

جانمایی ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا در تهران بزرگ

خسرو اشرفی^{۱*}، سرمد قادر^۲، وحید اصفهانیان^۳، سعید متصدی^۴

۱-استادیار گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست دانشگاه تهران

۲-استادیار گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران

۳-دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

۴-استادیار دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی و خدمات درمانی شهید بهشتی

تاریخ دریافت: ۸۵/۸/۱۷ تاریخ پذیرش: ۸۶/۲/۲۹

چکیده

یکی از مهم‌ترین مسائل در سنجش آلاینده‌ها در سطح شهری مثل تهران، جانمایی ایستگاه‌های سنجش آلودگی است. هر نوع تحلیل علمی در زمینه آلودگی هوا و تصمیم‌گیری در مورد کاهش و کنترل آن به داده‌های آلودگی نیاز دارد. به همین منظور ایستگاه‌های سنجش آلاینده‌ها باید در مکان‌هایی قرار گیرند که نمایش درستی از وضعیت آلودگی را نشان دهند، بنابراین موقعیت مکانی ایستگاه‌ها از حساسیت بالایی برخوردار است. در این مقاله این مهم مدنظر می‌باشد و با استفاده از جمعیت تهران و تعداد ایستگاه‌های کشورهای پیشگام در امر پایش آلودگی هوا نسبت به جمعیت آنها، تعداد ایستگاه‌های لازم برای شهر تهران ۵۶ عدد پیشنهاد شده است. با توجه به اینکه هم‌اکنون در سطح شهر تهران ۷ ایستگاه سازمان حفاظت محیط زیست، ۴ ایستگاه شرکت کنترل کیفیت هوا و ۱ ایستگاه وزارت بهداشت (وزارت بهداشت چندین ایستگاه دارد که فقط یکی از آنها اکثر آلاینده‌های معیار را اندازه‌گیری می‌کند) در اختیار دارند، می‌بایست ۴۴ ایستگاه جدید دیگر جانمایی شوند. با عنایت به تعریف مقیاس‌های همسایگی (مناطق حومه‌ای) و چگال (مناطق پرتراffیک و شلوغ)، به ترتیب ۸ ایستگاه در مقیاس همسایگی و ۳۶ ایستگاه در مقیاس چگال در نظر گرفته شده‌اند. برای جانمایی ایستگاه‌ها در مقیاس چگال از تحلیل همبستگی داده‌های ایستگاه‌های موجود استفاده شده است. همبستگی داده‌های موجود نشان می‌دهد که می‌بایست در غرب و جنوب ایستگاه مرکزی کنونی ویلا (ایستگاه خیابان نجات‌الهی سازمان حفاظت محیط زیست)، تمرکز بیشتری از ایستگاه‌ها وجود داشته باشد. با استفاده از این مهم جانمایی‌ها در مقیاس چگال انجام شده است.

واژه‌ها کلیدی: جانمایی ایستگاه‌ها - مقیاس چگال - مقیاس همسایگی - مقیاس منطقه‌ای - مقیاس ملی - همبستگی داده‌ها

سر آغاز

۱. ساختارهای لازم را برای اجرای قوانین کنترل آلودگی فراهم کند.
۲. تأثیرات برنامه‌های کنترل و کاهش آلودگی را نشان دهد.
۳. داده‌های زمان واقعی را فراهم کند و روند این داده‌ها را ذخیره کند.
۴. روابط بین چشمه‌ها و چاه‌ها را تعیین کند.
همچنین برای پایش آلودگی در مناطقی که تحت تأثیر یک ناحیه آلوده (مناطق صنعتی و شهری با ترافیک بالا) قرار می‌گیرند، یک مدل ریاضی توسط Seinfeld (1972) برای جانمایی ایستگاه‌ها استفاده شده است. در این مطالعه با استفاده از معادلات حاکم بر آلاینده‌ها و یک روش بهینه‌سازی مکانی، جانمایی ایستگاه‌ها انجام شده است. همچنین در سال‌های اخیر در زمینه جانمایی ایستگاه‌های

جانمایی ایستگاه‌های سنجش آلودگی از اهمیت بسزایی برخوردار است، به طوری که با جانمایی درست ایستگاه‌های پایش آلاینده‌ها، وضعیت واقعی تری از آلودگی هوا قابل دستیابی است. بنابراین یکی از مهم‌ترین ملاحظات در اجرای یک سیستم کنترل آلودگی هوا انتخاب مکان‌های مناسب برای ایستگاه‌ها می‌باشد. تعدادی از ملاحظات اساسی برای طراحی یک سیستم پایش هوا توسط Hamburg (1970) ارائه شده است.
در این مطالعه تعدادی از مشخصه‌های مؤثر در انتخاب مکان ایستگاه بیان شده‌اند. که از آن جمله، یک سیستم پایش باید بتواند:

به هر حال هرچه تعداد ایستگاه‌ها بیشتر باشد اطلاعات جامع‌تری در اختیار محققان و تصمیم‌گیران محیط زیست قرار می‌دهد ولی معمولاً باید تعداد ایستگاه‌ها با هزینه‌های اقتصادی بهینه شود. تعیین تعداد ایستگاه‌ها با توجه به بهینه‌سازی اقتصادی خارج از بحث این مقاله است و نیاز به یک مطالعه جامع و جداگانه دارد. در این مطالعه برای تعیین تخمین اولیه در مورد تعداد ایستگاه‌ها از جمعیت تهران و همچنین تعداد ایستگاه‌ها در کشورهای پیشرفته استفاده شده‌است. در جدول شماره (۱) تعداد ایستگاه‌های مناطق مختلفی از دنیا در مقابل جمعیت آنها برای نمونه آمده‌است (Fisher et al., 1995).

جدول شماره (۱): ایستگاه‌های سنجش آلاینده‌ها در مناطقی از

دنیا (Fisher et al., 1995)

تعداد به هر میلیون نفر	جمعیت (میلیون)	تعداد	شبکه سنجش آلودگی
۱۴	۲۵۰	۳۵۳۵	ایالات متحده
۱۲	۱/۷	۲۰	استرالیا غربی
۹	۳/۲	۲۸	کوئین‌لند
۸	۶	۵۰	نیوساوت‌ولز
۷	۱/۸	۱۲	سیروس
۵	۶۰	۲۸۰	انگلیس
۵	۵	۲۵	ویکتوریا
۳-۴	۳/۵	۱۰-۱۵	نیوزلند
۳	۲۷	۷۸	کانادا

با توجه به جدول شماره (۱) مشاهده می‌شود که در این مناطق به‌طور متوسط ۷ ایستگاه (با گرد کردن تعداد به عدد صحیح) به ازای هر میلیون نفر وجود دارد. با در نظر گرفتن جمعیت تهران برابر با ۸ میلیون نفر، تعداد ایستگاه‌های لازم برای شهر تهران به‌دست می‌آید.

$$8 \times 7 = 56 \quad (۱)$$

البته تعیین تعداد دقیق ایستگاه‌ها به مطالعات وسیعی با توجه به موقعیت جغرافیایی و توپوگرافی، نوع آلاینده‌ها و تراکم جمعیتی تهران نیاز دارد. اجرای مدل‌های هواشناسی و آلودگی جفت‌شده به یکدیگر و همچنین چگالی جمعیتی تهران در همه مناطق می‌تواند کمک قابل توجهی در تعیین تعداد دقیق ایستگاه‌ها باشد. تا هنگامی که این مطالعه

آلودگی هوا مطالعات مختلفی انجام شده‌است (Lebret et al., 2000; Kukkonen et al., 2001; Goswami et al, 2002). در اغلب این تحقیقات جانمایی ایستگاه‌ها برای منظور خاص انجام گرفته و عمومیت ندارد. همچنین روش‌های معمولی در جانمایی ایستگاه‌ها قبلاً توسط محققین مختلفی ارائه شده‌است (Caselton and Zidek, 1984; Caselton et al., 1992; Silva and Quiroz, 1992; Trujillo-Ventura and Ellis, 1991; Haas, 2003). علاوه بر مسائل علمی در طراحی یک شبکه پایش آلودگی مسائل اقتصادی نیز یکی از مشخصه‌های بسیار مهم است. به‌طوری‌که Noonan (1998) بیان می‌کند که "هدف از طراحی شبکه، انتخاب اقتصادی‌ترین ترکیب از ایستگاه‌های پایش است که بتواند اهداف پایش را برآورده کند."

یکی از عوامل مهم دیگر در جانمایی ایستگاه‌ها مقیاس سنجش آلاینده‌هاست. این مقیاس‌ها توسط Fisher و همکاران (1995) به‌صورت مقیاس چگال، مقیاس همسایگی، مقیاس منطقه‌ای و مقیاس ملی دسته‌بندی شده‌اند.

در مطالعه حاضر در ابتدا با توجه به جمعیت تهران و با عنایت به تعداد ایستگاه‌های سنجش آلودگی در کشورهایی که در زمینه پایش آلودگی هوا پیشگام هستند (Fisher et al., 1995)، تعداد ایستگاه‌های لازم برای تهران تخمین زده شده و در قسمت دوم با توجه به استانداردهای جانمایی ایستگاه‌ها و همچنین همبستگی داده‌های موجود بین ایستگاه‌های فعلی شهر تهران، ایستگاه‌های تخمین زده‌شده جانمایی شدند. استفاده از همبستگی بین داده‌ها در مطالعات پایش آلودگی برای منظورهایی از قبیل پیش‌بینی یک آلاینده از مقادیر آلاینده دیگر یا برای تعیین کارایی یک سیستم پایش استفاده شده‌است (Elsom, 1977; Sajani et al., 2004) ولی از این تحلیل برای جانمایی ایستگاه‌های آلودگی هوا به‌صورت عمومی استفاده نشده‌است.

تعیین تعداد ایستگاه‌های لازم

برای تعیین تعداد ایستگاه‌های مورد نیاز شهر تهران باید عوامل مختلفی را در نظر گرفت. از مهم‌ترین عوامل در تعیین این تعداد، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. تراکم جمعیت و چگونگی توزیع آن؛
۲. مقیاس‌های مختلف سنجش آلاینده‌ها؛
۳. هزینه‌های اقتصادی محدودکننده .

به محدودیت‌های مکانی آن مقیاس توجه نمود. این مقیاس‌های مکانی نیز در جدول شماره (۳) داده شده‌اند. توجه شود که این مقیاس‌ها از ده‌ها متر تا صدها کیلومتر گسترده شده‌اند.

به دلیل اینکه در اینجا جانمایی ایستگاه‌ها در سطح شهر تهران مطرح است پس مقیاس‌های منطقه‌ای و ملی مدنظر نیستند و این دو مورد باید در هنگام طراحی شبکه منطقه‌ای و ملی مورد مطالعه قرار گیرند.

پس برای طراحی شبکه سنجش آلودگی شهر تهران دو مقیاس چگال و همسایگی در نظر گرفته می‌شوند.

جدول شماره (۲): مقیاس سنجش آلاینده‌ها

(Fisher et al., 1995)

مقیاس	PM ₁₀	SO ₂	CO	O ₃	N O ₂
چگال	+	-	+	+	+
همسایگی	+	+	+	+	+
منطقه‌ای	+	+	-	+	+
ملی	-	+	+	+	+

جانمایی اولیه با توجه به مقیاس‌های مکانی

با توجه به تعریف مقیاس‌های چگال و همسایگی، شهر تهران به دو ناحیه چگال و همسایگی تقسیم می‌شود. این تقسیم‌بندی با توجه به تعریف‌هایی که در جدول شماره (۳) داده شده، انجام می‌شود.

برای جانمایی ایستگاه‌ها در مقیاس همسایگی حومه شهر تهران در نظر گرفته می‌شود. از آنجا که مقیاس همسایگی از لحاظ مکانی از مرتبه چندین کیلومتر می‌باشد و همچنین طول و عرض تهران در حدود ۲۰-۳۰ km می‌باشد، پس در ابتدا لازم است در هر گوشه حومه شهر یک ایستگاه سنجش آلودگی قرار گرفته و برای رعایت مقیاس همسایگی در بین هر دو گوشه نیز یک ایستگاه قرار گیرد.

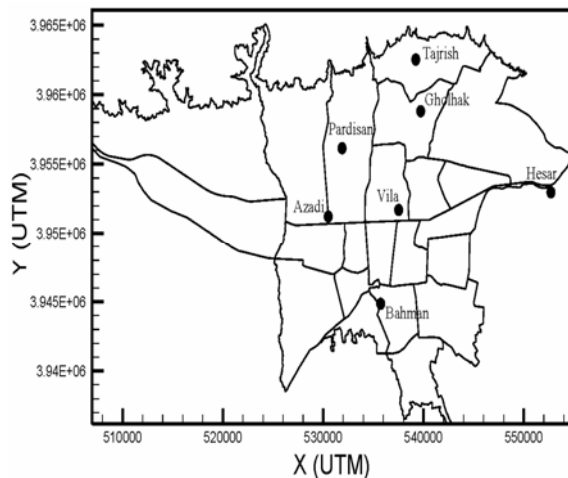
به این ترتیب ۸ ایستگاه از ۴۴ ایستگاه پیشنهادی در مقیاس همسایگی قرار می‌گیرند. در شکل شماره (۲) موقعیت تقریبی این ایستگاه‌ها در حومه شهر با دایره‌های توپر نشان داده شده‌اند.

موقعیت دقیق ایستگاه‌ها باید با در نظر گرفتن محدودیت‌های اقتصادی، کسب مجوزهای قانونی، استانداردهای نصب، شرایط اقلیمی و طبیعی منطقه و سایر موارد اجرایی تعیین شوند.

جامع انجام نشده باشد محاسبه سرانگشتی معادله (۱) برای این منظور تقریب بسیار خوبی است.

با توجه به این مطلب که سازمان حفاظت محیط زیست ۷ ایستگاه نصب‌شده (شکل شماره ۱)، شرکت کنترل کیفیت هوا ۴ ایستگاه و وزارت بهداشت ۱ ایستگاه (وزارت بهداشت چندین ایستگاه دارد که فقط یکی از آنها اکثر آلاینده‌های معیار را اندازه‌گیری می‌کند) در اختیار دارند، پس در مجموع باید ۴۴ ایستگاه دیگر در سطح شهر تهران نصب شود. با در نظر گرفتن ۴۴ ایستگاه برای شهر تهران باید مکان‌های لازم برای جانمایی این ایستگاه‌ها مشخص شود. در شکل شماره (۱) کاملاً مشخص است که هیچ ایستگاهی در مناطق غربی و جنوبی تهران وجود ندارد و اکثر ایستگاه‌های فعلی از مرکز تهران به سمت شمال تهران قرار دارند. به این مسأله در جانمایی ایستگاه‌ها توجه شده است.

شکل شماره (۱): ایستگاه‌های فعلی موجود سازمان حفاظت محیط زیست و محدوده شهر تهران



مقیاس‌های مختلف سنجش آلودگی

مقیاس‌های متفاوتی برای سنجش آلاینده‌ها وجود دارد. این مقیاس‌ها در جدول شماره (۲) آمده است.

در این جدول آلاینده‌هایی که باید در هر مقیاس اندازه‌گیری شوند با علامت "+" و آنهایی که نباید اندازه‌گیری شوند با علامت "-" مشخص شده‌اند. تعاریف مربوط به مقیاس‌های ارائه‌شده در جدول شماره (۲)، در جدول شماره (۳) آورده شده است.

در این جدول چهار مقیاس چگال، همسایگی، منطقه‌ای و ملی تعریف شده‌اند. می‌بایست با توجه به این تعاریف شبکه مورد نظر برای هر مقیاس را، طراحی نمود. هنگام طراحی شبکه‌ها در هر مقیاسی باید

جدول شماره (۳): تعریف مقیاس‌های مختلف مکانی برای سنجش آلاینده‌ها (Fisher et al., 1995)

نوع منطقه	مقیاس
مناطق تجاری: با منابع آلودگی بالا و چگالی جمعیتی زیاد. برای مثال مراکز شهرها، خیابان‌های با ترافیک سنگین و مناطق با مراکز صنعتی زیاد	چگال (دهه‌ها متر تا ۰/۵ کیلومتر)
مناطق صنعتی: با منابع نقطه‌ای و متغیر انتشار آلاینده‌ها و چگالی جمعیتی بالا. چنین مناطقی ممکن است شامل مناطق تجاری نیز باشند.	همسایگی (۰/۵ تا دهه‌ها کیلومتر)
مسکونی یا مناطق حومه شهر: با چگالی جمعیتی بالا ولی نه به اندازه مناطق تجاری، بدون منابع آلودگی صنعتی و حمل و نقلی	منطقه‌ای (دهه‌ها تا صد کیلومتر)
مناطق متمایز از لحاظ موقعیت جغرافیایی، هواشناختی و مشخصه‌های آلاینده‌ها	ملی
ایستگاه‌های لازم برای این مقیاس باید اطلاعاتی در مورد کل کیفیت هوای کشور ارائه دهند و به شبکه جهانی متصل باشند.	

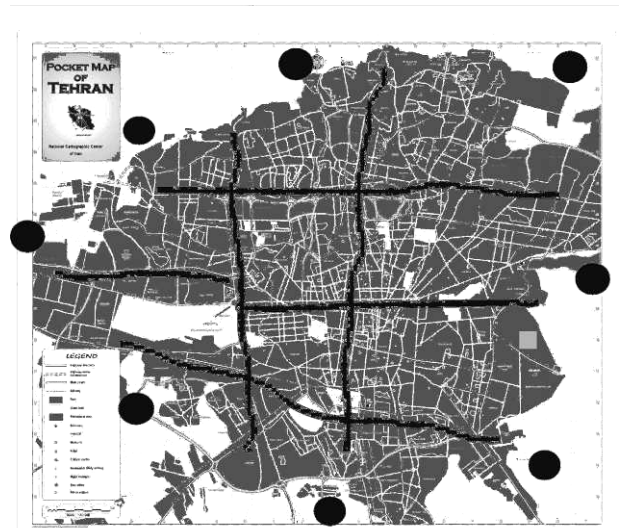
بنابراین مناطق مقیاس چگال اطراف بزرگراه‌ها، خیابان‌های پرتردد و مرکز شهر هستند.

این مناطق در شکل شماره (۲) با خطوط ضخیم نشان داده شده‌اند. ایستگاه‌هایی که برای مقیاس چگال باید نصب شوند ۳۶ عدد است. با توجه به شکل شماره (۲) که ۶ خط چگال اصلی را با طول تقریبی یکسان نشان می‌دهد، به هر خط چگال اصلی ۶ ایستگاه تعلق می‌گیرد. برای دستیابی به توزیع مکانی هر سری از این ۶ ایستگاه در اطراف خطوط چگال از داده‌های سال‌های گذشته ایستگاه‌های موجود استفاده شد. که در بخش بعدی با جزئیات بیشتری توضیح داده می‌شود.

جانمایی ایستگاه‌های مقیاس چگال با استفاده از همبستگی داده‌های ایستگاه‌های موجود

در اینجا هدف از تحلیل همبستگی داده‌های سال‌های گذشته ایستگاه‌های موجود، استفاده از آنها برای جانمایی ایستگاه‌های جدید در مقیاس چگال است.

برای این منظور همبستگی پیرسون (Wilks, 1995) یک آلاینده در یک ایستگاه با ایستگاه‌های دیگر به دست آمد. در همین راستا ایستگاه ویلا که تقریباً در وسط شهر تهران قرار دارد مبنایی



شکل شماره (۲): دایره‌های توپر نشان‌دهنده محل نصب ایستگاه‌های مقیاس همسایگی و خطوط ضخیم نشان‌دهنده مناطق مقیاس چگال می‌باشند.

برای نصب ایستگاه‌ها در مقیاس چگال عوامل متعددی را باید در نظر گرفت. برای این منظور ابتدا باید در سطح شهر مناطق با چگالی جمعیتی بالا و پرترافیک مشخص شوند. از آنجاکه خودروها در شهر تهران بیشترین سهم را در آلودگی دارند (حدود ۷۵ درصد)،

است و این وابستگی به صورت مستقیم است و ضریب همبستگی ۱- وابستگی کامل را به صورت معکوس نشان می‌دهد.

داده‌های مورد استفاده برای به دست آوردن ضرایب همبستگی دو آلاینده یکسان در دو ایستگاه متفاوت مربوط به سال‌های ۱۳۷۸ تا ۱۳۸۳ هستند که به صورت میانگین یک ساعته برای تمام روزهای سال ذخیره شده‌اند.

با استفاده از این داده‌ها و یک برنامه کامپیوتری نوشته شده، داده‌ها برای هر کدام از آلاینده‌ها در ایستگاه‌های مختلف خوانده شد و ضرایب همبستگی برای آلاینده‌های مختلف در ایستگاه‌های مورد نظر نسبت به ایستگاه ویلا به دست آمد این ضرایب همبستگی در جدول شماره (۴) آمده است.

برای مقایسه در نظر گرفته شده و همبستگی آلاینده‌ها در سایر ایستگاه‌ها نسبت به این ایستگاه سنجیده شد. این تحلیل برای ۷ آلاینده ذکر شده در جدول شماره (۴) انجام شده است. ضریب همبستگی پیرسون برای دو متغیر دلخواه x و y به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$r_{x,y} = \frac{\text{COV}(x, y)}{s_x \times s_y} = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{1/2} \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]^{1/2}} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، $r_{x,y}$ ضریب همبستگی برای دو متغیر x و y ، s_x و s_y به ترتیب مقادیر انحراف از معیار دو متغیر مورد نظر \bar{x} و \bar{y} میانگین دو متغیر ذکر شده‌اند.

مقدار ضریب همبستگی همیشه بین ۱- و ۱+ است. ضریب همبستگی ۱+ به این معنی است که متغیر x کاملاً به متغیر y وابسته

جدول شماره (۴): ضرایب همبستگی محاسبه شده به مرکزیت ایستگاه ویلا

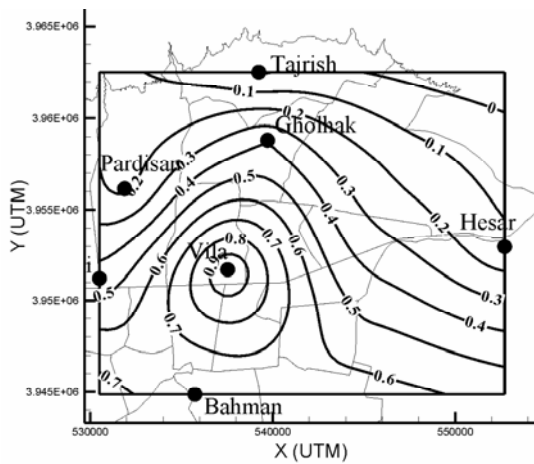
ایستگاه آلاینده	آزادی	بهمن	قلهک	سرخه حصار	تجربیش	پردیسان	ویلا
CO	۰/۳۰۶۳	۰/۴۲۶۴	۰/۴۰۶۳	۰/۳۱۹۴	۰/۲۵۴۲	۰/۶۲۶۲	۱
Dust	۰/۰۳۷۲	۰/۵۲۵۸	۰/۴۳۹۰	۰/۵۹۰۶	۰/۳۳۳۱	۰/۶۱۹۵	۱
NO	۰/۳۰۰۹	۰/۵۴۱۷	۰/۶۰۲۸	۰/۰۴۶۲	۰/۳۳۶۳	۰/۲۷۶۲	۱
NO ₂	۰/۴۳۷۲	۰/۶۰۵۵	۰/۳۹۴۴	۰/۱۱۳۵	-۰/۰۱۵۲	۰/۱۷۶۷	۱
NO _x	۰/۴۹۹۰	۰/۵۷۹۷	۰/۴۵۳۰	۰/۱۵۴۴	۰/۳۰۶۸	۰/۳۸۵۹	۱
O ₃	-۰/۱۶۴۸	-۰/۱۶۴۸	۰/۳۸۲۵	-۰/۰۰۵۳	-۰/۰۰۵۳	۰/۴۲۴۰	۱
SO ₂	۰/۳۶۴۰	۰/۱۸۸۱	-۰/۱۳۵۶	-۰/۰۲۱۲	۰/۲۰۷۹	-۰/۲۶۰۰	۱

که به عنوان ایستگاه مرکزی در نظر گرفته شده از مقدار عدد یک کاهش می‌یابند.

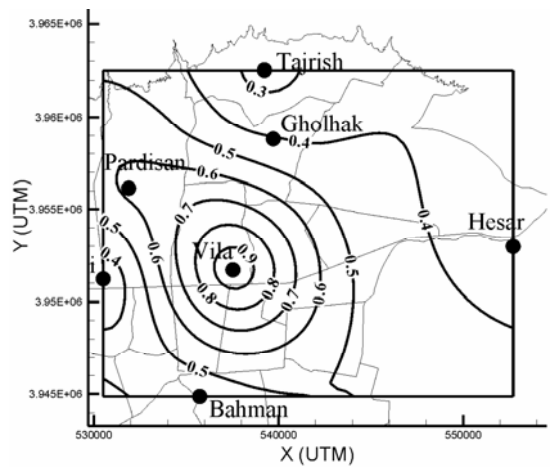
با استفاده از شکل‌های شماره (۳) تا (۹) و فاصله روی نقشه مقادیر کاهش همبستگی در چهار جهت اصلی محاسبه و میانگین آنها نسبت به فاصله به دست آمده است. همان طور که در جدول شماره (۵) مشاهده می‌شود بیشترین کاهش همبستگی نسبت به واحد فاصله در جهت غرب اتفاق می‌افتد. اگر بخواهیم از این تحلیل برای جانمایی ایستگاه‌ها استفاده کنیم در ابتدا باید خط‌های مقیاس چگال به خطوط شمالی - جنوبی و غربی - شرقی تقسیم شوند.

برای دستیابی به معیاری برای استفاده از ضرایب به دست آمده در جانمایی ایستگاه‌های جدید در ابتدا نمودار هم‌مقدارهای ضریب همبستگی برای هر کدام از آلاینده‌ها ترسیم و با استفاده از این نمودارها مقدار کاهش ضریب همبستگی بر واحد فاصله محاسبه شد تا بتوان از روی آن جانمایی ایستگاه‌های مورد نظر را انجام داد.

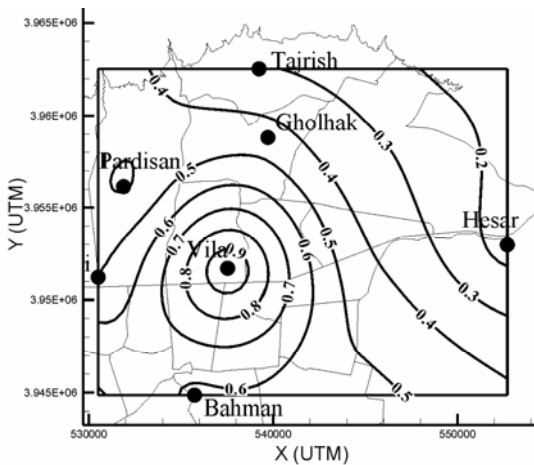
برای ترسیم هم‌مقدارهای ضرایب همبستگی، این مقادیر با استفاده از روش معکوس فاصله میان‌یابی و در نقشه‌های دوبعدی ترسیم گردیدند. این نمودارها در شکل‌های شماره (۳) تا (۹) نشان داده شده‌اند. همان طور که دیده می‌شود ضرایب همبستگی از ایستگاه ویلا



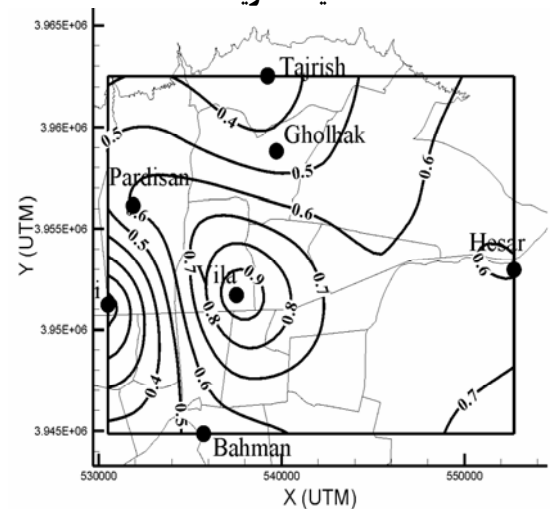
شکل شماره (۶): توزیع مکانی همبستگی آلاینده NO₂ با مرکزیت ایستگاه ویلا



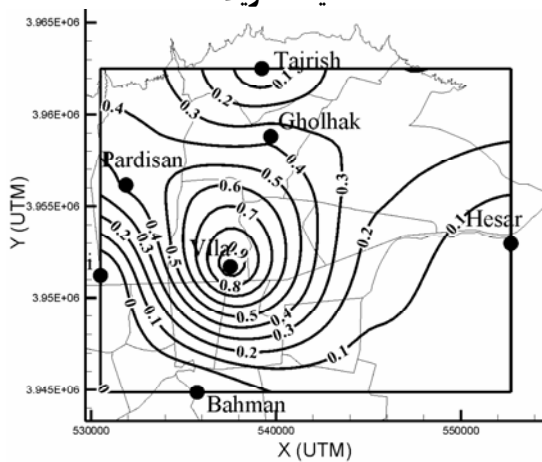
شکل شماره (۳): توزیع مکانی همبستگی آلاینده CO با مرکزیت ایستگاه ویلا



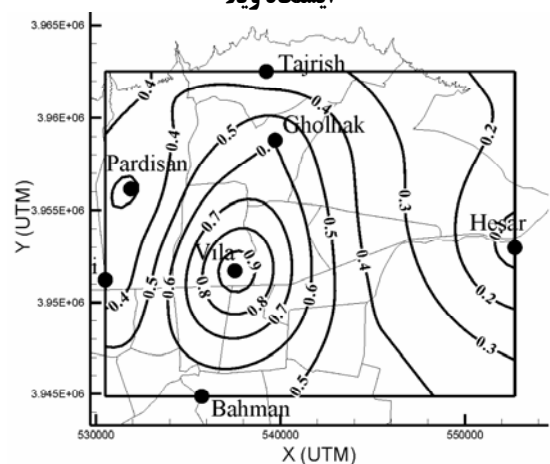
شکل شماره (۷): توزیع مکانی همبستگی آلاینده NO_x با مرکزیت ایستگاه ویلا



شکل شماره (۴): توزیع مکانی همبستگی آلاینده Dust با مرکزیت ایستگاه ویلا



شکل شماره (۸): توزیع مکانی همبستگی آلاینده O₃ با مرکزیت ایستگاه ویلا



شکل شماره (۵): توزیع مکانی همبستگی آلاینده NO با مرکزیت ایستگاه ویلا

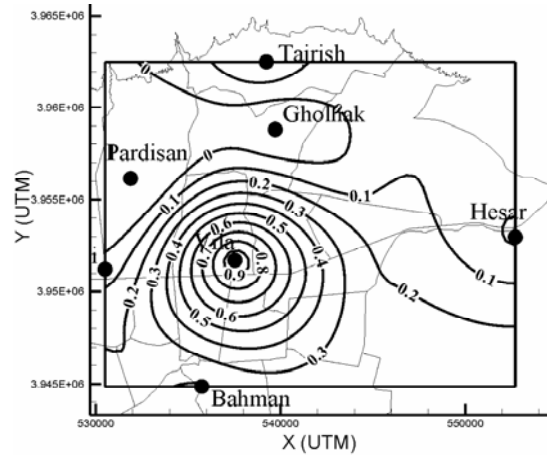
۲. در خط مقیاس چگال شمالی - جنوبی شمال غرب تهران به جنوب غرب اگر نسبت کاهش همبستگی را در نظر بگیریم باید همانند خط مقیاس چگال تجریش به راه‌آهن توزیع ایستگاه‌ها در قسمت جنوبی تراکم بیشتری داشته باشند. با توجه به این نکته که ایستگاه پردیسان فعلی در شمال این خط و ایستگاه آزادی در مرکز این خط قرار دارند، پس در ابتدا باید یک ایستگاه در جنوب این خط قرار گیرد تا تعادل حفظ شود. از ۵ ایستگاه باقی‌مانده برای اینکه توزیع در قسمت جنوبی بیشتر باشد باید ۳ ایستگاه در جنوب و دو ایستگاه در شمال قرار گیرند.

برای خط‌های غربی - شرقی نیز مشابه روش بالا عمل می‌شود. با توجه به شکل شماره (۲) چهار خط مقیاس چگال غربی - شرقی در تهران وجود دارد که جانمایی ایستگاه‌ها برای هر کدام از آنها به صورت زیر است:

۱. خط غربی - شرقی بزرگراه تهران - کرج: از آنجاکه هیچ ایستگاهی در دو منطقه غربی تهران وجود ندارد بنابراین میان‌یابی همبستگی به این دو منطقه نتایج را دچار اشکال می‌کند، به همین دلیل میان‌یابی به این دو منطقه انجام نشده است. با توجه به این نکته، باید جانمایی ایستگاه‌های خط چگال که در امتداد بزرگراه تهران - کرج قرار دارند به صورت یکنواخت صورت گیرد به طوری که کل منطقه غرب تهران را پوشش دهند.

۲. خط غربی - شرقی جنوب تهران: این خط به ایستگاه ویلا که به عنوان ایستگاه مرکزی انتخاب شده نزدیک است و می‌توان به نتایج کاهش ضرایب همبستگی اطمینان بیشتری نمود. در این خط با مقایسه کاهش همبستگی‌ها نسبت به ویلا مشخص است که کاهش به سمت غرب در یک فاصله کوتاه تقریباً برابر کاهش به سمت شرق در یک فاصله بیشتر است. بنابراین با توجه به این نکته باید در فواصل متفاوت تعداد ایستگاه‌های یکسانی نصب شوند. در نتیجه برای خط غربی - شرقی جنوب تهران در محدوده زیر ویلا به سمت شرق باید ۳ ایستگاه و به سمت غرب در فاصله کوتاه‌تر باید ۳ ایستگاه در نظر گرفته شوند.

۳. خط غربی - شرقی مرکزی (از آزادی تا شرق تهران): با در نظر گرفتن ایستگاه آزادی در غرب، ایستگاه ویلا در مرکز و ایستگاه سرخه‌حصار در شرق این خط، در حالت اولیه تعادل نسبی برقرار است. با اضافه کردن سه ایستگاه در شرق ویلا و سه ایستگاه در غرب آن مجدداً می‌توان توزیع مناسبی از ایستگاه‌ها را در این خط چگال به دست آورد. توجه شود که در فاصله کوتاه‌تری از آزادی تا ویلا تعداد



شکل شماره (۹): توزیع مکانی همبستگی آلاینده SO₂ با مرکزیت ایستگاه ویلا

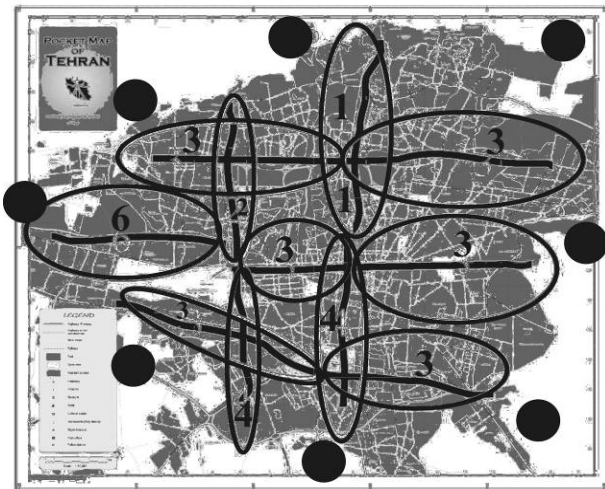
جدول شماره (۵): مقادیر کاهش همبستگی نسبت به ایستگاه

مرکزی ویلا

میانگین بر فاصله	میانگین	SO ₂	O ₃	NO _x	NO ₂	No	Dust	CO	فاصله (cm)	جهت
۰/۲۲۴	۰/۷۸۵۷	۱/۱	۰/۹	۰/۷	۰/۹	۰/۶	۰/۶	۰/۷	۳/۵	شمال
۰/۲۷۱	۰/۵۴۲۸	۰/۷	۱	۰/۴	۰/۳	۰/۵	۰/۴	۰/۵	۲	جنوب
۰/۳۶۴	۰/۷۲۸۶	۱	۱	۰/۵	۰/۵	۰/۶	۰/۹	۰/۶	۳	غرب
۰/۱۷۱	۰/۷۷۱۴	۱	۱	۰/۸	۰/۷	۰/۸	۰/۴	۰/۷	۴/۵	شرق

در این تقسیم‌بندی خط‌های مقیاس چگال شمالی - جنوبی، خط‌های تجریش به راه‌آهن و شمال غرب به جنوب غرب تهران می‌باشند. برای این دو خط مقیاس چگال، کاهش ضرایب همبستگی به سمت جنوب کمی بیشتر از این کاهش به سمت شمال است پس برای این دو مسیر می‌توان توزیع دو دسته از ۶ ایستگاه را به صورت زیر در نظر گرفت:

۱. از آنجاکه در خط مقیاس چگال تجریش به راه‌آهن (خیابان ولی‌عصر) دو ایستگاه قلهک و تجریش در قسمت شمال قرار دارند بنابراین در ابتدا باید دو ایستگاه از ۶ ایستگاه در قسمت جنوبی (جنوب مرکز پایین‌تر از میدان ولی‌عصر) قرار گیرند تا تعادل برقرار شود و بعد از این جاسازی از چهار ایستگاه باقی‌مانده برای اینکه بتوان توزیع متمرکزتری در قسمت جنوبی داشته باشیم باید دو ایستگاه دیگر در قسمت جنوبی، یک ایستگاه در قسمت مرکزی و یک ایستگاه در قسمت شمالی قرار گیرد.



شکل شماره (۱۰): چگونگی جانمایی ایستگاه‌های مورد نیاز در سطح شهر تهران در مقیاس چکال (اعداد نوشته شده در داخل بیضی‌ها) و ایستگاه‌های مقیاس همسایگی (دایره‌های توپر)

تحلیل همبستگی نشان می‌دهد که کاهش همبستگی‌ها نسبت به واحد فاصله در جهت غرب و جنوب بیشتر از جهات شمال و شرق است. بر همین مبنا جانمایی ایستگاه‌ها انجام شده است و در نتیجه ایستگاه‌ها باید با تراکم بیشتری در غرب و جنوب ایستگاه ویلا نصب شوند.

در کارهای آینده می‌توان برای بررسی دقیق‌تر و تعیین جاهای مختلف ایستگاه‌ها از کدهای عددی پیش‌بینی آلاینده‌ها که با کدهای پیش‌بینی عددی وضع هوا همبسته شده‌اند نیز استفاده کرد. این کدها می‌توانند غلظت آلاینده‌ها را با توجه به بادهای غالب در تهران در اختیار قرار دهند. بعد از این مرحله می‌توان جاهایی که غلظت‌های آلاینده‌ها از محدوده‌هایی فراتر می‌رود محل ایستگاه‌ها را به‌طور دقیق با توجه به اطلاعات هواشناسی و مباحث مطرح شده در این مقاله تعیین کرد. به هر حال مکان‌های به‌دست آمده در اینجا یک تخمین اولیه برای موقعیت ایستگاه‌ها است که بعد از نصب و به‌دست آوردن اطلاعات جدید باید مجدداً بهینه‌سازی شوند.

سپاسگزاری

بدین وسیله نویسندگان مقاله نهایت تشکر و قدردانی خود را از دانشگاه تهران، مرکز تحقیقات خودرو، سوخت و محیط زیست دانشکده فنی دانشگاه تهران و سازمان حفاظت محیط زیست ابراز می‌دارند، چراکه این تحقیق بدون حمایت ایشان قابل انجام نبود.

ایستگاه‌های برابر با فاصله بزرگتر از ویلا تا شرق در نظر گرفته شده است. زیرا این دو ناحیه همان‌طور که در جدول شماره (۵) آمده است کاهش همبستگی تقریباً یکسانی دارند.

۴. خط غربی - شرقی شمالی (بزرگراه همت): در این خط با توجه به دور شدن از مرکز مقایسه (ایستگاه ویلا) باید با توجه به شکل‌های شماره (۳) تا (۹) نتایج همبستگی را برای این خط جداگانه مورد ارزیابی قرار داد. با مشاهده این شکل‌ها دیده می‌شود که ضرایب همبستگی از مرکز این خط نسبت به فاصله به‌صورت تقریباً یکسانی کاهش می‌یابد و همچنین از آنجا که این خط دارای آلودگی یکنواختی می‌باشد پس می‌باید در این خط ۶ ایستگاه تقریباً با توزیع یکنواخت قرار گیرند.

در شکل شماره (۱۰) خلاصه جانمایی ایستگاه‌های مورد نیاز برای شهر تهران آمده است. در شکل دایره‌های توپر در حومه تهران محل تقریبی ایستگاه‌های مقیاس همسایگی و همچنین خطوط پر نشان‌دهنده خطوط مقیاس چکال هستند.

تعداد ایستگاه‌های مقیاس چکال با تقسیم‌بندی‌های ذکر شده در قبل در داخل بیضی‌ها در کنار خطوط مقیاس چکال نشان داده شده‌اند.

در ضمن برای جلوگیری از شلوغی شکل ایستگاه‌های فعلی ترسیم نشده‌اند و در هنگام محاسبه تعداد ایستگاه‌ها باید مدنظر قرار گیرند.

همان‌طور که قبلاً برای ایستگاه‌های مقیاس همسایگی ذکر شد در اینجا نیز یادآوری می‌شود که تعیین محل دقیق ایستگاه‌ها باید با توجه به استانداردهای نصب (از قبیل فاصله از خیابان‌ها، فاصله از درختان و غیره)، مجوزهای قانونی، هزینه‌های اقتصادی و غیره انجام شود. در این مقاله در ابتدا با استفاده از جمعیت تهران و تعداد ایستگاه‌های کشورهای پیشگام در امر پایش آلودگی هوا، تعداد ایستگاه‌های مورد نیاز برای شهر تهران تخمین زده شد.

در ادامه با استفاده از تقسیم‌بندی سنجش آلاینده‌ها به مقیاس‌های چکال، همسایگی، منطقه‌ای و ملی، شهر تهران در دو حیطه مقیاس چکال و همسایگی تقسیم‌بندی شد.

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

ایستگاه‌های لازم در مقیاس همسایگی با استفاده از تعریف این مقیاس جانمایی شدند و در نهایت جانمایی ایستگاه‌های مقیاس چکال با استفاده از تحلیل همبستگی داده‌های ایستگاه‌های موجود انجام گرفت.

منابع مورد استفاده

- Caselton, W.F., Zidek, J.V. 1984. Optimal network monitoring designs. *Statistics and Probability Letters* 2: 223–227.
- Caselton, W.F., Kan, L., Zidek, J.V. 1992. Quality data networks that minimize entropy. In: Guttorp, P., Walden, A. (Eds.), *Statistics in Environmental and Earth Sciences*. Griffin, London.
- Elosm, D. M. 1978. Spatial correlation analysis of air pollution data in an urban area. *Atmospheric Environment* 12: 1103-1107.
- Fisher, G. W., Graham, B. W., Bell M. J. 1995. Design of a national ambient air quality monitoring network for NewZeland. Prepared for the ministry of Environment.
- Goswami, E., et al. 2002. Spatial characteristics of fine particulate matter: identifying representative monitoring locations in Seattle. Washington. *Journal of Air & Waste Management Association* 52: 324–333.
- Hamburg, F. C. 1970. Some basic considerations in the design of an air pollution monitoring system. *Air Pollut. Control Assoc.* 63rd Annual Meeting APCA, St. Louis, 70-100.
- Haas, T.C. 1992. Redesigning continental-scale monitoring networks. *Atmospheric Environment* 26A (18): 3323–3333.
- Kukkonen, J., et al. 2001. A semi-empirical model for urban PM10 concentrations, and its evaluation against data from an urban measurement network. *Atmospheric Environment* 35:4433–4442.
- Lebret, E., et al. 2000. Small area variations in ambient NO2 concentrations in four European areas. *Atmospheric Environment* 34:177–185.
- Noonan, M. 1998. Monitoring sites in NewZeland and analysis of site classification, *Air Quality Technical Report No 8*. NewZeland Ministry of Environment.

Sajani, S. Z., Scotto, F., Lauriola, P. 2004. Urban air pollution monitoring and correlation properties between fixed-site stations. *Air & Waste Management Association* 54: 1-6.

Seinfeld, J. H. 1972. Optimal location of pollutant monitoring stations in an airshed. *Atmospheric Environment* 6: 847-858.

Silva, C., Quiroz, A. 2003. Optimization of the atmospheric pollution monitoring network at Santiago de Chile. *Atmospheric Environment* 37: 2337–2345.

Trujillo-Ventura, A., Ellis, J.H. 1991. Multiobjective air pollution monitoring network design. *Atmospheric Environment* 25A (2): 469–479.

Wilks, S. D. 1995. *Statistical methods in the atmospheric science, an introduction*. Academic Press, pp.467