نشریه علمی پژوهشی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال چهارم، شماره دوم، تابستان ۱۳۹۵
Vol.4, No.2, Summer 2016
۲۹-٤٦

غنی‌سازی شبکه پایش آلودگی هوا با استفاده از حسگرهای متحرک به‌منظور مدلسازی مکانی توزیع آلاینده‌ها (مطالعه موردی: آلاینده مونواکسید کربن در کلانشهر تهران)

منوچهر خردمندی[۱]، رحیم علی عباسپور[۲]*

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سیستم‌های اطلاعات مکانی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده های فنی دانشگاه تهران.
۲- استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۵/۰۲/۲۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۰۷

چکیده

با توسعه فناوری حسگرهای متحرک بی‌سیم، تولید اطلاعات مکانی داوطلبانه و افزایش مشارکت عمومی به منظور پایش محیط‌های شهری با تغییرات قابل توجهی روبرو گردیده است. از سوی دیگر، آلودگی هوا یکی از مهم‌ترین معضلات کلان‌شهرهای مانند تهران است که به منظور رفع آن، راهکاری به جز شناسایی دقیق میزان آلاینده‌ها و چگونگی توزیع آنها موجود نیست. توسعه مدلهای دقیق توزیع آلاینده‌های شهری، مستلزم وجود شبکه متراکم از ایستگاههای دقیق پایش آلاینده‌ها است. اما هزینه بالای تهیه و نگهداری از این ایستگاهها همواره از بزرگترین موانع توسعه مدلهای دقیق توزیع آلاینده‌های شهری بوده است. در پژوهش کنونی علاوه بر طراحی و ساخت یک سیستم پایش متحرک آلاینده مونواکسید کربن و کالیبراسیون آزمایشگاهی آن، اطلاعات غلظت آلاینده در ۲ بازه زمانی در منطقه ۶ شهرداری تهران (منطقه مطالعاتی) جمع‌آوری گردیده است. سپس مدل مکانی توزیع این آلاینده در هریک از بازه‌های زمانی و توسط روش رگرسیون کاربری اراضی حاصل گردید. برای حصول این هدف، پارامترهای محیطی نظیر کاربری اراضی، معابر شهری، ارتفاع و ترافیک به عنوان پارامترهای مستقل و میزان غلظت اندازه گیری شده توسط حسگر متحرک به عنوان پارامتر وابسته در مدل رگرسیونی استفاده شده است. این پژوهش در نهایت منجر به تولید نقشه‌های توزیع غلظت آلاینده مونواکسید کربن در منطقه مطالعاتی گردید که به منظور شناخت دقیق وضعیت آلودگی در منطقه مطالعاتی بسیار سودمند است. ارزیابی نتایج مدلسازی توسط پارامترهای آماری حاکی از آن دارد که روش پیشنهادی توانایی تقریبا مناسبی در تخمین غلظت این آلاینده در مناطق مختلف شهری دارد.

واژه‌های کلیدی: اطلاعات مکانی داوطلبانه، حسگرهای متحرک پایش آلاینده‌های هوا، پهنه‌بندی، رگرسیون کاربری اراضی.

* نویسنده مکاتبه کننده: : تهران، امیرآباد شمالی، دانشکده فنی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی
تلفن: ۰۹۱۲۳۰۱۱۲۵۵

Email: abaspour@ut.ac.ir

۱- مقدمه

بی شک مشارکت کاربران در اتخاذ تصمیماتی که قرار است خود نقشی در آن داشته باشند، حائز اهمیت است. جامعه شناسان معتقدند افرادی که در ارتباط با موضوعی که به آنها ارتباط دارد مورد مشورت قرارنگرفته باشند، حتی اگر تصمیمات در آینده مزایایی را نیز برای آنها به همراه داشته باشد، در برابر پذیرش آن تصمیمات مقاومت می‌کنند[۱]. مشارکت افراد غیرخبره در پروژه های مرتبط با اطلاعات مکانی توسط محققان مختلف مورد بررسی قرار گرفته است و محققان از نام های مختلفی برای توصیف این پدیده استفاده کرده است که از میان آنها برای نمونه می‌توان به نئوجغرافی[۱] [۲]، استفاده از جمع گستر[۲] [۳]، نقشه‌سازی جمعی[۳] [۴] و نقشه‌سازی مشارکتی[۴] [۵] اشاره کرد. اما در این میان مفهوم اطلاعات مکانی داوطلبانه[۵] برای اولین بار در سال ۲۰۰۷، توسط گودچایلد، با اصطلاح موسوم به VGI مطرح گردید[۶]. توان بالای تولید اطلاعات مکانی به این روش توجه محققان حوزه های متعددی را به خود جلب نمود. برای تبیین ارزش و اهمیت داده های مکانی داوطلبانه در مقایسه با داده‌های مکانی استاندارد بیان این نکته که VGI نه تنها ارزان ترین بلکه حتی در مواردی تنها منبع اطلاعات مکانی می‌باشد که این ویژگی ارزش و اهمیت این پدیده را دو چندان می‌نماید. اطلاعات جمع‌آوری شده در زلزله ژانویه سال ۲۰۱۰ در کشور هائیتی، نمونه‌ای از کاربرد VGI به عنوان منبع ارزشمند اطلاعات مکانی است[۷].

گودچایلد و همکاران، حسگرهای متحرک بی‌سیم[۶] را یکی از منابع تولید اطلاعات معرفی می‌کنند که با عنایت به پیشرفت‌های اخیر در حوزه ارتباطات بی‌سیم و میکروالکترونیک ها می‌توانند اطلاعات ارزشمندی در حوزه‌های مختلف تولید نمایند. حال آنکه ظهور و گسترش استفاده از گوشی‌های هوشمند مجهز به حسگرهای بی‌سیم، محققان حوزه‌های مختلف را به اندیشه استفاده از بستر گوشی‌های هوشمند با هدف پایش محیط رهنمون ساخت. کاربردهای نوعی این نوع از حسگرها شامل جمع آوری داده، کنترل، نظارت و انجام اندازه‌گیری‌های مختلف است. تجهیزات ارزان قیمت و هوشمند همراه با چندین حسگر امکانات و فرصتهای بسیاری را در پایش و کنترل شهرها، خانه‌ها و حتی محیط‌های پیرامون در اختیارمان قرار می‌دهند. علاوه بر این، حسگرهای بی‌سیم در مسائل دفاعی و نظامی، مانند بررسی امکانات دشمن و نظارت بر اعمال و رفتار آنها مورد توجه قرار گرفته‌اند[۸]. این حسگرها در محیط مستقر شده و داده‌های مختلفی از قبیل دما، فشار، نور، رطوبت، نوع خاک، حرکت وسایل نقلیه، غلظت آلاینده‌ها، صدا، سطح نویز، وجود و عدم وجود موانع، تصویر و ویدئو را از محیط اطراف خود دریافت می‌کنند. یکی از کاربردهای قابل توجه حسگرهای متحرک بی‌سیم توانایی های فوق‌العاده آنها در اندازه‌گیری پارامترهای محیطی نظیر دما، رطوبت، آلودگی هوا و آلودگی صوتی است که می‌تواند به‌منظور پایش محیط های شهری بویژه آلودگی هوا مورد استفاده قرار گیرد[۹، ۱۰ و ۱۱].

پدیده آلودگی هوا در تهران، یکی از دستاوردهای توسعه صنعتی است که با افزایش جمعیت و توسعه شهرنشینی، توسعه حمل و نقل و افزایش میزان مصرف سوخت روز به روز بر شدت آن افزوده می‌شود. در حال حاضر مهم‌ترین معضل زیست محیطی شهر تهران نیز آلودگی هوا بوده و مقابله و کاهش آن جز با شناخت آلاینده‌ها، منشا و عوامل تاثیرگذار بر آنها امکان‌پذیر نمی‌باشد. برنامه‌ریزی به‌منظور کاهش و کنترل میزان آلاینده ها، نیازمند بررسی دقیق چگونگی توزیع آلاینده‌ها در سطح شهرها و شناخت بهتر منابع

[1] Neogeography
[2] Crowdsourcing
[3] Collaborative mapping
[4] Participatory mapping
[5] Volunteered Geographic Information (VGI)
[6] Wireless Mobile Sensors

آلاینده ها می‌باشد که این امر توسط مدلهای مکانی توزیع آلاینده‌ها انجام می‌پذیرد. اگرچه روشهای متعدی با هدف مدلسازی توزیع آلاینده‌ها وجود دارند اما دقت و صحت اکثر این روشها مبتنی بر دقت دستگاههای پایش آلاینده‌ها و تعداد و تراکم ایستگاههای پایش آلودگی هوا است[۱۲].

هزینه بالای تهیه و نگهداری از ایستگاههای پایش آلاینده‌ها، از مهمترین موانع شهرداری‌ها در توسعه و گسترش شبکه پایش آلودگی هوا در یک شهر محسوب می‌گردد. بنابراین محدودیت تعداد ایستگاههای پایش آلودگی هوا، منجر به کاهش صحت و اعتمادپذیری در نقشه ها و مدلهای توزیع آلودگی هوا شده است. از دیگرسو آلودگی هوا به دلیل شرایط دینامیکی هوا، به صورت ویژه ای به مکان و شرایط جغرافیایی بستگی دارد و از یک نقطه به نقطه ای دیگر به شدت تغییر می‌کند. بنابراین شاید این ایستگاه‌ها بتوانند به جهت دقت بالایی که دارند میزان آلاینده ها را در مکان استقرار خود اندازه گیری نمایند اما با فاصله گرفتن از آنها صحت و اعتماد به میزان اندازه‌گیری شده کاهش می‌یابد[۱۳]. در مسئله پایش آلاینده ها، موقعیت و تراکم ایستگاههای پایش بسیار حائز اهمیت می‌باشد. اگرچه هنوز معیار ثابت و مشخصی برای تعداد و تراکم ایستگاه‌های پایش آلودگی هوا وجود ندارد؛ اما بررسی آمارهای کشورهای پیشرو حاکی از آن دارد که تعداد ایستگاههای مورد نیاز برای هر یک میلیون نفر ۷ عدد می‌باشد[۱۴]، که با درنظر گرفتن جمعیت ۱۲ میلیونی تهران، حداقل نیازمند ۸۴ ایستگاه پایش آلاینده‌ها می‌باشیم

ضرورت شناخت و مدلسازی مکانی توزیع آلاینده‌ها از یک سو، قابلیت های بالای حسگرهای متحرک که آنها را به ابزار مناسبی برای پایش پارامترهای محیطی مبدل ساخته از دیگر سو، از انگیزه های اصلی این پژوهش برای استفاده از حسگرهای بی‌سیم در مدلسازی مکانی آلاینده مونواکسید کربن می‌باشد. در واقع یکی از اهداف این تحقیق غنی سازی شبکه پایش آلاینده‌ها از طریق حسگرهای بی‌سیم در بستر VGI می‌باشد. شایان ذکر است که اگرچه امروزه تعداد محدودی از گوشی‌های هوشمند مجهز به حسگر پایش آلاینده‌ها هستند، اما پیش بینی می‌گردد در آینده نزدیک استفاده از گوشی‌های هوشمند مجهز به حسگر پایش آلاینده‌ها امری عادی گردد.

در این پژوهش پس از طراحی و ساخت یک حسگر متحرک پایش آلاینده مونواکسید کربن، اطلاعات میزان غلظت این آلاینده در منطقه ۶ شهرداری تهران در ۲ دوره زمانی مختلف در طی ۲ روز جمع آوری گردید. جهت پهنه‌بندی آلاینده مونواکسیدکربن در منطقه مطالعاتی روش رگرسیون کاربری اراضی استفاده گردیده است تا شرایط محیطی موثر بر غلظت این آلاینده نیز شناسایی شوند.

۲- پیشینه تحقیق

ایستگاههای پایش آلاینده‌های هوا، اولین گام موثر به‌منظور شناخت بهتر پدیده آلودگی هوا و تلاش در جهت حل این مشکل در کلانشهرها می‌باشد. اولین مطالعه بر روی اثرات این آلاینده‌ها در سال ۱۶۶۱ توسط ایولین[1] صورت پذیرفت. در سال ۱۹۶۱ انگلستان با استقرار شبکه ایستگاههای پایش آلاینده ها موسوم به National Survey سعی در پایش لحظه‌ای این آلاینده‌ها به منظور کنترل آنها داشت. امروزه این نوع ایستگاهها تقریباً در تمامی کلانشهرها و شهرهای دنیا موجود بوده و سعی در رصد لحظه‌ای میزان آلاینده‌ها دارند. اما پیشرفت تکنولوژی در سالهای اخیر منجر به توسعه حسگرهای متحرک برای سنجش پارامترهای مورد علاقه بشر به نام حسگرهای متحرک بی‌سیم با کاربرد در زمینه‌های مختلف گردید. یکی از کاربردهای قابل توجه این حسگرها، استفاده از آنها به منظور پایش محیطی بویژه آلاینده‌های محیطی می‌باشد. در حوزه استفاده از حسگرهای متحرک

[1] Evelyn

بی‌سیم به منظور پایش آلاینده‌های محیطی، نخستین بار هانیکی[1] و همکاران در دانشگاه برکلی با تلفیق گوشی تلفن همراه مجهز به تکنولوژی GPS و حسگرهای پایش نیترات‌های اکسیژن اقدام به پایش لحظه‌ای این آلاینده ها درمسیرهای مختلف شهر نمودند[۱۵]. اما روند استفاده از حسگرهای متحرک بی‌سیم در حوزه آلودگی هوا در سال ۲۰۰۹ با رشد قابل توجهی روبرو گردید. چوی[2] و همکاران با طراحی و توسعه سیستم‌های پایش لحظه‌ای انواع آلاینده‌های مختلف به نام آپولو با استفاده از حسگرهای متحرک ارزان قیمت، سعی در شناسایی مشکلات و محدودیت-های این حسگرها و ارائه روش‌هایی برای حل آنها داشتند[۱۶]. در سالهای ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۴ نیز تحقیقات متعددی نظیر پروژه‌های CommonSense و Wear Air انجام گردید، که هدف اصلی تمامی این تحقیقات استفاده از این نوع حسگرها برای نمایش میزان آلاینده ها در گوشی‌های همراه افراد حامل آنها به منظور افزایش سطح آگاهی مردم نسبت به آلاینده های محیطی و انتخاب مسیرهای دارای میزان آلاینده های کمتر بود[۱۷ و ۱۸]. یکی دیگر از تحقیقات قابل توجه در این سالها مطالعه مید[3] و همکاران است که توانستند با استفاده از روش‌های کالیبراسیون آزمایشگاهی دقت حسگرهای متحرک تکنولوژی الکتروشیمیایی (بیشتر حسگرهای متحرک ارزان قیمت از این نوع هستند) را به دقت های قابل قبول قسمت در میلیارد[4] (ppb) برسانند[۱۰].

به منظور مدلسازی مکانی میزان غلظت آلاینده ها یا پهنه بندی آنها نیز تحقیقات متعدد فراوانی صورت پذیرفته است و مدلهای متعددی را ارائه نموده‌اند. یکی از مدل‌های توانمند و موثر به منظور تخمین آلودگی هوا مدل رگرسیون کاربری اراضی[5] (LUR)می‌باشد. روش رگرسیون کاربری اراضی برای اولین بار در اروپا به منظور مدلسازی مکانی آلاینده‌های هوا در پروژه‌ای با نام تغییرات کوچک محلی در سلامت و کیفیت هوا (SAVIAH) مورد استفاده قرار گرفت و سپس درمناطق مختلف اروپا و آمریکا مورد توسعه و بهره برداری قرارگرفت[۱۹]. بریگز[6] و همکاران در مقاله خود اشاره کرده اند که هرچنداستفاده از این روش در مناطقی که تقریبا دارای کاربری یکسانی می‌باشند نتایج قابل قبولی دارد اما کارایی روش LUR در مناطق شهری زمانی قابل استناد است که از شبکه پایش آلاینده های هوا با تراکم خوبی نیز در کنار سایر پارامترها استفاده کنیم[۲۰]. هم چنین هوک[7] و همکاران در مطالعه ای که به بررسی و مقایسه انواع پیاده سازی های مدل LUR می‌پردازند، ذکر کردند که دقت مدلهای بدست آمده از این روش به شدت به تعداد و مکان قرارگیری ایستگاههای پایش آلاینده‌ها و وجود اطلاعات مورد نیاز در آن منطقه بستگی دارد[۱۹].

متاسفانه مطالعات اندکی به استفاده از حسگرهای متحرک برای مدلسازی مکانی آلاینده ها با استفاده از روش LUR پرداخته‌اند. اولین بار لارسون[8] و همکاران با استفاده از یک حسگر پایش متحرک، سعی در افزایش تراکم ایستگاههای پایش و بهره گیری از مدل LUR برای مدلسازی کربن سیاه در ونکور نمودند. اگرچه این مطالعه با استفاده از یک حسگر متحرک صورت پذیرفته است اما صرفا با استقرار یک حسگر پایش در نقاط مختلف منطقه مطالعاتی، تراکم اطلاعات پایش در منطقه مطالعاتی بالابرده شده و مدل مکانی با استفاده از این اطلاعات توسعه داده شده‌است[۲۱].

بررسی‌ها حاکی از آن است که استفاده از حسگرهای

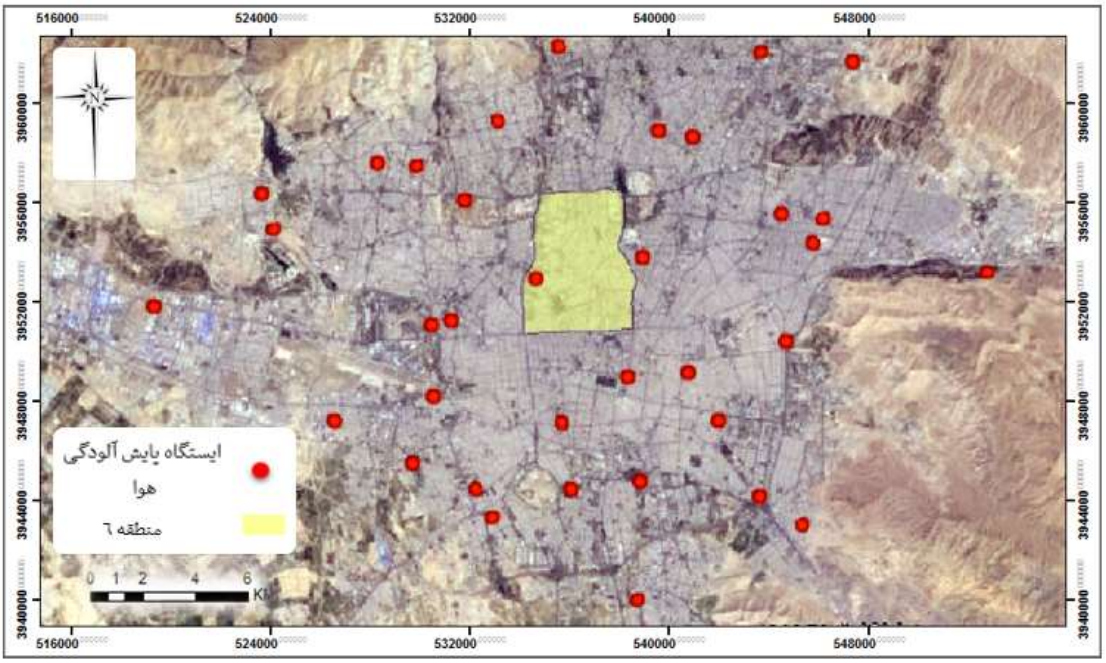
[1] Honickey
[2] Choi
[3] Mead
[4] Part Per Bilion
[5] Land Use Regression
[6] Briggs
[7] Hoak
[8] Larson

متحرک در مدلسازی آلاینده‌ها می‌تواند نتایج جالب توجهی را ارائه می‌نماید. از دیگر سو رشد تکنولوژی منجر به آن گردیده که حسگرهای پایش آلاینده های محیطی با تغییرات قابل توجهی در اندازه، هزینه تولید و دقت برداشت اطلاعات مواجه گردند. بر همین اساس مطالعه حاضر علاوه بر ارزیابی توانمندی حسگرهای کوچک و ارزان قیمت در پایش آلاینده های محیط شهری، توانایی آنها را در مدلسازی مکانی توزیع آلاینده های شهری نظیرمونواکسید کربن، ضمن درنظر داشتن شرایط محیطی با استفاده از مدل رگرسیون کاربری اراضی مورد بررسی قرار داده است. نکته جالب توجه دیگر این مقاله مدلسازی مکانی در ۲ بازه زمانی ضمن در نظر گرفتن شرایط ترافیکی و سایر شرایط محیطی موثر می‌باشد.

۳- منطقه مورد مطالعه

کلان شهر تهران، پایتخت ایران، با جمعیت بالغ بر ۱۲ میلیون نفر، پرجمعیت ترین شهر ایران نیز محسوب می‌گردد. شهر تهران به خاطر وجود ارتفاعات در شمال و شرق و وجود بافت قدیمی شهری، رشد بی رویه جمعیت در این شهر، تردد خودروهای بسیار و وجود بادهای غربی که در تمام طول سال دود کارخانجات و سایر عوامل آلوده کننده را به سطح شهر تهران وارد می‌کند دارای شرایط زیست محیطی مناسبی نمی‌باشد.

در این مطالعه منطقه ۶ شهرداری تهران به‌عنوان منطقه مطالعاتی انتخاب گردید. این منطقه با مساحتی معادل ۲۱/۲ کیلومتر مربع ، حدود ۳/۲ درصد از سطح شهر را در بر می‌گیرد و بیش از ۳۰ درصد ساختمان‌های دولتی و خصوصی را درخود جای داده و به لحاظ موقعیت جغرافیایی در حوزه مرکزی شهر تهران واقع است. منطقه ۶ از شمال به منطقه ۳ ، از شرق به منطقه ۷ ، از جنوب به مناطق ۱۰، ۱۱ و ۱۲ و از غرب به منطقه ۲ منتهی می‌گردد. این منطقه از ۳ جهت غرب، شرق و شمال با ۳ بزرگراه اصلی تهران؛ چمران، مدرس و همت و از سمت جنوب به بزرگترین محور شرقی- غربی شهر یعنی خیابان انقلاب محدود می‌گردد. حدود ۳۵ درصد کاربری منطقه، مسکونی، بیش از ۳۰ درصد اداری، تجاری، آموزشی و حدود ۳۰ درصد به شبکه‌های حمل و نقل اختصاص دارد. از عمده‌ترین ویژگی کالبدی منطقه ۶ می‌توان به موقعیت قرارگیری آن در مرکز شهر تهران از یک سو و از سوی دیگر استقرار مهم‌ترین کاربری‌های اداری ـ خدماتی با مقیاس عملکردی فرامنطقه‌ای، شهری و حتی ملی در آن اشاره کرد. تراکم مسکونی این منطقه ۷۵ درصد بوده که بالاتر از میانگین تراکم شهر تهران است . نسبت جمعیت نیز در هر کیلومتر مربع از ان برابر با ۱۰۲۴۱/۸۳۹ نفر است که از این نظر رتبه دوازدهم را به خود اختصاص داده است. وجود بیش از ۲۶ بیمارستان و مرکز درمانی از جمله مرکز قلب تهران و هم چنین حضور بالغ بر ۷۸ مدرسه ابتدایی در این منطقه سبب حضور قشر حساس به آلودگی در این منطقه شده است. با توجه به اینکه منطقه ۶ دارای اماکن مسکونی، تجاری و دانشگاهی می‌باشد و در محدوده مرکزی شهر واقع شده‌است، وجود و تداوم آلودگی هوا در این منطقه خسارات جبران ناپذیری را بر آن وارد می‌سازد. در شکل (۱) ایستگاههای پایش آلاینده‌ها در شهر تهران به نمایش درآمده است. همانگونه که مشخص است منطقه ۶ شهرداری تهران، تنها دارای یک ایستگاه پایش آلاینده مونواکسید کربن می‌باشد.



شکل ۱: پراکندگی ایستگاههای پایش آلاینده های هوا در تهران

۴- روش پیشنهادی

هدف این پژوهش غنی سازی شبکه پایش به کمک یک حسگر متحرک و استفاده از پارامترهای محیطی موثر بر غلظت از قبیل کاربری اراضی، معابر، جمعیت و ارتفاع می‌باشد برای حصول مدل مکانی توزیع آلاینده مونواکسید کربن می‌باشد. برای دستیابی به این هدف، پس از طراحی و کالیبراسیون حسگر پایش این آلاینده و جمع آوری اطلاعات در منطقه مطالعاتی، روش رگرسیون کاربری اراضی انتخاب و پیاده سازی گردید. شایان ذکر است که استفاده از این روش امکان مدلسازی تاثیر پارامترهای محیطی را بر غلظت آلاینده مونواکسید کربن فراهم می‌نماید که با عنایت به تغییرات شدید کاربری اراضی مناطق شهری استفاده از تکنولوژی حسگر متحرک می‌تواند اثرات این تغییرات را مدلسازی نماید. حال آنکه افزایش تراکم نقاط اندازه گیری غلظت آلاینده مونواکسید کربن توسط حسگرهای طراحی شده می‌تواند به عنوان راهی برای افزایش دقت این روش در مدلسازی غلظت آلاینده ها پیشنهاد گردد که با توجه به عدم وجود مطالعات دقیق در گذشته، در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است.

بر همین اساس پس از جمع آوری اطلاعات غلظت آلاینده در ۲ اپوک زمانی و آماده سازی داده های محیطی بهترین ساختمان رگرسیون توسط روش قدم به قدم برای هر اپوک به صورت مجزا پیاده سازی گردید. لازم به ذکر است که پارامترهای محیطی در شعاع‌های ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ متری محاسبه گردیده تا اثرات تغییر تراکم کاربری نیز بر غلظت آلاینده مونواکسید کربن مدلسازی گردد.

به‌منظور برآورد غلظت و پهنه بندی میزان آلاینده در منطقه مطالعاتی، گریدی به ابعاد ۱۰۰ * ۱۰۰متر ایجاد گردید و مقادیر هریک از پارامترهای مستقل در مرکز هر گرید محاسبه شد. در نهایت با توجه به وزن‌های اختصاص داده شده برای هریک از متغیرهای مستقل و مقادیر پارامتر مستقل، میزان غلظت مونواکسیدکربن محاسبه و رویه مد نظر بر روی منطقه مطالعاتی برازش داده شده است. فرآیند پیاده‌سازی روش پیشنهادی به‌صورت خلاصه در شکل (۲) نمایش داده شده‌است.

شکل ۲: دیاگرام فرآیند انجام تحقیق

۴-۱- آماده‌سازی داده‌های مورد نیاز

به منظور مدلسازی به روش رگرسیون کاربری اراضی از پارامترهای وابسته و مستقل استفاده گردید. مقادیر غلظت مونواکسید کربن به‌عنوان پارامتر وابسته توسط سیستم پایش طراحی شده جمع آوری گردید و داده های مستقل (پارامترها محیطی موثر) از منابع مختلف اطلاعاتی شهر تهران تهیه و آماده سازی گردیدند. در ادامه روند برداشت اطلاعات غلظت آلاینده و آماده سازی پارامترهای محیطی تشریح شده‌اند.

۴-۱-۱- اطلاعات غلظت آلاینده مونواکسید کربن

پس از طراحی و ساخت سیستم متحرک پایش و کالیبراسیون آزمایشگاهی آن، جمع‌آوری و برداشت غلظت آلاینده در مسیرهای مختلف در منطقه مطالعاتی صورت پذیرفت که هریک از آنها در ادامه بیان گردیده اند.

- طراحی و ساخت سیستم متحرک پایش آلاینده مونواکسید کربن

در این پژوهش از سامانه سنجش آلاینده مونواکسید کربن که شامل حسگر آلاینده مونواکسیدکربن با تکنولوژی الکتروشیمیایی، حسگرهای دما و رطوبت به‌منظور کالیبراسیون در شرایط آب و هوایی مختلف و هم‌چنین ماژول Bluetooth به منظور ارسال اطلاعات به گوشی تلفن همراه و GPS برای تعیین موقعیت سامانه استفاده گردید. لازم به ذکر است که علاوه بر ماژول Bluetooth که نمایش اطلاعات را در گوشی تلفن همراه امکان پذیر می‌نماید، وجود حافظه جانبی در سامانه، ذخیره مقادیر اندازه گیری شده را نیز فراهم نموده‌است.

- کالیبراسیون حسگر

در این تحقیق به منظور کالیبراسیون سیستم از رویکرد تشریح شده در شکل (۳) استفاده شد. بدین معنا که حسگر در کنار یک دستگاه آنالیزور گاز مونواکسیدکربن (environment 12M CO Analyzer) قرار گرفته و میزان این آلاینده توسط این دو دستگاه به‌صورت ۱۲ ساعت مداوم اندازه گیری گردید و کالیبراسیون حسگر متحرک با استفاده از اطلاعات دستگاه آنالیزور صورت پذیرفت.

شکل ۳: فرآیند کالیبراسیون سیستم طراحی شده

به‌منظور انجام کالیبراسیون هریک از پارامترهای دما و رطوبت به صورت گام به گام وارد مرحله مدلسازی با استفاده از رگرسیون گردیدند و اثر آنها بر میزان اندازه گیری شده توسط حسگر مونواکسید کربن حذف گردید. در راستای اطمینان از عملکرد حسگر متحرک، این حسگر در ایستگاه تربیت مدرس در مجاورت ایستگاه ثابت پایش آلودگی هوای شرکت کنترل کیفیت قرار گرفت. ضریب همبستگی پیرسون بین دو مجموعه داده (داده های حسگر متحرک و داده‌های ایستگاه ثابت) میزان۰/۸۴ استحصال گردید.

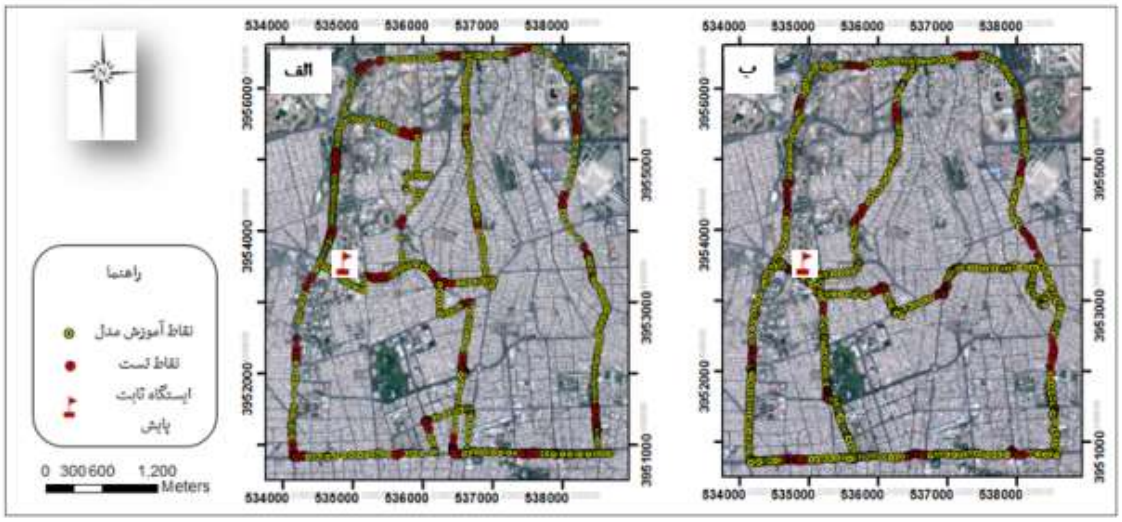
جمع‌آوری و پیش پردازش داده‌ها

با توجه به اینکه یکی از اهداف این مطالعه ارزیابی توانمندی استفاده از حسگرهای متحرک به عنوان بستری برای جمع‌آوری اطلاعات مکانی داوطلبانه است. از این رو جمع آوری اطلاعات در منطقه مطالعاتی با تراکم بالا اما در مسیر های متفاوت در دو دوره زمانی صبح روز جمعه ۱۶ بهمن و صبح روز یکشنبه ۱۸ بهمن ۱۳۹۴صورت پذیرفت تا اثر تغییرات تراکم و موقعیت داده های آموزشی بر نتایج خروجی مدل بررسی گردد. در شکل (۴) مسیرهای برداشت اطلاعات برای هریک از بازه های زمانی برداشت اطلاعات به‌نمایش درآمده است.

هم چنین لازم به ذکر که از جمله ویژگی‌هایی که در طراحی اولیه این حسگر مد نظر بود، توانایی تغییر فاصله زمانی میان برداشت اطلاعات تا بواسطه آن بتوان به تراکم مناسب و دلخواهی از داده ها در سطح منطقه مطالعاتی دست پیدا کرد. اما پس از حذف داده های پرت و هم چنین حذف داده های با دقت مکانی پایین توسط پارامتر HDOP[1] این هدف محقق نگردید. بر همین اساس پس از حذف تمامی داده های پرت و کم دقت فاصله میان داده‌ها مجددا اندازه گیری شد که کمترین فاصله ۷ متر و بیشترین فاصله ۸۹ متر

[1] Horizontal Dilution OF Precision

به‌دست آمد. بر همین اساس ابعاد گریدهای نهایی ۱۰۰ متر انتخاب گردید.



شکل ۴ : مسیرهای برداشت غلظت آلاینده درمنطقه مطالعاتی الف) صبح روز جمعه ب) صبح روز یکشنبه

برای پایش داده‌های جمع‌آوری شده و اطمینان از کیفیت این داده‌ها، پردازشهای زیر بر روی داده‌ها اعمال گردید.

- حذف اثر دما: در ابتدا اثر دما بر روی میزان داده‌های اندازه گیری شده حذف گردید. برای این منظور مطابق ضرایب بدست آمده از کالیبراسیون دستگاه، اثر دما بر داده‌های برداشت شده حذف گردید.
- حذف داده‌های با HDOP بزرگتر از ۳: مقدار HDOP دقت تعیین موقعیت را بر اساس هندسه ماهواره‌های GPS مشخص می‌نماید. مقادیر HDOP کوچکتر از ۳ تعیین موقعیت خوب تا عالی با دقت چند متر را نشان می‌دهد. بر همین اساس در این مطالعه داده های با HDOP بزرگتر از ۳ از لیست داده‌ها حذف شدند.

ارزیابی توزیع داده‌ها و حذف داده‌های پرت: پس از ترسیم نمودار هیستوگرام داده ها و تفسیر بصری آن مشخص گردید که نزدیکترین توزیع به داده ها، تابع توزیع لگ-نرمال می‌باشد. بدین معنا که لگاریتم داده‌ها از توزیع نرمال پیروی می‌نمایند. بر همین اساس پس از حذف داده‌های پرت توسط تست گراب[1]، تست نرمال بودن لگاریتم داده‌ها توسط روش کلموگروف-اسمیرنوف[2] در نرم‌افزار SPSS صورت پذیرفت. لازم به ذکر است که به دلیل فراوانی اندک مقادیر غلظت بالا در محیط‌های شهری، اکثریت مطالعات پیشین نیز، توزیع لگ-نرمال را برای حذف داده‌های پرت مورد استفاده قرار داده‌اند[۱۶ و ۱۷].

۴-۱-۲- آماده‌سازی داده های محیطی

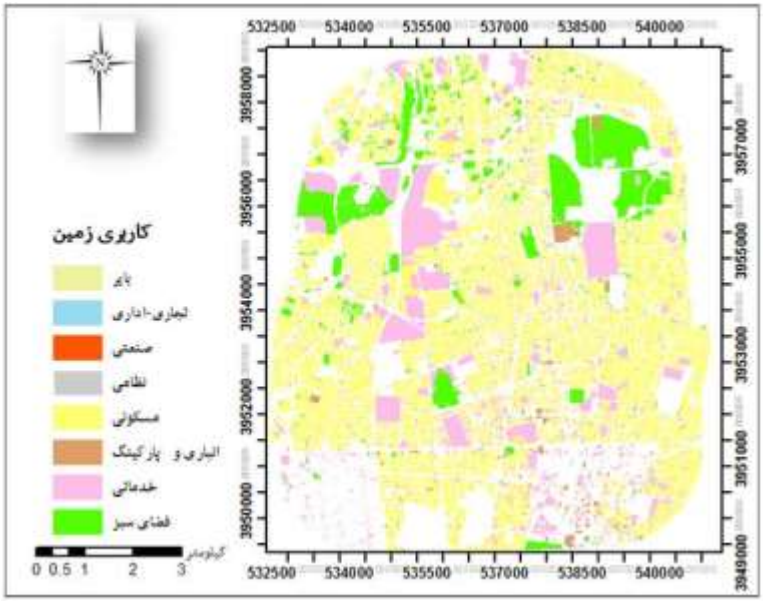
با توجه به نقش و تاثیر عوامل محیطی در تولید و تراکم آلاینده‌ها، در این بخش پارامترهای محیطی ای که در مدل وارد شده اند تشریح شده است. لازم به ذکر است که به دلیل آماده سازی داده‌ها در شعاع‌های ۲۵ تا ۲۰۰۰ متری، تمامی پارامترها در شعاع ۲۰۰۰ متری از منطقه مطالعاتی به نمایش درآمده‌اند.

- **کاربری اراضی**

به‌منظور ارزیابی اثرات کاربری زمین بر روی میزان غلظت آلاینده مونواکسیدکربن و پهنه بندی این آلاینده، نقشه کاربری اراضی منطقه مطالعاتی، مورد

[1] Grubb's test
[2] Kolmogorov-Smirnov

استفاده قرار گرفت. نقشه کاربری اراضی شهر تهران، توسط مرکز اطلاعات جغرافیایی شهرداری تهران تهیه گردیده است که در شکل (۵) کاربری اراضی منطقه مطالعاتی در ۸ گروه به نمایش درآمده است.



شکل ۵ : نقشه کاربری اراضی منطقه مطالعاتی

به‌منظور ارزیابی اثرات کاربری اراضی بر غلظت آلاینده مونواکسید کربن در روش LUR لازم است تا مساحت هریک از کاربری ها در اطراف نقاطی که غلظت آلاینده اندازه گیری شده است محاسبه گردد و به‌عنوان پارامتر مستقل در مدل مورد استفاده قرار گیرند. برای حصول این هدف، ابتدا کاربری ها از یکدیگر تفکیک شده و سپس مجموع مساحت هر کاربری در بافرهایی به شعاع ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ متری در اطراف هریک از نقاط برداشت شده، محاسبه گردیده و وارد مدل گردیده‌اند.

- **جمعیت**

با توجه به نقش جمعیت‌های ساکن در یک منطقه، در تولید و تجمع‌آلاینده های شهری، جمعیت نیز به عنوان یکی از پارامترهای مستقل در پهنه‌بندی و مدلسازی درنظرگرفته شده است. برای این منظور ابتدا نقشه بلوک‌های جمعیتی شهر تهران از مرکز فاوای شهرداری تهران تهیه گردید. سپس مجموع جمعیت برای هر نقطه اندازه‌گیری غلظت، در بافرهای ۲۵ ، ۵۰، ۱۰۰، ۵۰۰ و ۲۰۰۰متری محاسبه و به عنوان پارامتر مستقل در مدل وارد گردید.

- **حجم ترافیک**

یکی از متغیرهای مهم در مطالعات آلودگی هوا، پارامتر ترافیک می‌باشد[۲۲]. به منظور ارزیابی اثر این پارامتر باید حجم هم‌سنگ سواری در هریک از معابر منطقه مطالعاتی محاسبه و در ماتریس متغیرهای مستقل وارد گردد. محاسبه این پارامتر مستلزم وجود اطلاعات تعداد خودروهای عبوری در هریک از معابر است. بر همین اساس، با توجه به وضعیت ترافیکی منتشر شده در درگاه وب شهرداری تهران، اطلاعات ترافیکی در ۴ کلاس روان، سنگین در حال حرکت، سنگین و بسیار سنگین در بازه های زمانی برداشت اطلاعات ذخیره گردید. سپس در جدول اطلاعات توصیفی این لایه‌ها، این ۴ کلاس به اعداد کمی بین ۱ تا ۴ تبدیل گردید. در نهایت وضعیت ترافیکی در اطراف هریک از ایستگاههای برداشت غلظت آلاینده به شعاع‌های ۲۵ تا ۲۰۰۰ متری توسط تابع تراکم کرنل[1]

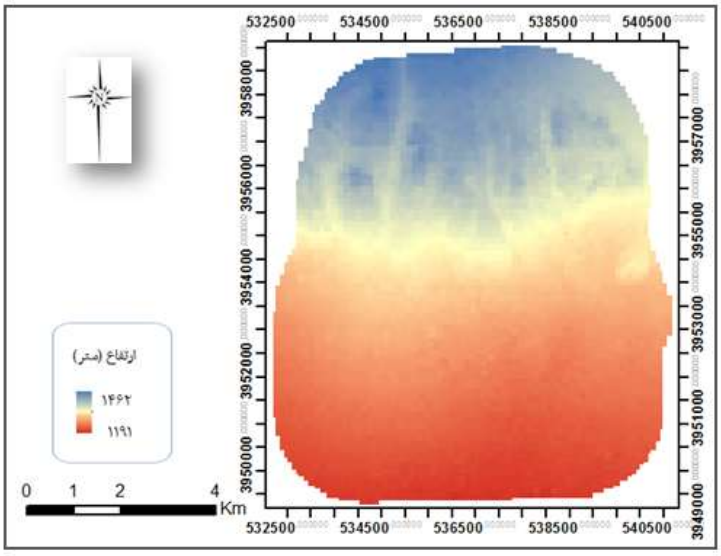
[1] Kernel Density

تخمین زده شد.

- **ارتفاع**

ارتفاع یکی دیگر از پارامترهای محیطی می‌باشد که با عنایت به شکل‌گیری پدیده وارونگی دمایی در کلان شهرها نقش قابل توجهی در میزان در معرض قرارگیری افراد در برابر آلاینده های هوا دارد. در هنگام بروز پدیده وارونگی دما، هوای سرد در لایه های پایین قرار می‌گیرد و چون هوای سرد سنگین تر است به صورت آرام و ساکن در جای خود باقی مانده و مانع خروج آلاینده ها به لایه‌های گرم بالاتر می‌گردد. بنابراین آلاینده‌های تولید شده در ارتفاع پایین‌تر محبوس گردیده و راهی برای خروج به لایه‌های بالایی پیدا نخواهند کرد.

به‌منظور بررسی میزان تاثیر ارتفاع بر غلظت مونواکسیدکربن در منطقه مطالعاتی، از مدل رقومی ارتفاعی در این منطقه استفاده شد. در همین راستا، DEM منطقه با قدرت تفکیک ۳۰ متر از سنجنده لندست ۷ استخراج گردید (شکل (۶)). هم چنین ارتفاع در هریک از نقاطی که غلظت آلاینده اندازه‌گیری شده بود توسط ابزار Extract values to point در نرم‌افزار Arc Map از لایه DEM منطقه استخراج گردیده است.



شکل ۶ : مدل رقومی ارتفاعی منطقه مطالعاتی

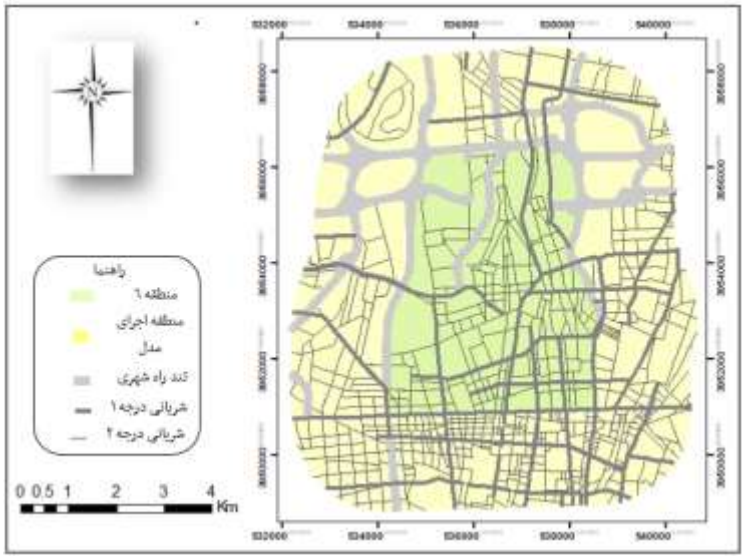
- **دما و رطوبت**

دما و رطوبت نیز از جمله عوامل محیطی می‌باشند که سبب واکنش‌های شیمیایی و افزایش غلظت آلاینده های هوا در محیط‌های شهری می‌شوند. مطالعات اوک و همکاران [۲۳] در ارزیابی اثر شرایط محیطی در میزان غلظت آلاینده مونواکسید کربن حاکی از آن است که این پارامترها به ترتیب دارای نقش ۸ و ۹ درصدی می‌باشند. از دیگر سو به دلیل پیچیدگی‌های فوق‌العاده مدلسازی دما و رطوبت، وجود تنها یک ایستگاه سینوپتیک در منطقه مطالعاتی، مدلسازی آن را غیر ممکن می‌نماید. از این رو، این پارامترها از لیست پارامترهای مستقل این مطالعه حذف شده است.

- **راهها و معابر**

راهها و معابر شهر تهران، به دلیل عبور و مرور وسائل نقلیه متعدد یکی از مکان‌های اصلی تجمع آلاینده ها محسوب می‌گردند. بر همین اساس اطلاعات راهها در مدلسازی این تحقیق در نظر گرفته شده است. اطلاعات راههای منطقه مطالعاتی، از مرکز اطلاعات جغرافیایی شهر تهران بدست آمد و در سه زیر گروه تندراه شهری، راههای شریانی درجه۱ (راه اصلی) و راههای شریانی درجه ۲ (راه فرعی) تقسیم بندی گردید (شکل (۷)). به‌منظور مدلسازی اثر راهها و معابر بر غلظت آلاینده

مونواکسید کربن در منطقه مطالعاتی مجموع طول هریک از این سه گروه راه، در بافرهای ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰و ۲۰۰۰ متری در هریک از نقاط اندازه‌گیری محاسبه گردید تا تراکم معابر در شعاع‌های مختلف به‌عنوان پارامتر مستقل در مدل وارد گردند. توضیح آنکه بهره‌گیری از بافرهای به شعاع‌های مختلف، امکان ارزیابی تاثیر تراکم معابر بر غلظت آلاینده را توسط روش رگرسیون کاربری اراضی فراهم می‌آورد.



شکل ۷ : نقشه معابر و راههای منطقه مطالعاتی

- **سرعت و جهت باد**

سرعت و جهت باد همواره یکی از عوامل پخش و انتشار آلاینده‌ها به حساب می‌آیند که با توجه به جهت وزش می‌توانند دارای نقش مثبت یا منفی در کاهش یا افزایش میزان غلظت آلاینده های شهری می‌باشند. مطالعات اوک و همکاران [۲۳] در ارزیابی اثر سرعت و جهت باد در میزان غلظت آلاینده مونواکسید کربن حاکی از آن دارد که این پارامتر دارای تاثیر یک درصدی می‌باشد. بررسی اطلاعات مرکز هواشناسی ایستگاه سینوپتیک ژئوفیزیک (تنها ایستگاه سینوپتیک موجود در منطقه)، حداکثر سرعت باد در روزهای برداشت اطلاعات دارای سرعت۲/۵ متر بر ثانیه می‌باشد. بنابراین با عنایت با مطالعه مذکور شاید بتوان گفت که سرعت و جهت باد در روزهای برداشت اطلاعات دارای نقش ناچیزی در تغییرات غلظت این آلاینده می‌باشند. از دیگر سو به دلیل پیچیدگی های فوق العاده مدلسازی باد، وجود تنها یک ایستگاه سینوپتیک در منطقه مطالعاتی، مدلسازی آن را غیر ممکن می‌نماید. بر همین اساس این پارامتر از لیست پارامترهای مستقل این مطالعه حذف شده است.

۴-۲- رگرسیون کاربری اراضی

برای ساخت مدل رگرسیونی در این تحقیق، از الگوریتم هندرسون به شرح زیر استفاده شده است[۲۴].

- همبستگی هریک از متغیرهای مستقل را در شعاع های مختلف مذکور با استفاده از روش رگرسیون خطی یک متغیره با میزان غلظت آلاینده‌ها بررسی شد. برای این منظور ابتدا مقادیر هریک از پارامترهای محیطی در نقاطی که اطلاعات غلظت آلاینده جمع آوری گردیده بودند و در شعاع های ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ متری محاسبه گردید. سپس همبستگی این مقادیر به عنوان پارامتر مستقل مدل و مقادیر غلظت به عنوان پارامتر وابسته توسط ضریب همبستگی پیرسون بدست آمد. میانگین مقادیر این ضرایب همبستگی برای تمامی ۱۴ پارامتر در

۶ شعاع در جدول (۱) نمایش داده شده است.

جدول۱: میانگین ضرایب همبستگی میان غلظت آلاینده و پارامترهای مستقل در شعاع های مختلف برای دو دوره زمانی

پارامتر مستقل / شعاع بافر(متر)	مسکونی	فضای سبز	خدماتی	تجاری/ اداری	نظامی	صنعتی	انبار وسایل نقلیه	بایر	جمعیت	ترافیک	تند راه شهری	راه شریانی درجه ۱	راه شریانی درجه ۲	ارتفاع*
۲۵	۰/۱۲	-۰/۰۱	۰/۲۱	۰/۰۹	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۱۶	۰/۰۰	۰/۱۰	۰/۳۷	۰/۰۵	۰/۱۷	۰/۱۴	-۰/۶۵
۵۰	۰/۳۴	-۰/۰۳	۰/۱۱	۰/۲۴	۰/۰۳	۰/۲۳	۰/۳۹	۰/۰۱	۰/۲۸	۰/۷۵	۰/۳۴	۰/۳۶	۰/۲۶	
۱۰۰	۰/۴۵	-۰/۲۳	۰/۳۱	۰/۲۷	۰.۰۰	۰/۱۱	۰/۵۱	۰/۱۲	۰/۷۱	۰/۸۹	۰/۷۴	۰/۶۶	۰/۶۹	
۵۰۰	۰/۶۱	-۰/۸۴	۰/۳۲	۰/۳۶	۰.۰۱	۰/۴۱	۰/۶۸	۰/۱۳	۰/۶۸	۰/۸۱	۰/۵۶	۰/۶۳	۰/۷۴	
۱۰۰۰	۰/۳۳	-۰/۴۳	۰/۴۶	۰/۳۱	۰/۰۷	۰/۷۴	۰/۵۸	۰/۰۸	۰/۳۴	۰/۷۲	۰/۶۴	۰/۷۱	۰/۳۳	
۲۰۰۰	۰/۰۹	-۰/۲۱	۰/۴۹	۰/۰۸	۰/۱۴	۰/۳۲	۰/۱۲	۰/۰۳	۰/۱۲	۰/۳۹	۰/۷۶	۰/۳۶	۰/۳۸	

*توضیح آنکه پارامتر ارتفاع تنها در هریک از نقاط اندازه گیری غلظت و توسط مدل رقومی ارتفاعی حاصل گردید و تنها به عنوان یک پارامتر مستقل در مدلسازی وارد گردید.

گام های آتی پیاده‌سازی روش رگرسیون کاربری اراضی به شرح زیر می‌باشد.

- رتبه‌بندی همبستگی هریک از متغیرها و تشخیص متغیری که بیشترین همبستگی را در هر گروه با میزان غلظت آلاینده دارد.
- حذف متغیرهایی که در هر گروه با متغیر غالب آن گروه همبستگی زیادی دارد (همبستگی بالاتر از ۰/۶)
- واردکردن متغیرهای باقی‌مانده در مدل رگرسیونی
- استفاده از روش انتخاب قدم به قدم[1] برای تعیین مدل نهایی (توضیحات کامل این روش در ادامه آمده است.)

  ○ انتخاب قدم به قدم

رگرسیون قدم با قدم، تعدیل روش انتخاب پیش رو[2] می باشد که در آن در هر قدم همه متغیرهای رگرسیونی از قبل وارد شده به مدل مجددا ارزیابی می شوند. برای این کار ابتدا دو متغیر اول به روش انتخاب پیش رو وارد مدل می‌شوند و سپس به روش حذف پس‌رو[3] این دو متغیر بررسی می‌شوند تا ببینند که آیا یکی از این دو کاندیدای خروج از مدل می‌باشند یا خیر. در هرمرحله با همان قواعدی که روش انتخاب پیش‌رو دارد متغیری وارد مدل می‌شود و سپس با قواعد روش حذف پس رو، کلیه متغیرهایی که تاکنون وارد شده‌اند را بررسی می‌شود. این فرآیند برای تمامی متغیرهای موجود بررسی می‌گردد.

  ○ انتخاب پیشرو

فرض اولیه این انتخاب این است که هیچ متغیری به جز عرض از مبدا در مدل اولیه وجود ندارد. در هر مرحله متغیری به مدل اضافه می‌گردد که بیشترین تغییر را در R^2 ایجاد کند و این تغییر در R^2 باید به حدی باشد که بتواند این فرض که مقدار واقعی تغییر برابر صفر است را رد کند. اولین متغیر وارد شده به مدل، متغیری است که دارای بیشترین همبستگی با متغیر پاسخ (y) است. این رویه هنگامی پایان می‌یابد که فرض صفر(مقدار واقعی تغییر R^2 برابر صفر است) یا اینکه آخرین متغیر رگرسیونی نامزد به مدل اضافه شده باشد.

[1] Stepwise Selection
[2] Forward Selection
[3] Backward Elimination

- روش حذف پس رو

فرض اولیه این است که تمام متغیرهای رگرسیونی نامزد، در مدل اولیه وجود دارند. انتخاب پیش رو بدون هیچ متغیر رگرسیونی در مدل آغاز می شود و کوشش می شود تا وصول به یک مدل مناسب متغیرها به مدل اضافه شوند. در روش حذف پس رو با کار در جهت مخالف سعی بر این است مدل خوبی به‌دست آید، بدین معنی که با مدلی که شامل کلیه K متغیر رگرسیونی نامزد است آغاز می شود و در هرمرحله متغیری خارج می‌گردد. این کار تا جایی ادامه پیدا می‌کند که خارج کردن هریک از متغیرها از مدل، تغییر معناداری در R^2 ایجاد کند.

۴-۳- پارامترهای ارزیابی

پارامترهای ارزیابی متعددی برای ارزیابی و اعتبارسنجی روش‌های آماری نظیر رگرسیون وجود دارند. در این مطالعه از دو پارامتر ضریب تعیین[1]، ضریب تعیین تعدیل شده و خطای جذر میانگین مربعات[2] که با علائم R^2، R^2_{adj} و RMSE نمایش داده می‌شوند استفاده شده است.

- ضریب تعیین (R^2) و ضریب تعیین تعدیل شده

این ضریب به‌منظور اندازه‌گیری میزان اعتماد و اطمینان به مدل استفاده می‌شود. به‌عبارت دیگر توسط این ضریب می‌توان نیکویی برازش را برآورد نمود. مقدار این ضریب توسط رابطه (۱) به‌دست می‌آید و دارای مقادیر در بازه [0,1] می‌باشد و مقدار بالاتر بیانگر برازش بهتر می‌باشد[۲۵].

رابطه (۱)
$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})}{n * S_{pred} * S_{obs}}\right)^2$$

در این رابطه P_i، i مین غلظت پیش‌بینی شده، $\bar{P}$ میانگین غلظت‌های پیش‌بینی شده، O_i، i مین غلظت مشاهده شده توسط حسگر متحرک، $\bar{O}$ میانگین غلظت‌های مشاهده شده، S_{pred} انحراف معیار استاندارد مقادیر پیش‌بینی شده و S_{obs} انحراف معیار استاندارد مقادیر مشاهده شده می‌باشند. ضریب تعیین تصحیح شده نیز از رابطه (۲) حاصل می‌گردد که در آن R^2 ضریب تعیین چندگانه، n تعداد مشاهدات و p تعداد پارامتر در مدل است.

رابطه (۲)
$$R^2_{adj} = 1 - \frac{1-n}{n-p} * (1 - R^2)$$

- خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)

خطای جذر میانگین مربعات یا انحراف جذر میانگین مربعات یا خطای جذر میانگین مربع‌ها، تفاوت میان مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل و مقدار واقعی می‌باشد و از رابطه (۳) به‌دست می‌آید. شایان ذکر است که هرچه مقدار این خطا کمتر باشد(به صفر نزدیک‌تر باشد) خطای مدل در برآورد کمتر بوده است.

رابطه (۳)
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(P_i - O_i)^2}$$

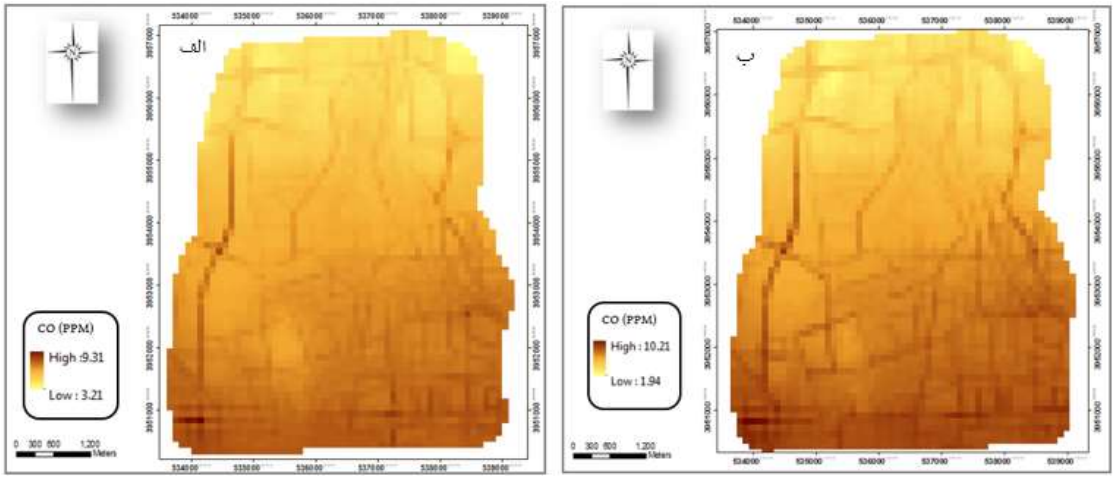
که P_i، i مین غلظت پیش‌بینی شده، O_i، i مین غلظت مشاهده شده و N تعداد کل داده‌های مورد استفاده می‌باشد.

۵- پیاده‌سازی و ارزیابی

به‌منظور پهنه بندی غلظت آلاینده مونواکسید کربن در منطقه مطالعاتی، میزان غلظت اندازه‌گیری شده به‌عنوان پارامتر وابسته و پارامترهای محیطی مذکور به‌عنوان پارامتر مستقل، وارد مدل رگرسیون کاربری اراضی گردید. لازم به ذکر است که در مجموع برای هریک از بازه های زمانی، ۷۹ پارامتر مستقل (۱۳ پارامتر محیطی در ۶ شعاع مختلف به همراه پارامتر ارتفاع) محاسبه شد. سپس بهترین ساختمان رگرسیون توسط روش قدم به قدم برای هر دوره زمانی به صورت مجزا پیاده‌سازی و ضرایب پارامترهای تاثیر گذار استخراج شدند. در انتها نیز میزان غلظت آلاینده در گریدهای ۱۰۰ متری و با توجه به وزن هریک از پارامترهای محیطی در منطقه مطالعاتی تخمین زده

[1] Coefficient of determination
[2] Root Mean Square Error

شد و مدل مکانی توزیع غلظت آلاینده در نرم افزار Arc Map تشکیل گردید. نتایج این مدلسازی برای هریک از ۲ بازه زمانی برداشت اطلاعات در شکل (۸) به نمایش درآمده‌است.



شکل ۸ : مدل تویع مکانی غلظت آلاینده مونواکسید کربن در منطقه مطالعاتی در الف) صبح روز جمعه ۱۶ بهمن ماه ۱۳۹۴. ب) صبح روز یکشنبه ۱۸ بهمن ماه ۱۳۹۴.

شناسایی پارامترهای موثر و رتبه‌بندی تاثیر آنها در غلظت یک آلاینده نیز، یکی از نتایج این مطالعه است. جدول (۲) پارامترهای موثر در میزان غلظت آلاینده را به ترتیب تاثیر با توجه به میانگین ضریب استانداردشده برای ۲ دوره زمانی نمایش می‌دهد. لازم به ذکر است از میان تمامی ۱۴ پارامتر مذکور در جدول شماره (۱) تنها ۹ پارامتر محیطی (فارغ از شعاع‌هایی که مقادیر پارامترها در آن محاسبه شده است.) به‌عنوان پارامترهای اثر گذار بر غلظت آلاینده مونواکسید کربن توسط روش قدم به قدم شناسایی شده اند. همانگونه که در جدول (۲) دیده می‌شود، پارامتر ترافیک دارای بیشترین اثر بر روی غلظت آلاینده مونواکسید کربن است و فضای سبز و افزایش ارتفاع سبب کاهش میزان غلظت اندازه‌گیری شده آلاینده گردیده است.

اعتبار سنجی یک مدل، یک گام مهم در مدل‌سازی و لازمه اطمینان یافتن از انجام صحیح مدلسازی توسط روش پیشنهادی می‌باشد. به همین منظور در هریک از دوره های برداشت اطلاعات، ۲۰ درصد از اطلاعات برداشت شده، به منظور مدلسازی حذف گردیده تا به‌عنوان مجموعه داده های تست در محاسبه پارامترهای آماری مورد استفاده قرار گیرند. لازم به ذکر است که موقعیت مکانی نقاط تست در شکل (۲) به نمایش در آمده است. در این مطالعه به‌منظور ارزیابی مدل‌های پیشنهای از پارامترهای شناخته شده آماری R^2 ، Adjusted R^2 و RMSE استفاده شده است. بدین‌منظور مقدار این پارامترها برای نتایج مدل و با استفاده از روابط مذکور محاسبه و در جدول (۳) نمایش داده شده است.

جدول ۲: رتبه بندی پارامترهای موثر در غلظت آلاینده مونواکسید کربن

ردیف	پارامتر	میانگین ضریب استاندارد شده در ۲ دوره زمانی
۱	ترافیک	۰/۵۳
۲	تندراه شهری	۰/۴۲
۳	راه شریانی درجه ۲	۰/۳۹
۴	فضای سبز	-۰/۲۶
۵	راه شریانی درجه ۱	۰/۲۱
۶	ارتفاع	-۰/۱۶
۷	خدماتی	۰/۰۹
۸	مسکونی	۰/۰۸
۹	تراکم جمعیت	۰/۰۵

جدول ۳: نتایج حاصل از ارزیابی مدل

دوره زمانی	R^2	R^2_{adj}	RMSE
صبح جمعه ۱۶ بهمن ماه ۱۳۹۴	۰/۶۱	۰/۵۲	۴/۰۳
صبح یکشنبه ۱۸ بهمن ماه ۱۳۹۴	۰/۵۴	۰/۴۹	۵/۵۷

روش رگرسیون کاربری اراضی یک روش آماری در پهنه‌بندی آلاینده ها ضمن در نظر گرفتن شرایط محیطی می‌باشد. بررسی پارامترهای آماری که از این تحقیق به دست آمد نشان می‌دهد که مدل رگرسیون کاربری اراضی با استفاده از داده های متراکم حسگرهای متحرک بی‌سیم دارای توانایی برازش مناسب (R^2_{adj}=0/49-0/52) می‌باشد. مقایسه مقادیر غلظت اندازه‌گیری شده توسط تنها ایستگاه ثابت پایش آلودگی هوا در منطقه مطالعاتی (ایستگاه تربیت مدرس) با مقادیر غلظت حاصل شده از مدلهای این مطالعه یکی‌دیگر از اقداماتی بود که با هدف ارزیابی دقت این پژوهش صورت پذیرفت. جدول (۴) این مقایر را برای دو دوره زمانی مورد بحث نمایش می‌دهد. همانگونه که در این جدول مشاهده می‌گردد مقادیر تخمین زده شده توسط مدل به طور متوسط مقدار ۲/۳PPM بیشتر از مقادیر اندازه گیری شده توسط ایستگاه ثابت پایش را نشان می‌دهد که با توجه دقت مدل مکانی توسعه داده شده قابل قبول می‌باشد.

جدول۴: غلظت آلاینده مونواکسید کربن در ایستگاه ثابت تربیت مدرس و مقادیر حاصل شده از مدل توسعه داده شده

غلظت آلاینده / دوره زمانی	میانگین غلظت آلاینده مونواکسید کربن در ایستگاه ثابت پایش تربیت مدرس (PPM)	میانگین غلظت آلاینده مونواکسید کربن حاصل شده از مدل برای موقعیت مکانی ایستگاه تربیت مدرس (PPM)
صبح جمعه	۴/۳	۵/۷
صبح یکشنبه	۲/۶	۵/۹

۶- نتیجه گیری و پیشنهادها

رشد و گسترش تکنولوژی در دهه اخیر منجر به ظهور حسگرهای پایش آلاینده‌ها در ابعاد کوچک و قابل حمل با تکنولوژی‌های متنوعی گردیده که امکان پایش میزان آلاینده ها را در هر مکان و زمانی برای ما فراهم می‌نمایند. در واقع با استفاده از این نوع حسگرها توانایی تولید اطلاعات مکانی داوطلبانه در پایش محیط های شهری با تغییرات چشمگیری روبرو گردید. به‌طور کلی این تحقیق با هدف ارزیابی توانمندی اطلاعات مکانی داوطلبانه در غنی سازی شبکه پایش و پهنه‌بندی مکانی غلظت آلاینده ها در محیط‌های شهری صورت پذیرفت. درپژوهش حاضر علاوه بر تهیه یک حسگر لحظه‌ای پایش آلاینده مونواکسید کربن، مدلسازی و پهنه‌بندی میزان غلظت آلاینده مونواکسید کربن با استفاده از اطلاعات محیطی، در منطقه مطالعاتی صورت پذیرفت که نتایج حاکی از دقت قابل قبول مدلهای مکانی توزیع آلاینده ها با استفاده از این نوع حسگرها می‌باشد.

رویه‌های به‌دست آمده حاکی از آن دارد که تراکم غلظت در قسمت های جنوبی منطقه مطالعاتی بالاتر است. لازم به ذکر است که تغییرات غلظت آلاینده در دو بازه زمانی برداشت اطلاعات، تفاوت چشم گیری را با هم نشان نمی‌دهند، اگرچه در رویه صبح جمعه به دلیل ترافیک کمتر، دارای یکنواختی بیشتری است. یکی دیگر از نتایج جالب توجه این مطالعه، بالاتربودن میزان غلظت آلاینده‌ها در معابر پرتردد شهری در تمامی دوره‌های زمانی برداشت اطلاعات است که در مدل مکانی توزیع غلظت صبح یکشنبه این امر شدید تر گردیده است. شایان ذکر است که افزایش غلظت در معابر شهری به نوعی بیانگر این موضوع می‌باشد که عمده ترین تولید کننده آلاینده مونواکسید کربن در شهرها خودروها و وسایل نقلیه موتوری می‌باشند.

بر همین اساس پیشنهاد می‌گردد که در تحقیقات آینده ضمن افزایش تعداد حسگرها و حمل آنها توسط عموم افراد داوطلب و کالیبراسیون آنها با امکانات آزمایشگاهی بهتر، به بررسی نتایج استفاده از این نوع حسگرها در پهنه بندی آلاینده های مختلف ضمن در نظر گرفتن پارامترهای محیطی دیگری علاوه بر آنچه شرح آن رفت نظیر باد، رطوبت و دما پرداخته شود. اما لازم به به ذکر است که حسگرهای متحرک بی‌سیم بویژه در زمینه پایش آلاینده های محیطی هنوز با مشکلات قابل توجهی نیز روبرو می‌باشند. برخی از مهم ترین مشکلات توسعه و استفاده از آنها به شرح زیر می‌باشد.

- نیازمند پردازش های بعدی برای تصحیح اثرات دما و رطوبت
- عدم وجود امکانات آزمایشگاهی مناسب نظیر محیط‌های کاملا ایزوله در کشور به منظور کالیبراسیون دقیق این نوع حسگرها
- مشکلات نگهداری و حمل دستگاه در صورت استفاده از منابع انرژی قوی تر به منظور افزایش بازه زمانی برداشت اطلاعات.

مراجع

[1] R. Piedrahita, Y. Xiang, N. Masson, J. Ortega, A. Collier, Y. Jiang, K. Li, R. Dick, Q. Lv, and M. Hannigan, "The next generation of low-cost personal air quality sensors for quantitative exposure monitoring," Atmospheric Measurement Techniques, vol. 7, pp. 3325-3336, 2014.

[2] A. Turner, Introduction to neogeography: " O'Reilly Media, Inc.", 2006.

[3] J. Howe, "The rise of crowdsourcing," Wired magazine, vol. 14, pp. 1-4, 2006.

[4] L. J. Rouse, S. J. Bergeron, and T. M. Harris, "Participating in the geospatial web: collaborative mapping, social networks and participatory GIS," in The Geospatial Web, ed: Springer, 2009, pp. 153-158.

[5] R. Chambers, "Participatory mapping and geographic information systems: whose map? Who is empowered and who disempowered? Who gains and who loses?," The Electronic Journal of Information Systems in Developing Countries, vol. 25, 2006.

[6] M. F. Goodchild, "Citizens as sensors: the world of volunteered geography," GeoJournal, vol. 69, pp. 211-221, 2007.

[7] M. Zook, M. Graham, T. Shelton, and S. Gorman, "Volunteered geographic information and crowdsourcing disaster relief: a case study of the Haitian earthquake," World Medical & Health Policy, vol. 2, pp. 7-33, 2010.

[8] J. P. Lynch and K. J. Loh, "A summary review of wireless sensors and sensor networks for structural health monitoring," Shock and Vibration Digest, vol. 38, pp. 91-130, 2006.

[9] S. Soleimani, E. Keshtehgar, and M. Malek, "Ubisound: Design a User Generated Model in Ubiquitous Geospatial Information Environment for Sound Mapping," The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. 40, p. 243, 2014.

[10] M. Mead, O. Popoola, G. Stewart, P. Landshoff, M. Calleja, M. Hayes, J. Baldovi, M. McLeod, T. Hodgson, and J. Dicks, "The use of electrochemical sensors for monitoring urban air quality in low-cost, high-density networks," Atmospheric Environment, vol. 70, pp. 186-203, 2013.

[11] E. Kanjo, "Noisespy: A real-time mobile phone platform for urban noise monitoring and mapping," Mobile Networks and Applications, vol. 15, pp. 562-574, 2010.

[12] M. Tomczak, "Spatial interpolation and its

uncertainty using automated anisotropic inverse distance weighting (IDW)-cross-validation/jackknife approach," Journal of Geographic Information and Decision Analysis, vol. 2, pp. 18-30, 1998.

[13] F. Nyberg, P. Gustavsson, L. Järup, T. Bellander, N. Berglind, R. Jakobsson, and G. Pershagen, "Urban air pollution and lung cancer in Stockholm," Epidemiology, vol. 11, pp. 487-495, 2000.

[14] G. W. Fisher, B. W. L. Graham, and M. J. Bell, Design of a National Ambient Air Quality Monitoring Network for New Zealand: A NIWA/ESR Study Prepared for the New Zealand Ministry for the Environment: NIWA, 1995.

[15] R. Honicky, E. A. Brewer, E. Paulos, and R. White, "N-smarts: networked suite of mobile atmospheric real-time sensors," in Proceedings of the second ACM SIGCOMM workshop on Networked systems for developing regions, pp25-30., , 2008.

[16] S. Choi, N. Kim, H. Cha, and R. Ha, "Micro sensor node for air pollutant monitoring: Hardware and software issues," Sensors, vol. 9, pp. 7970-7987, 2009.

[17] P. Dutta, P. M. Aoki, N. Kumar, A. Mainwaring, C. Myers, W. Willett, and A. Woodruff, "Common sense: participatory urban sensing using a network of handheld air quality monitors," in Proceedings of the 7th ACM conference on embedded networked sensor systems, pp349-350., 2009.

[18] S. Kim, E. Paulos, and M. D. Gross, "WearAir: expressive t-shirts for air quality sensing," in Proceedings of the fourth international conference on Tangible, embedded, and embodied interaction, pp 295-296., , 2010.

[19] G. Hoek, R. Beelen, K. De Hoogh, D. Vienneau, J. Gulliver, P. Fischer, and D. Briggs, "A review of land-use regression models to assess spatial variation of outdoor air pollution," Atmospheric environment, vol. 42, pp. 7561-7578, 2008.

[20] D. Briggs, A. Aaheim, C. Dore, G. Hoek, M. Petrakis, and G. Shaddick, "Air pollution modelling for support to policy on health and environmental risks in Europe. Final Report Section 6. Imperial College, London (2005)," EVK2-2002-00176. Available from: http://www. apmosphere. org.

[21] T. Larson, S. B. Henderson, and M. Brauer, "Mobile monitoring of particle light absorption coefficient in an urban area as a basis for land use regression," Environmental science & technology, vol. 43, pp. 4672-4678, 2009.

[22] J. J. Kim, S. Smorodinsky, M. Lipsett, B. C. Singer, A. T. Hodgson, and B. Ostro, "Traffic-related air pollution near busy roads: the East Bay Children's Respiratory Health Study," American journal of respiratory and critical care medicine, vol. 170, pp. 520-526, 2004.

[23] S. Ocak and F. S. Turalioglu, "Effect of meteorology on the atmospheric concentrations of traffic-related pollutants in Erzurum, Turkey," J. Int. Environmental Application & Science, vol. 3, pp. 325-335, 2008.

[24] S. B. Henderson, B. Beckerman, M. Jerrett, and M. Brauer, "Application of land use regression to estimate long-term concentrations of traffic-related nitrogen oxides and fine particulate matter," Environmental science & technology, vol. 41, pp. 2422-2428, 2007.

[25] H. A. Hamida, A. S. Yahayab, N. A. Ramlib, and A. Z. Ul-Saufie, "Performance of parameter estimator for the two-parameter and three-parameter gamma distribution in PM10 data modelling," International Journal of Engineering and Technology, vol. 2, pp. 637-643, 2012.

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.4, No.2, Summer 2016

Enrichment of Air Quality Monitoring with mobile Sensors for Spatial Modelling of Pollutants (case study: CO in Tehran)

Manouchehr Kheradmandi [1], Rahim Ali Abbaspour *[2]

1- MSc student of GIS, School of Surveying and Geospatial Engineering. College of Engineering, University of Tehran.
2- Assistant professor, School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran.

Abstract

By developing wireless mobile sensors, volunteered geographic information production and social co-operating increase, urban monitoring witnessed a considerable change. On the other hand, air pollution become one of the most important environmental challenge of Tehran and tackling it is not possible unless knowing the pollutants and their sources. Accurate investigation of spatial distribution of pollutants in cities requires development of spatial variability models of pollutants. But, high cost of developing and keeping of Air Quality Monitoring Network (AQMN) is one of the biggest problems in front of councils in developing such monitoring stations in cities. In this research, in addition to designing and building a mobile carbon monoxide monitoring system and calibrating it in the lab, data of pollutants concentration in 4 time periods in district 6 of Tehran was collected. Then by using land use regression method the spatial distribution model of this pollutant for the investigated area in each time period was determined. To reach this achievement, different environmental factors such as land use, Roads, elevation and traffic as independent factors and the measured pollutant concentration as dependent factor were applied to the mentioned model. Finally, this research led to provide carbon monoxide pollution maps for the investigated area, which are useful in finding high risk locations. Evaluating the statistical parameters show that in estimating pollutant concentration of different urban districts, the suggested method is practical to some extends.

Key words: Volunteered Geographic Information, Wireless mobile air quality sensors, Land use regression, Air pollution map.

Correspondence Address:. School of Surveying and Geospatial Eng., Faculty of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
Tel: 09123011255
Email: abaspour@ut.ac.ir