثبات می‌کند. در این مطالعه که با استفاده از مدل عددی جفت‌شده هواشناسی و مدول شیمی جو (WRF-Chem) انجام گرفته است، به مقایسه اثرهای جانبی توسعه بام سبز و بام خنک بر کیفیت هوا در کلان‌شهر تهران پرداخته شده است. به‌این‌منظور، تغییرات شبانه‌روزی شبیه‌سازی‌شده در غلظت سطحی آلاینده‌های دی‌اکسید نیتروژن (NO_2)، مونوکسیدکربن (CO) و ازن (O_3) و همچنین متغیرهای هواشناسی شامل دما، شار گرمای محسوس و ارتفاع لایه مرزی در نتیجه اجرای راهبردهای نامبرده مقایسه و تحلیل شده‌اند.

۲ مواد و روش‌ها

مطالعه موردی در کلان‌شهر تهران با استفاده از نتایج شبیه‌سازی‌های عددی مدل میان‌مقیاس WRF-Chem نسخه ۸ -۳ (گرل و همکاران، ۲۰۰۵) جفت‌شده با مدل فیزیک شهری تک‌لایه (ملکوتی و همکاران، ۱۳۹۸؛ جدول ۱) انجام شده است. دامنه‌های تعریف‌شده برای اجرای مدل عددی در شکل ۲ نشان داده شده است. جزئیات مربوط به پیکربندی مدل عددی، طرح‌واره‌های لایه مرزی، مدول شیمی جو و تعداد نقاط شبکه برای هر دامنه در جدول ۲ ارائه شده است. شبیه‌سازی کنترل در بازه زمانی پانزدهم تا سی‌ام ماه ژوئن سال ۲۰۱۶ با شرایط آرام جوی، بدون ابرناکی و بارندگی اجرا و صحت نتایج شبیه‌سازی‌های عددی در دو بخش هواشناسی و شیمی جو ارزیابی شد (ملکوتی و همکاران، ۱۳۹۸). نتایج شبیه‌سازی سه روز اول زمان SPIN-UP مدل درنظرگرفته‌شده‌است.

در مرحله بعد، سناریوهای توسعه بام سبز و بام خنک با پیکربندی مشابه شبیه‌سازی کنترل، اجرا و میانگین نتایج (بازه زمانی هجدهم تا سی‌ام ژوئن ۲۰۱۶) با نتایج اجرای کنترل مقایسه و تغییرات مشاهده‌شده بررسی شده است. شایان ذکر است بام سبز گسترده به‌دلیل مقرون به صرفه بودن هزینه‌های احداث و نگهداری، نیاز آبی محدود و نیاز نداشتن به رسیدگی ویژه برای استفاده عمومی توصیه می‌شود (اکاترینی و دیمتریس، ۱۹۹۸)؛ بنابراین در این مطالعه، توسعه بام سبز گسترده به میزان ۵۰ درصد بام‌های موجود انجام شده است. در راهبرد بام خنک نیز ضریب



شکل۲. چهار دامنه تعریف‌شده برای اجرای شبیه‌سازی‌های عددی با تفکیک افقی ۳۶، ۱۲، ۴ و ۱/۳۳ کیلومتر، ارتفاع کوهساری منطقه (متر) و موقعیت کلان‌شهر تهران در دامنه داخلی (برگرفته از ملکوتی و همکاران (۱۳۹۸)؛ شکل ۱).

جدول۲. پیکربندی مدل عددی WRF-Chem [ملکوتی و همکاران (۱۳۹۸)].

دوره زمانی	پانزدهم تا سی‌ام ژوئن سال ۲۰۱۶
میکروفیزیک	Morrison 2-moment scheme (موریسون و همکاران، ۲۰۰۹)
تابش	موج بلند: RRTM (ملاور و همکاران، ۱۹۹۷) موج کوتاه: Goddard (چو و سوآرز، ۱۹۹۴)
لایه مرزی	Yonsei University scheme (هونگ و همکاران، ۲۰۰۶)
مدل سطح	Noah Land Surface Model (چن و دودهیا، ۲۰۰۱)
لایه سطح	MM5 similarity (گرل و همکاران، ۱۹۹۴)
فیزیک شهری	Single-Layer Urban Canopy Model (کوساکا و همکاران، ۲۰۰۱)
فیزیک ابر	Kain-Fritsch scheme only for domain 1(کین، ۲۰۰۴)
شیمی	CB05(یاروود و همکاران، ۲۰۰۵؛ سرور و همکاران، ۲۰۰۸)
هواویز	MADE (اکرمن و همکاران، ۱۹۹۸)
بیوشیمی	MEGAN (گوئندر و همکاران، ۲۰۰۶)
فتولیز	Madronich F-TUV (مادرونیچ، ۱۹۸۷)
تفکیک افقی (تعداد نقاط شبکه)	دامنه۱: ۳۶ km (۴۷×۲۶) ؛ دامنه۲: ۱۲ km (۷۶×۲۸) دامنه۳: ۴ km (۷۶×۴۳) ؛ دامنه۴: ۱/۳ km (۱۰۳ ×۷۹)
تفکیک قائم	hPa۵۰ full Eta Levels / Model top level: ۴۰
گام زمانی	دامنه ۱: ۱۰۰ ثانیه؛ دامنه ۲: ۳۳ ثانیه؛ دامنه ۳: ۱۱ ثانیه؛ دامنه ۴: ۳ ثانیه
شرایط اولیه و مرزی	MOZART / °)۱°×۱GFS ((امونز و همکاران، ۲۰۱۰)

جدول ۳. شبیه‌سازی‌های عددی.

شبیه‌سازی عددی	تنظیمات جدول URBPARM.TBL
کنترل (Control)	پیش‌فرض مدل عددی WRF
بام سبز (GR)	• گزینه بام سبز (GROPTION =۱) • توسعه بام سبز گسترده تا ۵۰ درصد بام‌های موجود (FGR = ۰/۵۰) • طرح‌واره آبیاری فضای سبز (IRI_SCHEME = ۱) • با توجه به تعریف ارائه‌شده در جدول URBPARM.TBL مدل عددی WRF، در این مطالعه بام سبز اشاره به نوع گسترده آن دارد (۱۵ سانتی‌متر لایه سبزینگی، ۱۵ سانتی‌متر بستر خاک، ۲۰ سانتی‌متر لایه‌های زهکش، فیلتر و لایه محافظ ضد آب).
بام خنک (CR)	افزایش ضریب سپیدایی بام ساختمان‌ها (ALBR: Surface albedo of roof fraction) از ۰/۲ (پیش‌فرض مدل عددی WRF) به ۰/۷

سپیدایی بام ساختمان از ۰/۲ (پیش‌فرض مدل عددی WRF) به ۰/۷ افزایش یافته است. جزئیات مربوط به اجرای عددی راهبردهای بام سبز و بام خنک و تنظیمات مدل عددی در جدول ۳ ارائه شده است. شبیه‌سازی‌های عددی روی خوشه (کلاستر) محاسبات سریع دانشگاه هرمزگان با روش پردازش موازی انجام و زمان اجرای هر شبیه‌سازی حدود ۱۵۰ ساعت تخمین زده شد.

۳ نتایج و بحث

میانگین (بازه زمانی هجدهم تا سی‌ام ژوئن ۲۰۱۶) تغییرات مشاهده‌شده در غلظت سطحی آلاینده‌های گازی CO، NO_2 و O_3 در نتیجه شبیه‌سازی راهبردهای بام سبز (Green Roof: GR) و بام خنک (Cool Roof: CR) در دو زمان UTC ۰۰:۰۰ (لایه مرزی پایدار) و UTC ۱۲:۰۰ (لایه مرزی ناپایدار) که به‌ترتیب مطابق با ساعات ۰۳:۳۰ و ۱۵:۳۰ به وقت محلی هستند، در مقایسه با اجرای کنترل در شکل ۳ نشان داده شده است.

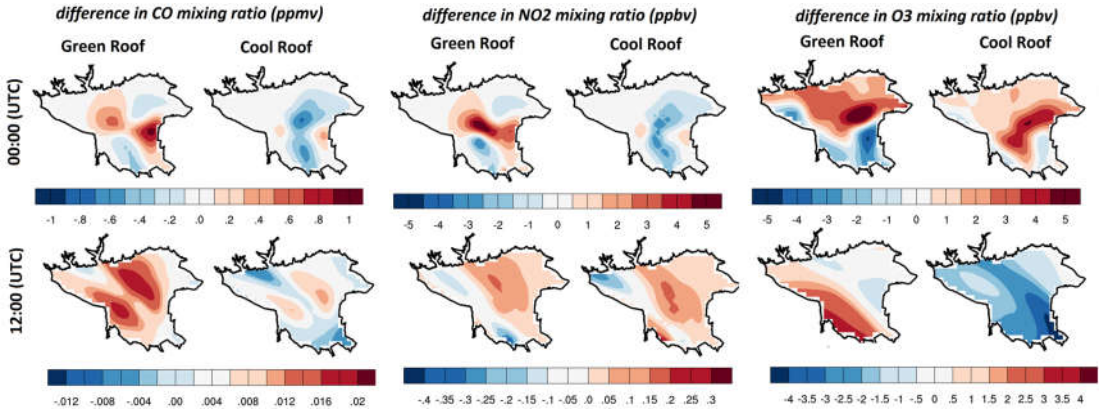
در ساعت UTC ۰۰:۰۰ غلظت آلاینده CO در مناطق مرکزی شهر الگویی کاهشی تا ۰/۸ ppmv− را در راهبرد بام خنک نشان می‌دهد، درحالی‌که در راهبرد بام سبز افزایش غلظت این آلاینده در مناطق مرکزی شهر شبیه‌سازی شده است. افزایش تراکم این آلاینده به حدود ۱ ppmv+ در ناحیه شرق تهران رسیده است. از طرفی، نتایج در ساعت UTC ۱۲:۰۰ الگوی افزایش غلظت سطحی این آلاینده در هر دو راهبرد را نشان می‌دهد. مقادیر به‌دست‌آمده برای بام سبز (بام خنک) به ppmv ۰/۰۲ + (۰/۰۰۸ ppmv +) رسیده است. در مورد آلاینده NO_2 روند کاهش (افزایش) غلظت در مناطق مرکزی شهر در راهبرد CR (GR) بین ۱ ppbv− تا ۴ ppbv− (۱ ppbv تا ۵ ppbv) دیده می‌شود. در ساعت UTC ۱۲:۰۰ در هر دو راهبرد افزایش غلظت سطحی این آلاینده دیده می‌شود که در مناطق مرکزی شهر به مقدار ppbv ۰/۲+ رسیده است. افزایش غلظت آلاینده‌های دی‌اکسید نیتروژن و مونوکسید کربن در طول روز نتیجه کاهش فرایندهای تلاطمی سطح (به دلیل کاهش دما و شار گرمای محسوس) و درنتیجه، کاهش انتقال بالاسوی آلاینده‌ها است.

نتایج شبیه‌سازی عددی همچنین افزایش شبانه غلظت سطحی آلاینده ازن بین ۱ ppbv تا ۴ ppbv را در هر دو راهبرد پیشنهادشده نشان می‌دهد. تغییر غلظت این آلاینده در راهبرد بام سبز در برخی مناطق شهر به بیش از ۵ ppbv نیز رسیده است. همچنین غلظت سطحی این آلاینده در ساعت UTC ۱۲:۰۰ در راهبرد CR (GR) به میزان ppbv ۳/۵ – (۱ ppbv) در محدوده شهر کاهش یافته است. در

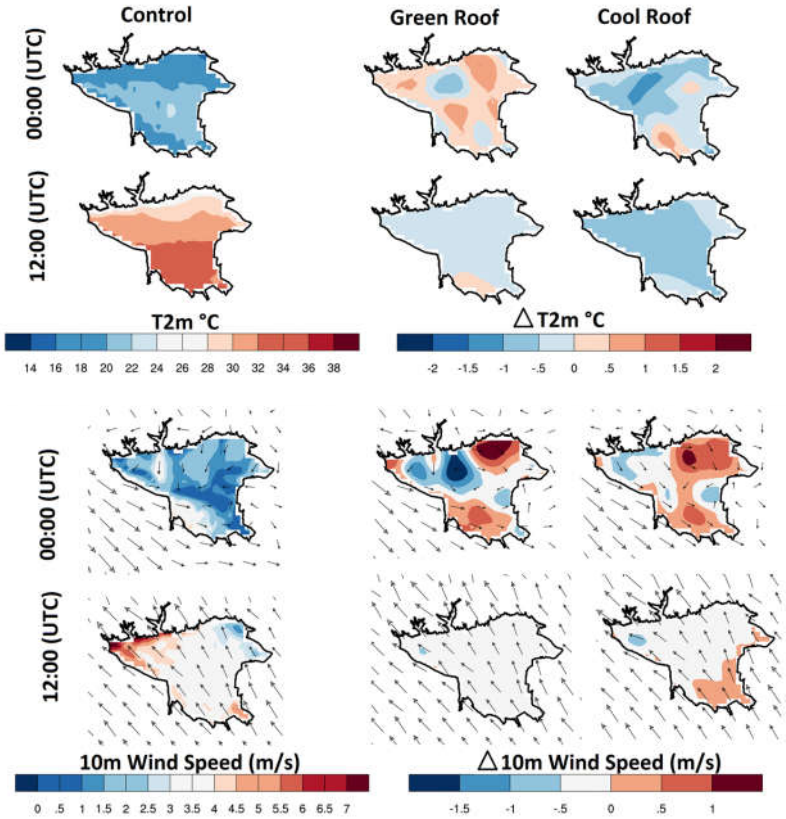
طول شب، با توجه به کم بودن سرعت بادهای محلی، تغییر جهت باد و کاهش انتقال آلاینده‌ها از چشمه‌های آلاینده مجاور شهر، بیشترین افزایش غلظت آلاینده‌ها در مناطق مرکزی شهر و در مجاورت مناطق پرتردد رخ داده است (شکل ۳)، اما در طول روز، جهت باد غالب منطقه (شکل ۴) الگوی کلی پخش آلاینده‌ها در محدوده شهر را تعیین می‌کند.

بودجه‌بندی انرژی در سطح زمین به‌صورت $Q + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A$ تعریف می‌شود که در این رابطه Q انرژی تابشی خورشید، Q_F گرمایش انسان‌ساخت، Q_H شار گرمای محسوس، Q_E شار گرمای نهان و ΔQ_S شارگرمایی ذخیره‌شده و ΔQ_A شار گرمایی ناشی از فرارفت هستند (آریا، ۲۰۰۱). در فناوری بام خنک، با افزایش سپیدایی بام، مقدار تابش خالص دریافتی خورشیدی (Q) کاهش و درنتیجه، شارهای گرمایی Q_H و ΔQ_S کاهش می‌یابد؛ درحالی‌که در بام سبز، شار حرارت نهان نسبت به شارهای گرمایی Q_H و ΔQ_S افزایش می‌یابد. فرایند تبخیر و تعرق گیاهان در کنار تبخیر رطوبت خاک باعث کاهش دما در بام ساختمان می‌شود. تغییر در معادله انرژی سطح وکاهش شارهای گرمایی Q_H و ΔQ_S منجر به کاهش دما می‌شود و درنتیجه، لایه مرزی پایدارتری را به همراه دارد. میانگین (بازه زمانی هجدهم تا سی‌ام ژوئن ۲۰۱۶) تغییرات دمای تراز ۲ متر و سرعت باد تراز ۱۰ متر در دو زمان UTC ۰۰:۰۰ (لایه مرزی پایدار) و UTC ۱۲:۰۰ (لایه مرزی ناپایدار) در نتیجه اجرای راهبردهای بام سبز و بام خنک در شکل ۴ نشان داده شده است. اثر سرمایشی بام سبز (بام خنک) در ساعت UTC ۱۲:۰۰ به ۰/۵- (۱- °C) رسیده است. در ساعت UTC ۰۰:۰۰ اثر سرمایشی بام خنک به بیش از ۱- °C در مرکز رسیده است و تا نواحی شمال شهر دیده می‌شود.

نتایج عددی، اثر گرمایشی راهبرد بام سبز (تا ۱+°C) را در محدوده شهر نشان می‌دهد. همچنین مدل عددی با دقت قابل‌قبولی الگوی میدان باد منطقه در طول روز (آناباتیک) و شب (کاتاباتیک) را شبیه‌سازی کرده است. اعمال راهبردهای بام سبز و بام خنک، کاهش سرعت باد تراز ۱۰ متری در ساعت UTC ۱۲:۰۰ (۰/۵- m/s) را به همراه داشته است. روند تغییرات سرعت باد در ساعت UTC ۰۰:۰۰ نیز کاهش سرعت باد را در مناطق مرکزی شهر در هر دو راهبرد نشان می‌دهد، اما سرعت باد در شمال شرق و نواحی جنوبی شهر افزایش (تا ۱+ m/s) یافته است. کاهش سرعت باد در سناریوی بام سبز به‌دلیل تغییر طول زبری و همچنین افزایش اصطکاک سطوح بام



شکل۳. میانگین (بازه زمانی هجدهم تا سی‌ام ژوئن ۲۰۱۶) تغییرات مشاهده‌شده (اجرای راهبرد- اجرای کنترل) در غلظت سطحی آلاینده‌های گازی CO، NO_2 و O_3 در نتیجه اجرای راهبردهای بام سبز (GR) و بام خنک (CR) در دو زمان UTC ۰۰:۰۰ (لایه مرزی پایدار) و UTC ۱۲:۰۰ (لایه مرزی ناپایدار).



شکل۴. میانگین (بازه زمانی هجدهم تا سی‌ام ژوئن ۲۰۱۶) تغییرات مشاهده‌شده در دمای هوا تراز ۲ متر و سرعت باد تراز ۱۰ متر در نتیجه اجرای راهبردهای بام سبز (GR) و بام خنک (CR) در دو زمان UTC ۰۰:۰۰ (لایه مرزی پایدار) و UTC ۱۲:۰۰ (لایه مرزی ناپایدار). ستون چپ مقادیر شبیه‌سازی‌شده در اجرای کنترل را نشان می‌دهد.

سبز است.

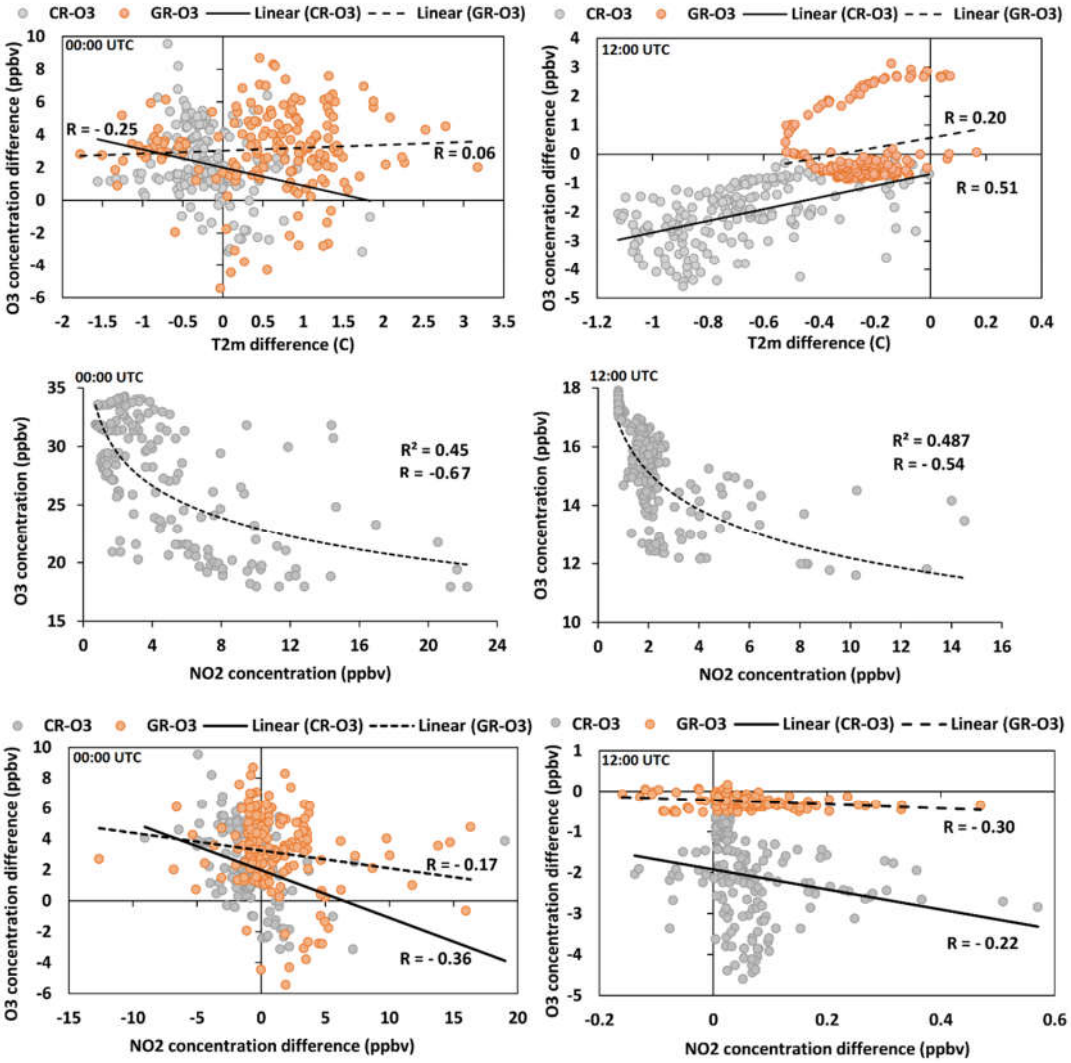
در طول روز و با تابش خورشید، واکنش تجزیه شیمیایی دی‌اکسید نیتروژن ($NO_2+hv \rightarrow O+NO$) و در مرحله بعد واکنش فتوشیمیایی ($O+O_2+M \rightarrow O_3+M$) منجر به تولید ازن مجاور سطح می‌شود (کالورت و همکاران، ۲۰۱۵). ارتباط بین میانگین تغییرات دما و تغییرات غلظت ازن در ساعات UTC ۰۰:۰۰ و UTC ۱۲:۰۰ در نقاط مختلف در محدوده کلان‌شهر تهران در شکل ۵ (ردیف اول) نشان داده شده است. علی‌رغم افزایش غلظت آلاینده NO_2 در طول روز به‌دلیل افزایش مصرف سوخت و ترافیک شهری، کاهش دما با کاهش واکنش‌های فتوشیمیایی تولید آلاینده ثانویه ازن همراه است و در هر دو راهبرد پیشنهادی (به‌ویژه راهبرد بام خنک)کاهش غلظت سطحی این آلاینده محسوس است. ضریب همبستگی پیرسون (R) بین تغییرات غلظت ازن و تغییرات دما برای راهبردهای بام خنک و بام سبز مثبت و به‌ترتیب ۰/۵۰ و ۰/۲۰ برآورد شده است. در طول شب، کاهش دما در راهبرد بام خنک با افزایش غلظت ازن (R= -۰/۲۵) و کاهش غلظت NO_2 همراه است. افزایش دما در راهبرد بام سبز در طول شب روند انتقال بالاسوی آلاینده NO را تسریع می‌کند و درنتیجه، روند مصرف ازن را طی واکنش ($O_3+NO \rightarrow O_2+NO_2$) کاهش می‌دهد

که با افزایش غلظت ازن در بیشتر مناطق شهر همراه است. علاوه‌براین، کاهش سرعت باد و روند تهویه طبیعی در سطح شهر به افزایش غلظت سطحی آلاینده‌ها منجر می‌شود. گفتنی است که در طول روز (شب) الگوی کاهش (افزایش) ازن با افزایش (کاهش) NO_2 سازگاری مناسبی را نشان داده است که نشان‌دهنده عملکرد قابل قبول مدل عددی به‌کاررفته در شبیه‌سازی فرایند تولید و حذف ازن است (شکل ۵، ردیف دوم و سوم).

بررسی الگوی کلی تغییرات مشاهده‌شده نشان می‌دهد که به‌دلیل ریخت‌شناسی پیچیده شهری و همچنین موقعیت چشمه‌های آلاینده شهر تهران در مرکز و نواحی پرتراکم شهری که در قالب سیاهه انتشار تهران (شهبازی و همکاران، ۲۰۱۶ الف و ب) قبل از اجرای شبیه‌سازی عددی به مدل عددی معرفی شده است (ملکوتی و همکاران، ۱۳۹۸؛ شکل ۳)، راهبردهای بام سبز و بام خنک الگوی متفاوتی را از تغییرات غلظت آلاینده‌ها در محدوده شهر تهران شبیه‌سازی می‌کنند؛ بنابراین برای مطالعه دقیق‌تر بازخورد متقابل بین متغیرهای شیمی جو و پارامترهای هواشناسی، دو ایستگاه سنجش آلودگی هوا شامل ایستگاه پیروزی (۵۱/۴۹ E, ۳۵/۶۹ N) و ایستگاه تربیت مدرس (۵۱/۳۸ E, ۳۵/۷۱ N) در محدوده شهر تهران با سطح آلودگی زیاد انتخاب شدند و میانگین (هجدهم تا سی‌ام ژوئن ۲۰۱۶) تغییرات شبانه‌روزی مشاهده‌شده در غلظت آلاینده‌های گازی (شکل ۶) و همچنین متغیرهای هواشناسی (شکل ۷) در نتیجه اجرای کنترل (C) و راهبردهای بام سبز (GR) و بام خنک (CR) در این دو ایستگاه بررسی و مقایسه شد. نتایج اجرای کنترل نشان می‌دهد که اگرچه غلظت ازن در طول شب از مقادیر مشاهده‌شده بیشتر تخمین زده شده است (اطلاعات ایستگاهی از سایت شرکت کنترل کیفیت هوا وابسته به شهرداری تهران: http://air.tehran.ir استخراج شده است)، به‌طور کلی، مدل عددی، غلظت شبانه‌روزی آلاینده‌های گازی را کمتر از مشاهدات تخمین زده است و خطای چشمگیری در شبیه‌سازی غلظت آلاینده‌ها به‌ویژه NO_2 دیده می‌شود (ملکوتی و همکاران، ۱۳۹۸؛ شکل ۵). میانگین خطای انحراف MBE (Mean Bias Error) محاسبه‌شده برای آلاینده‌های CO، NO_2 و O_3 در ایستگاه پیروزی (تربیت مدرس) به‌ترتیب عبارت است از: ppmv ۱/۴۶- (۱/۴۱ -)، ۱۵/۲۰ppbv- (۱۶/۶۶-) و ppbv ۸/۵۸- (۷/۱۹-).

خطای مشاهده‌شده می‌تواند به‌دلیل دقیق نبودن سیاهه انتشار تهران با پس‌زمینه ضعیف باشد که انتقال آلاینده‌ها از مناطق مجاور به سطح شهر را محدود می‌کند. بخش مهمی از خطای مشاهده‌شده آلاینده‌های ازن و NO_2 نیز مربوط به سازوکار طرح‌واره شیمی CB05 است که با تبدیل سریع ترکیبات NO_x به HNO_3، روند تولید ازن را کندتر می‌کند (هندرسون و همکاران، ۲۰۱۱). علاوه‌براین، عدم قطعیت در تخمین دقیق ارتفاع لایه مرزی و سرعت و جهت بادهای محلی که نقش اساسی در پخش و انتقال آلاینده‌ها دارند نیز از دیگر منابع خطا است. بااین‌حال، محاسبه ضریب همبستگی پیرسون (R) بین مشاهدات و مقادیر شبیه‌سازی‌شده در اجرای کنترل نشان می‌دهد که مدل عددی با دقت مطلوبی روند شبانه‌روزی تغییرات غلظت سطحی آلاینده‌های جوی را شبیه‌سازی کرده است. مقادیر به‌دست‌آمده در ایستگاه پیروزی (تربیت مدرس) برای آلاینده‌های CO، NO_2 و O_3 به‌ترتیب عبارت‌اند از: ۰/۵۷ (۰/۶۱)، ۰/۶۸ (۰/۶۹) و ۰/۷۳ (۰/۶۰).

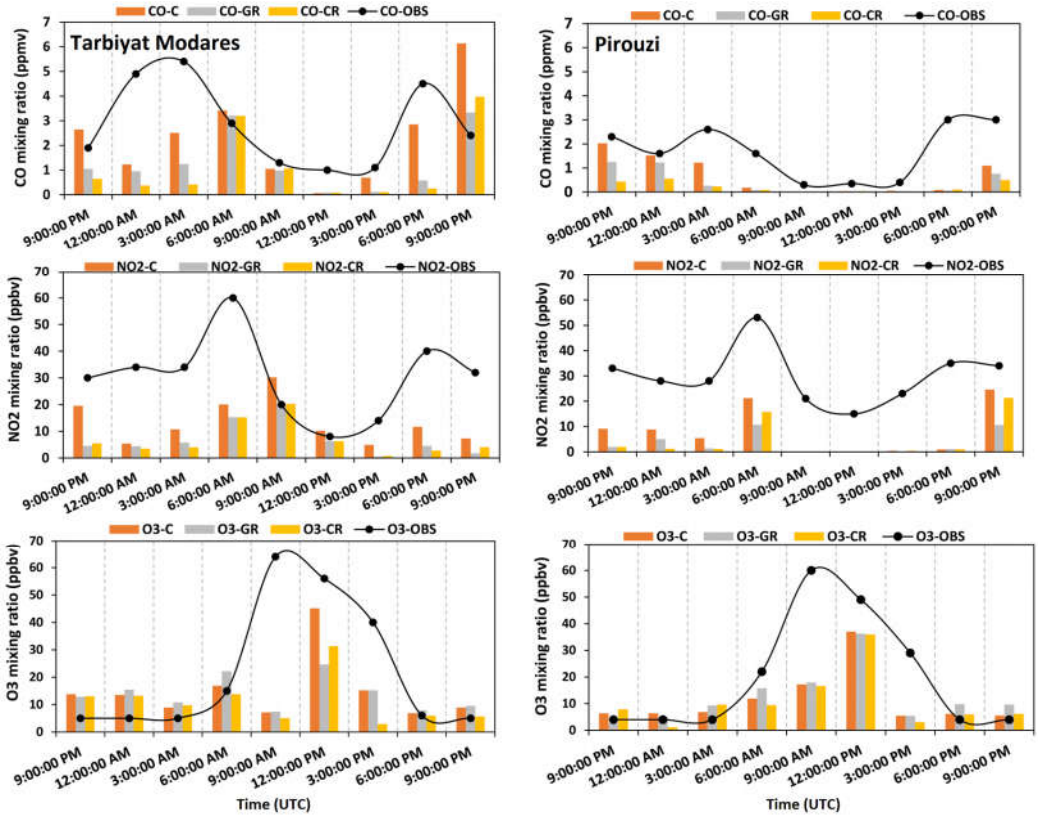
بررسی عملکرد شبانه‌روزی (میانگین ۲۴ ساعته) راهبردهای بام خنک (بام سبز) در ایستگاه پیروزی (شکل ۶)، مقادیر میانگین تغییر در غلظت آلاینده‌های CO، NO_2 و O_3 را به‌ترتیب ppmv ۰/۴- (۰/۲۷-)، ppbv ۳/۱- (۴/۴-) و ppbv ۰/۷۹- (۱+) نشان می‌دهد. مقادیر به‌دست‌آمده در ایستگاه تربیت مدرس عبارت‌اند از: ppmv ۱/۱۶- (۱-)، ppbv ۴/۶- (۳/۶-) و ppbv ۳/۹-



شکل ۵. (ردیف اول) ارتباط بین میانگین (هجدهم تا سی‌ام ژوئن ۲۰۱۶) تغییرات (راهبرد- کنترل) غلظت ازن سطحی (ppbv) و دمای تراز ۲ متر (°C) در محدوده کلان‌شهر تهران در راهبردهای بام خنک (CR) و بام سبز (GR) برای دو زمان UTC ۰۰:۰۰ و UTC ۱۲:۰۰ (ردیف دوم) همبستگی منفی بین غلظت ازن سطحی و دی‌اکسید نیتروژن در اجرای کنترل (ردیف سوم) ارتباط بین تغییرات (راهبرد- کنترل) غلظت ازن سطحی (ppbv) و تغییرات (راهبرد- کنترل) غلظت دی‌اکسید نیتروژن (ppbv) در راهبردهای بام خنک (CR) و بام سبز (GR).

(۱/۱۷) که الگوی مشابه کاهشی را نشان می‌دهد. میانگین سه ساعته تغییرات شبانه‌روزی مشاهده‌شده (بازه زمانی هجدهم تا سی‌ام ژوئن ۲۰۱۶) در دمای تراز ۲ متر، رطوبت نسبی تراز ۲ متر، شارگرمایی محسوس و ارتفاع لایه مرزی در نتیجه اجرای راهبردهای بام سبز و بام خنک در ایستگاه‌های منتخب در شکل ۷ نشان داده شده است.

در راهبرد بام سبز به‌طور میانگین افزایش (کاهش) دما در طول شب (روز) با میانگین ۰/۵۳°C (۰/۱۹°C-) دیده می‌شود. روند تغییرات دما در راهبرد بام خنک سرمایشی است و میانگین ۲۴ ساعته تغییرات به ۰/۶۵°C- می‌رسد. تغییرات دمایی با تغییر شار گرمایی تا ۵۷/۶۲ W/m۲- (۲۰ W/m۲) و تغییر ارتفاع لایه مرزی تا ۷۵- متر (۳۳ متر)



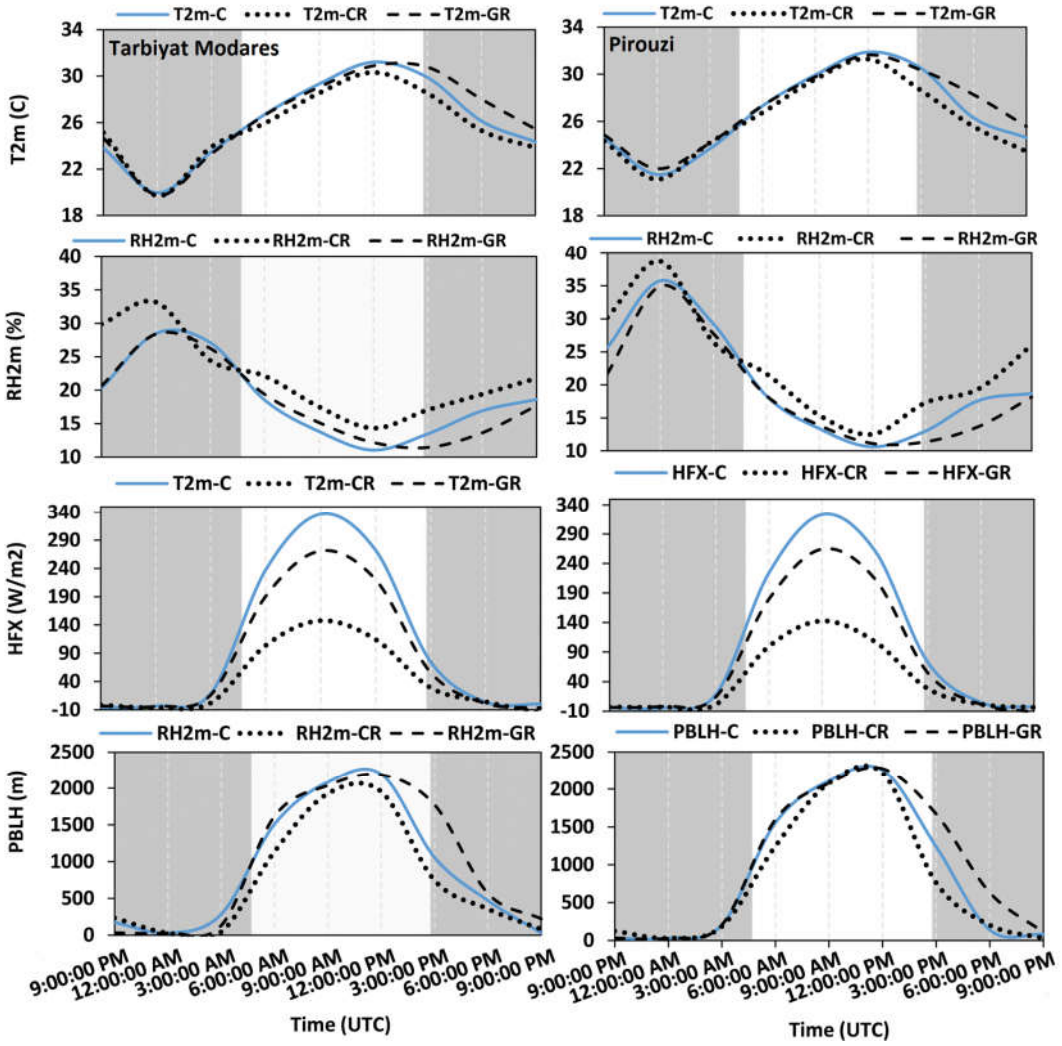
شکل۶. میانگین سه ساعته غلظت آلاینده‌های گازی CO، NO_2 و O_3 (بازه زمانی هجدهم تا سی‌ام ژوئن ۲۰۱۶) در اجرای کنترل (C) و راهبردهای بام سبز (GR) و بام خنک (CR) در مقایسه با مشاهدات (OBS) برای دو ایستگاه سنجش آلودگی هوا شامل ایستگاه پیروزی (ستون راست) و ایستگاه تربیت مدرس (ستون چپ).

در راهبرد بام خنک (بام سبز) همراه است. روند کلی تغییرات دما در راهبرد بام سبز باعث کاهش سطح رطوبت نسبی در طول شب و افزایش رطوبت نسبی تا ۰/۵۰ درصد در طول روز می‌شود. همچنین افزایش سطح رطوبت نسبی در راهبرد بام خنک به ۳/۴۵ درصد در شبانه‌روز رسیده است.

یافته‌های این بخش نشان می‌دهد که اعمال راهبردهای یادشده در برخی ساعات شبانه‌روز (به‌ویژه در طول شب) منجر به افزایش تراکم سطحی آلاینده‌های گازی در محدوده شهر تهران شده است، اما در میانگین ۲۴ ساعته اثر نامطلوب معنی‌داری نداشته و در ایستگاه‌های منتخب روند کاهشی نشان داده است. از طرفی، مقایسه عملکرد بام سبز و بام خنک نشان می‌دهد که بام خنک عملکرد مطلوبی بر کاهش غلظت آلاینده ثانویه ازن داشته است.

۴ نتیجه‌گیری

راهبردهای بام خنک و بام سبز در محیط‌های شهری ازجمله راهکارهای پیشنهادی برای تعدیل جزیره گرمایی و کاهش اثرهای تغییرات اقلیمی هستند. این راهکارها همچنین باعث کاهش ذخیره انرژی گرمایی در ساختمان‌ها می‌شوند؛ بنابراین انرژی کمتری برای سرمایش مصرف خواهد شد که با کاهش گرمایش انسان‌ساخت و بهبود جزیره گرمایی همراه است. رفتار سرمایشی بام خنک و بام سبز بستگی به عوامل محیطی متعددی مانند



شکل۷. میانگین سه ساعته متغیرهای هواشناسی (بازه زمانی هجدهم تا سی‌ام ژوئن ۲۰۱۶) دمای تراز ۲ متر (T2m)، رطوبت نسبی تراز ۲ متر (RH2m)، شار گرمایش محسوس (HFX) و ارتفاع لایه مرزی (PBLH) در نتیجه اجرای بام خنک (CR) و راهبردهای بام سبز (GR) در مقایسه با اجرای کنترل (C) برای دو ایستگاه سنجش آلودگی هوای پیروزی (ستون راست) و تربیت مدرس (ستون چپ). مناطق تیره، شب به وقت محلی هستند.

شرایط اقلیمی منطقه شامل میزان تابش خورشیدی، دما، رطوبت محیط و سرعت باد، نوع پوشش گیاهی به‌کاررفته در بام سبز و همچنین میزان آبیاری و محتوای رطوبت خاک (کولوکتسا، ۲۰۱۳) دارد؛ بنابراین پیش‌بینی عملکرد آنها در مناطق مختلف نیازمند مطالعات موردی است.

نتایج مطالعه عددی حاضر که در کلان‌شهر تهران و در اوایل فصل تابستان انجام شده است نشان می‌دهد که علی‌رغم کاهش دما در طول روز، افزایش شبانه دما در راهبرد بام سبز به‌دلیل تأثیر این بام‌ها بر سرعت و جهت باد و کاهش تهویه طبیعی در سطح شهر و همچنین گسیلندگی بالای این سطوح، موجب شده است که بام خنک به کاهش محسوس‌تر دمای هوا و همچنین کاهش شبانه‌روزی زیاد در شار گرمای محسوس منجر شود. بام‌های خنک با کاهش تابش دریافتی، گرمای ذخیره‌شده

در سطوح شهری را کاهش می‌دهند که نقش مثبتی در کاهش جزیره گرمایی دارند. افزایش رطوبت نسبی در نتیجه کاهش دما نیز در فصل تابستان می‌تواند نقش مهمی در بهبود آسایش محیطی ساکنین داشته باشد. همچنین کاهش دما باعث کند شدن واکنش‌های فتوشیمیایی در جو شده و کاهش شبانه‌روزی غلظت سطحی ازن و آلاینده‌های CO و NO_2 را در میانگین روزانه (۲۴ ساعته) به همراه داشته است.

ارتفاع لایه مرزی و سرعت باد ازجمله عوامل اصلی تأثیرگذار بر پخش و انتقال آلاینده‌ها و درنتیجه غلظت آلاینده‌های جوی هستند و آهنگ تهویه طبیعی منطقه را تعیین می‌کنند (کریشنان و کونهی‌کریشنان، ۲۰۰۴). نتایج مطالعه حاضر نشان داد که اگرچه کاهش دما در طول روز با کاهش ارتفاع لایه مرزی و تلاطم همراه است و همچنین کاهش سرعت باد، فرایندهای تلاطم و همچنین فرارفت‌های افقی را کاهش می‌دهد، تغییرات شبیه‌سازی‌شده در میانگین شبانه‌روزی غلظت آلاینده‌های سطحی بعد از اعمال راهبردهای بام سبز و بام خنک محسوس نبوده و در ایستگاه‌های منتخب روند کاهشی نشان داده است و به‌طور کلی، راهبردهای پیشنهادی تأثیر نامطلوب و معنی‌داری بر کیفیت هوا درکلان‌شهر تهران نداشته‌اند.

با توجه به هزینه‌های احداث و نگهداری بام سبز و مقایسه عملکرد محیطی بام سبز و بام خنک در این مطالعه، توسعه بام خنک در کلان‌شهر تهران پیشنهاد می‌شود. بااین‌حال، نویسندگان بر لزوم انجام مطالعات میدانی به‌منظور صحت سنجی نتایج شبیه‌سازی عددی تأکید می‌کنند. همچنین مطالعات بیشتر در زمینه میزان کاهش آلاینده‌های جوی در نتیجه افزایش سطح نهشت خشک در راهبرد بام سبز پیشنهاد می‌شود. نظر به اینکه کاهش دما و سرعت باد و درنتیجه لایه مرزی پایدارتر می‌تواند باعث افزایش غلظت آلاینده‌ها و تشدید پدیده جزیره گرمایی شهری در برخی ساعات شبانه‌روز شود، برنامه‌های کاهش انتشار آلاینده‌های اولیّه و گرمای انسان‌ساخت ازجمله بهبود کیفیت سوخت و به‌روزرسانی سامانه‌های حمل و نقل شهری همچنان باید در اولویت برنامه‌های بهبود کیفیت هوا و تعدیل جزیره گرمایی در کلان‌شهر تهران قرار گیرند.

منابع

اصلانی، ر.، **۱۳۹۲**، بررسی تأثیر استفاده از فناوری Aبام خنک≅ بر روی پتانسیل جزایرحرارتی شهری (مطالعه موردی: کلان‌شهر تهران): پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد رشته عمران، دانشگاه تهران، تهران، **۹۴** صفحه.

پورصفری، ف.، اسکندری، س.، زاهدی، م.، **۱۳۹۴**، بام سبز یا باغ‌بام؟ نگاهی به تجربه‌های اخیر تهران: ویژه‌نامه منظر، **۳۱**.

کریمیان، ز.، **۱۳۹۵**، شبیه‌سازی اثرگذاری زیست‌محیطی بام‌های سبز گسترده و فشرده در شهر یزد: مؤسسه علوم باغبانی ایران، **٤٧**(۴)، ۶۸۱-۶۹۱.

شرکت کنترل کیفیت هوا، **۱۳۹۷**، گزارش سالانه کیفیت هوای تهران در سال **۱۳۹۶**، QM97/02/01(U)/1.

مقبل، م.، عرفانیان سلیم، ر.، قدیمی، م.، **۱۳۹۶**، ارزیابی اثر بام‌های سبز بر دما، رطوبت و غلظت دی‌اکسید کربن موجود در هوای شهر تهران و نقش آنها در توسعه پایدار شهری: مجله محیط زیست طبیعی (مجله منابع طبیعی ایران)، **۷۰**(۱)، ۱۸۱-۱۹۵.

ملکوتی، ح.، ارغوانی، س.، علی اکبری بیدختی، ع.، **۱۳۹۸**، ارزیابی عددی تأثیرات توسعه کمربند سبز بر هواشناسی محلی و کیفیت هوا در کلان‌شهر تهران: محیط شناسی، **٤٥**(۳)، ۴۱۱-۴۲۵.

Ackermann, I. J., Hass, H., et al., 1998, Modal aerosol dynamics model for Europe: Development and first applications: Atmospheric Environment, **32**(17), 2981–2999.

Akbari, H., Levinson, R., et al., 2005, Monitoring the energy-use effects of cool roofs on California commercial buildings: Energy and Buildings, **37**(10), 1007-1016.

Arya, S. P., 2001, Introduction to Micrometeorology: Academic Press.

Besir, A. B., andCuce, E., 2018, Green roofs and facades: A comprehensive review: Renewable and Sustainable Energy Reviews, **82**, 915–939.

Bidokhti, A. A., Shariepour, Z., et al., 2016, Some resilient aspects of urban areas to air pollution and climate change, case study: Tehran, Iran: Scientia Iranica,Transaction A, Civil Engineering, **23**(5).

Calvert, J. G., Orlando, J. J., Stockwell, W. R., and Wallington, T. J., 2015, The mechanisms of reactions influencing atmospheric ozone: Oxford University Press.

Chen, F., and Dudhia, J., 2001, Coupling an advanced land-surface/ hydrology model with the Penn State/NCAR MM5 modeling system. Part I: Model description and implementation: Monthly Weather Review, **129**(4), 569–585.

Chou, M. D., and Suarez, M. J., 1994, An Efficient Thermal Infrared Radiation Parameterization for Use in General Circulation Models: NASA Technical Memorandum, No. 1046063.

Ekaterini, E., and Dimitris, A., 1998, The contribution of a planted roof to the thermal protection of buildings in Greece: Energy and Build, **27**, 29-36.

Emmons, L. K., Walters, S., et al., 2010, Description and evaluation of the model for ozone and related chemical tracers, version 4 (MOZART-4): Geoscientific Model Development, **3**, 43–67.

Fallmann, J., Forkel, R., et al., 2016, Secondary effects of urban heat island mitigation measures on air quality: Atmospheric Environment, **125**, 199–211.

Georgescu, M., Morefield, P. E., et al., 2014, Urban adaptation can roll back warming of emerging megapolitan regions: Proceedings of the National Academy of Sciences, **111**(8), 2909–2914.

Grell, G. A., Dudhia, J., et al., 1994, A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5): NCAR Tech. Note NCAR TN-398-1-STR.

Grell, G. A., Peckham, S. E., et al., 2005, Fully coupled online chemistry within the WRF model: Atmospheric Environment, **39**, 6957-6975.

Guenther, A., Karl, T., et al., 2006, Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature): Atmospheric Chemistry and Physics, **6**(11): 3181 3210.

Henderson, B. H., Pinder, R. W., et al., 2011, Evaluation of simulated photochemical partitioning of oxidized nitrogen in the upper troposphere: Atmospheric Chemistry and Physics, **11**, 275–291.

Hong, S. Y., Yign, N., and Jimy, D., 2006, A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes: Monthly Weather Review, **134**: 2318–2341.

Imran, H. M., Kala, J., et al., 2018, Effectiveness of green and cool roofs in mitigating urban heat island effects during a heatwave event in the city of Melbourne in southeast Australia: Journal of Cleaner Production: **197**, 393–405.

Jandaghian, Z., and Akbari, H., 2018, The effect of increasing surface albedo on urban climate and air quality: A detailed study for Sacramento, Houston, and Chicago: Climate, **6**.

Kain, S., 2004, The Kain–Fritsch convective parameterization: An update: Journal of Applied Meteorology, **43**(1), 170-181.

Kolokotsa, D., Santamouris, M., et al., 2013, Green and cool roofs' urban heat island mitigation potential in European climates for office buildings under free floating conditions: Solar Energy, **95**, 118-130.

Krishnan, P., and Kunhikrishnan, P. K., 2004, Temporal variations of ventilation coefficient at a tropical Indian station using UHF wind profiler: Current Science, **86**(3), 447-451.

Kusaka, H., and Kimura, F., 2004, Coupling a single-layer urban canopy model with a simple atmospheric model: Impact on urban heat island simulation for an idealized case: Journal of the Meteorological Society of Japan, **82**, 67–80.

Kusaka, H., Kondo, H., et al., 2001, A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: comparison with multi-layer and slab models: Boundary Layer Meteorology, **101**, 329–358.

Li, D., Bou-Zeid, E., et al., 2014, The effectiveness of cool and green roofs as urban heat island mitigation strategies: Environmental Research Letters, **9**(5).

Madronich, S., 1987, Photo dissociation in the atmosphere: 1.Actinic flux and the effect of ground reflections and clouds: Journal of Geophysical Research, **92**, 9740–9752.

Magill, J. D., Midden, K., et al., 2011, A history and definition of green roof technology with recommendations for future research: Southern Illinois University Carbondale, available at: <http://opensiuc.lib.siu.edu/gs_rp/9>, Research Papers paper 91.

Malakooti, H., and Bidokhti, A., 2014, A modeling study of boundary layer wind flow over Tehran region during a high pollution episode: Journal of Applied Fluid Mechanics, **7**(2), 299-313.

Mlawer, E. J., Taubman, S. J., et al., 1997, Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave: Journal of Geophysical Research, **102**, 0148-0227.

Morrison, H., Thompson, G., and Tatarskii, V., 2009, Impact of cloud microphysics on the development of trailing stratiform precipitation in a simulated squall line: Comparison of one- and two-moment schemes: Monthly Weather Review, **137**, 991–1007.

Salamanca, F., and Martilli, A., 2010, A new building energy model coupled with an urban canopy parameterization for urban climate simulations—part II. Validation with one dimension off-line simulations: Theoretical and Applied Climatology, **99**(3-4), 345-356.

Sarwar, G., Luecken, D., et al., 2008, Impact of an updated carbon bond mechanism on predictions from the CMAQ modeling system: preliminary assessment: Journal of Applied Meteorology and Climatology, **47**(1), 3-14.

Shafiquea, M., Kim, R., et al., 2018, Green roof benefits, opportunities and challenges – A review: Renewable and Sustainable Energy Reviews, **90**, 757–773.

Shahbazi, H., Reyhanian, M., et al., 2016a, The relative contributions of mobile sources to air pollutant emissions in Tehran, Iran: an emission inventory approach: Emission Control Science and Technology, **2**(1), 44-56.

Shahbazi, H., Taghvaee, S., et al., 2016b, A GIS based emission inventory development for Tehran: Urban Climate, **17**, 216–229.

Sharma, A., Conry, P., et al., 2016, Green and cool roofs to mitigate urban heat island effects in the Chicago metropolitan area: evaluation with a regional climate model: Environmental Research Letters, **11**(6).

Taha, H., 2008, Urban surface modification as a potential ozone air-quality improvement strategy in California: A mesoscale modeling study: Boundary Layer Meteorology, **127**, 219–239.

Tian, Y., Bai, X., et al., 2017, Study on heat fluxes of green roofs based on an improved heat and mass transfer model: Energy and Buildings, **152**, 175–184.

Vijayaraghavan, K., 2016, Green roofs: a critical review on the role of components, benefits, limitations and trends: Renewable and Sustainable Energy Reviews, **57**, 740–752.

Yarwood, G., Rao, S., et al., 2005, Updates to the carbon bond chemical mechanism: CB05: Final report to the the U.S. EPA, RT-0400675, 246pp [available online at http://www.camx.com].

Zhang, N., Chen, Y., et al., 2017, Effectiveness of different urban heat island mitigation methods and their regional impacts: Journal of Hydrometeorology, **18**, 2991–3012.

A Case Study of Summer Performance of Green Roof and Cool Roof Development Strategies on Air Quality in Tehran Metropolis

Hossein Malakooti*[1], Somayeh Arghavani[2] and *Vali* Sheikhy[2]

[1]*Associate Prof., Department of Marine and Atmospheric Science (non-Biologic), Faculty of Marine Science and Technology, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran*
[2]*Ph.D Candidate, Department of Marine and Atmospheric Science (non-Biologic), Faculty of Marine Science and Technology, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran*

(Received: 05 January 2020, Accepted: 25 March 2020)

Summary

The unfavorable consequences of the expansion of the metropolitans, including urban heat island and air pollution, have attracted the attention of urban managers to strategies for improving environmental conditions. In recent years, along with population growth and high energy consumption, as well as building materials replacing permeable surfaces and urban green spaces, deteriorate the urban heat island phenomenon and air quality in Tehran. Given the significant area of roof surfaces in urban areas, the application of new and environmentally friendly technologies such as the development of cool and green roofs, with heat island modification impact, can play a positive role in reducing cooling energy consumption and improving air quality. Therefore, to study the mutual interaction between meteorological parameters and changes in the urban structure and its possible side effects on air quality, numerical simulation of green roof and cool roof strategies based on the urbanized coupled meteorological-chemical model (WRF/Chem/SLUCM) during the period June 15 to 30, 2016, have been conducted in Tehran metropolitan area. Results show that the development of cool roofs with an averaged diurnal temperature decrease (-0.65°C) and a decrease in the heat flux (-57 W/m^2) has a positive role in the reduction of Tehran heat island. Also, the relative reduction of atmospheric pollutant concentrations has also been achieved in numerical simulations. It shows that the decrease in the height of the boundary layer and turbulence process as a result of the decrease in near-surface temperature has not caused a significant change in the air quality in Tehran. The development of green roofs has led to a daily (nightly) decrease (increase) in the air temperature. The increase in temperature during the night was noticeable (up to +0.53°C), and it is a result of the high emissivity of vegetation, as well as a decrease in wind speed in the vicinity of green roof surfaces which slows down the natural ventilation over the city. Furthermore, an increase in the near-surface humidity also predicted in both strategies which improves the environmental comfort satisfaction in the summer hot and dry days. Comparison of these strategies performance shows that cool roof has a significantly sensible cooling effect than green roofs, and the process of reducing pollutants, especially at night, is more favorable in cool roofing strategy. Consequently, since the cooling efficiency of green roofs depends on soil moisture content, as well as comparing construction costs and no need for specific infrastructure, the development of cool roofs in Tehran metropolis is recommended.

Keywords: Air quality, green roof, cool roof, WRF/Chem/SLUCM, Tehran metropolis

*Corresponding author: malakooti@hormozgan.ac.ir