



بهینه سازی یک مدل شبه تجربی با استفاده از الگوریتم ژنتیک به منظور برآورد غلظت ذرات معلق (PM_{10}) سطحی در شهر تهران با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و داده‌های هواشناسی

عباس حجازی: دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش اذدور دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران *
محمدرضا مباشری: دانشیار سنجش اذدور دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
ابوالفضل احمدیان: دانشجوی دکتری سنجش اذدور دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

وصول: ۱۳۹۱/۴/۱۵ پذیرش: ۱۳۹۱/۸/۲۲، صص ۳۷-۵۰

چکیده

ذرات با قطر کمتر از ۱۰ میکرومتر سلامتی ساکنین شهرهای بزرگ را تهدید می‌کند. تا کنون روش‌های مختلفی برای آشکارسازی این ذرات با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای پیشنهاد شده‌است. اغلب این روش‌ها نیاز به واسنجی برای اقلیم‌های متفاوت دارند. در این تحقیق یک مدل شبه تجربی با روش الگوریتم ژنتیک برای برآورد غلظت ذرات معلق در زمان عبور ماهواره و در مقیاس محلی معرفی شده است. برای این کار از مقادیر تصحیح شده عمق اپتیکی (AOD) بدست آمده از تصاویر سنجنده MODIS استفاده گردیده است. بدین منظور AOD نسبت به رطوبت نسبی و ارتفاع اختلاط تصحیح شده‌است. در مدل شبه تجربی، با استفاده از الگوریتم ژنتیک داده‌های هواشناسی نیز وارد مدل شده و تاثیر آنها در نظر گرفته می‌شود. وارد شدن دما و رطوبت نسبی به مدل موجب بهبود برآورد غلظت ذرات معلق شده است. در نهایت این مدل برای منطقه تهران اعتبار سنجی شده و در نتیجه آن همبستگی قابل قبول ($R^2=0.51$) با تغییرات غلظت ذرات معلق سطحی با انحراف معیاری معادل $28 \mu g/m^3$ بدست آمد. در تصحیح AOD محدودیت‌هایی از قبیل ناکافی بودن ایستگاه‌های هواشناسی و تعیین تقریبی ارتفاع اختلاط وجود دارد که موجب ورود عدم قطعیت‌هایی به مدل می‌شود.

واژه‌های کلیدی: MODIS، عمق نوری هواویز (AOD)، PM_{10} ، اطلاعات هواشناسی، مدل شبه تجربی

۱- مقدمه

مهمترین شاخص‌های آلودگی هوا محسوب شده و به همین علت از بیشترین توجه نسبت به سایر آلاینده‌های جوی برخوردار هستند (Wang, 2010). بنا به گزارش اداره محیط زیست تهران، رشد سریع شهر و صنعت در آن، موجب شده است که هواویزها تبدیل به مهمترین آلودگی هوای تهران شوند. بر اساس گزارش اداره کنترل کیفیت هوای تهران و با توجه به

در یک تعریف کلی، هواویز عبارتست از تعلیق کلوئیدی از ذرات مایع و جامد در هوا. هواویزها تاثیر زیادی روی آب‌وهوا و محیط زندگی بشر دارند، به خصوص هواویزهای تروپسفری که با عنوان ذرات معلق شناخته می‌شوند تاثیر سوء بر سلامتی بشر می‌گذارند. غلظت ذرات معلق موجود در جو از

مزایای این روش است. پس از آن که سنجنده اسپکتروراديو متر تصویر بردار با قدرت تفکیک متوسط (MODIS) در مدار قرار گرفت، اقدام به برآورد عمق اپتیکی کلی (AOD^1) از مشاهدات طیفی آن شده است. AOD حاصل از تصاویر MODIS نتیجه اندازه‌گیری ضریب تضعیف هواویز از سطح زمین تا ارتفاع بالای جو برای یک طول موج ثابت در زمان گذر ماهواره است (Tian, 2010). AOD یک پارامتر کلیدی برای تخمین آلودگی جوی در مطالعات آلودگی هوا می باشد (Liu, 2007).

تحقیقات مختلفی با استفاده از AOD در برآورد غلظت ذرات معلق سطح زمین در نقاط مختلف جهان انجام شده است. در این تحقیقات از مدل‌های خطی بین AOD و غلظت ذرات معلق استفاده شده است (Tian, 2010, Gupta, 2006, 2008). همچنین گروهی دیگر مانند (Liu, 2007, Chirostpher, 2008, Tian, 2010) از مدل‌های غیر خطی استفاده کرده‌اند. گروهی از محققان همچون (Van Dankelaar, 2008, Wang, 2010) نیز از روابط فیزیکی اقدام به برآورد غلظت ذرات معلق با استفاده از AOD کردند. این تحقیقات نشان دادند همبستگی نسبتاً قابل قبولی بین غلظت ذرات معلق و AOD وجود دارد. در این پژوهش‌ها ضریب همبستگی بین AOD و غلظت ذرات معلق از $0/4$ تا $0/9$ متغیر بوده است. نتایج این تحقیقات به طور خلاصه در جدول شماره ۱ به نمایش در آمده است. اما تحقیقاتی که پیش از این در شهر تهران توسط (Torkian, 2007, Sohrabinia, 2007 مغربی، ۱۳۸۵) انجام شده است به دقت بالایی

مقدار ثبت شده برای شاخص آلودگی هوا (PSI) در سال‌های ۱۳۸۷ و ۱۳۸۸ به ترتیب تنها ۱۳ و ۲۹ درصد از روزهای سال، هوای تهران در حالت پاک قرار داشت و همچنین در سال ۱۳۸۸، ۳۸٪ از روزها در حالت ناسالم و خطرناک بوده است. (گزارش سالیانه اداره محیط زیست تهران، ۱۳۸۹).

بسیاری از تحقیقات اپیدمولوژی نشان می‌دهند قرار گرفتن در معرض ذرات معلق موجب مرگ‌ومیرهای زودرس، سرطان ریه، سرطان خون، برونشیت، آسم و سایر بیماری‌های تنفسی می‌شود (Pearson, 2002, Gauderman, 2004, Yonesian, 2002, Asghari, 1999).

اگرچه اندازه‌گیری‌های ایستگاه‌های آلودگی سنج زمینی دارای دقت بالا هستند، اما این اندازه‌گیری‌ها تنها برای محدوده‌های اطراف ایستگاه اندازه‌گیری معتبر هستند. در اکثر شهرها و از جمله شهر تهران ایستگاه‌های سنجش آلودگی دارای توزیعی تنک و غیر همگن هستند (قربانی، ۱۳۸۹). بنابراین تنها با اتکا به اندازه‌گیری این ایستگاه‌ها نمی‌توان با دقت مناسب در مورد توزیع آلودگی‌ها اظهار نظر کرد.

۳۰ سال از زمانی که داده‌های ماهواره‌ای در پایش آلودگی‌ها استفاده می‌شود، می‌گذرد و در طی گذشت این زمان، تکنیک‌های سنجش‌ازدوری از بهبود و پیشرفت‌های قابل ملاحظه‌ای برخوردار شده‌اند (Wang, 2010). بهره بردن تصاویر ماهواره‌ای از پوشش مکانی و زمانی بالا، این توانایی را در این تکنیک‌ها بوجود آورده است تا اطلاعات ارزشمندی برای مطالعات اپیدمولوژی، کمک به طراحی شبکه اندازه‌گیری و پیش‌بینی آلودگی هوا فراهم کند (Guo, 2009). به بیان دیگر اطلاعات فراوان با هزینه اندک از

¹Aerosol Optical Depth

شهر تهران است. همچنین در این تحقیق از روش‌های حل عددی (الگوریتم ژنتیک (GA)) برای بهینه سازی تاثیر پارامترهای جوی در محاسبات استفاده شده است.

۲-AOD مستخرج از MODIS و ارتباط آن با غلظت ذرات معلق (PM_s)

ضخامت نوری هواویزها از انتگرال ضریب تضعیف هواویز از سطح زمین تا بالای جو برای یک طول موج معین λ ، به صورت زیر بدست می‌آید (Tian, 2010).

(۱)

$$\tau(\lambda) = \int_0^{\infty} \beta_{ext}(\lambda, z) dz = \int_0^{\infty} P(z) \sigma_{ext}(\lambda, z) dz$$

که در آن $\beta_{ext}(\lambda, z)$ ضریب تضعیف (m^{-1})، $P(z)$ غلظت هواویز (Mg/m^3) در ارتفاع z و $\sigma_{ext}(\lambda, z)$ سطح مقطع تضعیف هواویز (m^2/mg) است

صحت و دقت در محاسبه AOD سنجنده MODIS در حدود 0.15 ± 0.05 گزارش شده است. این نتیجه با مقایسه τ بازیابی شده از مشاهدات MODIS با اندازه‌گیری زمینی توسط دستگاه AERONET به دست آمده است (NASA, 2009). این دقت معمولاً قابل انتظار است، مگر در حالاتی که الف) تصویر آلوده به ابر باشد، ب) منطقه ساحلی باشد و ج) مناطق پوشیده از برف یا یخ باشد (Gupta, 2006). متأسفانه به دلیل عدم وجود ایستگاه‌های شبکه AERONET در ایران، امکان دقت‌سنجی AOD مستخرج از MODIS در منطقه تهران وجود ندارد.

با توجه به تاثیری که رطوبت نسبی و ارتفاع اختلاط (ارتفاع لایه‌ای از هوا که در آن لایه، هوا کاملاً مخلوط شده است) بر AOD می‌گذارد، رابطه زیر برای اعمال این تاثیر پیشنهاد شده است (Wang, 2010).

در این زمینه دست نیافته‌اند. ضریب همبستگی برآورد غلظت ذرات معلق برای شهر تهران در تحقیقات گذشته در حدود ۰/۵ تا ۰/۶ گزارش شده است (قربانی، ۱۳۸۹). همچنین در تحقیقی دیگر که در تهران انجام شد و در آن از تصاویر سنجنده MODIS استفاده شد، AOD را به عنوان پارامتری مفید در ارزیابی کلی آلودگی هوای تهران بیان کرد (موقتی، ۱۳۸۷). در کنار روش‌هایی که از AOD استفاده می‌کنند، تیم تحقیقاتی مباحثی و همکاران از روش جداسازی طیفی داده‌های سنجنده MODIS به برآورد غلظت ذرات معلق پرداخته است و به توفیقاتی در این زمینه دست یافته‌اند (قربانی، ۱۳۹۱). علاوه بر روش یاد شده تیم تحقیقاتی مباحثی و همکاران از روش دیگری با عنوان جداسازی سهم ذرات معلق در انرژی کل رسیده سنجنده، به محاسبه غلظت ذرات معلق پرداخته است (حجازی، ۱۳۹۱). لازم به ذکر است محققان ایرانی از داده‌های سنجنده MODIS در زمینه‌های بسیار دیگری همچون بررسی شاخص‌های اقلیمی و کشاورزی استفاده کرده‌اند (مباحثی، ۱۳۸۹، فرج زاده، ۱۳۹۱).

تحقیقات نشان می‌دهند که چگونگی توزیع ارتفاعی ذرات معلق و رطوبت نسبی (RH) در برآورد AOD تاثیر گذار است (Liu, 2007). بنابراین اگر تنها از AOD در تعیین غلظت ذرات معلق سطح زمین استفاده شود، این برآورد با عدم قطعیت‌های فراوان روبه‌رو خواهد بود. به این جهت شایسته است که تاثیر پارامترهای جوی در این برآورد در مدل لحاظ شود (Engel-Cox, 2006).

هدف از این تحقیق بررسی اثر پارامترهای جوی در برآورد غلظت ذرات معلق با استفاده از AOD در سطح

$$AOD^* = \frac{AOD}{f(humidity) \cdot BLH} \quad (۲)$$

(۳)

$$f(humidity) = \frac{(1 - RH)}{(1 - RH_0)^{-g}}$$

در حالت کلی برای ضریب تجربی g عدد $۰/۰۴$ در نظر گرفته می‌شود (Hanel, 1976). رطوبت نسبی مبنا (RH_0) بر اساس میانگین رطوبت نسبی منطقه در نظر گرفته می‌شود، که در این تحقیق میانگین رطوبت نسبی در طول دوره تحقیق $۰/۳۵$ (۳۵ درصد) محاسبه شده است.

در این رابطه BLH ارتفاع اختلاط و $f(humidity)$ تابعی بر اساس رطوبت نسبی جو است. این تصحیح، اثر بخار آب و ارتفاع را بر ضریب تضعیف تا حدودی تعدیل می‌کند. هنگامی که رطوبت هوا زیاد باشد، اندازه ذرات معلق به صورت نمایی افزایش می‌یابد و در نتیجه مقدار ضریب تضعیف افزایش یافته و غلظت هواویزها نیز بیشتر از مقدار واقعی برآورد می‌شود (Tian, 2010). $f(humidity)$ توسط (Hanel, 1976) به صورت زیر تعریف شده است.

جدول ۱: اطلاعاتی در مورد تحقیقات قبلی در این زمینه

محقق (سال)	مکان تحقیق	نوع مدل	R_square
Wang et al., (2003)	آلاباما	مدل خطی بین AOD مستخرج از MODIS و $PM_{2.5}$	۰/۴۹
Engle-Cox et al., (2004)	آمریکا	مدل خطی بین AOD مستخرج از MODIS و $PM_{2.5}$	۰/۴
Li et al. (2005b)	هنگ کنگ	مدل خطی بین AOD مستخرج از MODIS و PM_{10}	۰/۵۱
Li et al. (2005a)	پکن	مدل خطی بین AOD مستخرج از MODIS و PM_{10}	۰/۲۹
Koelemeijer et al. (2006)	اروپا	مدل خطی بین AOD مستخرج از MODIS و $PM_{2.5}$ و PM_{10}	۰/۵۹ ۰/۴۶
Gupta et al., (2008)	غرب آمریکا	مدل خطی بین AOD مستخرج از MODIS تصحیح شده و $PM_{2.5}$	۰/۵۲
Liu et al. (2005)	شرق آمریکا	مدل غیر خطی بین AOD مستخرج از MISR و $PM_{2.5}$	۰/۴۸
Liu et al. (2007)	کانادا	مدل غیر خطی بین AOD مستخرج از MODIS و $PM_{2.5}$	۰/۵۵
Pelletier et al., (2007)	فرانسه	مدل غیر خطی بین AOD مستخرج از MODIS و PM_{10}	۰/۷۶
Vidotet al., (2007)	غرب اروپا	مدل غیر خطی بین AOD مستخرج از MODIS و $PM_{2.5}$ و PM_{10}	۰/۴۳ ۰/۶۱
Tian et al., (2010)	اوتاریو	مدل غیر خطی بین AOD مستخرج از MODIS و $PM_{2.5}$	۰/۶۴
Wang et al., (2010)	پکن	مدل غیر خطی بین AOD مستخرج از MODIS و PM_{10}	۰/۶۶

کلان‌شهر تهران با جمعیتی حدود هشت میلیون نفر و مساحت ۷۳۰ کیلومتر مربع در کوهپایه‌های جنوبی رشته کوه البرز در حد فاصل طول جغرافیایی ۵۱ درجه

۳- داده‌های مورد استفاده

۳-۱ منطقه مورد مطالعه

می‌شود (NASA, 2009). برای استخراج AOD از تصاویر بازتابندگی طیفی MODIS و خصوصیات هواویز مورد نظر و تطبیق آن با مقادیر جدول جستجو (LookUp Table)، استفاده می‌شود. اگرچه مواردی همچون مدل تقریبی هواویز و یا رابطه تجربی آن با بازتابندگی سطحی در طول موج‌های مختلف اغلب عدم قطعیت‌هایی را موجب می‌شود، اما به طور کلی AOD بازیابی شده در مقایسه با اندازه‌گیری‌های Sunphotometer از دقت کافی برخوردار است (NASA, 2009).

در این تحقیق از محصولات AOD سنجنده MODIS که بر مبنای الگوریتم مجموعه 5 (C005) بازیابی شده و تحت عنوان (Corrected_Optical_Depth_Land) در دسترس است، استفاده شده است. این AOD در طول موج 0/550 میکرومتر در پایگاه اینترنتی <http://Modis.gsf.gov/data/> قابل دسترس است. برای این تحقیق از 150 تصویر AOD سنجنده MODIS مستقر بر روی سکوی Terra استفاده شده است. قابل ذکر است تصاویر انتخابی خالی از ابر هستند و برای اطمینان از این موضوع بر تصاویر تست ابر (الگوریتم MOD 35¹) اعمال می‌شود.

و 2 دقیقه شرقی تا 51 درجه و 36 دقیقه شرقی، به طول تقریبی 50 کیلومتر و عرض جغرافیایی 35 درجه و 34 دقیقه شمالی تا 35 درجه و 50 دقیقه شمالی به عرض تقریبی 30 کیلومتر گسترده شده است. ارتفاع شهر در شمالی‌ترین نقاط به 1800 متر و در جنوبی‌ترین نقاط به 1050 متر از سطح دریا می‌رسد. تهران از شمال به نواحی کوهستانی و از جنوب به نواحی کویری منتهی شده و نواحی شمالی از آب و هوای سرد و خشک و نواحی جنوبی از آب و هوای گرم و خشک برخوردارند.

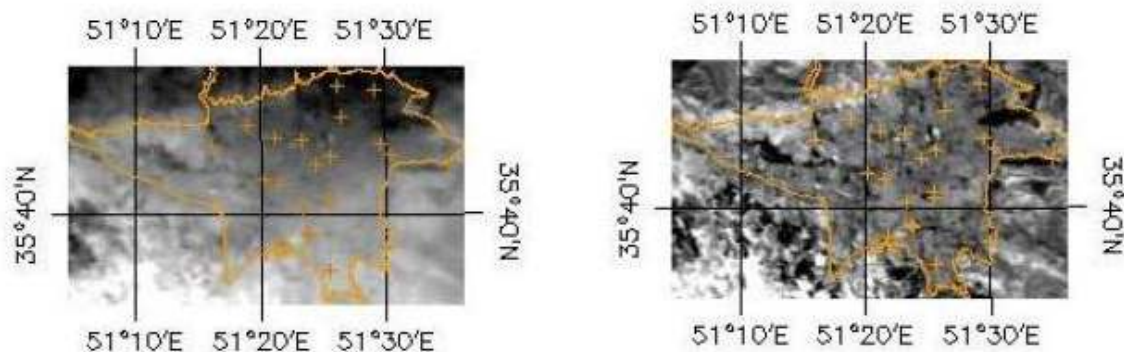
۲-۳ اطلاعات ایستگاه‌های آلودگی سنج

غلظت ذرات معلق توسط ایستگاه‌های زمینی و در ارتفاع کمی از سطح زمین اندازه‌گیری می‌شود. با استفاده از این داده‌ها به‌بندهی دقیق کیفیت هوا در نقاط مختلف شهر مقدور نیست، زیرا تعداد این ایستگاه‌ها بسیار اندک بوده و کل شهر را به خوبی پوشش نمی‌دهند. اطلاعات مورد استفاده در این تحقیق از ایستگاه‌های تحت نظارت سازمان محیط زیست و شهرداری تهران جمع‌آوری شده است. این ایستگاه‌ها، اطلاعات را در بازه‌های زمانی 1 ساعت ثبت می‌کنند. اطلاعات جمع‌آوری شده مربوط به فصل‌های بهار و تابستان 1386 تا 1388 است.

۳-۳ تصاویر سنجنده MODIS

ضخامت نوری هواویز (AOD)، نشان دهنده بارگذاری ستونی از هواویزها در جو بوده که از محصولات سطح 2 مشاهدات سنجنده MODIS بحساب می‌آید (NASA, 2009). الگوریتم بازیابی AOD از تصاویر MODIS برای خشکی و اقیانوس متفاوت است (Tian, 2010). بر روی خشکی از تصاویر در سه باند با مراکز 0/47، 0/55 و 0/66 میکرومتر استفاده

¹ الگوریتم MOD 35 از مطرح ترین الگوریتم‌های تست ابر بر روی تصاویر MODIS می‌باشد که از روش آستانه گذاری دمایی اقدام به تشخیص حضور ابر در تصاویر می‌نماید.



شکل ۱: شکل سمت راست، تصویر پردازش شده modis از تهران در یک روز پاک (۱۳۸۸/۱/۳) و شکل سمت چپ، تصویر پردازش شده modis در یک روز آلوده (۱۳۸۸/۴/۱۵). نشان + بیانگر مکان ایستگاه‌های اندازه‌گیری آلودگی است.

۳-۴ پارامترهای هواشناسی

اطلاعات هواشناسی مورد استفاده در این تحقیق در طول سال‌های ۸۶ تا ۸۸ شامل دمای ۵ سانت سطح زمین، رطوبت نسبی، پوشش ابر و وضعیت جوی بوده که در ایستگاه‌های هواشناسی مهرآباد، اقدسیه و فرودگاه امام جمع‌آوری شده‌اند. برای محاسبه مقدار تقریبی ارتفاع اختلاط (BLH) از مدل جهانی CSIRO Mixing Height Model استفاده شده است. پارامترهای مورد نیاز این مدل که شامل دما، سرعت باد سطحی و وضعیت حضور ابر است (Luhar, 1998)، که از اطلاعات ایستگاه‌های هواشناسی استخراج شد. گرادیان دمایی در این مدل در منطقه تهران به صورت نرمال در نظر گرفته شده است.

۴- روش تحقیق

در این تحقیق از دو مدل آماری استفاده شده است، الف) مدل: که در آن از یک مدل رگرسیون خطی ساده بین AOD مستخرج از MODIS و [GL-PM₁₀] (غلظت اندازه‌گیری شده ذرات در سطح زمین) استفاده شده است ب) مدل ii: که یک مدل شبه

تجربی با پارامترهای AOD مستخرج از MODIS، [GL-PM₁₀] و اطلاعات هواشناسی است. در مدل i وجود یک ارتباط خطی بین AOD و [GL-PM₁₀] مفروض است. در حقیقت هدف از تعریف مدل i مقایسه نتیجه آن با نتایج مدل ii است. چرا که بدینوسیله تاثیر ورود پارامترهای هواشناسی در محاسبه آلودگی هوا ارزیابی می‌شود. در مدل‌های شبه تجربی موجود که توسط محققانی همچون (Liu, 2007, Christopher, 2008, Tian, 2010) در مناطقی از آمریکا، کانادا و چین استفاده شد، تاثیر پارامترهای هواشناسی نیز در کنار AOD مستخرج از MODIS در تعیین غلظت [GL-PM₁₀] بکار گرفته شده است. در این تحقیق مدل ii به منظور اعمال اثر پارامترهای هواشناسی به صورت زیر معرفی می‌گردد. این رابطه از مدل‌های مطرح در این زمینه بوده و از آن محققان زیادی استفاده کرده‌اند (Liu, 2007, Christopher, 2008, Tian, 2010).

(۴)

مدل بهینه‌سازی این ضرایب به نحوی است که غلظت ذرات معلق تعیین شده توسط این روش با اندازه‌گیری‌های زمینی بهترین تطابق را داشته باشد. برای اینکار از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. مجموعه اطلاعات استفاده شده در این پژوهش در جدول (۲) ارائه شده است.

$PM_{10} = \exp(\beta_0) \cdot AOD^{\beta_{AOD}} \cdot BLH^{\beta_{BLH}} \cdot \exp(\beta_{ST} ST) RH^{\beta_{RH}}$
در رابطه بالا طرف چپ معادله، غلظت ذرات معلق (PM_{10}) و طرف راست آن شامل شامل ترکیبی از AOD بدست آمده از MODIS، ارتفاع اختلاط (BLH)، دمای سطح زمین (ST) و رطوبت نسبی (RH) است. ضرایب β نیز بر اساس میزان تاثیر هر یک از پارامترهای بالا تعیین می‌شود. هدف در این

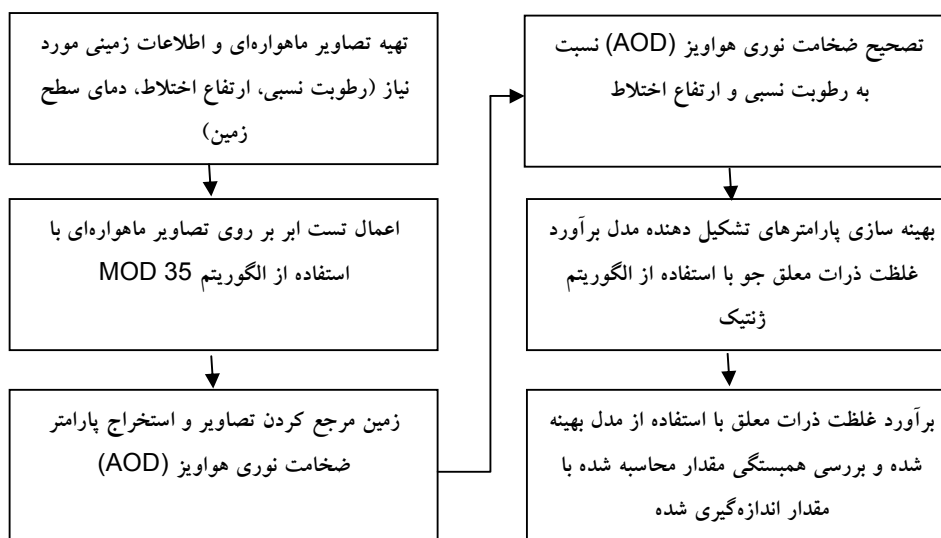
جدول ۲: توصیف اطلاعات استفاده شده در این تحقیق

نام متغیر	واحد	فراوانی	منبع
غلظت ذرات معلق سطح زمین ($GL-PM_{10}$)	$\mu g/m^3$	ساعتی	ایستگاه های سنجش آلودگی
AOD مستخرج از MODIS در $0.550 \mu m$	بدون واحد	روزانه	MODIS تصاویر
دمای سطح زمین	$^{\circ}C$	ساعتی	ایستگاه های هواشناسی
رطوبت نسبی	%	روزانه	ایستگاه های هواشناسی
ارتفاع اختلاط (BLH)	m	ساعتی	CSIRO Model

جواب‌ها استفاده می‌شود. الگوریتم ژنتیک از یک سو به خاطر طبیعت تصادفی‌اش در تمام فضای جواب‌های ممکن به دنبال جواب بهینه می‌گردد و در نتیجه از لحاظ تئوری توانایی پیدا کردن بهینه کلی را دارد و از سوی دیگر، به خاطر آن که عمل جستجو در هر گام در حوالی جواب‌های شبه بهینه‌ی فعلی صورت می‌گیرد، به صورت هدفمند این عمل انجام گردیده و جستجو به صورت کور انجام نمی‌شود. در این تحقیق از الگوریتم ژنتیک به منظور یافتن ضرایب پارامترهای مدل ii بهره گرفته شده است.

۴-۱ الگوریتم ژنتیک

الگوریتم‌های تکاملی به طور عام و الگوریتم ژنتیک به طور خاص روش‌هایی جستجوگر هستند که برای یافتن پاسخ بهینه می‌توان از آنها سود جست (Goldberg, 1989). در الگوریتم ژنتیک از ایده‌ی تکامل موجودات زنده استفاده می‌شود. بدین صورت که در ابتدا مجموعه‌ای از جواب‌ها به صورت اتفاقی حدس زده می‌شوند و میزان نزدیکی آنها به جواب بهینه با محاسبه یک تابع برازندگی برای هر یک از آنها معلوم می‌شود. سپس از جواب‌های بهتر و برازنده‌تر در به وجود آوردن مجموعه‌ی جدیدی از



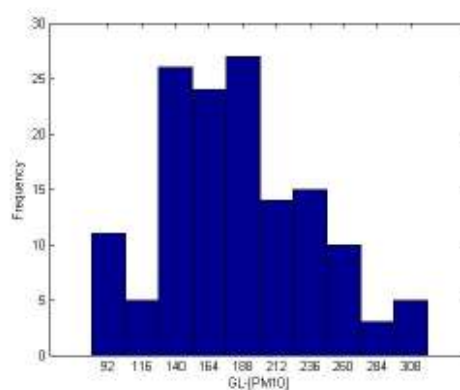
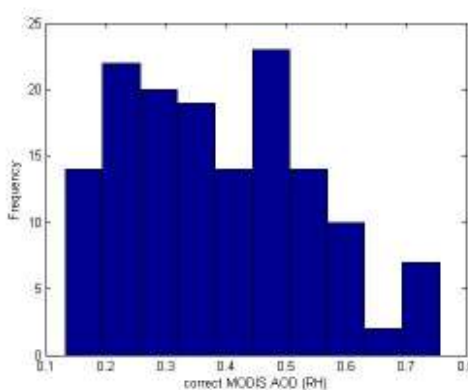
شکل ۲: مراحل انجام این پژوهش

نسبت به ارتفاع اختلاط و رطوبت نسبی (AOD(BLH,RH)). بهترین همبستگی با غلظت ذرات معلق اندازه‌گیری شده از AOD تصحیح شده نسبت به رطوبت نسبی کسب شده است. همچنین همبستگی به دست آمده پس از تصحیح AOD نسبت به ارتفاع اختلاط موجب تنزل در کارآمدی مدل شده است. در جدول ۳ مقادیر همبستگی بین AODهای مختلف و $GL-[PM_{10}]$ به نمایش در آمده است.

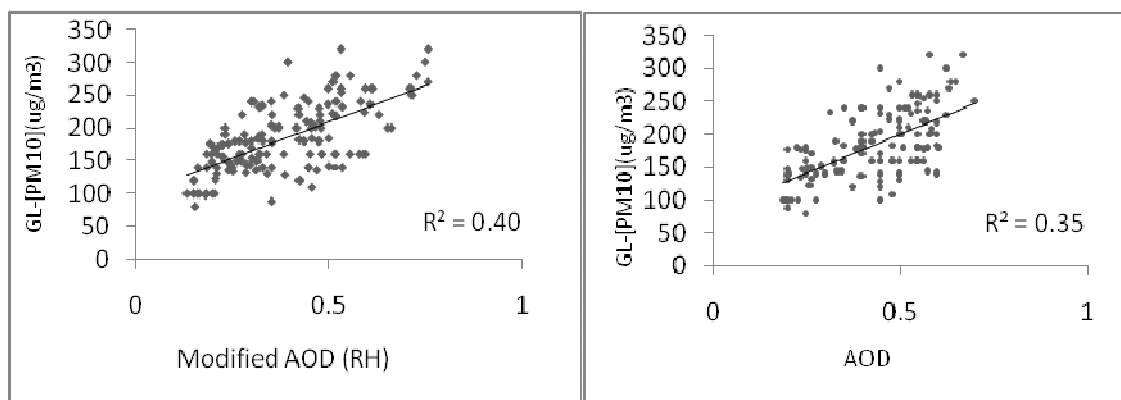
۵- تجزیه و تحلیل نتایج

۵-۱ مدل i

تشریح آماری AODهای استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای و غلظت ذرات معلق در همان زمان، در تصاویر ۳ و ۴ دیده می‌شود. در این مدل برای برقراری ارتباط خطی بین AOD و $GL-[PM_{10}]$ ، از سه نوع AOD استفاده شده است، (۱) AOD استخراج شده از تصاویر MODIS، (۲) AOD تصحیح شده نسبت به رطوبت نسبی (AOD(RH) و (۳) AOD تصحیح شده



شکل ۳: فراوانی غلظت ذرات معلق $GL-[PM_{10}]$ شکل ۴: فراوانی AOD مستخرج از MODIS تصحیح شده نسبت به رطوبت



شکل ۵: تغییرات GL-[PM₁₀] بر حسب AOD اصلاح نشده
 شکل ۶: تغییرات GL-[PM₁₀] (ug/m³) بر حسب AOD تصحیح شده نسبت به رطوبت نسبی

جدول ۳: میزان انطباق در مدل i در حالت استفاده از AOD های مختلف

مدل	R ²
AOD استخراج شده از تصاویر MODIS بدون تصحیح	0/35
AOD تصحیح شده نسبت به رطوبت نسبی $AOD^* = \frac{AOD}{f(humidity)}$	0/40
AOD تصحیح شده نسبت به ارتفاع اختلاط و رطوبت نسبی $AOD^* = \frac{AOD}{f(humidity) \cdot BLH}$	0/33

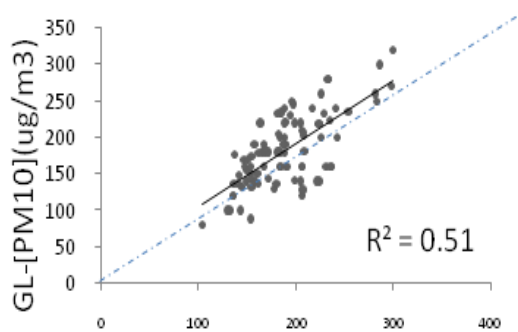
AOD های استخراج شده از تصاویر و سایر اطلاعات به دو دسته تقسیم شده و از یک دسته آن برای بهینه سازی پارامترهای معادله ۴ بوسیله الگوریتم ژنتیک استفاده می شود. این دسته از اطلاعات شامل AOD ها و اطلاعات هواشناسی ۶۰ روز از بهار و تابستان های سال ۸۶ تا ۱۳۸۹ است. دسته دیگر اطلاعات که شامل AOD و اطلاعات هواشناسی ۹۰ روز دیگر از بهار و تابستان های سال ۸۶ تا ۱۳۸۹ است، برای برآورد غلظت ذرات با استفاده از مدل بهینه شده به کار گرفته می شود. مقدار همبستگی این برآورد با مقدار اندازه-

۲-۵ مدل ii

در تحقیقات گذشته معمولاً ضرایب پارامترهای موجود در رابطه (۴) به صورت مستقل از هم و بر اساس برآزش های خطی و تاثیر هر پارامتر در مدل بهینه سازی می شدند (Liu, 2007, Tian, 2010). اما در این تحقیق تاثیر تمامی پارامترها به صورت همزمان اعمال شده و پیش بینی می شود با توجه به این که این پارامترها از قاعده مشخصی پیروی نمی کنند، استفاده از روش های حل عددی همچون الگوریتم ژنتیک نتیجه بخش باشد.

جدول ۴: مقدار برآورد شده ضرایب پارامترهای مدل ii

پارامتر مربوطه در مدل	β
مقدار ثابت	۵/۵۷
AOD	-۰/۴۶۴
RH	-۰/۱۳۲
ST	۰/۰۰۸
BLH	-۰/۰۳



PM10(ug/m3) برآورد شده

شکل ۷: تغییرات GL-PM10 برحسب مقدار برآورد

شده غلظت ذرات معلق توسط مدل ii

نتایج حاصله از مدل‌های i و ii در این تحقیق حاکی از آن است که با تصحیح نسبت به رطوبت برای AOD و وارد کردن پارامترهای هواشناسی، دقت برآورد غلظت آلودگی ذرات معلق در هوا بهبود یافته است.

اگر تنها از AOD برای برآورد غلظت ذرات معلق استفاده شود (مدل i)، ضریب همبستگی ($R^2=0.06$) اصلاح شده نسبت به رطوبت استفاده شود، ضریب همبستگی به 0.63 ($R^2=0.4$) افزایش می‌یابد که نشان دهنده تاثیر رطوبت در این محاسبه است.

گیری شده توسط ایستگاه‌ها نشان دهنده دقت مدل خواهد بود.

جدول (۴) ضرایبی که برای پارامترهای موجود در رابطه ۴ به صورت بهینه محاسبه شده است را نشان می‌دهد. این ضرایب نشان‌دهنده آن هستند که بین افزایش مقدار AOD، دما و رطوبت با افزایش غلظت ذرات معلق ارتباط مستقیم برقرار است، ولی بین ارتفاع اختلاط و غلظت ذرات معلق ارتباطی عکس وجود دارد. در بین این پارامترها، ارتفاع اختلاط و AOD به ترتیب کمترین و بیشترین تاثیر را در برآورد آلودگی دارند. شاید دلیل تاثیر کم ارتفاع اختلاط، استفاده از یک مدل جهانی برای محاسبه آن باشد.

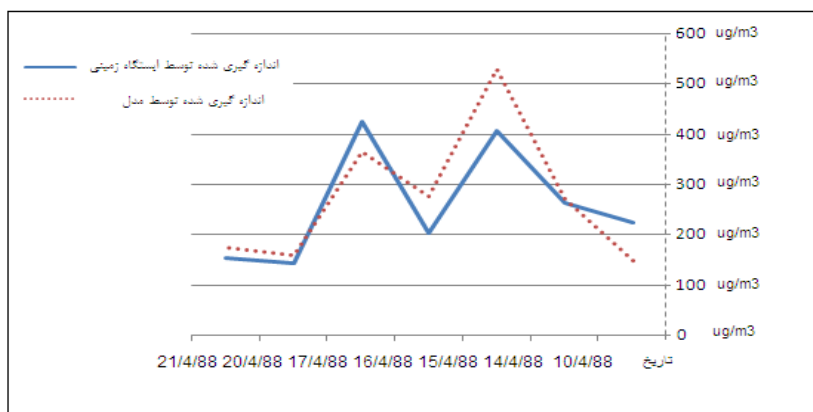
بر اساس تعریف تحمیل تابشی هواویز (Aerosol Radiative Forcing)، مناطقی که دارای آلودگی بیشتر از ذرات معلق هستند، باید دمایی بیشتر از مناطقی داشته باشند که ذرات معلق کمتری دارند (Remer et al., 2007). با توجه به نتیجه الگوریتم ژنتیک برای پارامتر دمایی، این قاعده رعایت شده است. یکی دیگر از تاثیراتی که هواویزها بر محیط تحمیل می‌کنند، اثر شبه مستقیم هواویز (Aerosol Semi-DirectEffect) است. این اثر بر رطوبت محلی منطقه تاثیر می‌گذارد (Remer et al., 2007). ضریب محاسبه شده برای پارامتر رطوبت نیز نشان‌دهنده همسویی آن با غلظت ذرات معلق است.

دیده می‌شود یک هماهنگی در روند تغییرات این دو دیده می‌شود.

نکته‌ای که باید به آن اشاره کرد این است که نمی‌توان با استفاده از این مدل نقشه توزیع ذرات معلق دقیقی برای سطح شهر تهران ترسیم کرد، چون در حال حاضر قدرت تفکیک AODهای استخراج شده از تصاویر MODIS پایین است. ولی این امیدواری وجود دارد با روند کنونی پیشرفت در سنجنده‌های طیف سنج، AODهایی با قدرت تفکیک بالاتر محاسبه شده و به طبع آن امکان ترسیم نقشه‌های دقیق از این مدل میسر گردد.

اما وقتی که پارامترهای هواشناسی (ST, BLH, RH) به همراه AOD تصحیح شده نسبت به رطوبت نسبی برای برآورد غلظت ذرات معلق به کار گرفته شوند، ضریب همبستگی 0.72 ($R^2=0.51$) خواهد بود که نسبت به مدل i بین 0.09 تا 0.12 افزایش همبستگی خواهیم داشت.

در شکل ۸ مقایسه‌ای بین مقدار میانگین روزانه غلظت ذرات معلق برآورد شده توسط مدل و میانگین غلظت اندازه‌گیری شده توسط ایستگاه‌های زمینی آلودگی-سنج دیده می‌شود. این مقایسه در تعدادی از روزهای تیر ماه سال ۱۳۸۸ انجام پذیرفته است. همینطور که



شکل ۸: مقایسه میانگین غلظت ذرات معلق اندازه‌گیری شده توسط ایستگاه‌های آلودگی سنج و محاسبه شده توسط مدل در روزهای مختلف

امر موجب انحراف ارتباط $PM-AOD$ می‌شود. (ب) اندازه‌گیری ایستگاه‌های زمینی تنها نشان دهنده آلودگی در یک نقطه هستند ولی در تصاویر ماهواره‌ای به دلیل وسعت زیادی که هر پیکسل در بر می‌گیرد، یک میانگین از کل آلودگی در آن منطقه را ارائه می‌دهد. (پ) در تصحیحات RH و ارتفاع اختلاط محدودیت وجود دارد. معمولاً از چند ایستگاه محدود

با توجه به تمامی عواملی که ذکر شد و تمامی حساسیت‌هایی که در تعیین و کاربرد مدل‌ها وجود دارد، همواره بین برآورد غلظت PM از مشاهدات MODIS و اندازه‌گیری‌های زمینی اختلاف وجود دارد. در این رابطه چندین عامل را می‌توان دلیل وجود این اختلاف دانست: الف) AOD به شدت تحت تاثیر شرایط محیطی مانند ابر و مه است که این

مطمئن و دائمی برای برای اندازه‌گیری‌های زمینی در نظر گرفت، زیرا در بسیاری از روزها، در هنگام گذر ماهواره، محدوده مورد نظر، ابری بوده و این رخداد مانع از رسیدن به دقت مطلوب در کار خواهد شد. بنابراین استفاده از داده‌های ماهواره‌ای می‌تواند مکمل و نه جایگزین ایستگاه‌های زمینی آلودگی‌سنج باشد.

پیشنهادات برای پژوهش‌های آینده:

الف: اگر بتوان AOD را در قدرت تفکیک‌های بالاتری استخراج کرد، ممکن است دقت برآورد غلظت ذرات معلق بالاتر رود.

ب: در این پژوهش برای محاسبه ارتفاع اختلاط از یک مدل جهانی استفاده شده است و پیش‌بینی می‌شود با استفاده از مدل‌های محلی دقت محاسبات بالاتر رود. بنابراین پیشنهاد می‌شود در تعیین ارتفاع اختلاط از مدل‌های محلی استفاده شود.

تشکر و قدردانی

این پژوهشگران بر خود لازم میدانند که از همکاری سازمان محیط زیست شهر تهران، شرکت کنترل کیفیت هوا و سازمان هواشناسی کشور در تامین داده‌های مورد نیاز این تحقیق تشکر و قدردانی نمایند.

منابع

قربانی، ر. ۱۳۸۹، اعتبار سنجی داده‌های سنجنده MODIS در رابطه با آلودگی‌های جوی در مناطق شهری، پایان‌نامه کارشناسی ارشد سنجش‌ازدور، دانشکده نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه- نصیرالدین طوسی

موقتی، ا. ۱۳۸۷، بررسی امکان سنجش آلودگی هوای شهر تهران با استفاده از تصاویر سنجنده

برای محاسبه RH و BHL استفاده می‌شود که نمی‌تواند نشان دهنده شرایط جوی برای کل منطقه باشد.

۶- نتیجه‌گیری

هواویزها تاثیر زیادی روی آب‌وهوا و محیط زندگی بشر دارند، به خصوص هواویزهای تروپسفری که با عنوان ذرات معلق شناخته می‌شوند تاثیر سوء بر سلامتی بشر می‌گذارند. بنا به گزارش‌ها، رشد سریع شهر تهران و صنعت در آن، موجب شده است که ذرات معلق تبدیل به مهمترین آلودگی هوای تهران شوند. تا کنون روش‌های مختلفی برای آشکارسازی این ذرات با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای پیشنهاد شده است. اغلب این روش‌ها نیاز به واسنجی برای اقلیم-های متفاوت دارند. در این مقاله یک مدل شبه تجربی برای برآورد غلظت ذرات معلق با قطر کمتر از ۱۰ میکرومتر پیشنهاد شده است. AOD مستخرج از MODIS، دمای سطح زمین، رطوبت نسبی و ارتفاع اختلاط از پارامترهای ورودی این مدل است. از الگوریتم ژنتیک نیز جهت بهینه‌سازی تاثیر هر پارامتر در مدل استفاده شده است. در نتیجه دیده شد اعمال اثر دمای سطح زمین و رطوبت نسبی در محاسبه برآورد غلظت ذرات معلق تاثیر مثبت دارد. این مدل توانایی پیش‌بینی تغییرات غلظت ذرات معلق شهر تهران را با همبستگی ۰/۷ و انحراف معیاری برابر با $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ را دارا است. در این تحقیق اثر رطوبت نسبی و ارتفاع اختلاط بر AOD اعمال گردید و معلوم شد AOD تصحیح شده مطابقت بهتری با غلظت ذرات معلق داشته است.

لازم به ذکر است علی‌رغم وجود سرعت و مقرون به صرفه بودن استفاده از روش ماهواره‌ای برای برآورد غلظت ذرات معلق، نمی‌توان این روش را جایگزینی

- Engel-Cox, J., Hoff, A., and Rogers, M., (2006). Integrating lidar and satellite optical depth with ambient monitoring for 3-dimensional particulate characterization. *Atmospheric Environment*, 40, 8056-8067.
- Gauderman, W. (2004). The effect of air pollution on lung development from 10 to 18 years of age". *N. Engl. J. Med.* 351, 11, 1057-1067
- Goldberg, D.E., (1989). Genetic Algorithm in search optimization and machine learning, addison-wesley, reading, MA
- Guo, J. Zhang., (2009). Correlation between PM concentrations and aerosol optical depth in eastern China, *Atmospheric Environment* 43 5876-5886
- Gupta, P., Christopher. S. (2008). Seven year particulate matter air quality assessment from surface and satellite measurements *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, Vol. 8, no. 1, 327-365.
- Gupta P. and Christopher S. A. and Wang J. and Gehrig R. and Lee Y. and Kumar N., 2006. Satellite remote sensing of particulate matter and air quality assessment over global cities. *Atmospheric Environment*, 40, 5880-5892.
- Hanel, G., (1976). The properties of atmospheric aerosol particles as functions of the relative humidity at thermodynamic equilibrium with the surrounding moist air. *Advances in Geophysics*, 19, 73-188.
- NASA (2009)- http://modis.gsfc.nasa.gov/sci_team/meetings/200610/atmosAgen da.pdf
- Liu, Y., Franklin, M., Kahn R (2007). Using aerosol optical thickness to predict ground-level PM_{2.5} concentrations in the St. Louis area: A comparison between MISR and MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 107, 33-44.
- Luhar, K., (1998). An analytical slab model for the growth of the coastal thermal internal boundary layer under near-neutral onshore flow conditions. *Boundary-Layer Meteorology* 88, 103-120
- Pearson, R. L., (2000). Distance-weighted traffic density in proximity to a home is a risk factor for leukemia and other childhood
- MODIS, پایان نامه کارشناسی ارشد سنجش از دور، دانشکده نقشه برداری، دانشگاه تهران
- مغربی، م. ۱۳۸۵، بررسی کاربرد سنجنده های ماهواره ای در تشخیص ذرات معلق شهرهای بزرگ، مجموعه مقالات اولین همایش تخصصی مهندسی محیط زیست، دانشگاه تهران
- گزارش سالیانه اداره محیط زیست تهران، ۱۳۸۹
- حجازی، ع.، مباشری، م.ر.، تهیه نقشه توزیع مکانی ذرات معلق با قطر کمتر از ۲/۵ میکرومتر در هوای شهر تهران با استفاده از داده های سنجنده MODIS، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، زیر چاپ (زمستان ۱۳۹۱)
- قربانی، ر.، مباشری، م.ر.، ۱۳۹۱، روشی سریع در برآورد غلظت ذرات معلق با استفاده از سنجنده مودیس: یک مطالعه موردی در تهران، مجله پژوهشی حکیم، شماره ۱۵، ۱۶۶-۱۷۷
- فرج زاده، م.، خورانی، ا.، ۱۳۹۱، شناسایی و تحلیل تأثیر پارامترهای اقلیمی و شاخص های اقلیم شناسی کشاورزی بر مراحل مختلف فنولوژی گندم دیم در استان کردستان دوره ۱۵، شماره ۴، صفحه ۱-۱۷
- مباشری، م.ر.، پورباقرکردی، م.، (۱۳۸۹)، برآورد آب قابل بارش کلی با استفاده از تصاویر ماهواره ای MODIS و داده های رادیساونند: ناحیه تهران دوره چهاردهم، شماره اول، صفحه ۱۰۷-۱۲۶
- Asgari, M.M., DuBois, A. (1998). Association of ambient air quality with children's lung functions in urban and rural Iran. *Arch Environ Health*; 53: 222
- Christopher, J. (2008). Spatiotemporal associations between GOES Aerosol Optical Depth Retrievals and Ground-Level PM_{2.5}. *Environ. Sci. Technol.* 42, 5800-5806.

- vertical-and-RH correcting method. Remote Sensing of Environment, 114, 50–63.
- Yunesian, M., MalekAfzali, H., Holakouei, K., (2002). Air pollution mortality in elderly in Tehran, Iran. Payesh, Journal of the Iranian Institute for Health Sciences Research 1: 19-24
- Sohrabinia, M., Khorshiddoust, A., (2007). Application of satellite data and GIS in studying air pollutants in Tehran, Habitat International 31, pps. 268 - 275
- Torkian, A., Amid, F., Keshavarzi, H., (2007). The application of MODIS satellite remote sensing in estimation of particulate urban air pollution, Proceeding 100th AWMA Conference, Pittsburg, June 26 - 29
- cancers. ; J. Air Waste Manag. Assoc, 50(2):175-80.
- Remer, A., Chin, M., DeCola, P., (2007). Atmospheric Aerosol Properties and Climate Impacts, NASA GSFC
- Tian, j., Chen, D., (2010). A semi-empirical model for predicting hourly round-level fine particulate matter (PM_{2.5}) concentration in southern Ontario from satellite remote sensing and ground-based meteorological measurements. Remote Sensing of Environment, 114, 221–229.
- vanDonkelaar, A., Martin, R., (2006). Estimating ground-level PM_{2.5} with aerosol optical depth determined from satellite remote sensing. JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, 111.69-77
- Wang, Z., Chen, L., Tao, J., Zhang, Y., Su. L., (2010). Satellite-based estimation of regional particulate matter (PM) in Beijing using