

مدلسازی اثرات آلاینده ذرات معلق بر روی افراد به کمک یک مدل پویای مکانی - زمانی و GIS

سیدحسین جلالی^۱، حسین آقامحمدی^{۲*}، محمدحسن وحیدنیا^۳، سیدعلیرضا میرزاحسینی^۴

^۱ دانشجوی دکتری سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
shn.jalali@gmail.com

^۲ استادیار گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
hossein.ghamohammadi@gmail.com

^۳ استادیار مرکز مطالعات سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
mh_vahidnia@sbu.ac.ir

^۴ استادیار گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
mirzahosseini@gmail.com

(دریافت: مهر ۱۴۰۲، تصویب: دی ۱۴۰۲)

چکیده

در میان آلاینده‌های مختلف هوای شهر تهران، آلاینده ذرات معلق با قطر کمتر از $2.5/5$ میکرون یکی از مهمترین آلاینده‌های هوا محسوب می‌شود که از طریق احتراق سوخت ایجاد شده و می‌تواند سبب ایجاد انواع بیماری‌ها و افزایش مرگ و میر افراد شود. با توجه به اهمیت موضوع تاکنون تحقیقات مختلفی در خصوص اثرات آلاینده $PM_{2.5}$ انجام پذیرفته که اغلب آن‌ها به بررسی صرفاً آماری و اپیدمیولوژیکی اثرات پرداخته‌اند. در این مطالعه هدف، بررسی و نمایش اثر غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ به کمک مدلسازی عامل مبنا می‌باشد که در اینجا اثر آلودگی بر روی یک خودرو به عنوان عامل حرکت‌کننده و نمایش اثرات آلودگی به صورت تغییر رنگ بر روی آن، مدنظر قرار گرفته‌است. به همین منظور ابتدا نقشه پراکنش آلاینده $PM_{2.5}$ برای دور روز که دارای شدت آلودگی مختلف بودند، در محیط نرم افزار ArcGIS تهیه شد. برای انجام این کار از اطلاعات مربوط به غلظت آلودگی روزهای ۳ دی و ۱۱ دی ماه سال گذشته استفاده شده و از روش درونیابی IDW برای درونیابی و تهیه نقشه پراکنده استفاده شد. پس از آن از داده‌های بدست‌آمده غلظت آلودگی و همچنین تلفیق آن با موقعیت خیابان‌ها و میادین منطقه مورد مطالعه محیط حرکت عامل در نرم افزار Netlogo ساخته شده و محیط مربوطه فرخوانی شد. با تعیین مبدأ و مقصد، مسیر و میزان سرعت حرکت خودرو، مدل برای دو روز ۳ دی و ۱۱ دی ماه اجرا شد. نتایج اجرای مدل نشان داد که به دلیل شدت آلودگی بالاتر در روز ۱۱ دی، اثر غلظت آلودگی بر روی عامل بسیار بیشتر از روز ۳ دی بوده‌است. با اجرای مدل در روز ۱۱ دی مقدار اثر آلودگی در مدت زمان کوتاهی به اعداد بالای ۱۰۰ که محدوده ناسالم برای گروه‌های حساس است رسید که این میزان غلظت مطابق شاخص AQI سبب ایجاد مشکلات جدی تنفسی بر روی سالمندان و کودکان می‌شود.

واژگان کلیدی: GIS، مدلسازی عامل مبنا، $PM_{2.5}$ ، درونیابی، IDW

۱- مقدمه

آلودگی هوا جزء یکی از مهمترین مسائل زیست محیطی و سلامت عمومی در سطح جهان محسوب می‌شود. گسترش شهرنشینی، توسعه شهرها، افزایش جمعیت، توسعه فعالیت‌های صنعتی و افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی، کمبود سیستم حمل و نقل عمومی کارا، کیفیت کم سوخت و تراکم ترافیک باعث شده که روزانه حجم وسیعی از آلاینده‌های غیرسازگار با مکانیسم‌های طبیعی در هوا تخلیه گردد [۱]. آلودگی هوا یک تهدید بزرگ برای سلامت عمومی، خصوصاً در شهرهای با حجم ترافیک بالا محسوب می‌شود. مطالعات علمی اخیر نشان داده است که یک ارتباط مشخص بین آلاینده‌های هوا بر روی سلامت افراد وجود دارد [۲]. آلاینده‌ها را می‌توان براساس منبع انتشار و حالت آن نیز طبقه‌بندی نمود. بر این اساس آن دسته از آلاینده‌هایی که از منبع به طور مستقیم وارد هوا می‌شوند، به عنوان آلاینده‌های اولیه و آن دسته از آلاینده‌هایی که در نتیجه واکنش آلاینده‌های اولیه با سایر گازها و عناصر موجود در هوا ایجاد می‌شوند، به عنوان آلاینده‌های ثانویه شناخته می‌شوند [۳]، [۴] و [۵].

به عبارت دیگر، آلاینده‌های اولیه آنهایی هستند که از یک منبع مستقیم مانند اگزوز وسایط نقلیه یا از یک منبع ثابت مانند کارخانه‌ها منتشر می‌شوند. در عین حال، گرد و غبار آلوده نیز می‌تواند توسط باد به مناطق غیر آلوده منتقل شود. این آلاینده‌ها را می‌توان با اندازه‌گیری مقادیر منتشر شده توسط خود منبع محاسبه کرد. آلاینده‌های اولیه هوا شامل اکسیدهای نیتروژن^۱، مونوکسیدکربن (CO)^۲، دی-اکسید گوگرد (SO₂)^۳، ترکیبات آلی فرار (VOCs)^۴ و ذرات اولیه کربنی و غیرکربنی می‌شوند [۶]. منابع زیادی برای تولید آلاینده‌های اولیه وجود دارند که از جمله آنها می‌توان به ترافیک شهرها و نیروگاه‌ها اشاره کرد. علاوه بر این گرمایش صنعتی و مسکونی بر پایه چوب، زغال سنگ و نفت نیز به افزایش میزان این دسته از آلاینده‌ها کمک می‌کنند [۵]، [۷] و [۸]. آن دسته از آلاینده‌هایی که در نتیجه واکنش آلاینده‌های اولیه با سایر گازها و عناصر موجود در

هوا ایجاد می‌شوند، به عنوان آلاینده‌های ثانویه شناخته می‌شوند [۳]. از جمله مهمترین آلاینده‌های ثانویه می‌توان به ازن (O₃)^۵، پراکسی آستیل نیترات (PAN)^۶ و ذرات معلق (PM)^۷ اشاره کرد [۵] و [۹]. ذرات معلق موجود در هوا (PM) از جمله ذرات موجود در اتمسفر هستند که تقریباً در تمام مکان‌ها وجود دارند. منابع ایجاد کننده ذرات معلق هم شامل منابع انسانی و هم منابع طبیعی می‌باشند. ذرات معلق براساس قطر آیرودینامیکی به دو دسته تقسیم می‌شوند. ذرات معلق درشت آن دسته از ذراتی هستند که قطر دینامیکی آنها بیش از ۱۰ μm (PM₁₀) می‌باشد و اغلب در ابتدای مجاری تنفسی رسوب می‌کنند [۱۰]. به طور کلی این ذرات از خاک ساییده شده، گرد و غبار جاده، دود ناشی از خودروها، ذرات آلاینده ناشی از ساخت و سازها و یا تجمع ذرات معلق کوچکتر ایجاد می‌شوند [۳].

ذرات معلق با قطر کمتر از ۲/۵ میکرون (PM_{2.5}) به عنوان یکی از مضرترین عناصر برای سلامت انسان شناخته شده است [۱۱]. این ذرات می‌تواند پیامدهای کوتاه‌مدت و بلندمدت بر سلامت انسان داشته باشد [۱۲]. منابع تولید این ذرات اغلب احتراق سوخت می‌باشد. علاوه بر این واکنش‌های مربوط به رادیکال‌های آزاد و هیدروکربن‌های آروماتیک^۸ نیز در تولید این ذرات نقش دارند. به طور کلی معمولاً آلاینده‌های با قطر کمتر از ۲/۵ میکرون از طریق احتراق سوخت خودروها ایجاد شده و از تجمع آنها، ذرات معلق با قطر بیشتر نظیر ذرات با قطر ۱۰ میکرون شکل می‌گیرند [۳]. ذرات PM_{2.5} اثرات بسیار بیشتری نسبت به PM₁₀ دارند و می‌توانند از موانع ریه عبور کرده و وارد جریان خون شوند [۱۳]. از جمله اثرات حاد بهداشتی در غلظت‌های بالای ذرات PM_{2.5}، افزایش شدت مرگ و میر، افزایش میزان عفونت‌های سیستم تنفسی، شروع آسم، آلرژی و برونشیت می‌باشد [۱۴]. نقص در رشد ریه کودکان، انسداد مزمن ریه (COPD)^۹ و افزایش موارد کودکان به آسم از جمله اثرات قرارگرفتن در معرض آلاینده PM_{2.5} می‌باشند [۱۵]، [۱۶]، [۱۷] و [۱۸]. این ذرات علاوه بر این، به طور مستقیم در لوله‌های تنفسی سایش ایجاد کرده و مسیرهای عبور هوا را مسدود می‌کنند [۱۹]. مطالعات بهداشتی،

۶ Peroxyacetyl Nitrate

۷ Particulate Matter

۸ Aromatic Hydrocarbons

۹ Chronic Obstructive Pulmonary Disease

۱ Nitrogen Oxides

۲ Carbon Monoxide

۳ Sulfur Dioxide

۴ Volatile Organic Compounds

۵ Ozone

ارتباط معناداری بین قرارگرفتن در معرض ذرات $PM_{2.5}$ و مرگ زودرس ناشی از بیماریهای قلبی و ریوی نشان می‌دهند [۲۰]، [۲۱] و [۲۲]. نتایج مطالعات ۲۵ سال اخیر نشان می‌دهد که مرگ و میر ناشی از آلاینده $PM_{2.5}$ به شدت افزایش یافته است [۲۳]. همچنین مطالعات نشان می‌دهد که تعداد مراجعه کنندگان به بیمارستان‌ها به دلیل عفونت‌های ریوی ناشی از افزایش غلظت ترکیبات $PM_{2.5}$ به طور معنی‌داری افزایش یافته است [۲۴].

نتایج پژوهش‌های مختلف نشان‌دهنده رابطه مستقیم میان مرگ و میر ناشی از سرطان ریه و سرطان دستگاه گوارش با میزان غلظت $PM_{2.5}$ در هوا می‌باشد [۲۵] و [۲۶]. علاوه بر این، تحقیقات بیانگر این واقعیت است که غلظت $PM_{2.5}$ در نزدیکی جاده‌ها به شدت افزایش می‌یابد و از فواصل ۱۰۰ تا ۲۰۰ متری به بعد از شدت آن کاسته می‌شود [۲۷]. بر این اساس اغلب مطالعات اپیدمیولوژیکی بیانگر رابطه مستقیم میان آلاینده $PM_{2.5}$ و افزایش اثرات ناشی از آن بر روی افراد می‌باشد. در میان شهرهای پرجمعیت دنیا، تهران از نظر آلودگی هوا یکی از آلوده‌ترین پایتخت‌های جهان به شمار می‌رود. وجود کوه‌های البرز در شمال و شرق آن به عنوان یک مانع جلوی بادهای غربی را سد کرده و سبب می‌شوند که همه آلاینده‌ها در سطح شهر باقی بمانند [۲۸]. محدود شدن تهران به وسیله کوه‌ها باعث شده که از خاصیت پالایش مؤثری برخوردار نباشد و عوامل هواشناسی مانند وارونگی دمایی، استمرار سامانه‌های پرفشار همراه با هوای پایدار در فصل‌های سرد و بادهای محلی مانند کوه به دشت، آلاینده‌ها را به مرکز شهر وارد کرده و آلودگی را تشدید می‌کند [۲۹].

علاوه بر این، ارتفاع بالای تهران از سطح دریا کمک به احتراق ناقص سوخت‌ها می‌نماید که این خود بر مشکلات آلاینده‌گی می‌افزاید. براساس مطالعات انجام گرفته در سال‌های قبل، بیشترین ارتباط بین کل مرگ و میرها در شهر تهران و ذرات آلاینده مشاهده گردیده است. طی چند سال اخیر آلاینده ذرات معلق، به ویژه ذرات معلق با قطر کمتر از $2/5$ میکرون به عنوان آلاینده شاخص شهر تهران مطرح شده‌است. شهر تهران از نظر میزان آلاینده‌گی ذرات معلق خصوصاً آلاینده $PM_{2.5}$ دارای بیشترین روزهای ناسالم در طی سالهای اخیر بوده است [۲۰]. طبق آمارهای ارائه شده،

۷۰ درصد ذرات معلق موجود در هوای شهر تهران ناشی از تردد وسایط نقلیه و به نوعی منابع متحرک برآورد شده است [۳۰]. بنابراین می‌توان گفت که آلودگی ناشی از تردد وسایط نقلیه در تهران از مهمترین عوامل آلودگی هوا محسوب می‌شود [۳۱]. این موارد سبب شده است تا تحقیقات مختلف و گوناگونی در خصوص اثرات آلاینده‌های هوای شهر تهران بر روی افراد انجام گیرد که هر کدام از آنها می‌تواند به مدیران و سازمان‌های مختلف جهت تصمیم‌گیری در کاهش آلودگی هوا و اثرات آنها مؤثر باشد. بر همین اساس، هدف از انجام تحقیق پیش رو، مدلسازی و نمایش اثر آلاینده $PM_{2.5}$ بر روی یک خودرو در حال حرکت به عنوان نمونه می‌باشد که با توجه به استفاده از مدلسازی عامل مینا، خودرو به عنوان عامل متحرک در محیط در نظر گرفته شده است و اثر آلودگی بر روی آن مورد بررسی قرار گرفته‌است. به عبارت دیگر چالش این تحقیق، نمایش ملموس اثر آلودگی بر روی یک عامل نمونه می‌باشد که این کار به کمک مدلسازی عامل مینا انجام گرفته‌است. در بخش بعدی در خصوص پیشینه کارهای انجام شده در خصوص اثرات آلودگی هوا به تفصیل توضیح داده شده‌است.

۲- پیشینه تحقیق

تا به امروز تحقیقات گسترده‌ای در خصوص آلودگی هوا در شهر تهران و اثرات مخرب آن بر انسان و محیط انجام شده‌است. طبق بررسی‌های صورت گرفته، اغلب تحقیقاتی که تاکنون در این حوزه انجام گرفته است را می‌توان در دو قالب تقسیم‌بندی نمود: کمی و کیفی. روش‌های کمی بر اندازه‌گیری‌های عددی متکی هستند در حالیکه روش‌های کیفی بر اندازه‌گیری‌های مبتنی بر دسته‌بندی و طبقه‌بندی متکی هستند [۳۲]. تعدادی از این روش‌ها عبارتند از: تخمین آلودگی به کمک روشهای مجاورت، درونیایی، روش رگرسیون کاربری اراضی (LUR)^۱، مدل‌های پراکندگی^۲، سنجش از دور و GIS^۳. در تعدادی از مطالعات و تحقیقات همواره هدف تخمین میزان آلاینده‌های هوای شهر و تجزیه و تحلیل اثرات آنها می‌باشد که این کار اغلب به کمک روش‌های مدلسازی آماری همبستگی و رگرسیون‌های چند متغیره نظیر روش رگرسیون کاربری اراضی (LUR) و یا

۳ Geographic Information System

۱ Land Use Regression

۲ Dispersion Model

روش‌های درون‌یابی انجام می‌گیرد [۳۲]، [۳۳] و [۳۴]. در بین روش‌های ذکر شده، روش رگرسیون کاربری اراضی یکی از روش‌های اصلی است. رگرسیون کاربری زمین (LUR) یک مدل تجربی است که داده‌های پایش آلودگی هوا را در ایستگاه‌های سنجش آلودگی ترکیب می‌کند و پارامترها را از طریق روش‌هایی نظیر GIS جمع‌آوری می‌کند [۳۵] و [۳۶].

روش LUR رابطه‌ای بین غلظت‌های آلودگی مشاهده شده (متغیر وابسته) و پیش‌بینی‌کننده‌های کاربری زمین (متغیرهای مستقل) برای توصیف تغییرپذیری مکانی آلودگی هوا برقرار می‌کند [۳۷]. از جمله تحقیقاتی که به کمک این روش انجام گرفته است می‌توان به مطالعه سیفی و همکارانش (۲۰۱۹) اشاره کرد که از مدل توسعه‌یافته رگرسیون کاربری زمین برای تخمین قرار گرفتن در معرض آلودگی هوا به شکل تصادفی استفاده کردند [۳۸]. دانز و همکارانش (۲۰۱۴) از روش LUR برای تخمین میزان اثرات آلودگی آلاینده کربن سیاه (BC)^۱ و NO₂^۲ به صورت طولانی مدت و روزانه برای کودکان ساکن در منطقه آنتورپ استفاده کردند. تخمین‌ها و تفکیک‌های مکانی - زمانی در این مطالعه مطابق با نیازهای اپیدمیولوژیست‌های درگیر در این تحقیق تنظیم شد [۳۹]. مدل‌های پراکندگی، مدل‌های قطعی هستند که از دانش قطعی و الگوریتم‌های ریاضی به شبیه‌سازی عناصر شیمیایی موجود در جو می‌پردازند.

مطالعات اپیدمیولوژیک به طور کلی بر مدل‌های پراکندگی آلودگی هوا و تلفیق آنها با سایر روش‌های آماری استوار می‌باشند [۴۰] و [۴۱]. تاکنون مطالعات گوناگونی به منظور مدلسازی آلودگی به روش پراکندگی انجام پذیرفته است که از جمله آنها می‌توان به مطالعه بولتو و همکارانش (۲۰۱۹) اشاره کرد که از یک مدل پراکنش برای ارزیابی ارتباط بین قرار گرفتن در معرض آلاینده‌های PM₁₀ و NO_x و میزان مرگ و میر افراد ساکن در منطقه مورد مطالعه استفاده نمودند [۴۲]. در مطالعه‌ای دیگر، گاریاتزو و همکارانش (۲۰۲۱) از یک مدل خاص پراکندگی به نام مدل CTM^۳ که مدلی مبتنی بر تخمین انتشار و پراکندگی مواد شیمیایی و واکنش‌های آنها در جو بود برای بررسی اثرات طولانی مدت قرار گرفتن در معرض آلاینده‌های هوا و ارتباط آن با میزان مرگ و میر رخ داده استفاده کردند [۴۳].

همانطور که گفته شد علاوه بر روش‌های کمی، روش‌های دیگری نیز برای بررسی اثرات آلودگی هوا وجود دارند که به عنوان روش‌های کیفی شناخته می‌شوند. این روش‌ها روش‌های گذشته‌نگر بوده که براساس اطلاعات بدست آمده از سایر مطالعات، پرسشنامه‌ها و یادداشت‌ها اقدام به تحلیل و ارزیابی اثرات آلاینده‌ها می‌نمایند [۳۲]. علاوه بر موارد ذکر شده، در دهه اخیر به منظور بررسی اثرات آلاینده‌ها بر روی افرادی که در معرض آلودگی هوا هستند، تحقیقات مختلفی صورت پذیرفته است که نقطه مشترک آنها استفاده از GIS جهت مدلسازی آلاینده‌ها و اثرات آنها می‌باشد. به عبارت دیگر استفاده از GIS در مطالعات و تحقیقات مربوط به ارزیابی اثرات آلودگی بر افراد در معرض آلاینده‌ها به سرعت افزایش یافته‌است. به طور کلی GIS روشی مناسب برای نمایش ورودی‌ها و خروجی‌های یک مدل مکانی می‌باشد [۴۴]. امروزه افزایش میزان دسترسی به داده‌های ژئوکد شده و همچنین، افزایش ذخیره‌سازی داده‌ها توسط رایانه‌ها سبب شده است تا امکان مدلسازی اثرات آلاینده‌ها با دقت مکانی بالا فراهم شود. با پیشرفت علوم رایانه‌ای این امکان بیش از پیش برای استفاده از GIS در مطالعات مربوط به آلودگی هوا فراهم شده است [۴۵].

به عنوان نمونه اگر بخواهیم به تعدادی از مقالات انجام گرفته به کمک GIS اشاره کنیم می‌توانیم به مقاله ذاکری - کیا و همکارانش (۱۳۹۸) اشاره کنیم که در آن به ارائه راهکاری مکان‌مند برای مدلسازی و تحلیل مکانی پراکنش ذرات معلق PM_{2.5} و PM₁₀ بر پایه آنالیزهای GIS پرداخته شده‌است. در این مطالعه به کمک داده‌های تهیه شده از غلظت آلاینده‌های PM_{2.5} و PM₁₀ در سال‌های ۹۳ و ۹۴ نقشه‌های روزانه و میانگین ماهانه و سالانه غلظت آنها تهیه شده و با توجه به نتایج بدست‌آمده تحلیل مکانی و زمانی پراکنش آلاینده‌های مذکور در شهر تهران انجام شد [۴۶]. در مطالعه‌ای دیگر، جمشیدی و همکارانش (۱۳۹۶) اقدام به شناسایی مکان‌هایی که میزان آلودگی هوا در آن بیشتر بوده نمودند و سپس در مطالعه خود به تحلیل آلودگی و منابع آلاینده‌های هوا با استفاده از مدل آماری و GIS در آبان ماه سال ۱۳۹۵ در شهر اصفهان، پرداختند [۴۷]. در میان تحقیقات گسترده‌ای که تاکنون در حوزه بررسی اثرات آلودگی هوا انجام شده است، کمبود استفاده از ابزارهای

۳ Chemical Transport Model

۱ Carbon Black

۲ Nitrogen Dioxide

مدلسازی پویا کاملاً به چشم می‌خورد. با توجه به اینکه اثرات آلودگی هوا بر شیوع بیماری‌ها تابعی از مکان و زمان است، لذا این مسئله جزء مسائل و چالش‌های پویا (از نظر زمانی و مکانی) در حوزه مدیریت شهری محسوب می‌شود. استفاده از ابزارهای مدلسازی نوین مکانی-زمانی که امروزه کاربرد بسیاری در مدلسازی سیستم‌های پیچیده دارند و تلفیق آن با سایر روش‌ها نظیر GIS، به عنوان یک ابزار مدیریت اطلاعات مکانی، می‌تواند نتایج بهتر، واقعی‌تر و ملموس‌تری را در خصوص اثرات آلاینده‌ها ارائه نماید.

امروزه در دنیا ثابت شده است که پدیده‌های پویای شهری را نمی‌توان صرفاً با نظریات و تئوریهای علوم اجتماعی و همچنین مطالعات اپیدمیولوژیکی و آماری بررسی و مطالعه نمود بلکه اکنون رویکرد کارشناسان به سمت به کارگیری سایر علوم به ویژه هوش مصنوعی و کامپیوتر جهت عینیت بخشیدن به تئوریه‌ها و نمایش مدل‌های نظری و آماری و بررسی مسائل موجود براساس واقعیات مدلسازی شده محیط زندگی انسانهاست. از جمله این روش‌های نوین می‌توان به مدلسازی عامل مبنای اشاره کرد که در مطالعه پیش رو از این روش مدلسازی برای بررسی اثرات آلاینده $PM_{2.5}$ بهره‌گیری شده است. به طور کلی با توجه به اینکه ارزیابی اثرات قرار گرفتن طولانی مدت انسان در معرض آلودگی هوا از نظر مکان و زمان مستلزم در نظر گرفتن متغیرهایی نظیر فعالیت‌های مکانی-زمانی افراد می‌باشد، لذا روش مدلسازی عامل مبنای که روشی مبتنی بر عامل (سیستم‌های چندعامله) می‌باشد، می‌تواند روشی مناسب برای مدلسازی مسائل اجتماعی-محیطی نظیر آلودگی هوا باشد [۴۸] و [۴۹].

با توجه به مطالب گفته شده، می‌توان به این نکته اشاره کرد که مزیت پژوهش پیش‌رو استفاده از بستر مدلسازی عامل مبنای به عنوان یک محیط شیء‌گرا و تلفیق آن با رابطه ریاضی مورد نظر می‌باشد که به کمک آن می‌توان به شکل واقعی و ملموس اثر آلودگی را بر روی عامل متحرک در محیط پیوسته که در آن غلظت آلودگی برای هر سلول به کمک درونیایی در GIS بدست آمده است، نمایش داد. این درحالیست که در اکثر تحقیقات خصوصاً تحقیقات اپیدمیولوژیکی ضعف استفاده از روش‌های نوین مدلسازی در بستر مکان و زمان کاملاً به چشم می‌خورد و در اغلب این

پژوهش‌ها از روش‌های صرفاً آماری و فرمول‌ها جهت بررسی داده‌ها استفاده شده است. بر همین اساس، در بخش بعدی به تفصیل مراحل انجام کار در این مقاله تشریح شده است.

۳- مواد و روش‌ها

در این بخش مراحل انجام کار در این مطالعه در سه بخش ارائه گردیده است. در بخش اول روند کلی کار از ابتدا تا انتها در قالب مدل مفهومی ارائه شده است و فلوچارت روند مذکور نیز نمایش داده شده است. در قسمت دوم داده‌های مورد نیاز جهت اجرای فرآیند مدلسازی در این مطالعه، تشریح گردیده است و در بخش سوم، سناریوی مربوط به اجرای مدلسازی عامل مبنای در نرم افزار مربوطه و الگوی حرکت عامل‌ها در آن و نحوه نمایش اثرات آلاینده $PM_{2.5}$ بیان شده است.

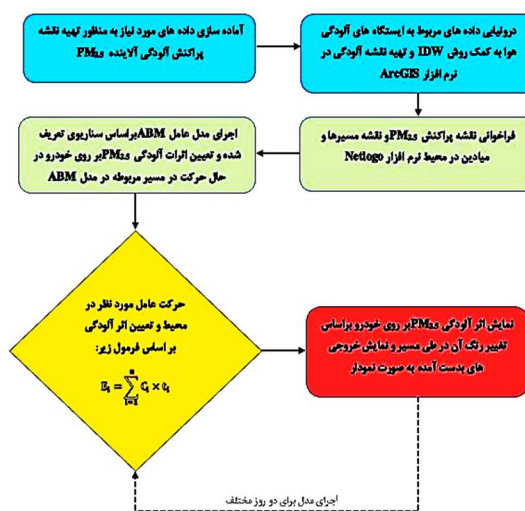
۳-۱- مدل مفهومی و روش کلی کار

همان طور که پیش از این اشاره شد، هدف از این مطالعه بررسی اثرات آلاینده $PM_{2.5}$ به کمک مدلسازی عامل مبنای، به عنوان یکی از روش‌های مدلسازی مکانی-زمانی می‌باشد که برای انجام این کار، نقشه میزان آلودگی $PM_{2.5}$ برای دو روز مختلف با شدت آلودگی متفاوت براساس داده‌های ایستگاه‌های آلودگی هوا در محیط GIS تهیه شده و سپس به کمک نقشه مربوطه و تلفیق آن با نقشه مسیرها و میداین مربوط به منطقه مورد مطالعه، اثرات آلودگی بر عامل نمونه متحرک که در اینجا یک خودرو در نظر گرفته شده است، در محیط نرم‌افزاری عامل مبنای، نمایش داده شده است. نقشه پراکنش آلودگی در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.8.2 و با استفاده از روش درونیایی تهیه شد. برای درونیایی از روش IDW^2 بهره‌گیری شده است و با استفاده از متد Equal Interval خروجی‌های آن در ۶ کلاس نمایش داده شده‌اند. عدد انحراف معیار بدست آمده برابر با 2.97 بود که در محدوده نرمال بوده است. به طور کلی روش درونیایی IDW بر این ایده استوار است که اثر پدیده مورد نظر با افزایش فاصله کاهش می‌یابد. مزیت روش فوق‌الذکر این است که از فاصله به عنوان وزن متغیر معلوم در پیش-بینی نقاط اندازه‌گیری نشده استفاده می‌کند زیرا نقش متغیر پیوسته در تأثیرگذاری با فاصله از مکان نقطه مجهول

^۲ Inverse Distance Weighted

^۱ Agent-based Modeling

کاهش می‌یابد [۵۰]. به طور کلی در این روش درونیابی افزایش یا کاهش وابستگی نقاط مجهول به نقاط معلوم اطراف براساس توان معکوس فاصله تنظیم می‌شود. با توجه به هدف این تحقیق مبنی بر ایجاد یک محیط پیوسته از میزان آلاینده‌ی ذرات معلق مبتنی بر ایستگاه‌های آلودگی هوا، روش IDW می‌تواند یک روش کارا و مؤثر در ایجاد این محیط باشد. پس از تهیه نقشه پراکنش آلودگی و با انتخاب مسیر مورد نظر، از نقشه مسیرها و میادین مربوط به منطقه مورد مطالعه به عنوان نقشه‌های ورودی در نرم افزار عامل مینا به منظور اجرای مدل استفاده شد. از میان نرم‌افزارهای عامل مینای مختلف، نرم‌افزار Netlogo 6.2.2 به جهت امکان نمایش بهتر اثر آلودگی و نزدیکی آن با هدف این مقاله به عنوان نرم‌افزار مدلسازی این مطالعه انتخاب شد. برای اجرای مدل عامل مینا مسیر مربوطه از مبدأ به مقصد بر روی نقشه مشخص شده و یک خودرو به عنوان عامل جهت حرکت در مسیر مربوطه در نظر گرفته شد. با شروع اجرای مدل خودرو مربوطه در مسیر تعیین شده حرکت کرده و براساس فرمول تجمعی آلاینده $PM_{2.5}$ اثر آلودگی بر روی عامل مربوطه به شکل تغییر رنگ آن نمایش داده شده‌است. در شکل ۱ فلوجارت مربوط به روند کار در این مقاله ارائه شده‌است.



شکل ۱- فلوجارت روند کلی اجرای مدل

۳-۲- داده‌های مورد نیاز

همان گونه که اشاره شد، برای تهیه نقشه پراکنش آلودگی و همچنین ایجاد محیط حرکت عامل مورد نظر لازم است تا داده‌های مربوطه مورد نیاز تعیین شوند. در این

مطالعه داده‌های مختلفی مورد استفاده قرار گرفته که در ادامه این داده‌ها عبارتند از:

- ❖ لایه نقطه‌ای مربوط به موقعیت ایستگاه‌های آلودگی هوای شهر تهران
- ❖ لایه پلیگونی مناطق ۲۲ گانه شهر تهران
- ❖ نقشه معابر و میادین شهر تهران
- ❖ اطلاعات توصیفی مربوط به غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا

به منظور پیاده‌سازی مدل مورد نظر و تهیه خروجی مناسب از آخرین داده‌های مربوط به غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ و همچنین آخرین تقسیم‌بندی محدوده مناطق شهر تهران استفاده شد.

۳-۳- سناریوی مدل عامل مینا

به منظور اجرای مدل عامل مینا ابتدا نقشه پراکنش آلودگی آلاینده $PM_{2.5}$ براساس لایه مناطق شهر تهران، موقعیت ایستگاه‌های سنجش آلودگی و همچنین اطلاعات توصیفی مربوط به غلظت $PM_{2.5}$ برای دو روز مختلف با شدت آلودگی متفاوت تهیه شد و با انتخاب محدوده مورد مطالعه جهت تعیین مسیر مورد نظر به عنوان نقشه ورودی به محیط نرم‌افزاری عامل مینا تعیین شد. نقشه مربوطه پس از درونیابی به روش IDW در ۶ کلاس طبقه بندی شده و خروجی آن تهیه شد. با توجه به نقشه تهیه شده، تمامی سلول‌ها از نظر غلظت $PM_{2.5}$ دارای مقدار بوده و با فراخوانی نقشه غلظت آلاینده‌ی از طریق رابط کاربری GIS در نرم‌افزار Netlogo و همچنین نقشه مسیرها و میادین و مبدأ و مقصد حرکت عامل، محیط حرکت عامل مربوطه در نرم‌افزار Netlogo ساخته شد. سناریوی اجرای مدل عامل مینا در نرم‌افزار بدین صورت است که یک خودرو به عنوان عامل نمونه در نظر گرفته شده و مسیر حرکت عامل به رنگ قرمز مشخص گردید. رابط کاربری نرم‌افزار به گونه ای طراحی شد که بتوان سرعت حرکت خودرو را از ابتدا تعیین نمود. با شروع اجرای مدل خودرو براساس سرعت مشخص از مبدأ شروع به حرکت کرده و براساس فرمول تجمعی غلظت آلودگی، پارامتر تأثیرگذاری $PM_{2.5}$ با طی شدن زمان مدل

به صورت تجمعی افزایش می‌یابد. رابطه ریاضی استفاده شده جهت تعیین اثر آلودگی بدین صورت می‌باشد.

$$E_i = \sum_{i=1}^n C_i \times t_i \quad (1)$$

در فرمول مربوطه، C_i غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ می‌باشد که برای خودرو مورد نظر با عبور از سلول i محاسبه می‌شود و واحد آن میکروگرم بر متر مکعب ($\mu g/m^3$) است. t_i زمان حرکت خودرو از مبدأ تا مقصد می‌باشد که همان زمان اجرای مدل است و واحد آن نیز مطابق با زمان مدل به صورت تیک (Tick) محاسبه می‌شود. E_i میزان تأثیرگذاری آلودگی بر روی خودرو براساس میزان در معرض بودن و حرکت آن در سلول i می‌باشد که واحد آن میکروگرم بر مترمکعب ($\mu g/m^3$) می‌باشد. همچنین پارامتر n تعداد سلول‌هایی که خودرو در آن حرکت کرده است را نشان می‌دهد [۵۱]. همان گونه که گفته شد با شروع اجرای مدل خودرو در مسیر تعیین شده حرکت کرده و میزان

تأثیرگذاری آلودگی براساس فرمول تجمعی ارائه شده محاسبه شده که این تأثیرگذاری به شکل تغییر رنگ در خودرو در حال حرکت نمایش داده می‌شود و همزمان نمودار افزایش میزان اثرگذاری آلودگی در یک گراف جداگانه در نرم افزار Netlogo نشان داده می‌شود. غلظت آلودگی هر سلول برابر با متوسط غلظت روزانه آلاینده $PM_{2.5}$ بوده و تغییر رنگ خودرو براساس شاخص کیفیت هوا (AQI) انجام می‌شود که سطوح تغییر آلودگی $PM_{2.5}$ و تقسیم‌بندی آن در شکل جدول ۱ ارائه شده است. جدول شاخص AQI میزان تأثیرگذاری آلودگی $PM_{2.5}$ را در ۶ کلاس ارائه می‌کند که هر کدام از کلاس‌ها بیانگر میزان تأثیرگذاری براساس رنگ کلاس مربوطه می‌باشند. خودرویی که به عنوان عامل در نظر گرفته شده است با حرکت در مسیر و عبور از هر سلول، پارامتر تأثیرگذاری آلودگی آن محاسبه شده و با توجه به مقادیر جدول فوق، رنگ آن تغییر می‌کند.

جدول ۱- شاخص آلودگی آلاینده $PM_{2.5}$ و مقادیر آن براساس شاخص AQI [۵۲]

تشریح	مقدار شاخص	شاخص آلودگی هوا (AQI)
کیفیت هوا مناسب است و خطری برای سلامتی وجود ندارد	۰ تا ۵۰	پاک (خوب)
کیفیت هوا در شرایط قابل قبول قرار دارد مگر برای کسانی که نسبت به برخی از آلاینده‌ها دارای حساسیت هستند و ممکن است علائم تنفسی در آنها دیده شود.	۵۱ تا ۱۰۰	سالم (متوسط)
گروه‌های حساس مانند سالمندان، کودکان و بیماران تنفسی ممکن است علائم تنفسی بروز بدهند اما احتمال بروز علائم در عموم مردم کم است.	۱۰۱ تا ۱۵۰	ناسالم برای گروه‌های حساس
تمامی گروه‌ها با قرار گرفتن در محیط ممکن است اثرات آن را بر سلامتی خود حس کنند و دچار علائم تنفسی شوند و باید فعالیت سنگین یا طولانی بیرون از منزل را کاهش دهند. گروه‌های حساس بیشتر از سایرین در معرض خطر قرار دارند.	۱۵۱ تا ۲۰۰	ناسالم
این حالت دارای هشدار برای سلامتی تمامی افراد است و علائم جدی تری در پی دارد و باید از فعالیت طولانی و سنگین بیرون از منزل خودداری کنند.	۲۰۱ تا ۳۰۰	بسیار ناسالم
این محدوده دارای هشدار بسیار جدی برای سلامت افراد و وضعیت اضطراری است و تخلیه شهر در دستور کار قرار می‌گیرد.	۳۰۱ و بالاتر	خطرناک

۴- نتایج و بحث

شدت آلودگی را داشتند به عنوان نمونه جهت درون‌یابی انتخاب شدند. داده‌هایی که برای تهیه نقشه انتخاب شدند مربوط به روزهای ۳ و ۱۱ دی ماه سال اخیر بودند که در جدول شماره ۲ غلظت آلاینده‌های مربوط به دو روز مذکور برای ایستگاه‌های مختلف ارائه شده است. همان گونه که در

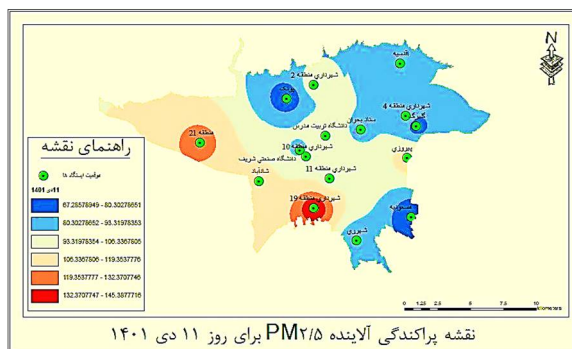
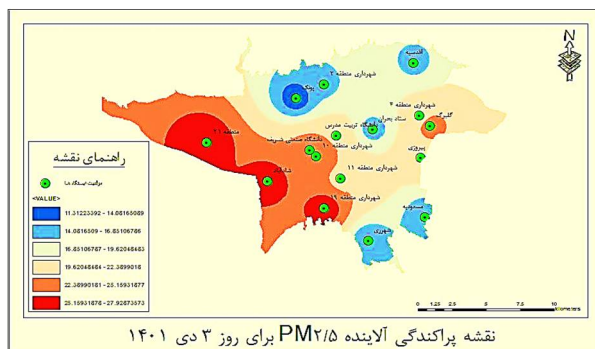
همان گونه که پیش از این نیز بیان شد، به منظور تهیه نقشه پراکنش آلاینده $PM_{2.5}$ از داده‌های غلظت آلودگی مربوط به ۱۶ ایستگاه سنجش آلودگی هوا در سطح شهر تهران استفاده شد. پس از بررسی داده‌های آلودگی، داده‌های مربوط به دو روز از یک ماه که بیشترین و کمترین

موقعیت ایستگاه‌های سنجش آلاینده‌ی هوا متصل شده و برای درونیابی در محیط نرم افزار ArcGIS آماده سازی شد. همانطور که بیان شد، از روش IDW که یکی از مهمترین روش‌های آماری برای درونیابی محسوب می‌شود، جهت درونیابی داده‌ها استفاده شد و نقشه‌های بدست آمده در ۶ کلاس طبقه‌بندی شدند که در شکل ۲ خروجی‌های بدست-آمده ارائه شده‌است.

جدول نیز مشخص است، دامنه آلودگی PM_{2.5} برای روز ۱۱ دی بسیار بیشتر از دامنه آلودگی در روز ۳ دی می‌باشد. دامنه آلودگی روز ۱۱ دی بین ۶۷ تا ۱۴۶ و دامنه آلودگی روز ۳ دی نیز بین ۱۱ تا ۲۸ می‌باشد. توجه به شدت آلاینده‌ی بالاتر در روز ۱۱ دی بیانگر این نکته است که تأثیر آلودگی بر روی افراد نیز در این روز بیشتر بوده‌است. داده‌های جدول شماره ۲ پس از تهیه به لایه نقطه‌ای

جدول ۲- موقعیت ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا و میزان غلظت آلاینده PM_{2.5} برای دو روز مورد نظر

نام ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	غلظت PM _{2.5} برای روز ۳ دی ماه	غلظت PM _{2.5} برای روز ۱۱ دی ماه
اقدسیه	35° 48' 0.214"	51° 29' 6.114"	۱۵/۹۲	۸۴/۲۳
پونک	35° 45' 46.418"	51° 18' 51.611"	۱۱/۳۱	۶۸/۹۴
شهرداری منطقه ۲	35° 46' 37.52"	51° 22' 5.43"	۱۶/۰۳	۹۹/۱۰
گلبرک	35° 43' 51.692"	51° 30' 22.073"	۲۴/۰۶	۷۴/۰۸
مسعودیه	35° 37' 48.099"	51° 29' 56.48"	۱۳/۹۴	۶۷/۲۸
شهری	35° 36' 16.475"	51° 25' 32.08"	۱۳/۹۳	۸۱/۵۵
شهرداری منطقه ۴	35° 44' 30.54"	51° 29' 32.95"	۲۰/۶۸	۸۹/۸۳
شهرداری منطقه ۱۰	35° 41' 50.94"	51° 21' 28.91"	۲۴/۵۶	۱۰۴/۵۰
شهرداری منطقه ۱۱	35° 40' 22.72"	51° 23' 23.04"	۲۱/۵۵	۱۰۲/۵۶
شهرداری منطقه ۱۹	35° 38' 06.76"	51° 21' 45.08"	۲۷/۹۰	۱۴۵/۴۰
شاد آباد	35° 40' 14.619"	51° 17' 36.559"	۲۷/۵۹	۱۱۱/۸۴
پیروزی	35° 41' 45.581"	51° 29' 37.545"	۲۱/۹۷	۱۱۷/۷۶
ستاد بحران	35° 43' 37.5"	51° 25' 52.31"	۱۴/۹۴	۸۹/۸۳
شهرداری منطقه ۲۱	35° 42' 46.673"	51° 12' 52.152"	۲۷/۹۳	۱۲۴/۴۴
دانشگاه شریف	35° 42' 21.391"	51° 20' 44.861"	۲۴/۰۳	۸۶/۵۱
دانشگاه تربیت مدرس	35° 43' 12.72"	51° 23' 1.30"	۲۲/۲۷	۱۰۳/۶۳



شکل ۲- خروجی بدست‌آمده مربوط به نقشه پراکندگی غلظت PM_{2.5} برای دو روز ۳ و ۱۱ دی ماه

این نقشه مسیرها و خیابان‌های منطقه مورد مطالعه نیز وارد نرم‌افزار شده و مبدأ و مقصد حرکت خودرو به عنوان عامل مشخص شد. جهت بررسی اثر آلودگی دو نقطه در مرکز شهر به عنوان مبدأ و مقصد تعیین گردید و مسیر حرکت عامل نیز

پس از تهیه نقشه غلظت آلودگی، غلظت آلاینده PM_{2.5} به طور پیوسته برای تمامی نقاط مشخص شده و مقادیر آن به عنوان ورودی برای محدوده مورد مطالعه، جهت استفاده در محیط عامل مبنا، وارد نرم افزار Netlogo گردید. علاوه بر

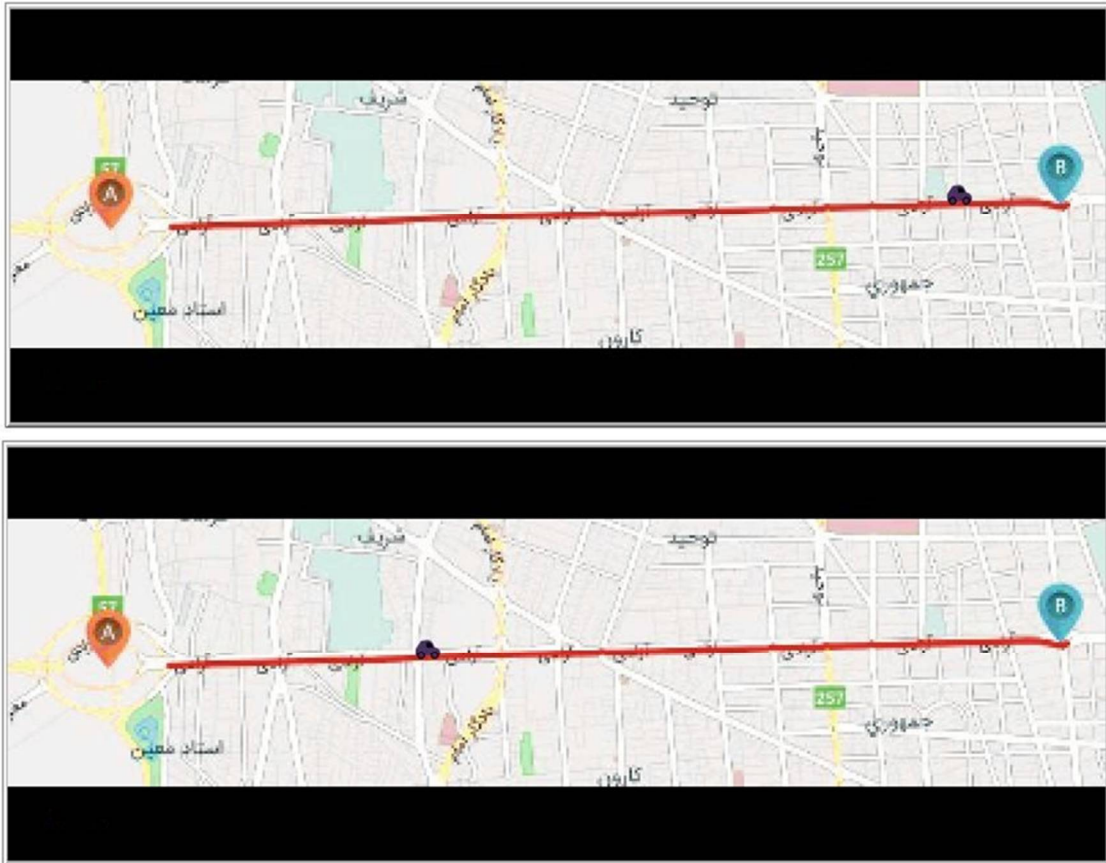
با رنگ قرمز در محیط نمایش داده شد. برای اجرای مدل عامل مبنا رابط کاربری مناسب در نرم افزار Netlogo طراحی شد تا بتوان سرعت خودرو و همچنین نمودار مربوط به میزان تأثیرگذاری آلودگی را در هنگام حرکت عامل به طور مشخص نمایش داد. به کمک رابط کاربری طراحی شده این امکان فراهم شد تا بتوان اثرگذاری آلاینده را بر روی خودرو به صورت لحظه‌ای پایش کرد. پس از فراخوانی نقشه‌ها، با کلیک بر روی دکمه مربوطه، شروع اجرای مدل آغاز شده و خودرو مورد نظر به عنوان عامل در مسیر تعیین شده به حرکت درآمد. نحوه محاسبه تأثیرگذاری آلودگی بدین صورت است

جدول ۳- نتایج بدست آمده از مدل برای دو روز ۳ دی و ۱۱ دی در زمان‌های معین

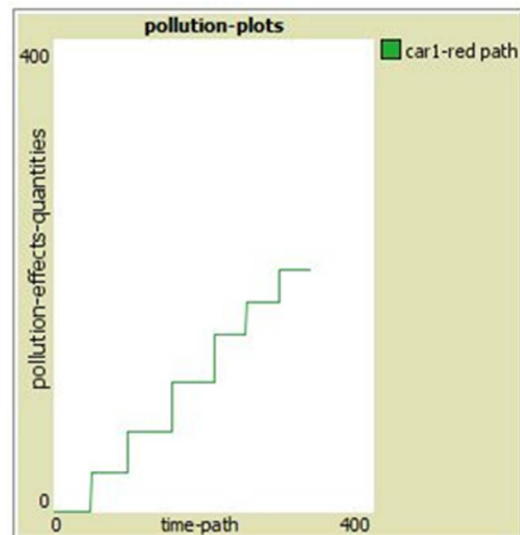
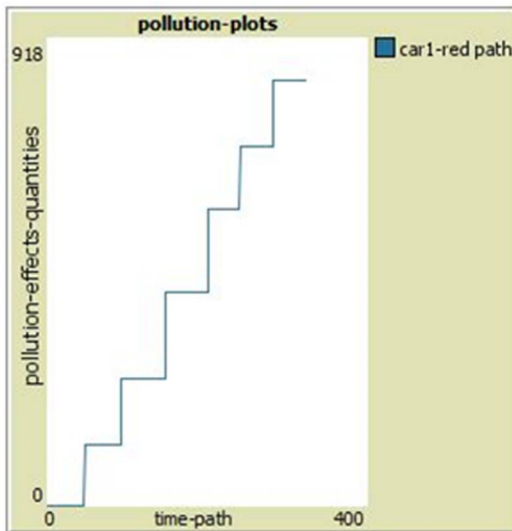
زمان مدل (Tick)						مقدار اثر $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$) در زمان‌های مدل در دو روز مورد نظر
۳۲۰	۲۵۰	۲۰۰	۱۵۰	۱۰۰	۵۰	
۲۰۵	۱۷۶	۱۴۶	۱۱۰	۶۶	۳۲	روز ۳ دی
۸۳۲	۷۰۷	۵۷۶	۴۱۸	۲۴۸	۱۱۹	روز ۱۱ دی

که اجرای مدل نشان می‌دهد که تأثیرگذاری آلودگی بر روی خودرو از یک روند خاص پیروی می‌کند. در روز ۳ دی میزان غلظت برای خودرو در حال حرکت در تیک ۱۵۰ به مرحله ناسالم برای گروه‌های حساس رسیده است در حالیکه در روز ۱۱ دی در تیک ۴۵ این اتفاق افتاده است. مطابق با نتایج جدول ۲، در روز ۱۱ دی، غلظت آلودگی در تیک ۵۰ برای خودرو به عدد ۱۱۹ رسیده که این نشان‌دهنده این واقعیت است که با توجه به غلظت آلاینده بالای روز ۱۱ دی، تأثیرگذاری آلودگی برای خودرو در زمان کمتری به مرحله ناسالم رسیده است و در تیک ۱۰۰ مقدار آن در محدوده بسیار ناسالم قرار گرفته است در حالیکه عدد غلظت بدست آمده برای خودرو در همان تیک در روز ۳ دی در محدوده سالم می‌باشد. علاوه بر این، در تیک ۱۵۰ عدد بدست آمده برای روز ۱۱ دی نشان‌دهنده قرار گرفتن خودرو در وضعیت خطرناک می‌باشد در حالیکه برای روز ۳ دی وضعیت عامل در حال حرکت، ناسالم برای گروه‌های حساس می‌باشد. به طور کلی نتایج بدست آمده حاکی از این واقعیت است که خودرو در روز ۳ دی تأثیر کمتری از آلودگی نسبت به روز ۱۱ دی پذیرفته است و تغییر رنگ خودرو در روز ۱۱ دی بسیار زودتر و در زمان کمتری اتفاق افتاده است. در شکل ۴ نمودار تغییر مقدار غلظت آلودگی برای خودرو در دو روز مورد نظر ارائه شده است.

اجرای مدل برای هر دو روز نتایج بدست آمده بدین صورت است که برای روز ۳ دی با حرکت خودرو در مسیر تعیین شده، خودرو در تیک ۹۰ به رنگ زرد درآمد و در تیک ۱۵۰ نیز رنگ آن نارنجی شد. این در حالیست که برای روز ۱۱ دی، خودرو در تیک ۴۵ به رنگ نارنجی درآمد. خودرو در روز ۳ دی با رسیدن به تیک ۲۰۳ به رنگ قرمز و در تیک ۲۸۳ به رنگ بنفش درآمد و تا انتهای مدل نیز رنگ آن تغییر نکرد در حالیکه در روز ۱۱ دی خودرو در تیک ۹۰ به رنگ بنفش درآمد و در تیک ۱۴۸ نیز رنگ آن قهوه‌ای شد. این خروجی نشان‌دهنده این است که اثرگذاری آلاینده بر روی خودرو در حال حرکت در روز ۱۱ دی مطابق انتظار، بیشتر از روز ۳ دی ماه بوده است. با افزایش غلظت آلاینده و تغییر رنگ خودرو، مدل اجرا شده به وضوح این تأثیرپذیری را نمایش داد. در جدول شماره ۲ نیز مقادیر بدست آمده در زمان‌های مدل ارائه شده نیز بیانگر این واقعیت است که خودرو در حال حرکت با گذشت ۳۲۰ تیک در روز ۳ دی به مقدار ۲۰۵ رسیده است در حالیکه در روز ۱۱ دی در تیک ۵۰ به مقدار ۱۱۹ و در تیک ۱۰۰ به مقدار ۲۴۸ رسیده است که غلظت آلاینده بسیار ناسالم محسوب می‌شود. در شکل ۳ لحظه تغییر رنگ خودرو به بنفش برای روز ۳ دی و ۱۱ دی ماه نمایش داده شده است. اگر بخواهیم نتایج بدست آمده را مطابق شاخص AQI تحلیل کنیم می‌توانیم بگوییم



شکل ۳- خروجی مدل اجرا شده در نرم افزار Netlogo برای روز ۳ دی (تصویر اول) و ۱۱ دی ماه (تصویر دوم)



شکل ۴- نمودار روند افزایش غلظت آلودگی برای عامل (خودرو) در روز ۳ دی (تصویر راست) و روز ۱۱ دی (تصویر چپ)

۵- نتیجه گیری

امروزه با گسترش علوم کامپیوتر و هوش مصنوعی و تلفیق آن با علم آمار و ریاضیات، به منظور نمایش دقیق تر و ملموس تر پدیده‌های پویای شهری استفاده از روش‌های نوین مدلسازی نظیر مدلسازی عامل مبنا که امکان مدلسازی پدیده‌های مکانی-زمانی را فراهم می‌کند، در حال

به منظور مدلسازی و نمایش اثرات آلودگی هوا تاکنون مطالعات مختلفی انجام پذیرفته است که در بسیاری از آنها از روش‌های صرفاً آماری و اپیدمیولوژیکی استفاده شده‌است.

گسترش است. استفاده از روش مدل‌سازی عامل مبنا و روش‌های نظیر آن، سبب می‌شود تا بتوان المان‌های شهری را مدل‌سازی نمود و فرآیندهای پویای شهری نظیر اثرات آلاینده‌های هوا را شبیه‌سازی و مدل‌سازی کرد.

بر همین اساس، در این مطالعه هدف، بررسی و نمایش اثر غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ به کمک مدل‌سازی عامل مبنا می‌باشد که در اینجا اثر آلودگی بر روی یک خودرو به عنوان عامل حرکت‌کننده در محیط عامل مبنا مدنظر قرار گرفته‌است. به همین منظور ابتدا نقشه پراکنش آلودگی آلاینده $PM_{2.5}$ برای دور روز مختلف در محیط نرم افزار ArcGIS تهیه شد. برای این کار اطلاعات مربوط به غلظت آلودگی به لایه نقطه‌ای موقعیت ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا متصل شده و از روش درونیایی IDW برای درونیایی و تهیه نقشه پراکنش استفاده شد. پس از آن از داده‌های بدست آمده غلظت آلودگی و همچنین تلفیق آن با موقعیت خیابان‌ها و میدانی منطقه مورد مطالعه محیط حرکت عامل در نرم افزار Netlogo ساخته شده و محیط مربوطه فرخوانی شد. با تعیین مبدأ و مقصد، مسیر و میزان سرعت حرکت خودرو به عنوان عامل مورد نظر، مدل برای دو روز ۳ دی و ۱۱ دی ماه اجرا شد. نتایج اجرای مدل نشان داد که به دلیل شدت آلودگی بالاتر در روز ۱۱ دی، اثر غلظت آلودگی بر روی عامل بسیار بیشتر از روز ۳ دی بوده است که این موضوع در تغییر رنگ عامل مربوطه به شکل ملموس نمایان شد. در این مقاله اثر آلودگی مطابق با شاخص AQI به صورت تغییر رنگ در عامل نمایش داده شد.

مطابق خروجی‌ها و اعداد بدست آمده که در بخش قبلی ارائه شد، مشخص است که میزان اثر غلظت آلودگی بر روی خودرو در روز ۱۱ دی در مدت زمان کوتاهی به اعداد بالای ۱۰۰ که محدوده ناسالم برای گروه‌های حساس است رسیده است و این میزان غلظت سبب ایجاد مشکلات جدی تنفسی و ریوی بر روی سالمندان و کودکان می‌شود. به عبارت دیگر در مدل مربوط به این روز، در زمان کوتاهی (زمان کمتر از ۱۰۰) مقدار اثر آلودگی به عدد بالای ۲۰۰ رسیده و رنگ

مراجع

خودرو به رنگ بنفش تغییر کرده که این میزان غلظت باعث بروز مشلات جدی برای تمامی گروه‌های سنی می‌شود. همچنین با افزایش غلظت آلودگی (در زمان کمتر از ۱۵۰) رنگ عامل به سرعت به رنگ قهوه‌ای تغییر کرده است که نشان‌دهنده وضعیت بسیار خطرناک برای تمامی گروه‌های سنی می‌باشد. این در حالیست که در روز ۳ دی، رنگ خودرو با توجه به غلظت پایین‌تر، در طول مدت زمان بیشتری تغییر کرده و مقدار اثر آلودگی در مدت زمان طولانی‌تری افزایش یافته‌است. مطابق با جدول بخش قبلی، کاملاً مشخص است که غلظت آلودگی خودرو تا میانه‌های مسیر در وضعیت سالم برای کلیه گروه‌ها می‌باشد و از تیک ۱۵۰ به بعد وارد مرحله ناسالم برای گروه‌های حساس می‌شود. همچنین اجرای مدل نشان داد که تقریباً در انتهای زمان مدل اثر آلودگی بر روی عامل به مرحله بسیار ناسالم برای کلیه گروه‌ها رسیده و میزان اثر آلودگی نیز وارد محدوده خطرناک نشده و تا انتهای اجرای مدل نیز خودرو به رنگ قهوه‌ای درنیامده‌است. با توجه به ملموس بودن نتایج و خروجی‌های بدست آمده و نمایش واقعی اجرای مدل می‌توان گفت که استفاده از مدل عامل مبنا و نمایش اثرات براساس تغییر رنگ عامل‌ها، به عنوان نوآوری این مطالعه محسوب می‌شود و می‌توان در مطالعات بعدی به توسعه این مدل جهت شبیه‌سازی هرچه بهتر اثرات آلاینده‌های مختلف موجود در هوا پرداخت.

با این حال در این مقاله صرفاً از دو پارامتر غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ و زمان جهت مدل‌سازی استفاده شده است که می‌توان در مطالعات بعدی جهت توسعه مدل به سایر پارامترها نیز توجه نمود. به عنوان مثال می‌توان با در نظر گرفتن شرایط متغیر ترافیکی در مسیر مورد نظر و تعیین سرعت متغیر حرکت خودرو به نمایش واقعی‌تر مدل کمک نمود. همچنین در مطالعات بعدی می‌توان با تلفیق تحلیل‌های GIS با مدل عامل مبنا با در نظر گرفتن شرایط آلودگی و ترافیکی مسیر مربوطه، به شبیه‌سازی هر چه بهتر اثر آلودگی کمک نمود.

- [۱] Khazaei, E., Alesheikh, A. A., Karimi, M., Vahidnia, M. H. (2017). "Prediction and modeling of carbon monoxide pollutant concentration with the integration of adaptive neural-fuzzy network and geographic information system." *Journal of RS and GIS for Natural Resources. Vol. 3, No. 3, PP. 21-33, (in Persian).*

- [۲] Esposito, S., Galeone, C., Lelii, M., Longhi, B., Ascolese, B., Senatore, L., ... Principi, N. (2014). "Impact of air pollution on respiratory diseases in children with recurrent wheezing or asthma." *BMC Pulmonary Medicine*. Vol. 14, No. 130.
- [۳] Bernstein, J. A., Alexis, N., Barnes, C., Bernstein, L., Nel, A., Peden, D... Williams, B. (2004). "Health effects of air pollution." *Environmental and Occupational Respiratory Disorders*. Vol. 70, No. 3, PP. 245-256.
- [۴] Mannucci, P. M., Harari, S., Martinelli, I., Franchini, M. (2015). "Effects on health of air pollution: a narrative review." *Internal and Emergency Medicine*. Vol. 10, No. 6, PP. 657-662.
- [۵] World Health Organization. (2005). "WHO air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide." global update 2005, PP. 1-21.
- [۶] Bala, G. P., Rajnoveanu, R. M., Tudorache, E., Motișan, R., Oancea, C. (2021). "Air pollution exposure the (in) visible risk factor for respiratory diseases." *Environmental Science and Pollution Research*. Vol. 28, PP. 19615-19628.
- [۷] Kravchenko, J., Lyerly, H. K. (2018). "The impact of coal-powered electrical plants and coal ash impoundments on the health of residential communities." *North Carolina Medical Journal*. Vol. 79, No. 5, PP. 289-300.
- [۸] Minichilli, F., Gorini, F., Bustaffa, E., Cori, L., Bianchi, F. (2019). "Mortality and hospitalization associated to emissions of a coal power plant: a population-based cohort study." *Science of the Total Environment*. Vol. 694, No. 133757.
- [۹] Li, T., Hu, R., Chen, Z., Li, Q., Huang, S., Zhu, Z., Zhou, L. F. (2018). "Fine particulate matter (PM2.5): The culprit for chronic lung diseases in China." *Chronic Diseases and Translational Medicine*. Vol. 4, No. 3, PP. 176-186.
- [۱۰] Guarnieri, M., Balmes, J. R. (2014). "Outdoor air pollution and asthma." *The Lancet*. Vol. 383, No. 9928, PP. 1581-1592.
- [۱۱] Park, Y. M. (2020). "Assessing personal exposure to traffic-related air pollution using individual travel-activity diary data and an on-road source air dispersion model." *Health and Place*. Vol. 63, No. 102351.
- [۱۲] Lin, C. K., Lin, R. T., Chen, T., Zigler, C., Wei, Y., Christiani, D. C. (2019). "A global perspective on coal-fired power plants and burden of lung cancer." *Environmental Health: A Global Access Science Source*. Vol. 18, No. 1, PP. 1-11.
- [۱۳] Naddafi, K., Hassanvand, M. S., Faridi, S. (2019). "Review of studies on air quality status and its health effects in Iran." *Iranian Journal of Health and Environment*. Vol. 12, No. 1, PP. 151-172, (in Persian).
- [۱۴] Bowatte, G., Lodge, C., Lowe, A. J., Erbas, B., Perret, J., Abramson, M. J... Dharmage, S. C. (2015). "The influence of childhood traffic-related air pollution exposure on asthma, allergy and sensitization: a systematic review and a meta-analysis of birth cohort studies." *Allergy*. Vol. 70, PP. 245-256.
- [۱۵] Adar, S. D., Filigrana, P. A., Clements, N., Peel, J. L. (2014). "Ambient coarse particulate matter and human health: a systematic review and meta-analysis." *Current Environmental Health Reports*. Vol. 1, No. 3, PP. 258-274.
- [۱۶] Akpınar-Elci, M., Martin, F. E., Behr, J. G., Diaz, R. (2015). "Saharan dust, climate variability, and asthma in Grenada, the Caribbean." *International Journal of Biometeorology*. Vol. 59, No. 11, PP. 1667-1671.
- [۱۷] Cadelis, G., Tourres, R., Molinie, J. (2014). "Short-term effects of the particulate pollutants contained in Saharan dust on the visits of children to the emergency department due to asthmatic conditions in Guadeloupe (French Archipelago of the Caribbean)." *PloS ONE*. Vol. 9, No. 3.
- [۱۸] Zhang, S., Li, G., Lin, T., Guo, Q., Pan, X. (2016). "Short-term exposure to air pollution and morbidity of COPD and asthma in East Asian area: a systematic review and meta-analysis." *Environmental Research*. Vol. 148, PP. 15-23.
- [۱۹] Kermani, M., Aghaei, M., Gholami, M., Bahramiasl, F., Karimzadeh, S., Fallah, S., Dolati, M. (2011). "Estimation of Mortality Attributed to PM2.5 and CO Exposure in eight industrialized cities of Iran during 2011." *Iran Occupational Health*. Vol. 13, No. 4, PP. 49-61, (in Persian).
- [۲۰] Bahari, R., Abbaspour, R., Pahlavani, P. (2016). "Zoning of suspended particulate pollution using local statistical models in GIS (case study, Tehran)." *Journal of Geomatics Science and Technology*. Vol. 5, No 3, (in Persian).
- [۲۱] Motesaddizarandi, S., Nasiri, R. (2020). "Spatio-temporal analysis of PM2.5 pollutant in Tehran metropolis during the years 2014-2017." *Journal of Research in Environmental Health*. Vol. 6, No. 3, PP. 211-220, (in Persian).

- [۲۲] Mohammadian, M., Sojodi, L., Etemadinejad, S. (2011). "Survey of concentrations of PM2.5 inside and outside of shops in Sari's city centre." *Journal of Mazandaran University of Medical Science. Vol. 21, No. 84, PP. 72-79*, (in Persian).
- [۲۳] Cohen, A. J., Brauer, M., Burnett, R., Anderson, H. R., Frosted, J., Estep, K. ... Forouzanfar, M. H. (2017). "Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015." *Lancet. Vol. 389, PP. 1907-1918*.
- [۲۴] Zhang, Z., Chai, P., Wang, J., Ye, Z., Shen, P., Lu, H., Jin, M. ... Chen, K. (2019). "Association of particulate matter air pollution and hospital visits for respiratory diseases : a time-series study from China." *Environmental Science and Pollution Research International. Vol. 26, No. 12, PP. 12280-12287*.
- [۲۵] Hamra, G. B., Guha, N., Cohen, A., Laden, F., Raaschou-Nielsen, O., Samet, J. M. ... Loomis, D. (2014). "Outdoor particulate matter exposure and lung cancer: a systematic review and meta-analysis." *Environmental Health Perspectives. Vol. 122, No. 9, PP. 906-911*.
- [۲۶] Rahmani, H., Sadeghi, S., Roshani, M., Amani, D., Ghazanfari, T., Nariman, M. (2019). "Particulate matter effects on peritoneal macrophages inflammatory function in C57BL/6 mice." *Research on Medicine. Vol. 43, No. 1, PP. 1-7*, (in Persian).
- [۲۷] Isakov, V., Arunachalam, S., Batterman, S., Bereznicki, S., Burke, J., Dionizio, K. ... Vette, A. (2014). "Air quality modeling in support of the near-road exposures and effects of urban air pollutants study (NEXUS)." *International Journal of Environmental Research and Public Health. Vol. 11, No. 9, PP. 8777-8793*.
- [۲۸] Safavi, S. Y., Alijani, B. (2007). "Investigation of geographical factors in air pollution in Tehran." *Geographical Research Quarterly. Vol. 38, No. 58, PP. 99-112*, (in Persian).
- [۲۹] Karimi, M., Khosnavaz, S., Shamsipour, A., Moghbel, M. (2020). "Modeling the Effect of Street Orientation on the Air Pollution Dispersion (District Six of Tehran Municipality)." *Motaleate Shahri. Vol. 9, No. 34, PP. 77-90*, (in Persian).
- [۳۰] Rafieetoroghi, H., Hosseinali, F., Sheikhmohammadzadeh, A. (2017). "Analysis and modeling of effective environmental effects on PM2.5 pollutant using LUR method in Tehran city." *The 2nd National Conference on Geospatial Information Technology (NCGIT), K.N.Toosi University of Technology, Faculty of Geomatics Engineering, Tehran, Iran*, (in Persian).
- [۳۱] Mansoori, N. (2011). "Environmental pollution.", *Arad Ketab. Tehran*, (in Persian).
- [۳۲] Susumary, J., Deepalakshmi, P. (2020). "Innovative Methods of Air Pollution Exposure Assessment for Environmental Safety." *Procedia Computer Science. Vol. 171, PP. 689-698*.
- [۳۳] Gholizadeh, M. H., Farajzadeh, M., Darand, M. (2009). "The Correlation Between Air Pollution and Human Mortality in Tehran." *Hakim. Vol. 12, No. 2, PP. 65-71*, (in Persian).
- [۳۴] Matkan, Aliakbar., Shakiba, A., Pourali, S. H., Baharloo, I. (2009). "Determining spatial and temporal changes of CO pollution and PM using GIS techniques in Tehran." *Iranian Journal of Remote Sensing and GIS. Vol. 1, No. 1, PP. 57-72*, (in Persian).
- [۳۵] Habermann, M., Billger, M., Haeger-Eugensson, M. (2015). "Land use regression as method to model air pollution. Previous results for Gothenburg/Sweden." *Procedia Engineering. Vol. 115, PP. 21-28*.
- [۳۶] Saucy, A., Roosli, M., Kunzli, N., Tsai, MY., Sieber, C., Olaniyan, T. ... De hoogh, K. (2018). "Land Use Regression Modelling of Outdoor NO2 and PM2.5 Concentrations in Three Low Income Areas in the Western Cape Province, South Africa." *International Journal of Environmental Research Public Health. Vol. 15, No. 1452*.
- [۳۷] Hoek, G. (2017). "Methods for assessing long-term exposures to outdoor air pollutants." *Current Environmental Health reports: Topical Collection on Air Pollution and Health. Vol. 4, PP. 450-462*.
- [۳۸] Seifi, M., Niazi, S., Johnson, G., Nodehi, V., Yunesian, M. (2019). "Exposure to Ambient Air Pollution and Risk of Childhood Cancers: A Population-Based Study in Tehran, Iran." *Science of Total Environment. Vol. 646, PP. 105-110*.
- [۳۹] Dons, E., Poppel, M. V., Panis, L. I., Prins, S. D., Berghmans, P., Koppen, G., Matheeußen, C. (2014). "Land Use Regression Models as a Tool for Short, Medium- and Long-Term Exposure to Traffic Related Air Pollution." *Science of the Total Environment. Vol. 476, PP. 378-386*.

- [۴۰] Coudon, T., Danjou, A. M. N., Faure, E., Praud, D., Severi, G., Mancini, F. R. ... Fervers, B. (2019). "Development and performance evaluation of a GIS-based metric to assess exposure to airborne pollutant emissions from industrial sources." *Environmental Health*. Vol. 18, No. 8.
- [۴۱] Teggi, S., Costanzini, S., Ghermandi, G., Malagoli, C., Vinceti, M. (2017). "A GIS-based atmospheric dispersion model for pollutants emitted by complex source areas." *Science of the Total Environment*. Vol. 610, PP. 175-190.
- [۴۲] Bauleo, L., Bucci, S., Antonucci, C., Sozzi, R., Davoli, M., Forastiere, F., Ancona, C. (2019). "Long-Term Exposure to Air Pollutants from Multiple Sources and Mortality in an Industrial Area: A Cohort Study." *Occupational Environment Medicine*. Vol. 76, PP. 48-57.
- [۴۳] Gariazzo, C., Carlino, G., Silibello, C., Gianni, T., Renzi, M., Finardi, S. ... Stafoggia, M. (2021). "Impact of different exposure models and spatial resolution on the long-term effects of air pollution." *Environmental Research*. Vol. 192, No. 110351.
- [۴۴] Vahidnia, M. H., Vafaiejad, A. R., Shafiei, M. (2019) "Heuristic game-theoretic equilibrium establishment with application to task distribution among agents in spatial networks." *Journal of Spatial Science*. Vol. 64, No. 1, PP. 131-152.
- [۴۵] Stroth, E. (2010). "The use of GIS in assessing exposure to airborne pollutants, Sweden." Department of medicine. Land University.
- [۴۶] Zakerikia, S., Aghamohammadi, H., Behzadi, S., Azizi, Z. (2020). "Modeling and Spatio -Temporal Analysis of the Distribution of Particulate Matter in Tehran City Based on Spatial Analysis in GIS Enviroment." *Journal of Environmental Science and Technology*. Vol. 22, No. 11, PP. 241-252, (in Persian).
- [۴۷] Jamshidi, S. S., Mohammadzadeh, M., Ghofrani, M. (2017). "Locating and analyzing pollution and sources of air pollutants in the metropolis of Isfahan using a geographic information system (GIS)." *The 7th International Conference on Sustainable Development and Urban Development, Esfahan, Iran*, (in Persian).
- [۴۸] Ghazi, S., Dugdale, J., Khadir, T. (2015). "A Multi-Agent based Approach for Simulating the Impact of Human Behaviours on Air Pollution." *Informatica*. Vol. 39, PP. 501-505.
- [۴۹] Lu, M., Schmitz, O., de Hoogh, K., Hoek, G., Li, Q., Karssenber, D. (2022). "Integrating statistical and agent-based modelling for activity-based ambient air pollution exposure assessment." *Environmental Modelling and Software*. Vol. 158, No. 105555.
- [۵۰] Jalali, S. H., Vafaiejad, A. R., Aghamohammadi, H., Esmacili Bidhendi, M. (2019). "The Study of CO Symptoms' Impacts on Individuals, Using GIS and Agent-based Modeling (ABM)." *Pollution*. Vol. 5, No. 3, PP. 463-471.
- [۵۱] Klepeis, N. E. (2006). "Modeling Human Exposure to Air Pollution. In: *Human Exposure Analysis*." CRC Press.
- [۵۲] Abulude, F. O., Arifalo, K. M., Kenni, A. M., Akinnusotu, A., Oluwagbayide, S. D., Sunday, A. (2022). "Air quality index levels of particulate matter (PM2.5) in Yenogua, Nigeria." *Journal Geografi Gea*. Vol. 22, No. 2.