

بهبود دقت مدل‌سازی غلظت ذرات معلق ($PM_{2.5}$) از طریق ادغام ایستگاه‌های ثابت و همراه سنجش آلودگی هوا

سارا حق بیان^۱

بهنام تشیع^۲

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۰۱/۲۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۰۴/۰۶

چکیده

آلودگی هوا از جمله پدیده‌های پیچیده‌ای است که دارای دینامیک غیرخطی بوده و تأثیر پارامترهای متنوع بر رفتار آن، تجزیه و تحلیل و مدل‌سازی تغییرات مکانی و زمانی غلظت آلاینده‌ها را با دشواری‌های فراوانی مواجه می‌سازد. هدف از این مطالعه بهبود دقت مدل‌سازی آلاینده‌های هوا به منظور مدیریت مواجهه با استفاده از داده‌های حاصل از حسگرهای همراه جهت مرتفع ساختن نواقص روش رگرسیون کاربری اراضی^۳ است. به منظور بهبود دقت مدل‌سازی LUR برای تخمین غلظت $PM_{2.5}$ از هفت ایستگاه ثابت و چهارده حسگر همراه استفاده گردید. منطقه مورد مطالعه شهر اصفهان است و محل نمونه‌برداری حسگرهای همراه در مکان‌هایی با بیشترین پیش‌بینی عدم قطعیت و بالاترین احتمالی که از یک حد آستانه معین تجاوز می‌کند، انتخاب شدند؛ سپس از آزمون آماری t برای بررسی معنی‌دار بودن و یا نبودن بهبود نتایج استفاده گردید. در این تحقیق، چارچوبی برای تأمین دقت مورد نظر با افزودن داده‌های حاصل از حسگرهای همراه؛ پیشنهاد شده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که خطای جذر میانگین مربعات^۴ حاصل از لایه زمین آمار هفت ایستگاه ثابت پایش برابر با $1/802$ و RMSE حاصل از ترکیب این ایستگاه‌ها با چهارده ایستگاه همراه معادل با $0/591$ برآورد شد. نتایج نشان داد که حتی با افزودن یک حسگر همراه به ایستگاه‌های ثابت میزان RMSE $0/113$ میکروگرم بر متر مکعب کاهش می‌یابد و با افزودن چهارده حسگر همراه به هفت ایستگاه ثابت میزان RMSE حاصل از ساخت مدل LUR حدود سه برابر کاهش می‌یابد. یافته‌های حاصل از این تحقیق نشان داد که با استفاده از چارچوب پیشنهادی می‌توان کیفیت هوا را در هر مکان و زمان با دقت مورد نظر تخمین زد و قدرت تفکیک بالاتری را برای محیط‌های ناهمگن شهری فراهم کرد.

واژه‌های کلیدی: آلودگی هوا، حسگرهای همراه، ایستگاه پایش کیفیت هوا، غلظت ذرات معلق $PM_{2.5}$ ، ادغام حسگرها.

۱- دانشجوی دکتری سیستم‌های اطلاعات مکانی، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان

۲- استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان (نویسنده مسئول) B.Tashayo@eng.ui.ac.ir

3- Land Use Regression (LUR)

4- Root Mean Square Residual (RMSE)

۱- مقدمه

مدیریت مواجهه با آلودگی هوا در شهرهای بزرگ به یک مسئله پیچیده تبدیل شده است. بیش از ۵۰ درصد جمعیت جهان در مناطق شهری زندگی می‌کنند و پیش‌بینی شده تا سال ۲۰۵۰ این جمعیت به ۷۰ درصد افزایش خواهد یافت (Firculescu & Tudose, 2015). شواهد گسترده‌ای نشان می‌دهد که قرار گرفتن در معرض آلودگی هوا منجر به بروز بیماری‌های قلبی - تنفسی، سرطان ریه، سکته مغزی و حتی مرگ‌ومیر می‌شود (Khan et al., 2019). از بین آلاینده‌های اصلی هوا پیچیده‌ترین و خطرناک‌ترین آلاینده، ذرات معلق هستند که در اندازه‌های مختلف از ذرات بسیار ریز در مقیاس نانومتر تا ده میکرومتر و حتی بالاتر وجود دارند (Hosseini & Shahbazi, 2016; Nourmoradi et al., 2016). ذرات معلق در اثر انتشار مستقیم و یا واکنش‌های شیمیایی ایجاد می‌شوند.

عمدتاً منابع انتشار این آلاینده‌ها شامل احتراق سوخت (سوزاندن زغال سنگ و چوب)، خودروها (اکزوزها، لنت، لاستیک)، ماشین‌آلات و فرآیندهای صنعتی است. مواجهه کوتاه مدت با ذرات معلق باعث تشدید بیماری‌های تنفسی و مواجهه طولانی مدت با آن عامل مرگ‌ومیر و تشدید بیماری‌های قلبی و ریوی است (Hosseini & Shahbazi, 2016). بیشترین غلظت ذرات $PM_{2.5}$ و PM_{10} در زمان اوج ترافیک حادث می‌شود (Prashant, 2005). براساس گزارش سازمان بهداشت جهانی^۱ در سال ۲۰۰۵ نسبت $PM_{2.5}$ / PM_{10} در کشورهای در حال توسعه در محدوده ۰/۵-۰/۸ برآورده شده است.

مقدار مجاز روزانه برای $PM_{2.5}$ معادل $25 \mu g m^{-3}$ و برای PM_{10} معادل $50 \mu g m^{-3}$ است (Maraziotis, Sarotis, Marazioti, & Marazioti, 2008). نتایج حاصل از مطالعات پیشین نشان داده که به ازای افزایش هر ده میکروگرم بر متر مکعب غلظت ذرات $PM_{2.5}$ و PM_{10} تعداد کل موارد مرگ متناسب به ترتیب ۱/۵ و ۳ درصد افزایش یافته است (Jonidi et al).

سازمان بهداشت جهانی تخمین می‌زند سالانه ۲/۴ میلیون مرگ زودرس ناشی از قرارگرفتن در معرض ذرات ریز $PM_{2.5}$ اتفاق می‌افتد. (Lim et al., 2019)

اندازه‌گیری‌های غلظت آلاینده‌های هوا معمولاً با استفاده از ایستگاه‌های ثابت پایش کیفیت هوا انجام می‌شود (Mihăiță, Dupont, Chery, Camargo, & Cai, 2019). ایستگاه‌های زمینی می‌توانند اطلاعات مربوط به دما، رطوبت، فشار و همچنین آلاینده‌هایی نظیر ازن (O_3)، مونوکسیدکربن (CO)، دی اکسیدکربن (CO_2)، دی اکسیدگوگرد (SO_2)، دی اکسیدنیتروژن (NO_2) و ذرات نانو مانند $PM_{2.5}$ ، PM_{10} را جمع‌آوری کنند. این ایستگاه‌ها معمولاً گران قیمت، بسیار پراکنده، بزرگ و پیچیده هستند و هزینه‌های بالایی در تعمیر، نگهداری و استقرار دارند؛ همچنین چگالی داده آن‌ها کم است و مناطق گسترده‌ای را نیز پوشش نمی‌دهند (Leung et al., 2019). در سال ۲۰۱۱ یک سازمان غیردولتی به نام اکوپولیس^۳ نشان داد که ۲۳/۴٪ از داده‌های ثبت شده شهر بخارست که توسط هشت ایستگاه ثابت پایش کیفیت هوا در طول یک سال جمع‌آوری شده است؛ نامعتبر هستند که دلایل آن از کار افتادن غیرمنتظره دستگاه، از دست رفتن داده یا اندازه‌گیری‌های نامعتبر داده است (Firculescu & Tudose, 2015).

صحت مدل‌های شبیه‌سازی محدود به فرض‌های ساخته شده و توان محاسباتی و غلظت آلاینده‌های هوا در مقیاس شهرها است و معمولاً بین مدل‌های شبیه‌سازی شده و مشاهدات دنیای واقعی، واگرایی وجود دارد (Leung et al., 2019). اطلاعات ایستگاه‌های پایش کیفیت هوا به خودی خود کافی نیستند و برای همین مدل‌سازی می‌شوند و مدل‌سازی‌هایی مانند LUR هم که بر مبنای آن‌ها انجام می‌شود به دلیل نقش داده‌های مورد استفاده در فرآیند تولید مدل دچار نقصان می‌باشند پس برای رفع این مشکل نیاز است تا از منابع داده دیگری به عنوان اطلاعات مکمل در فرآیند توسعه مدل‌های آلودگی هوا استفاده شود؛ یکی از

2- Air Quality Monitoring (AQM)

3- Ecopolis

1- World Health Organization (WHO)

برخی مطالعاتی که در این زمینه انجام شده عبارتند از: کریستینگ^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۷ یک معماری اینترنت اشیا^۲ را ارائه کردند که از داده‌های حسگر همراه برای جریان آلودگی هوا استفاده کردند که می‌تواند اطلاعات مربوط به آلودگی هوا را در زمان آنی جمع‌آوری کند و سبب حل مشکلات مختلف برای پردازش داده‌های از دست‌رفته و همگام‌سازی می‌شود (Kersting, Geierhos, Jung, & Kim, 2017). همکاران در سال ۲۰۱۷ از اتوبوس به‌عنوان حسگر با هدف تهیه نقشه‌ای با کیفیت هوا با وضوح بالا برای گزارش اندازه‌گیری آلاینده‌ها و تسهیل آنالیز برای حمایت از تصمیمات دولت به منظور کاهش آلودگی انجام دادند (Biondi et al., 2017). لئونگ^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۸ یک چارچوب دقیق برای ادغام داده‌های غلظت آلاینده از ایستگاه‌های ثابت پایش کیفیت هوا با حسگرهای همراه ارائه کردند. این مطالعه در کشور کره با استفاده از سیزده ایستگاه ثابت پایش کیفیت هوا و چهل‌وچهار حسگر همراه مستقر بر روی تاکسی انجام گرفت که با استفاده از فرکانس‌های مختلف به‌عبارتی هر ده ثانیه در طول مسیر مانند ایستگاه‌های زمینی، غلظت آلاینده‌های هوا را اندازه‌گیری می‌کردند (Leung et al., 2018). تعدادی از شرکت‌های تجاری و تعدادی از پروژه‌ها در حال توسعه سامانه‌های مرتبط با آلودگی هوا هستند. به عنوان مثال، پروژه‌هایی مانند Open Sense, Air Quality, Egg, MESSAGE از حسگرهای همراه برای بهبود پایش کیفیت هوا استفاده می‌کنند. شهرهایی مانند شارجه، پراگ، کاتانیا، بخارست و دانگو^۴ از حسگرهای همراه برای بهبود نظارت بر کیفیت هوا استفاده می‌کنند (Firculescu & Tudose, 2015; Leung et al., 2019). دانش مبتنی بر ابر^۵ ایجاد کرده است که کیفیت هوا در زمان

این منابع، استفاده از شبکه‌های حسگر همراه با هدف تولید داده‌های کیفیت هوا با وضوح زمانی و مکانی بالا است. حسگرهای همراه اغلب کم‌هزینه و موقت هستند اما با محدودیت‌های نظیر باتری، پردازش و محدودیت پهنای باند مواجه‌اند.

بنابراین تعداد کافی مشاهدات توسط ترکیب اطلاعات حسگرهای همراه و ایستگاه‌های ثابت زمینی می‌تواند پروفایل آلودگی زمانی - مکانی صحیح در یک منطقه مطالعاتی مانند یک شهر را بسازد (Biondi, Catania, Monteleone, & Polito, 2017; Leung et al., 2018; Leung et al., 2019).

پایش وضعیت آلودگی هوا، نیازمند توزیع مناسب، کافی و دقیق ایستگاه‌ها در کل منطقه مطالعاتی است که با توجه به تعداد محدود ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا و همچنین قرارگیری این ایستگاه‌ها در مناطق خاصی از شهر، مانع از مدل‌سازی مطلوب آلودگی هوا در قدرت تفکیک‌های مکانی مورد نیاز است. در این تحقیق، روشی برای ادغام داده‌های ایستگاه‌های ثابت با حسگرهای همراه؛ پیشنهاد شده است.

در روش پیشنهادی، یک لایه زمین‌آمار بر مبنای ایستگاه‌های موجود تولید می‌شود، سپس با در نظر گرفتن معیارهایی نظیر خطای استاندارد پیش‌بینی‌ها، محل ایستگاه‌های همراه معین می‌گردند.

با روش پیشنهادی می‌توان به محل‌هایی که مقدار آلودگی در آن‌ها نزدیک آستانه خطر باشد یا از آن فراتر رفته باشد اولویت بیشتری داد. به منظور ارزیابی کارایی روش پیشنهادی غلظت ذرات معلق (PM_{2.5}) از مدل LUR در شهر اصفهان استفاده گردید. هدف از این مطالعه ایجاد یک چارچوب دقیق برای ادغام داده‌های جمع‌آوری شده توسط حسگرهای همراه و ایستگاه‌های زمینی در یک محیط شهری است. با استفاده از این چارچوب کیفیت هوا را در هر نقطه و مکان و زمان می‌توان با دقت مورد نظر تخمین زد و مشخصات مکانی و زمانی آلاینده‌های هوا را بدست آورد.

1- Kersting

2- Internet of Things (IOT)

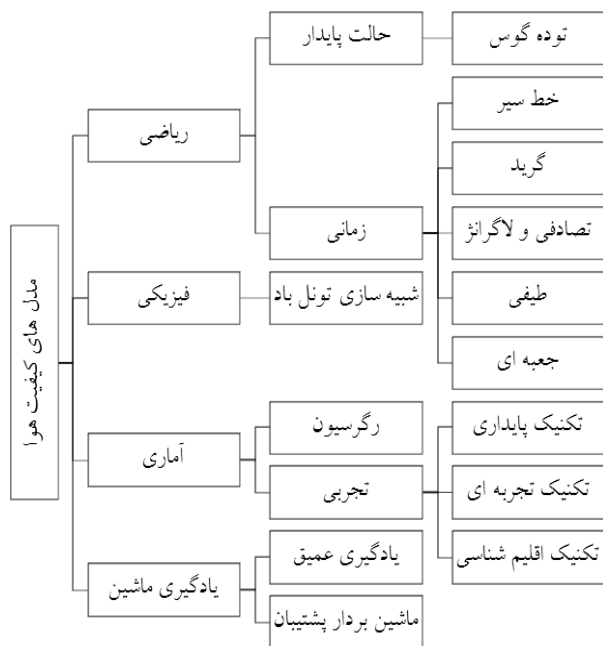
3- Biondi

4- Leung

5- Daegu

6- Cloud-Based

آنی و ریزدانه را در کل شهر بر اساس داده‌های کیفیت هوای پیشین^۱ و در زمان آنی استنباط می‌کند. این امر با استفاده از ایستگاه‌های پایش موجود و انواع منابع داده مشاهده شده در شهر مانند داده‌های هواشناسی، جریان ترافیک، تحرک انسان، ساختار شبکه‌های جاده‌ای و نقطه نظرات اندازه‌گیری می‌شود (Leung et al., 2018). طرح دیگری به نام Open Sense در زوریخ سوئیس انجام شد؛ در این طرح دستگاه‌های حسگر همراه بر روی سقف اتوبوس‌ها نصب و از این طریق شبکه نظارت بر کیفیت هوا با استفاده از شبکه حمل‌ونقل عمومی موجود ایجاد کردند و ارتباط بین حسگرها با استفاده از سرویس بسته امواج رادیویی^۲ انجام گرفت تا نقشه‌های آلودگی با وضوح زمانی و مکانی بالا تهیه گردد (Firculescu & Tudose, 2015; Lim et al., 2019). ویلت^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۰ از شهروندان برای جمع‌آوری داده‌های آلودگی هوا استفاده کردند. این پروژه Common Sense نام داشت. در این پروژه کاربران حسگرها را با خود در طول روز حمل می‌کنند و این حسگرها آلاینده‌های ازن، مونوکسید کربن و اکسیدهای ازت را اندازه‌گیری می‌کردند و این اطلاعات از طریق اتصال به شبکه داده GSM به سرور پایگاه داده منتقل می‌شد. برای ترغیب شرکت‌کنندگان میزان مواجهه فرد در معرض آلودگی هوا را به صورت توصیفی خوب، متوسط، ناسالم نشان می‌دهد (Willett, Aoki, Kumar, Subramanian, & Woodruff, 2010).



نگاره ۱: انواع مدل‌های کیفیت هوا

مدل‌های رگرسیون باتوجه به داده‌های کمی و کیفی ناهمگن با عدم قطعیت مواجه‌اند و روند کلی تغییرات آلودگی را به تصویر می‌کشند (Tashayo & Alimohammadi, 2016). مدل‌های رگرسیون غالباً از داده‌های ایستگاه‌های پایش کیفیت هوا استفاده می‌کنند. تعداد این ایستگاه‌ها معمولاً اندک است و در مناطق خاصی از شهر واقع

این پروژه Common Sense نام داشت. در این پروژه کاربران حسگرها را با خود در طول روز حمل می‌کنند و این حسگرها آلاینده‌های ازن، مونوکسید کربن و اکسیدهای ازت را اندازه‌گیری می‌کردند و این اطلاعات از طریق اتصال به شبکه داده GSM به سرور پایگاه داده منتقل می‌شد. برای ترغیب شرکت‌کنندگان میزان مواجهه فرد در معرض آلودگی هوا را به صورت توصیفی خوب، متوسط، ناسالم نشان می‌دهد (Willett, Aoki, Kumar, Subramanian, & Woodruff, 2010).

۲- دیدگاه‌ها و مبانی نظری

اقدامات مؤثری برای به حداقل رساندن میزان مواجهه و کاهش آلودگی هوا برای شهرها می‌تواند، انجام شود. یکی از این اقدامات، مدل‌سازی و پیش‌بینی غلظت آلاینده‌های هوا است که با تغییر عادات می‌تواند به سلامت افراد کمک کند (Leung et al., 2018; Mahajan et al., 2020; Mihăiță et al., 2018).

1- Historical

2- General Packet Radio Service (GPRS)

3- Willett

آلاینده‌های هوا است (Lim et al., 2019). به همین دلیل به صورت گسترده‌ای در مطالعات اپیدمیولوژیک و ارزیابی اثرات مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مدل LUR هنگامی که تعداد مشاهدات در منطقه مورد مطالعه زیاد باشد، عملکرد بهتری دارد (Beelen, Voogt, Duyzer, Zandveld, & Hoek, 2010).

۳- مواد و روش‌ها

۳-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق شهر اصفهان جمعیت بیش از دو میلیون نفر و مساحتی معادل با ۲۰۰ کیلومتر مربع، معادل ۶/۳٪ از مساحت ایران در موقعیتی بین ۳۰ درجه و ۴۳ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۲۷ دقیقه عرض شمالی و ۴۹ درجه و ۳۸ دقیقه تا ۵۵ درجه و ۳۲ دقیقه طول شرقی و ۱۵۵۰ متر بالاتر از ارتفاع سطح دریا در ایران مرکزی قرار دارد (Rashidi, Rameshat, & Gharib, 2012).

از مجموع کل آلاینده‌های وارد شده به شهر اصفهان ۱۳ درصد متعلق به صنایع شهری، ۱۱ درصد مربوط به منابع خانگی و ۷۶ درصد از کل آلاینده‌ها مربوط به منابع آلوده کننده ناشی از ترافیک در شهر اصفهان است (Jafari, Nemati, Hajizadeh, & Abdollahnejad, 2017). بخش عمده ذرات معلق $PM_{2.5}$ توسط سامانه حمل‌ونقل ایجاد می‌شود و سامانه حمل‌ونقل با سهم ۷۶ درصدی در انتشار آلاینده‌ها یکی از مهمترین عوامل آلوده‌کننده هوای شهر اصفهان است (Rashidi et al., 2012; Zarrabi, Mohammadi, & Abdollahi, 2010). علت اصلی آلودگی هوا در شهر اصفهان وسایل نقلیه زیاد، صنایع بزرگ و جمعیت زیاد است. ۲۲ درصد مرگ ساکنین شهر اصفهان در سال ۱۳۹۵، مرتبط با آلاینده $PM_{2.5}$ با غلظت ۷۰-۷۹ میکروگرم بر متر مکعب بوده است (Jafari et al., 2017).

نگاره ۲ توزیع ایستگاه ثابت پایش کیفیت هوا در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد که اطلاعات سالیانه غلظت ذرات معلق $PM_{2.5}$ و مختصات این ایستگاه‌ها از شهرداری استان اصفهان گرفته شده است.

شده‌اند. این ویژگی منجر به این امر می‌گردد که استفاده از مدل‌های رگرسیون در مناطقی که بافت شهری در مقایسه با محل قرارگیری ایستگاه‌های پایش شهری متفاوت است، با خطای زیادی همراه شود (Basagaña et al., 2013).

مدل رگرسیون کاربری اراضی روشی است که برای اولین بار توسط بریگز^۱ و همکاران در سال ۱۹۹۷ معرفی شد (Morley & Gulliver, 2018). طی سال‌های اخیر مدل‌های LUR به دلیل ارائه نقشه‌های آلودگی با قدرت تفکیک بالا استفاده شده است، همچنین برای پیش‌بینی آلاینده‌ها، خصوصیات و ویژگی‌های اطراف ایستگاه‌های پایش آلودگی را به عنوان متغیرهای مستقل و تمرکز آلاینده‌ها را در ایستگاه پایش آلودگی به عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته است و این تمرکز را در نقاط بدون سنجش آلاینده با استفاده از تحلیل رگرسیونی پیش‌بینی می‌کند (Weissert et al., 2019). دقت مدل LUR برای پیش‌بینی غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ توسط بریگز^۱ و همکاران، هوچادل^۲ و همکاران، مورگنسترن^۳ و همکاران و برآور^۴ و همکاران برحسب RMSE به ترتیب ۳/۳، ۲/۳، ۱/۴۸، ۱/۵۹ میکروگرم بر متر مکعب برآورد شده است (Hoek et al., 2008). مدل‌های LUR برای برآورد غلظت آلاینده استفاده می‌شوند و کاربرد آن‌ها به دلیل هزینه قابل قبول و امکان اجرای آسان افزایش یافته است (Hennig et al., 2016).

مدل LUR یک روش امیدوارکننده است و غلظت آلاینده هوا را در وضوح مکانی بالا پیش‌بینی می‌کند (Henderson, Beckerman, Jerrett, & Brauer, 2007). لیم^۵ و همکاران در سال ۲۰۱۹ از ترکیب حسگرهای همراه با ایستگاه‌های ثابت برای ایجاد نقشه‌های پیش‌بینی سطح غلظت $PM_{2.5}$ در شهر سئول استفاده کردند و نتایج تحقیق نشان داد که جمع‌آوری داده‌ها با استفاده از حسگرهای همراه هزینه‌ای کمتر از سیصد دلار را به همراه داد؛ بنابراین یک رویکرد بسیار مقرون به صرفه برای مدل‌سازی غلظت

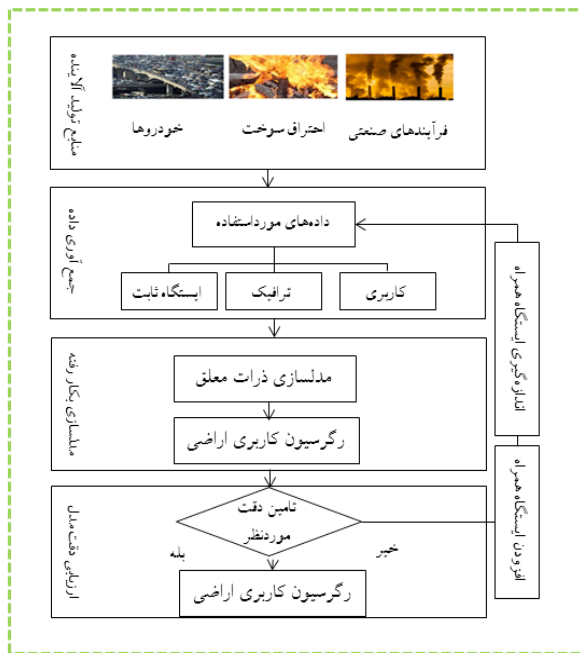
1- Briggs

2- Hochadel

3- Morgenstern

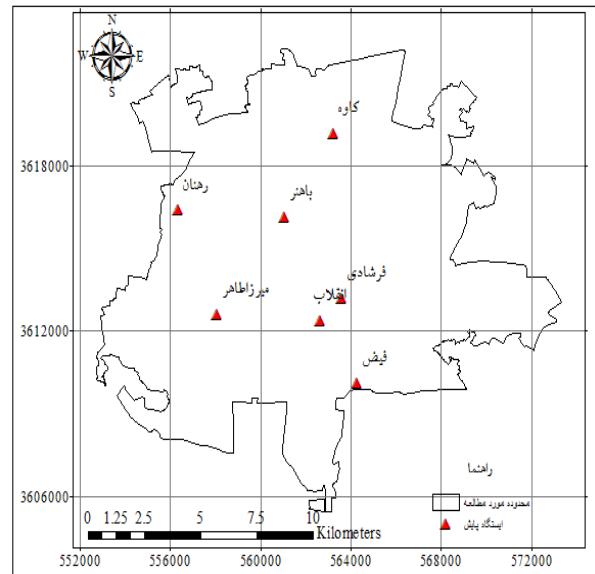
4- Brauer

5- Lim



نگاره ۳: چهارچوب پیشنهادی به منظور بهبود دقت مدل‌سازی

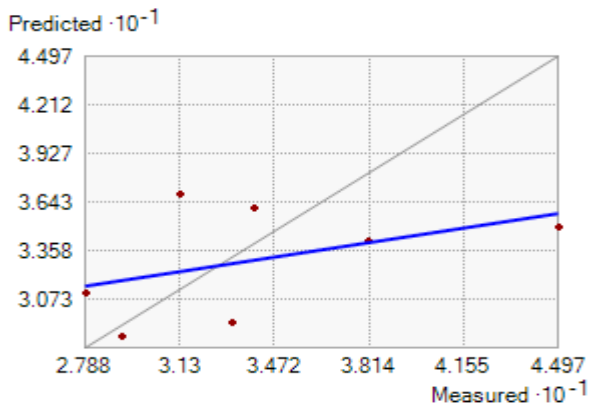
در روش‌شناسی پیشنهادی، یک لایه زمین‌آمار بر مبنای ایستگاه‌های موجود تولید می‌شود، سپس با در نظر گرفتن معیارهایی نظیر خطای استاندارد پیش‌بینی‌ها، محل ایستگاه‌های همراه معین می‌گردند. با روش پیشنهادی می‌توان به محلهایی که مقدار آلودگی در آن‌ها نزدیک آستانه خطر باشد یا از آن فراتر رفته باشد اولویت بیشتری داد. مرحله اول چارچوب پیشنهادی برای بهبود دقت مدل‌سازی غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ جمع‌آوری اطلاعات است. جمع‌آوری داده در این مطالعه شامل اطلاعات سالیانه ایستگاه ثابت پایش کیفیت هوا، کاربری اراضی و ترافیک است. مرحله دوم از مدل رگرسیون کاربری اراضی برای تخمین و ایجاد نقشه‌های پیش‌بینی سطح غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری شده مرحله اول استفاده می‌شود. مرحله سوم، ارزیابی دقت مدل‌سازی است؛ اگر دقت مورد نظر تأمین شد می‌توان غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ را تخمین زد. در صورتی که دقت مورد نظر تخمین نشد می‌توان از حسگرهای همراه به منظور افزایش دقت



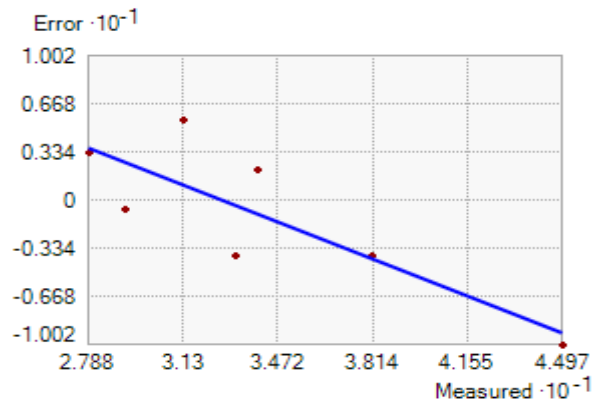
نگاره ۲: توزیع ایستگاه‌های پایش کیفیت هوا در منطقه مورد مطالعه

۳-۲- روش‌شناسی

پایش وضعیت آلودگی هوا نیازمند توزیع مناسب، کافی و دقیق ایستگاه‌ها در کل منطقه مطالعاتی است که تعداد محدود این ایستگاه‌ها و قرارگیری آن‌ها در مناطق خاصی از شهر، مانع از مدل‌سازی مطلوب آلودگی هوا در قدرت تفکیک‌های مکانی مورد نیاز است. جهت مرتفع ساختن نواقص داده‌های حاصل از ایستگاه‌های ثابت پایش کیفیت هوا، از ادغام حسگرهای همراه به عنوان مکمل این ایستگاه‌ها استفاده می‌شود. ایستگاه‌های ثابت پایش کیفیت هوا مرتباً در مکان‌های ثابت اندازه‌گیری می‌کنند و قدرت تفکیک زمانی آن‌ها یک ساعت است. در مقابل، حسگرهای همراه توسط وسایل نقلیه یا انسان‌ها حمل می‌شوند و فقط داده‌ها را در طول مسیرشان جمع‌آوری می‌کنند. اندازه‌گیری‌ها فقط در زمانی انجام می‌شوند که از یک نقطه از فضا عبور کنند. نحوه ادغام مؤثر داده‌های ایستگاه‌های ثابت زمینی که دارای وضوح زمانی بالا و وضوح مکانی کم هستند و داده‌های حسگرهای همراه که دارای وضوح زمانی کم اما وضوح مکانی زیاد هستند به یک چالش تبدیل شده است. نگاره ۳ متدولوژی پیشنهادی را نشان می‌دهد.



ب



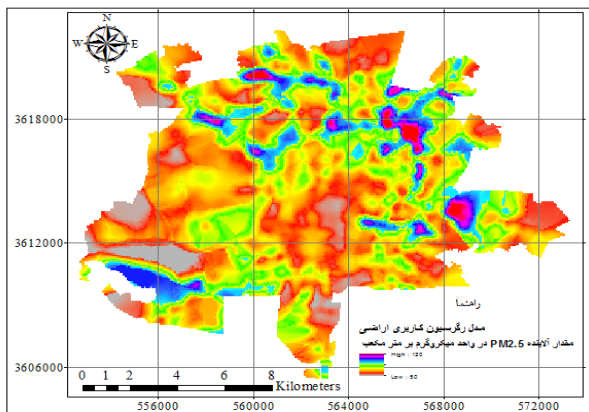
الف

نگاره ۴. الف: نمودار خطا، ب: نمودار پیش‌بینی مقدار غلظت آلاینده در ایستگاه ثابت پایش

از مدل به‌کار رفته در این تحقیق در جدول ۱ ارائه شده است. نگاره ۴ نمودار خطا و پیش‌بینی مقدار غلظت آلاینده در ایستگاه ثابت پایش را نشان می‌دهد. چگالی کم داده‌ها، پراکندگی و ناهمگن بودن مشاهدات در این نمودارها کاملاً مشهود است و نشان می‌دهد که اگر تنها از ایستگاه‌های ثابت برای سنجش آلودگی هوا استفاده شود؛ مدل‌سازی غلظت ذرات معلق در منطقه ناهمگنی مانند سطح یک شهر، منجر به افزایش قابل توجه خطای مدل‌سازی می‌گردد.

مدل‌سازی استفاده کرد. به‌منظور پیاده‌سازی روش موردنظر از رگرسیون خطی چند متغیره استفاده شده است. در مدل مورد استفاده غلظت آلاینده PM_{2.5} به عنوان متغیر وابسته و پارامترهای کاربری اراضی و ترافیک به عنوان متغیر مستقل مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

کاربری اراضی بکار رفته شامل مسکونی، تجاری و کشاورزی است. اندازه بافرهای بکار رفته در این تحقیق به ترتیب برای مسکونی ۱۰۰۰ متر، تجاری ۳۰۰ متر، و کشاورزی ۱۵۰ متر است. منظور از پارامترهای ترافیک، سطح معبر و حجم ترافیک است که برای آن‌ها از بافر ۶۰۰ متری استفاده شده است. رابطه ۱ معادله رگرسیونی به‌کار رفته در این تحقیق را نشان می‌دهد.



$$Y = 24.01 + 5.83 \times 10^{-6} \times X_1 - 6.32 \times 10^{-5} \times X_2 - 1.07 \times 10^{-5} \times X_3 + 0.0013 \times X_4 + 0.002 \times X_5 \quad (1)$$

در این رابطه Y متغیر وابسته، X_k ($k = 1, 2, \dots, 5$) متغیرهای مستقل هستند که هر کدام به ترتیب شامل X_1 مسکونی، X_2 تجاری، X_3 کشاورزی، X_4 سطح معبر، X_5 حجم ترافیک، مقدار ۲۵/۰۸ عرض از مبدا است. مقایسه نتایج حاصل از مقادیر مشاهداتی سالیانه ایستگاه ثابت پایش برای تخمین غلظت آلاینده PM_{2.5} در سال ۱۳۹۶ به همراه نتایج حاصل

نگاره ۵: غلظت ذرات معلق حاصل از ایستگاه‌های ثابت با استفاده از مدل رگرسیون کاربری اراضی

به‌منظور ارزیابی کارایی روش پیشنهادی، غلظت ذرات معلق (PM_{2.5}) با استفاده از مدل LUR در شهر اصفهان پیش‌بینی گردید. نگاره ۵ شامل غلظت ذرات معلق

جدول ۱: مقایسه نتایج حاصل از مقادیر مشاهداتی با مقادیر مدل‌سازی با استفاده از مدل LUR

میزان غلظت $g/m^3 \mu PM_{2.5}$	میزان غلظت $g/m^3 \mu PM_{2.5}$	موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های	نام ایستگاه‌های پایش
حاصل از مدل LUR	حاصل از ایستگاه ثابت	پایش کیفیت هوا	کیفیت هوا
۷۷/۹۷۷	۳۱/۳۰۹	۵۶۱۰۳۳_۳۶۱۶۱۴۶	باهر
۷۸/۸۵۷	۳۸/۰۸۱	۵۶۳۲۱۹_۳۶۱۹۱۹۳	کاوه
۶۲/۴۶۲	۲۷/۸۸۳	۵۶۲۶۲۶_۳۶۱۲۳۹۹	انقلاب
۵۳/۸۱۴	۲۹/۱۸۵	۵۶۴۲۵۲_۳۶۱۰۱۲۱	فیض
۵۶/۷۰۳	۴۴/۹۶۹	۵۵۶۳۴۳_۳۶۱۶۴۰۳	رهنان
۶۶/۷۸۶	۳۳/۹۴۵	۵۵۸۰۵۶_۳۶۱۲۶۲۵	میرزا طاهر
۵۵/۰,۳۲۹	۳۳/۱۶۲	۵۶۳۵۷۷_۳۶۱۳۲۱۷	فرشادی
۶۴/۵۶۱	۳۴/۰,۷۶۷		میانگین حسابی

که در این مطالعه دو معیار بیشترین پیش‌بینی عدم قطعیت و بالاترین احتمالی که از یک حد آستانه معین تجاوز می‌کند، انتخاب شدند.

نمونه‌برداری‌ها با استفاده از دستگاه غبارسنج محیطی پرتابل به عنوان حسگر همراه با محدوده اندازه‌گیری (μmg^{-3}) ۵۰۰-۰ با دقت $\mu g cm^{-3}$ ۰/۱ براساس استاندارد ۱/۱/۲ به معنای قرار گرفتن دستگاه در فاصله یک متر از سطح زمین و در فاصله یک متر از موانع محیطی انجام گرفت. از آنجا که مقدار اندازه‌گیری آلاینده در طول روز متفاوت است بنابراین به منظور بهبود دقت اندازه‌گیری برای هر نقطه میانگین حاصل از سه نوبت اندازه‌گیری صبح، ظهر و شب لحاظ گردید؛ مدت زمان اندازه‌گیری برای هر ایستگاه همراه دو ساعت است. به عبارت دیگر برای هر نقطه شش ساعت اندازه‌گیری انجام شد و در کل چهارده روز اندازه‌گیری‌ها به طول انجامید. اندازه‌گیری‌ها در روزهای ۱۱ تا ۲۴ آذر ماه سال ۱۳۹۸ در شهر اصفهان انجام گرفت. نگاره ۶ دستگاه غبارسنج محیطی پرتابل بکار رفته برای اندازه‌گیری غلظت آلاینده $PM_{2.5}$ در دو ایستگاه همراه را نشان می‌دهد.

۴- نتایج و بحث

مدل‌های رگرسیون غالباً از داده‌های ایستگاه‌های پایش کیفیت هوا استفاده می‌کنند. با توجه به این‌که توزیع زمانی - مکانی قابل اعتماد و صحیح از غلظت آلودگی

حاصل از ایستگاه‌های ثابت با استفاده از مدل رگرسیون کاربری اراضی است. مدل‌های رگرسیون غالباً از داده‌های ایستگاه‌های پایش کیفیت هوا استفاده می‌کنند. چندین قانون برای تعیین تعداد ایستگاه‌ها برای شبکه‌ها وجود دارد یکی از این قوانین براساس میزان جمعیت است؛ به طوری که برای جمعیت کمتر از ۱۰۰۰۰۰ نفر باید سه ایستگاه، ۱۰۰۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰۰ بین چهار تا ده ایستگاه، بیشتر از ۱۰۰۰۰۰۰ نفر یازده تا بیست ایستگاه احداث گردد (Hoek et al., 2008). یک قانون بهتر این است که تعداد و توزیع مکانی ایستگاه‌ها باید نشان دهنده تنوع سطح غلظت باشند.

این قانون می‌تواند منجر به نیاز به ایستگاه‌های بیشتر در منطقه شود. کمیته هواشناسی APCA TA-8 مجموعه‌ای از قوانین یا شرایط را برای مکان دستگاه‌های نمونه‌برداری هوا ارائه می‌دهد. از طرف دیگر، شواهد قاطع وجود دارد که نشان می‌دهد عدم توجه به هواشناسی در طراحی ایستگاه پایش و همچنین موقعیت مکانی اغلب مانع استفاده از داده‌ها برای اهداف مقایسه‌ای می‌شود. پس از استانداردسازی محل ایستگاه‌ها، مشکل مکان‌یابی ایستگاه‌های انفرادی همچنان باقی خواهد ماند و لزوماً شامل توصیه‌های هواشناسان خواهد بود. هواشناسان علاوه بر اینکه می‌توانند در مورد اهمیت عوامل مختلف در مکان قضاوت کنند، به سوابق اقلیمی مانند جهت باد و ثبات نیز دسترسی دارند (Hamburg, 1971). چندین معیار برای یافتن بهترین مکان برای نمونه‌برداری توسط حسگرهای همراه می‌تواند استفاده شود



دستگاه اندازه‌گیری غلظت آلاینده



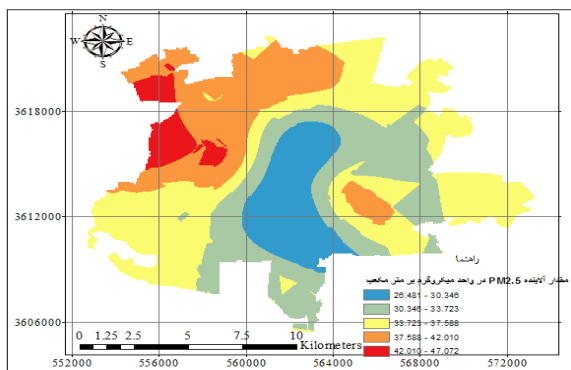
پایانه اتوبوس‌رانی بین شهری



خیابان هزار جریب

نگاره ۶: دستگاه اندازه‌گیری غلظت آلاینده $PM_{2.5}$

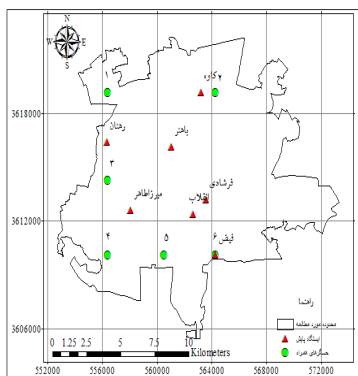
به همراه داشته باشد. در این مطالعه ترکیب ایستگاه‌های زمینی با شش، نه و چهارده حسگر همراه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که RMSE حاصل از لایه زمین آمار هفت ایستگاه ثابت پایش برابر با $1/802$ میکروگرم بر متر مکعب است. با ترکیب شش حسگر همراه تقریباً معادل با تعداد ایستگاه‌های پایش کیفیت هوا مقدار RMSE $1/0265$ (حدود دو برابر) کاهش یافت. میزان RMSE حاصل از ترکیب هفت ایستگاه ثابت پایش و چهارده حسگر همراه برابر با $0/591$ میکروگرم بر مترمکعب است.



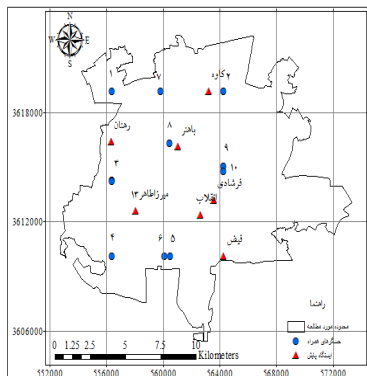
نگاره ۷: نقشه پیش‌بینی سطح غلظت $PM_{2.5}$ حاصل از ترکیب ایستگاه ثابت و حسگرهای همراه

بنابراین با دو برابر کردن تعداد ایستگاه‌ها میزان RMSE حدود سه برابر کاهش یافت. نتایج حاصل از افزودن حسگرهای همراه به عنوان مکمل ایستگاه‌های زمینی در جدول ۲ ارائه شده است. همان‌طور که نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد افزایش مشاهدات توسط حسگرهای همراه باعث

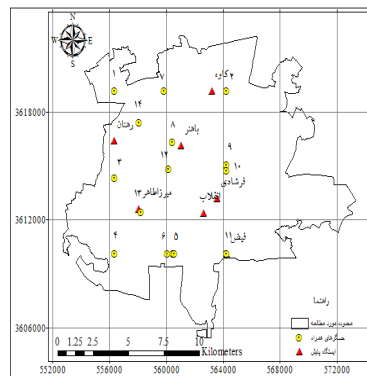
هوا با تعداد محدود ایستگاه‌های پایش کیفیت هوا به دست نمی‌آید؛ به‌منظور حل این مشکل منابع داده دیگری برای اطلاعات مکمل در فرآیند آلودگی هوا نیاز هست که استفاده شود. استفاده از حسگرهای همراه در محل‌هایی که مقدار آلودگی در آن‌ها نزدیک آستانه خطر باشد یا از آن فراتر رفته باشد؛ کمک شایانی به تخمین دقیق‌تر و پیش‌بینی غلظت ذرات معلق در منطقه ناهمگنی مانند شهر می‌کند. با استفاده از مدل LUR نقشه پیش‌بینی حاصل از ترکیب ایستگاه ثابت و حسگر همراه ایجاد شد که در نگاره ۷ نمایش داده شده است. محدوده‌هایی که با رنگ قرمز میزان غلظت ذرات معلق را بالا و مناطقی با رنگ آبی غلظت ذرات معلق را کم نشان می‌دهد. با استفاده از این روش می‌توان کیفیت هوا را در هر مکان و زمان با دقت مورد نظر پیش‌بینی کرد. به منظور بهبود دقت مورد نظر از حسگرهای همراه به عنوان مکمل اطلاعات ایستگاه‌های پایش استفاده شده است و مکان توزیع حسگرهای همراه و ترکیب آن با ایستگاه‌های ثابت زمینی در منطقه مورد مطالعه در نگاره ۸ نشان داده شده است. نگاره ۹ نمودار خطا و پیش‌بینی مقدار غلظت آلاینده در ترکیب ایستگاه ثابت با حسگرهای همراه را نشان می‌دهد. پرواضح است که نگاره ۹ نسبت به نگاره ۴ که تنها از ایستگاه‌های ثابت استفاده شده بود داده‌ها همگن و مترکم‌تر هستند؛ بنابراین افزایش تعداد مشاهدات به کمک حسگرهای همراه می‌تواند افزایش در پیش‌بینی غلظت ذرات معلق و کاهش خطا را



ج



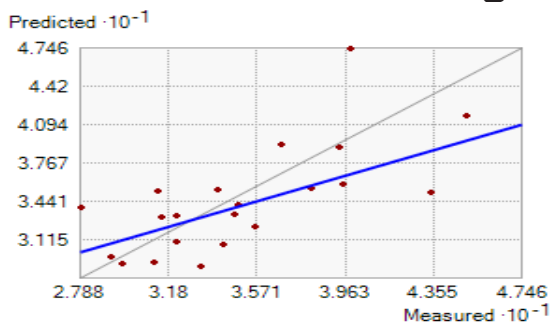
ب



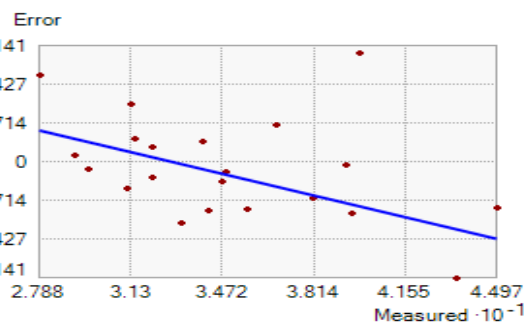
الف

نگاره ۸: توزیع حسگرهای همراه و ترکیب آن‌ها با ایستگاه‌های ثابت پایش در منطقه مورد مطالعه، الف- ترکیب چهارده

حسگر و ایستگاه، ب- ترکیب ده حسگر و ایستگاه، ج- ترکیب شش حسگر و ایستگاه



ب



الف

نگاره ۹: الف- نمودار خطا، ب- نمودار پیش‌بینی مقدار غلظت آلاینده در ترکیب ایستگاه ثابت با

حسگرهای همراه

افزایش دقت و کاهش RMSE و خطای استاندارد می‌شود. ارائه گردید، استفاده شده است (Joanes & Gill, 1998). رابطه ۲ شاخص چولگی استفاده شده در این پژوهش می‌باشد:

(۲)

$$Ske = \frac{\sqrt{\frac{n(n-1)}{n-2}} \times \frac{\frac{1}{n} \sum (x_i - \bar{x})^3}{\left(\frac{1}{n-1} \sum (x_i - \bar{x})^2\right)^{\frac{3}{2}}}$$

در رابطه ۲، n تعداد مشاهدات و \bar{x} میانگین مشاهدات است. یکی از روش‌های مقایسه یا برازش داده به یک توزیع، استفاده از رسم نمودار چندک-چندک^۳ یا Q-Q plot است که رسم مقادیر داده‌ها در مقابل مقادیر توزیع نرمال استاندارد که توزیع‌های تجمعی یکسانی دارند، ایجاد می‌شود. در این روش هرچه نقاط خط ترسیم شده را بیشتر پوشش دهند،

ثابت میزان RMSE ۰/۱۱۳ میکروگرم بر متر مکعب کاهش می‌یابد.

شاخص چولگی^۱ میزان عدم تقارن داده‌ها نسبت به توزیع نرمال استاندارد را نشان می‌دهد. از این شاخص برای مشخص کردن توزیع نرمال بودن یا نبودن داده‌ها استفاده می‌شود. مقدار این شاخص برای منحنی نرمال استاندارد برابر با صفر است. برای محاسبه شاخص چولگی فرمول‌های متعددی ارائه شده است. در این پژوهش برای محاسبه شاخص چولگی از فرمولی که در سال ۱۹۹۸ توسط گیل^۲

1- skewness

2- Gill

3- Quantile Quantile plot

جدول ۲: مقادیر حاصل از مشاهدات حسگرهای همراه در منطقه مورد مطالعه

تعداد حسگر همراه	میانگین مقدار مشاهده $\mu\text{gm}^3/\text{PM}_{2.5}$ توسط حسگرهای همراه	مقدار RMSE حاصل از حسگر همراه	مقدار RMSE حاصل از ترکیب حسگر با ایستگاه پایش	خطای استاندارد
۶	۳۵/۹۴۶	۱/۰۴۱	۰/۷۷۵	۵/۲۳۹
۹	۳۵/۸۶۱	۰۹/۷۲۲	۰/۷۷۵	۴/۱۶۶
۱۰	۳۶/۲۰۰	۰/۶۸۶	۰/۶۶۲	۴/۰۸۰
۱۴	۳۴/۲۲۲	۰/۵۱۶	۰/۵۹۱	۳/۹۹۹

جدول ۳ مقدار مربوط به شاخص چولگی، انحراف معیار، کمترین، بیشترین و میانگین مقدار غلظت آلاینده را نشان می دهد. مقدار شاخص چولگی ترکیب ایستگاه ها معادل ۰/۸۶۹ است در حالی که مقدار شاخص چولگی حاصل از ایستگاه ثابت معادل با ۱/۴۱ است. مقدار این شاخص برای منحنی نرمال استاندارد برابر با صفر می باشد؛ بنابراین هرچه مقدار این شاخص به سمت صفر میل کند به توزیع نرمال نزدیک تر است. به طور کلی نتایج نشان می دهد ترکیب ایستگاه ثابت و همراه پراکنش داده های غلظت آلاینده $\text{PM}_{2.5}$ را به سمت توزیع نرمال می برد. منظور از نرمال بودن توزیع داده ها این است که فراوانی داده ها تقریباً به صورت منحنی نرمال باشد از آزمون آماری t برای بررسی معنی دار بودن و یا نبودن بهبود نتایج استفاده گردید.

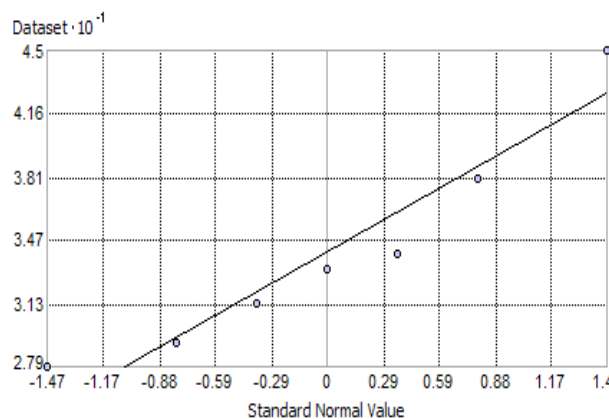
به طور کلی، از این آزمون برای قضاوت وجود یا عدم وجود خطای نامعینی بین دو سری داده استفاده می شود. نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است. رابطه (۳) آماره آزمون t و نحوه محاسبه درجه آزادی را نشان می دهد؛ در این فرمول n تعداد مشاهدات است.

$$t = \frac{\bar{r}}{\sqrt{\frac{1-r^2}{n-2}}} \quad (3)$$

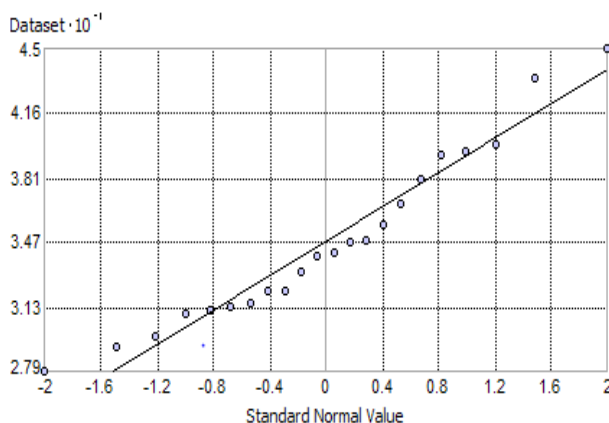
$$df = n-2$$

نتایج حاصل از آزمون آماری t معنادار بودن بهبود نتایج حاصل از ادغام ایستگاه های ثابت و همراه را نشان داد. به طوری که اگر تنها از تعداد محدود ایستگاه ثابت استفاده شود $t_{\text{Stat}} < t_{\text{Critical}}$ بنابراین بین دو سری داده خطای

توزیع داده ها به توزیع نرمال نزدیک تر می شوند. نگاره ۱۰ نمودار چندک-چندک ایستگاه ثابت و نگاره ۱۱ ترکیب ایستگاه ثابت و حسگرهای همراه را نشان می دهد.



نگاره ۱۰: نمودار چندک-چندک ایستگاه ثابت



نگاره ۱۱: نمودار چندک-چندک ترکیب ایستگاه ثابت و حسگرهای همراه

جدول ۳: مقایسه شاخص چولگی ایستگاه‌های ثابت و ترکیب ایستگاه‌های ثابت و همراه

تعداد نمونه‌ها	انحراف معیار	بیشترین مقدار غلظت آلاینده PM2.5	کمترین مقدار غلظت آلاینده PM2.5	میانگین غلظت آلاینده PM2.5	شاخص چولگی
۷	۵/۸۵۲	۴۴/۹۷	۲۷/۸۸۴	۳۴/۰۷۷	۱/۱۴۱
۲۱	۴/۴۴۳	۸۸/۴۹۱	۲۷/۸۸۴	۵۶/۴۵۶	۰/۸۶۹

جدول ۴: نتایج حاصل از آزمون آماری t حاصل از ایستگاه‌های ثابت و ترکیب حسگرهای ثابت با همراه

مقایسه آماری	درجه آزادی	انحراف معیار	t Stat	t Critical	
t Stat > t Critical	۵	۸/۷۱۴	۸/۸۵۵	۲/۱۷۸	استفاده از ایستگاه‌های ثابت پایش
t Stat < t Critical	۱۹	۴/۴۴۹	-۲/۰۸۲	۲/۰۹۳	استفاده از ترکیب ایستگاه ثابت و همراه

این آزمایش برای ترکیب ایستگاه‌های زمینی با شش، نه و چهارده حسگر همراه مورد بررسی قرار گرفت. با روش پیشنهادی می‌توان با توجه به عوامل مختلفی نظیر دقت مورد نیاز، آستانه خطر ناشی از آلودگی و هزینه برداشت اطلاعات و به صورت بهینه به تعداد ایستگاه‌های همراه اضافه نمود. روش پیشنهادی می‌تواند به صورت مؤثری در مدیریت و برنامه‌ریزی برای کاهش مخاطرات آلودگی هوا مورد استفاده قرار گیرد. روش پیشنهادی علاوه بر مزایای ذکر شده با کاستی‌ها از جمله محدودیت شارژ باتری، حمل آن توسط کاربر، معضل اتمام رسید کاغذی، زمان‌بر بودن جمع‌آوری داده مواجه است. در ادامه پیشنهادهایی برای ادامه کار آتی بیان می‌گردد.

در این مطالعه چارچوب ایجاد شده فقط برای آلاینده PM_{2.5} ارزیابی شد؛ درحالی‌که برای دیگر ذرات آلاینده هوا نیز قابل اجرا است همچنین می‌توان به ادغام چندین منبع اطلاعات برای تجزیه و تحلیل داده‌های حجیم شهری پرداخت. در نظر گرفتن متغیرهای محلی و ارزیابی وابستگی آلودگی هوا روی متغیرها و نتیجه آلودگی هوا در مکان یا برچسب زمانی موردنظر براساس تخمین غلظت آلاینده هوا پیشنهاد می‌شود.

نامعین وجود دارد. در حالی‌که اگر از ترکیب ایستگاه‌های ثابت و همراه استفاده شود t Stat > t Critical و خطای نامعینی بین دو سری داده وجود ندارد.

۵- نتیجه گیری

در این مطالعه یک چارچوب جدید برای ادغام ایستگاه‌های ثابت و همراه به منظور بهبود دقت تخمین غلظت آلاینده PM_{2.5} پیشنهاد گردید. به منظور ارزیابی کارایی چارچوب پیشنهادی، از غلظت ذرات معلق (PM_{2.5}) حاصل از روش مدل‌سازی رگرسیون کاربری اراضی در شهر اصفهان استفاده شد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که استفاده از چارچوب پیشنهادی دقت مدل LUR را افزایش می‌دهد و در مقایسه با RMSE حاصل از دقت مدل LUR برای پیش‌بینی آلاینده PM_{2.5} در سایر مطالعات انجام گرفته، افزایش دقت قابل ملاحظه‌ای دارد.

از آزمون آماری t برای بررسی معنی دار بودن و یا نبودن بهبود نتایج استفاده گردید. نتایج حاصل از آزمون آماری t نشان می‌دهد که اگر فقط از ایستگاه‌های ثابت پایش استفاده شود؛ نمایش الگوی واقعی و توزیع آن در سطح شهر با شکست مواجه خواهد شد. در واقع داده‌های حسگر همراه داده‌های اضافی ضروری برای پروفایل آلودگی هوا فراهم می‌کند. نتایج نشان داد که حتی با افزودن یک حسگر همراه به ایستگاه‌های ثابت میزان RMSE ۰/۱۱۳ میکروگرم بر متر مکعب کاهش می‌یابد.

7561-7578.

10- Hosseini, V., & Shahbazi, H. (2016). Urban air pollution in Iran. *Iranian Studies*, 49(6), 1029-1046.

11- Jafari, N., Nemati, S., Hajizadeh, Y., & Abdolhnejad, A. (2017). Spatial analysis and attributable mortality to outdoor air pollutants in Isfahan. *Journal of health research in community*, 2(4), 11-25.

12- Joanes, D., & Gill, C. (1998). Comparing measures of sample skewness and kurtosis. *Journal of the Royal Statistical Society: Series D (The Statistician)*, 47(1), 183-189.

13- Jonidi, A., Bahari, N., nowroozi, a. a., Bahmaei, J., Rezaee, R., Khavasi, M., . . . Gholami-Borujeni, F. Monitoring and Modeling of the Concentration and Quality Index of Dust Particles in the Air of Gorgan City in 1396.

14- Kersting, J., Geierhos, M., Jung, H., & Kim, T. (2017). Internet of Things Architecture for Handling Stream Air Pollution Data. Paper presented at the IoTBDS.

15- Khan, J., Kakosimos, K., Raaschou-Nielsen, O., Brandt, J., Jensen, S. S., Ellermann, T., & Ketzel, M. (2019). Development and performance evaluation of new AirGIS-A GIS based air pollution and human exposure modelling system. *Atmospheric environment*, 198, 102-121.

16- Leung, Y., Leung, K.-S., Wong, M.-H., Mak, T., Cheung, K.-Y., Lo, L.-Y., . . . Dong, Y.-L. (2018). An integrated web-based air pollution decision support system-a prototype. *International Journal of Geographical Information Science*, 32(9), 1787-1814.

17- Leung, Y., Zhou, Y., Lam, K.-Y., Fung, T., Cheung, K.-Y., Kim, T., & Jung, H. (2019). Integration of air pollution data collected by mobile sensors and ground-based stations to derive a spatiotemporal air pollution profile of a city. *International Journal of Geographical Information Science*, 33(11), 2218-2240.

18- Lim, C. C., Kim, H., Vilcassim, M. R., Thurston, G. D., Gordon, T., Chen, L.-C., . . . Kim, S.-Y. (2019). Mapping urban air quality using mobile sampling with low-cost sensors and machine learning in Seoul, South Korea. *Environment international*, 131, 105022.

19- Mahajan, S., Kumar, P., Pinto, J. A., Riccetti, A.,

منابع و مأخذ

1- Basagaña, X., Aguilera, I., Rivera, M., Agis, D., Foraster, M., Marrugat, J., . . . Künzli, N. (2013). 2- Measurement error in epidemiologic studies of air pollution based on land-use regression models. *American Journal of Epidemiology*, 178(8), 1342-1346.

3- Beelen, R., Voogt, M., Duyzer, J., Zandveld, P., & Hoek, G. (2010). Comparison of the performances of land use regression modelling and dispersion modelling in estimating small-scale variations in long-term air pollution concentrations in a Dutch urban area. *Atmospheric environment*, 44(36), 4614-4621.

4- Biondi, S. M., Catania, V., Monteleone, S., & Polito, C. (2017). Bus as a sensor: A mobile sensor nodes network for the air quality monitoring. Paper presented at the 2017 IEEE 13th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob).

5- Firculescu, A.-C., & Tudose, D. S. (2015). Low-cost air quality system for urban area monitoring. Paper presented at the 2015 20th International Conference on Control Systems and Computer Science.

6- Hamburg, F. C. (1971). Some Basic Consideration in the Design of an Air Pollution Monitoring System. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 21(10), 609-613.

7- Henderson, S. B., Beckerman, B., Jerrett, M., & Brauer, M. (2007). Application of land use regression to estimate long-term concentrations of traffic-related nitrogen oxides and fine particulate matter. *Environmental science & technology*, 41(7), 2422-2428.

8- Hennig, F., Sugiri, D., Tzivian, L., Fuks, K., Moebus, S., Jöckel, K.-H., . . . Memmesheimer, M. (2016). Comparison of land-use regression modeling with dispersion and chemistry transport modeling to assign air pollution concentrations within the Ruhr area. *Atmosphere*, 7(3), 48.

9- Hoek, G., Beelen, R., De Hoogh, K., Vienneau, D., Gulliver, J., Fischer, P., & Briggs, D. (2008). A review of land-use regression models to assess spatial variation of outdoor air pollution. *Atmospheric environment*, 42(33),

and temporal resolution. *Atmospheric environment*, 213, 285-295.

30- Willett, W., Aoki, P., Kumar, N., Subramanian, S., & Woodruff, A. (2010). Common sense community: scaffolding mobile sensing and analysis for novice users. Paper presented at the International Conference on Pervasive Computing.

31- Zarrabi, A., Mohammadi, J., & Abdollahi, A. (2010). Evaluation of mobile and stationary sources of Isfahan air pollution (In persian). *Geography*, 26, 151-164.

Schaaf, K., Camprodon, G., ... Forino, G. (2020). A citizen science approach for enhancing public understanding of air pollution. *Sustainable Cities and Society*, 52, 101800.

20- Maraziotis, E., Sarotis, L., Marazioti, C., & Marazioti, P. (2008). Statistical analysis of inhalable (PM10) and fine particles (PM2. 5) concentrations in urban region of Patras, Greece. *Global nest journal*, 10(2), 123-131.

21- Mihăiță, A. S., Dupont, L., Chery, O., Camargo, M., & Cai, C. (2019). Evaluating air quality by combining stationary, smart mobile pollution monitoring and data-driven modelling. *Journal of cleaner production*, 221, 398-418.

22- Morley, D. W., & Gulliver, J. (2018). A land use regression variable generation, modelling and prediction tool for air pollution exposure assessment. *Environmental Modelling & Software*, 105, 17-23.

23- Nourmoradi, H., Khaniabadi, Y. O., Goudarzi, G., Daryanoosh, S. M., Khoshgoftar, M., Omidi, F., & Armin, H. (2016). Air quality and health risks associated with exposure to particulate matter: a cross-sectional study in Khorramabad, Iran. *Health scope*, 5(2).

24- Prashant, K. (2005). Mass and number concentration of respirable suspended particulate matter (RSPM) on selected urban corridors of Delhi City. MSc. Thesis: Indian Institute of Technology Delhi.

25- Rashidi, M., Rameshat, M., & Gharib, H. (2012). Air Pollution and Death Due to Cardiovascular Diseases: A Case Study of Isfahan Province of Iran. *Air Pollution: A Comprehensive Perspective*, 175.

26- Srivastava, S., & Sinha, I. N. (2004). Classification of air pollution dispersion models: a critical review. Paper presented at the Proceedings of National Seminar on Environmental Engineering with special emphasis on Mining Environment.

27- Tashayo, B., & Alimohammadi, A. (2016). Modeling urban air pollution with optimized hierarchical fuzzy inference system. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(19), 19417-19431.

28- Weissert, L., Alberti, K., Miskell, G., Pattinson, W., Salmond, J., Henshaw, G., & Williams, D. E. (2019). Low-cost sensors and microscale land use regression: Data fusion to resolve air quality variations with high spatial