

جغرافیا (فصلنامه علمی - پژوهشی و بین المللی انجمن جغرافیای ایران)
دوره جدید، سال پانزدهم، شماره ۵۴، پاییز ۱۳۹۶

تحلیل روند روزانه آلاینده‌های هوای کلانشهر تهران

راحله صنیعی^۱، علی زنگی‌آبادی^۲ و محمد شریفی‌کیا^۳

تاریخ وصول: ۱۳۹۶/۵/۸، تاریخ تایید: ۱۳۹۶/۶/۲۰

چکیده

در این پژوهش، داده‌های شش آلاینده اصلی استاندارد قابل اندازه‌گیری هوای تهران، شامل: دی‌اکسید گوگرد (SO₂)، مونواکسیدکربن (CO)، ذرات معلق (PM_{2.5} و PM₁₀)، گاز دی‌اکسید نیتروژن (NO₂) و گاز اوزن (O₃) در یک بازه عمدتاً ۱۱ ساله از ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۲ جمعاً به مدت ۴۰۱۸ روز برای تحلیل آماری و بررسی روند تاریخی توزیع آلاینده‌ها در جو تهران مورد استفاده قرار گرفته‌است. روش‌های مورد استفاده این پژوهش عبارتند از: آمار توصیفی، تحلیل مؤلفه روند سری‌های زمانی بویژه روند خطی، پلی‌نومیال و نمایی بوده و از روش ناپارامتری من - کندال برای بررسی معنی‌داری روند تغییرات استفاده شده است. تحلیل روند تاریخی داده‌های آلودگی هوای تهران نشان داد که، روند SO₂ با سهمی درجه ۳، CO با خطی، NO₂ با نمایی و O₃ با سهمی درجه ۲ دارای برازش بهتری هستند. روند PM₁₀ و PM_{2.5} روند مشخص و قابل توجهی در طول دوره مورد مطالعه از خود نشان ندادند. نتایج حاصل از آزمون من‌کندال نشان داد که روند تغییرات زمانی آلاینده‌های CO، NO₂، O₃ با ۹۵ درصد فاصله اطمینان معنی‌دار بوده، ولی روند تغییرپذیری آلاینده‌های CO و ذرات معلق PM₁₀ و PM_{2.5} معنی‌دار نیستند. بنابراین با توجه به روند تاریخی داده‌های مورد استفاده از سری آلاینده‌های هوای تهران و تداوم فعلی آنها انتظار می‌رود که در هوای تهران آلاینده NO₂ در آینده افزایش قابل توجهی پیدا کرده و کماکان آلودگی هوای تهران با در نظر گرفتن آلاینده یاد شده تداوم یابد. اما اگر انتشار آلاینده‌های هوای CO و ذرات معلق PM₁₀ و PM_{2.5} با روال فعلی تداوم یابد، کاهش یا افزایش قابل توجهی از آلاینده‌های مذکور انتظار نمی‌رود، در عوض انتظار می‌رود با تداوم روال و روند فعلی انتشار دو آلاینده CO، O₃ کاهش قابل توجهی در میزان انتشار گازهای مذکور بوجود آید.

کلیدواژگان: آلودگی هوا، آلاینده‌های هوا، تحلیل روند، آزمون من کندال، تهران.

۱. دکتری جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری دانشگاه اصفهان

۲. دانشیار گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری دانشگاه اصفهان

۳. دانشیار گروه سنجش از دور دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه

سیاره زمین سیستمی پیچیده و پویا دارد و موجودات زنده و غیرزنده در این سیستم با هم در ارتباط هستند و چنانچه تغییری در هر یک از اجزای آن رخ دهد، بدون شک، اجزای دیگر سیستم نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد، یکی از اجزای مهم این سیستم آب و هواست که با فعالیتهای انسانی رابطه متقابل دارد (حجازی‌زاده و مقیمی، ۱۳۸۶: ۱۶۰). پدیده آلودگی هوا در مناطق شهری یکی از پیامدهای انقلاب صنعتی است که از ۳۰۰ سال قبل آغاز شده و با توسعه صنعتی و افزایش تعداد شهرها روزبه‌روز بر میزان و شدت آن افزوده می‌شود. تکیه اساسی بر منابع جدید انرژی از قبیل زغال سنگ، نفت و گاز و در نتیجه آزاد شدن مواد ناشی از احتراق این مواد، فرآورده‌های مضر و زیان بخش را به همراه می‌آورد که حیات موجودات زنده به‌ویژه انسان‌ها را تهدید می‌نماید (نظریان، ۱۳۸۶: ۱۷). امروزه حیات بیش از یک میلیارد نفر از مردم جهان به دلیل آلودگی هوای شهری مورد تهدید واقع شده است. برآوردهای انجام شده توسط بانک جهانی نشان می‌دهد که هزینه سالیانه ضررهای مستقیم و غیرمستقیم آلودگی هوا در کشورهای در حال توسعه تا ۵ درصد تولید ناخالص ملی می‌رسد (chaaban, 2008, p46). آلودگی هوا در شهرهای بزرگ صنعتی امروزه، به صورت مشکل حادثتری مطرح می‌شود (Zannetti, 1993, p108).

هر روزه زندگی هزاران زن و مرد و کودک تحت تأثیر این پدیده قرار می‌گیرد. سالیانه ۵,۳۷۰,۰۰۰ مرگ نابهنگام به سبب آلودگی هوا اتفاق می‌افتد که اکثریت آنها حاشیه‌نشین‌ها و شهروندان فقیر هستند؛ کسانی که مجبور به تحمل نمودن اثرات تخریبی آلودگی هوا به سبب نزدیکی با منابع آلودگی هوا هستند. رشد جمعیت شهرنشین و اقتصاد به همراه رشد سریع وسایل نقلیه، سبب استفاده زیاد از انرژی شده است (Schwela, et al, 2006, p6).

تهران نیز به مانند سایر شهرهای بزرگ در حال توسعه با این معضل روبرو است. از انتخاب تهران به مرکزیت سیاسی و اداری کشور بیش از ۲۰۰ سال می‌گذرد، در این مدت تهران از یک قریه کوچک به یک کلان شهر بزرگ تبدیل شده است. جمعیت این شهر در طول ۲۰۰ سال گذشته ۱۴۰ برابر شده است. امروزه آلودگی هوا به‌عنوان یکی از معضلات مهم شهرنشینی و زندگی صنعتی مطرح بوده و زندگی تمام افراد جامعه تحت تأثیر این مسأله قرار می‌گیرد. طبق گزارش سازمان جهانی بهداشت در سال ۲۰۰۰ میلادی افزون بر ۲۰۰ میلیون نفر از مردم جهان در محیط‌هایی به‌سر برده‌اند که در آن، سطح آلاینده‌ها بالاتر از استانداردهای کیفیت هوا بوده است.

شهر تهران نیز یکی از هشت شهر آلوده دنیا محسوب می‌شود و با وجود این که فقط ۱/۱۲٪ از مساحت کل کشور را دارد اما ۸۰٪ امور مالی، ۴۰٪ صنعت و ۸۵٪ کل متخصصان کشور را در خود جای داده است (نوری و همکاران، ۱۳۸۴: ۱۳).

تحقیقات متنوعی راجع به آلودگی هوا با توجه به آلودگی هوا و سلامت انسان‌ها در جهان انجام شده است. Cole & Neumayer (2004)، به بررسی اثر عوامل جمعیتی و شدت انرژی بر آلودگی هوا در کشورهای منتخب پرداختند. شاخص‌های آلودگی، دی‌اکسیدکربن و دی‌اکسید سولفور در نظر گرفته شدند. شدت انرژی در همه الگوها اثر مثبت و معناداری بر آلودگی هوا داشته است؛ در حالی که جمعیت بر انتشار دی‌اکسیدکربن و دی‌اکسیدسولفور به ترتیب، اثر مثبت و اثر منفی داشته‌اند.

مگ و همکاران (۱۹۹۶) در مقاله‌ای تحت عنوان آلودگی هوای شهر در شهرهای بزرگ، نشان می‌دهند پتانسیل بالقوه این شهرها برای آلودگی هوا در قرن آینده بیشتر بوده مگر آنکه این شهرها استراتژی‌هایی جهت کاهش آن اتخاذ

نماید. آتش (۲۰۰۷)، در مقاله زوال محیط‌زیست شهرهای کشورهای در حال توسعه، با استفاده از نمونه تهران، سعی در نشان دادن بحران آلودگی هوا در شهرهای بزرگ کشورهای در حال توسعه را دارد. نتایج نشان داد که طرح جامع ۱۰ ساله آلودگی هوای تهران با تأخیر انجام شده است و در آن وقفه‌هایی صورت گرفته است. نادال و همکاران (۲۰۱۱)، با توجه به مقدار آلاینده‌های مهم و پارامترهای حساسیت محل و جمعیت اقدام به تهیه نقشه ریسک فازی شهر تاراگونا اسپانیا نموده‌اند.

خراسانی و همکاران (۱۳۸۱)، در پژوهشی تحت قالب مقاله نشان داد که در شهر تهران آلوده‌ترین ماهها خرداد، شهریور، آبان و بهمن و در شهر اصفهان خرداد ماه می‌باشد. ایرج هاشمی (۱۳۸۴)، در پژوهشی اعلام نمود که شاخص کیفیت هوا به‌طور کامل معرفی شده و این شاخص برای آلاینده‌های معیار که شامل ازن، ذرات معلق، مونواکسید کربن و دی‌اکسید گوگرد می‌باشند، به‌صورت مشخص در جداول آورده شده است. یونسیان و همکاران (۱۳۸۰)، در تحلیل رابطه بین افزایش آلودگی هوا و مرگ در افراد با سن بیشتر از ۶۴ سال تهران، به این نتیجه رسیدند که آلاینده‌های CO₂ و PM₁₀ اثر معنی‌داری بر مرگ‌ومیر سالخورده‌گان تهران دارند. این تحقیق با هدف تحلیل زمانی تغییرات روند روزانه آلاینده‌های هوای تهران انجام شده است.

داده‌ها و روش‌ها

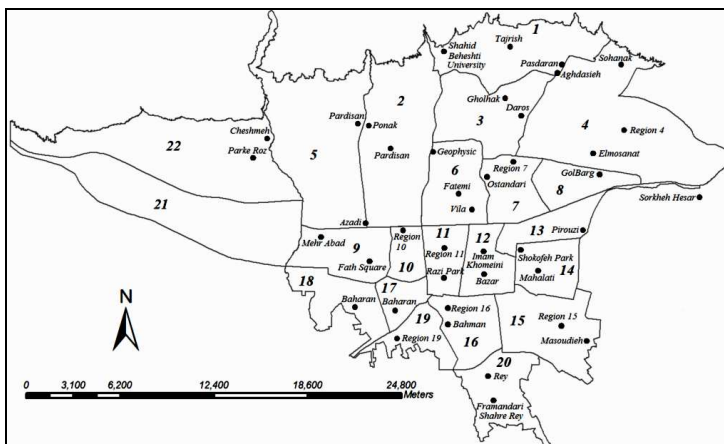
داده‌های ۳۶ ایستگاه سنجش آلودگی هوای شهر تهران که در شکل شماره ۱ موقعیت و پراکنش فضایی آنها نشان داده شده است، برای مطالعه انتخاب گردید. طول دوره آماری ایستگاهها ۱۱ ساله بوده و از سال ۱۳۸۱ یا ۲۰۰۲ میلادی تا سال ۱۳۹۱ یا ۲۰۱۲ میلادی را دربرمی‌گیرد. داده‌های مربوطه شامل داده‌های روزانه دی‌اکسید گوگرد (SO₂)، مونواکسید کربن (CO)، ذرات معلق (PM_{2.5} و PM₁₀)، گاز دی‌اکسید نیتروژن (NO₂) و گاز اوزن (O₃) هستند. با توجه به بازه ۱۱ ساله ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۲ و احتساب روزهای اضافه سال‌های کبیسه، جمع روزهای مورد مطالعه در طول دوره آماری برای همه آلاینده‌ها به غیر از PM_{2.5} بالغ بر ۴۰۱۸ روز می‌باشند. داده‌های مربوط به ذرات معلق ۲/۵ میکرونی یا PM_{2.5} از روز ۲۶ سپتامبر ۲۰۱۰ در ایستگاه‌ها قابل ثبت بوده و بنابراین تعداد روزهای مربوط به آلاینده مذکور در کل ۹۰۷ روز می‌باشد.

در این مطالعه برای نمایش الگوی فضایی پراکنش آلاینده‌های هوای شهر تهران به‌طور انفرادی، از هر آلاینده یک روز از آلوده‌ترین روزها انتخاب گردید و الگوی هر کدام به‌طور اخص به روش kriging رسم گردید.

روش‌های محاسبه روند

در این پژوهش به‌منظور تحلیل روند خطی و ترسیم نمودارهای روند از روش‌های مختلف منحنی رگرسیون بر اساس شیوه حداقل مربعات برای بررسی تغییرات زمانی شاخص کیفیت و آلاینده‌های هوا استفاده شده است. شکل عمومی رگرسیون خطی ساده عبارت از:

$$Y_i = a + \beta X \quad (1)$$



شکل ۱. توزیع فضایی ایستگاههای سنجش آلودگی هوای شهر تهران (مرکز پایش آلودگی هوای شهر تهران، ۱۳۹۱)

که در آن Y_t روند سری زمانی، ضریب a که عرض از مبدا نیز نامیده می‌شود و ضریب β که بیانگر شیب خط روند است، می‌باشند. در رگرسیون خطی فوق میزان تغییرات Y را به ازای یک واحد تغییر در X مشخص می‌کنند. X به‌عنوان متغیر مستقل عمل می‌کند و Y اثر تابع یا پاسخ است که به X وابسته است. شیب خط رگرسیون که در اینجا شیب خط روند است، از طریق معادله شماره ۲ مورد محاسبه قرار می‌گیرد:

$$\beta = \Delta y / \Delta x \quad (2)$$

ضریب a یا آلفای معادلات رگرسیون از طریق معادله شماره ۳ محاسبه می‌شود.

$$a = \bar{y} - \beta \bar{x} \quad (3)$$

به‌منظور آگاهی از تصادفی نبودن شیب خط روند β (همان شیب خط رگرسیون است) و معنی‌دار بودن آن از لحاظ آماری در سری‌های زمانی که توزیع احتمال وقوع آنها به‌نحی دیگر یا نرمال است، باید خطای استاندارد شیب مورد محاسبه قرار گیرد. محاسبه مذکور از طریق معادله ۴ انجام می‌گیرد:

$$SE(\beta) = \sqrt{\frac{12 \sum (Y_t - a - \beta)^2}{(n-2)n(n^2-1)}} \quad (4)$$

چنانچه حاصل تقسیم β بر $SE(\beta)$ بیشتر از مقدار به‌دست آمده از جدول تی‌استیودنت با $t_0 = 0-2$ درجه آزادی باشد در آن صورت فرضیه صفر که نمایانگر عدم وجود شیب در روند سری زمانی است، رد می‌شود و ثابت می‌شود که خط رگرسیون دارای شیب غیرتصادفی و معنی‌دار است. معادلات فوق‌الذکر اساس معادلات دیگر روش‌های محاسبه روند تغییرات بلندمدت سری‌های زمانی مورد مطالعه در این پژوهش می‌باشند. دیگر روش‌های محاسبه و تحلیل روند سری‌های زمانی (روند خطی سه جمله‌ای) مورد استفاده در این پژوهش به‌صورت اجمالی عبارت‌اند از:

$$Y_t = a + \beta_1 X + \beta_2 X^2 + \beta_3 X^3 \quad (5)$$

که معادله روند چند جمله‌ای فوق سهمی درجه سوم نیز نامیده می‌شوند، قادر است در سری‌های زمانی که داده‌های آنها در یک خط مستقیم قرار نمی‌گیرند، مدل مناسبی برای ترسیم و تحلیل روند دراز مدت باشند (فرشادفر، ۱۳۸۱: ۱۰۵). شکل

روند ترسیمی در روندهایی نظیر سهمی درجه سوم بسته به مثبت یا منفی بودن β ممکن است مقعر یا محدب باشد (شیرازی، ۱۳۸۳: ۳۳۵). یکی از اشکال غیرخطی روند توزیع احتمالات، نوع نمایی است. معادله روند نمایی عبارت‌اند:

$$Y_t = ae^{\beta x} \quad (۶)$$

است (شیرازی، ۱۳۸۳: ۳۳۵). گاه منحنی رگرسیون یا خط روند بلندمدت به صورت S شکل ظاهر می‌شود، به ویژه در رگرسیون‌های دو یا سه‌سهمی، این حالت بیشتر به چشم می‌خورد. زمانی که متغیر مستقل زمان باشد، منحنی یک دوره رشد آرام اولیه‌ای را نشان می‌دهد که بعداً رشد سریعی را به خود می‌گیرد و سپس به تدریج ملایم می‌شود. چنین وضعیت رگرسیون یا منحنی روند نشانگر رابطه لوجستیک است که از رگرسیون‌های غیرخطی می‌باشد.

آزمون ناپارامتری من - کندال برای آشکارسازی تغییر روند

از آماره ناپارامتری من - کندال جهت آزمون معنی‌داری روند و آشکارسازی جهش در سری‌های زمانی استفاده می‌شود. آماره من - کندال، آزمون نامحدودی است که برای شناسایی مسایل علمی در برهه‌ای از زمان مورد استفاده قرار می‌گیرد. این آزمون عمدتاً در علوم محیطی به کار می‌آید، زیرا آزمون ساده و محکمی است و می‌تواند مقادیر پایین‌تر از حد مشخص را کنترل کند. اجرای آزمون رتبه‌ای من - کندال در چند مرحله انجام می‌گیرد. به این ترتیب که ابتدا داده‌ها را رتبه‌بندی نموده و آماره‌ای موسوم به t_i را که نسبت رتبه i به رتبه‌های ماقبل خودش می‌باشد، مورد محاسبه قرار می‌دهند. در مرحله بعدی فراوانی تجمعی آماره t_i را که با $\sum t_i$ نشان داده شده، مورد محاسبه قرار می‌دهند. در گام‌های بعدی به ترتیب آماره‌های E_i که معرف امید ریاضی، V_i یا واریانس و U_i که شاخص مقایسه‌ای آزمون من - کندال است، مورد محاسبه قرار می‌گیرند. معادله آماره‌های فوق‌الذکر به شرح ذیل است:

$$E_i = \frac{n_i(n_i - 1)}{4} \quad (۷)$$

$$V_i = \frac{n_i(n_i - 1)(2n_i + 5)}{72} \quad (۸)$$

$$U_i = \frac{(\sum t_i - E_i)}{\sqrt{V_i}} \quad (۹)$$

در معادلات فوق n_i ترتیب زمانی داده‌ها است. شاخص U_i دارای توزیع بهنجار است و به همین خاطر جهت آشکارسازی و آزمون معنی‌دار بودن روند به جدول منحنی نرمال مراجعه می‌شود.

برای ترسیم نمودار من - کندال و آشکارسازی معنی‌داری یا غیرمعنی‌دار بودن روند سری زمانی باید آماره‌های قرینه‌ای تحت عنوان‌های E'_i ، V'_i و U'_i نیز مورد محاسبه قرار گیرند. معادله آماره‌های فوق‌الذکر به شرح معادلات ذیل است.

$$E'_i = \frac{[N - (n_i - 1)](N - n_i)}{4} \quad (۱۰)$$

$$V'_i = \frac{[[N - (n_i - 1)](N - n_i)][2(N - n_i)] + 5}{72} \quad (۱۱)$$

$$U'_i = \frac{(\sum t'_i - E'_i)}{\sqrt{V'_i}} \quad (۱۲)$$

در معادلات فوق N طول دوره آماری یا حجم نمونه می‌باشد. محل تلاقی U_i و U'_i در محدوده اطمینان ۹۵ درصدی،

بیانگر تغییرات معنی‌دار سری زمانی بوده و رفتار U_i بعد از محل تلاقی وضعیت نزولی یا صعودی سری را مشخص می‌کند. نمودارهایی که در آنها دو خط U_i و U'_i به هم برخورد نکرده‌اند یا فاقد محل تلاقی دو خط U_i و U'_i هستند، معرف سری‌های فاقد روند هستند (خوشحال دستجردی و قویدل رحیمی، ۱۳۸۷: ۲۵).

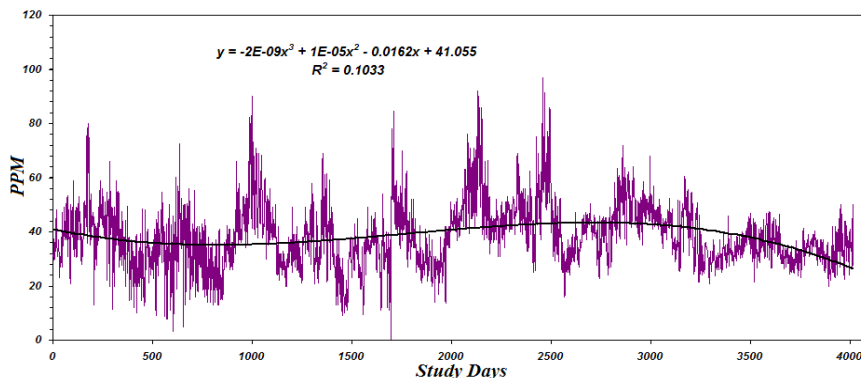
تحلیل روند سری‌های زمانی آلاینده‌های شهر تهران

پس از منظم‌نمودن و رفع نواقص آماری، سری زمانی روزانه آلاینده‌های هوای تهران تشکیل داده شد و سپس مشخصات مربوط به فراسنج‌های آمار توصیفی سری‌های مذکور استخراج گردید که در جدول ۱ قابل مشاهده است.

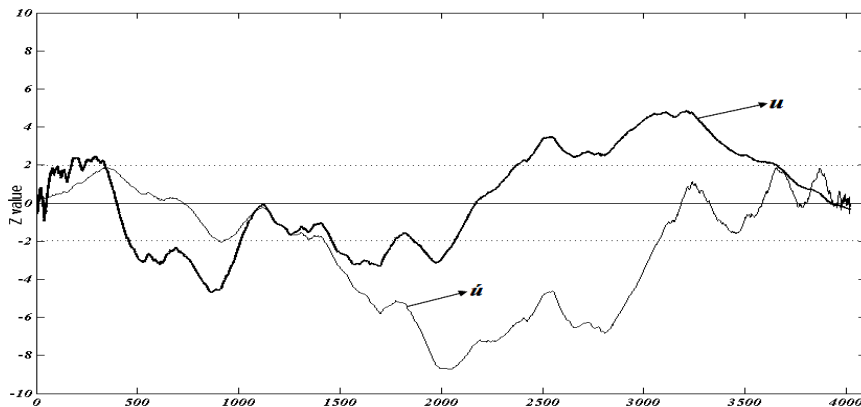
جدول ۱. فراسنج‌های آمار توصیفی روزانه آلاینده‌های هوای شهر تهران در طول دوره مورد مطالعه

Variable	SO2	CO	NO2	O3	pm2.5	PM10
Mean	38	67	33	37	103	62
StDev	11	31	18	20	28	21
CoefVar	30	45	55	53	27	34
Minimum	0	19	6	2	24	5
Median	37	61	27	34	101	60
Maximum	97	237	110	103	204	381
Range	97	217	104	128	180	376
Mode	109	49	153	79	6	82
Skewness	0.72	1.11	1.33	1.03	0.37	2.45

از مهم‌ترین موارد جدول ۱ می‌توان به میانگین بلندمدت روزانه ذرات معلق $10 \mu\text{m}$ میکرونی با رقم 103 اشاره نمود که براساس آن می‌توان گفت تهران به‌طور متوسط برای افراد حساس جامعه ناسالم است. ضرایب تغییر آلاینده‌های هوا نشان می‌دهد که از نظر زمانی گازهای NO_2 و O_3 دارای بالاترین تغییرپذیری و ذرات معلق $2/5 \mu\text{m}$ میکرونی دارای کمترین تغییرپذیری زمانی هستند. بیشینه ثبت شده آلاینده‌های هوای تهران نشان می‌دهد که بیشینه ذرات معلق PM_{10} تا حد خطرناک و CO و $\text{pm}_{2.5}$ تا مرز خیلی ناسالم در سیستم طبقه‌بندی استاندارد کیفیت هوا (AQI) می‌توانند مضر باشند. پس از تحلیل آماری داده‌های روزانه مربوط به آلاینده‌های هوای تهران با استفاده از مؤلفه روند سری‌های زمانی، تغییرات زمانی هر یک از آلاینده‌های هوا تهران مورد تحلیل قرار داده شد. بر این اساس، همان‌گونه که در شکل ۲ دیده می‌شود، روند تغییرات روزانه دی‌اکسید گوگرد جو تهران تابعی از روند پلی‌نومیال سه‌جمله‌ای بوده و در بلندمدت تا حدود $10/33$ درصد، تغییرات کاهشی از خود نشان می‌دهد. آزمون ناپارامتری توزیع آزاد من کندانال نشان داد که روند کاهشی مذکور معنی‌دار نبوده (شکل ۳) و سری زمانی 4018 روزه مذکور در طول دوره مورد مطالعه فقط شاهد چندین بار برخورد بوده که برخوردهای مذکور به معنی تغییر در میانگین بلندمدت سری زمانی موردنظر محسوب می‌شوند و تغییر روند بلندمدت آن سری زمانی به حساب نمی‌آیند.

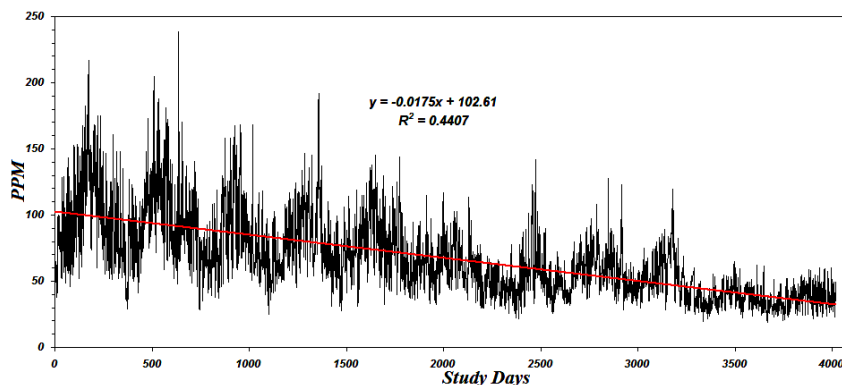


شکل ۲. روند تغییرات زمانی SO₂ هوای تهران طی ۴۰۱۸ روز مورد مطالعه



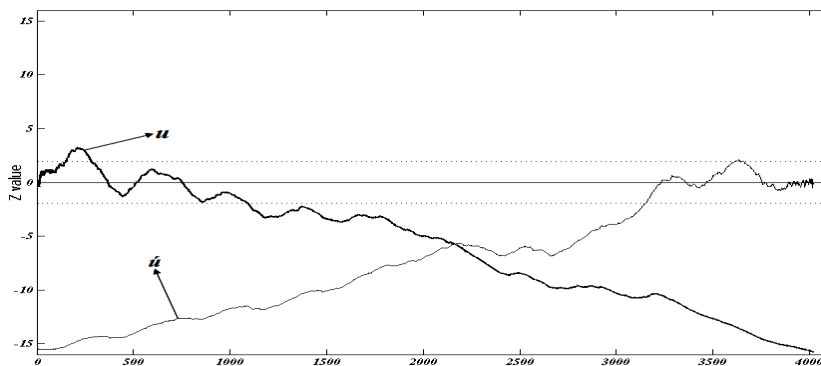
شکل ۳. نمودار من کنثال برای آزمون معنی داری روند تغییرات زمانی SO₂ هوای تهران طی ۴۰۱۸ روز مورد مطالعه

تغییرات بلندمدت میزان مونواکسیدکربن جو هوای تهران نیز مبین کاهش نسبتاً قابل توجه و معنی دار گاز مذکور بوده و با یک روند خطی کاملاً واضح در طول ۴۰۱۸ روز مورد مطالعه تا ۴۴ درصد کاهش از خود نشان می‌دهد (شکل ۴). گازسوزشدن تعداد زیادی از خودروها و گسترش فرهنگ استفاده از مترو و وسایل نقلیه عمومی و ارتقاء زیست‌محیطی موتور و وسایل نقلیه به بالاتر از یورو ۲ و مواردی از این دست در کاهش گاز مونواکسیدکربن جو تهران بسیار مؤثر بوده است.



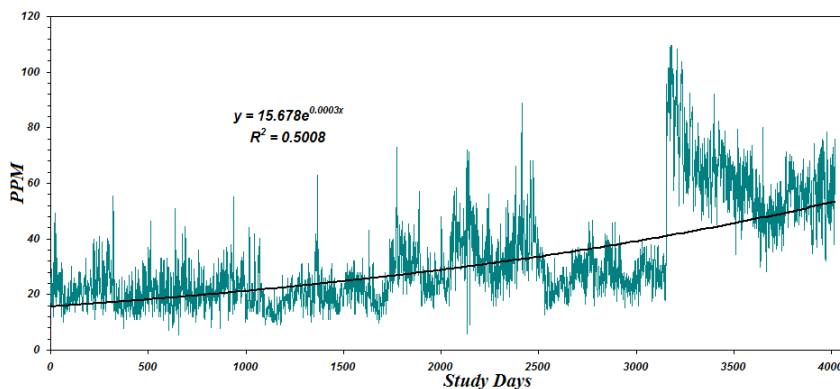
شکل ۴. روند تغییرات زمانی CO هوای تهران طی ۴۰۱۸ روز مورد مطالعه

با استفاده از آزمون من کندال معنی‌داری روند تغییرات ۴۴ درصد کاهش روزانه مونواکسیدکربن جو تهران مورد آزمون قرار گرفت و همان‌طور که در شکل ۵ دیده می‌شود، روند مزبور معنی‌دار است. بر این اساس، به احتمال قوی در روزهای آتی بعد از دوره مطالعه روند کاهش گاز مونواکسیدکربن جو تهران با روال فعلی ۴۴ درصد کاهش از خود نشان خواهد داد.



شکل ۵. نمودار من کندال برای آزمون معنی‌داری روند تغییرات زمانی CO هوای تهران طی ۴۰۱۸ روز مورد مطالعه

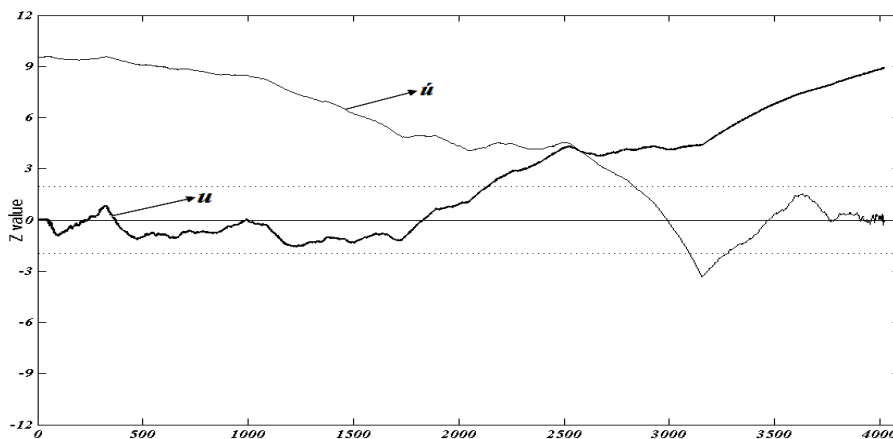
بررسی روند گاز NO₂ (دی‌اکسید نیتروژن) موجود در هوای روزانه تهران نیز نشان داد که در ۴۰۱۸ روز مورد مطالعه روند مذکور به‌طور چشمگیری صعودی می‌باشد. با توجه به این که روند افزایش NO₂ هوای تهران از روند نمایی پیروی می‌کند، می‌توان به شدت تغییرات زمانی آن که تا ۵۰ درصد در بازه زمانی ۴۰۱۸ روزه از خود افزایش معنی‌دار نشان می‌دهد، پی برد. تغییرات زمانی NO₂ جو تهران در بین آلاینده‌های مورد مطالعه شدیدتر از سایر آلاینده‌ها و شاخص کیفیت هوا است.



شکل ۶. روند نمایی تغییرات زمانی NO₂ هوای تهران طی روزهای مورد مطالعه

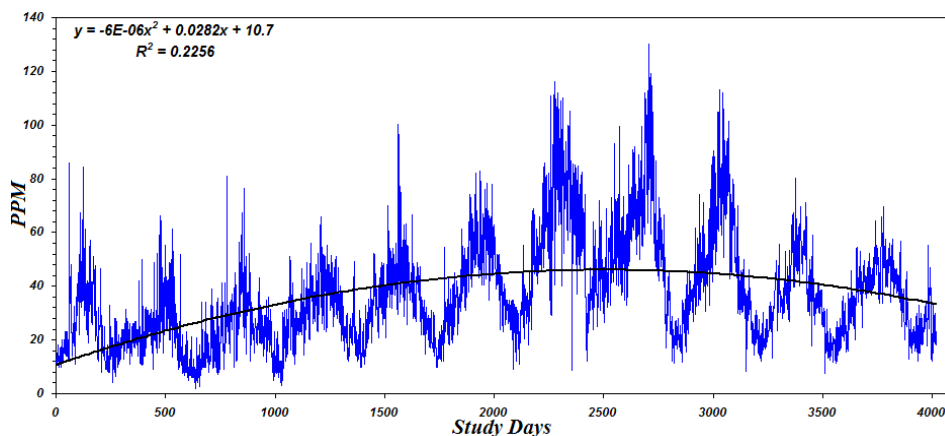
تغییرات زمانی NO₂ هوای تهران طی روزهای مورد مطالعه که در شکل ۶ درج شده، نشان می‌دهد که از حدود سال ۲۰۱۰ یک جهش ناگهانی در سری زمانی دی‌اکسیدنیتروژن هوای تهران به‌وقوع پیوسته که به‌وضوح تغییرات بعد از زمان یاد شده با تغییرات سری تا قبل از زمان یاد شده متفاوت می‌باشد. کاربرد روش ناپارامتری من کندال برای آزمون معنی‌داری روند تغییرپذیری روزانه بیش از ۵۰ درصدی NO₂ هوای تهران طی روزهای مورد مطالعه نشان داد که

روند تغییرات یاد شده معنی‌دار بوده و با روند موجود در روزهای آینده شاهد افزایش آلاینده مذکور در هوای تهران خواهیم بود (شکل ۷).

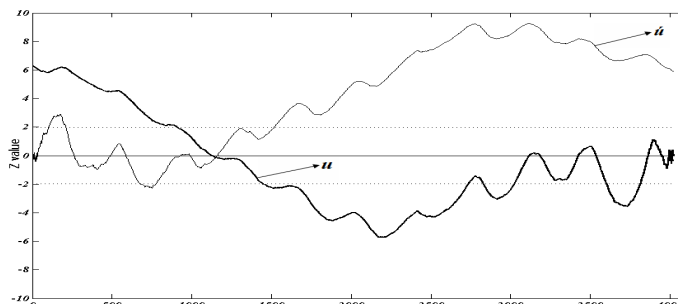


شکل ۷. نمودار من کنندال برای آزمون معنی‌داری روند تغییرات زمانی NO₂ هوای تهران طی ۴۰۱۸ روز مورد مطالعه

از دیگر آلاینده‌های مهم هوای تهران می‌توان به گاز O₃ (اوزون) اشاره نمود. بررسی روند تغییرات بلندمدت ۴۰۱۸ روزه O₃ جو تهران نشان می‌دهد که تغییرات زمانی آلاینده مذکور بهترین برازش را با روند سهمی درجه دو نشان داده و با روند پلی‌نومیال درجه ۲ در طول دوره آماری بیش از ۲۲/۵ درصد تغییرات نزولی از خود نشان می‌دهد (شکل ۸). همان‌گونه که از شکل ۹ برمی‌آید، روند تغییرات نزولی ۲۲/۵ درصدی ۴۰۱۸ روزه O₃ هوای تهران براساس آزمون ناپارامتری من‌کنندال معنی‌دار بوده و در روزهای آتی با تداوم منوال فعلی انتشار گاز اوزون، شاهد کاهش در حدود بیش از ۲۲/۵ درصدی گاز مذکور خواهیم بود.

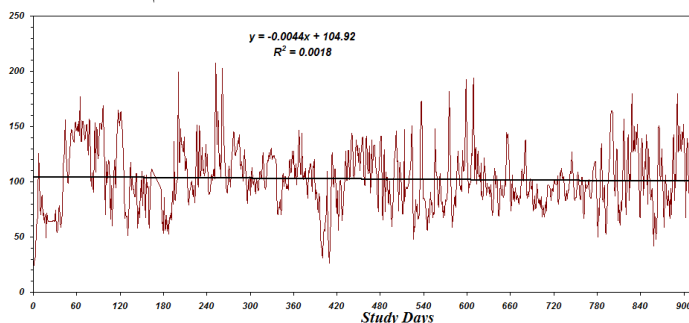


شکل ۸. روند پلی‌نومیال درجه دوم تغییرات زمانی O₃ هوای تهران طی روزهای مورد مطالعه



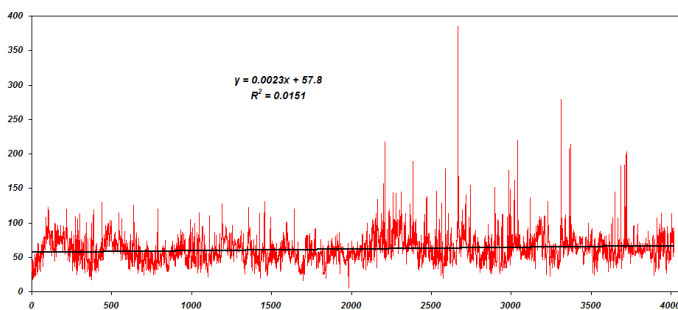
شکل ۹. نمودار من کندال برای آزمون معنی‌داری روند تغییرات زمانی O3 هوای تهران طی ۴۰۱۸ روز مورد مطالعه

تغییرات زمانی ذرات معلق PM2.5 (۲/۵ میکرونی) که در یک دوره آماری ۹۰۷ روزه از ۲۶ سپتامبر ۲۰۱۰ تا ۲۰ مارس ۲۰۱۳ برداشت و مورد بررسی قرار داده شده، نشان می‌دهد که شیب خط روند ذرات مذکور کاملاً خستگی و نزدیک به صفر است. بنابراین، تغییرات زمانی نامشخص آن که فقط دارای مؤلفه نوسانات نامنظم است، معنی‌دار نیست (شکل ۱۰).



شکل ۱۰. تغییرات زمانی ذرات معلق ۲/۵ میکرونی PM2.5 از ۲۶ سپتامبر ۲۰۱۰ تا ۲۰ مارس ۲۰۱۳

تقریباً همان روند تغییرات زمانی که در طول دوره آماری ۹۰۷ روزه برای ذرات معلق ۲/۵ میکرونی ذکر شد، برای ذرات معلق PM10 (۱۰ میکرونی) در یک دوره آماری بلندمدت‌تر ۴۰۱۸ روزه قابل تصور بوده و همان‌طور که در شکل ۱۱ دیده می‌شود، روند تغییرات زمانی ذرات معلق ۱۰ میکرونی خستگی بوده و در طول سری ۴۰۱۸ روزه ذرات معلق ۱۰ میکرونی فقط مؤلفه نوسانات نامنظم سری مذکور قابل توجه بوده و سری فاقد سایر مؤلفه‌ها از جمله مؤلفه‌های روند، فصلی و چرخه‌ای می‌باشد.



شکل ۱۱. تغییرات زمانی ذرات معلق ۱۰ میکرونی PM10 هوای تهران طی روزهای مورد مطالعه

نکته جالب توجه ذرات معلق ۱۰ میکرونی مربوط به میزان شاخص PM10 در سال ۲۰۰۹ است که به عدد ۳۸۱ بالغ شده که از نظر کیفیت هوا روز ۶ جولای ۲۰۰۹ یا ۱۵ تیرماه ۱۳۸۸ آلوده‌ترین روز تهران نه از نظر فقط ذرات معلق

بلکه، از نظر سایر آلاینده‌های هوا بوده است. از نظر طبقه‌بندی شاخص‌های کیفیت هوا AQI روز مذکور تنها روز خطرناک دوره ۴۰۱۸ روزه مورد مطالعه در تهران بوده است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای نخستین بار ویژگی‌های زمانی آلاینده‌های اصلی هوای تهران شامل دی‌اکسید گوگرد (SO_2)، مونواکسید کربن (CO)، ذرات معلق PM_{10} ، گاز دی‌اکسید نیتروژن (NO_2) و گاز اوزن (O_3) در یک بازه ۴۰۱۸ روزه که شامل سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۲ جمعاً به مدت ۱۱ سال، مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین ذرات معلق $PM_{2.5}$ نیز از بدو اندازه‌گیری در ایستگاهها به مدت ۹۰۷ روز مورد مطالعه قرار داده شده است. بررسی‌های آماری این مطالعه با استفاده از انواع روش‌های تحلیل سری زمانی شامل روند خطی، پلی‌نومیال درجه ۲ و نمایی بوده و روند بلندمدت آلاینده‌های هوای تهران هر یک با یکی از انواع روندهای یاد شده برازش بهتری از خود نشان دادند. به این ترتیب که روند SO_2 با سهمی درجه ۳، CO با خطی، NO_2 با نمایی و O_3 با سهمی درجه ۲ دارای بهترین برازش بوده‌اند. روند ذرات معلق $PM_{2.5}$ و PM_{10} میکرونی روند مشخص و قابل توجهی در طول دوره مورد مطالعه از خود نشان ندادند. به منظور بررسی معنی‌داری روند تغییرات زمانی آلاینده‌های هوای تهران از آزمون ناپارامتری توزیع آزاد من‌کنندال استفاده شد که نتایج حاصله نشان داد، روند تغییرات زمانی آلاینده‌های CO ، NO_2 ، O_3 با ۹۵ درصد فاصله اطمینان معنی‌دار بوده ولی روند تغییرپذیری آلاینده‌های CO و ذرات معلق PM_{10} و $PM_{2.5}$ معنی‌دار نیستند. بنابراین با توجه به روند تاریخی داده‌های مورد استفاده از سری آلاینده‌های هوای تهران و تداوم فعلی آنها انتظار می‌رود که در هوای تهران آلاینده NO_2 در آینده افزایش قابل توجهی پیدا کرده و کماکان آلودگی هوای تهران با در نظر گرفتن آلاینده یاد شده تداوم یابد. اما اگر انتشار آلاینده‌های هوای CO و ذرات معلق PM_{10} و $PM_{2.5}$ با روال فعلی تداوم یابد، کاهش یا افزایش قابل توجهی از آلاینده‌های مذکور انتظار نمی‌رود، در عوض انتظار می‌رود با تداوم روال و روند فعلی انتشار دو آلاینده CO ، O_3 شاهد کاهش قابل توجهی در میزان انتشار گازهای مذکور باشیم.

الگوی فضایی آلاینده‌ها نشان می‌دهد، تمرکز CO در ارتفاعات شمال‌غربی تهران بوده و به سمت شرق تهران از شدت آن کاسته می‌شود. این آلاینده، مناطق ۲، ۵ و ۲۲ را تا حد خطرناک و مناطق ۹، ۱۰، ۱۷، ۱۸، ۲۱ و بخش‌هایی از مناطق ۱، ۳، ۶ و ۱۱ را در وضعیت خیلی ناسالم قرار داده است. تمرکز ازن بر روی ارتفاعات شمالی و جنوبی زیاد بوده و به سمت مرکز کاهش می‌یابد. این آلاینده در منطقه ۱ تهران بیشترین تمرکز را نشان می‌دهد. پهنه‌بندی آلاینده NO_2 نمایشگر این امر است که بخش‌هایی از مناطق ۱۵، ۱۶، ۱۴ و ۲۰ در حالت میانه قرار داشته و بقیه مناطق در حالت ناسالم برای گروه‌های حساس قرار گرفته‌اند. توزیع فضایی آلودگی $PM_{2.5}$ نشان می‌دهد مناطق ۹، ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰ و ۲۱ بیشترین آلودگی را تا مرحله خطرناک داشته و مناطق ۲، ۵، ۶، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۶، ۱۵، ۲۰، ۲۱ و ۲۲ به مرحله خیلی ناسالم رسیده و در بقیه مناطق به سمت شرق از شدت آلودگی کم می‌شود. آلاینده PM_{10} بخش‌های کوچکی از مناطق ۱، ۲، ۵، ۲۲ در وضعیت خیلی ناسالم قرار داده و بقیه مناطق حالت خطرناک را نشان می‌دهند. نمایش فضایی آلاینده‌ها حاکی از این امر است که توزیع فضایی آنها از یک الگو تبعیت نکرده و هر کدام بر اساس نوع آلاینده الگوی خاص خود را دارند.

کتابشناسی

۱. تقیان، ب؛ دانش کار، آراسته، پ؛ رحیمی بندرآبادی، س؛ فتاحی، ا؛ محمدزاده، م. (۱۳۸۹)، پیش‌نویس راهنمای روشهای توزیع مکانی عوامل اقلیمی با استفاده از داده‌های نقطه‌ای، وزارت نیرو و معاونت امور آب و آبفا، دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا، نشریه شماره ۳۶۸ - الف، دی ماه؛
۲. حجازی‌زاده، زهرا و شوکت، مبینا (۱۳۸۶)، کاربرد اقلیم در برنامه‌ریزی شهری و منطقه‌ای، پیام نور، تهران؛
۳. خراسانی، نعمت‌الله؛ چراغی، مهرداد؛ ندافی، کاظم؛ کرمی، محمود (۱۳۸۱)، بررسی و مقایسه کیفیت هوا در شهرهای تهران و اصفهان در سال ۱۳۷۸ و ارائه راهکارهایی برای بهبود آن، مجله منابع طبیعی ایران، جلد ۵۵، شماره ۴، صص ۵۵۹-۵۶۷؛
۴. خوشحال، ج؛ قویلد رحیمی، ی (۱۳۸۷)، کاربرد آزمون ناپارامتری من-کندال در برآورد تغییرات دمای مطالعه موردی: دماهای کرانگین ایستگاه اصفهان، فصلنامه فضای جغرافیایی، ۳۸-۲۱ : ۲۲؛
۵. سازمان محیط زیست (۱۳۹۱)، مرکز پایش آلودگی هوای شهر تهران؛
۶. سبحانی اردکانی، سهیل؛ طیبی، لیما؛ چراغی، مهرداد (۱۳۸۷)، ارزیابی کیفیت بهداشتی هوای تهران در سال ۱۳۸۵ با کاربرد شاخص کیفیت هوا به تفکیک ایستگاههای سنجش آلاینده‌های هوا، دومین همایش و نمایشگاه تخصصی مهندسی محیط زیست؛
۷. شیرازی، م (۱۳۸۳)، روش‌های آمار کاربردی با رویکرد آمار در پژوهش، انتشارات شکوه اندیشه، تهران؛
۸. فاضل‌نیا، غریب؛ حکیم‌دوست، یاسر و یدالله بلیانی (۱۳۹۱)، راهنمای جامع مدل‌های کاربردی GIS در برنامه‌ریزی شهری، روستایی و محیطی، دانشگاه زابل؛
۹. فرشادفر، ع (۱۳۸۱)، اصول روش‌های آماری، جلد دوم، انتشارات دانشگاه رازی کرمانشاه؛
۱۰. نظریان، اصغر؛ ضیائیان فیروزآبادی، پرویز (۱۳۸۶)، بررسی نقش مکان و مورفولوژی در کیفیت هوای شهر تهران با استفاده از GIS داده‌های ماهواره‌ای (RS)، پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۶۱، صص ۱۷-۳۰؛
۱۱. نوری، کبری؛ ضیائی، سعیده؛ کاظم‌نژاد، انوشیروان (۱۳۸۴)، اثرات منواکسیدکربن ناشی از آلودگی هوا در حاملگی بر جنین و آسیب‌شناسی بند ناف، مجله دانشگاه علوم پزشکی بابل، دوره هفتم، شماره ۳، صص ۱۲-۱۹؛
۱۲. هاشمی، ایرج (۱۳۸۴)، معرفی شاخص کیفیت هوا (AQI) و رفتارهای اجتماعی مناسب در مواقع اضطراری بروز آلودگی هوا، همایش آلودگی هوا و اثرات آن بر سلامت، موسسه مطالعاتی زیست‌محیط پاک، تهران؛
۱۳. یونسیان، مسعود؛ ملک‌افضلی، حسین؛ هلاکوئینی نا نینی، کورش، رابطه بین آلودگی هوا و مرگ‌ومیر افراد بالای ۶۴ سال در تهران، فصلنامه پایش، سال اول، شماره اول، صص ۱۹-۲۴؛
14. Atash, F, (2007), The deterioration of urban environments in developing countries: Mitigating the air pollution crisis in Tehran, Iran, Cities, Vol. 24, No. 6: 399-409 Elsevier Ltd;
15. Cole, M.A., & E., Neumayer, (2004), Examining the Impact of Demographic Factors on Air Pollution. Population and Development Review, Vol. 26, No. 1, pp 5-21;
16. Schwela, Dieter, Haq, Gary, Huizenga, Cornie, Han, Wha-Jin, Fabian, Herbert, Ajero. May, (2006), Urban Air Pollution in Asian Cities, First published by Earthscan in the UK and USA;
17. Mage David, Ozolins Guntis, Peterson Peter, Webster Anthony, Orthoferj Rudi, Vandeweerd Veerle, Gwynnet Michael, (1996), Urban Air Pollution In Megacities Of The World, Atmospheric Environment Vol. 30, No. 5: 681-686;
18. Nadal, M., O. Cadiach, V. Kumar, P. Poblet, M. Mari, M. Schuhmacher and J. L. Domingo (2011), "Health Risk Map of a Petrochemical Complex through GIS-Fuzzy Integration of Air Pollution Monitoring Data." Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal 17(4) : 873-891;
19. United Nations Department of Economic and Social Affairs/Population (Division), 2005;
20. United Nations Department of Economic and Social Affairs/Population Division, 2005 World Urbanization Prospects: the 2005 Revision, New York. Accessed on the internet. <<http://esa.un.org/unup/index.asp?panel=1>>. (visited on April 2010);
21. Zannetti, P., Environmental Modeling, Computational Mechanics, Pub. & Elsevier Applied Science, 1, p.108 (1993);
22. Chaaban FB. Air quality. In: Tolba MK and Saab NW, Editor Arab environment: future challenges. Beirut: Technical Publications and Environment & Development Magazine; 2008. P.45-62.