فصلنامه مهندسی ترافیک، سال بیست و پنجم، شماره ۱۰۳، زمستان ۱۴۰۴، ص. ۵۵-۴۳

تحلیل مکانی-زمانی آلاینده‌های هوا در شهر تهران و ارتباط آن با فضای سبز شهری

میثم محرمی، فارغ‌التحصیل دکتری، گروه سنجش‌ازدور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران
مهدی رهنما، دانشیار، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران
سارا عطارچی (مسئول مکاتبات)، دانشیار، گروه سنجش‌ازدور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران
E-mail: satarchi@ut.ac.ir

چکیده

آلودگی هوا به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پیامدهای توسعه شهری، سبب بروز مشکلات عمده محیط‌زیستی به‌خصوص در کلان‌شهرها شده است. از طرفی فضای سبز شهری به‌عنوان یکی از عوامل تعدیل‌کننده آلودگی هوا، نقش مهمی در افزایش کیفیت محیط‌زیست شهری ایفا می‌کند. بر این اساس، در این پژوهش به تحلیل مکانی-زمانی آلاینده‌های هوا و ارتباط آن با فضای سبز شهری در کلان‌شهر تهران پرداخته شد. بدین منظور از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۵ در سال ۱۴۰۳ برای پایش پنج آلاینده هوا (مونوکسید کربن، فرمالدهید، دی‌اکسید نیتروژن، ازن و دی‌اکسید گوگرد) در فصول مختلف استفاده شد. نتایج نشان داد، نواحی با آلودگی زیاد عمدتاً در مناطق ۶، ۷ و ۸ واقع شده و مناطق ۲۱ و ۲۲ از آلودگی کمتری برخوردار هستند. همچنین بین مناطق با میزان آلودگی زیاد و فضای سبز شهری ازلحاظ مکانی ارتباط معکوس وجود دارد. این همپوشانی مکانی، در آلاینده‌های مونوکسید کربن، فرمالدهید، دی‌اکسید نیتروژن بیش از سایر آلاینده‌ها است. یکی از علل اصلی این موضوع جذب مستقیم این آلاینده‌ها توسط پوشش گیاهی است، درصورتی‌که آلاینده‌های ازن و دی‌اکسید گوگرد جذب کمتری توسط گیاهان دارند. بررسی آماری نتایج نشان داد بیشترین همبستگی منفی بین دی‌اکسید نیتروژن و فضای سبز شهری در فصل زمستان با ضریب همبستگی پیرسون ۰/۳۲- وجود دارد. با توجه به وارونگی دمایی در فصل زمستان و تجمع بیشتر آلاینده‌ها و نقش تعدیل‌کننده فضای سبز، بیشترین همبستگی منفی در فصل زمستان ایجاد شده است. بررسی مناطق مختلف ازلحاظ نیاز به توسعه فضای سبز نشان داد منطقه ۷ از بیشترین و منطقه ۲۲ از کمترین اولویت برخوردار هستند.

واژه‌های کلیدی: آلودگی هوا، تهران، خودهمبستگی فضایی، سنتینل-۵، فضای سبز

۱. مقدمه و ادبیات پژوهش

یکی از پنج عنصر ضروری برای ادامه حیات انسان، هوا است (قربان‌پور و همکاران، ۱۴۰۲). آلودگی هوا یکی از مهم‌ترین مشکلات محیط‌زیستی در اکثر کلان‌شهرهای جهان محسوب می‌شود. بر اساس برآورد سازمان بهداشت جهانی سالانه بیش از ۴/۲ میلیون مرگ زودرس براثر آلودگی هوا رخ می‌دهد که بیشتر این مرگ‌ومیرها در کشورهای کم‌درآمد رخ می‌دهد (وو و لیو، ۲۰۲۳). آلودگی هوا پنجمین عامل مرگ‌ومیر انسان‌ها محسوب شده و انتظار می‌رود این معضل محیط‌زیستی در سال‌های آینده نیز در کلان‌شهرهای کشورهای درحال‌توسعه ادامه داشته باشد (کومار و همکاران، ۲۰۱۹). بر اساس پیش‌بینی سازمان ملل تا سال ۲۰۵۰ میلادی ۶۸ درصد از جمعیت جهان در شهرها زندگی خواهند کرد و این موضوع اهمیت آلودگی هوا در محیط‌های شهری را دوچندان می‌کند (چن و همکاران، ۲۰۲۲). آلودگی هوا به شرایطی گفته می‌شود که در آن وجود گازها و ذرات معلق در اتمسفر، باعث به خطر افتادن سلامت جانداران مختلف می‌شود. آلودگی هوا پدیده‌ای پویا بوده و در مقیاس‌های مکانی و زمانی مختلف بر سلامت انسان‌ها و جانداران مختلف اثر می‌گذارد (ورگس و نما، ۲۰۲۲).

محیط‌های شهری به دلیل تمرکز فعالیت‌های انسانی و مصرف بالای انرژی، معمولاً از بالاترین سطح آلودگی برخوردار می‌باشند (ورگس و نما، ۲۰۲۲). شهرها بیش از ۷۵ درصد از منابع طبیعی را مصرف می‌کنند و عامل انتشار ۸۰ درصد از گازهای گلخانه‌ای در جهان هستند (دولال و اکبر، ۲۰۱۳). پژوهشگران شهرها را ازلحاظ نوع منابع آلاینده به سه دسته کلی تقسیم می‌کنند: دسته اول شهرهایی هستند که در آن منابع آلاینده متحرک عامل اصلی آلودگی هوا می‌باشند که از آن جمله می‌توان به شهرهای نیویورک و توکیو اشاره کرد. دسته دوم شهرهایی هستند سوزاندن زباله و گردوغبار عامل اصلی آلودگی در آن‌ها است که از آن جمله می‌توان به شهرهای قاهره و مکزیکوسیتی اشاره کرد. دسته سوم شهرهایی هستند که صنایع و کارخانه‌ها عامل اصلی آلودگی در آن‌ها است که از آن جمله می‌توان به شهرهای واقع در اروپای شرقی و پکن اشاره کرد (لیو و همکاران، ۲۰۱۸ و لی و همکاران، ۲۰۱۹). ازجمله آلاینده‌های مهم شهری می‌توان به ذرات معلق، دی‌اکسید نیتروژن و ترکیبات عالی فرار اشاره کرد که نه‌تنها سلامتی انسان‌ها را به خطر می‌اندازد بلکه اقلیم شهری را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد (وو و لیو، ۲۰۲۳). عوامل مختلفی در آلودگی هوا در محیط‌های شهری مؤثر هستند که از آن جمله می‌توان به اقلیم محلی، توپوگرافی، فعالیت‌های انسانی، مصرف انرژی، نوع کاربری اراضی و حتی ارتفاع ساختمان‌ها اشاره کرد (لیانگ و همکاران، ۲۰۲۳).

برقراری تعادل بین توسعه شهری و کنترل آلودگی هوا از اهمیت زیادی برخوردار است. روش‌های پیشین برنامه‌ریزی شهری باعث کم‌توجهی به محیط‌زیست شهری و به‌طورکلی کیفیت زندگی شهری شده است. بر این اساس، توسعه شهری باعث تخریب و تغییر کاربری در بخش عظیمی از فضای سبز شهری شده است (میرزایی مقدم و همکاران، ۱۳۹۹). یکی از ایده‌هایی که در سال‌های اخیر موردتوجه برنامه‌ریزان شهری قرار گرفته است ایده بوم‌شهر یا شهر اکولوژیک (Eco-City or Ecological City) است که در آن شهر بر اساس اصول محیط‌زیستی ساخته می‌شود. هدف نهایی بوم‌شهر زدودن تمامی پسماندهای کربن، تولید انرژی از طریق منابع تجدید پذیر و پیوند شهر و محیط‌زیست با یکدیگر است (شریفیان بارفروش و همکاران، ۱۳۹۳). فضای سبز شهری نقش بسیار مهمی را در ایجاد تعادل اکولوژیک شهری ایفا می‌کند. مفهوم شهرها بدون فضای سبز غیرقابل‌تصور است (ابراهیم‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷). فضای سبز شهری توانایی حذف مقادیر قابل‌توجهی از آلاینده‌های هوا و درنتیجه بهبود کیفیت محیط‌زیست شهری را دارد (جوانگ و همکاران، ۲۰۲۰). فضای سبز شهری در نقش ریه‌های تنفسی شهرها عمل کرده و از طریق مختلف کیفیت هوای شهری را بهبود می‌بخشد. بااین‌حال، نقش تعدیل‌کننده پوشش گیاهی عمدتاً در مقیاس بزرگ مانند جنگل‌ها موردتوجه

قرار گرفته و نقش فضای سبز شهری، کمتر موردتوجه قرار گرفته است (چیسورا، ۲۰۰۴).

اندازه‌گیری و پایش آلودگی هوا در شهرها برای کنترل کیفیت هوا و کاهش اثرات منفی آن بر سلامت انسان و محیط‌زیست ضروری است. تاکنون روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری و پایش آلاینده‌های هوا در محیط‌های شهری ایجاد شده است که از آن جمله می‌توان به ایستگاه‌های پایش کیفیت هوا، پایش متحرک با استفاده از سنجنده‌های دستی و سنجش‌ازدور اشاره کرد (باکیرسی، ۲۰۲۴). ایستگاه‌های پایش کیفیت هوا با استفاده از حسگرهای پیشرفته، آلاینده‌های معیار ازجمله ذرات معلق، دی‌اکسید گوگرد، دی‌اکسید نیتروژن، ازن و مونوکسید کربن را اندازه‌گیری می‌کنند (اسپنگل و همکاران، ۲۰۰۷). این ایستگاه‌ها با استفاده از تجهیزات پیشرفته، دقت بالایی را در اندازه‌گیری آلاینده‌های مختلف ارائه می‌دهند و داده‌های آن به‌صورت لحظه‌ای ثبت می‌شود. با توجه به وجود حسگرهای مختلف در این ایستگاه‌ها، تعداد آلاینده‌های ثبت‌شده در آن‌ها نسبت به روش‌های دیگر بیشتر است. از طرفی هزینه احداث این ایستگاه‌ها زیاد بوده و داده‌های آن به‌صورت نقطه‌ای ثبت می‌شود. ازاین‌رو امکان پوشش گسترده و ثبت آلودگی در تمام نقاط شهر با این روش وجود ندارد (وانگ و همکاران، ۲۰۱۸). سنجنده‌های دستی امکان اندازه‌گیری برخی از آلاینده‌های هوا را فراهم می‌آورند. مشکل اصلی این روش تعداد کم آلاینده‌های قابل ثبت و نیاز به کالیبره شدن دستگاه در محیط‌های مختلف است. از طرفی فناوری سنجش‌ازدور با ثبت تصاویر ماهواره‌ای، امکان پایش آلاینده‌های هوا در اکثر مناطق سطح زمین با پوشش زمانی و مکانی مناسب را فراهم می‌کند (صفریان زنگیر و همکاران، ۲۰۲۰).

سنجش‌ازدور نقش مهمی را در اندازه‌گیری و پایش آلودگی هوا در مقیاس محلی، منطقه‌ای و جهانی ایفا می‌کند. ثبت تصاویر ماهواره‌ای با پوشش گسترده جغرافیایی و تکرارپذیری بالا این امکان را فراهم می‌آورد تا آلاینده‌های مختلف به‌صورت سری زمانی مورد تحلیل قرار گرفته و روند مکانی و زمانی آلاینده‌ها ثبت شود (کاظمی قراجه و همکاران، ۲۰۲۳). از طرفی اندازه‌گیری آلودگی هوا با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای دارای محدودیت‌هایی نیز است که از آن جمله می‌توان به‌دقت کم‌تر اندازه‌گیری آلاینده‌ها نسبت به ایستگاه‌های پایش کیفیت هوا و تعداد کمتر آلاینده‌های قابل‌اندازه‌گیری اشاره کرد (یو و همکاران، ۲۰۱۸). علی‌رغم این محدودیت‌ها، پوشش گسترده مکانی و دسترسی رایگان به تصاویر ماهواره‌ای باعث شده تا از این روش به‌طور گسترده‌ای در پایش آلودگی هوا استفاده شود (رولی و کاراکوش، ۲۰۲۳). تاکنون ماهواره‌های مختلفی برای اندازه‌گیری آلاینده‌های هوا مورداستفاده قرار گرفته است، ماهواره MAPS نخستین ماهواره در این زمینه است که امکان ثبت مقادیر آلاینده مونوکسید کربن را بین سال‌های ۱۹۸۱ تا ۱۹۹۹ میلادی فراهم آورد. ماهواره سنتینل-۵ یکی از جدیدترین ماهواره‌ها در زمینه پایش آلودگی هوا محسوب شده که از سال ۲۰۱۸ میلادی تاکنون امکان ثبت آلاینده‌های مختلف جوی را به‌صورت روزانه و از تمام سطح زمین فراهم آورده است (کافی و همکاران، ۲۰۲۴). تاکنون مطالعات مختلفی در زمینه اندازه‌گیری و پایش آلودگی هوا و ارتباط آن با فضای سبز در محیط‌های شهری انجام شده است که در ادامه به برخی از مهم‌ترین آن‌ها اشاره شده است.

جعفری و همکاران (۱۳۹۷) به مدل‌سازی ارتباط فضای سبز شهری با آلودگی هوا، صوت و دما با استفاده از سنجه‌های سیمای سرزمین پرداختند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد فضای سبز باعث کاهش آلودگی هوا، صوت و دما در محیط‌های شهری می‌شود. همچنین فضای سبز بیشترین اثر کاهشی را بر ذرات معلق و کمترین اثر کاهشی را بر آلاینده دی‌اکسید گوگرد می‌گذارد. رهنما و صبوری (۱۴۰۲) به تحلیل فضایی اثر فضای سبز شهری بر آلودگی هوا و مرگ‌ومیر تنفسی در شهر مشهد پرداختند. برای بررسی آلودگی هوا از داده‌های ایستگاه‌های زمینی استفاده شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد ضریب همبستگی بین فضای سبز و

آلاینده دی‌اکسید نیتروژن ۰/۱۱-، آلاینده مونوکسید کربن ۰/۰۳- و با میزان مرگ‌ومیر ۰/۰۴۶- است. این موضوع نشان‌دهنده تأثیر فضای سبز در کاهش آلودگی و میزان مرگ‌ومیر است. ویلنوو و همکاران (۲۰۱۲) در مطالعه‌ای رابطه بین فضای سبز، آلودگی هوا و مرگ‌ومیر در انتاریو کانادا را موردبررسی قرار داده و متوجه شدند قرار گرفتن در مجاورت فضای سبز تا محدوده ۵۰۰ متری باعث کاهش دی‌اکسید کربن هوا و کاهش ۹۵ درصدی مرگ‌ومیر تنفسی می‌شود. خان و همکاران (۲۰۲۵) به بررسی ارتباط بین فضای سبز شهری، آلودگی هوا و سلامت کودکان در شهر بارسلونای اسپانیا پرداختند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد کاهش آلودگی هوا و افزایش فضای سبز باعث کاهش وزن کودکان و سلامت کودکان می‌شود. بر این اساس کاهش آلودگی هوا تا حد استاندارد سازمان بهداشت جهانی و افزایش فضای سبز تا حد استانداردهای شهرسازی به ترتیب باعث کاهش ۴/۶ و ۱۰ درصدی چاقی در کودکان می‌شود. جمع‌بندی پیشینه پژوهش نشان‌دهنده اثر فضای سبز شهری بر کاهش آلودگی هوا در محیط‌های شهری است. همچنین در پژوهش‌های مختلف به اثر نامطلوب آلاینده‌های هوا بر سلامت انسان و افزایش مرگ‌ومیر تنفسی اشاره شده است. در اکثر پژوهش‌ها، آلودگی هوا در محیط‌های شهری با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های زمینی موردبررسی قرار گرفته است و از تصاویر ماهواره‌ای بدین منظور استفاده نشده است.

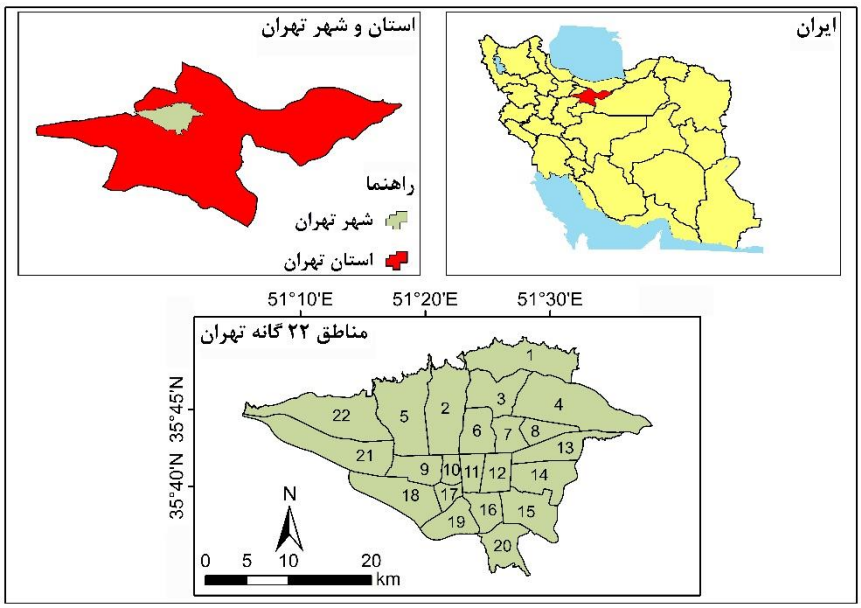
تهران پرجمعیت‌ترین شهر ایران و یکی از شهرهای آلوده ایران و جهان محسوب می‌شود. بحث آلودگی هوا در سال‌های اخیر به یکی از دغدغه‌های اصلی متولیان و مسئولان در مقیاس ملی تبدیل شده است. در همین راستا پژوهش حاضر درصدد است به تحلیل مکانی-زمانی آلودگی هوا در شهر تهران و ارزیابی اثر فضای سبز بر آن بپردازد. در مطالعات قبلی عمدتاً از داده‌های ایستگاه‌های زمینی و انجام درون‌یابی برای دستیابی به نقشه آلودگی هوا در سطح شهر تهران استفاده شده است. در این پژوهش از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۵ بدین منظور استفاده شده است. همچنین در این پژوهش با استفاده از تکنیک خودهمبستگی فضایی و استفاده از داده‌های سری زمانی، به تحلیل یکپارچه مکانی-زمانی آلودگی هوا در سطح شهر تهران پرداخته شده است. درنهایت در این پژوهش آلودگی هوا در سطح مناطق ۲۲ گانه شهر تهران موردبررسی قرار گرفته و با تحلیل همزمان آلودگی هوا و فضای سبز در سطح مناطق شهرداری، نسبت به اولویت‌بندی مناطق برای توسعه فضای سبز و کاهش آلاینده‌ها اقدام شده است.

۲. روش پژوهش

در این بخش به معرفی منطقه موردمطالعه، داده‌ها و روش انجام پژوهش پرداخته می‌شود.

۲-۱ منطقه موردمطالعه

منطقه موردمطالعه در این پژوهش شهر تهران است (شکل ۱). تهران ازلحاظ تقسیمات اداری به ۲۲ منطقه تقسیم می‌شود. این شهر از شمال به رشته‌کوه البرز، از جنوب به دشت ورامین، از شرق به لواسانات و از غرب به کرج محدود شده است (قربان‌پور و همکاران، ۱۴۰۲). شهر تهران ازلحاظ جغرافیایی در محدوده ″۱۹ ′۵ °۵۱ تا ″۱۰ ′۳۸ °۵۱ طول شرقی و ″۸ ′۳۴ °۳۵ تا ″۳۹ ′۴۹ °۳۵ عرض شمالی قرار دارد. ارتفاع این شهر از ۱۰۳۱ تا ۲۰۱۱ متر بالاتر از سطح آب‌های آزاد متغیر است. آلودگی هوا در تهران، سالانه جان بسیاری از شهروندان را می‌گیرد. همچنین تعطیلی ادارات و مراکز آموزشی بر اثر آلودگی هوا به‌خصوص در فصل سرما یکی دیگر از اثرات آلودگی هوا بر شهروندان است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه موردمطالعه

۲-۲ مواد و روش

داده‌های مورداستفاده در این پژوهش شامل تصاویر سری زمانی ماهواره سنتینل-۵ در سال ۱۴۰۳ است. این تصاویر در سامانه گوگل ارث انجین (Google Earth Engine) تهیه و میانگین فصلی هر یک از آلاینده‌ها (مونوکسید کربن، فرمالدهید، دی‌اکسید نیتروژن، ازن و دی‌اکسید گوگرد) برای تحلیل‌های مکانی- زمانی مورداستفاده قرار گرفت. داده فضای سبز شهری از دیگر داده‌های مورداستفاده در این پژوهش است که برای تهیه آن از لایه اطلاعات مکانی شهرداری تهران استفاده شد. برای انجام تحلیل‌های مکانی-زمانی از نرم‌افزار ArcMap 10.5 و برای انجام تحلیل‌های آماری از زبان برنامه‌نویسی پایتون استفاده شد. انجام پژوهش در پنج مرحله کلی انجام شد. در مرحله اول با استفاده از تصاویر سری زمانی ماهواره سنتینل-۵، نقشه میانگین فصلی هر یک از آلاینده‌ها تهیه شد. در مرحله دوم با استفاده از تکنیک خودهمبستگی فضایی تحلیل نواحی گرم (Hot Spot Analysis) به تحلیل مکانی-زمانی آلاینده‌های هوا در فصول مختلف سال پرداخته شد. در مرحله سوم، ارتباط مکانی هر یک از آلاینده‌ها با فضای سبز شهری در فصول مختلف با استفاده از همپوشانی لایه‌ها موردبررسی قرار گرفت. در مرحله چهارم، تحلیل آماری بر روی داده‌ها انجام شد و روابط همبستگی بین هر یک از آلاینده‌ها و فضای سبز با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون موردبررسی قرار گرفت. درنهایت در مرحله پنجم، بر اساس میزان آلاینده‌ها و فضای سبز در هر یک از مناطق ۲۲ گانه تهران، نسبت به اولویت‌بندی مناطق برای توسعه فضای سبز و کاهش آلاینده‌ها اقدام شد.

برای تشخیص مناطق با آلایندگی زیاد و کم در سطح شهر تهران، از تکنیک خودهمبستگی فضایی تحلیل نواحی گرم استفاده شد. در تحلیل نواحی گرم، از آماره Getis-Ord-Gi برای هر یک از عوارض (در اینجا پیکسل) یک مجموعه داده استفاده می‌شود. امتیاز Z و مقدار P نشان‌دهنده این موضوع می‌باشند که عوارض دارای مقادیر بالا یا پایین، در چه مکان‌هایی، با هم تشکیل یک خوشه می‌دهند. در این تحلیل، هر عارضه در ارتباط با عوارض همسایه سنجیده می‌شود. اگر عارضه‌ای مقدار عددی بالایی داشته باشد لزوماً به معنای وجود ناحیه گرم در آن منطقه نیست. هر عارضه، برای اینکه ازلحاظ آماری ناحیه گرم معنی‌داری باشد، باید مقدار عددی بالایی داشته باشد و با دیگر عوارض دارای مقدار بالا احاطه شده باشد. درمجموع ناحیه‌ای که مقدار P آن کمتر از سطح معناداری (برای مثال ۰/۰۵) و امتیاز Z آن مثبت

باشد به‌عنوان ناحیه گرم و ناحیه‌ای که مقدار P آن کمتر از سطح معناداری و امتیاز Z آن منفی باشد به‌عنوان ناحیه سرد شناخته می‌شود (گتیس و ارد، ۱۹۹۲). برای انجام تحلیل نواحی گرم از نرم‌افزار ArcMap 10.5 و رابطه ۱ استفاده شد.

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^{n} w_{i,j}x_j - \bar{X}\sum_{j=1}^{n} w_{i,j}}{S\sqrt{\frac{\left[n\sum_{j=1}^{n} w_{i,j}^2 - \left(\sum_{j=1}^{n} w_{i,j}\right)^2\right]}{n-1}}} \quad (۱)$$

در رابطه ۱، x_j مقداری ویژگی عارضه j، $w_{i,j}$ وزن مکانی بین i و j، و n تعداد کل عوارض است. G_i^* خود نوعی امتیاز Z به‌حساب می‌آید و نیاز به محاسبات دیگری ندارد. مقادیر منفی G_i^* نشان‌دهنده نواحی سرد (مقادیر آلاینده کم) و مقادیر مثبت G_i^* نشان‌دهنده نواحی گرم (مقادیر آلاینده زیاد) است. برای محاسبه $\bar{X}$ از رابطه ۲ و برای محاسبه S از رابطه ۳ استفاده شد.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^{n} x_j}{n} \quad (۲)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n} x_j^2}{n} - (\bar{X})^2} \quad (۳)$$

برای محاسبه ضریب همبستگی پیرسون (Pearson Correlation Coefficient (R)) بین هر یک از آلاینده‌ها و فضای سبز شهری از کتابخانه rasterio و numpy در زبان برنامه‌نویسی پایتون استفاده شد. بر این اساس، ابتدا تمامی لایه در سیستم مختصات (WGS 1984) و سیستم تصویر (UTM Zone 39 N) یکسان با ابعاد پیکسل یکسان (۱۰۰۰ متر) قرار گرفته و سپس روابط همبستگی بین آن‌ها بررسی شد.

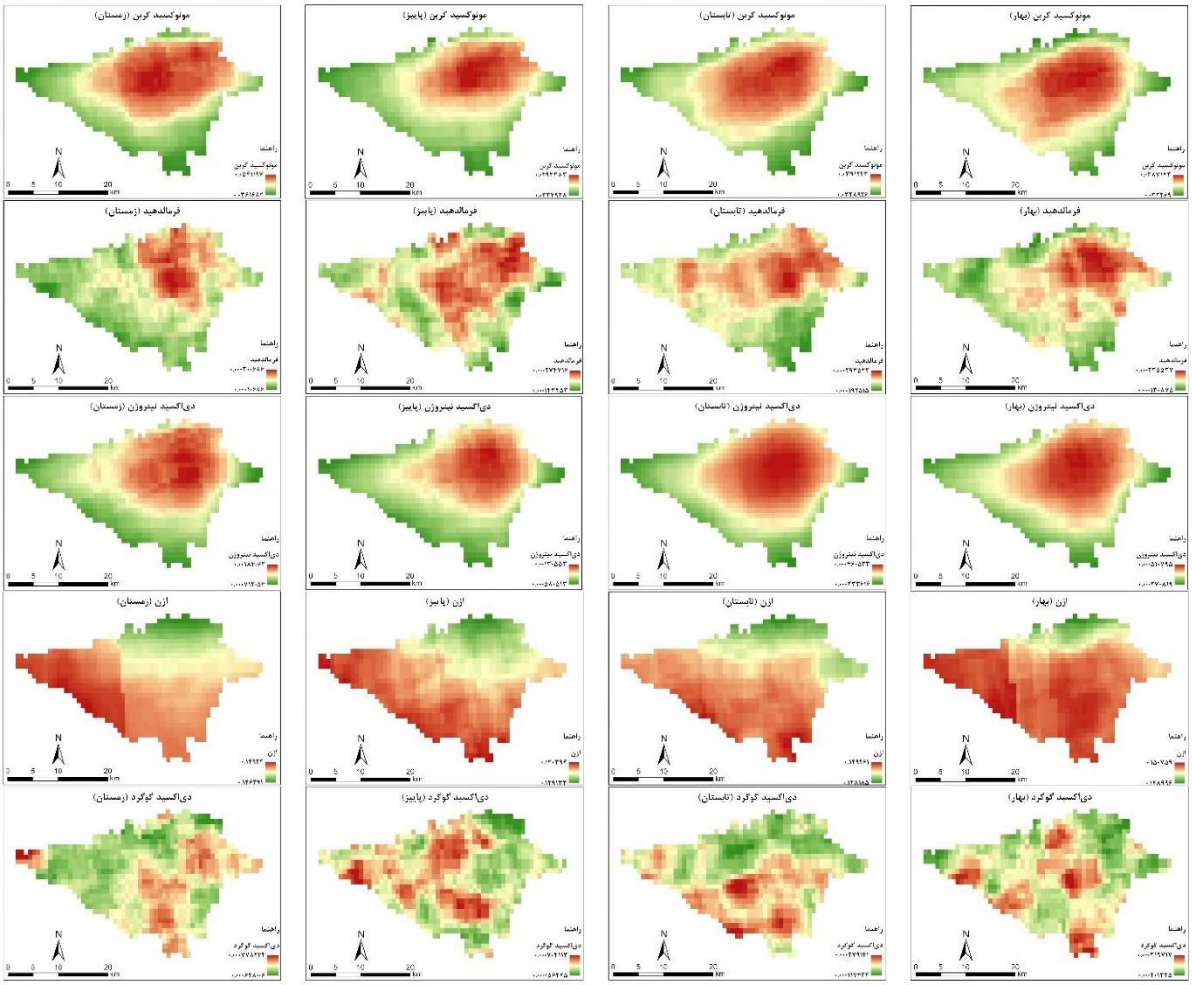
با توجه به اینکه مساحت فضای سبز مناطق مختلف متغیر است، باید سهم هر یک از مناطق ۲۲ گانه تهران از فضای سبز محاسبه شود. بدین منظور مساحت فضای سبز در هر منطقه بر مساحت کل آن منطقه تقسیم و در عدد ۱۰۰ ضرب شده تا سهم هر منطقه از فضای سبز شهری محاسبه شود. درنهایت بر اساس سهم فضای سبز و میزان آلودگی هوا در هر منطقه، نسبت به اولویت‌بندی مناطق ۲۲ گانه به‌منظور توسعه فضای سبز و کاهش آلودگی هوا اقدام شد.

۳. تحلیل داده‌ها

بررسی پراکنش آلاینده‌های هوا در فصول مختلف (شکل ۲) نشان داد، آلاینده مونوکسید کربن در مناطق مرکزی شهر تهران از بیشترین مقدار برخوردار است. میزان این آلاینده در مناطق ۳، ۶، ۷ و ۸ بیش از سایر مناطق است. با توجه به اینکه یکی از منابع تولید این آلاینده سوخت خودروها است و با در نظر گرفتن تراکم بالای وسایل نقلیه در این مناطق، میزان آلاینده مونوکسید کربن در این مناطق از بیشترین مقدار برخوردار است. از طرفی مناطق ۱ و ۲۲ از مقدار آلایندگی کمتری برخوردار هستند. بررسی زمانی پراکنش آلاینده مونوکسید کربن نشان داد میزان پوشش مکانی این آلاینده ازلحاظ میزان آلایندگی زیاد، در فصل زمستان بیش از سایر فصول است، یکی از علل این موضوع وارونگی دمایی در فصل سرد سال است که باعث گسترش پراکنش مکانی و ماندگاری آن در اتمسفر شده است. بررسی پراکنش آلاینده‌های فرمالدهید و دی‌اکسید نیتروژن نیز نشان داد مقدار این آلاینده‌ها در مناطق مرکزی شهر از بیشترین مقدار و در مناطق حاشیه شهر به‌خصوص در شمال، شرق و جنوب شهر از کمترین مقدار برخوردار است. با توجه به اینکه سوخت خودروها در تولید آلاینده‌های فرمالدهید و دی‌اکسید نیتروژن نیز مؤثر است، میزان این آلاینده‌ها در مناطق مرکزی شهر بیش از سایر مناطق است.

روند پراکنش آلاینده ازن به این صورت است که از شمال به جنوب شهر بر میزان آن افزوده می‌شود. ازن از آلاینده‌های ثانویه است و بر اثر واکنش‌های فتوشیمیایی با حضور ترکیبات آلی فرار و اکسیدهای نیتروژن تشکیل می‌شود. با توجه وجود پالایشگاه‌ها و نیروگاه‌های مختلف در جنوب شهر تهران که باعث تولید ترکیبات آلی فرار و اکسیدهای نیتروژن می‌شوند و دمای بیشتر مناطق جنوب شهر تهران نسبت به شمال شهر، شدت واکنش‌های فتوشیمیایی و تولید ازن در جنوب شهر بیش از شمال شهر است. بررسی زمانی پراکنش این آلاینده نیز نشان از مقدار بیشتر آن در فصول گرم سال (بهار و تابستان) است که علت آن تشدید

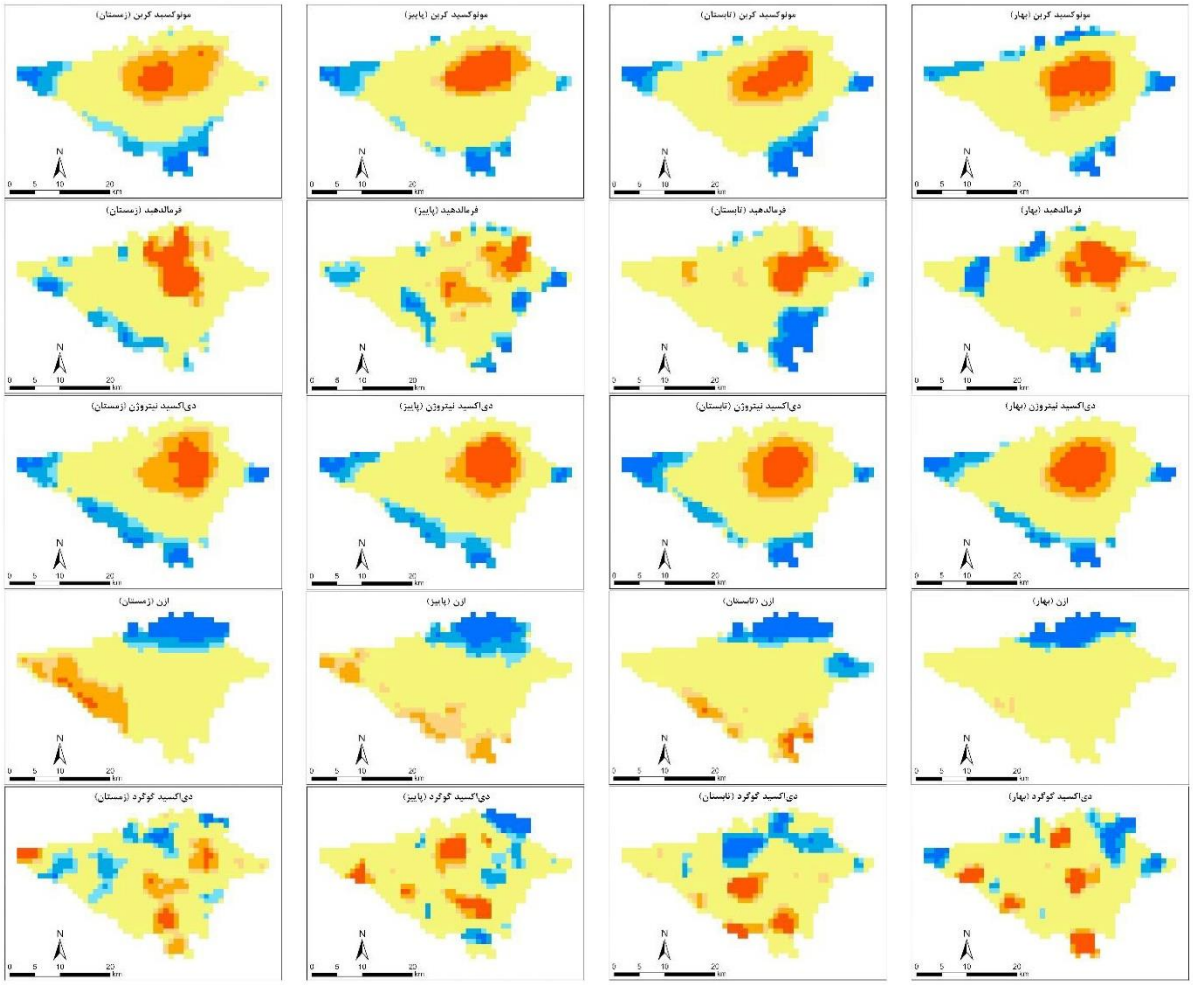
واکنش‌های فتوشیمیایی در حضور گرمای هوا است. بررسی پراکنش آلاینده دی‌اکسید گوگرد در سطح شهر تهران نشان از میزان بالای این آلاینده در مناطق مرکزی و جنوب شهر دارد. با توجه به اینکه سوخت خودرو و صنایع عامل تولید این گاز در محدوده شهر تهران است، میزان این آلاینده در مناطق مرکزی (تراکم خودروها) و جنوبی (وجود صنایع و پالایشگاه‌ها) شهر بیش از سایر مناطق است.



شکل ۲. نقشه پراکنش آلاینده‌های هوا در فصول مختلف

بررسی خودهمبستگی فضایی آلاینده‌های هوا طبق تحلیل نواحی گرم (شکل ۳) نشان داد، مناطق مرکزی شهر ازلحاظ آلاینده‌های مونوکسید کربن و دی‌اکسید نیتروژن تشکیل نواحی گرم (میزان آلایندگی زیاد و معنادار) را داده‌اند. از طرفی میزان این آلاینده‌ها در نواحی جنوب و غرب تهران کمترین میزان بوده و در این مناطق نواحی سرد (میزان آلایندگی کم و معنادار) تشکیل شده است. نواحی گرم در مورد آلاینده فرمالدهید در مناطق مرکز و شمال شرقی شهر تهران ایجاد شده است و نواحی سرد نیز عمدتاً در مناطق حاشیه‌ای شهر تهران ایجاد شده است. در مورد آلاینده ازن، نواحی گرم در جنوب و نواحی سرد در شمال شهر ایجاد شده و سایر مناطق فاقد الگوی معنادار هستند. آلاینده دی‌اکسید گوگرد، در مناطق مرکزی و جنوب شهر تشکیل نواحی گرم و در مناطق شمالی تشکیل نواحی سرد داده است. بررسی الگوی زمانی نواحی گرم و سرد نشان داد، وسعت نواحی گرم در فصل زمستان بیش از سایر فصل‌ها است، علت این موضوع وارونگی

دمایی و مصرف سوخت مازوت توسط کارخانه‌ها در فصل سرد سال بوده که باعث گسترش وسعت پراکنش آلاینده‌ها شده است.



شکل ۳. پراکنش آلاینده‌های هوا در فصول مختلف طبق تحلیل نواحی گرم

بررسی همپوشانی مکانی نواحی گرم و سرد و فضای سبز شهری نشان داد، لکه‌های سرد به‌خصوص در مورد آلاینده‌های مونوکسید کربن، فرمالدهید، دی‌اکسید نیتروژن در مناطقی با پوشش فضای سبز زیاد قرار گرفته‌اند و لکه‌های گرم نیز در مناطقی با پوشش فضای سبز اندک قرار گرفته‌اند. این موضوع نشان می‌دهد بین فضای سبز شهری و آلاینده‌های هوا ارتباط معکوس وجود داشته و فضای سبز شهری مقدار آلاینده‌ها را کاهش داده است. با توجه به اینکه آلاینده‌های مونوکسید کربن، فرمالدهید، دی‌اکسید نیتروژن به‌صورت مستقیم توسط گیاهان جذب می‌شوند ولی آلاینده‌های ازن و دی‌اکسید گوگرد میزان جذب کمتری را دارند، میزان همپوشانی مکانی آن‌ها با فضای سبز نیز کمتر است. از طرفی برخی از درختان در فضای سبز شهری (برای مثال اکالیپتوس و کاج) با تولید ترکیبات آلی فرار و اکسیدهای نیتروژن باعث تولید اندک گاز ازن شده که این موضوع نیز باعث همپوشانی کمتر آن با فضای سبز شهری شده است.

بررسی آماری نتایج (جدول ۱) نشان داد، بین فضای سبز شهری و آلودگی هوا رابطه معکوس وجود دارد. در بین آلاینده‌های هوا، فضای سبز بیشترین تأثیر را بر آلاینده دی‌اکسید نیتروژن در فصل زمستان گذاشته است، به‌طوری‌که ضریب همبستگی بین این

آلاینده و فضای سبز در فصل زمستان ۰/۳۲- است. آلاینده‌های مونوکسید کربن و فرمالدهید نیز بیشترین همبستگی منفی را در فصل زمستان ارائه داده‌اند. نتایج این پژوهش همسو با نتایج پژوهش رهنما و صبوری (۱۴۰۲) است که بین فضای سبز شهری و آلودگی هوا رابطه معکوس مشاهده شد. بر این اساس، ضریب همبستگی دی‌اکسید نیتروژن و مونوکسید کربن با فضای سبز در شهر مشهد به ترتیب برابر با ۰/۱۱- و ۰/۰۳- است. همچنین بر اساس نتایج پژوهش جوانگ و همکاران (۲۰۲۰) فضای سبز شهری باعث کاهش ۱ تا ۳ درجه‌ای دمای هوا و ۲۰ تا ۴۰ درصدی آلودگی هوا در سنگاپور شده است. با توجه به اینکه منبع اصلی این آلاینده‌ها سوخت خودروها بوده و این آلاینده‌ها با سرعت بیشتری توسط گیاهان جذب می‌شوند و از طرفی با توجه به ایجاد شرایط وارونگی دمایی در فصل زمستان، بیشترین همبستگی منفی بین این آلاینده‌ها و فضای سبز در فصل زمستان ایجاد شده است. از طرفی کاهش آلاینده‌ها در فصول گرم سال، به سبب کاهش مصرف سوخت مازوت در نیروگاه‌ها، وزش تندبادهای لحظه‌ای و بارش‌های بهاری، سبب همبستگی منفی کمتر بین فضای سبز و این آلاینده‌ها در فصول بهار و تابستان شده است.

بیشترین ضریب همبستگی منفی بین آلاینده‌های ازن و دی‌اکسید گوگرد در فصل تابستان ایجاد شده است. با توجه به اینکه ازن یک آلاینده ثانویه محسوب شده و بر اثر واکنش فتوشیمیایی و در حضور موادی همچون ترکیبات آلی فرار و اکسیدهای نیتروژن ایجاد می‌شود و گرمای هوا نیز این واکنش و تولید گاز ازن را تشدید می‌کند، بیشترین ضریب همبستگی بین آلاینده ازن و فضای سبز در فصل تابستان ایجاد شده است. بر این اساس، فضای سبز شهری با کاهش دما باعث کاهش فعالیت‌های فتوشیمیایی و کاهش تولید گاز ازن در محدوده‌هایی که فضای سبز وجود دارد می‌شود. در مورد گاز دی‌اکسید گوگرد باید به این نکته اشاره کرد که یکی از منابع جذب آلاینده دی‌اکسید گوگرد تجزیه در خاک مرطوب است. وجود رطوبت در مناطق با فضای سبز و گرمای هوا در تابستان باعث تشدید تجزیه و کاهش مقدار این آلاینده در مناطقی با پوشش گیاهی زیاد شده است.

جدول ۱. ضریب همبستگی پیرسون بین فضای سبز شهری و آلاینده‌های هوا در فصول مختلف

	فضای سبز (بهار)	فضای سبز (تابستان)	فضای سبز (پاییز)	فضای سبز (زمستان)
مونوکسید کربن	۰/۱۳-	۰/۰۱-	۰/۰۳-	۰/۳-
فرمالدهید	۰/۰۵-	۰/۰۳-	۰/۰۸-	۰/۲۷-
دی‌اکسید نیتروژن	۰/۱۱-	۰/۰۲-	۰/۰۶-	۰/۳۲-
ازن	۰/۰۹-	۰/۲۹-	۰/۱۱-	۰/۰۴-
دی‌اکسید گوگرد	۰/۰۱-	۰/۲۷-	۰/۰۸-	۰/۰۶-

تحلیل مناطق ۲۲ گانه تهران ازلحاظ میزان آلاینده‌ها، فضای سبز و نیاز به توسعه فضای سبز و کاهش آلاینده‌ها (جدول ۲) نشان داد، منطقه ۷ از بیشترین و منطقه ۲۲ از کمترین اولویت برای توسعه فضای سبز و کاهش آلاینده‌ها برخوردار هستند. طبق نتایج ارائه‌شده در جدول ۲، منطقه ۷ ازلحاظ سهم فضای سبز در رتبه ۲۰ در بین مناطق ۲۲ گانه (عدد ۱ در سهم فضای سبز نشان‌دهنده بیشترین سهم فضای سبز و عدد ۲۲ نشان‌دهنده کمترین سهم فضای سبز است) و ازلحاظ میزان آلایندگی در رتبه ۲ در بین مناطق ۲۲ گانه (عدد ۱ در میزان آلایندگی نشان‌دهنده بیشترین میزان آلایندگی و عدد ۲۲ نشان‌دهنده کمترین میزان آلایندگی است) قرار دارد و بنابراین از بیشترین اولویت (عدد ۱ نشان‌دهنده بیشترین اولویت و عدد ۲۲ نشان‌دهنده کمترین اولویت است) برای توسعه فضای سبز و کاهش میزان آلاینده‌ها برخوردار است. پس از منطقه ۷، مناطق ۶ و ۸ از بیشترین و پس

از منطقه ۲۲، مناطق ۱۹ و ۱۵ از کمترین اولویت برای توسعه فضای سبز و کاهش آلاینده‌ها برخوردار هستند. این موضوع نشان می‌دهد مناطق مرکزی شهر تهران به دلیل حجم تردد زیاد خودروها و تولید گازهای آلاینده و از طرفی کمبود سرانه فضای سبز در این مناطق باعث شده تا این مناطق از بیشترین اولویت برای توسعه فضای سبز و کاهش آلاینده‌ها برخوردار باشند. از طرفی وجود بوستان‌های متعدد ازجمله بوستان چیتگر در منطقه ۲۲ و بوستان ولایت به‌عنوان بزرگ‌ترین پارک خاورمیانه در منطقه ۱۹ و مقدار کمتر آلاینده‌ها در این مناطق باعث شده تا این مناطق از کمترین اولویت برای توسعه فضای سبز و کاهش آلاینده‌ها برخوردار باشد.

جدول ۲. اولویت مناطق ۲۲ گانه شهر تهران ازلحاظ توسعه فضای سبز و کاهش آلاینده‌های هوا

منطقه	سهم فضای سبز (رتبه)	میزان آلودگی هوا (رتبه)	اولویت (رتبه)	منطقه	سهم فضای سبز (رتبه)	میزان آلودگی هوا (رتبه)	اولویت (رتبه)
۱	۱۵	۱۳	۱۰	۱۲	۱۴	۶	۷
۲	۷	۸	۱۱	۱۳	۱	۱۲	۱۸
۳	۱۱	۵	۸	۱۴	۱۳	۱۵	۱۳
۴	۴	۱۰	۱۵	۱۵	۵	۲۰	۲۰
۵	۹	۱۶	۱۶	۱۶	۶	۱۱	۱۴
۶	۱۶	۱	۲	۱۷	۱۲	۱۴	۱۲
۷	۲۰	۲	۱	۱۸	۸	۱۷	۱۷
۸	۱۹	۴	۳	۱۹	۲	۱۹	۲۱
۹	۲۲	۹	۵	۲۰	۱۰	۲۲	۱۹
۱۰	۱۸	۷	۶	۲۱	۲۱	۱۸	۹
۱۱	۱۷	۳	۴	۲۲	۳	۲۱	۲۲

۴. نتیجه‌گیری

آلودگی هوا به‌عنوان یکی از چالش‌های زندگی در محیط‌های شهری، سالانه باعث بیماری و مرگ‌ومیر تعداد زیادی از شهروندان می‌شود. بر این اساس، مطالعه آلودگی هوا در محیط‌های شهری از اهمیت زیادی برخوردار است. در این پژوهش با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۵ به تحلیل مکانی-زمانی آلودگی هوا در مناطق ۲۲ گانه شهر تهران پرداخته شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده تراکم بالای آلاینده‌ها به‌خصوص آلاینده‌های مونوکسید کربن، فرمالدهید و دی‌اکسید نیتروژن در مناطق مرکزی شهر است. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که سوخت خودروها به‌عنوان یکی از عوامل اصلی تولید این آلاینده‌ها در محیط‌های شهری محسوب شده و با توجه به نقش فضای سبز در کاهش این آلاینده‌ها، توسعه فضای سبز در این مناطق از اهمیت زیادی برخوردار است. از طرفی با توجه به نقش ترکیبات آلی فرار و اکسیدهای نیتروژن در تولید گاز ازن و نقش صنایع در تولید گاز دی‌اکسید گوگرد و تراکم بالای این آلاینده‌ها در مناطق جنوبی شهر (با توجه به مجاورت به کارخانه‌ها و صنایع) باید تدابیری اتخاذ شود که با توسعه فضای سبز در این مناطق از میزان آلایندگی در این مناطق کاسته شود. نکته‌ای که در این زمینه از اهمیت زیادی برخوردار است، استفاده از گیاهانی است که خود تولیدکننده ترکیبات آلی فرار نباشند (برای مثال ارس و سرو) و بتوانند نقش بیشتری را در کاهش دمای هوا و جذب این آلاینده‌ها ایفا کنند. همچنین با توجه به

گسترش آلودگی هوا در فصول سرد سال به دلیل وارونگی دمایی، باید در فضای سبز شهری از گیاهان همیشه‌سبز با قابلیت جذب بالای آلاینده‌ها (برای مثال سرو نقره‌ای و برگ‌بو) استفاده شود تا اثر آلودگی هوا به‌واسطه گیاهان همیشه‌سبز در فضای سبز شهری تعدیل شود. درنهایت باید به این نکته اشاره شود که توسعه فضای سبز و کاهش آلودگی هوا، باید به‌عنوان یکی از اولویت‌های اصلی مسئولین شهری مدنظر قرار گیرد، زیرا این موضوع باعث ایجاد محیطی سالم‌تر و پایدارتر و بهبود کیفیت زندگی شهروندان می‌شود.

۵. مراجع

– ابراهیم‌زاده، ع.، شاطریان، م.، حسینی، س.ا. و امیریان، س. (۱۳۹۷). ارزیابی فضای سبز شهری با استفاده از مدل تحلیل شبکه راهبردی جهت دستیابی به توسعه پایدار مطالعه موردی منطقه بی‌سیم زنجان. فصلنامه مطالعات برنامه‌ریزی سکونتگاه‌های انسانی، ۱۳(۱)، ۵۳–۶۸.

– جعفری، ش.، علیزاده شعبانی، ا.، معین الدینی، م.، دانه‌کار، ا. و علم‌بیگی، ا. (۱۳۹۷). مدل‌سازی رابطه فضای سبز شهری با آلودگی هوا صوت و دما با استفاده از سنجه‌های سیمای سرزمین. سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۹(۲)، ۵۹–۷۵.

– رهنما، م.ر. و صبوری، م. (۱۴۰۲). تحلیل فضایی اثر فضای سبز شهری بر آلودگی هوا و مرگ‌ومیر تنفسی با استفاده از رگرسیون خطی در شهر مشهد. مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۱۴(۵۴)، ۷۵–۸۸.

– شریفیان بارفروش، س.ش. و مفیدی شمیرانی، س.م. (۱۳۹۳). معیارهای شاکله بوم شهر از دیدگاه نظریه‌پردازان. باغ نظر، ۱۱(۳۱)، ۹۹–۱۰۸.

– قربان‌پور، م.، صداقت نیا، س. و زالی، ن. (۱۴۰۲). تحلیل ارتباط بین فضای سبز شهری و آلودگی هوا با تأکید بر بوم‌گرایی شهری موردپژوهی شهر تهران. فصلنامه مطالعات برنامه‌ریزی سکونتگاه‌های انسانی، ۱۸(۲)، ۱۱۵–۱۲۹.

– میرزایی مقدم، م.، اوجی، ر. و آقایی زاده، ا. (۱۳۹۹). تحلیل اثر کاهش فضاهای سبز شهری بر تغییرات دما و رطوبت نسبی مطالعه موردی شهر رشت. فصلنامه مطالعات برنامه‌ریزی سکونتگاه‌های انسانی، ۱۵(۴)، ۱۱۰۳–۱۱۱۸.

– Bakirci, M. (2024). Smart city air quality management through leveraging drones for precision monitoring. Sustainable Cities and Society, 106, 105390-105401.

– Chen, S., Huang, Q., Muttarak, R., Fang, J., Liu, T., He, C., & Zhu, L. (2022). Updating global urbanization projections under the Shared Socioeconomic Pathways. Scientific data, 9(1), 137-151.

– Chiesura, A. (2004). The role of urban parks for the sustainable city. Landscape and urban planning, 68(1), 129-138.

– Dulal, H. B., & Akbar, S. (2013). Greenhouse gas emission reduction options for cities: Finding the Coincidence of Agendas between local priorities and climate change mitigation objectives. Habitat International, 38, 100-105.

– Getis, A., & Ord, J. K. (1992). The analysis of spatial association by use of distance statistics. Geographical analysis, 24(3), 189-206.

– Jaung, W., Carrasco, L. R., Shaikh, S. F. E. A., Tan, P. Y., & Richards, D. R. (2020). Temperature and air pollution reductions by urban green spaces are highly valued in a

– Liu, Y., Wu, J., Yu, D., & Ma, Q. (2018). The relationship between urban form and air pollution depends on seasonality and city size. Environmental Science and Pollution Research, 25, 15554-15567.

– Rowley, A., & Karakuş, O. (2023). Predicting air quality via multimodal AI and satellite imagery. Remote Sensing of Environment, 293, 113609-113623.

– Safarianzengir, V., Sobhani, B., Yazdani, M. H., & Kianian, M. (2020). Monitoring, analysis and spatial and temporal zoning of air pollution (carbon monoxide) using Sentinel-5 satellite data for health management in Iran, located in the Middle East. Air Quality, Atmosphere & Health, 13, 709-719.

– Spangl, W., Schneider, J., Moosmann, L., & Nagl, C. (2007). Representativeness and classification of air quality monitoring stations. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

– Verghese, S., & Nema, A. K. (2022). Optimal design of air quality monitoring networks a systematic review. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 36(10), 2963-2978.

– Villeneuve, P. J., Jerrett, M., Su, J. G., Burnett, R. T., Chen, H., Wheeler, A. J., & Goldberg, M. S. (2012). A cohort study relating urban green space with mortality in Ontario, Canada. Environmental research, 115, 51-58.

– Wang, C., Zhao, L., Sun, W., Xue, J., & Xie, Y. (2018). Identifying redundant monitoring stations in an air quality monitoring network. Atmospheric Environment, 190, 256-268.

– Wu, B., & Liu, C. (2023). Impacts of building environment and urban green space tropical city-state. Urban Forestry & Urban Greening, 55, 126827-126840.

– Kafi, F., Yousefi, E., Ehteram, M., & Ashrafi, K. (2024). Monitoring Air Pollution Using Sentinel-5 Satellite Imagery A Case Study of Razavi and South Khorasan Provinces. Sustainable Earth Trends, 4(4), 41-55.

– Kazemi Garajeh, M., Laneve, G., Rezaei, H., Sadeghnejad, M., Mohamadzadeh, N., & Salmani, B. (2023). Monitoring trends of CO, NO2, SO2, and O3 pollutants using time-series sentinel-5 images based on google earth engine. Pollutants, 3(2), 255-279.

– Khanh, H. N. T., Rigau-Sabadell, M., Khomenko, S., Barboza, E. P., Cirach, M., Duarte-Salles, T., & de Bont, J. (2025). Ambient air pollution, urban green space and childhood overweight and obesity A health impact assessment for Barcelona Spain. Environmental Research, 264, 120306-120316.

– Kumar, P., Druckman, A., Gallagher, J., Gatersleben, B., Allison, S., Eisenman, T. S., & Morawska, L. (2019). The nexus between air pollution, green infrastructure and human health. Environment international, 133, 105181-105195.

– Li, C., Wang, Z., Li, B., Peng, Z. R., & Fu, Q. (2019). Investigating the relationship between air pollution variation and urban form. Building and Environment, 147, 559-568.

– Liang, Q., Miao, Y., Zhang, G., & Liu, S. (2023). Simulating Microscale Urban Airflow and Pollutant Distributions Based on Computational Fluid Dynamics Model A Review. Toxics, 11(11), 927-939.

features on urban air quality focusing on interaction effects and nonlinearity. Buildings, 13(12), 3111-3123.

– Yu, T., Wang, W., Ciren, P., & Sun, R. (2018). An assessment of air-quality monitoring station locations based on satellite observations. International Journal of Remote Sensing, 39(20), 6463-6478.