



Numerical Simulation of Secondary Impacts of Designed Urban Thermal Island Control on Summer Air Quality in Tehran Metropolitan Area

Valiollah Sheikhy¹, Hossein Malakooti^{1*}, Sarmad Ghader²

¹ Department of Marine and Atmospheric Science (non-Biologic), Faculty of Marine Science and Technology, University of Hormozgan, Bandar-Abbas, Iran

² Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article Type: Research article

Article history:

Received 1 January 2020

Accepted 20 February 2020

Available online 29 April 2020

Keywords:

Air Pollution, Climate change, Tehran, Numerical Simulations, Urban Heat Island.

Citation: Sheikhy, V., Malakooti, H., Ghader S. (2020). Numerical Simulation of Secondary Impacts of Designed Urban Thermal Island Control on Summer Air Quality in Tehran Metropolitan Area. *Geography and Sustainability of Environment*, 10 (1), 69-92. doi: [10.22126/GES.2020.4895.2178](https://doi.org/10.22126/GES.2020.4895.2178)

ABSTRACT

The Urban Heat Island (UHI) describes the temperature difference between urban and rural temperatures. Finding urban heat island mitigation strategies is of great importance, given expected influences on human health and air quality. This study presents numerical simulations over a summer period to investigate the impact of urban heat island control measures on Tehran urban air quality. The WRF-Chem Chemical Mesoscale Model is used to investigate the effect of increasing urban vegetation and highly reflective surfaces on the concentration of primary pollutants (CO, NO) as well as secondary pollutants (O₃) in urban canyons. In order to account for the heterogeneity of urban areas, a multi-layered urban canopy model is coupled with WRF-Chem. Using this canopy model at its broad range requires introducing several urban user classes in WRF-Chem. Tehran metropolis is considered to simulate designed experiments in the summer of 2016. The selected reduction measures in the simulations are able to reduce the urban temperature by about 1-3 degrees Celsius and average daily ozone concentration by 5 to 10 percent. The modeling results also presented secondary negative effects on urban air quality, which is strongly related to the reduction of vertical mixing in the urban boundary layer. The simulation results show a 1 to 20% increase in the primary pollutants (NO and CO). Despite the daily average decrease in ozone concentration, highly reflective surfaces due to severe short-wavelength radiation that accelerates photochemical reactions can lead to an increase in the peak ozone concentration by up to 9% at noon hours.

*. Corresponding author E-mail address:

malakooti@hormozgan.ac.ir



شبیه‌سازی عددی اثرات ثانویه اقدامات طراحی شده کنترل جزیره حرارتی شهری در تابستان بر کیفیت هوا در کلان‌شهر تهران

ولی‌اله شیخی^۱، حسین ملکوتی^{۱*}، سرمد قادر^۲

^۱گروه علوم غیر زیستی جوی و اقیانوسی، دانشکده علوم و تکنولوژی دریایی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران
^۲گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

مشخصات مقاله	چکیده
نوع مقاله: پژوهشی	
تاریخچه مقاله: دریافت ۱۱ دی ۱۳۹۸ پذیرش ۲ اسفند ۱۳۹۸ دسترسی آنلاین ۱۰ اردیبهشت ۱۳۹۹	
کلیدواژه‌ها: آلودگی هوا، تغییر اقلیم، تهران، شبیه‌سازی‌های عددی، جزیره گرمایی شهری	
استناد: شیخی، ولی‌اله؛ ملکوتی، حسین؛ قادر، سرمد (۱۳۹۹). شبیه‌سازی عددی اثرات ثانویه اقدامات طراحی شده کنترل جزیره حرارتی شهری در تابستان بر کیفیت هوا در کلان‌شهر تهران. جغرافیا و پایداری محیط، ۳۴ (۱)، ۶۹-۹۲. doi: 10.22126/GES.2020.4895.2178	جزیره گرمایی شهری، تفاوت دما بین دمای شهری و روستایی را توصیف می‌کند. با توجه به تأثیرات مورد انتظار بر سلامتی انسان و کیفیت هوا، یافتن راهبردهای کاهش جزایر گرمایشی شهری بسیار مهم است. نوشتار پیش رو شبیه‌سازی‌های عددی در یک بازه تابستانی برای بررسی تأثیر اقدامات طراحی شده کاهش جزیره گرمایی شهری روی کیفیت هوای شهری تهران را ارائه کرده است. از مدل WRF/Chem نسخه شیمی مدل پیش‌بینی تحقیقاتی وضع هوا WRF به‌منظور بررسی تأثیر افزایش سطوح با پوشش گیاهی شهری و سطوح بسیار بازتابنده بر غلظت آلاینده‌های اولیه (کربن مونوکسید، نیتریک اکسید) و همچنین آلاینده‌های ثانویه (ازن) درون دره شهری استفاده شد. به‌منظور در نظر گرفتن ناهمگونی‌های مناطق شهری، یک مدل چندلایه‌ای تاج‌پوشش شهری با مدل شیمی جفت شد. استفاده از این مدل تاج‌پوشش در گستره وسیع آن به معرفی چندین کلاس کاربری شهری در مدل شیمی نیاز دارد. کلان‌شهر تهران برای شبیه‌سازی آزمایش‌های طراحی شده در تابستان سال ۲۰۱۶ در نظر گرفته شد. اقدامات کاهش انتخاب شده در شبیه‌سازی‌ها قادر به کاهش دمای شهری در حدود ۱ تا ۳ درجه کلوین و غلظت متوسط روزانه ازن به‌اندازه ۵٪ تا ۱۰٪ شدند؛ همچنین نتایج مدل‌سازی‌ها اثرات ثانویه منفی بر کیفیت هوای شهری که به‌شدت مربوط به کاهش اختلاط عمودی در لایه مرزی شهری است را ارائه دادند. در نتایج شبیه‌سازی افزایش ۱ تا ۲۰ درصدی در آلودگی‌های اولیه مشاهده شده است. برخلاف کاهش متوسط روزانه غلظت ازن، سطوح بسیار بازتابنده به‌علت تابش طول موج کوتاه بازتابی شدید که واکنش‌های فتوشیمیایی را سرعت می‌بخشد، می‌تواند افزایش غلظت ازن حداکثری را تا ۹٪ در ساعات ظهر خورشیدی به‌دنبال داشته باشد.

مقدمه

افزایش دمای ناشی از فعالیت‌ها و دستکاری‌های انسان در زمین، به دلیل تفاوت قابل ملاحظه ظرفیت حرارتی سطوح مصنوعی نسبت به سطوح طبیعی منجر به ایجاد جزیره گرمایی شهری^۱ شده است. افزایش و رشد چشم‌گیر فعالیت‌های انسانی در حوزه صنعت، به ویژه در سال‌های اخیر، باعث افزایش تولید و انتشار آلاینده‌های هوا شده است که بر ترکیب شیمیایی هوای شهری نیز تأثیرگذار هستند. براساس پژوهش‌های انجام‌شده، دمای متوسط سالانه مناطق مرکزی یک کلان‌شهر، حداقل در حدود ۱ تا ۳ درجه سانتی‌گراد بالاتر از مناطق اطراف آن است، به گونه‌ای که در شب‌های صاف و آرام، مراکز کلان‌شهرها حتی می‌توانند تا ۱۲ درجه سانتی‌گراد دمای بالاتر را تجربه کنند (اکه^۲، ۱۹۸۲). میزان شار گرمای مصنوعی ناشی از احتراق سوخت، مصرف انرژی، سیستم‌های تهویه مطبوع مصنوعی، فعالیت‌های متابولیک انسانی و همچنین کاهش سرعت باد با توجه به زبری ایجادشده با ساخت و سازهای شهری، به تشکیل شرایط دینامیک اتمسفری خاص در مناطق شهری کمک می‌کند. الگوهای ثانویه ایجادشده به دلیل توسعه شهرها و روستاها، می‌توانند بر پیچیدگی پراکندگی آلاینده‌ها در محیط‌های روستایی اثر داشته باشند (آرنفیلد^۳، ۲۰۰۳). در این راستا مطالعات و پژوهش‌های دقیقی بر تأثیرات جزیره گرمایی کلان‌شهرها در کشورهای مختلف صورت گرفته است (سانتاموریس^۴ و همکاران، ۲۰۱۱).

به تازگی پژوهش‌هایی درباره جزیره حرارتی شهری در هر دو زمینه مدل‌سازی (جیاناروس^۵ و همکاران، ۲۰۱۳؛ لاوت^۶ و همکاران، ۲۰۱۶) و سنجش از دور (پنگ^۷ و همکاران، ۲۰۱۶؛ قاضی و موندال^۸، ۲۰۱۸؛ زاکسک و اوستیر^۹، ۲۰۱۲) افزایش یافته است. تغییرات روزانه جزیره حرارتی سطحی در شرایط آب‌وهوایی ایده‌آل برای شهر پکن در چین بررسی شد (ژو^{۱۰} و همکاران، ۲۰۱۳). این بررسی، اثرات قابل توجهی از جزیره حرارتی بر لایه مرزی و سلامت شهری را نشان می‌دهد؛ همچنین در تجزیه و تحلیل داده‌های اندازه‌گیری برای مناطق مختلف شهری در لندن، ویژگی‌های مختلف لایه مرزی در سطوح شهری و روستایی که کنترل‌کننده جریان و پراکندگی شهری هستند، بررسی شد و نشان داده شد که در شرایط همراه با جزیره گرمایی شدید، سطح شهر بیشترین تأثیر را بر جو و به طور ویژه بر لایه مرزی شهری دارد (بارلو^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۵).

پژوهش‌ها بر سطوح پیرامونی ساختمان‌ها نشان دادند که به کارگیری راهبردهای ویژه مانند استفاده از افزایش پوشش گیاهی شهری و یا به کارگیری نماهای اجراشده با مواد با قابلیت بازتابندگی بالا، قادر به کاهش شدت جزیره حرارتی شهری هستند. در مطالعه صورت‌پذیرفته در شهر لس‌آنجلس نشان داده شد که افزایش سپیدایی (آلبیدو) به اندازه ۰/۳ می‌تواند دمای هوای تابستانی را برای مناطق شهری تا ۱/۵ درجه سانتی‌گراد کاهش دهد (طاها^{۱۲}، ۱۹۹۷ ب). همچنین تأثیر مثبت افزایش پوشش گیاهی شهری و افزایش سپیدایی سطح بر دمای هوا در شرایط موج گرمایی در شهر برلین مطالعه شد (سوبرت و گراسمن-کلارک^{۱۳}، ۲۰۱۳). این پژوهش نشان داد که بیشترین

1- Urban Heat Island

2- Oke

3- Arnfield

4- Santamouris

5- Giannaros

6- Lauwaet

7- Peng

8- Gazi & Mondal

9- Zakšek & Oštir

10- Zhou

11- Barlow

12- Taha

13- Schubert & Grossman-Clarke

تأثیر دو راهبرد افزایش پوشش گیاهی شهری و بازتابندگی، مربوط به زمان‌های شبانه است. استفاده از سطوح با سپیدایی بالا برای کاهش شدت جزیره حرارتی به‌طور ویژه برای تهران نیز پیشنهاد شده است (شاه‌محمدی^۱ و همکاران، ۲۰۱۲: ۲۸۲).

در بررسی ارتباط بین جزیره حرارتی شهری و کیفیت هوا براساس داده‌های میدانی و مشاهداتی و شبیه‌سازی کیفیت هوا در منطقه شهری تاج‌ونگ مشخص شد که یک سیستم پرفشار پایدار می‌تواند در شکل‌گیری جزیره حرارتی و افزایش میزان ازن، PM_{2.5} و PM₁₀ به دلیل شرایط آب و هوایی ایستا در حوضه کمک کند (لای و چنگ^۲، ۲۰۰۹). از طرفی باید توجه کرد که افزایش پوشش گیاهی شهری و استفاده از سقف‌های با بازتاب بالا می‌تواند به میزان قابل توجهی مصرف انرژی (میزان مصرف برق به‌ازای هر ۱۰ درجه افزایش دما، ۲۰٪ تا ۴۰٪ افزایش می‌یابد) را کاهش دهد و در نتیجه آن، کیفیت هوا افزایش یابد (اکبری^۳ و همکاران، ۲۰۰۱).

پژوهش‌های اخیر نشان داد که توانایی کنترل توزیع مکانی آلاینده‌های شهری به‌واسطه افزایش آشفستگی و پراکندگی توسعه مناطق شهری تغییر یافته است (سارات^۴ و همکاران، ۲۰۰۶). در مطالعه جدیدی که با شبیه‌سازی به‌وسیله مدل WRF/Chem نسخه شیمی مدل پیش‌بینی تحقیقاتی وضع هوا WRF برای بررسی اثرات فرایند اختلاط در لایه مرزی اتمسفری شبانه روی غلظت ازن در شهرها صورت پذیرفت، مشخص شد که غلظت ازن نزدیک به سطح در شب‌های با پایداری کم، زمانی که اختلاط فعال وجود دارد، به دلیل افزایش پراکندگی اکسید نیتروژن که مسئولیت تیتراسیون ازن و همچنین اختلاط ازن از لایه باقیمانده به سطح را دارد، بالاتر است (کلین^۵ و همکاران، ۲۰۱۴). افزایش میزان سپیدایی سطح از ۰/۲ به ۰/۵ که افزایش پایداری را به دنبال دارد، باعث کاهش غلظت حداکثری ازن شبیه‌سازی شده در بین ساعت‌های ۱۴:۰۰ و ۱۶:۰۰ ساعت محلی در مناطق شهری و در جهت باد ساحل لس‌آنجلس و ساکرامنتو شد (طاها، ۲۰۰۸)؛ همچنین با به‌کارگیری تکنیک‌های سنجش از دور در منطقه شهری هلسینکی، تأثیر پایداری اتمسفر بر غلظت سطحی آلاینده‌ها بررسی شد (ووود^۶ و همکاران، ۲۰۱۳). در این پژوهش، بالاترین غلظت ذرات در شرایط پایدار یا در انتقال پایداری از پایدار به خنثی اندازه‌گیری شد.

هدف اصلی نوشتار پیش رو بررسی تأثیر اقدامات مختلف به‌منظور کاهش جزیره حرارتی در کیفیت هوای شهری در کلان‌شهر تهران است؛ اما به‌طور کلی می‌توان هدف را بررسی نقش فرایندهای دینامیکی و شیمیایی در لایه مرزی شهری بر میزان غلظت آلاینده‌های اولیه و ثانویه در تاج‌پوشش شهری بیان کرد. درحالی‌که مطالعات موجود به‌طور عمده بر میزان تأثیرات غلظت ازن شهری تمرکز دارند، پژوهش حاضر فاز شیمی کامل گاز شهری و همچنین آلاینده‌های اولیه را بررسی کرده است.

مواد و روش‌ها

طراحی و راه‌اندازی شبیه‌سازی‌های عددی

در نوشتار پیش رو از مدل WRF/Chem نسخه شیمی مدل پیش‌بینی تحقیقاتی وضع هوا WRF نسخه ۳/۵/۱ (گریل^۷ و همکاران، ۲۰۰۵) استفاده شده است. دامنه مدل برای آشیانه داخلی ۱۰۳ در ۷۹ سلول شبکه‌ای با

1- Shahmohamadi

2- Lai & Cheng

3- Akbari

4- Sarraf

5- Klein

6- Wood

7- Grell

تفکیک افقی ۱/۳۳ کیلومتر در نظر گرفته شد (شکل ۱). دامنه به نواحی ارتفاعی بالاتری در شمال و در جنوب به دشت کویر گسترش می‌یابد. این اندازه شبکه اجازه بررسی تعداد قابل توجهی از شبکه‌های شهری برای منطقه تهران را فراهم می‌کند. تعداد ترازهای قائم، ۳۲ سطح که ۵ تراز در ۱۰۰ متر نزدیک به زمین واقع شده، در نظر گرفته شد. بازه شبیه‌سازی ۱۷ جولای تا ۲۳ جولای ۲۰۱۶، دوره‌ای از تنش گرمایی در تهران که می‌تواند به‌عنوان دوره خاصی برای شرایط آب‌وهوایی آینده در تهران لحاظ شود، در نظر گرفته شد. نتایج روز ابتدایی شبیه‌سازی به‌مثابه اسپین آپ^۱ در نظر گرفته شده و از تجزیه و تحلیل‌ها حذف شد.

طرح تعیین پارامتر اثر ساختمانی^۲ (مارتیلی^۳ و همکاران، ۲۰۰۲) با مدل WRF/Chem همراه شده و همان‌طور که در پژوهش چن^۴ و همکاران (۲۰۱۱) شرح داده شد، استفاده شد. طرح چندلایه‌ای، ماهیت سه‌بعدی سطوح شهری را محاسبه می‌کند و ساختمان‌ها را به‌مثابه چشمه و چاهه گرما، رطوبت و حرکت در نظر می‌گیرد. اثرات سطوح افقی (سقف و جاده) و عمودی (دیوار) روی انرژی جنبشی تلاطمی، دمای پتانسیل و اندازه حرکت نیز با این مدل پوشش داده شده است. طرح ساختمانی، چندین لایه را در درون تاج پوشش شهری در نظر می‌گیرد که اجازه رسیدن به وضوح بالای عمودی در نزدیکی زمین و تعامل مستقیم با لایه مرزی شهری را فراهم می‌کند.

به‌منظور تولید شرایط مرزی شیمیایی برای بزرگ‌ترین دامنه، از ابزار پیش‌پردازنده موزیسی^۵ استفاده شده و شرایط اولیه برای داخلی‌ترین دامنه از نسخه چهارم موزارت^۶ (مدلی برای ازن و ردیاب‌های شیمیایی مرتبط با آن) تولید (ایمونس^۷ و همکاران، ۲۰۱۰) و در ادامه داده‌های بزرگ‌ترین دامنه برای شرایط مرزی دامنه‌های داخلی استفاده شد. لیست نشر انسان‌ساز از داده‌های جهانی ریترو^۸ (داده‌های بازتحلیل‌شده ترکیبات شیمیایی تروپوسفری) (شولتز^۹ و همکاران، ۲۰۰۷: ۵۰) از خروجی پیش‌پردازنده پرپ-چم-سورس^{۱۰} (فریتاس^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۱) حاصل شد.

برای بهبود نتایج شبیه‌سازی‌ها، لیست نشر به‌روزرسانی‌شده تهران (شهبازی^{۱۲} و همکاران، ۲۰۱۶ الف) روی داده‌های انسان‌ساز جهانی در دامنه چهارم ترسیم و در دو زمان متفاوت به مدل معرفی شد. wrfchemi_[00z,12z]_A_d04 - (شکل ۲). لیست نشر تهران برای سال ۲۰۱۳ براساس چشمه‌های اصلی آلاینده‌ها شامل چشمه‌های ایستگاهی مثل مناطق صنعتی، خانگی، پایانه‌ها و چشمه‌های سیّار (حمل‌ونقل جاده‌ای) تهیه شده که نشان می‌دهد در سال‌های اخیر الگوهای نشر آلاینده‌ها به‌طور قابل ملاحظه‌ای تغییر یافته است. در حالی که نشر SO₂ در جنوب و غرب شهر، برای مثال ناشی از نیروگاه‌های برق و پالایشگاه‌های نفت قابل ملاحظه است، نشر VOC ها، CO و NO₂ در مرکز شهر به‌دلیل ترافیک بالا و همچنین مصارف خانگی و صنعتی در این کلان‌شهر بالاتر است.

1- Spin-up

2- BEP

3- Martilli

4- Chen

5- mozbc

6- MOZART

7- Emmons

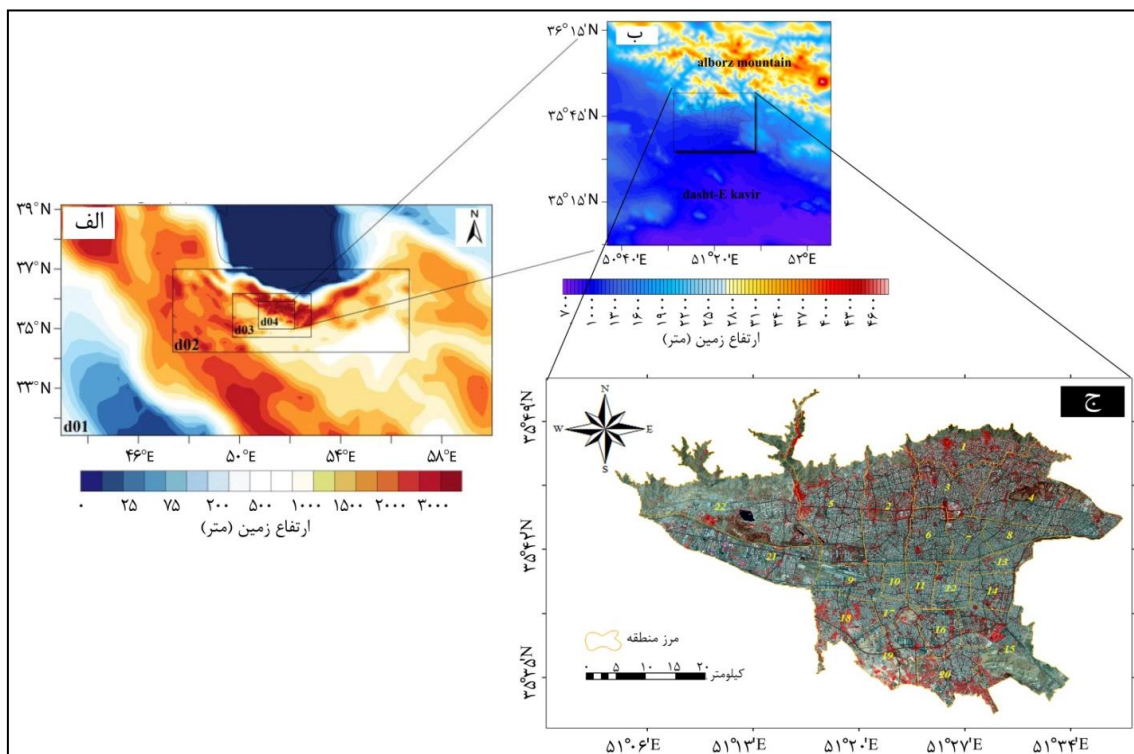
8- REanalysis of the TROpospheric chemical composition (RETRO)

9- Schultz

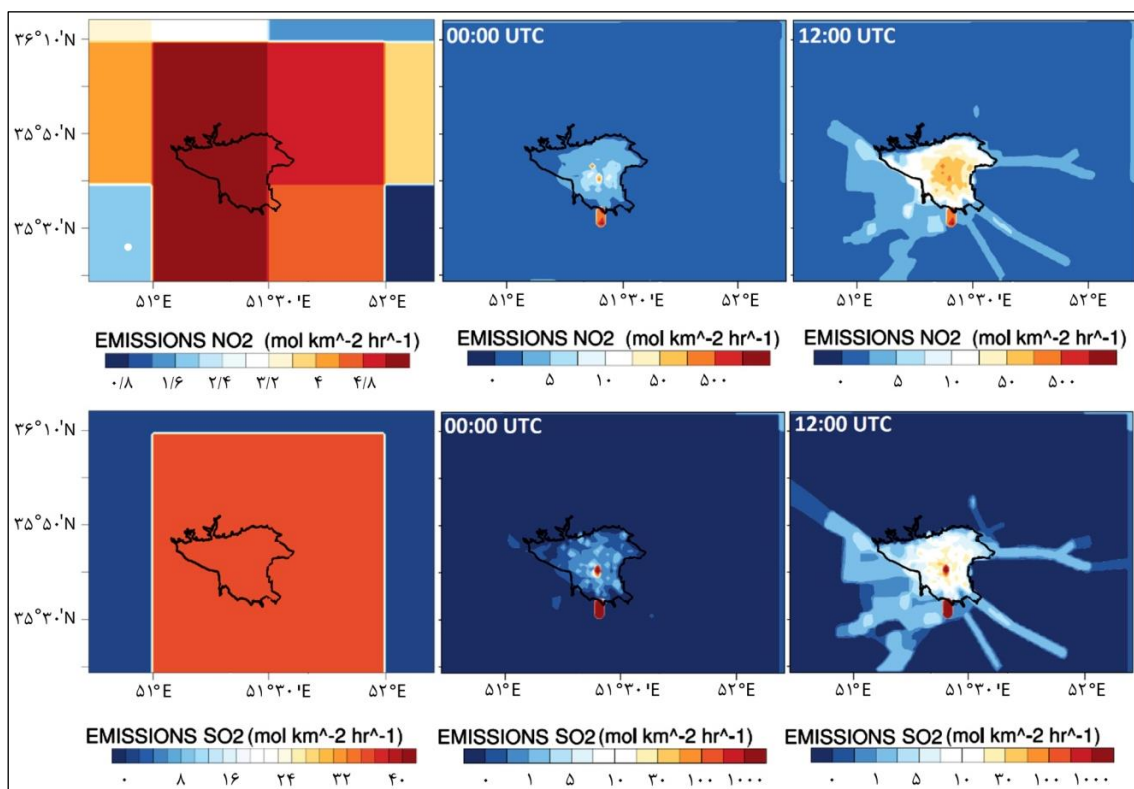
10- PREP-CHEM SOURCES

11- Freitas

12- Shahbazi



شکل ۱. موقعیت دامنه‌های مدل‌سازی با قدرت تفکیک ۱، ۴، ۱۲، ۳۶، ۱۰۰، ۳۰۰، ۶۰۰، ۱۲۰۰، ۲۴۰۰، ۴۸۰۰ متر (الف)، خروجی نرم‌افزار این.سی.ال همراه با نمایش جداگانه کوچک‌ترین دامنه (دامنه ۴) با شهر تهران درون دامنه (ب، خروجی نرم‌افزار این.سی.ال)؛ همچنین شهر تهران با مناطق بیست و دوگانه آن (ج) در شکل آورده شده است.



شکل ۲. مقایسه لیست نشر جهانی RETRO با لیست نشر محلی به‌روزرسانی شده برای دو ترکیب شیمیایی NO₂ (بالا) و SO₂ (پایین) برای دامنه چهارم شبیه‌سازی (خروجی نرم‌افزار این.سی.ال).

نسخه ۲۰۰۵ مکانیسم‌های شیمیایی پیوند کربنی^۱ (یاروود^۲ و همکاران، ۲۰۰۵: ۱۲) و طرح ذرات معلق مدل دینامیکی کیفیت ذرات معلق برای اروپا^۳ برای شبیه‌سازی‌ها استفاده شد (اکرم^۴ و همکاران، ۱۹۹۸). برای معرفی انتشارات گازی و ابروسل طبیعی در مدل از بخش نشر بیوشیمی در پایگاه داده‌های نشر جهانی^۵ استفاده شد (گونزر^۶ و همکاران، ۲۰۱۲).

برای تنظیمات میکرو فیزیک، طرح تک‌لحظه‌ای^۷ با شش کلاس اعمال شد، برای تابش خورشید طرح دودیا^۸ و برای تابش طول موج بلند از طرح RRTM استفاده شد. شار تلاطمی گرما، اندازه حرکت و اجزای موجود در لایه مرزی جوی با طرح لایه مرز سیاره‌ای میلور-یامادا-جانجیک^۹ تعیین پارامتر شد (هو^{۱۰} و همکاران، ۲۰۱۰). طرح کین-فریتش^{۱۱} فقط برای داخلی‌ترین دامنه برای پارامترسازی همرفت کومولوسی استفاده شد و فرایندهای سطح زمین با مدل سطح زمین نوحا^{۱۲}، یک مدل چندلایه‌ای خاک که شامل معادلات پیش‌یابی برای درجه حرارت خاک و محتوای آب مایع در خاک است (میشل^{۱۳}، ۲۰۰۵: ۱۰)، بیان شد. مشابه با شرایط اولیه و مرزی هواشناسی، دما و رطوبت اولیه خاک از داده‌های NCEP FNL با تفکیک ۱×۱ درجه که برای هر شش ساعت در دسترس است، گرفته شده است (وبگاه سازمان جهانی هواشناسی^{۱۴}). تنظیمات کامل استفاده‌شده برای شبیه‌سازی انتقال شیمیایی WRF-BEP در ادامه آورده شده است (جدول ۱).

جدول ۱. پیکربندی شبیه‌سازی‌های پایه WRF-BEP

Parameter/scheme	Specification	Parameter/scheme	Specification
Geographical input data	1 km USGS landuse	Meteorological BC	۱×۱ Deg NCEP FNL data
dx, dy	۱/۳۳ کیلومتر	Urbanization scheme	BEP (۲۰۰۲ و همکاران، ۲۰۰۲)
West-east [grid cells]	۱۰۳	Microphysics	Single-Moment
South-north [grid cells]	۷۹	Longwave	RRTMG (ماور ^{۱۵} و همکاران، ۱۹۹۷)
Vertical layers	۳۲	Shortwave	Dudhia
Time frame	۷/۱۷-۷/۲۳-۲۰۱۶	Cumulus (only 4th domain)	Kain-Fritsch
Lowest model level	۱۰ متر	Land surface model	Noah LSM
Land surface model	NoahLSM	Photolysis scheme	Madronich F-TUV (مادرونیچ ^{۱۶} ، ۱۹۸۷)
Chemistry & Aerosol	CB05 Chemistry with MADE sectional aerosols	Dry deposition	Wesley
Biochemistry	MEGAN global data	Chemical boundary	MOZART global data

1- Carbon Bond mechanism (CB05)

2- Yarwood

3- Modal Aerosol Dynamics Model for Europe (MADE)

4- Ackermann

5- Modeling system for estimating the net emission of gases and aerosols (MEGAN)

6- Guenther

7- Single-Moment

8- Dudhia

9- Mellor-Yamada-Janjic (MYJ)

10- Hu

11- Kain-Fritsch

12- NOAA-LSM

13- Mitchell

14- World Meteorological Organization (WMO)

15- Mlawer

16- Madronich

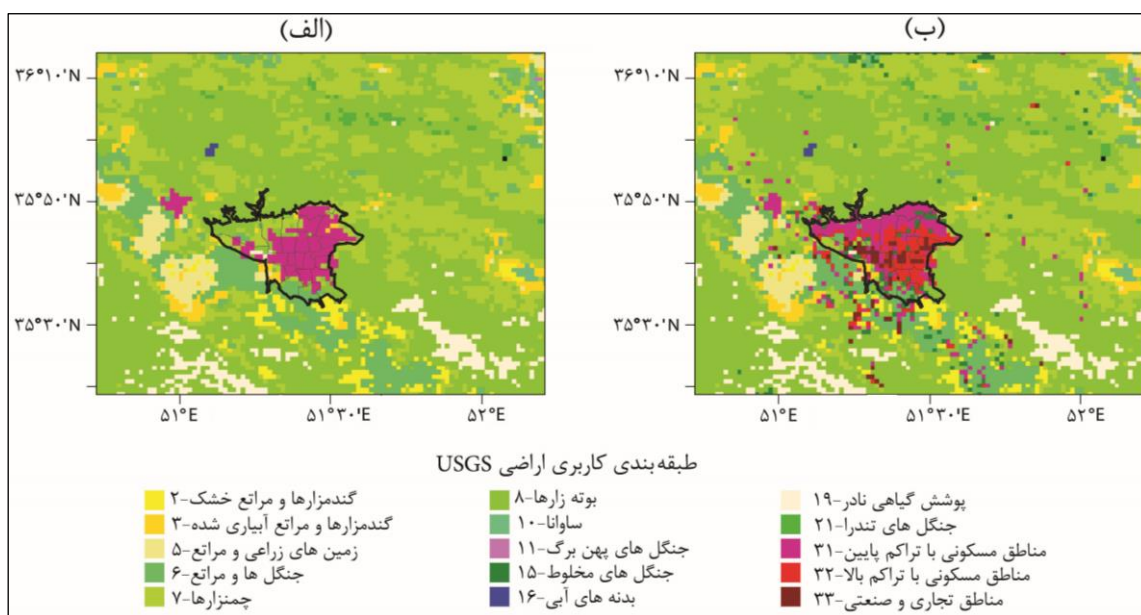
داده‌های ورودی و پیش‌پردازش

مناطق شهری با استفاده از سلول‌های شبکه‌ای به شاخص‌های کاربری زمین ۳۱ (مسکونی با تراکم پایین)، ۳۲ (مسکونی با تراکم بالا) و ۳۳ (صنعتی و تجاری) طبقه‌بندی می‌شوند. این سه طبقه شهری براساس ظاهر و درصد سطوح نفوذناپذیر آن‌ها مشخص می‌شود. مسکونی با تراکم پایین (کلاس ۳۱) شامل مناطق با مخلوطی از ساختمان‌ها و پوشش گیاهی است که ۲۰٪ تا ۷۰٪ پوشش زمین پوشش گیاهی است. به‌طور مشابه، پوشش گیاهی در مناطق مسکونی با تراکم بالا (کلاس ۳۲) کمتر از ۲۰٪ است. صنعتی/تجاری (کلاس ۳۳) شامل زیرساخت‌ها و مناطق بسیار توسعه‌یافته است که به‌صورت مسکونی طبقه‌بندی نشده‌اند (یو.اس.جی.اس.^۱، ۲۰۰۶).

در نسخه فعلی مدل WRF/Chem، طبقه‌بندی‌ای با ۲۴ کلاس طبقه‌بندی زمین به‌طور پیش‌فرض به‌کار گرفته شده است، که اجازه تمایز کاربری‌های شهری در شبیه‌سازی (شکل ۳ الف) را فراهم نمی‌کند.

به‌منظور نشان‌دادن ناهمگونی سطوح زمین شهری و استفاده از مدل کنین شهری با گسترش کامل آن، کلاس اصلی شهری (۱) در مدل WRF/Chem (شکل ۳ الف) به سه زیرکلاس (۳۱ تا ۳۳) تقسیم می‌شود (شکل ۳ ب). شماره کلاس ۳۱ تا ۳۳ مطابق با BEP انتخاب شده است. کلاس‌های کاربری زمین ۲۵ تا ۳۰ در مجموعه داده‌های جدید استفاده نمی‌شوند.

از آنجاکه نهشت خشک آلاینده‌ها به‌طور عمده با نوع کاربری زمین کنترل می‌شود، دسته‌بندی‌های کاربری زمین برای مناطق شهری باید درون کد اصلی بخش نهشت خشک نیز مقداً دهی اولیه شود. به‌منظور محاسبه مقاومت کلی سطح به نهشت خشک گازی (IC) و سرعت نهشت به‌ترتیب، پارامترهای ورودی باید برای همه ۳۳ کلاس طبقه‌بندی‌شده در داده‌های ورودی کاربری زمین تعریف شود. نهشت خشک مسئول بخش بزرگی از حذف مواد شیمیایی ردیاب از اتمسفر است درحالی‌که میزان آن را می‌توان از مقاومت سطحی کل محاسبه کرد (وزلی، ۱۹۸۹؛ وزلی و لشت^۲، ۱۹۸۹).



شکل ۳. داده‌های ورودی برای کاربری زمین WRF الف: برای کاربری اراضی پیش‌فرض ۲۴ طبقه و ب: کاربری اراضی جدید ۳۳ طبقه. خط سیاه نشانگر مرز شهر تهران است (خروجی نرم‌افزار این.سی.ال).

همانند قانون اهم در مدارهای الکتریکی، مقاومت سطح برای یازده نوع وسلی برآورد شده است. با توجه به کمبود داده‌های مرجع، کلاس‌های استفاده از زمین ۳۱: «مسکونی با تراکم پایین»، ۳۲: «مسکونی با تراکم زیاد» و ۳۳: «صنعتی/ تجاری» به کلاس 1 Wesely (زمین شهری) ترکیب شده‌اند. کلاس فصلی روی ۱: «نیمه تابستان با پوشش گیاهی پرپشت» تنظیم شده است. تمام شرایط توصیف مقاومت سطح از کار وسلی (۱۹۸۹) بازیابی می‌شوند. همانند رسوب خشک، تعداد صحیح کلاس‌های کاربری زمین باید در بخش گسیل زیست‌ساز نیز مقداری اولیه شود. به‌طور کلی، یک فاکتور گسیل زیست‌ساز صفر برای کاربری اراضی شهری تعیین می‌شود.

به‌منظور شناسایی ویژگی‌های مورفولوژیکی منطقه شهری تهران، ویژگی‌های جاده‌ها و ساختمان‌ها باید درون BEP تعریف شود. میانگین عرض‌ها و جهت‌های جاده‌ها از خروجی‌های سلول شبکه‌ای برابر در گوگل ارث^۱ (حدود ۱/۵×۱/۵ کیلومتر) تخمین زده شد که نشان‌دهنده سه کلاس مختلف شهری مربوط به انواع کاربری زمین است. تمام جاده‌ها در این شبکه‌ها اندازه‌گیری شده و میانگین عرض جاده محاسبه شد. میانگین اندازه سقف ساختمان‌ها نیز به همان شیوه محاسبه شد. اطلاعات ارتفاع متوسط ساختمان برای هر طبقه شهری را اداره نقشه‌برداری شهر تهران ارائه داده است. پارامترهای مورفولوژیکی شهری که در درون BEP در نظر گرفته شده ارائه شده است (جدول ۲). هدایت حرارتی، ظرفیت گرمایی ویژه، تابندگی، سپیدایی و طول زبری اندازه حرکت برای سقف‌ها، دیوارها و جاده‌ها به‌صورت پیش‌فرض تعریف و مقادیر از سالامانکا^۲ و همکاران (۲۰۱۲) گرفته شده است.

آزمایش‌های شبیه‌سازی

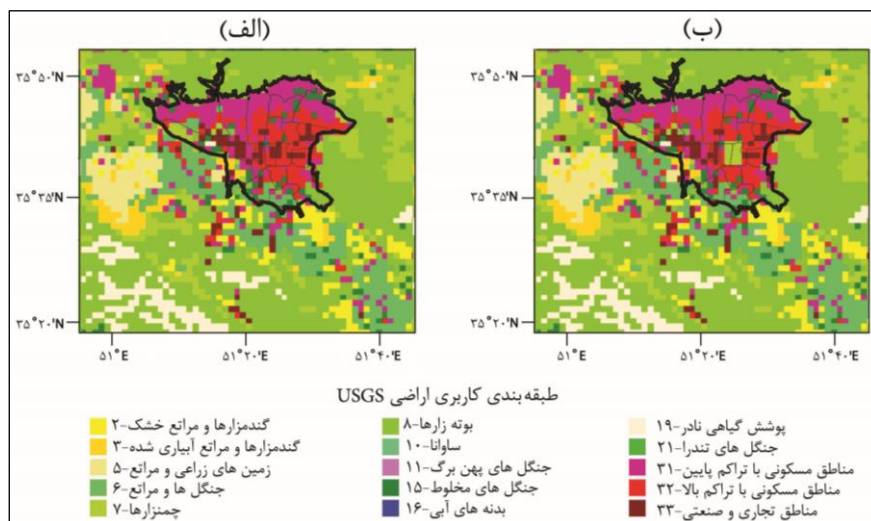
حالت پایه (کنترل) همراه با سه سناریو، با استفاده از طرح BEP (مارتیلی و همکاران، ۲۰۰۲) اجرا شد. طراحی‌های انجام گرفته نشان‌دهنده استراتژی‌های برنامه‌ریزی شهری مانند افزایش پوشش گیاهی شهری (پارک)، افزایش سپیدایی سطوح ساختمانی (آلبیدو) یا تغییر تراکم ساختمان (تراکم) هستند. برای سناریو افزایش پوشش گیاهی شهری، پانزده شبکه شهری در مرکز تهران، که ۳٪ از کل مناطق شهری را تشکیل می‌دهند، با چمن‌زار جایگزین شدند (شکل ۴). مدل سطح زمین در WRF توازن گرمایی و آبی را برای سطوح با پوشش گیاهی و توازن گرمای را برای سطوح خشک شده محاسبه می‌کند. تغییر یک سلول شبکه‌ای از نوع شهری به چمن‌زار (شکل ۴ ب) تغییر مقدار کسر پوشش گیاهی از ۰/۱۲ به ۰/۸ و تغییر کسر سطح بدون تبخیر از ۰/۸۸ به ۰/۲ را به‌دنبال دارد. در همان زمان که کسر پوشش گیاهی از ۰/۱۲ به ۰/۸ تغییر می‌کند، ارتفاع زبری Z_0 از ۱/۲ متر به ۰/۱۲ متر برای سلول‌های شبکه مربوطه کاهش می‌یابد. مقادیر از تنظیمات پیش‌فرض WRF نسخه ۳/۵ به‌دست آمد. یک افزایش سپیدایی در سقف و نماها با تغییر سپیدایی سطح برای تمام سلول‌های شبکه‌ای با کاربری اراضی شهری از ۰/۲ به ۰/۷ که رنگ سفیدی با بازتابندگی بالا را نشان می‌دهد (تاکابایاشی و موریاما^۳، ۲۰۰۷)، شبیه‌سازی شده است. این تغییر موجب افزایش تابش خورشیدی بازتاب‌شده از مناطق ساختمانی شده و با این روش، شار حرارتی کل را از سطح تا پایین‌ترین سطح اتمسفر تغییر می‌دهد.

تغییر تراکم ساختمان سناریوی سوم است که تحلیل شد. در شبیه‌سازی‌های حاضر عرض جاده‌های اصلی در جدول تاج‌پوشش شهری BEP از ۱۹ به ۲۲ متر (کلاس ۳۳)، از ۱۵ به ۱۸ متر (کلاس ۳۲) و از ۱۸ به ۲۱ متر (کلاس ۳۱) افزایش یافت. بقیه خواص شهری در مقایسه با حالت کنترل، ثابت باقی ماند. این تغییر باعث افزایش ۲۰٪ نسبت سقف/ جاده در جدول تاج‌پوشش شهری می‌شود. این تغییرات تأثیراتی بر توزیع گرما در دره‌های شهری با در نظر گرفتن سایه، بازتاب و به‌دام افتادگی تابش‌های طول موج کوتاه و بلند دارد.

1- Google Earth

2- Salamanca

3- Takebayashi & Moriyama



شکل ۴. تغییر کاربری زمین بین حالت پایه (الف) و سناریو افزایش پوشش گیاهی شهری (ب) برای منطقه شهری تهران (خط سیاه) و سلول های شبکه اطراف آن (خروجی نرم افزار این.سی.ال.)

جدول ۲. پارامترهای خیابانی و ساختمانی و توزیع ارتفاع ساختمان همان طور که در مدل چند لایه ای تاج پوشش شهری (BEP) تعریف شده است.

پارامترهای خیابان			ارتفاع ساختمان ها				
کلاس شهری	درجه [جهت خیابان از شمال]	عرض خیابان [متر]	عرض ساختمان [متر]	ارتفاع [متر]	کلاس ۱ [%]	کلاس ۲ [%]	کلاس ۳ [%]
۱	۰	۱۹	۲۵	۵	۴۴	۳۳	۴۸
۱	۹۰	۱۹	۲۵	۱۰	۲۶	۲۰	۳۷
۲	۰	۱۵	۱۳	۱۵	۱۴	۲۳	۱۱
۲	۹۰	۱۵	۱۳	۲۰	۸	۱۸	۳
۳	۰	۱۸	۱۰	۲۵	۴	۴	۱
۳	۹۰	۱۸	۱۰	۳۰	۲	۲	-
				۳۵	۲	-	-

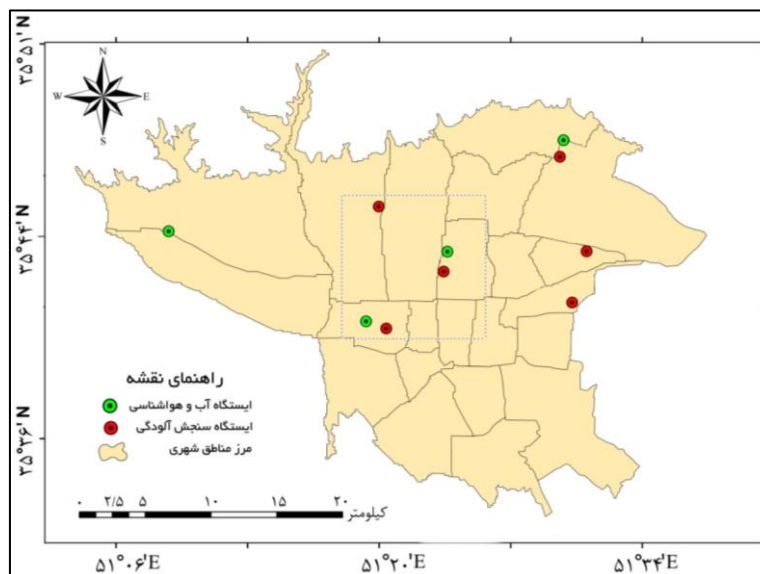
نتایج

اعتبارسنجی شبیه سازی پایه

شبیه سازی WRF_BEP برای اجرای کنترل در یک شبکه شهری واقع در مرکز تهران بررسی شد. غلظت های شبیه سازی شده ترکیبات اولیه و ثانویه در پایین ترین سطح مدل با میانگین گیری روی سه ایستگاه اندازه گیری شهری موجود (جدول ۳ و شکل ۵) در داخل سلول شبکه ای شهری در نظر گرفته شده در مدل مقایسه شد (جدول ۴).

جدول ۳. مشخصات ایستگاه های اندازه گیری کیفیت هوا در داخل منطقه شهری تهران که برای مقایسه بین مدل و اندازه گیری مورد استفاده قرار گرفت

ایستگاه	منطقه	ایستگاه	سال تأسیس	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی
اقدسیه	۱	میدان نویناد خیابان شهید لنگری، داخل سازمان هواشناسی	۱۳۷۹	۳۵° ۴۷' ۴۵"	۵۱° ۲۹' ۰۳"
پونک	۵	میدان پونک، خیابان عدل، پارک ترافیک	۱۳۸۶	۳۵° ۴۵' ۴۴"	۵۱° ۱۹' ۵۳"
پیروزی	۱۳	انتهای خیابان پیروزی، جنب پارک پیروزی، خدمات شهری	۱۳۹۰	۳۵° ۴۱' ۴۵"	۵۱° ۲۹' ۳۷"
تربیت مدرس	۶	تقاطع بزرگراه چمران و جلال آل احمد، داخل محوطه دانشگاه تربیت مدرس	۱۳۹۱	۳۵° ۴۳' ۰۳"	۵۱° ۲۳' ۰۹"
گلبرگ	۸	بزرگراه رسالت، خیابان دردشت، خیابان ۷۲ شرقی اندیشه سرای گلبرگ	۱۳۸۷	۳۵° ۴۳' ۵۱"	۵۱° ۳۰' ۲۳"
میدان فتح	۹	میدان آزادی، میدان فتح، داخل ستاد مدیریت بحران	۱۳۸۹	۳۵° ۴۰' ۴۳"	۵۱° ۲۰' ۱۵"



شکل ۵. منطقه شهری تهران با ایستگاه‌های آب‌وهواشناسی (نقاط سبز) و کیفیت هوا (نقاط قرمز). مربع نشان داده شده در وسط تصویر با خط چین سلول شبکه 10 km^2 مربوط به WRF-Chem که برای ارزیابی اجرای مدل شیمیایی استفاده شده را نشان می‌دهد. برای مقایسه، میانگین ۳ ایستگاه قرار گرفته در کادر در نظر گرفته شد.

جدول ۴. مقایسه مشاهدات (میانگین برای سه ایستگاه) با حالت پایه (WRF_BEP) برای مدت زمان مدل سازی ۱۷ تا ۲۳ جولای ۲۰۱۶. اریبی مطلق (Bias_abs) و نسبی (Bias_rel)، ضریب همبستگی R و اریبی مطلق برای شب و روز محاسبه شده است. نتایج به دست آمده برای آلاینده‌های ثانویه (ازن) و اولیه (CO , NO_2 , SO_2) و همچنین پارامترهای هواشناسی دمای دو متری (T_2) و سرعت باد (U10) نشان داده شده است.

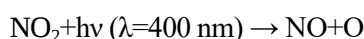
	OBS	WRF_BEP	Bias_abs	Bias_rel	R[-]	Bias_night	Bias_day
$\text{O}_3[\text{ppb}]$	۳۱/۳۷	۲۹/۷۶	-۱/۶	-۰/۰۵	۰/۷۸	-۶/۱۱	۱/۹۲
$\text{SO}_2[\text{ppb}]$	۷/۹۸	۶/۸۳	-۱/۱۵	-۰/۱۴	۰/۶۵	-۰/۱۳	-۱/۹۵
$\text{NO}_2[\text{ppb}]$	۳۴/۰۱	۲۶/۵۱	-۷/۴۹	-۰/۲۳	۰/۷۳	-۴/۶۹	-۹/۶۹
$\text{CO} [\text{ppb}]$	۲۲۴/۷۶	۲۴۳/۱۳	۱۸/۳۷	-۰/۰۸	۰/۲۵	۵۲/۳	-۸/۲۹
$T_2 [^\circ\text{C}]$	۳۱/۸۲	۳۴/۲۱	۲/۳۹	۰/۰۷	۰/۸۸	-	-
U10 [m/s]	۱/۷۷	۱/۹۲	۰/۱۵	۰/۰۸	۰/۴۶	-	-

میانگین تغییرات روزانه ازن، CO ، NO_2 و SO_2 برای شبیه سازی حالت پایه (WRF_BEP) محاسبه شده و با مشاهدات (OBS) مقایسه شد (شکل ۶).

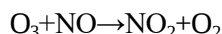
شکل گیری و حذف ازن در تروپوسفر به طور عمده ناشی از ترکیب اکسیژن اتمی و اکسیژن مولکولی در حضور یک عامل سوم جذب کننده انرژی (M) است که M می تواند نیتروژن یا اکسیژن مولکولی و حتی ذرات، سطوح یا مولکول های گاز ردیاب باشد (معادله ۱). اتم های اکسیژن به طور عمده از تجزیه نوری NO_2 (معادله ۲) به دست می آیند که طول موج آستانه برای تجزیه NO_2 و تولید حالت پایه اتم های NO و O دارای مقدار $397/8$ نانومتر است. به دلیل واکنش های تیتراسیون انجام گرفته با NO در غروب، ازن کم شده و دوباره تبدیل به NO_2 می شود (معادله ۳) که باعث می شود چرخه نیتروژن بسته شود. با توجه به معادلات ۱ تا ۳ به تنهایی، هیچ تولید خالصی از ازن مشاهده نمی شود و واکنش در حالت تعادل قرار دارد.



معادله ۱



معادله ۲



معادله ۳

با مقایسه ضرایب سرعت واکنش می‌توان مشاهده کرد که از بین رفتن ازن به‌طور قابل توجهی سریع‌تر از تولید ازن در معادله ۲ رخ می‌دهد. برای تولید خالص ازن حضور اکسیدهای نیتروژن به‌تنهایی کافی نیست و عامل سوم M مورد نیاز است. اطلاعات بیشتر درباره روابط شیمیایی تشکیل‌دهنده ازن را می‌توان در مطالعه فینالیسون و پیتس^۱ (۱۹۹۹: ۲۶۴) یافت.

غلظت ازن حداکثری در ایستگاه‌های اندازه‌گیری در دوره مدل‌سازی بین ۴۵ تا ۸۵ ppb متغیر است. مدل برآورد کمتری از ازن در طول شب و برآورد بیشتری از ازن در طول روز را نشان داد (جدول ۴ و شکل ۶ الف). غلظت بیش از حد پایین ازن در طول شب ممکن است به دلیل برآورد کمتر غلظت ازن در لایه باقی‌مانده یا اختلاط پایین‌سو خیلی ضعیف ازن از لایه باقیمانده به سمت سطح باشد. از آنجاکه ازن در لایه باقی‌مانده شبانه با تیتراسیون و نهشت خشک مصرف و حذف نمی‌شود، غلظت در طول شب در آنجا بیشتر از نزدیک سطح است. اهمیت اختلاط عمودی برای غلظت‌های شبانه ازن در نزدیکی سطح در مطالعات متعددی گزارش شده است (کلین^۲ و همکاران، ۲۰۱۴؛ ژانگ و راثو^۳، ۱۹۹۹). قطعی نبودن کلی غلظت‌های شبیه‌سازی شده ازن در مناطق عرض‌های میانی با چندین مدل میان‌مقیاس کیفیت هوا را ایم^۴ و همکاران (۲۰۱۵) بررسی کرده‌اند. افزون بر کیفیت مکانیسم شیمی، پارامتر کردن نهشت خشک و کیفیت عمومی پیش‌بینی هواشناسی، عدم قطعیت موجود در لیست نشر پیش‌ماده‌ها، می‌تواند دلیل خطا در غلظت‌های ازن شبیه‌سازی شده باشد.

برای گونه‌های شیمیایی با طول عمر بالا مانند CO (شکل ۶ ب)، غلظت‌های بسیار پایین در طول روز زمانی که اختلاط خوب هوا وجود دارد، تا حدودی می‌تواند به مقادیر مرزی بیش از حد پایین نسبت داده شود. پیک CO در ساعت ۷ صبح، با یک برآورد بیشتر WRF_BEP به اندازه ۷۶ ppb (۲۲٪) بسیار خوب نمایش داده شده است. برای گونه‌های با طول عمر کوتاه‌تر، مانند NO₂ اثر شرایط مرزی کمتر است (جیوردانو^۵ و همکاران، ۲۰۱۵). درباره NO₂، غلظت صبح به‌خوبی بازتولید می‌شود، اما WRF_BEP تمایل به برآورد کمتر مقادیر روزانه تا بیش از ۴۰٪ دارد (شکل ۶ ج). برآورد بیشتر اختلاط عمودی در روز ممکن است یکی از دلایل برآورد کمتر NO₂ نزدیک سطح باشد. اگر NO بیشتری با اختلاط روزانه در نزدیکی سطح حذف شود، NO کمتری برای تولید NO₂ در نزدیکی سطح، در دسترس است (سنفیلد و پاندیس^۶، ۲۰۱۲: ۱۷۵).

غلظت‌های SO₂ همانند NO₂ برای دوره‌های شبانه بهتر شبیه‌سازی شده و تمایل به برآورد کمتر در طول دوره روز مشاهده می‌شود؛ اما به‌نظر می‌رسد روند تغییرات (شکل ۶ د) به‌خوبی بازتولید شده است. اگرچه به‌نظر می‌رسد پروفایل‌های روزانه گازهای خروجی بسیار خوب تولید می‌شود، برآورد بیشتر در طول ساعات پرتردد ممکن است ناشی از این واقعیت باشد که تکامل روزانه لایه مرزی کمی تأخیر دارد که به سرعت منجر به برآورد کمتر اختلاط می‌شود.

اریبی نسبی برای ترکیبات اولیه و ثانویه شبیه‌سازی شده از ۰/۵- برای ازن تا ۰/۲۳- برای NO₂ است، اندازه اریبی در روز در مقایسه با اریبی شبانه برای NO₂ و SO₂ برخلاف CO و ازن بیشتر است. همبستگی بین WRF_BEP و OBS به‌جز برای CO بیشتر از ۰/۵ است.

1- Finlayson-Pitts & Pitts Jr

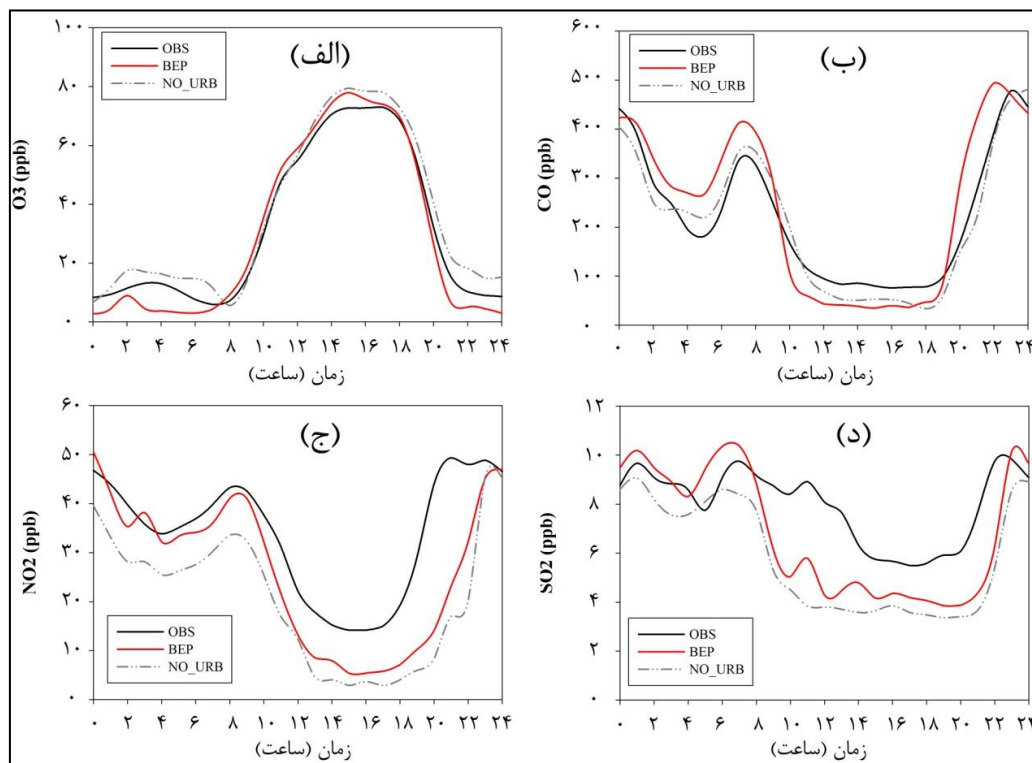
2- Klein

3- Zhang & Rao

4- Im

5- Giordano

6- Seinfeld & Pandis



شکل ۶. تغییرات روزانه غلظت مدل سازی شده ازن (الف)، CO (ب)، NO₂ (ج)، SO₂ (د) در یک شبکه شهری با استفاده از BEP (قرمز) در مقایسه با میانگین مشاهدات از ایستگاه‌های اندازه‌گیری واقع در داخل آن سلول شبکه‌ای (مشکی). منحنی‌ها نشان‌دهنده مقادیر میانگین برای دوره ۱۷ تا ۲۳ جولای ۲۰۱۶ است.

به‌طور کلی، با عملکرد بهبود یافته به‌طور میانگین درجه حرارت ۲/۳۹ درجه سانتی‌گراد در طول روز بیشتر برآورد شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که سرعت باد پایین مشاهده‌شده برای دوره تابستانی مورد بررسی، تا حدودی توانسته با WRF_BEP بازتولید شود.

ضریب همبستگی برای دما بیشتر از ۰/۵ است؛ اما این ضریب برای سرعت باد کمتر از ۰/۵ را نشان می‌دهد. اگرچه تفکیک افقی شبکه‌ای ۱/۳۳ کیلومتر برای شبیه‌سازی الگوی جریان در مناطق ناهموار نامناسب به‌نظر می‌رسد؛ با این وجود آزمایش‌های بیشتر نشان داد که WRF_BEP توانایی بازسازی مسیرهای باد و وزش باد در این منطقه را دارد؛ همچنین خطای مقادیر مطلق، هدف اصلی نوشتار پیش رو را مختل نمی‌کند؛ زیرا این مطالعه به‌طور عمده تغییرات نسبی بین سناریوها و حالت پایه را بررسی کرده است.

نتایج شبیه‌سازی‌های عددی

اثرات روی پارامترهای هواشناسی

مقادیر میانگین دمای پتانسیل ۲ متری (T₂)، سرعت باد ۱۰ متری (U₁₀)، انرژی جنبشی تلاطمی (TKE) و ارتفاع لایه مرزی سیاره‌ای (PBLH) و همچنین تابش طول موج کوتاه پایین‌سو و بالاسو (SW) برای ارائه اثر تغییرات کاربری و سطوح بر این متغیرها در ادامه آورده شده است (جدول ۵). رفتار پارامترهای TKE و PBLH مطالعه شده‌اند؛ زیرا تبادل تلاطمی بر توزیع و رقیق‌سازی قائم آلاینده‌های اولیه درون تاج‌پوشش شهری تأثیر می‌گذارد. انرژی جنبشی تلاطمی به‌صورت پیش‌آگهی محاسبه شده و برای تعیین ضریب پخش پیچکی در طرح لایه مرزی MYJ استفاده می‌شود (جانکیک^۱، ۱۹۹۴؛ جانکیک، ۲۰۰۱: ۴۰). ارتفاع لایه مرزی سیاره‌ای به‌صورت ارتفاعی

تعریف می‌شود که در آن عبارت $\text{TKE} \times 2$ اولین بار به کمتر از $0.2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ افت می‌کند (یامادا^۱، ۱۹۸۲). دوره میانگین‌گیری ۱۷ تا ۲۳ جولای ۲۰۱۶ است. میانگین روزانه (ساعت ۰۷:۰۰ تا ۲۰:۰۰) و میانگین شبانه (ساعت ۲۱:۰۰ تا ۰۶:۰۰) برای بررسی‌های بیشتر محاسبه شده است (جدول ۵).

به‌طور میانگین، به‌ترتیب دمای هوا، $3/37$ درجه سلسیوس و $1/7$ درجه سلسیوس برای سناریو آلبیدو و پارک کاهش می‌یابد. افزایش در بازتاب سطح (آلبیدو) باعث کاهش شدیدتر دما در طول روز نسبت به دوره شبانه می‌شود. با این حال، در افزایش پوشش گیاهی شهری (پارک) اثر خنک‌کننده در طول شب، بهتر از سناریو آلبیدو است. برای سناریو تراکم، برای روز و شب، تنها یک اثر جزئی در نوسان دما مشاهده شد.

میانگین سرعت باد در طول دوره شبیه‌سازی پایین و کاهش نسبی از حالت پایه به آلبیدو کمابیش 40% است. چه‌بسا کاهش سرعت باد ناشی از این واقعیت باشد که دمای نزدیک به سطح پایین‌تر در شهر برای حالت آلبیدو منجر به ازدست‌رفتن جمله تولید شناوری در معادله تولید TKE شود که باعث کاهش سرعت اصطکاکی u^* می‌شود (استال^۲، ۱۹۸۸: ۶۷). برای سناریو افزایش پوشش گیاهی شهر، افزایش کوچکی در U_{10} در مرکز شهر، به‌دلیل کاهش ارتفاع زبری به‌سبب حذف ساختمان‌ها دیده می‌شود. به‌نظر این اثر می‌رسد اثرات دمایی را بیشتر کند. سناریو تراکم تأثیری بر سرعت باد نشان نداد.

درباره میانگین روزانه، می‌توان کاهش TKE حدود $0.23 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ و کاهش PBLH به‌ترتیب حدود 292 - متر و 110 - متر برای سناریو آلبیدو و پارک را مشاهده کرد. کاهش عمده در اختلاط تلاطمی و ارتفاع لایه مرزی را می‌توان به سناریو آلبیدو با یک کاهش شبیه‌سازی شده TKE به‌اندازه $0.34 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ و کاهش PBLH ، 432 - متر در روز نسبت داد. کاهش ارتفاع لایه مرزی سیاره‌ای برای سناریو افزایش پوشش گیاهی شهری (پارک) در طول روز حدود 165 - متر و در طول شب حدود 42 - متر است. اثر لایه مرزی شبانه بزرگ‌تر می‌تواند به خنک‌سازی به‌وسیله تبخیر در سطوح پوشش گیاهی در شب منجر شود.

هنگام کاهش تراکم ساختمان (تراکم)، WRF-Chem اثر جزئی بر TKE و PBLH نشان می‌دهد که می‌تواند صرف‌نظر شود. افزایش آلبیدو مصالح ساختمانی به افزایش تابش طول موج کوتاه بازتابی منجر می‌شود. برای حالت پایه و تراکم، به‌طور متوسط حدود 15% از میانگین روزانه تابش طول موج کوتاه از سطح بازتاب می‌شود، درحالی‌که این مقدار برای پارک حدود 20% و برای آلبیدو به حدود 40% می‌رسد.

جدول ۵. اثر سناریوهای کاهشی UHI بر دمای پتانسیل دو متری (T2)، سرعت باد ده متری (U10)، انرژی جنبشی تلاطمی (TKE)، ارتفاع لایه مرزی سیاره‌ای (PBLH) و تابش طول موج کوتاه پایین‌سو و بالاسو در سطح (SW) در مرکز شهر. مقادیر برای میانگین دوره مدل‌سازی ۱۷ تا ۲۳ اوت ۲۰۱۶ ارائه شده است.

scenario	$\text{T2 (}^\circ\text{C)}$	$\text{TKE (m}^2/\text{s}^2)$	SW_D (W/m)	SW_U (W/m)	U10 (m/s)	PBLH (m)
control	۳۴/۲۱	۰/۴۴	۳۷۳/۸۹	۵۶/۲	۱/۷۷	۱۲۰۶/۵۱
	(۲۷/۹۲، ۳۹/۱۵)	(۰/۲۴، ۰/۵۹)			(۱/۱۷، ۲/۲۴)	(۸۷۶/۹۵، ۱۴۶۵/۴۵)
albedo	۳۰/۸۴	۰/۲۰	۳۷۹/۹۷	۱۵۰/۵	۱/۲۴	۹۱۴/۲۴
	(۲۶/۴۱، ۳۴/۳۲)	(۰/۱۶، ۰/۲۵)			(۰/۸۲، ۱/۵۷)	(۷۶۳/۶۶، ۱۰۳۲/۵۵)
park	۳۲/۵۱	۰/۲۱	۳۷۴/۹۳	۷۳/۴	۱/۸۲	۱۰۹۵/۷۱
	(۲۶/۱۳، ۳۷/۵۲)	(۰/۱۱، ۰/۲۷)			(۱/۰۶، ۲/۴۱)	(۸۳۴/۹۹، ۱۳۰۰/۵۶)
density	۳۳/۹۸	۰/۴۳	۳۷۳/۹۰	۵۴/۷	۱/۷۳	۱۲۱۶/۷۴
	(۲۷/۶۱، ۳۸/۹۸)	(۰/۲۳، ۰/۵۸)			(۱/۱۱، ۲/۲۱)	(۸۷۱/۳۴، ۱۴۸۸/۱۲)

تفاوت در تابش بازتابی طول موج کوتاه (SW_UP) بین پارک و حالت پایه می‌تواند به تغییر آلودگی برای مناطق ساخته‌شده (۰/۱۵) به مقادیر چمن‌زار (۰/۲۰) مرتبط شود. کمابیش نبود تفاوت در تابش خورشیدی بین حالت پایه و تراکم نیز می‌تواند تأثیر بسیار کم این سناریو روی درجه حرارت را نشان دهد. به نظر می‌رسد که تغییر تراکم ساختمان به اندازه ۱٪ کوچک تغییرات غیر معنی‌داری روی درجه حرارت، سرعت باد و اختلاط در مدل تاج‌پوشش شهری BEP ایجاد کند.

اثر بر غلظت آلاینده‌ها

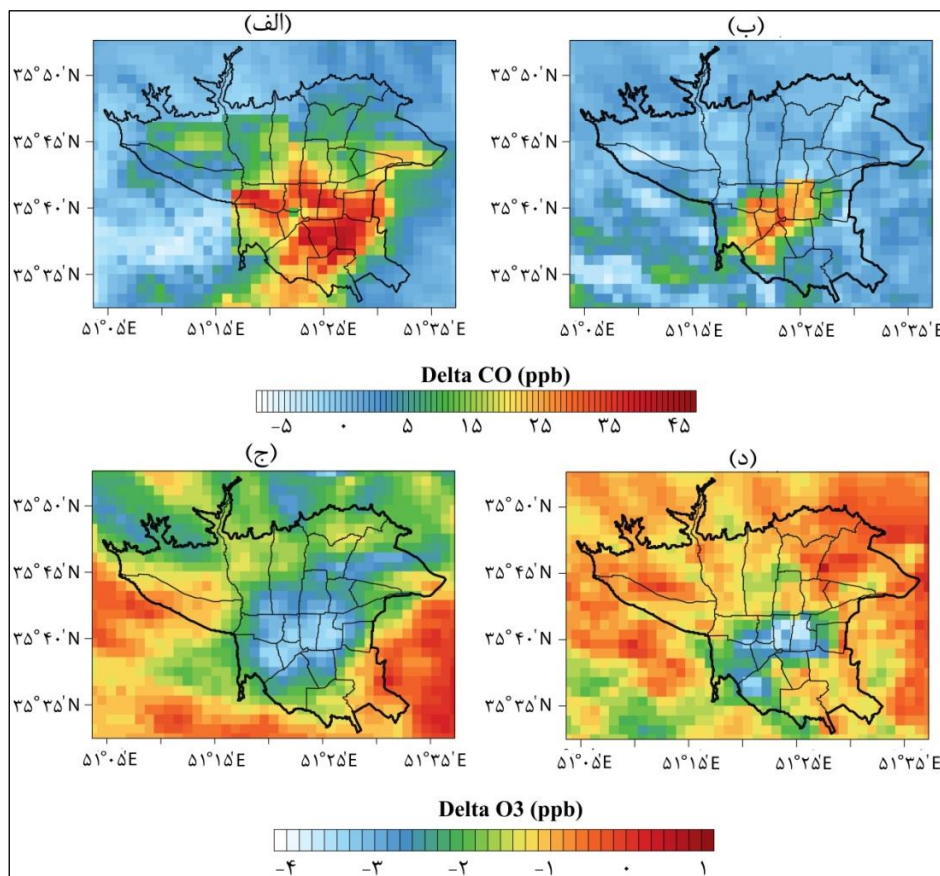
مقادیر میانگین غلظت‌های نزدیک به سطح (~۱۰ متری) مربوط به SO_2 , NO , NO_2 , CO و ازن در بازه زمانی شبیه‌سازی (۱۷ تا ۲۳ جولای) براساس مقادیر میانگین در مرکز شهر برای حالت پایه و سه سناریو محاسبه شده است (جدول ۶). به‌طور کلی، کاهش دمای هوای نزدیک به سطح، باعث افزایش آلاینده‌های اولیه مانند NO , SO_2 و CO می‌شود. هرچند NO_2 به‌طور عمده از نشر اولیه سرچشمه می‌گیرد، اما این آلاینده از تیتراسیون NO نیز حاصل می‌شود. درباره NO , SO_2 و CO ، قوی‌ترین تأثیر در حالت آلودگی یافت می‌شود. افزایش مقدار متوسط غلظت NO به اندازه ۲۲٪، SO_2 به بیش از ۴٪ و افزایش مقدار متوسط CO در این سناریو به حدود ۱۹٪ می‌رسد. افزایش پوشش گیاهی شهری (پارک) به افزایش غلظت هرسه ترکیب به ترتیب به اندازه ۱۰٪، ۱٪ و ۱۰٪ منجر می‌شود. دی‌اکسید نیتروژن برای سناریو آلودگی و پارک به ترتیب به میزان ۱۶٪ و ۵٪ افزایش یافته است. با این حال کاهش دمای هوا می‌تواند به کاهش غلظت متوسط ازن به بیش از ۵٪ (آلودگی) و ۱۰٪ (پارک) منجر شود. اثرات کوچک سناریو تراکم ساختمانی بر متغیرهای هواشناسی (جدول ۵) منجر به تأثیرات جزئی بر غلظت آلاینده‌ها می‌شود؛ بنابراین، تراکم در بحث‌های مطرح‌شده در ادامه این مقاله حذف شد.

یک تصویر بزرگ‌نمایی‌شده از داخلی‌ترین دامنه مدل WRF-Chem که به‌طور کامل منطقه شهری تهران واقع در مرکز دامنه را دربر می‌گیرد، با تفکیک افقی ۱/۳۳ کیلومتر نشان داده شده است (شکل ۷). در این تصویر اثرات فضایی سناریوها در منطقه شهری تهران برای CO (الف و ب) و ازن (ج و د) نشان داده شده است. رنگ‌های مختلف اثرات را بر غلظت نزدیک به سطح نشان می‌دهد که برای آلاینده‌های اولیه مثبت و برای آلاینده‌های ثانویه منفی است.

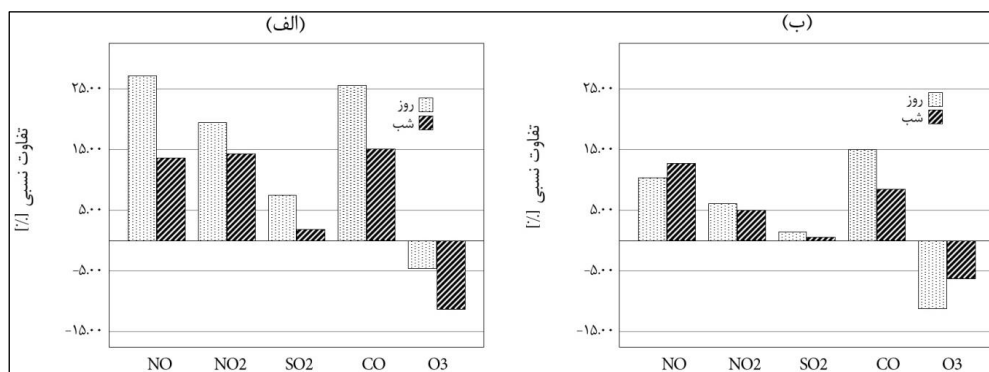
درحالی‌که اثرات روی آلاینده‌های اولیه برای سناریو آلودگی، با حداکثر افزایش غلظت ۴۶ ppb (۱۹٪) مشخص‌تر است، وضعیت برای ازن با حداکثر کاهش میانگین ۳/۱۵ ppb (۱۱٪) برای سناریو پارک، متفاوت است؛ افزون بر این، میانگین نسبی تفاوت غلظت بین سناریو و حالت پایه (کنترل) به‌طور جداگانه برای شب و روز آورده شده است (شکل ۸).

جدول ۶. تأثیر اقدامات طراحی‌شده برای کاهش جزیره حرارتی بر میانگین دوره شبیه‌سازی، میانگین غلظت روزانه و شبانه NO , NO_2 و CO و ازن در مرکز شهر برای پایین‌ترین سطح مدل (~۱۰ متری). مقادیر برای میانگین دوره مدل‌سازی ۱۷ تا ۲۳ اوت ۲۰۱۶ به صورت ppb ارائه شده است.

Density	Park	Albedo	Control	Scenario
(۴/۶۵، ۹/۳۸) ۷/۳۰	(۵/۱۴، ۱۰/۲۱) ۷/۹۸	(۵/۱۸، ۱۱/۷۶) ۸/۷۸	(۴/۵۶، ۹/۲۵) ۷/۱۹	NO [ppb]
(۳۸/۲۲، ۱۷/۸۴) ۲۶/۸۱	(۳۹/۴۶، ۱۸/۹۲) ۲۷/۹۶	(۴۲/۹۲، ۲۱/۲۹) ۳۰/۸۱	(۳۷/۵۶، ۱۷/۸۳) ۲۶/۵۱	NO_2 [ppb]
(۸/۷۹، ۵/۳۲) ۶/۸۵	(۸/۸۳، ۵/۴۰) ۶/۹۱	(۸/۹۴، ۵/۷۲) ۷/۱۴	(۸/۷۸، ۵/۳۲) ۶/۸۳	SO_2 [ppb]
(۳۵۱/۰۸، ۱۸۰/۲۰) ۲۵۵/۳۹	(۳۶۸/۱۴، ۱۹۲/۵۸) ۲۶۹/۸۳	(۳۹۰/۷۰، ۲۱۰/۲۵) ۲۸۹/۶۵	(۳۳۹/۴۷، ۱۶۷/۴۳) ۲۴۳/۱۳	CO [ppb]
(۸/۱۸، ۴۶/۰۵) ۲۹/۳۹	(۷/۸۲، ۴۱/۳۷) ۲۶/۶۱	(۷/۴۰، ۴۴/۴۵) ۲۸/۱۵	(۸/۳۴، ۴۶/۵۹) ۲۹/۷۶	O_3 [ppb]



شکل ۷. تفاوت مطلق بین اجرا سناریو و حالت پایه برای میانگین غلظت شبیه‌سازی شده CO (الف و ب) و ازن (ج و د) برحسب ppb در پایین‌ترین سطح مدل. سناریوی آلودگی در سمت چپ و سناریو پارک در سمت راست نشان داده شده است (خروجی نرم‌افزار این.سی.ال).



شکل ۸. تفاوت نسبی بین مقادیر میانگین شبیه‌سازی شده در سناریو آلودگی (الف) و پارک (ب) با حالت پایه (کنترل). مقادیر روز با رنگ خاکستری و مقادیر شبانه با رنگ سیاه نشان داده شده است. مقادیری که برای NO، NO₂، CO و O₃ با مقادیر منفی محاسبه می‌شوند، نشان‌دهنده کاهش نسبی و مقادیر مثبت نشان‌دهنده افزایش در غلظت میانگین نزدیک به سطح است.

گرچه غلظت مطلق NO₂، SO₂ و CO در طول شب بیشتر از روز است، به‌جز برای NO در سناریو افزایش پوشش گیاهی، تأثیرات نسبی کاهش دما بر غلظت در طول روز بیشتر است. افزون بر وابستگی شدید به منابع گسیل محلی، غلظت روزانه NO_x، SO₂ و CO برای سناریوها نسبت به شبیه‌سازی حالت پایه بیشتر است؛ زیرا هردو سناریو باعث کاهش دمای نزدیک زمین و در نتیجه کاهش اختلاط تالاطمی می‌شوند. این اثر برای سناریو آلودگی از سناریو افزایش پوشش گیاهی شهری (پارک) برجسته‌تر است. درباره سناریو افزایش پوشش گیاهی

شهری، به جز برای NO، اثرات نسبی روزانه قوی تر است؛ افزون بر این، به هر حال این شکل نشان می دهد که غلظت های عموماً بسیار کم در شب (جدول ۶)، منجر به تغییرات کوچک می شود که اثرات نسبی بزرگ را به دنبال دارد. از آنجاکه در طول روز، ازن اضافی می تواند به علت افزایش میزان فوتولیز روی سطوح با بازتاب بالا شکل بگیرد، در این مطالعه افزایش آلودگی مناطق ساختمانی باعث کاهش مشخص تری از متوسط غلظت ازن در طول شب نسبت به طول روز شده است.

تغییرات روزانه

تفاوت میانگین ساعتی نسبی (میانگین گیری شده روی یک ساعت مشابه از روز برای همه روزهای مورد مطالعه) بین سناریوها (پارک، آلودگی) و حالت پایه برای غلظت های نزدیک به سطح ازن، NOx و CO نشان داده شده است (شکل ۹).

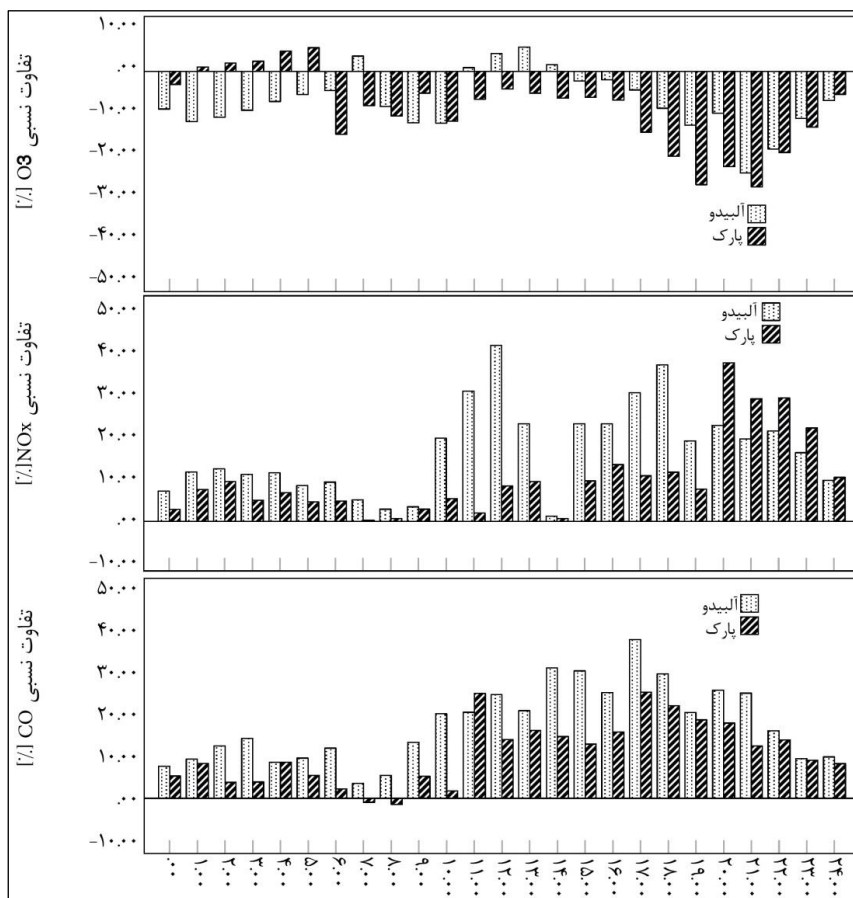
به طور کلی، دوره های روزانه همان نتایجی را که پیش از این بیان شده است، با کاهش در ترکیبات ثانویه و افزایش در ترکیبات اولیه نشان می دهند. کاهش شدید غلظت ازن برای سناریو افزایش پوشش گیاهی شهری در ساعات عصر می تواند با خنک سازی معنی دارتر سطح بالای سطوح سبز نسبت به سطوح مصنوعی توضیح داده شود. اختلاط تلاطمی در هردو سناریو به طور خاص پیش از ظهر کاهش می یابد که اختلاط پایین سو ازن از سطوح بالاتر در این زمان را کاهش می دهد (کلین^۱ و همکاران، ۲۰۱۴؛ ولاسکو^۲ و همکاران، ۲۰۰۷)؛ افزون بر این، مقدار زیادی از ازن با تیتراسیون NOx حذف می شود. به طور کلی، بالاترین کاهش نسبی ازن با بالاترین سطوح NOx مطابقت دارد (شکل ۹).

بیشترین افزایش نسبی روزانه NOx می تواند به NO گسیل شده که از رقیق سازی آن به علت اختلاط اتمسفری پایین جلوگیری می شود، نسبت داده شود. غلظت NO در ارتباط با NO₂ است که در طول روز به تدریج رشد می کند. NO که در عصر گسیل می شود، به سرعت با ازن واکنش می دهد تا NO₂ را دوباره تشکیل دهد که منجر به افزایش نسبی بالا NO₂ در آنجا می شود (شکل ۹). درباره CO، حداکثرهای صبح برای آلودگی به علت کاهش قابل ملاحظه ای از افزایش دمای سطح در سطوح با بازتاب بالا در ساعات صبح (شکل ۹) بالاتر است که به تبادل تلاطم عمودی کاهش یافته در طول این زمان منجر می شود.

برای حالت آلودگی، افزایش کوچکی در بیشینه برای میانگین نسبی تغییرات ساعتی ازن را می توان در بین ساعات ۱۱:۰۰ تا ۱۴:۰۰ مشاهده کرد (شکل ۹). این اثر را می توان با تابش طول موج کوتاه بازتاب شده بالا (جدول ۵) توضیح داد که به افزایش در میانگین ساعتی حداکثر غلظت ازن در دوره شبیه سازی تا ۵/۹۴٪ منجر می شود. شکل ۱۰ نشان دهنده افزایش نسبی بیشینه های روزانه غلظت ازن بین ساعات ۱۱:۰۰ تا ۱۴:۰۰ برای هریک از روزهای مدل سازی است. برای سناریوی سپیدایی تفاوت ها می تواند به ۱۰ ppb (۹٪) هم برسد. برای سناریو افزایش پوشش گیاهی شهری (پارک)، کاهش یکنواختی در غلظت های بیشینه ازن برای تمام روزها قابل مشاهده است.

ترکیبات اولیه

غلظت آلاینده های اولیه شبیه سازی شده استخراج شده از پایین ترین تر از شبیه سازی، به صورت منفی با متغیر دینامیکی TKE در همان سطح همبستگی دارد. افزایش در جمله انرژی جنبشی تلاطمی (TKE) موجب کاهش CO و NOx می شود (شکل ۱۱).



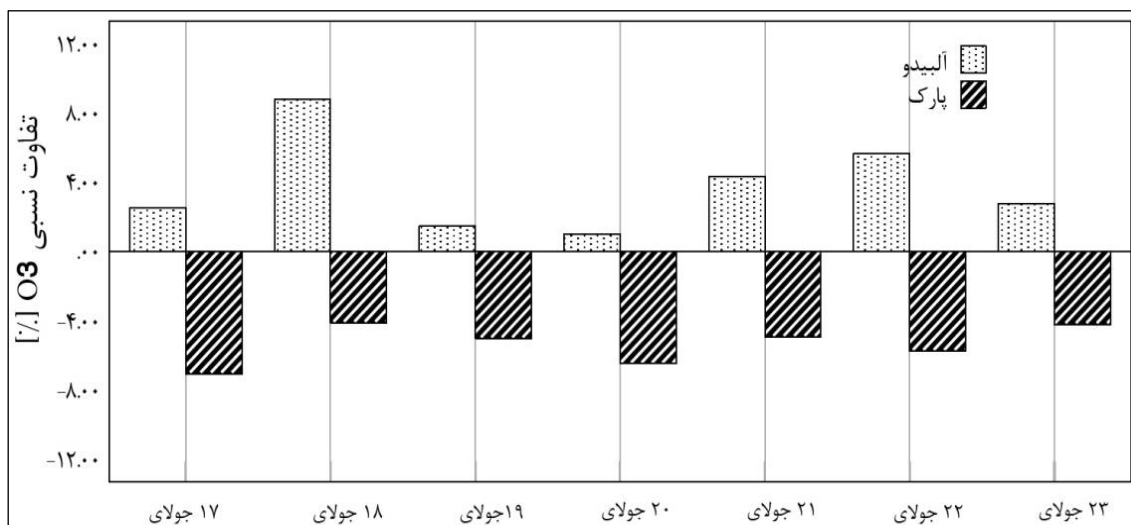
شکل ۹. اختلاف نسبی میانگین ساعتی دوره‌های روزانه، در غلظت ازن، NOx و CO (ppb) بین سناریوهای (آلبیدو و پارک) و حالت پایه (کنترل)، برای میانگین سه سلول شبکه‌ای شهری در مدل برای پایین‌ترین تراز مدل (۱۰ متر).

اگرچه سناریو افزایش پوشش گیاهی شهری (پارک) بیشترین تأثیر را در TKE نشان می‌دهد، اثر این سناریو روی غلظت CO و NOx کوچک‌تر از سناریو سپیدایی است (شکل ۷). اثر به‌دام‌افتادگی در دره‌های خیابانی زمانی که ویژگی‌های بازتابی سقف‌ها و دیوارها اصلاح می‌شود، همچنان مؤثر است، درحالی‌که در سناریو پارک ساختمان‌ها به‌طور کامل با پوشش گیاهی طبیعی جایگزین می‌شوند. پوشش‌های طبیعی تمایل دارند گرمای محسوس را به گرمای نهان تبدیل کنند که به‌نوبه خود، دمای زمین و ارتفاع متوسط لایه مرزی را کاهش می‌دهد. هیچ ارتباط مستقیمی بین غلظت آلاینده‌های اولیه و دما یافت نشد. با این حال تغییر در غلظت یک آلاینده به‌علت کاهش اختلاط لایه مرزی جو، می‌تواند اثرات ثانویه‌ای بر ترکیبات دیگر ازراه واکنش‌های شیمیایی ایجاد کند.

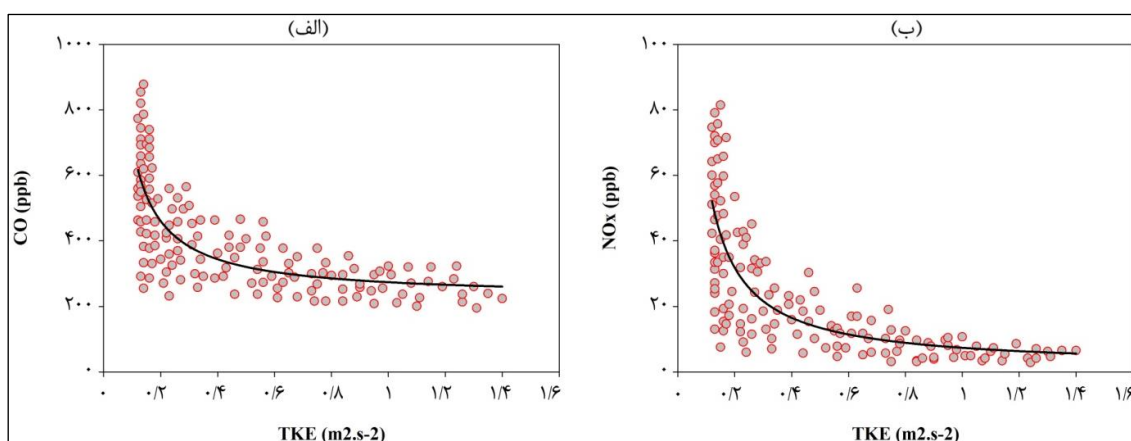
ترکیبات ثانویه

غلظت ازن پایین‌تر همراه با کاهش درجه حرارت به‌طور مستقیم نمی‌تواند با یک تغییر در دینامیک لایه مرزی، از آنجاکه برای آلاینده‌های اصلی CO و NOx معتبر است، توضیح داده شود.

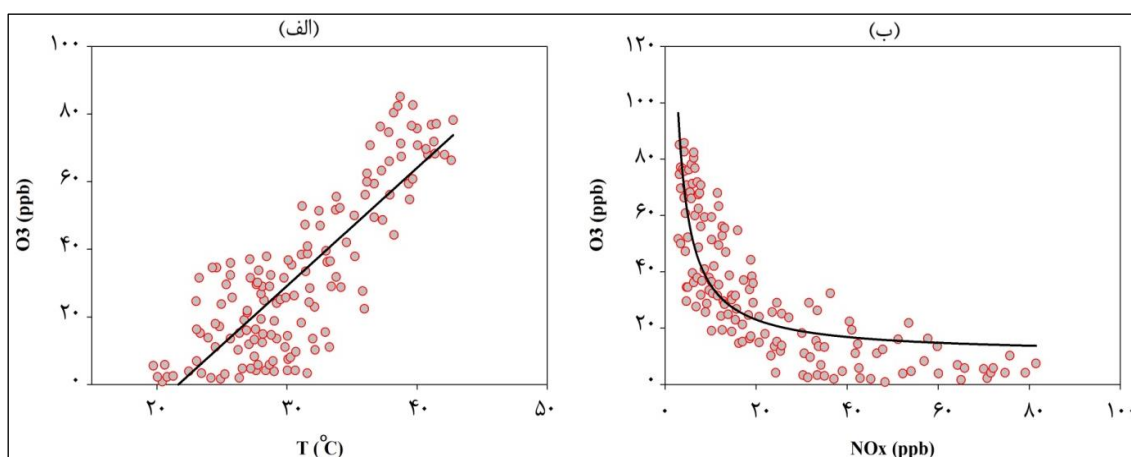
شکل ۱۲ دو نمونه را نشان می‌دهد که می‌تواند برای توضیح کاهش متوسط غلظت ازن که برای سناریوهای آلبیدو و پارک شبیه‌سازی شده است، استفاده شود. از یک‌سو، ازن رابطه لگاریتمی منفی با غلظت NO را نشان می‌دهد و NO بالاتر به دلیل اختلاط تلاطمی ضعیف‌تر منجر به نرخ بالاتر تیتراسیون NO می‌شود؛ از سوی دیگر، همبستگی ازن و دما، به‌صورت رگرسیون خطی مشاهده می‌شود. هیچ همبستگی معنی‌داری بین VOC های اولیه شبیه‌سازی‌شده (برای مثال فرمالدئید HCHO) و غلظت ازن یافت نشد.



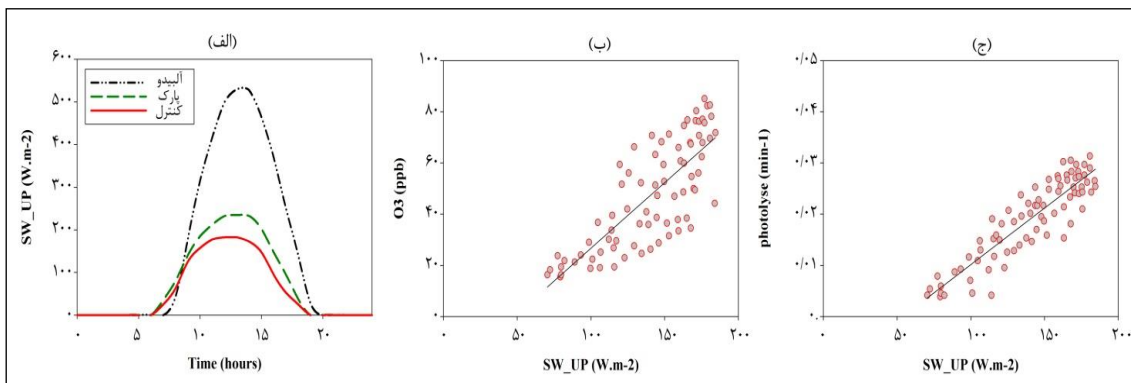
شکل ۱۰. تفاوت نسبی بین سناریو (آلبیدو و پارک) و حالت پایه (کنترل) برای غلظت ازن بین ساعت ۱۱:۰۰ و ۱۴:۰۰. نتایج سناریو آلبیدو با رنگ خاکستری و پارک با رنگ سیاه نمایش داده شده است.



شکل ۱۱. وابستگی غلظت آلاینده‌های اولیه CO (الف) و NOx (ب) به انرژی جنبشی تلاطمی (TKE) برای مقادیر ساعتی دوره شبیه‌سازی (۱۷ تا ۲۳ جولای ۲۰۱۶). مقادیر برای اجرای حالت پایه نمایش داده شده است.



شکل ۱۲. همبستگی بین غلظت NO [ppb] سطحی و غلظت ازن سطحی (الف) و همبستگی بین دما پتانسیل دومتري [C°] و غلظت ازن سطحی [ppb] (ب) برای خروجی ساعتی مدل در یک دوره شبیه‌سازی (۱۷ تا ۲۳ جولای ۲۰۱۶) (چپ). مقادیر برای اجرای کنترل نمایش داده شده‌اند.



شکل ۱۳. متوسط چرخه روزانه تابش طول موج کوتاه بازتاب شده (SW_UP) برای کنترل و دو سناریو (الف). همبستگی بین تابش طول موج کوتاه بازتابی SW_UP و غلظت سطح O_3 (ب) و نرخ فوتولیز O_3 (ج) برای خروجی ساعتی مدل برای حالت پایه (کنترل).

بحث

یکی از مهم‌ترین فاکتورهایی که واکنش‌های فتوشیمیایی در تروپوسفر را کنترل می‌کند، تابش طول موج کوتاه است (سنفیلد و پاندیس، ۲۰۱۲: ۱۷۵). این جنبه افزایش بیشینه سطحی ازن در طول روز بین ساعات ۱۱:۰۰ تا ۱۴:۰۰ هنگامی که بازتاب سطح افزایش می‌یابد، را توضیح می‌دهد (شکل ۹). افزایش آلبدو از ۰/۲ به ۰/۷ برای سقف و نمای ساختمان در مدل شهری، منجر به افزایش تابش طول موج کوتاه بازتابی می‌شود. این اثر برای سناریوی افزایش پوشش گیاهی شهری مشاهده نمی‌شود (شکل ۱۳). در مقایسه با سناریو افزایش پوشش گیاهی شهری، حالت آلبدو افزایش تابش طول موج کوتاه بازتابی تا ۱۹۰٪ را نشان می‌دهد. این مقدار اضافی انرژی، باعث تسریع در واکنش‌های فتوشیمیایی می‌شود و از این راه شکل‌گیری ازن را راه‌اندازی می‌کند. افزایش ازن برای دوره کوتاهی بین ساعات ۱۱:۰۰ تا ۱۴:۰۰، منجر به این نتیجه‌گیری می‌شود که میانگین روزانه غلظت ازن می‌تواند با استفاده از افزایش پوشش گیاهی شهری به‌جای سقف‌ها و نماهای با بازتاب بالا به‌طور مؤثرتری کاهش یابد. شکل ۱۳ رابطه خطی مثبت بین تابش طول موج کوتاه بازتابی (Wm^{-2}) و غلظت ازن نزدیک سطح (ppb) را نشان می‌دهد؛ همچنین رابطه مثبت بین متغیر SW_UP و نرخ فوتولیز (min^{-1}) از این جنبه پشتیبانی می‌کند.

براساس کار طاها (۱۹۹۷ ب)، غلظت ازن بیشینه بین ۱۴:۰۰ و ۱۶:۰۰ ساعت محلی برای منطقه شهری لس‌آنجلس و محیط اطراف آن زمانی که سپیدایی سطح سقف‌ها و دیوارها از ۰/۲ به ۰/۵ افزایش یافت با کاهش ۴/۷٪ روبه‌رو شد. در مطالعه‌ای مشابه، برای منطقه شهری ساکرامنتو (طاها، ۲۰۰۸)، زمانی که سپیدایی شهر به‌طور گسترده افزایش یافت، کاهش ۱۸ درصدی بیشینه ازن مشاهده شد. حداکثر کاهش دما در هر دو مطالعه به ترتیب به اندازه ۴/۵ و ۳ درجه سانتی‌گراد محاسبه شد. با این حال، در این مطالعه افزایشی در غلظت ازن تا ۹٪ برای سناریو آلبدو حدود ساعت ۱۳:۰۰ یافت شد. برخی از دلایل ممکن برای این تفاوت در اینجا را می‌توان با استفاده از همبستگی‌های نشان داده‌شده در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ بررسی کرد. در مرحله اول، افزایش بیشتری از سپیدایی سطح سقف و دیوارها از ۰/۲ به ۰/۷ (تاکاباشی و موریاما، ۲۰۰۷) وجود داشت که ۶۷٪ بیشتر از افزایش استفاده‌شده دو مطالعه دیگر (طاها، ۲۰۰۸ و ۱۹۹۷ الف) است. از طرفی کاهش نتیجه‌شده در حداکثر دمای هوای منطقه شهری تهران ۲/۱۷ درجه سانتی‌گراد محاسبه شد که حدود ۲/۳۳ تا ۰/۸۳ درجه سانتی‌گراد پایین‌تر از کاهش دما گزارش شده طاها (۲۰۰۸) بود.

کاهش میزان غلظت ازن در بیشتر زمان‌های روز (شکل ۹) به‌روشنی می‌تواند با کاهش دما که منجر به کاهش

تشکیل ازن می‌شود (شکل ۱۲)، توضیح داده شود. با این حال، برای تابش خورشیدی بالاتر بین ۱۰:۰۰ تا ۱۴:۰۰، تأثیر مقدار اضافی تابش طول موج کوتاه بازتابی تاحدودی می‌تواند اثرات دما بر شیمی در سناریو آلبیدو را جبران کند. چه‌بسا این مورد در پژوهش طاه‌ها و همکاران (۲۰۰۸)، جایی که کاهش دما بزرگ‌تر و افزایش تابش خورشیدی بازتابی کمتر از مورد این مطالعه است، وجود ندارد؛ همچنین، کاهش دمای بزرگ‌تر یافته‌شده در کار طاه‌ها و همکاران (۲۰۰۸)، می‌تواند منجر به کاهش بیشتر اختلاط تلامی در طول روز و در نتیجه افزایش بیشتر غلظت NOx در نزدیکی زمین شود. این به‌نوبه خود منجر به تیتراسیون بیشتر ازن در مقیاسه با مطالعه فعلی می‌شود. در نهایت، گسیل و نسبت VOC/NOx ممکن است برای مناطق مورد نظر متفاوت باشد و همچنین گسترش بیشتر شهرها در ایالات متحده و توپوگرافی‌های مختلف می‌تواند تأثیر تغییر سپیدایی شهری بر غلظت‌های ازن را تغییر دهد.

نگارندگان پژوهش حاضر با مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌ها با داده‌های مشاهداتی، تأکید دارند که مدل به‌طور کلی تغییرات ساعتی متغیرهای هواشناسی را به‌خوبی شبیه‌سازی می‌کند، اما برآورد بیشتر یا کمتر غلظت آلاینده هوا در طول دوره شبیه‌سازی را نشان می‌دهد (گراسمن و سوبرت و کلارک، ۲۰۱۳). یکی از دلایل روش مقایسه است؛ برون‌داده‌های شبیه‌سازی در ابتدای هر ساعت استخراج می‌شوند، درحالی‌که اندازه‌گیری‌ها به‌طور میانگین یا میانگین روزانه گزارش می‌شوند. دلیل دیگر برآوردهای شار انسانی و بیوژنیک است (اکبری و همکاران، ۲۰۰۱). موضوع دیگر مربوط به قسمت شبیه‌سازی است که هفت روز متوالی در طول دوره موج گرما را شامل می‌شود، درحالی‌که پراکندگی و شکل‌گیری آلاینده‌ها ممکن است در دوره زمانی طولانی‌ای رخ دهد. تنظیمات هواشناسی و شیمیایی مدل WRF/Chem، پیکربندی‌شده در اینجا منطقی است، اما تنظیمات دیگری نیز ممکن است منطقی باشد.

مطالعه حاضر آشکار کرده است که افزایش در آلبیدو و پوشش گیاهی شهری قادر به بهبود کیفیت هوا و به‌دنبال آن، کاهش روزانه غلظت متوسط ازن است. این پژوهش، یافته‌های مطالعاتی پیشین را پشتیبانی می‌کند (طاه‌ها، ۱۹۹۷؛ اکبری، ۲۰۰۱). به هر حال دربارهٔ بیشینه غلظت‌های ازن، افزایشی در حدود ۱۰٪ برای سناریو آلبیدو در زمان‌هایی که بیشینه ازن روزانه اتفاق می‌افتد، شبیه‌سازی شد. درحالی‌که طاه‌ها (۱۹۹۷؛ ب و ۲۰۰۸) کاهش در بیشینه ازن روزانه را گزارش داده‌اند. این را می‌توان به افزایش بیشتر سپیدایی اعمال‌شده در این مطالعه مرتبط دانست، درحالی‌که کاهش دمای شبیه‌سازی‌شده برای تهران به‌میزان قابل توجهی از شهرهای ایالات متحده در پژوهش طاه‌ها (۱۹۹۷؛ ب و ۲۰۰۸) کمتر بود.

نتیجه‌گیری

در نوشتار پیش رو آزمایش‌های شبیه‌سازی با استفاده از WRF-Chem جفت‌شده با مدل شهری چندلایه آرایش ساختمانی BEP برای شهر تهران برای یک بازه تابستانی در سال ۲۰۱۶ به‌منظور ارزیابی اقدامات کنترل جزیره حرارتی شهری که می‌تواند روی کیفیت هوای شهری اثرات جانبی داشته باشد، پیاده‌سازی و مطالعه شد. از آنجاکه این دوره خاص مطالعه موردی بارزی برای پیش‌بینی تأثیرات تغییرات آب‌وهوایی تابستانی در تهران را فراهم می‌آورد، انتخاب شده است (سودودی^۱ و همکاران، ۲۰۱۴).

اقدامات انتخاب‌شده می‌توانند هردو اثر مثبت و منفی بر غلظت و پراکندگی آلاینده‌های اولیه و ثانویه را داشته باشند. برای آلودگی ثانویه ازن، نتایج این شبیه‌سازی کاهش غلظت‌های نزدیک به سطح در حدود ۵٪ تا ۱۰٪ هنگام

استفاده از سناریو افزایش پوشش گیاهی شهری یا استفاده از سطوح با بازتابندگی بالا را نشان می‌دهد. درباره آلاینده‌های اولیه CO، SO₂ یا NO_x اثر مثبت دما کاهش یافته وارونه می‌شود. نتایج مدل نشان می‌دهد که کاهش دما تأثیر قابل توجهی بر ساختار دینامیکی لایه مرزی شهری دارد. کاهش انرژی جنبشی تلاطمی (TKE) به علت دمای پایین‌تر منجر به کاهش نرخ اختلاط تلاطمی و کاهش در ارتفاع لایه اختلاط می‌شود که غلظت سطحی بالاتر آلودگی‌های اولیه را در پی دارد. این موضوع به‌طور ویژه برای سناریویی که در آن سپیدایی سقف و دیوار ساختمان‌ها افزایش یافت (افزایش نسبی آلاینده‌های اولیه تا ۲۰٪) مشاهده شد.

با این حال، هدف نوشتار پیش رو، ارائه و پیشنهاد نظریه‌ای برای به‌کارگیری یک اقدام کاربردی ویژه نیست، از آنجاکه اثرات مختلف مثبت و منفی باید در برابر یکدیگر امتحان شوند و مطالعات دقیق‌تری برای چنین تصمیم‌گیری‌ای مورد نیاز است؛ این مطالعه موردی، شبیه‌سازی برای شهری در شرایط خاص آب‌وهوایی را فراهم می‌کند؛ زیرا برای شهرهایی با اندازه‌ها، مکان‌ها، تراکم جمعیت، شرایط گسیل یا شرایط هواشناسی مختلف، اقدامات مشابه ممکن است اثرات متفاوتی را بر کیفیت هوا داشته باشد؛ همچنین اثرات توضیح داده‌شده در پژوهش حاضر، تغییر در گسیل آلاینده‌ها را در نظر نمی‌گیرد که در عمل می‌تواند کارآمدترین راهبرد برای بهبود کیفیت هوا در شهر باشد؛ افزون بر این، نوشتار پیش رو در شرایط هواشناسی همراه با آسمانی صاف و دوره‌ای آفتابی تابستانی با سرعت باد کم صورت پذیرفته است.

پیشنهاد می‌شود پژوهشی برای ارزیابی اثرات افزایش سپیدایی سطح در طول یک سال برای مشاهده اثرات آن در فصل زمستان و در طول سال نیز انجام پذیرد. تنظیمات هواشناسی و شیمیایی مدل WRF/Chem، پیکربندی‌شده در اینجا منطقی است، اما تنظیمات دیگری نیز ممکن است منطقی باشد؛ همچنین، تعیین پارامترهای جایگزین برای دیدن اثرات سپیدایی سطح در یک رویکرد دوطرفه توزیع شده، مانند آنچه برای مطالعات بیشتر انجام خواهیم داد می‌تواند مفید باشد؛ همچنین پیشنهاد می‌شود اثرات سایر استراتژی‌های کاهش‌دهنده آب‌وهوای شهری و کیفیت هوا در رویکرد دوطرفه بررسی شود.

References

- Ackermann, I. J., Hass, H., Memmesheimer, M., Ebel, A., Binkowski, F. S. & Shankar, U. (1998). Modal aerosol dynamics model for Europe: Development and first applications. *Atmospheric environment*, 32 (17), 2981-2999.
- Akbari, H., Pomerantz, M. & Taha, H. (2001). Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar energy*, 70 (3), 295-310.
- Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International journal of climatology*, 23 (1), 1-26.
- Barlow, J. F., Halios, C. H., Lane, S. & Wood, C. R. (2015). Observations of urban boundary layer structure during a strong urban heat island event. *Environmental Fluid Mechanics*, 15 (1), 373-398.
- Chen, F., Kusaka, H., Bornstein, R., Ching, J., Grimmond, C., Grossman-Clarke, S., Loridan, T., Manning, K. W., Martilli, A. & Miao, S. (2011). The integrated WRF/urban modelling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems. *International Journal of Climatology*, 31 (2), 273-288.
- Emmons, L. K., Walters, S., Hess, P. G., Lamarque, J.-F., Pfister, G. G., Fillmore, D., Granier, C., Guenther, A., Kinnison, D. & Laepple, T. (2010). Description and evaluation of the Model for Ozone and Related chemical Tracers, version 4 (MOZART-4). *Geoscientific Model Development*, 3 (1), 43-67.
- Finlayson-Pitts, B. J. & Pitts Jr, J. N. (1999). *Chemistry of the upper and lower atmosphere: theory, experiments, and applications*. California. Elsevier.

- Freitas, S., Longo, K., Alonso, M., Pirre, M., Marecal, V., Grell, G., Stockler, R., Mello, R. & Sánchez Gácita, M. (2011). PREP-CHEM-SRC-1.0: a preprocessor of trace gas and aerosol emission fields for regional and global atmospheric chemistry models. *Geoscientific Model Development*, 4 (2), 419-433.
- Gazi, M. A. A. & Mondal, I. (2018). Urban Heat Island and its effect on Dweller of Kolkata Metropolitan area using Geospatial Techniques. *International Journal of Computer Sciences and Engineering*, 6 (10), 741-753.
- Giannaros, T. M., Melas, D., Daglis, I. A., Keramitsoglou, I. & Kourtidis, K. (2013). Numerical study of the urban heat island over Athens (Greece) with the WRF model. *Atmospheric Environment*, 73 (11), 103-111.
- Giordano, L., Brunner, D., Flemming, J., Hogrefe, C., Im, U., Bianconi, R., Badia, A., Balzarini, A., Baró, R. & Chemel, C. (2015). Assessment of the MACC reanalysis and its influence as chemical boundary conditions for regional air quality modeling in AQMEII-2. *Atmospheric Environment*, 115 (7), 371-388.
- Grell, G. A., Peckham, S. E., Schmitz, R., McKeen, S. A., Frost, G., Skamarock, W. C. & Eder, B. (2005). Fully coupled "online" chemistry within the WRF model. *Atmospheric Environment*, 39 (37), 6957-6975.
- Guenther, A., Jiang, X., Heald, C., Sakulyanontvittaya, T., Duhl, T., Emmons, L. & Wang, X. (2012). The Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature version 2.1 (MEGAN2.1): an extended and updated framework for modeling biogenic emissions. *Geoscientific Model Development*, 5 (6), 1471-1492.
- Hu, X.-M., Nielsen-Gammon, J. W. & Zhang, F. (2010). Evaluation of three planetary boundary layer schemes in the WRF model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 58 (6), 1831-1844.
- Im, U., Bianconi, R., Solazzo, E., Kioutsioukis, I., Badia, A., Balzarini, A., Baró, R., Bellasio, R., Brunner, D. & Chemel, C. (2015). Evaluation of operational on-line-coupled regional air quality models over Europe and North America in the context of AQMEII phase 2. Part I: Ozone. *Atmospheric Environment*, 115 (1), 404-420.
- Janjić, Z. I. (1994). The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *Monthly Weather Review*, 122 (6), 927-945.
- Janjić, Z. I. (2001). *Nonsingular implementation of the Mellor-Yamada level 2.5 scheme in the NCEP mesomodel NOAA/NWS/NCEP Off.* NOAA, USA.
- Klein, P. M., Hu, X.-M. & Xue, M. (2014). Impacts of mixing processes in nocturnal atmospheric boundary layer on urban ozone concentrations. *Boundary-layer meteorology* 150, 107-130.
- Lauwaet, D., De Ridder, K., Saeed, S., Brisson, E., Chatterjee, F., van Lipzig, N. P., Maiheu, B., & Hooyberghs, H. (2016). Assessing the current and future urban heat island of Brussels. *Urban Climate*, 15 (3), 1-15.
- Madronich, S. (1987). Photodissociation in the atmosphere: 1. Actinic flux and the effects of ground reflections and clouds. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 92 (8), 9740-9752.
- Martilli, A., Clappier, A. & Rotach, M. W. (2002). An urban surface exchange parameterisation for mesoscale models. *Boundary-Layer Meteorology*, 104 (9), 261-304.
- Mellor, G. L. & Yamada, T. (1982). Development of a turbulence closure model for geo-physical fluid problems. *Rev. Geophys*, 20 (4), 851-875.
- Mitchell, K. (2005). *The community NOAA-LSM-User's guide public release version 2.7. 1.* NOAA, USA.
- Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J. & Clough, S. A. (1997). Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102 (14), 16663-16682.
- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108 (455), 1-24.
- Peng, F., Wong, M., Nichol, J. & Chan, P. (2016). Historical GIS data and changes in urban morphological parameters for the analysis of urban heat islands in Hong Kong. *International*

- archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, XLI-B2 (12), 55-62.
- Salamanca, F., Martilli, A. & Yagüe, C. (2012). A numerical study of the Urban Heat Island over Madrid during the DESIREX (2008) campaign with WRF and an evaluation of simple mitigation strategies. *International Journal of Climatology*, 32 (15), 2372-2386.
- Santamouris, M., Synnefa, A. & Karlessi, T. (2011). Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. *Solar Energy*, 85 (12), 3085-3102.
- Sarrat, C., Lemonsu, A., Masson, V. & Guedalia, D. (2006). Impact of urban heat island on regional atmospheric pollution. *Atmospheric Environment*, 40 (10), 1743-1758.
- Schubert, S. & Grossman-Clarke, S. (2013). The Influence of green areas and roof albedos on air temperatures during Extreme Heat Events in Berlin, Germany. *Meteorologische Zeitschrift*, 22 (2), 131-143.
- Schultz, M., Rast, S., van het Bolscher, M., Pulles, T., Brand, R., Pereira, J., Mota, B., Spessa, A., Dalsøren, S. & van Noije, T. (2007). *Emission data sets and methodologies for estimating emissions*, RETRO project report D1-6, Hamburg.
- Seinfeld, J. H. & Pandis, S. N. (2012). *"Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change,"* John Wiley & Sons. New jersey.
- Shahbazi, H., Reyhanian, M., Hosseini, V. & Afshin, H. (2016 a). 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.
- Shahmohamadi, P., Cubasch, U., Sodoudi, S. & Che-Ani, A. (2012). *Mitigating urban heat island effects in Tehran metropolitan area. Air Pollution—A Comprehensive Perspective*; Rijeka, IntechOpen.
- Sodoudi, S., Shahmohamadi, P., Vollack, K., Cubasch, U. & Che-Ani, A. (2014). Mitigating the urban heat island effect in megacity Tehran. *Advances in Meteorology*, 2014 (3).1-20.
- Stull, R. B. (1988). *Similarity theory*. In *"An Introduction to Boundary Layer Meteorology"*. Springer. Vancouver.
- Taha, H. (1997 a). Modeling the impacts of large-scale albedo changes on ozone air quality in the South Coast Air Basin. *Atmospheric Environment*, 31 (11), 1667-1676.
- Taha, H. (1997 b). Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energy and buildings*, 25 (2), 99-103.
- Taha, H. (2008). Meso-urban meteorological and photochemical modeling of heat island mitigation. *Atmospheric Environment*, 42 (38), 8795-8809.
- Takebayashi, H. & Moriyama, M. (2007). Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island. *Building and Environment*, 42 (8), 2971-2979.
- USGS (2006). The National Land Cover Database. Accessed at: <http://landcover.usgs.gov/usgslandcover.php>; 05/25/2014.
- Velasco, E., Márquez, C., Bueno, E., Bernabé, R., Sánchez, A., Fentanes, O., Wöhmschimmel, H., Cárdenas, B., Kamilla, A. & Wakamatsu, S. (2007). Vertical distribution of ozone and VOCs in the low boundary layer of Mexico City. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 8 (12), 12751-12779.
- Wesely, M. & Lesht, B. (1989). Comparison of RADM dry deposition algorithms with a site-specific method for inferring dry deposition. *Water, Air, and Soil Pollution*, 44 (3), 273-293.
- Wood, C., Järvi, L., Kouznetsov, R., Nordbo, A., Joffre, S., Drebs, A., Vihma, T., Hirsikko, A., Suomi, I. & Fortelius, C. (2013). An overview of the urban boundary layer atmosphere network in helsinki. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94 (11), 1675-1690.
- Yarwood, G., S. Rao, M. Yocke, & G.Z. Whitten. (2005). Updates to the Carbon Bond Mechanism: CB05, US EPA Final Report, *Report to the U.S. Environmental Protection Agency*, RT-04006758 (13), 161 pp.
- Zakšek, K. & Oštir, K. (2012). Downscaling land surface temperature for urban heat island diurnal cycle analysis. *Remote Sensing of Environment*, 117 (2), 114-124.
- Zhang, J. & Rao, S. T. (1999). The role of vertical mixing in the temporal evolution of ground-level

ozone concentrations. *Journal of Applied Meteorology*, 38 (12), 1674-1691.

Zhou, J., Chen, Y., Zhang, X. & Zhan, W. (2013). Modelling the diurnal variations of urban heat islands with multi-source satellite data. *International journal of remote sensing*, 34 (21), 7568-7588.