

مدل سازی فضایی - زمانی اکسیدهای نیتروژن شهر تهران در سال ۲۰۱۴ میلادی

عظیمه مغزی نجف آبادی^۱، اکبر حسن زاده^۲، سید محمود تقوی شهری^۳، یعقوب حاجیزاده^۴، بهزاد مهکی^۵

^۱ کارشناس ارشد آمار زیستی، کمیته تحقیقات دانشجویی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان، اصفهان، ایران

^۲ مربی گروه آمار زیستی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان، اصفهان، ایران

^۳ دکترای آمار زیستی، گروه آمار، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران؛ دکترای آمار زیستی، مرکز تحقیقات سلامت سالمندان، دانشگاه علوم پزشکی سبزوار، سبزوار، ایران

^۴ دانشیار گروه بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان، اصفهان، ایران

^۵ دانشیار گروه آمار زیستی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران؛ دانشیار گروه آمار زیستی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان، اصفهان، ایران

نویسنده رابط: بهزاد مهکی، تلفن: ۰۹۱۲۸۰۷۷۹۶۰، پست الکترونیک: Behzad.mahaki@kums.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۶/۶/۴؛ پذیرش: ۹۶/۱۲/۱۲

مقدمه و اهداف: آلودگی هوا سالانه منجر به مرگ زودرس قریب به هفت میلیون نفر در سراسر دنیا می‌شود. از جمله آلاینده‌های اصلی هوا اکسیدهای نیتروژن است. با وجود مطالعه‌های خارجی گسترده در زمینه ارزیابی مواجهه ساکنان شهرها با آلاینده‌های هوا، اما مطالعه‌های ایرانی محدود به استفاده از تحلیل‌های ابتدایی هستند. بنابراین در این پژوهش الگوی پراکندگی این آلاینده‌ها در شهر تهران به‌صورت روزانه در سال ۲۰۱۴ میلادی با استفاده از مدل‌سازی فضایی-زمانی بررسی شده است.

روش کار: مقادیر غلظت اکسیدهای نیتروژن از ۲۱ ایستگاه سنجش آلاینده در تهران اخذ شد که برای هر آلاینده در هر ایستگاه مجموعه داده شامل ۸۷۶۰ رکورد بود. متغیرهای پیشگوی وضع تعطیلات و ارتفاع زمین در مدل‌سازی فضایی-زمانی استفاده شد. نرم‌افزار D-STEM برای تحلیل داده‌ها و رسم نقشه‌ها به کار گرفته شد.

یافته‌ها: میزان مونواکسید نیتروژن در روزهای تعطیل و نیز با افزایش ارتفاع به‌طور معنی‌داری (به ترتیب با ضرایب ۰/۰۷۰- و ۰/۱۶۹-) کاهش یافته است. همچنین میزان دی‌اکسید نیتروژن نیز در روزهای تعطیل به‌طور معنی‌داری کاهش یافته (با ضریب ۰/۶۳۰-)، اما با افزایش ارتفاع به‌طور معنی‌داری افزایش (با ضریب ۰/۱۵۵) داشته است ($P < 0.001$).

نتیجه‌گیری: در این مطالعه برای نخستین بار در ایران ارزیابی مواجهه ساکنان شهر تهران با آلاینده‌های NO و NO₂ به‌صورت فضایی-زمانی انجام شده است. خروجی این مطالعه که نقشه‌های برآورد غلظت آلاینده‌های اکسیدهای نیتروژن به‌صورت روزانه است می‌تواند در مطالعه‌های اپیدمیولوژی برای بررسی دقیق‌تر اثرات آلاینده‌های هوا بر سلامت شهروندان تهرانی استفاده شود.

واژگان کلیدی: مدل‌سازی فضایی-زمانی، آلاینده‌های هوا، اکسیدهای نیتروژن، تهران

مقدمه

سالخورده) ایجاد می‌کند (۳،۴). در ماه‌های گرم سال، تهران متأثر از سامانه‌های کم‌فشار حرارتی کوپر مرکزی واقع شده و دارای تابستانی گرم و خشک است. باد غالب، غربی-شرقی بوده و زمانی که این بادهای شدت بگیرند، به خارج شدن آلودگی‌ها از تهران کمک می‌کنند (۵،۶).

در سال‌های اخیر تلاش‌های بسیاری برای کاهش آلودگی هوای تهران صورت گرفته که از آن جمله می‌توان به گسترش سامانه ناوگان حمل‌ونقل عمومی به‌ویژه مترو، بالا بردن استانداردهای خودرو و سوخت، نظارت بر میزان گسترش واحدهای صنعتی در حومه‌ی شهر و ... اشاره کرد (۷). با وجود تمامی اقدامات صورت گرفته، به دلیل جمعیت حدود ۹ میلیون نفری این شهر (۸)،

با پیشرفت بشر در زمینه فن‌آوری و زندگی صنعتی و مدرن امروزی، آلودگی هوا ناشی از سوخت‌های فسیلی یکی از معضلات جوامع بزرگ شده است که در اغلب کشورهای در حال توسعه دیده می‌شود. بر اساس آمارهای موجود، شانگهای، پکن، دهلی، تهران و بمبئی دارای بالاترین رشد غلظت آلاینده دی‌اکسیدنیتروژن در آسیا هستند (۱)

شهر تهران با مساحتی در حدود ۶۱۳ کیلومتر مربع در جنوب رشته کوه البرز قرار گرفته (۲-۴) و دارای زمستان سرد و خشک و عموماً آلوده است. آلودگی به همراه پدیده وارونگی هوا، مشکلات بسیاری برای ساکنان شهر و به ویژه گروه‌های حساس جامعه (کودکان، کسانی که بیماری‌های قلبی و تنفسی دارند، افراد

تجزیه و تحلیل، روی آلاینده‌های هوا صورت گرفته است از آن جمله می‌توان به استفاده از مدل‌های LUR (۲۱، ۲۰، ۸)، مدل سری‌های زمانی (۲۸-۲۶)، مدل‌های فضایی-زمانی (۳۲-۲۹) و سایر روش‌های پیشرفته تجزیه و تحلیل اشاره کرد.

با توجه به وسعت پژوهش‌های خارجی در زمینه‌ی آلودگی هوا و استفاده آن‌ها از مدل‌های پیشرفته‌ی آماری، و محدود بودن مطالعه‌های داخلی به استفاده از مدل‌ها و تحلیل‌های ابتدایی و با نظر گرفتن هزینه‌های جانی و مالی تحمیل شده ناشی از آلاینده‌های هوا بر سلامت جامعه (۳۳)، این پژوهش به بررسی الگوی پراکندگی روزانه آلاینده‌های NO₂ و NO در فاصله زمانی زمستان ۹۲ تا آخر پاییز ۹۳ (سال ۲۰۱۴ میلادی) با استفاده از مدل‌سازی فضایی- زمانی در شهر تهران پرداخته است.

روش کار

نوع این مطالعه ارزیابی مواجهه است که در آن برای کوهورت ساکنان شهر تهران میزان مواجهه با آلاینده‌های اکسیدهای نیتروژن (NO و NO₂) در سال ۲۰۱۴ میلادی به صورت روزانه و برای تمام نقاط شهر به وسیله‌ی مدل‌سازی آماری فضایی- زمانی برآورد شده است. در تهران ایستگاه‌های متعددی برای سنجش آلودگی هوا وجود دارد که در فواصل نسبتاً زیاد از یکدیگر واقع شده‌اند. تعدادی از این ایستگاه‌ها زیر نظارت شهرداری تهران و تعدادی دیگر زیر نظارت سازمان حفاظت محیط زیست اداره می‌شوند. اطلاعات این آلاینده‌ها به صورت ساعتی با استفاده از روش نورتایی شیمیایی^۲ اندازه‌گیری و ثبت می‌شود.

در این مطالعه به‌جای انجام نمونه‌گیری، مقادیر غلظت اکسیدهای نیتروژن از ۴۱ ایستگاه ثابت سنجش آلاینده‌های شهر تهران برای تمام ساعت‌های سال ۲۰۱۴ میلادی اخذ شد. با توجه به وجود داده‌های گمشده و البته قابلیت‌های مقادیر گمشده هم‌زمان با مدل‌سازی در نرم‌افزار D-STEM و روش کار مطالعات مشابه خارجی (۳۶-۳۴) فقط ایستگاه‌های سنجشی وارد مطالعه شدند که درصد داده گم‌شده در آن‌ها کم‌تر از ۴۷ درصد بود.

برای هر ایستگاه مجموعه داده به صورت ساعتی شامل ۸۷۶۰ رکورد بود که با توجه به حجم بسیار زیاد داده‌ها و پیچیدگی برآزش و رسم نقشه‌ها در بازه‌های زمانی، از میانگین روزانه آلاینده (۲۴ ساعت شبانه‌روز) برای مدل‌سازی و رسم نقشه‌های مدل استفاده شد. متغیرهای پیشگو مورد استفاده وضع تعطیلات و

کمبود سامانه‌های حمل‌ونقل شهری پاک و مؤثر و عدم توجه کافی به رعایت استانداردها در تولید خودرو و سوخت (۷) و نیز عوامل طبیعی، موقعیت جغرافیایی و وجود ارتفاعات شرقی و کوه‌های شمالی، امروزه آلودگی بیش از پیش هوای تهران دیده می‌شود (۶).

بر اساس گزارش‌های رسمی شهروندان تهرانی یک سوم سال را با آلودگی فراتر از حد استاندارد می‌گذرانند (۹). از جمله این آلودگی‌ها می‌توان به مونواکسید نیتروژن (NO) و دی اکسید نیتروژن (NO₂) اشاره کرد. مونواکسید نیتروژن در اثر احتراق سوخت‌های فسیلی در درجه حرارت بالا به وجود می‌آید (۱۰). قسمت اصلی دی اکسید نیتروژن در اثر اکسیداسیون فتوشیمیایی مونواکسید نیتروژن حاصل می‌شود که در غلظت‌های زیاد به صورت غبار قهوه‌ای رنگ سمی ظاهر می‌شود (۱۱) که شدت جذب اشعه ماوراء بنفش خورشید را افزایش داده و باعث تشدید واکنش‌های فتوشیمیایی و به وجود آمدن مه‌دود^۱ در هوای آلوده می‌شود (۱۲). این گاز باعث ایجاد مشکلات حادی در عملکرد ریه‌ها می‌شود (۱۵-۱۳). از سوی دیگر غلظت‌های بالای این گازها، نقش مهمی در تغییرات آب و هوایی دارد. قابل حل در آب بوده و باران اسیدی ایجاد می‌کند که باعث آسیب به پوشش گیاهی و زندگی آبزیان می‌شود (۱۶). اکسیدهای نیتروژن، همچنین در ایجاد ازن و ذرات معلق در جو دخالت دارند (۱۲). عمر اکسیدهای نیتروژن در هوا کم است و چند روزی بیش نخواهد بود (۱۷).

در زمینه‌ی پژوهش‌های علمی داخلی می‌توان به مطالعه‌ای که با استفاده از روش کریجینگ ساده، به بررسی دو آلاینده CO و NO₂ در شهر تهران پرداخته است، اشاره نمود (۱۸). همچنین در مطالعه‌ای دیگر، تأثیر عوامل جغرافیایی از جمله بادهای غالب و ارتفاعات اطراف شهر تهران در افزایش و تثبیت آلودگی‌های هوای تهران و پدیده وارونگی هوا مورد بررسی قرار گرفته است (۱۹). پژوهشگران در مطالعه‌های متعدد دیگر نیز با استفاده از مدل LUR به مدل‌سازی و بررسی فضایی پراکندگی آلاینده‌های مختلف پرداختند (۲۱، ۲۰، ۸). در این بین، مدل‌های فضایی- زمانی، کمتر در حوزه آلودگی‌های هوا مورد استفاده قرار گرفته‌اند (به دلیل پیچیدگی این مدل‌ها) و بیشتر در حوزه بیماری‌ها مورد استفاده بوده‌اند (۲۵-۲۲).

در دنیا، پژوهش‌های متعددی با استفاده از روش‌های گوناگون

^۲ Chemiluminescence

^۱ Smog

یافته‌ها

شکل شماره ۱ مکان هر ایستگاه را روی نقشه شهر تهران نشان می‌دهد و جدول شماره ۱ میانگین و انحراف معیار آلاینده NO₂ را به تفکیک ایستگاه بیان می‌کند که بیش‌ترین و کم‌ترین میانگین غلظت آلاینده NO₂ به ترتیب مربوط به ایستگاه شهرداری منطقه ۱۵ با مقدار ۱۳۶/۲۶ و پارک قائم با مقدار ۳۰/۷۳ است. برای آلاینده NO₂ بیش‌ترین و کم‌ترین میانگین غلظت آلاینده، به ترتیب مربوط به ایستگاه ستاد بحران با مقدار ۷۲/۱۲ و ایستگاه محلاتی با مقدار ۲۲/۱۴ است.

جدول شماره ۲ خلاصه‌ای از یافته‌های مدل‌سازی آلاینده‌ها را نشان می‌دهند که علامت ضریب‌های α ، برای متغیر مونواکسید نیتروژن بیان‌گر این مطلب است که با افزایش ارتفاع یا قرار گرفتن در روزهای تعطیل، از میزان آلودگی مونواکسید نیتروژن کاسته می‌شود. مقدار p-value برای هر دو متغیر پیشگو، فرض برابری با صفر اثرات این متغیرها را رد می‌کند و به عبارت ساده‌تر افزایش ارتفاع و قرارگرفتن در روز تعطیل، اثرات معنی‌داری در کاهش میزان غلظت آلاینده یاد شده دارد. نتیجه فاصله اطمینان نیز این مطلب را تأیید می‌نماید.

برای متغیر دی‌اکسید نیتروژن نیز هم‌چنان با قرارگرفتن در روز تعطیل از غلظت آلاینده، به‌طور معنی‌داری کاسته می‌شود که این مطلب در ضریب منفی α و مقدار معنی‌دار p-value مربوطه مشخص است و فاصله اطمینان به‌دست آمده نیز آن را تأیید می‌کند. در حالی که برای متغیر ارتفاع با افزایش آن، میزان آلاینده نیز افزایش می‌یابد که این مطلب در ضریب مثبت α منعکس شده و فاصله اطمینان به‌دست‌آمده نیز تأییدی بر این مطلب است.

شکل a2 و b2 به ترتیب نقشه برآورد میانگین و خطای معیار مقادیر غلظت آلاینده NO₂ را برای سال ۲۰۱۴ میلادی نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل‌های یاد شده مشخص است برای نقاط مرکزی، جنوب، جنوب غربی و غرب تهران که ارتفاع کم‌تر است، غلظت آلاینده NO₂ بیش‌تر بوده و با افزایش ارتفاع از میزان غلظت این آلاینده کاسته می‌شود. در مورد آلاینده NO₂، نقشه برآورد میانگین و خطای معیار مقادیر غلظت آلاینده در شکل a3 و b3 آمده است که در مورد این آلاینده، با حرکت به سمت نقاط پراارتفاع شمال تهران، بر میزان غلظت آلاینده افزوده می‌شود.

ارتفاع (متر از سطح دریا) بود که به ترتیب متغیرهایی صرفاً زمانی و صرفاً فضایی هستند.

فرم کلی مدل آماری مورد استفاده در این پژوهش به‌صورت زیر است:

$$y(c, t) = \mu(c, t) + \omega(c, t) + \varepsilon(c, t)$$

که $y(c, t)$ مقدار مشاهده‌شده در مکان c و زمان t است و $\mu(c, t)$ جمله اثر ثابت و $\omega(c, t)$ جمله اثر تصادفی و $\varepsilon(c, t)$ خطای اندازه‌گیری که از توزیع نرمال با میانگین صفر و واریانس σ^2 است که به‌صورت مستقل در طول زمان و مکان فرض شده است. به‌طور خاص مدل‌های زیر برای متغیر پاسخ $y_{NO_2}(c, t)$ و $y_{NO}(c, t)$ مورد استفاده قرار گرفته‌اند:

$$y_{NO}(c, t) = \alpha_1 \times X_h(t) + \alpha_2 \times X_1(c) + \gamma \times \omega(c, t) \times X_1(c) + z(t) + \varepsilon(c, t)$$

$$y_{NO_2}(c, t) = \alpha_1 \times X_h(t) + \alpha_2 \times X_1(c) + \gamma \times \omega(c, t) \times X_1(c) + z(t) + \varepsilon(c, t)$$

که $y_{NO_2}(c, t)$ و $y_{NO}(c, t)$ برآورد غلظت آلاینده‌های مونواکسید نیتروژن و دی‌اکسید نیتروژن در مکان c و زمان t را نشان می‌دهد. $X_h(t)$ متغیر پیشگوی صرفاً زمانی تعطیلات و $X_1(c)$ متغیر پیشگوی صرفاً فضایی ارتفاع است. $Z(t)$ متغیر پنهان اثرات زمانی آلاینده است که به عنوان یک پارامتر توسط مدل برآورد می‌شود. پارامترهای α_1 و α_2 اثرات ثابت متغیرهای تعطیلات و ارتفاع را نشان می‌دهد (جمله $\mu(c, t)$ در مدل عمومی). اثرات تصادفی متغیر ارتفاع توسط پارامترهای γ و $\omega(c, t)$ نشان داده می‌شود که $\omega(c, t)$ تغییرات مکانی و زمانی اثرات ارتفاع را با در نظر گرفتن واریانس واحد مدل می‌کند و γ پارامتر تغییر مقیاس است که برای آزمون فرضیه وجود اثرات تصادفی نیز کاربرد دارد. اثرات تصادفی $\omega(c, t)$ ، یک فرایند گوسی مستقل در طول زمان اما خود همبسته در طول مکان با تابع خود همبستگی‌نمایی فرض شده است و متغیر پنهان $Z(t)$ ، فرآیندی مارکف از توزیع نرمال فرض می‌شود. خطای اندازه‌گیری، $\varepsilon(c, t)$ است که در طول زمان و مکان مستقل فرض شده است.

مدل‌سازی فضایی-زمانی و رسم نقشه‌های روزانه آلاینده‌ها با استفاده از نرم‌افزار D-STEM که در سال ۲۰۱۴ میلادی ارایه شده و در محیط برنامه‌نویسی MATLAB اجرا می‌شود، انجام شده است (۳۷-۳۹).

جدول شماره ۱- شاخص‌های توصیفی آلاینده‌های NO و NO₂ (ppb) در ایستگاه‌های سنجش در سال شهر تهران در سال ۲۰۱۴ میلادی

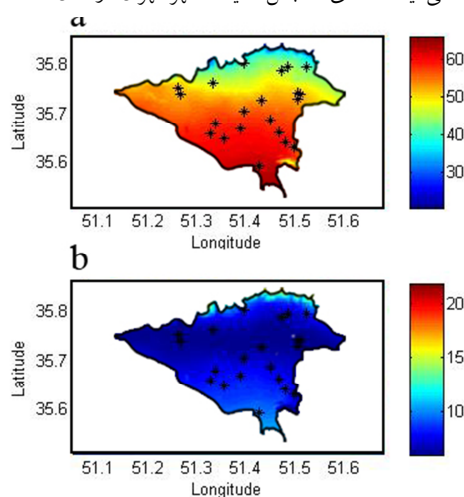
NO ₂		NO		نام ایستگاه	شماره‌ی ایستگاه	کد ایستگاه در نقشه
خطای معیار	میانگین	خطای معیار	میانگین			
۶/۷۸	۲۲/۱۴	۳۱/۰۵	۶۷/۴۱	محلاتی	۱	A
۱۲/۸۲	۴۲/۲۴	۳۳/۹۷	۴۵/۳۱	اقدسیه	۲	B
۲۵/۳۰	۶۱/۹۰	۵۰/۰۲	۵۹/۵۶	پارک رز	۳	C
۲۰/۲۶	۴۱/۳۸	۴۶/۰۴	۵۹/۷۴	پونک	۴	D
۱۶/۶۹	۷۲/۱۲	۵۶/۰۸	۱۱۲/۱۱	ستاد بحران	۵	E
۱۴/۲۷	۳۸/۰۵	۲۶/۷۲	۳۸/۸۵	شهرداری منطقه ۴	۶	F
۱۵/۹۲	۴۹/۷۴	۱۷/۷۴	۳۲/۶۶	گلبرگ	۷	G
۹/۰۱	۲۳/۱۳	۴۷/۹۰	۶۲/۳۴	مسعودیه	۸	H
۱۱/۴۴	۲۶/۷۸	۳۰/۵۳	۵۴/۱۴	میدان فتح	۹	I
۱۱/۹۷	۴۸/۲۵	۵۹/۱۳	۱۰۷/۷۲	دانشگاه تهران	۱۰	J
۱۳/۹۹	۲۹/۷۵	۷۷/۸۷	۱۳۶/۲۶	شهرداری ۱۵	۱۱	K
۷/۴۰	۲۵/۴۶	۱۳/۴۷	۳۰/۷۳	پارک قائم	۱۲	L
۱۵/۶۴	۴۱/۵۶	۲۸/۹۴	۳۲/۸۷	شکوفه	۱۳	M
۹/۲۴	۲۷/۴۷	۱۵/۳۲	۳۰/۱۹	آتی‌ساز	۱۴	N
۱۷/۳۸	۳۴/۷۷	۲۸/۰۵	۵۰/۵۰	چشمه	۱۵	O
۱۷/۰۲	۴۶/۰۱	۴۵/۷۷	۶۷/۲۷	پارک سلامت	۱۶	P
۱۳/۶۹	۴۴/۰۵	۳۳/۰۶	۴۸/۷۲	پارک رازی	۱۷	Q
۹/۷۹	۵۱/۷۰	۵۴/۲۴	۸۴/۱۶	علم و صنعت	۱۸	R
۱۹/۳۳	۴۹/۰۵	۵۴/۰۴	۱۰۰/۴۱	شهید بهشتی	۱۹	S
۶/۷۸	۲۲/۱۵	۳۱/۰۵	۶۷/۴۲	فرمانداری شهری	۲۰	T
۱۲/۸۲	۴۲/۲۴	۳۳/۹۷	۴۵/۳۱	پاسداران	۲۱	U

جدول شماره ۲ - برآورد ضرایب متغیرهای پیشگو در مدل‌های مونواکسید نیتروژن و دی‌کسید نیتروژن (ppb)

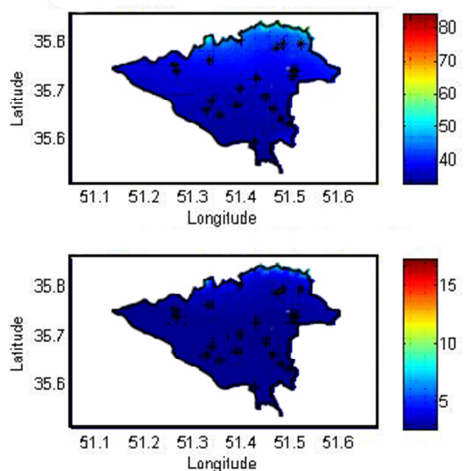
NO ₂				NO				متغیر
فاصله اطمینان ۹۵ درصد	مقدار P (p-value)	خطای معیار	برآورد	فاصله اطمینان ۹۵ درصد	مقدار P (p-value)	خطای معیار	برآورد	
۰/۱۳۳ ، ۰/۱۷۷	<۰/۰۰۱	۰/۰۱۱	+۰/۱۵۵	-۰/۱۹۰ ، -۰/۱۴۷	<۰/۰۰۱	۰/۰۱۱	-۰/۱۶۹	ارتفاع
-۰/۰۹۴ ، ۰/۰۳۲	<۰/۰۰۱	۰/۰۱۶	-۰/۰۶۳	-۰/۱۰۱ ، -۰/۰۳۹	<۰/۰۰۱	۰/۰۱۶	-۰/۰۷۰	تعطیلی



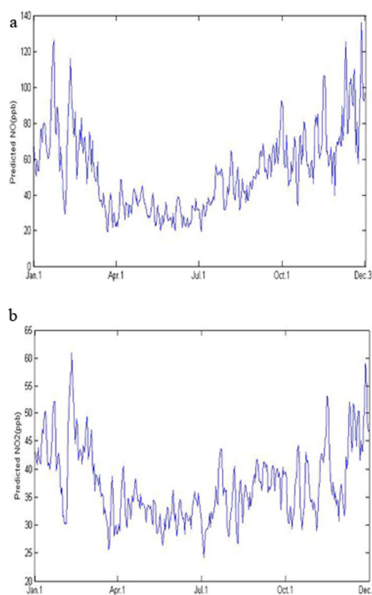
شکل شماره ۱ - موقعیت مکانی ایستگاه‌های سنجش آلاینده شهر تهران در سال ۲۰۱۴ میلادی روی نقشه



شکل شماره ۲- a: برآورد میانگین سالانه غلظت آلاینده مونواکسید نیتروژن در هوای شهر تهران در سال ۲۰۱۴ و b: برآورد خطای معیار آلاینده مونواکسید نیتروژن در هوای شهر تهران در سال ۲۰۱۴. (ایستگاه‌های سنجش آلاینده با علامت ستاره نشان داده شده است)



شکل شماره ۳- a: برآورد میانگین سالانه غلظت آلاینده دی‌اکسید نیتروژن در هوای شهر تهران در سال ۲۰۱۴ و b: برآورد خطای معیار آلاینده دی‌اکسید نیتروژن در هوای شهر تهران در سال ۲۰۱۴. (ایستگاه‌های سنجش آلاینده با علامت ستاره نشان داده شده است).



شکل شماره ۴- a: برآورد روند تغییرات زمانی غلظت مونواکسید نیتروژن برای شهر تهران در سال ۲۰۱۴. b: برآورد روند تغییرات زمانی غلظت دی‌اکسید نیتروژن برای شهر تهران در سال ۲۰۱۴

بحث

است که در این مطالعه، در هر سه مدل تک‌متغیره، چندمتغیره و مدل با داده‌های ایستگاه‌های زمینی و ماهواره‌ای برای آلاینده‌های NO_2 و $\text{PM}_{2.5}$ ، اثر ارتفاع و روزهای تعطیل بر غلظت آلاینده‌ها، منفی بود (۳۸). فاسو و همکاران و همچنین فینازی و فاسو (۳۸، ۳۶، ۳۴) نیز در پژوهشهایی دیگر و با استفاده از داده‌های آلاینده‌های اروپا، ایتالیا و نیز سه شهر بزرگ لندن، میلان و برلین، به وجود اثر منفی ارتفاع بر غلظت آلاینده‌ها دست یافتند. استفنز و همکاران (۴۰) نیز با بررسی یک دوره‌ی ۱۲ ساله داده‌های آلاینده شهر مکزیکوسیتی، برای سه آلاینده NO_x ، CO و PM_{10} به وجود اثر منفی تعطیلات آخر هفته در غلظت این آلاینده‌ها اذعان دارند. تان و همکاران (۴۱) نیز در پژوهشی در بررسی اثر تعطیلات سال نو چینی بر غلظت آلاینده‌ها در ناحیه تایپه در طی ۱۳ سال، به وجود رابطه‌ی منفی بین غلظت آلاینده‌ها و قرار گرفتن در روز تعطیل پی بردند. همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، در مورد آلاینده NO_2 ، روزهای تعطیل همچنان اثر منفی در غلظت آلاینده دارد و این یافته با یافته‌های فینازی و فاسو (۳۸)، فاسو و همکاران (۳۶، ۳۴) همخوانی دارد، اما در مورد متغیر ارتفاع، با افزایش آن، غلظت آلاینده یادشده نیز افزایش می‌یابد که نتیجه مطالعه آمینی و همکاران (۸) را تأیید می‌کند که در آن پژوهشگران با استفاده از روش LUR به مدل‌بندی آلاینده‌های اکسیدهای نیتروژن شهر تهران در سال ۲۰۱۰ میلادی پرداخته‌اند و متغیر ارتفاع در بررسی یاد شده نیز

در این پژوهش برای نخستین بار در ایران، با به‌کارگیری نرم‌افزار D-STEM به مدل‌سازی فضایی-زمانی آلاینده‌های NO و NO_2 برای ۲۱ ایستگاه سنجش آلاینده شهر تهران در سال ۲۰۱۴ میلادی پرداخته شد در این نرم‌افزار از مدل‌های فضایی-زمانی سلسله مراتبی بر پایه متغیر پنهان که در میدان تصادفی گوسی با تابع همبستگی نمایی مدل‌سازی می‌شود و خطای اندازه‌گیری را نیز لحاظ می‌کند، استفاده شده است، که این ویژگی‌ها، انعطاف‌پذیری بالایی به نرم‌افزار داده است و حتی در حالت‌های ساده تک‌متغیره، مدل قدرت بالایی دارد (۳۸). متغیرهای پیش‌بین مورد مطالعه، ارتفاع و روزهای تعطیل سال هستند که در مورد آلاینده NO ، با افزایش ارتفاع و یا قرار گرفتن در روزهای تعطیل، از غلظت این آلاینده کاسته می‌شود که با در نظر گرفتن این نکته که منبع عمده تولید آلاینده NO در شهرها، وسایل حمل و نقل هستند و در مناطق شمالی تهران این حمل و نقل به مراتب کم‌تر است و با توجه به عمر کوتاه این آلاینده که با ازن موجود در هوا واکنش می‌دهد و به NO_2 تبدیل می‌شود؛ بنابراین از غلظت آلاینده NO با افزایش ارتفاع کاسته می‌شود. برای روزهای تعطیل نیز کاهش غلظت این آلاینده با کاهش ترافیک شهری در تعطیلات آخر هفته کاملاً مطابقت دارد. علاوه بر این، نتیجه به‌دست آمده در راستای یافته‌های مطالعه فینازی و فاسو

صورت گرفته است (۲۰، ۸) و این درحالی است که دیگر پژوهش‌ها به در نظر گرفتن این همبستگی‌ها برای بهبود پیش‌بینی‌ها، اذعان دارند (۵۰).

۵- در این پژوهش علاوه بر اثرات ثابت پیشگوه‌ها، اثرات تصادفی پیشگوه‌ها نیز بررسی شده است، اما در سایر مطالعه‌های داخلی صرفاً اثرات ثابت برای مدل‌سازی استفاده شده است (۸).

از جمله محدودیت‌های این پژوهش، عدم استفاده از متغیرهای هواشناسی به علت تفاوت داشتن موقعیت مکانی ایستگاه‌های هواشناسی با ایستگاه‌های ثبت آلاینده بود که این عدم تقارن در محاسبات فضای- زمانی باعث پیچیده‌تر شدن محاسبات می‌شد که نیاز به تجهیزات با قابلیت‌های بالاتر را ایجاد می‌کرد و بنابراین از انجام آن در این مطالعه صرف نظر شد. از طرف دیگر وارد کردن مقادیر فقط یک ایستگاه ثابت هواشناسی به عنوان پیشگوی صرفاً زمانی با توجه به وسعت شهر زیاد توجیه‌پذیر نبود، اما با توجه به ویژگی‌های مدل همان‌طور که در شکل شماره ۴ مشخص است، تغییرات زمانی آلاینده حتی بدون وارد کردن متغیرهای هواشناسی به خوبی توسط مدل فضای- زمانی D-STEM برآورد شده است.

محدودیت دیگری که این پژوهش با آن روبه‌رو است، تعداد کم متغیرهای پیشگو در مدل است، درحالی‌که می‌دانیم متغیرهایی چون فاکتورهای جمعیتی و ترافیکی، تغییرات فصلی و متغیرهای هواشناسی مانند دما، سرعت وزش باد و جهت آن، میزان بارش، تعداد ساعت‌های آفتابی روز، رطوبت هوا و... بر غلظت آلاینده‌ها تأثیر به‌سزایی دارند و در تحقیقات متعددی، همبستگی بالای این متغیرها با غلظت آلاینده‌های هوا به اثبات رسیده است و مشخص شده که این عوامل در تراکم آلاینده‌های هوا مؤثرند (۵۲، ۵۱).

بنابراین پیشنهاد می‌شود که برای لحاظ نمودن متغیرهای مستقل مؤثر بیشتر در مدل و نیز بالاتر بردن دقت مدل، از سیستم‌های کامپیوتری پیشرفته‌تر با حافظه به مراتب بالاتر از سیستم معمولی استفاده شود به‌ویژه این‌که نرم‌افزار مورد استفاده، از قابلیت اجرا در شبکه‌های کامپیوتری Master-Slave به منظور توزیع محاسبات روی چند کامپیوتر نیز برخوردار است و به این روش، هر دو محدودیت علمی پژوهش فعلی، قابل رفع خواهد بود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با استفاده از اطلاعات آلاینده‌های هوا و تکیه بر مدل‌های فضای- زمانی و به‌کار بردن نرم‌افزار جدید D-STEM، به مدل‌سازی آلاینده‌های اکسیدهای نیتروژن برای شهر تهران در

با اثر مثبت در خروجی‌ها ظاهر شده بود و این درحالی است که یافته‌های این دو مطالعه با یافته‌های مطالعه‌های فاسو (۳۸) برای داده‌های ایتالیا، اسکاتلند و اروپا و نیز فاسو و همکاران (۳۶، ۳۴) برای داده‌های اروپا هم‌خوانی ندارد. دلیل افزایش این غلظت در دامنه‌ی ارتفاعات شمال تهران این است که به‌علت سرعت بالای فرایند تبدیل NO به NO₂، بعد از چند ساعت از غلظت NO موجود در هوا کاسته شده و به غلظت NO₂ اضافه می‌شود و سپس با توجه به رخ‌دادن پدیده "چرخه‌ی اِدی"^۱، تغلیظ آلاینده NO₂ در دامنه ارتفاعات اتفاق می‌افتد.

به عنوان خلاصه‌ای از نکات قوت این مطالعه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- در بیش‌تر پژوهش‌هایی که تاکنون برای شهر تهران صورت گرفته، از روش‌هایی چون رگرسیون خطی چندگانه (۴۴-۲۱، ۲۰، ۴، ۸، ۲۰، ۴۵) و کریجینگ ساده (۴۶، ۱۸) برای تجزیه و تحلیل داده‌ها استفاده شده است که تمام اطلاعات دوره موردنظر را روی هم ریخته^۲ و در نهایت برای کل دوره مورد بررسی، تنها یک نقشه به‌دست می‌آورند و این در حالی است که در این پژوهش برای هر شبانه‌روز یک نقشه محاسبه می‌شود.

۲- از جمله چالش‌های اصلی کار با اطلاعات آلاینده‌ها، داده گم شده است. معمولاً پیش از شروع کار، داده‌ی گم‌شده به‌وسیله نرم‌افزارهای جانبی (۲۱، ۲۰، ۸) میانگین‌گیری از مقادیر نقاط همسایه (۴۷) یا میانگین روزانه آلاینده برای همان ایستگاه (۴۸) برآورد می‌شود، اما در این پژوهش داده‌های گم شده با بهره‌گیری از روش EM هم‌زمان توسط مدل برآورد و جایگذاری می‌شوند و نیازی به استفاده از روش‌ها یا نرم‌افزارهای جانبی نیست.

۳- در پژوهش‌های متعددی برای شهر تهران (۴۵-۲۱، ۲۰، ۱۸، ۸)، صرفاً از منظر مکانی به ارزیابی آلاینده‌ها پرداخته شده است؛ در حالی که در این پژوهش، مشابه معبود پژوهش‌های موجود (۴۹، ۴۸) هر دو جنبه مکانی و زمانی لحاظ شده است.

۴- در این پژوهش، خودهمبستگی مکانی آلاینده‌ها در قالب تابع کوواریانس نمایی، برحسب فاصله نقاط از هم در نظر گرفته شده (۳۸)، اما در پژوهش‌های مشابه برای تهران، از این خودهمبستگی صرف‌نظر شده یا با استناد به مقادیر ناچیز آماره Moran's I تجزیه و تحلیل‌ها بدون لحاظ خود همبستگی‌ها

^۱Eddy circulation
^۲Collapsee

هوا بر سلامت شهروندان تهرانی به‌کار گرفته شود.

تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل بخشی از پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته آمار زیستی دانشگاه علوم پزشکی اصفهان، به شماره ۳۹۴۸۳۱ است. از معاونت پژوهشی دانشگاه علوم پزشکی اصفهان که منابع مالی و اعتباری این پژوهش را تأمین کرده است، سپاسگزاری می‌شود.

سال ۲۰۱۴ میلادی پرداخته شد. در این راستا با استفاده از مقادیر متغیرهای مستقل ارتفاع زمین و روزهای تعطیل، مدل‌های جداگانه‌ای برای هر یک از آلاینده‌های NO و NO₂ به‌دست آمد که در نتیجه آن اثر منفی روزهای تعطیل و ارتفاع بر غلظت NO تأیید شد، اما در مورد آلاینده NO₂، متغیر ارتفاع اثر منفی و روزهای تعطیل اثر مثبت بر غلظت آلاینده داشت.

هم‌چنین خروجی این مطالعه که نقشه‌های برآورد غلظت آلاینده‌های اکسیدهای نیتروژن به‌صورت روزانه است می‌تواند در مطالعه‌های اپیدمیولوژی برای بررسی دقیق‌تر اثرات آلاینده‌های

منابع

1. Van Der A RJ, Eskes HJ, Boersma KF, Van Noije TPC, Van Roozendaal M, De Smedt I, et al. Trends, seasonal variability and dominant NO_x source derived from a ten year record of NO₂ measured from space. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2008; 113.
2. Zawar-Reza P, Appelhans T, Gharaylou M, Shamsipour A. Mesoscale controls on particulate matter pollution for a mega city in a semi-arid mountainous environment: Tehran, Iran. *International Journal of Environment and Pollution*. 2010; 41: 166-83
3. Azizi MH. Impact of traffic-related air pollution on public health: a real challenge. *Archives of Iranian medicine*. 2011; 14: 139.
4. Mohammadi H, Cohen D, Babazadeh M, Rokni L. The Effects of Atmospheric Processes on Tehran Smog Forming. *Iranian J Publ Health*. 2012; 41: 1-12.
5. Saeednia A. Location of Tehran -Environmental research complex. 1990; 15.
6. Safavi Y, B A. Geographical agents analyzing in air pollution in Tehran. *Geographical Research*. 2006:106-517.
7. Ahadi S, Roshani M, Naderi M, Torbatian S, Shahbazi H. Tehran Annual Air Quality Report, Period of March 2015-March 2016, Report Code:QM95/02/01(U)/1, Available at air.tehran.ir/, Accessed Feb10, 2017. 2016.
8. Amini H, Taghavi-Shahri S-M, Henderson SB, Hosseini V, Hassankhany H, Naderi M, et al. Annual and seasonal spatial models for nitrogen oxides in Tehran, Iran. *Scientific reports*. 2016; 6.
9. Air Quality Control Center at TM. Archive data and information 2016 [2016/07/07]. Available from: airnow.tehran.ir/home/DaiyAQIArchive.aspx.
10. Mallik C, Lal S. Seasonal characteristics of SO₂, NO₂, and CO emissions in and around the Indo-Gangetic Plain. *Environmental monitoring and assessment*. 2014; 186: 1295-310.
11. Hilboll A, Richter A, Burrows JP, editors. Rapid economic growth leads to boost in NO₂ pollution over India, as seen from space. *EGU General Assembly Conference Abstracts*; 2016.
12. Moradi G, Savari C, Mohadesi M, Hosseinpour V, editors. Investigation of photochemical smog episode in Tehran city 2010. 2010.
13. Hoek G, Krishnan RM, Beelen R, Peters A, Ostro B, Brunekreef B, et al. Long-term air pollution exposure and cardio-respiratory mortality: a review. *Environmental Health*. 2013; 12: 43.
14. Johannson KA, Vittinghoff E, Lee K, Balmes JR, Ji W, Kaplan GG, et al. Acute exacerbation of idiopathic pulmonary fibrosis associated with air pollution exposure. *European Respiratory Journal*. 2014; 43: 1124-31.
15. Uzoigwe JC, Prum T, Bresnahan E, Garelnabi M. The emerging role of outdoor and indoor air pollution in cardiovascular disease. *North American journal of medical sciences*. 2013; 5: 445.
16. Grant L, Schneider T. Air pollution by nitrogen oxides. *Studies in environmental science*. 21: Elsevier Scientific; 1982.
17. Science On a Sphere. Nitrogen Dioxide: National Oceanic and Atmospheric Administration 2016 [2016/07/14]. Available from: <https://sos.noaa.gov/Datasets/dataset.php?id=32>.
18. Afshar H, Delavar M. A GIS-based air pollution modeling in Tehran. *Environmental Informatics Archives*. 2007; 5: 557-66.
19. Rahimi Ghoroghi N. The effect of geographic factors on air pollution in Tehran and its relationship with temperature inversion phenomenon. *First air pollution and noise Management Conference Sharif University of Technology, Tehran, Iran 2012*. p. 5.
20. Amini H, Taghavi-Shahri SM, Henderson SB, Naddafi K, Nabizadeh R, Yunesian M. Land use regression models to estimate the annual and seasonal spatial variability of sulfur dioxide and particulate matter in Tehran, Iran. *Science of the Total Environment*. 2014; 488: 343-53.
21. Amini H, Taghavi-Shahri S-M, Naddafi K, Nabizadeh R, Yunesian M. Correlation of air pollutants with land use and traffic measures in Tehran, Iran: A preliminary statistical analysis for land use regression modeling. *Journal of Advances in Environmental Health Research*. 2013; 1.
22. Ahmadipanamhehrabadi V, Hassanzadeh A, Mahaki B. Bivariate spatiotemporal shared component modeling: Mapping of relative death risk due to colorectal and stomach cancers in Iran provinces. *Int J Prev Med* 2018; DOI:10.4103/ijpvm.IJPVM_31_17 (In Press).
23. Mahaki B, Mehrabi Y, Kavousi A, Schmid VJ. Joint Spatio-Temporal Shared Component Model with an Application in Iran Cancer Data. *Asian Pacific journal of cancer prevention: APJCP*. 2018; 19: 1553-60.
24. Raei M, Schmid VJ, Mahaki B. Bivariate spatiotemporal disease mapping of cancer of the breast and cervix uteri among Iranian women. *Geospatial health*. 2018; 13.
25. Rastaghi S, Jafari-Koshki T, Mahaki B. Application of Bayesian multilevel space-time models to study relative risk of esophageal cancer in Iran 2005-2007 at a county level. *Asian Pac J Cancer Prev*. 2015; 16: 5787-92.

26. Gilge S, Plass-Dülmer C, Fricke W, Kaiser A, Ries L, Buchmann B, et al. Ozone, carbon monoxide and nitrogen oxides time series at four alpine GAW mountain stations in central Europe. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2010; 10: 12295-316.
27. Guarnaccia C, Quartieri J, Cerón Bretón J, Tepedino C, Cerón Bretón R, editors. *Time Series Predictive Model Application to Air Pollution Assessment. Latest Trends on Systems*, Proc of the 18th Int Conf on Circuits, Systems, Communications and Computers; 2014.
28. Pandey Deolal S, Brunner D, Steinbacher M, Weers U, Staehelin J. Long-term in situ measurements of NO_x and NO_y at Jungfraujoch 1998–2009: time series analysis and evaluation. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2012; 12: 2551-66.
29. Duncan BN, Lamsal LN, Thompson AM, Yoshida Y, Lu Z, Streets DG, et al. A space-based, high-resolution view of notable changes in urban NO_x pollution around the world (2005–2014). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2016.
30. Ionov DV. Tropospheric NO₂ trend over St. Petersburg (Russia) as measured from space. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2010; 11.
31. Li A, Zhang J, Xie P, Hu Z, Xu J, Mou F, et al. Variation of temporal and spatial patterns of NO₂ in Beijing using OMI and mobile DOAS. *Science China Chemistry*. 2015; 58: 1367-76.
32. Menezes R, Píairo H, García-Soidán P, Sousa I. Spatial-temporal modellization of the {NO} _ {2} concentration data through geostatistical tools. *Statistical Methods & Applications*. 2016; 25: 107-24.
33. Karimzadegan H, Rahmatian M, Farhud D, Yunesian M. Economic Valuation of Air Pollution Health Impacts in the Tehran Area, Iran. *Iranian Journal of Public Health*. 2008; 37: 20-30.
34. Fassò A, Finazzi F. A varying coefficients space-time model for ground and satellite air quality data over Europe. *Statistica & Applicazioni, Special Online Issue*. 2013:45-56.
35. Fassò A, Finazzi F, Ndongo F. Preliminary results on tapering multivariate spatio-temporal models for exposure to airborne multipollutants in.
36. Fassò A, Finazzi F, Ndongo F. European population exposure to airborne pollutants based on a multivariate spatio-temporal model. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics*. 2016; 21: 492-511.
37. MathWorks. 2016 [2016/02/13]. Available from: www.mathworks.com/products/matlab.html
38. Finazzi F, Fassò A. D-STEM: a software for the analysis and mapping of environmental space-time variables. *Journal of Statistical Software*. 2014; 62: 1-29.
39. GRASPA-Group. A Software for the Analysis and Mapping of Environmental Space-Time Variables 2016 [2016/05/12]. Available from: <https://github.com/graspa-group/d-stem>.
40. Stephens S, Madronich S, Wu F, Olson JB, Ramos R, Retama A, et al. Weekly patterns of México City's surface concentrations of CO, NO_x, PM₁₀ and O₃ during 1986–2007. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2008; 8: 5313-25.
41. Tan P-H, Chou C, Liang J-Y, Chou CCK, Shiu C-J. Air pollution "holiday effect" resulting from the Chinese New Year. *Atmospheric Environment*. 2009; 43: 2114-24.
42. Abbaspour M, Soltaninejad A. Design of an environmental assessment model on the effect of vehicle emission in greater Tehran on air pollution with economic sensitivity. *International Journal of Environmental Science & Technology*. 2004; 1: 27-38.
43. Elham A, Ghole VS, Sen PN. Study on the Status of SO₂ in the Tehran-Iran. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*. 2006; 10.
44. Masoudi M, Sakhaei M, Behzadi F, Jokar P. Status of PM₁₀ as an air pollutant and its prediction using meteorological parameters in Tehran, Iran. *Fresen Environ Bull*. 2016;25.(۴)
45. Shahraiyini HT, Shahsavani D, Sargazi S, Habibi-Nokhandan M. Evaluation of MARS for the spatial distribution modeling of carbon monoxide in an urban area. *Atmospheric Pollution Research*. 2015; 6: 581-8.
46. Halek F, Kavousi-rahim A. gis assessment of the pm₁₀, pm_{2.5} and pm_{1.0} concentrations in urban area of tehran in warm and cold seasons. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2014; 40: 141.
47. Naddafi K, Sowlat MH, Safari MH. Integrated assessment of air pollution in Tehran, over the period from September 2008 to September 2009. *Iranian journal of public health*. 2012; 41: 77.
48. Mousavi S, Mohammadzadeh M. Determination of Spatial-Temporal Correlation Structure of Troposphere Ozone Data in Tehran City. *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran*. 2013; 24: 171-8.
49. Shamsipour M, Farzadfar F, Gohari K, Parsaeian M, Amini H, Rabiei K, et al. A framework for exploration and cleaning of environmental data: Tehran air quality data experience. *Archives of Iranian medicine*. 2014; 17: 821-9.
50. Zou B, Luo Y, Wan N, Zheng Z, Sternberg T, Liao Y. Performance comparison of LUR and OK in PM_{2.5} concentration mapping: a multidimensional perspective. *Scientific reports*. 2015; 5.
51. Whiteman CD, Hoch SW, Horel JD, Charland A. Relationship between particulate air pollution and meteorological variables in Utah's Salt Lake Valley. *Atmospheric Environment*. 2014; 94: 742-53.
52. Zhang C, Ni Z, Ni L. Multifractal detrended cross-correlation analysis between PM_{2.5} and meteorological factors. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2015; 438: 114-23.

Spatio-Temporal Modeling for Nitrogen Oxides Pollutants in Tehran, 2014

Maghzi Najafabadi A¹, Hasanzadeh A², Taghavi Shahri SM³, Hajizadeh Y⁴, Mahaki B⁵

1- MSc, Student Research Committee, School of Health, Isfahan University of Medical Sciences, Isfahan, Iran

2- MSc, Department of Biostatistics, School of Health, Isfahan University of Medical Sciences, Isfahan, Iran

3- PhD Student, Department of Statistics, Payame Noor University (PNU), Tehran, Iran; 4- PhD Student, Iranian Research Center on Healthy Aging, Sabzevar University of Medical Sciences, Sabzevar, Iran

4- Associate Professor, Department of Environmental Health Engineering, School of Health, Isfahan University of Medical Sciences, Isfahan, Iran

5- Associate Professor, Department of Biostatistics, School of Health, Kermanshah University of Medical Sciences, Kermanshah, Iran; Associate Professor, Department of Biostatistics, School of Health, Isfahan University of Medical Sciences, Isfahan, Iran

Corresponding author: Mahaki B, Behzad.mahaki@kums.ac.ir

(Received 26 August 2017; Accepted 3 March 2018)

Background and Objectives: Annually about 7 million premature deaths occur due to air pollution in the world. Nitrogen oxides are among major air pollutants. Although many foreign exposure assessment studies have been carried out, Iranian studies are limited to primary analyses. Hence, in this research, we studied spatial variation of nitrogen oxides using spatiotemporal modeling in Tehran 2014.

Methods: The concentration of nitrogen oxides was obtained from 21 air pollution monitoring stations in Tehran. There were 8760 records for each pollutant in each station. Holidays and land elevation were the predictors implemented in the spatiotemporal model. The D-STEM software was used for analyses and mapping.

Results: Nitrogen monoxide significantly decreased ($P < 0.001$) over holidays and with an increase in land elevation (coefficient: -0.070 and -0.169, respectively). Moreover, the concentration of nitrogen dioxides decreased in holidays (coefficient: -0.630) but increased with with an increase in land elevation (coefficient: 0.155) ($P < 0.001$).

Conclusion: Spatiotemporal exposure assessment of nitrogen oxide pollutants was done for residents of Tehran for the first time in this study. The results of this study, which are estimation maps for daily nitrogen oxides, could benefit future epidemiological studies in evaluation of the effect of air pollutions on health of Tehran citizens.

Keywords: Spatio-Temporal modeling, Air pollutants, Nitrogen oxides