

بررسی روند و تغییرات فصلی دی‌اکسید نیتروژن تروپوسفری در ایران با استفاده از ۱۴ سال داده‌برداری سنجنده OMI

روح‌اله مرادحاصلی

گروه فیزیک، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران، کدپستی ۵۸۱۴۵ - ۴۵۱۵۶؛
rmhaseli1361@gmail.com

چکیده. در این مقاله نتایج مربوط به مطالعه روند تغییرات غلظت آلاینده NO_2 مربوط به تروپوسفر در ایران طی یک دوره ۱۴ ساله ارائه شده است. بدین منظور متوسط ماهیانه غلظت NO_2 بدست آمده از اندازه‌گیری سنجنده OMI از اکتبر ۲۰۰۴ تا مارس ۲۰۱۸ بکار برده شده است. از یک مدل خطی بعلاوه جمله نوسانی جهت تحلیل روند تغییرات و تحول فصلی آلاینده NO_2 استفاده شده است. از داده‌های OMI با وضوح 0.125×0.125 درجه متوسط‌گیری شده تا وضوح 1×1 درجه برای تحلیل روند تغییرات حاصل شود. در تحلیل روند تغییرات نتایج با رضایت‌مندی ۹۵ درصد حفظ شده‌اند. در ۲۷ مرکز استان افزایش غلظت معنادار مشاهده شده است. با تحلیل جملات فصلی آلوده‌ترین ماه‌ها از لحاظ آلاینده NO_2 برای مراکز استان‌های کشور تعیین شده و به تفکیک برای فصل‌های چهارگانه ارائه شده‌اند. بیش‌ترین آلودگی NO_2 برای ۲ مرکز استان در بهار، ۳ مرکز استان در تابستان، ۲ مرکز استان در پاییز و ۲۴ مرکز استان در زمستان مشاهده شده است. برای هرکدام از مراکز استان نوع چشمه آلودگی نیز مشخص شده است. چشمه آلودگی غالب برای ۲۴ مرکز استان شهری و برای ۳ مرکز استان خاک بدست آمده‌اند. بعلاوه در ۴ مرکز استان با استفاده از معیارهای استفاده شده در این مطالعه نوع چشمه قابل تشخیص نبود.

واژه‌های کلیدی: دی‌اکسید نیتروژن، ایران، سنجنده OMI، روند تغییرات، تغییرات فصلی، نوع چشمه

A study of trend and seasonality of tropospheric NO_2 over Iran by using 14 years of OMI data acquisition

Ruhollah Moradhaseli¹

¹ Department of Physics, Zanjan Branch, Islamic Azad University, Zanjan, Iran;
email: rmhaseli1361@gmail.com

Abstract. Results of a study on tropospheric NO_2 over Iran for a 14 years period have been reported. Monthly averages of tropospheric NO_2 concentrations recorded by OMI from Oct 2004 to Mar 2018 have been used. A model including a linear and sinusoidal term is applied to study trend and seasonal behavior of NO_2 concentrations. Original 0.125×0.125 degree data of OMI have been averaged to get 1×1 degree resolution to analyze trends. Trend results with 95% confidence level have been reported. In 27 centers of provinces in Iran, real trends have been detected. By using seasonal analysis, mostly polluted months have been determined for these cities. 2 cities experience most pollution in spring, 3 in summer, 2 in autumn and 24 cities in winter. Pollution source type classification shows 24 urban and 3 soil emission cases for the studied cities. Source type determination was impossible in 4 cities by criteria used in this paper.

Keywords: NO_2 , Iran, OMI, Trend, Seasonality, Source Type

۱ مقدمه

آلودگی هوا به یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی بشر در قرن ۲۱ تبدیل شده است. با صنعتی شدن کشورهای مختلف و تولید انواع آلاینده‌ها و گازهای گلخانه‌ای اثرات مخربی بر تروپوسفر و جو زمین تحمیل شده است [۱]. آلاینده‌هایی مانند اکسیدهای نیتروژن دار، اکسیدهای گوگرد، ذرات کوچک‌تر از 2.5 میکرون، ذرات غبار و بسیاری موارد دیگر بطور مستقیم بر سلامت انسان‌ها اثرگذار هستند [۲]؛ از این رو مطالعه دقیق رفتار این ذرات از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مطالعات تعیین توزیع فضایی و زمانی آلاینده‌ها از پارامترهای مهم به حساب می‌آیند. بعلاوه مهم است بدانیم آلاینده‌ها در طولانی مدت چه روندی از خود نشان می‌دهند. پس از مطالعات دقیق و حصول نتایج قابل اطمینان می‌توان این نتایج را در اتخاذ تصمیمات مدیریتی در راستای کنترل و کاهش اثرات آلودگی بکار گرفت.

اکسیدهای نیتروژن دار ($NO_2 + NO$ یا NO_x) از مهم‌ترین آلاینده‌های موجود در جو زمین بویژه در مناطق شهری و پرتراپیک هستند. میزان متوسط غلظت NO_x در جو زمین بطور مستمر از مقدار 280 قسمت در بلیون حجمی در دوران پیش از صنعتی شدن تا مقدار 320 قسمت در بلیون حجمی امروزی افزایش یافته است. تخمین زده شده که سالانه حدود $13/8$ تراگرم NO_x به جو زمین افزوده می‌شود. این آلاینده دارای چشمه‌های متعددی است. از چشمه‌های طبیعی NO_x می‌توان به نیتروژن زدایی از اقیانوس‌ها و خاک اشاره کرد [۳]. مهم‌ترین چشمه‌های NO_x ناشی از فعالیت‌های انسانی عبارتند از حمل و نقل و تراپیک و نیروگاه‌های حرارتی. میزان تولید NO_x از هرکدام از این چشمه‌ها به پارامترهای مختلفی از جمله شرایط احتراق و مواردی دیگر بستگی دارد [۴]. فعالیت‌های کشاورزی هم از عوامل انسانی در تولید اکسیدهای نیتروژن دار هستند. NO_x به شکل‌های مختلفی بر سلامت افراد تأثیر می‌گذارد. از یک سو موجب تولید اکسیدان‌هایی مانند ازن در تروپوسفر می‌شود. از سوی دیگر موجب تولید اسید نیتریک و بارش‌های اسیدی می‌شود. از این رو مهم است تا اطلاعات دقیقی از این آلاینده داشته باشیم [۵، ۶].

ماهواره Aura در ۱۵ جولای ۲۰۰۴ به مدار خود در جو زمین ارسال شد. سنجنده OMI یکی از ابزارهای این ماهواره با هدف مطالعه ازن جو زمین است. OMI قادر است علاوه بر مطالعه ازن اطلاعات مهمی از برخی مؤلفه‌های جوی دیگر از جمله NO_2 و SO_2 ثبت کند [۷]. مطالعات فراوانی در زمینه بررسی توزیع فضایی-زمانی و روند آلاینده NO_x با استفاده از OMI انجام شده است. کروتکوف و همکاران در سال ۲۰۱۶ با استفاده از داده‌های سنجنده OMI روند تغییرات دو آلاینده SO_2 و NO_2 را در نقاط صنعتی جهان از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۵ گزارش دادند. روندهای بدست آمده در این مطالعه غالباً در توافق با روند توسعه اقتصادی و میزان مصرف انرژی هستند. در این مطالعه خلیج فارس بعنوان یکی از مناطق با میزان بالای آلودگی SO_2 گزارش شده است [۸]. فان در ای و همکاران در سال ۲۰۰۶ با استفاده از داده‌های GOME و SCIAMACHY روند و تغییرات فصلی آلاینده NO_2 را برای بازه ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۵ برای کشور چین مطالعه و گزارش کردند. نتایج نشان دهنده روند افزایشی شدیدی بویژه در مناطق صنعتی بودند. بعلاوه مطالعات فصلی نشان دهنده اختلاف معناداری بین غرب و شرق چین بودند. شرق (غرب) چین شاهد بیش‌ترین آلودگی در زمستان (تابستان) ناشی از فعالیت‌های صنعتی (کشاورزی) است [۹]. فان در ای و همکاران در مطالعه‌ای دیگر در سال ۲۰۱۷ اثر سیاست‌های کاهش آلودگی در چین را بین سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۵ مطالعه کردند. آن‌ها در این مطالعه دریافتند که در غیاب این سیاست‌ها غلظت آلاینده‌ها برای SO_2 باید به میزان 2.5 برابر و برای NO_2 ، ۲۵ درصد بیش‌تر از مقادیر متوسط آن‌ها در سال ۲۰۱۵ می‌بود [۱۰]. شرعی‌پور ز. و همکاران در سال ۱۳۹۲ توزیع زمانی-مکانی NO_2 تروپوسفری را بین سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۲ برای ۷ شهر در ایران بررسی و گزارش کردند. نتایج این مطالعه نشان دادند که بیشینه فصلی NO_2 در فصل زمستان و کمینه آن در تابستان رخ می‌دهد. در این مطالعه برخی شرایط آب و هوایی مانند حضور پشته‌ها در تروپوسفر، پایداری ستون هوا و وارونگی دما بعنوان بخشی از عوامل مؤثر بر میزان غلظت آلاینده‌ها معرفی شده‌اند [۱۱]. شاهمحمدی ع. و همکاران در سال ۱۳۹۶ روند NO_2 را برای شهر تهران بین سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۶ مطالعه کردند. در این مطالعه همبستگی آلاینده NO_2 با برخی پارامترها مانند دما، باد و دید افقی بررسی شده است. مقدار گزارش شده برای روند تغییرات غلظت NO_2 برای پیکسل بالای تهران در این مطالعه $10 \text{ yr} / \text{cm}^2 / \text{molec} \times 10^{14} / 57.6$ است [۱۲].

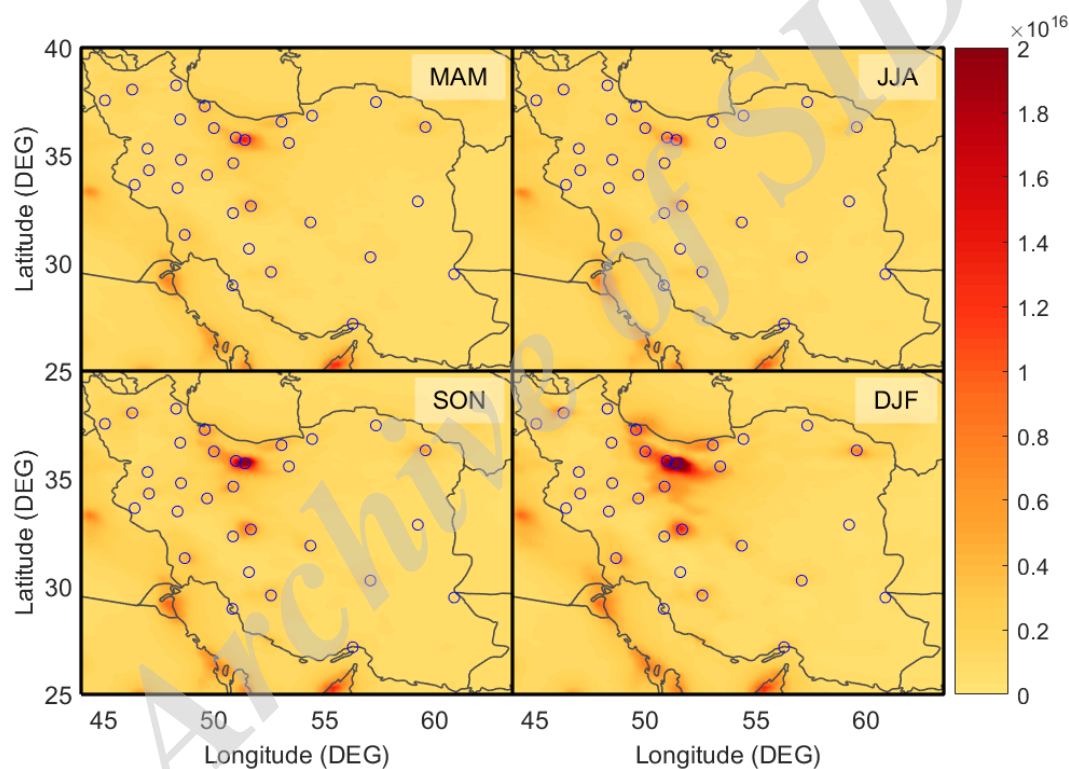
در مطالعه حاضر از داده‌های ماهانه NO_2 در لایه تروپوسفر، اندازه‌گیری شده بوسیله سنجنده OMI از اکتبر ۲۰۰۴ تا مارس ۲۰۱۸ استفاده کرده‌ایم. داده‌های اولیه دارای وضوح فضایی 125×125 / ۰٫۱۲۵ درجه هستند. ابتدا از این داده‌ها متوسط‌گیری فضایی کرده‌ایم تا وضوح 1×1 درجه بدست آوریم. با برازش مدلی شامل جملات خطی و نوسانی اطلاعات مربوط به روند تغییرات، تحول فصلی و مقادیر اولیه آلاینده استخراج شده‌اند. با تحلیل اطلاعات فصلی استخراج شده چشمه‌های آلودگی برای مناطق مختلف دسته‌بندی شده‌اند. اطلاعات فوق را برای ۳۱ مرکز استان استخراج کرده و گزارش کرده‌ایم.

۲ داده‌ها و روش مطالعه

۱.۲ داده‌ها

ماهواره Aura در تاریخ ۱۵ جولای ۲۰۰۴ در مداری حول قطبی قرار داده شد. ویژگی این نوع مدارها این است که اجرام مستقر در آن‌ها می‌توانند هماهنگ با خورشید در طول جغرافیایی جابجا شده و همزمان در راستای جنوب به شمال یا شمال به جنوب هم حرکت کنند. در این حالت ماهواره همواره خط استوا را در ساعت محلی مشخصی قطع می‌کند. در مدار خود با هر بار چرخش حول کره زمین در حرکتی رو به شمال استوا را در ساعت ۴۵ : ۱۳ محلی قطع می‌کند. سنجنده OMI عمود بر مدار حرکت Aura منطقه‌ای به عرض ۳۶۰۰ کیلومتر را جاروب می‌کند. هدف از این جاروب این است که حتی‌الامکان هر روز کل سطح زمین پوشش داده شود. اندازه پیکسل‌های زیر ماهواره ۲۴×۱۳ کیلومتر است و به سمت کنار طول این منطقه افزایش می‌یابد. داده‌برداری OMI شامل طول موج‌های فرابنفش تا مرئی (۲۷۰ تا ۵۰۰ نانومتر) است [۷].

در این مطالعه از داده‌های متوسط ماهانه OMI استفاده کرده‌ایم. این داده‌ها در وبسایت مربوطه بصورت رایگان در دسترس عموم قرار داده شده‌اند [۱۳]. برای استخراج نتایج رضایت‌بخش و قابل اعتماد ابتدا از داده‌ها متوسط‌گیری فضایی کرده‌ایم تا به وضوح ۱×۱ درجه برسیم.



شکل ۱: متوسط فصلی غلظت NO_2 مربوط به لایه تروپوسفر در ایران از دسامبر ۲۰۰۴ تا فوریه ۲۰۱۸.

۲.۲ روش مطالعه

در شکل ۱ متوسط فصلی غلظت آلاینده NO_2 لایه تروپوسفر از دسامبر ۲۰۰۴ تا فوریه ۲۰۱۸ نشان داده شده است. مراکز ۳۱ استان کشور با دایره‌های آبی مشخص شده‌اند. تغییرات فصلی غلظت NO_2 بخصوص در شهرهای بزرگ مانند تهران، کرج، اصفهان، تبریز، مشهد و قم مشخص‌تر است. مدل‌های مختلفی برای مطالعه آلاینده‌های جوی پیشنهاد شده

است. غلظت آلاینده‌های جوی مختلف کم و بیش با دوره‌های مشخصی تکرار می‌شوند. در کنار این نوسانات ممکن است مقادیر متوسط این پارامترها نیز با گذشت زمان روند مشخصی (افزایش یا کاهش) از خود نشان دهند [۸، ۱۴، ۱۵]. در این مطالعه روند و تغییرات فصلی آلاینده NO₂ تروپوسفری با استفاده از مدلی شامل جملات خطی و نوسانی به شکل مقابل بررسی شده است [۹، ۱۶]:

$$C(t) = C_I + \frac{1}{\sqrt{2}} C_T t + C_S \sin(\omega t + \phi) + N(t) \quad (1)$$

در معادله ۱، $C(t)$ غلظت برازش شده برای ماه t ام است. C_I مقدار اولیه غلظت است که از برون‌یابی خط (دو جمله اول) به ازای اکتبر ۲۰۰۴ بدست می‌آید. C_T و C_S بترتیب ضرایب روند سالانه (برحسب molec./cm²/yr) و دامنه نوسانات فصلی (برحسب molec./cm²) هستند. $N(t)$ مقدار انحراف داده‌ها از مدل در ماه t ام است که بعنوان مانده جهت بررسی معناداری ضرایب روند استفاده خواهد می‌شود. $\omega = \frac{2\pi}{T}$ فرکانس زاویه‌ای نوسانات است که با دوره تناوب ۱۲ ماه کوک شده است. ϕ فاز مربوط به جمله فصلی است. با طبقه‌بندی فاز می‌توان آلوده‌ترین ماه مربوط به هر منطقه را مشخص کرد.

تحلیل داده‌ها در این مقاله شامل دو مرحله است. ابتدا تابع معادله ۱ را بر داده‌های هر پیکسل برازش داده و پارامترهای مربوط به روند و جمله فصلی را استخراج می‌کنیم. سپس با استفاده از روش ارائه شده در مراجع [۹، ۱۷] روندهای با ضریب توافق بالای ۹۵٪ را حفظ و روندهای بی‌معنی را فیلتر می‌کنیم.

با تحلیل پارامترهای فصلی می‌توان نوع غالب و منشأ اصلی آلودگی را مشخص کرد. در تعیین نوع چشمه آلودگی، تفکیک سهم خاک از آلاینده‌های شهری و سوختن زیست توده‌ها با توجه به آلوده‌ترین ماه و برخی ملاحظات دیگر انجام می‌شود. خاک بیش‌ترین NO₂ را در تابستان آزاد می‌کند، این در حالی است که آلودگی شهری و زیست توده‌ای در زمستان بیش‌تر می‌شود. مسئله بعدی تفکیک آلاینده‌های شهری از زیست توده‌ای است. نوسانات فصلی آلودگی شهری و زیست توده‌ای شدید است. اما آلودگی شهری افت و خیز کم‌تری در قیاس با آلودگی زیست توده‌ای از خود نشان می‌دهد؛ چرا که سهم غالب آلودگی شهری از حمل و نقل و ترافیک ناشی می‌شود و این سهم در تمام فصول با شدت تقریباً یکنواخت وجود دارد [۳]. از این نکته برای تفکیک این دو نوع آلاینده استفاده خواهیم کرد.

بیشینه آلودگی شهری و زیست توده‌ای را نمی‌توان با آلوده‌ترین ماه به تنهایی تفکیک کرد. برای تفکیک این چشمه‌ها پارامتری با عنوان دامنه تغییرات سالانه به شکل $\frac{C_S}{\langle C_y \rangle}$ تعریف می‌کنیم. C_S دامنه نوسانات فصلی در معادله ۱ است. $\langle C_y \rangle$ نیز متوسط سالانه آلاینده است.

ماندگاری NO₂ در جو به میزان تابش نور بستگی دارد. میزان تابش نور خود وابسته به طول روز است. طول روز تابعی از عرض جغرافیایی است. بنابراین انتظار می‌رود عرض جغرافیایی خود بر ماندگاری NO₂ در جو و دامنه تغییرات سالانه آن تأثیرگذار باشد. این اثر را به شکل تابعی چند جمله‌ای در نظر گرفته و پارامتر مرجع $V_{max} = 0.5 + 0.5 \times (\frac{\theta}{\theta_{pol}})^2$ را برای مقایسه با دامنه تغییرات سالانه در نظر می‌گیریم. در این رابطه θ عرض جغرافیایی مربوط به هر پیکسل و θ_{pol} عرض جغرافیایی دایره قطبی و حدود ۶۶° است. دامنه تغییرات سالانه کم‌تر از V_{max} بعنوان آلودگی شهری و بیش‌تر از V_{max} آلودگی زیست توده‌ای در نظر گرفته خواهند شد [۱۶، ۱۸]. معیارهای دسته‌بندی منشأ آلودگی در جدول ۱ ارائه شده‌اند. در ادامه نتایج تحلیل داده‌های NO₂ تروپوسفری از اکتبر ۲۰۰۴ تا مارس ۲۰۱۸ ارائه شده است.

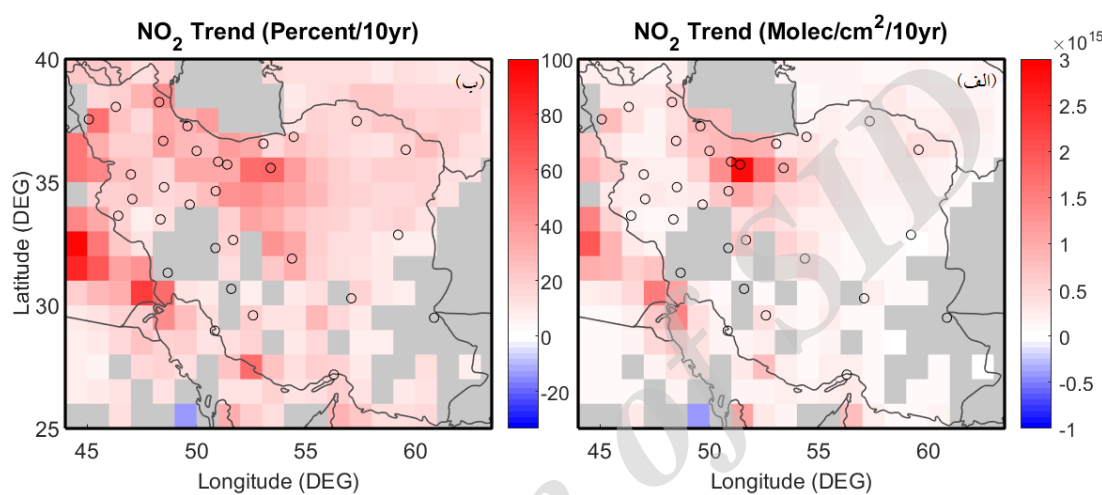
جدول ۱: معیارهای تعیین نوع چشمه آلودگی.

نوع چشمه	آلوده‌ترین ماه	دامنه سالانه
شهری	Dec – Feb	$< V_{max}$
زیست توده‌ای	Jan – Apr	$> V_{max}$
خاک	Jun – Sep	–

۳ نتایج

۱.۳ روند تغییرات غلظت

نتایج مربوط به روند تغییرات غلظت آلاینده NO_2 در شکل ۲ نشان داده شده است. در این شکل روندهای با ضریب اطمینان بیش از ۹۵٪ نشان داده شده‌اند. رنگ طوسی بیان‌گر مناطقی است که روند معناداری در آن‌ها مشاهده نشده است. مشاهده می‌شود که هیچ نقطه‌ای در داخل ایران طی دوره مورد مطالعه با روند کاهش غلظت مواجه نبوده است. شکل چپ تغییرات غلظت در یک دهه و شکل راست درصد این تغییرات نسبت به مقدار اولیه آن در اکتبر ۲۰۰۴ را نشان می‌دهد. مشخص است که بیش‌ترین افزایش غلظت در شهرهای تهران و کرج رخ داده است. البته از نظر درصد تغییرات پیکسل‌های مجاور شهر اهواز بیش‌ترین روند را طی ۱۴ سال مورد مطالعه داشته‌اند.

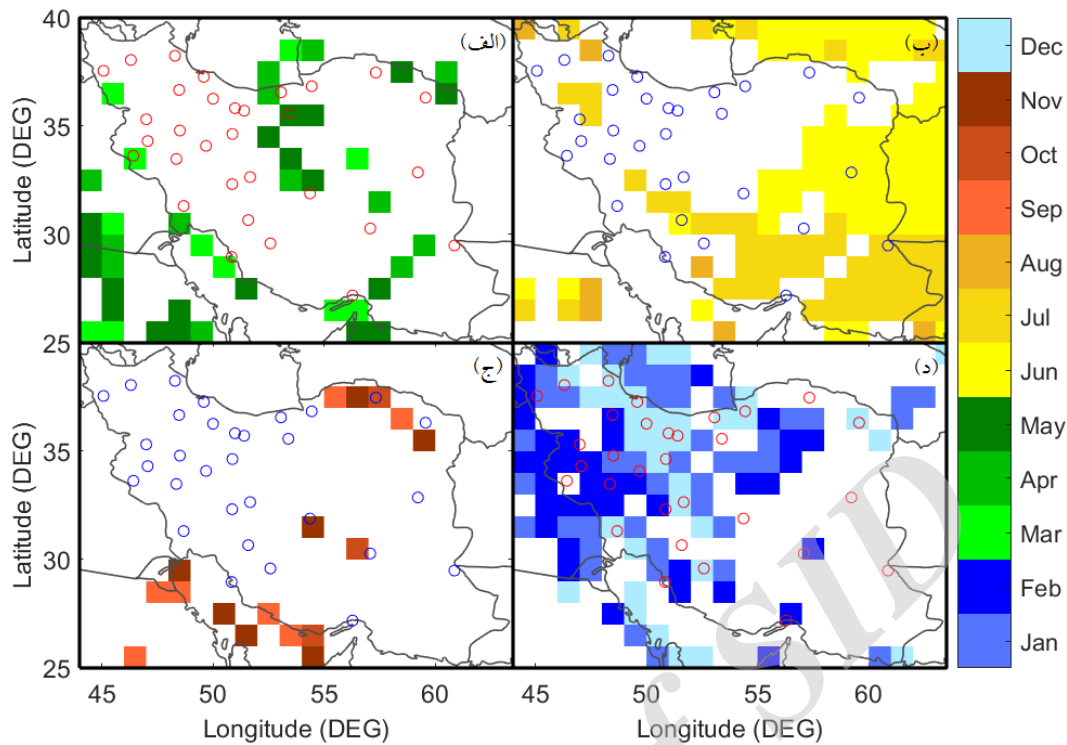


شکل ۲: توزیع مربوط به (الف) روند و (ب) درصد روند غلظت دی‌اکسید نیترژن تروپوسفری به ازای هر ۱۰ سال در ایران طی دوره اکتبر ۲۰۰۴ تا مارس ۲۰۱۸. درصد روند از مقایسه روندها با مقادیر اولیه برای هر پیکسل در معادله ۱ بدست آمده‌اند. طیف رنگی برای روندهای با ضریب اطمینان بیش‌تر از ۹۵٪ بکار رفته است. رنگ طوسی مشخص‌کننده مناطق با روندهای بی‌معنی است.

مقادیر مربوط به غلظت اولیه در اکتبر ۲۰۰۴، روند تغییرات غلظت و درصد این روندها نسبت به مقدار اولیه برای مراکز ۳۱ استان ایران در جدول ۲ ارائه شده‌اند. شهرها براساس غلظت اولیه دی‌اکسید نیترژن تروپوسفری از زیاد به کم رده‌بندی شده‌اند. در پیکسل مربوط به اهواز روند معناداری مشاهده نشده است. اما پیکسل جنوب اهواز افزایشی در حدود ۶۵/۲۹ درصد در ۱۰ سال نشان می‌دهند. این سریع‌ترین درصد رشد در بین تمام شهرهای ایران است. در این مناطق شهرهایی مانند آبادان، خرمشهر، بندر ماهشهر و بندر امام خمینی قرار دارند. در حدود همین مقدار افزایش غلظت در جنوب شرق بوشهر (عرض جغرافیایی ۲۷ الی ۲۸ و طول جغرافیایی ۵۲ الی ۵۳) جایی که دو شهر جم و عسلویه قرار دارند مشاهده می‌شود. افزایش غلظت در این مناطق احتمالاً به ساخت و توسعه پالایشگاه‌های نفت و گاز مربوط است [۸]. علاوه بر اهواز که در مورد آن صحبت شد، در سه شهر زاهدان، یاسوج و شهرکرد نیز روند معناداری مشاهده نشده است. تنها منطقه با روند معنادار منفی در نقشه شهر الهفوف عربستان با روند ۱۴- درصد در ۱۰ سال است.

۲.۳ تحول فصلی آلودگی

در شکل ۳ آلوده‌ترین ماه مناطق مختلف نشان داده شده است. شکل شامل ۴ بخش مربوط به فصل‌های مختلف است. هر بخش با طیف رنگی مناسب فصل مربوطه مشخص شده است. دقت کنید که اکثر نقاط بیابانی بیشینه غلظت NO_2 را در تابستان و مناطق شهری بیش‌ترین غلظت را در زمستان تجربه می‌کنند. در بین شهرها نیز بزرگترین شهرها (تهران، کرج، اصفهان، تبریز، رشت، مشهد، قزوین، قم و اهواز) همگی در ماه دسامبر بیش‌ترین آلودگی را تجربه می‌کنند. در ستون



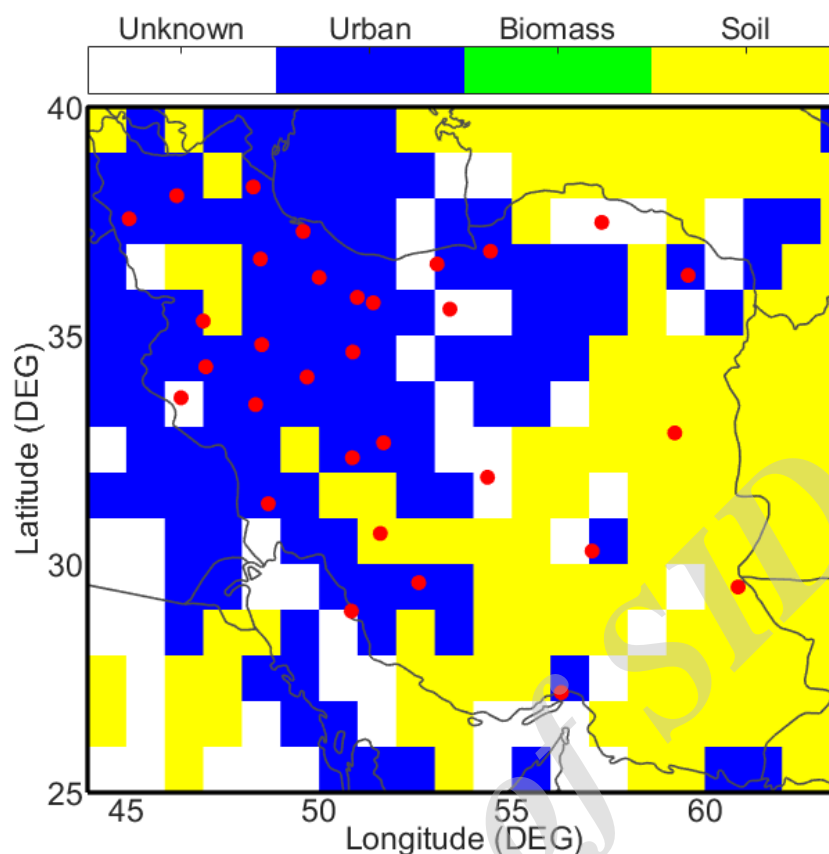
شکل ۳: توزیع آلوده‌ترین ماه از نظر آلاینده NO_2 برای فصل‌های (الف) بهار، (ب) تابستان، (ج) پاییز و (د) زمستان. دقت کنید که اکثر شهرهای مشخص شده در شکل بیش‌ترین آلودگی NO_2 را در فصل زمستان تجربه می‌کنند.

آخر جدول ۲ آلوده‌ترین ماه‌های مربوط به مراکز استان‌ها نشان داده شده‌اند. از ۳۱ مرکز استان ۲ شهر در بهار، ۳ شهر در تابستان، ۲ شهر در پاییز و ۲۴ شهر در زمستان بیش‌ترین آلودگی را تجربه می‌کنند. علاوه بر شهرهایی که در این جا مطالعه شده‌اند، چابهار، عشق‌آباد، مناطق شهری حاشیه جنوبی خلیج فارس، کویت و عراق نیز بطور غالب بیش‌ترین آلودگی را در زمستان تجربه می‌کنند.

سهم غالب آلاینده در مناطق شهری مربوط به ترافیک، حمل و نقل شهری و نیروگاه‌های تأمین انرژی است. این چشمه‌ها در تمامی سال بطور یکنواخت وجود دارند. سرمای زمستان موجب مصرف انرژی بیشتر و تولید آلاینده‌های بیش‌تری می‌شود. نکته دیگر این است که به علت گرمای زیاد تابستان برخی فرآیندهای شیمیایی در جو موجب تولید ازن تروپوسفری شده و ماندگاری اکسیدهای نیتروژن‌دار را کاهش می‌دهند. این فرآیند در زمستان با شدت کم‌تری رخ می‌دهد. از این رو ماندگاری اکسیدهای نیتروژن‌دار در جو در فصل زمستان بالاتر است. پدیده‌های جوی مانند کاهش سرعت جریان‌های جوی و وقوع وارونگی دما در فصل زمستان موجب می‌شوند تا آلودگی به تله افتاده و قادر به خروج از مناطق شهری نباشد. مجموعه عوامل فوق موجب می‌شوند تا در فصل زمستان در مناطق شهری شاهد بیشینه‌ای در غلظت آلاینده‌ها (و بطور مشخص NO_2 در این مطالعه) باشیم [۱۹].

۳.۳ تعیین نوع آلودگی

تعیین نوع آلودگی طبق معیارهای ارائه شده در جدول ۱ انجام شده است. دامنه تغییرات سالانه در ستون پنجم جدول ۲ گزارش شده است. برای منطقه مورد مطالعه در این مقاله مقدار V_{max} از ۵۷٪ تا ۶۸٪ متغیر است. بیش‌ترین مقدار دامنه تغییرات طبق جدول ۲ با مقدار ۵۳٪ مربوط به رشت است. این مقدار نیز از کم‌ترین مقدار V_{max} کوچک‌تر است؛ در نتیجه نوع آلودگی غالب تمام مراکز استانی که بیشینه آلودگی‌شان در زمستان رخ می‌دهد شهری تشخیص داده شده است. هیچ موردی از آلودگی ناشی از سوختن زیست توده‌ها تشخیص داده نشده است. با استفاده از معیارهای جدول ۱ موارد



شکل ۴: توزیع نوع آلودگی غالب NO_2 در مناطق مختلف ایران.

مربوط به آلودگی ناشی از فعالیت خاک هم مشخص شده‌اند. در شکل ۴ توزیع نوع آلودگی در مناطق مختلف نمایش داده شده است. در مناطق مشخص شده با رنگ سفید هیچ نوع آلودگی غالبی تشخیص داده نشده است. رنگ‌های آبی، سبز و زرد بترتیب آلودگی شهری، زیست توده‌ای و خاک را نشان می‌دهند. طبق جدول ۲ آلودگی غالب در ۲۴ مورد از نوع شهری و در ۳ مورد از نوع گسیل از خاک است. در ۴ شهر هم آلاینده غالبی تشخیص داده نشده است. دقت کنید که در این مطالعه با توجه به ملاحظات منطقه‌ای سهم NO_2 ناشی از رعدوبرق مطالعه نشده است. سهم NO_2 ناشی از رعدوبرق غالباً در مناطق پرباران بارز است.

۴ بحث

داده‌های NO_2 مربوط به لایه تروپوسفر از اکتبر ۲۰۰۴ تا مارس ۲۰۱۸ بطور آماری بررسی شدند. روند تغییرات غلظت آلاینده مورد نظر برای ایران استخراج و گزارش شد. نتایج مربوط به روند تغییرات نشان می‌دهند در غالب مناطق کشور بخصوص در مناطق شهری روند افزایشی معنادار وجود داشته است. افزایش تعداد وسایل نقلیه همراه با کاهش کیفیت سوخت مورد استفاده در کنار افزایش مصرف انرژی می‌تواند از عوامل اصلی افزایش آلودگی در مناطق شهری باشند [۲۰، ۲۱]. البته در شهرهای جنوبی توسعه پالایشگاه‌های نفت و گاز و گسیل آلاینده‌ها از این مناطق نیز از عوامل افزایش آلودگی محسوب می‌شوند [۸].

با بررسی تغییرات فصلی، آلوده‌ترین ماه برای هر منطقه تعیین شد. غالب مراکز استان‌های کشور در زمستان بخصوص در ماه دسامبر آلوده‌تر از سایر زمان‌ها هستند. از دلایل مهم این امر می‌توان به تولید آلاینده بیش‌تر ناشی از مصرف انرژی

جدول ۲: اطلاعات مربوط به غلظت اولیه، روند تغییرات و آلوده‌ترین ماه مربوط به مراکز استان‌های ایران. * نتایج مربوط به پیکسل جنوب اهواز گزارش شده‌اند.

شهر	غلظت اولیه ($10^{15} \frac{\text{Molec.}}{\text{cm}^3}$)	تغییرات غلظت ($10^{14} \frac{\text{Molec.}}{\text{cm}^3 \cdot 10 \text{yr}}$)	درصد تغییرات (درصد/10yr)	دامنه تغییرات سالانه	آلوده‌ترین ماه	چشمه غالب
تهران	۸/۳۵	۲۸/۲	۳۳/۷۵	۰/۴۰	Dec	شهری
کرج	۶/۱۶	۲۰/۸	۳۳/۷۲	۰/۳۶	Dec	شهری
اصفهان	۳/۸۹	۶/۵۴	۱۶/۸۱	۰/۲۸	Dec	شهری
قزوین	۲/۸۹	۷/۸۲	۲۷/۱۰	۰/۳۶	Dec	شهری
رشت	۲/۷۵	۸/۵۴	۳۱/۰۶	۰/۵۳	Dec	شهری
قم	۲/۵۱	۸/۳۹	۳۳/۸۸	۰/۲۸	Dec	شهری
ساری	۲/۳۷	۵/۹۴	۲۴/۱۳	۰/۲۴	Dec	شهری
اهواز*	۲/۳۱	۱۵/۱	۶۵/۲۹	۰/۱۳	Dec	شهری
مشهد	۲/۲۱	۳/۹۲	۱۷/۷۱	۰/۲۳	Dec	شهری
شیراز	۱/۹۵	۴/۰۲	۲۰/۶۸	۰/۱۳	Dec	شهری
اراک	۱/۷۲	۳/۰۲	۱۷/۵۱	۰/۱۹	Jan	شهری
سمنان	۱/۶۲	۹/۶۵	۵۹/۶۲	۰/۴۰	May	-
بندرعباس	۱/۴۸	۲/۶۸	۱۸/۱۰	۰/۰۶	Feb	شهری
تبریز	۱/۴۶	۳/۲۵	۲۲/۳۶	۰/۱۷	Dec	شهری
گرگان	۱/۴۵	۳/۳۷	۲۳/۲۹	۰/۱۹	Dec	شهری
ارومیه	۱/۴۲	۷/۷۶	۵۴/۷۴	۰/۲۵	Jan	شهری
همدان	۱/۳۳	۲/۱۹	۱۶/۵۰	۰/۱۰	Jan	شهری
شهرکرد	۱/۳۲	-	-	۰/۲۳	Feb	شهری
بوشهر	۱/۲۸	۱/۵۶	۱۲/۱۶	۰/۰۵	Feb	شهری
زنجان	۱/۲۵	۴/۴۳	۳۵/۴۴	۰/۱۸	Feb	شهری
کرمانشاه	۱/۲۴	۲/۶۰	۲۰/۹۳	۰/۰۹	Feb	شهری
اردبیل	۱/۲۰	۵/۳۰	۴۴/۲۵	۰/۲۱	Dec	شهری
یزد	۱/۲۰	۳/۸۱	۳۱/۸۰	۰/۱۰	Nov	-
بجنورد	۱/۱۵	۲/۱۴	۱۸/۵۸	۰/۰۴	Oct	-
کرمان	۱/۱۳	۱/۹۳	۱۷/۰۲	۰/۱۱	Feb	شهری
خرم‌آباد	۱/۱۰	۱/۴۰	۱۲/۷۱	۰/۰۸	Feb	شهری
سنندج	۱/۰۵	۲/۵۰	۲۴/۰۲	۰/۱۲	Feb	شهری
ایلام	۱/۰۵	۱/۷۵	۱۶/۷۱	۰/۰۸	Mar	-
یاسوج	۰/۹۲	-	-	۰/۱۰	Jun	خاک
زاهدان	۰/۸۱	-	-	۰/۱۳	Jul	خاک
بیرجند	۰/۷۸	۰/۹۶	۱۲/۲۳	۰/۱۶	Jun	خاک

بیش‌تر در فصل زمستان، ماندگاری بیش‌تر NO_2 و گیر افتادن آلودگی در مناطق شهری در اثر پدیده‌های جوی اشاره کرد. شهرهای کوچک‌تر که دارای ترافیک کم‌تری هستند یا زمستان سردی را تجربه نمی‌کنند در فصل سرد کم‌تر دچار آلودگی می‌شوند. بیشینه مقدار NO_2 در چنین مناطقی در فصل تابستان رخ می‌دهد.

بیش‌ترین گسیل NO_2 از خاک در تابستان رخ می‌دهد. در فصل زمستان سهم آلودگی شهری و آلودگی ناشی از سوختن زیست توده‌ها افزایش می‌یابد. آلودگی ناشی از سوختن زیست توده‌ها در فصل گرم بسیار کاهش یافته و در فصل سرد افزایش می‌یابد. اما آلودگی شهری در هر دو فصل به میزان نسبتاً زیادی تولید می‌شود. از این رو نوسانات فصلی آلودگی زیست توده‌ای بارزتر از نوسانات فصلی آلودگی شهری است. البته نقش تابش خورشید در ماندگاری NO_2 در جو نیز باید در نظر گرفته شود. با در نظر گرفتن این معیارها نوع غالب آلودگی در مناطق مختلف تعیین شدند. در اکثر مناطق مرکز به سمت شمال غرب ایران که تجمع شهرها بیش‌تر است آلاینده غالب از نوع شهری تشخیص داده شد. در مناطق با تراکم شهری کم‌تر یعنی از مرکز به سمت جنوب شرق غالب NO_2 از خاک آزاد می‌شود. حتی در این مناطق هم شهرهایی مانند شیراز، کرمان، بندرعباس و چابهار از نظر آلودگی غالب، شهری تشخیص داده شده‌اند.

تحلیل سری زمانی داده‌های ماهواره‌ای اطلاعات مهمی از آلودگی در منطقه‌ای وسیع در مدت زمانی نسبتاً طولانی در اختیار ما قرار می‌دهد. با مطالعه دیگر آلاینده‌ها می‌توان اطلاعات جامعی از توزیع فضایی زمانی آلودگی و روند طولانی مدت آن‌ها بدست آورد.

تقدیر و تشکر

این مطالعه در قالب طرح پژوهشی با عنوان مطالعه توزیع آلاینده جوی NO_2 در ایران از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۴ میلادی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و مدل‌های عددی جوی انجام شده است. نویسندۀ مقاله لازم می‌داند کمال تشکر و قدردانی خود را از حمایت‌های بی‌دریغ دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان در اجرای این طرح ابراز دارد.

مراجع

- [1] IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, doi:10.1017/CBO9781107415324.
- [2] Kampa M., Castanas E., 2008, Human health effects of air pollution, *Env. Pol.*, 151, 362-367.
- [3] Hall S. J. and Matson P. A., 1996, NO_x emissions from soil: Implications for air quality modeling in agricultural regions, *Annu. Rev. Energy Environ.* 21
- [4] Kumar A., 2010, Air Quality, Published by SCIYO, Croatia
- [5] Keuken M., Roemer M., Van den Elshout S., 2009, Trend analysis of urban NO_2 concentrations and the importance of direct NO_2 emissions versus ozone/ NO_x equilibrium, *Atm. Env.* 43, 4780-4783.
- [6] Williams E. J. and Fehsenfeld F. C., 1991, Measurement of soil nitrogen oxide emissions at three north American ecosystems, *JGR* 96, 1033-1042
- [7] <http://projects.knmi.nl/omi/research/documents/index.php>
- [8] Krotkov N. A., et al., 2016, Aura OMI observations of regional SO_2 and NO_2 pollution changes from 2005 to 2015, *Atmos. Chem. Phys.* 16

- [9] Van der A. R. J., Peters D. H. M. U., Eskes H., Boersma K. F., Van Roozendael M., De Smedt I. and Kelder H. M., 2006, Detection of the trend and seasonal variation in tropospheric NO₂ over China, JGR 111, D12317.
- [10] Van der A. R. J., Mijling B., Ding J., Koukouli M. E., Liu F., Li Q., Mao H. and Theys N., 2017, Cleaning up the air: effectiveness of air quality policy for SO₂ and NO_x emissions in China, Atmos. Chem. Phys. 17
- [۱۱] شرعی پور ز،، علی اکبری بیدختی ع.، ۱۳۹۳، بررسی وضعیت NO₂ تروپوسفری ایران طی سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۲، محیط‌شناسی، دوره ۴۰.
- [۱۲] شاه‌محمدی ع.، بیات ع.، مشهدی‌زاده ملکی س.، ۱۳۹۶، بررسی رفتار و روند دی‌اکسید نیتروژن هوای تهران با استفاده از اندازه‌گیری‌های سنجنده OMI، مجله نجوم و اختر فیزیک ایران، دوره ۴.
- [13] Boersma, K. F., Eskes H. J., Dirksen R. J., van der A R. J., Veefkind J. P., Stammes P., Huijnen V., Kleipool Q. L., Sneep M., Claas J., Leitao J., Richter A., Zhou Y. and Brunner D., 2011, An improved retrieval of tropospheric NO₂ columns from the Ozone Monitoring Instrument, Atmos. Meas. Tech. 4, 1905-1928
- [14] Lu Z., Streets D. G., de Foy B., Lamsal L. N., Duncan B. N. and Xing J., 2015, Emissions of nitrogen oxides from US urban areas: estimation from Ozone Monitoring Instrument retrievals for 2005-2014, Atmos. Chem. Phys. 15
- [15] Miyazaki K., Eskes H., Sudo K., Boersma K. F., Bowman K. and Kanaya Y., 2017, Decadal changes in global surface NO_x emissions from multi-constituent satellite data assimilation, Atmos. Chem. Phys. 17
- [16] Van der A. R. J., Eskes H. J., Boersma K. F., Van Noije T. P. C., Van Roozendael M., De Smedt I., Peters D. H. M. U. and Meijer E. W., 2008, Trends, seasonal variability and dominant NO_x source derived from a ten year record of NO₂ measured from space, JGR 113, D04302
- [17] Weatherhead E. C., Reinsel G. C., Tiao G. C., Meng X., Choi D., Cheang W., Keller T., DeLuisi J., Wuebbles D. J., Kerr J. B., Miller A. J., Oltmans S. J. and Frederick J. E., 1998, Factors affecting the detection of trends: Statistical considerations and applications to environmental data, JGR 103, 17149-17161
- [18] Jaegle L., Steinberger L., Martin R. V. and Chance K., 2005, Global partitioning of NO_x sources using satellite observations: Relative roles of fossil fuel combustion, biomass burning and soil emissions, Faraday Discuss. 130, 407-423
- [19] Semple R. D., Song F. and Gao Y., 2012, Seasonal characteristics of ambient nitrogen oxides and ground-level ozone in metropolitan northeastern New Jersey, Atmos. Pol. Res. 3, 247-257
- [20] Reuters Staff, 2010, Quality of Iran petrol below global standards-report, Energy & Oil News
- [21] Ghadiri Z., Rashidi Y. and Broomandi P., 2017, Evaluation Euro IV of effectiveness in transportation systems of Tehran on air quality: Application of IVE model, Pollution 3(4), 639-653