

بررسی تغییرات آلاینده‌های معلق جوی در کلان‌شهرهای عمده ایران با استفاده از عمق نوری تصاویر ماهواره‌ای

محمود احمدی*، داود درویش

گروه آب و هواشناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۴

چکیده

تحلیل‌های جهانی از ذرات معلق ($PM_{2.5}$) نشان می‌دهد که در معرض قرار گرفتن مقابل این ذرات، پنجمین عامل خطر مرگ میر در جهان است. هدف از این تحقیق بررسی تغییرات آلاینده‌های معلق جوی در کلان‌شهرهای تهران، کرج، اصفهان، مشهد و شیراز با استفاده از تلفیق عمق نوری تصاویر ماهواره‌ای است. روش کار ابتدا از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده‌های MODIS، MISR و SeaWifs استفاده شد سپس برای صحت‌سنجی، از داده‌های ایستگاه‌های کنترل کیفی کلان‌شهرهای ایران و شاخص‌های آماری استفاده شد. همچنین برای تحلیل روند، روش من-کندال و شیب سنس بکار گرفته شد. نتایج نشان داد تغییرپذیری سالیانه ذرات معلق ($PM_{2.5}$) طی دوره آماری ۲۰۱۸-۲۰۰۰ روندی افزایشی را در تمامی کلان‌شهرهای ایران دارد. شهرستان تهران بیشینه میزان $PM_{2.5}$ را نشان داد که بیشتر از سایر کلان‌شهرها است. بعدازآن کرج و اصفهان بیشترین مقدار را به خود اختصاص دادند. همچنین مقدار روند و شیب روند $PM_{2.5}$ در تمامی کلان‌شهرهای روند افزایشی داشت. این مقدار روند، برای تهران در سطح آماری ۰/۰۵ معنی‌دار است؛ به طوری که نمره Z آزمون من-کندال برای تهران ۱/۹۹۸ به دست آمده است. کمترین مقدار روند ذرات معلق در کلان‌شهر اصفهان با نمره Z آزمون من-کندال ۰/۰۲ است. اثرات مناطق شهری و تغییرات ارتفاعی بیش‌ترین تغییرات فضایی مقدار $PM_{2.5}$ برآورد شده را نشان می‌دهند. مقدار $PM_{2.5}$ در تمامی کلان‌شهرها دارای تنوع فضایی بالایی بود؛ علت این تغییرپذیری به دلیل نزدیکی به منابع اصلی گردوغبار و آلاینده‌های شهری و صنعتی سوی دیگر است.

کلید واژگان: آلاینده جوی، ماهواره، توزیع فضایی، مک-کندال، کلان‌شهر ایران

مقدمه

اجرای سیاست‌های توسعه شهری پایدار و ابتکار برای رشد هوشمندانه، به دلیل برخی از عوامل به تأخیر افتاده است. مهم‌ترین عامل در بین آن‌ها، فقدان برنامه‌ریزی شهری شفاف و عملی به دلیل کمبود اطلاعات مکانی است (اتحادیه بین‌المللی نقشه‌برداران^۱، ۲۰۱۰). طبق گزارش‌ها، ۷۰ درصد رشد شهری در کشورهای در حال توسعه برنامه‌ریزی نمی‌شود. تلاش‌ها برای تولید یا به‌روزرسانی اطلاعات مکانی موجود برای اهداف برنامه‌ریزی توسط هزینه بالای داده‌های جغرافیایی به‌ویژه نقشه‌برداری یا عکسبرداری هوایی با مانع مواجه شده است (Conitz, 2000). با این وجود، افزایش به‌کارگیری فناوری سنجش‌ازدور (داده‌های ماهواره‌ای با وضوح بالا و متوسط) برای پایش پوشش / کاربری اراضی شهری در دهه‌های گذشته مورد توجه قرار گرفته است (Yuan et al., 2005). داده‌های ماهواره‌ای با وضوح بالا و متوسط برای شناسایی الگوهای کاربری / پوشش اراضی در چشم‌اندازهای شهری در مقیاس منطقه‌ای مفید است (Kamusoko, 2017). استفاده از فناوری سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در مدیریت شهری بسیار مهم است و می‌تواند در تهیه نقشه‌های الگو و آینده‌نگری در فضای شهری و آمایش سرزمین جهت مدیریت برنامه‌ریزی بکار رود (Nickho et al., 2015).

در زمینه آلودگی‌های هوا سپهری نیز مطالعات بسیاری انجام شده است که به برخی از این مطالعات در ادامه اشاره خواهد شد. Van Donkelaar و همکاران (۲۰۱۴)، با استفاده از داده‌های مشاهداتی ماهواره، غلظت ذرات معلق را در سطح جهانی مورد ارزیابی قراردادند. نتایج آن‌ها نشان داد که داده‌های ماهواره‌ای در برآورد $PM_{2.5}$ از کارایی بالایی برخوردار می‌باشند. Sorek-Hamer (۲۰۱۵)، به ارزیابی غلظت $PM_{2.5}$ با استفاده از داده‌های سنجنده MODIS در دو منطقه فلسطین و دره San Joaquin در کالیفرنیا مرکزی ایالات متحده آمریکا پرداختند. نتایج نشان داد که الگوریتم

دیپ‌بلو (DB) سنجنده MODIS می‌تواند $PM_{2.5}$ را به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک برآورد کند. Van Donkelaar (۲۰۱۶) به برآورد جهانی ذرات معلق با استفاده از روش آماری-ژئوفیزیکی ترکیبی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای، مدل‌ها و داده‌های مشاهداتی پرداختند. آن‌ها گزارش کردند که برآورد $PM_{2.5}$ بر اساس داده‌های عمق نوری هواویزهای ماهواره‌ای نتیجه بسیار مناسبی را ارائه می‌دهد به طوری که R^2 به دست آمده بین AOD و $PM_{2.5}$ ۰/۸۱ بوده است. Khoshsima و همکاران (۲۰۱۵) به محاسبه تمرکز ذرات معلق (PM_{10}) در جو با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور، ایستگاه‌های زمینی و پارامترهای هواشناسی با کاربست شبکه عصبی مصنوعی طی دوره دسامبر ۲۰۰۹ تا سپتامبر ۲۰۱۰ در منطقه زنگان پرداختند و به این نتیجه رسیدند که ضریب همبستگی بین مقادیر مشاهداتی با مقادیر پیش‌بینی شده برای روش همبستگی ساده چند متغیره و شبکه عصبی به ترتیب برابر ۰/۶۲ و ۰/۸۲ است همچنین بیان کردند که استفاده از شبکه عصبی قادر به پیش‌بینی روابط پیچیده بین پارامترهای ورودی و خروجی است، در مقایسه با روش همبستگی ساده چند متغیره، برای برآورد تمرکز PM_{10} مناسب‌تر است.

Mohammadzadeh و Ghorbanzadeh (۲۰۱۸) با استفاده از رگرسیون‌های غیرخطی به برآورد غلظت و تولید نقشه پراکندگی ذرات معلق کوچک‌تر از ۱۰ میکرون با استفاده از تصاویر سنجش‌ازدور و اندازه‌گیری‌های زمینی در شهر تهران برای ۸ روز در سال ۱۳۹۶ پرداختند نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که میانگین مجذور همبستگی رگرسیون‌های خطی، نمایی، لگاریتمی و توانی به ترتیب برابر با ۰/۵۹۱۲، ۰/۵۸۲۶، ۰/۵۸۰۸ و ۰/۵۷۸۲ است و رگرسیون نمایی بهترین عملکرد را برای تولید نقشه پراکندگی آلودگی داشته است.

جمع‌بندی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که مطالعات انجام شده در زمینه آلودگی جوی شهری در ایران به شکل

¹ International Union of Surveyors

مجزا مورد مطالعه قرار گرفته‌اند و در بررسی‌های انجام‌شده نیز کلان‌شهرهای مختلف جداگانه مطالعه شده‌اند و تاکنون یک نگاه بلندمدت از آلودگی‌ها سطحی شهری انجام نشده است. این پژوهش با نگاه ترکیبی ۵ کلان‌شهر رسمی ایران را کانون توجه خود قرار داده است و تلاش دارد تا با استفاده از جدیدترین داده‌های ماهواره‌ای و بازکاوی شده، یک دیدگاه ترکیبی در حوزه آب‌وهوای شهری ارائه نماید. در آخرین تحلیل‌های جهانی از ذرات معلق (در سال ۲۰۱۵) مشخص شد که قرار داشتن در معرض $PM_{2.5}$ پنجمین رتبه عامل مرگ‌ومیر بوده و مرگ $4/2$ میلیون نفر به دلیل بیماری قلبی و سکنه، سرطان ریه، بیماری مزمن ریه و عفونت‌های تنفسی نیز تاکنون به ثبت رسیده است. 254000 مرگ دیگر نیز به‌قرار داشتن در معرض ازن و تأثیر آن بر بیماری مزمن ریه نسبت داده شده است. $PM_{2.5}$ نسبت به عوامل خطر شناخته‌شده‌تر مانند مصرف الکل یا عدم فعالیت بدنی مرگ‌ومیر بیشتری را به خود اختصاص داده و میزان مرگ مرتبط با آن مشابه با مصرف سدیم زیاد و کلسترول بالا بوده است. با توجه به موارد ذکر شده و اهمیت ذرات معلق، هدف از این تحقیق پایش و بررسی تغییرات آلاینده‌های معلق جوی در کلان‌شهرهای عمده ایران با استفاده از تلفیق عمق نوری تصاویر ماهواره‌ای $MISR$ ، $SeaWiFS$ و $MODIS$ است.

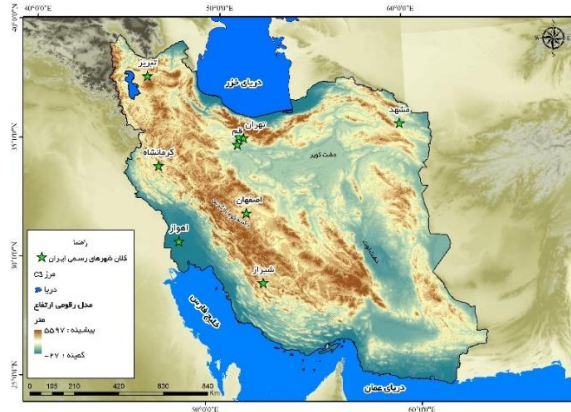
مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه: در این پژوهش ۵ کلان‌شهر تهران، مشهد، اصفهان، کرج و شیراز مورد مطالعه قرار گرفت (شکل ۱). تهران پرجمعیت‌ترین شهر و پایتخت ایران، مرکز استان تهران و شهرستان تهران است. این شهر با 8693706 نفر جمعیت، بیست و چهارمین شهر پرجمعیت جهان و پرجمعیت‌ترین شهر غرب آسیا به شمار می‌رود. از دید ناهمواری‌های طبیعی، تهران به دو ناحیه دشتی و کوهپایه‌ای البرز تقسیم می‌شود و گستره کنونی آن از ارتفاع ۹۰۰ تا 1800 متری از سطح دریا امتداد یافته است. تهران دارای

اقلیم نیمه‌خشک است. مشهد کلان‌شهری در شمال شرقی ایران و مرکز استان خراسان رضوی است. شهر مشهد در حوزه رودخانه کشف رود و در دشت مشهد بین کوه‌های هزار مسجد و بینالود گسترده شده است. بیشینه ارتفاع شهر مشهد 1150 متر و کمینه آن 950 متر است. شهر مشهد دارای آب و هوای متغیر، اما معتدل و متمایل به سرد و خشک است و از تابستان‌های گرم و خشک و زمستان‌های سرد و مرطوب برخوردار است. اصفهان شهری تاریخی در مرکز ایران است. این شهر مرکز استان اصفهان است. اصفهان، سومین شهر بزرگ ایران است. سطح شهر از سطح عمومی دریاها حدود 1570 متر ارتفاع دارد و در قسمت شمالی و شرقی به کویر محدود می‌گردد و در قسمت غربی و جنوبی نیز به سلسله کوه‌های زاگرس منتهی می‌شود. کرج مرکز استان البرز، مرکز شهرستان کرج و یکی از کلان‌شهرهای ایران است و به‌عنوان چهارمین شهر بزرگ ایران شناخته می‌شود. کرج یک شهر کوهپایه‌ای است که در دامنه رشته کوه‌های البرز و در ارتفاع 1300 متر بالاتر از سطح دریا قرار دارد. در مقیاس کلی، منطقه کرج همانند سایر بخش‌های استان البرز در فصول سرد سال تحت تأثیر سیستم‌های شمالی و شمال‌غربی و غربی به‌ویژه جنوب غربی بوده و ریزش‌های جوی آن‌که از ماه‌های آبان و آذر آغاز و تا اواسط اردیبهشت‌ماه ادامه دارد

شیراز از دیگر کلان‌شهرهای ایران و مرکز استان فارس در جنوب کشور است. جمعیت شیراز در سال 1395 خورشیدی، بالغ بر 1565572 نفر بوده که این رقم با احتساب جمعیت ساکن در حومه شهر به 1869001 می‌رسد. شیراز پنجمین شهر بزرگ و پرجمعیت ایران و پرجمعیت‌ترین شهر جنوب کشور به‌شمار می‌رود. این شهر بخش مرکزی استان فارس، در ارتفاع 1486 متر بالاتر از سطح دریا و در منطقه کوهستانی زاگرس واقع شده و آب‌وهوای معتدلی دارد.

روش تحقیق: داده‌های مورد استفاده در این پژوهش در جدول شماره (۱) ارائه شده است.



شکل ۱- موقعیت کلان شهرهای رسمی ایران.

برآورد $PM_{2.5}$ از داده‌های ماهواره‌ای سنجنده‌های **MODIS** و **MISR**، **SeaWifs**: برای برآورد $PM_{2.5}$ داده‌های ماهواره‌ای (Van Donkelaar *et al.*, 2016) از رابطه (۳) استفاده شد.

رابطه (۳)

$$SAT PM_{2.5} = \frac{\sum_{n=1}^N \frac{1}{NRMSD_n} \times \left(\frac{\Delta AOD_{adj,n}}{AOD_n}\right)^{-1} \times N_{obs,n}^2 \times PM_{2.5,n}}{\sum_{n=1}^N \frac{1}{NRMSD_n} \times \left(\frac{\Delta AOD_{adj,n}}{AOD_n}\right)^{-1} \times N_{obs,n}^2}$$

در رابطه (۳)، $\Delta AOD_{adj,n}$ و AOD_n حداقل روی 0.1 تنظیم شده‌اند. N_{obs} برای حداکثر پنج مشاهده در همراه به منظور مقیاس (مقیاس پایه) تنظیم شد. N_{obs} نیز تراکم مشاهده پراکنده را ارزیابی می‌کند. مقادیر بیش از سه انحراف معیار نیز با استفاده از روش درون‌یابی خطی جایگزین شدند (Ahmadi and Dadashiroudbari, 2019). پس از دریافت داده‌ها، مدل‌سازی روند و شیب تغییرات پارامترهای دمای سطح زمین و ناهنجاری آن بررسی شد. به منظور ارزیابی روند دمای سطح زمین و ناهنجاری آن در ایران از آزمون ناپارامتریک من-کندال استفاده شد. این آزمون ابتدا توسط Mann (۱۹۴۵) ارائه و سپس توسط Kendall (۱۹۷۵) توسعه یافت. این روش نیز همانند آزمون شیب خط $Sen's^3$ در مباحث علوم محیطی به‌طور گسترده‌ای کاربرد

عمق نوری و هواویزها (**AOD**) و تلفیق وزنی آن‌ها: داده‌های عمق نوری هواویز از سه سنجنده تابش‌سنج تصویربرداری با توان تفکیک متوسط (**MODIS**) ماهواره‌های **Terra** و **Aqua** با دو الگوریتم **Dark (DT)** و **Target** و **Deep Blue (DB)**، سنجنده تابش‌سنج تصویربرداری چند زاویه‌ای (**MISR**) ماهواره **Terra** و سنجنده **SeaWifs** ماهواره **GeoEye's OrbView-2** (**AKA SeaStar**) استفاده شد. این داده از پایگاه **Ladsweb** دریافت شدند. مقادیر **AOD** و $PM_{2.5}$ از تمام منابع اشاره شده با استفاده از میانگین وزنی ترکیب شدند. سپس باقیمانده وزنی **AOD** که با استفاده از روش بهنجار شده ریشه متوسط مربع خطا ($NRSMD^2$) (رابطه ۱)، اختلاف درصد معکوس مطلق بین داده‌های **AOD** واسنجی شده (ΔAOD_{adj}) و غیر واسنجی شده (**AOD**) و تراکم داده‌های محلی برای **AOD** با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شد (Ahmadi and Dadashi Rudbari, 2019)

رابطه (۱)

$$RMSD = \frac{(MEAN((AOD_{RETRIVED} - AOD_{AERONET})^2))^{0.5}}{AOD_{AERONET}}$$

رابطه (۲)

$$AOD = \frac{\sum_{n=1}^N \frac{1}{NRSMD_n} \times \left(\frac{\Delta AOD_{adj,n}}{AOD_n}\right)^{-1} \times N_{obs,n}^2 \times AOD_n}{\sum_{n=1}^N \frac{1}{NRSMD_n} \times \left(\frac{\Delta AOD_{adj,n}}{AOD_n}\right)^{-1} \times N_{obs,n}^2}$$

³ Sen's Slope Estimator Nonparametric Method

² Normalized Root Mean Square Difference (NRMSE)

جدول ۱- داده‌های مورداستفاده در پژوهش به همراه مقیاس زمانی-مکانی.

تفکیک مکانی (درجه/ایستگاهی)	محصول	دوره زمانی	نوع داده/پایگاه یا ماهواره و سنجنده
۰/۰۱	AOD	۲۰۱۸-۲۰۰۳	MODIS TERRA
۰/۰۱	AOD	۲۰۱۸-۲۰۰۳	MISR TERRA
۰/۰۱	AOD	۲۰۱۸-۱۹۹۸	SeaWifs

داده‌های
سنجنش از دور

داده‌های ایستگاهی	ایستگاه‌های کنترل کیفی کلان‌شهرهای ایران	لحظه تأسیس تا ۲۰۱۸	داده‌های ساعتی کنترل کیفی هوا	برای ۹ کلان‌شهر ایران
----------------------	---	--------------------	----------------------------------	-----------------------

این روش نیز ابتدا توسط (Thiel, 1950) ارائه سپس (Sen, 1968) آن را گسترش داده شد. روش حاضر همانند بسیاری دیگر از روش‌های ناپارامتریک دیگر از جمله Mann-Kendall بر تحلیل تفاوت بین مشاهدات سری زمانی استوار است (Ahmadi and Dadashi Rudbari, 2019). این روش زمانی می‌تواند مورداستفاده قرار گیرد که، روند موجود در سری زمانی یک روند خطی باشد. این بدین معناست که $f(t)$ در رابطه (۸) برابر است با:

رابطه (۸)

$$f(t) = Qt + B$$

که Q ، شیب خط روند و B ، مقدار ثابت است. جهت محاسبه شیب خط روند یعنی Q ، ابتدا بایستی شیب بین هر جفت داده مشاهداتی، با استفاده از رابطه (۹) محاسبه گردد:

رابطه (۹)

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k}$$

در این معادله x_j و x_k به ترتیب داده‌های مشاهداتی در زمان‌های j و k است و $j > k$ است با اعمال این رابطه برای هر جفت از داده‌ها یک شیب قرار داشت و با قرار دادن آن‌ها در کنار هم یک سری زمانی از شیب‌های محاسبه شده به دست می‌آید. میانه این مقدار از Q_i ، شیب سن است.

روش‌های ارزیابی کارایی داده‌های مشاهداتی و مدل سازی شده: جهت ارزیابی داده‌های بازاکاوی شده مدل

دارد (Ahmadi and Dadashiroudbari, 2017). آزمون Mann-Kendall نمره Z از رابطه (۴) محاسبه می‌گردد:

رابطه (۴)

$$Z = \begin{cases} x = \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(s)}} & \text{if } S > 0 \\ x = \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(s)}} & \text{if } S < 0 \end{cases}$$

S نشانه تفاوت مقادیر با یکدیگر و $\text{VAR}(s)$ واریانس S می‌باشد:

رابطه (۵)

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_j^n = k + \text{sgn}(x_j - x_k)$$

رابطه (۶)

$$\text{VAR}(s) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \beta}{18}$$

در این رابطه n تعداد مشاهدات سری، x_j و x_k به ترتیب داده‌های j ام و k ام سری هستند، sgn تابع علامت و β عامل مربوط به تصحیح پراش است. اگر داده‌های تکراری در اطلاعات وجود داشته باشد از رابطه ۷ استفاده می‌شود.

رابطه (۷)

$$\beta = \sum_{i=1}^m t(t-1)(2t-5)$$

در این رابطه t تعداد داده‌های مشاهده شده و m بیانگر تعداد سری‌های زمانی است که در آن‌ها حداقل یک داده تکراری وجود دارد. جهت برآورد شیب روند در سری زمانی فرین‌های سرد ایران از روش ناپارامتریک Sen's استفاده شده است.

ابتدا ذرات معلق و تغییرات آن برای شهرستان‌های مربوط به ۵ کلان‌شهر مورد مطالعه مورد بررسی قرار گرفت. مشخصات آماری غلظت $PM_{2.5}$ سالانه طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸ در جدول ۲ ارائه شده است. به منظور آشکارسازی نوع تغییرات $PM_{2.5}$ سری زمانی به همراه روند خطی برای ۵ کلان‌شهر تهران، مشهد، اصفهان، کرج و شیراز ترسیم و در شکل‌های ۲ تا ۶ ارائه شده است. بر اساس نتایج، روند سری زمانی برای هر ۵ کلان‌شهر منتخب طی دوره آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸ افزایشی است. در برخی از شهرها شدت روند بسیار بالا می‌باشد.

توزیع فضایی ذرات معلق سالانه در ۵ کلان‌شهر

منتخب ایران: سپس توزیع فضایی ذرات معلق ($PM_{2.5}$) برای ۵ کلان‌شهر منتخب برآورد شد که در شکل‌های ۷ تا ۱۱ نشان داده شده است. به‌طور کلی غلظت $PM_{2.5}$ در کلان‌شهرهای ایران نشان داد که الگوی فضایی مشخص و با تغییرات قوی در کل شهرستان‌های مربوط وجود دارد. شهرستان تهران بیشینه میزان $PM_{2.5}$ را طول سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۶ نشان داد که بیشتر از سایر کلان‌شهرها است. به دنبال آن کرج و اصفهان بیشینه $PM_{2.5}$ را نشان دادند. به‌طور کلی متوسط سالانه $PM_{2.5}$ در تهران به‌عنوان مهم‌ترین و بزرگترین کلان‌شهر ایران $15/07 \mu m^3$ است. همان‌طور که در جدول ۲، نیز مشخص شد برای بررسی بهتر تغییرات $PM_{2.5}$ سالانه در ۵ کلان‌شهر مورد مطالعه، داده‌ها با شاخص‌های مختلف آماری مورد بررسی قرار گرفتند. بیشینه مقدار ضریب تغییرات $PM_{2.5}$ با مقدار $18/94$ درصد مربوط به اصفهان است به‌طوری‌که این مقدار متوسط از تمامی کلان‌شهرهای ایران حتی تهران نیز بیش‌تر بوده است. کلان‌شهرهایی که مقدار ضریب تغییرات ذرات معلق با قطر کمتر از $2/5$ میکرومتر آن‌ها بیشتر از ۱۰ درصد در طول دوره آماری است در کلان‌شهرهای مشهد و اصفهان قرار گرفته است. این مقدار از تغییرات ذرات معلق در دو دهه گذشته بیانگر نقش عوامل خارجی قوی در منطقه مورد مطالعه است. در تأیید نتایج به‌دست‌آمده

NOAA-GFDL-ESM2M و داده‌های ماهواره‌ای از آماره‌های ضریب تعیین (R^2)، میانگین خطای مطلق (MAE)، میانگین انحراف خطا (MBE) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) که معادلات آن به ترتیب در روابط زیر انجام خواهد شد. ضریب تعیین یکی از معیارهای مهم ارزیابی بین دو متغیر می‌باشد، مقدار آن از صفر تا یک متغیر است و از طریق رابطه (۱۰) می‌توان ضریب تعیین را محاسبه نمود:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n [(xi - \bar{x})(yi - \bar{y})]^2}{\sum_{i=1}^n (xi - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (yi - \bar{y})^2} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

میانگین انحراف خطا (MBE): این معیار بیانگر اختلاف

بین میانگین مقادیر مشاهده‌ای و برآورد شده است که انحراف از میانگین را نیز نشان می‌دهد و مقدار آن می‌تواند مثبت و یا منفی باشد، MBE هر چقدر به صفر نزدیک باشد، اختلاف کمتر مقادیر برآورد شده را نسبت به مقادیر مشاهده‌ای را نشان می‌دهد که از طریق رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود.

رابطه (۱)

$$BE = \frac{\sum_{i=1}^n (xi - yi)}{n}$$

جذر میانگین مربعات خطا (RMSE): این آماره برای

ارزیابی دقت داده‌های پیش‌بینی شده شده یا شبیه‌سازی شده استفاده و طبق رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود.

رابطه (۱۲)

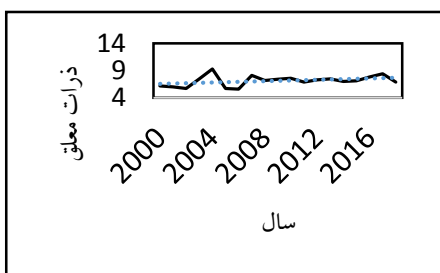
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (xi - yi)^2}{n}}$$

در چهار رابطه بالا X_i و Y_i به ترتیب i امین داده واقعی و شبیه‌سازی شده توسط مدل، \bar{X} و \bar{Y} میانگین کل داده‌های X_i و Y_i در جامعه آماری n تعداد کل نمونه‌های مورد ارزیابی می‌باشند.

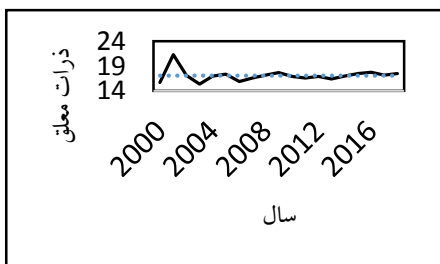
نتایج

جدول ۲- مشخصات آماری سالانه ذرات معلق (PM2/5) بلندت مدت (۲۰۱۸-۲۰۰۰) کلان‌شهرهای ایران.

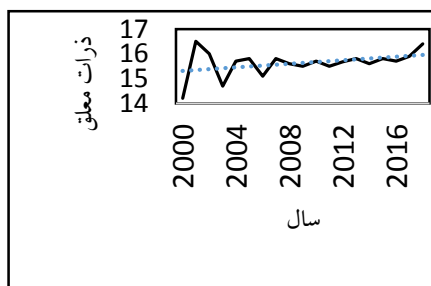
کلان‌شهر	مجموع	مجموعه	کاف	کاف	کاف	کاف	کاف
مشهد	۵/۶۰	۹/۳	۶/۵۵	۷/۵۵	۷/۱۲	۰/۹۵	۱۳/۳
کرج	۱۵/۴	۲۱	۱۶/۱۵	۱۷/۱۵	۱۶/۸۵	۱/۲۳	۷/۳۲
تهران	۱۳/۴	۱۶	۱۴/۶۵	۱۵/۶۵	۱۵/۰۷	۰/۷۵	۵/۰۰
اصفهان	۴/۵۰	۱۰	۶/۸۰	۷/۸۵	۷/۴۷	۱/۱۹	۱۵/۹
شیراز	۶/۲۰	۸/۶۰	۷/۲۵	۷/۸۵	۷/۵۲	۰/۵۶	۷/۴۸



شکل ۲- روند سالیانه ذرات معلق کلان‌شهر مشهد.



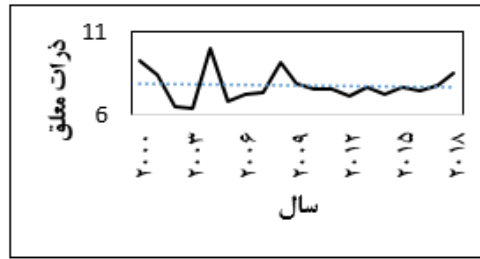
شکل ۳- روند سالیانه ذرات معلق کلان‌شهر کرج.



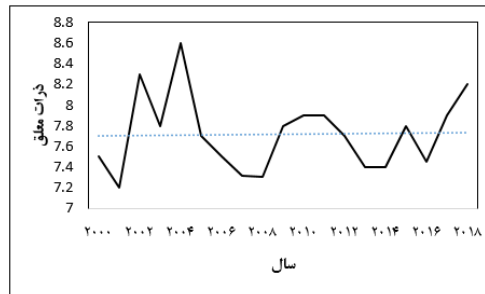
شکل ۴- روند سالیانه ذرات معلق کلان‌شهر تهران.

گردوغباری افزایش یافته است و در مقابل، از اواخر سال ۲۰۱۲ تا میانه‌های سال ۲۰۱۴ میانگین شاخص جذب هواویز (AAI) مقدار کاهشی را نشان داده است. لذا هرگونه تغییر در مقدار بار گردوغبار حاصل شده به منطقه مورد مطالعه، مقدار PM_{2.5} موجود در جو کلان‌شهرهای ایران به‌خصوص برای کلان‌شهرهای غربی و جنوب غربی

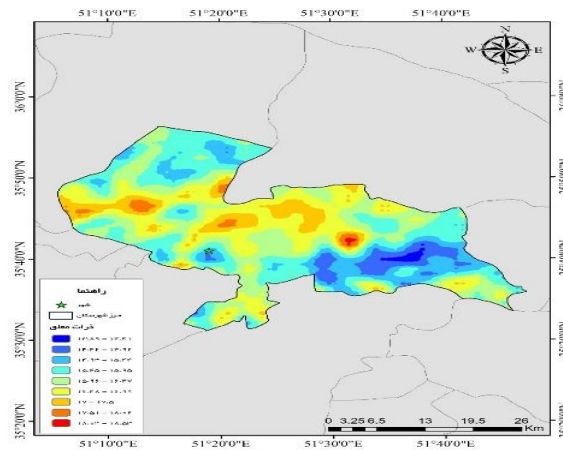
(Ahmadi and Dadashi Rudbari, 2019). با مطالعه شاخص جذب هواویز (AAI) بر اساس داده‌های سنجنده TOMS دو ماهواره Nimbus 7 (۱۹۹۲-۱۹۷۹) و Earth Probe (۲۰۰۵-۱۹۹۶) و سنجنده OMI (۲۰۰۵-۲۰۱۵) ماهواره EOS Aura بیان کردند که در بازه سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۰۸ با تغییر از یک رژیم غیرفعال به فعال دوره



شکل ۵- روند سالانه ذرات معلق کلان‌شهر اصفهان.



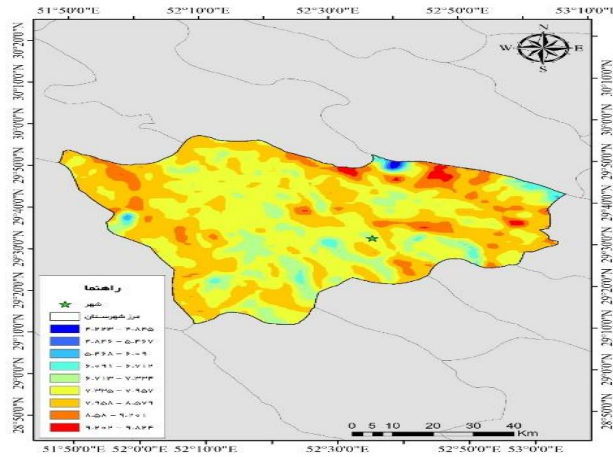
شکل ۶- روند سالانه ذرات معلق (PM2.5) کلان‌شهر شیراز.



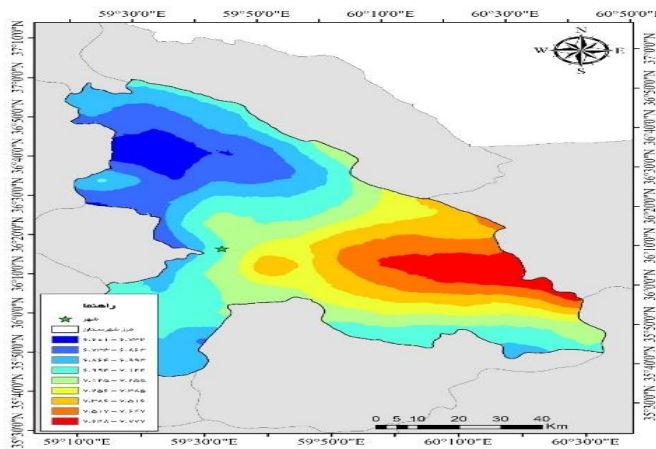
شکل ۷- پراکنش فضایی ذرات معلق تهران.

باید توجه داشت مناطق کوهستانی باعث افزایش عدم قطعیت در برآورد PM_{2.5} می‌شود؛ لذا مقادیر برآوردی در شهرستان‌های کرج، تهران و مشهد می‌تواند بالاتر از شیراز باشد. همچنین کمبود ایستگاه با سری زمانی بلندمدت نیز یکی از مشکلات در برآورد PM_{2.5} در ایران است. گردوغبارها نیز به‌عنوان یک محرک جدی در افزایش PM_{2.5} در منطقه مورد مطالعه نقش ایفا می‌کنند. عامل دیگری که به‌شدت می‌تواند تغییرپذیری ذرات معلق را تغییر دهد، سیستم‌های سینوپتیکی هستند که دقت داده‌های

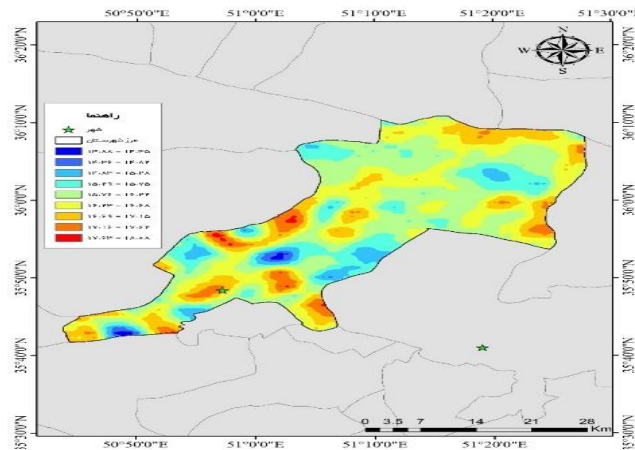
ایران افزایش چشمگیری خواهد داشت که برای سلامتی انسانی و کیفیت هوا بسیار خطرناک است. همان‌طور که در اشکال ۷ تا ۱۱ نیز مشاهده می‌شود، اثرات مناطق شهری و تغییرات ارتفاعی بیش‌ترین تغییرات فضایی مقدار PM_{2.5} برآورد شده را ۵ کلان‌شهر مورد مطالعه نشان می‌دهند. مقدار PM_{2.5} در تمامی کلان‌شهرها، دارای تنوع فضایی بالایی است؛ علت این تغییرپذیری بالای ذرات معلق به دلیل نزدیکی به منابع اصلی گردوغبار از یک‌سو و آلاینده‌های شهری و صنعتی‌ای از سوی دیگر است. البته



شكل ۸- پراكش فضايي ذرات معلق شيراز.



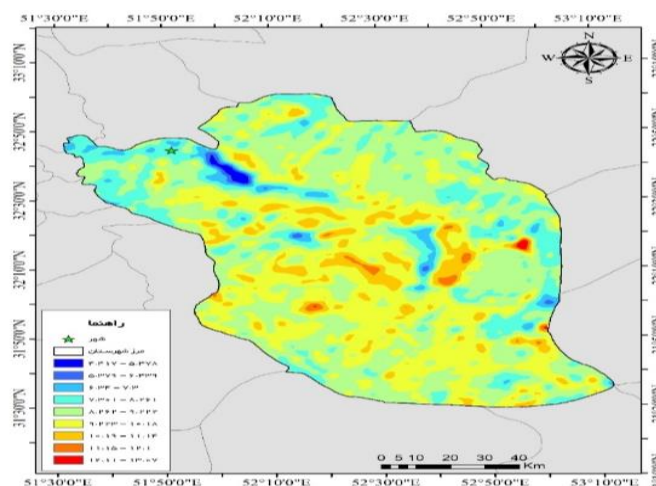
شكل ۹- پراكش فضايي ذرات معلق مشهد.



شكل ۱۰- پراكش فضايي ذرات معلق كرج.

دليل قرارگيري صنايع) و مناطق غربي آن است؛ بخش غربي شهرستان تهران را جاده مخصوص كرج و كارخانه‌هاي بسيار بزرگ آن همچون ايران خودرو و ساپيا در بر مي‌گيرد؛ لذا اين مقدار زياد از ذرات معلق تحت تأثير عوامل انساني

تركيبي و برآورد شده را تحت تأثير قرار دهند. مقدار ذرات معلق موجود در جو شهرستان تهران بين $13/89$ تا $18/53 \mu\text{m}^3$ متغير است. بالاترين مقدار ذرات در مناطق مركزي شهرستان تهران و بخش‌هاي جنوبي (به



شکل ۱۱- پراکنش فضایی ذرات معلق اصفهان.

جدول ۳- مشخصات آماری روند سالانه ذرات معلق (PM2/5) کلان شهرهای ایران با استفاده از آزمون‌های ناپارمتریک من-کندال و سنس.

کلان شهر	دوره بلند مدت (۲۰۰۰-۲۰۱۸)	
	آزمون من-کندال	آزمون سنس سطح معنی داری
مشهد	۱/۱۵۷	۰/۰۶۴
کرج	۰/۹۱۲	۰/۰۳۳
تهران	۱/۹۹۸	۰/۰۷۱
اصفهان	۰/۲۵۰	۰/۱۲۰
شیراز	۰/۵۹۹	۰/۱۷۰

شهرستان مشهد نسبت به چهار شهرستان دیگر مورد مطالعه در سطح نسبتاً پایین‌تری قرار دارد. به‌طوریکه میانگین متوسط پهنه‌بندی شده در این شهرستان حتی به ۱۰ $\mu\text{m}^3/\text{m}^3$ نیز نمی‌رسد. متوسط مقدار کلان شهر مشهد نیز $7/12 \mu\text{m}^3/\text{m}^3$ است. این مقدار برای شهرستان کرج بین $13/88$ تا $18/08 \mu\text{m}^3/\text{m}^3$ است. کرج به دلیل وجود صنایع بسیار، یکی از آلوده‌ترین کلان شهرها و حتی شهرستان‌های ایران به جهت ذرات معلق است. عمدتاً کانون‌های مربوط به $\text{PM}_{2.5}$ در این شهرستان مربوط به صنایع است. همچنین ذرات بسیاری زیادی که به‌شکل یک لکه داغ در این کلان شهر خودنمایی می‌کند. متوسط ذرات موجود در جو این کلان شهر $16/85 \mu\text{m}^3/\text{m}^3$ است. متوسط بلند مدت ذرات

می‌باشد. مقدار متوسط بلند مدت ذرات در کلان شهر تهران که با نماد ستاره مشخص شد، $15 \mu\text{m}^3/\text{m}^3$ است. شکل ۸ پراکنش فضایی ذرات معلق شهرستان شیراز را طی دوره آماری ۲۰۰۰-۲۰۱۸ نشان می‌دهد. متوسط بلند مدت ذرات معلق در جو شهرستان شیراز بین $4/223$ تا $9/824 \mu\text{m}^3/\text{m}^3$ است. مناطق شرقی و شمالی و غربی شهرستان شیراز مقدار ذرات معلق زیادی را نشان داده است؛ مقدار متوسط کلان شهر شیراز نیز برای دوره آماری بلند مدت $7/52 \mu\text{m}^3/\text{m}^3$ به‌دست آمده است. پراکنش فضایی ذرات معلق شهرستان مشهد طی دوره آماری ۲۰۰۰-۲۰۱۸ نشان داد که متوسط بلند مدت ذرات معلق در جو شهرستان مشهد بین $6/60$ تا $7/77 \mu\text{m}^3/\text{m}^3$ است. پراکنش فضایی مقدار ذرات معلق در

معلق در جو شهرستان اصفهان بین ۴/۴۱ تا ۱۳/۰۷ $\mu\text{m}/\text{m}^3$ متغیر است. مناطق مرکزی و جنوبی شهرستان اصفهان نسبت به مناطق شمالی ذرات معلق بیشتری دارند. مقدار $\text{PM}_{2.5}$ در کلان‌شهر اصفهان نیز ۷/۴۷ $\mu\text{m}/\text{m}^3$ به دست آمده است؛ اصفهان به همراه مشهد و شیراز جزء سه کلان‌شهر از ۹ کلان‌شهر ایران هستند که مقدار $\text{PM}_{2.5}$ آن‌ها کمتر از ۱۰ $\mu\text{m}/\text{m}^3$ بوده و جزء پاک‌ترین کلان‌شهرهای ایران هستند. جدول ۳، تغییرات روند سالانه ذرات معلق ($\text{PM}_{2.5}$) را در ۵ کلان‌شهر ایران نشان می‌دهد، مقادیر مربوط به روند $\text{PM}_{2.5}$ برای پیکسل یا پیکسل‌های موجود در سطح شهر و مقادیر تغییرات روند پهنه‌بندی شده برای سطح شهرستان محاسبه شده است. مقدار روند و شیب روند $\text{PM}_{2.5}$ در تمامی کلان‌شهرهای ایران روند افزایشی دارد؛ این مقدار روند برای تهران در سطح آماری ۰/۰۵ معنی‌دار است؛ به طوری که نمره Z آزمون من-کندال برای تهران ۱/۹۹۸ به دست آمده است؛ همچنین مقدار شیب روند با آزمون سنس نیز نشان داده است که در تهران به ازای هر سال از سری زمانی ۰/۰۷ در این کلان‌شهر مهم صنعتی ایران افزایش یافته است. کمترین مقدار روند ذرات معلق در کلان‌شهر اصفهان با نمره Z آزمون من-کندال ۰/۰۲ به دست آمده است. از آنجا که نقش سیستم‌های گردشی جو در اهداف این پژوهش نمی‌باشد به این مورد پرداخته نشد و لزوم یک مطالعه مستقل در این حوزه تحقیقاتی دیده می‌شود.

بحث و نتیجه گیری

در این پژوهش ذرات معلق در ۵ کلان‌شهر اصلی ایران به‌عنوان یک مطالعه موردی از شهرهای واقع در آب‌وهوای نیمه‌خشک و خشک مورد بررسی قرار گرفت. ارزیابی تغییرپذیری درون سالی ذرات معلق ($\text{PM}_{2.5}$) طی دوره آماری ۲۰۰۰-۲۰۱۸ نشان داد مقدار $\text{PM}_{2.5}$ روندی افزایشی را در تمامی کلان‌شهرهای ایران نشان داده است. این تغییر

به‌خصوص در کلان‌شهرهای غربی و جنوب غربی ناشی از یک رژیم غیرفعال به فعال دوره گردوغباری بوده است که (Ahmadi et al., 2019). نیز با مطالعه شاخص جذب هواویز (AAI) آن را تأیید کردند. بیشینه ذرات معلق موجود در جو کلان‌شهرهای ایران مربوط به اهواز، تهران و کرج بوده است. همچنین ضریب تغییرات $\text{PM}_{2.5}$ طی دوره آماری مورد مطالعه نشان از افزایش بین ۵ تا حدود ۱۹ درصدی ذرات برای کلان‌شهرهای مورد مطالعه بوده است به طوری که تهران بیشینه شیب روند محاسباتی را نشان داد. آلاینده‌ها شهری طی یک دهه گذشته در تمامی کلان‌شهرها روندی افزایشی را تجربه کرده است. آزمون‌های ناپارامتریک من-کندال و سنس نشان داد که روند و شیب روند ذرات معلق شهری ($\text{PM}_{2.5}$) در تمامی کلان‌شهرهای ایران روند افزایشی دارد. ذرات معلق ($\text{PM}_{2.5}$) نیز علی‌رغم افزایشی بودن در تمامی کلان‌شهرهای ایران فقط در تهران در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار بود.

همچنین بر اساس استاندارد سازمان محیط‌زیست ایران، ۵ کلان‌شهر تهران، کرج، اصفهان، مشهد و شیراز آلوده‌ترین شهرهای ایران هستند که در این زمینه مدیران شهری باید تدابیر مناسبی را برای کاهش این ذرات در اولویت قرار دهند. با توجه به وجود چندین سازمان متولی در خصوص آلودگی هوا (سازمان محیط‌زیست، شهرداری‌ها و ...) پیشنهاد می‌شود، این موضوع در مجلس محترم شورای اسلامی مطرح گردد و یک سازمان با امکانات کافی متولی رسیدگی و تحقیق در مورد آلودگی هوا مشخص گردد. موضوع دیگر انتقال پادگان‌ها و کارگاه‌های بزرگ و کوچک صنعتی به خارج از شهر و تغییر کاربری آن‌ها به فضای سبز شهری می‌باشد که این مهم در چند مورد محدود در شهر تهران (پادگان قلعه مرغی و دامپزشکی ارتش و...) اتفاق افتاد و دیگر خبری نشد که این مهم نیز نیازمند تصویب قانونی برای اجرا شدن می‌باشد.

References

- Ahmadi, M., Dadashi Rudbari, A.A., 2019. Temporal-spatial distribution of suspended particles (PM_{2.5}) with environmental approach in western and southern Iran based on SeaWifs, MISR and MODIS sensors. *Environmental Science* 45(3), 379-394. (In Persian)
- Ahmadi, M., Dadashi Rudbari, A.A., 2020. Urban meteorological models and remote sensing techniques (theoretical-applied) Navid Mehr Publications, Tehran, 288 p. (In Persian)
- Ahmadi, M., Dadashi Roudbari, A.A., 2017. Identification of urban thermal islands based on environmental approach, case study (Isfahan metropolis). *Geography and Environmental Planning* 28(3): 1-20. (In Persian)
- Ahmadi, M., Dadashi Roudbari, A.A., Esfandiari, N., 2019. Monitoring of urban thermal islands with special fractal evolution approach (FNEA) (Case study: Tehran metropolis), 11(1): 114-95. (In Persian)
- Khoshsima, M., Ali Akbari Bidokhti, A. 2015. Estimation of the concentration of suspended particles (PM₁₀) in the atmosphere using satellite and ground-based sensing data and meteorological parameters: Application of artificial neural network. *Earth and Space Physics* 41, 499-510. (In Persian)
- Ghorbaniyan, A., Mohammadzadeh, A. 2018. Use nonlinear regressions to estimate the concentration and generate a scatter plot of particles smaller than 10 microns using remote sensing images and ground measurements. *Journal of Surveying Science and Technology*, No. 2, 163-171. (In Persian)
- Nikkho, N., Ilderimi, A., Nouri, H. 2015. Land Use Developments in Malayer Using Remote Sensing, 8(30): 63-86. (In Persian)
- Conitz, M. 2000. GIS applications in Africa: Introduction. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66(6), 672-673.
- Frey, C. M., Rigo, G., Parlow, E. 2009. Investigation of the daily Urban Cooling Island (UCI) in two coastal cities in an arid environment: Dubai and Abu Dhabi (UAE). *City* 81-102.
- Kamusoko, C. 2017. Importance of Remote Sensing and Land Change Modeling for Urbanization Studies. In *Urban Development in Asia and Africa* (pp. 3-10). Springer. Singapore. PP.310-312.
- Sorek-Hamer, M., Kloog, I., Koutrakis, P., Strawa, A. W., Chatfield, R., Cohen, A., Broday, D. M. 2015. Assessment of PM_{2.5} concentrations over bright surfaces using MODIS satellite observations. *Remote Sensing of Environment* 163, 180-185.
- Van Donkelaar, A., Martin, R. V., Brauer, M., Boys, B. L. 2014. Use of satellite observations for long-term exposure assessment of global concentrations of fine particulate matter. *Environmental Health Perspectives* 123(2), 135-143.
- Van Donkelaar, A., Martin, R. V., Brauer, M., Hsu, N. C., Kahn, R. A., Levy, R. C., Winker, D. M. 2016. Global estimates of fine particulate matter using a combined geophysical-statistical method with information from satellites, models, and monitors. *Environmental Science & Technology* 50(7), 3762-3772.
- Yuan, F., Sawaya, K. E., Loeffelholz, B. C., & Bauer, M. E. 2005. Land cover classification and change analysis of the Twin Cities (Minnesota) Metropolitan Area by multitemporal Landsat remote sensing. *Remote sensing of Environment* 98(2), 317-328.