تهیه نقشه توزیع مکانی ذرات معلق با قطر کمتر از دو نیم میکرومتردر هوای شهر تهران با استفاده از داده‌های سنجنده مودیس

دریافت مقاله:۹۱/۳/۱۱ پذیرش نهایی: ۹۱/۷/۱۹
صفحات: ۱۷۸- ۱۶۱

عباس حجازی: دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سنجش از دور دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی
Email: Hejazi_abbas@yahoo.com
محمدرضا مباشری: دانشیار گروه مهندسی سنجش از دور دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی
Email:Mobasheri@kntu.ac.ir
ابولفضل احمدیان مرج: دانشجوی دکترای مهندسی سنجش از دور دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی
Email: Abolfazl_216@yahoo.com

چکیده

ذرات با قطر کمتر از دو و نیم میکرومتر به شدت 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 اقلیم-های متفاوت دارند. در این پژوهش با استفاده از رگرسیون خطی، بین سهم بازتابندگی ناشی از پراکنش توسط هواویزها، مستخرج از داده‌های سنجنده مودیس و غلظت ذرات معلق با قطر کمتر از دو و نیم میکرومتر اندازه‌گیری‌شده توسط دوازده ایستگاه آلودگی‌سنج شهر تهران یک ارتباط برقرار شد. محاسبه هواویزه مستلزم محاسبه بازتابندگی سطحی می‌باشد. برای محاسبه بازتابندگی سطحی در باندهایی که از ذرات معلق شهری متاثر می‌شوند، از روابط تجربی موجود بین بازتابندگی در طول موج‌های مرئی و ۲/۱۲ میکرومتر استفاده شد. با استفاده از نقشه توزیع آلودگی ذرات معلق که از این روش ترسیم شد، ملاحظه می‌شود که آلودگی مناطق مرکزی بیش از سایر قسمت‌های شهر می‌باشد. برای کاهش عدم قطعیت، در مراحل آماده-سازی و پردازش در این تحقیق تست ابر با استفاده از روش آستانه‌گذاری دمای درخشندگی انجام گردید.

کلید واژگان: ذرات معلق، هواویزه ها، مودیس، بازتابندگی سطحی، توزیع آلودگی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

مقدمه

هواویزهای جوی نقش مهمی در تعادل تابشی ایفا می‌کنند و از فاکتورهای مهم عدم قطعیت برای تولید پارامترهای مورد استفاده در مدل‌های اقلیمی هستند (Taylor, 1994, 735). هواویزها تاثیر زیادی روی آب‌وهوا و محیط زندگی بشر دارند، به خصوص هواویزهای تروپسفری که با عنوان ذرات معلق شناخته می‌شوند، تاثیر سوی بر سلامتی بشر می‌گذارند. مقدار حجم ذرات معلق موجود در جو از مهمترین شاخص‌های آلودگی هوا محسوب شده و به همین علت بیشترین توجه را نسبت سایر آلاینده‌های جوی در سازمان‌های حفاظت محیط زیست برخودار هستند (Wang, 2010, 53). بنا به گزارش اداره محیط زیست تهران، رشد سریع شهر و صنعت در آن موجب شده است که ذرات معلق تبدیل به مهمترین آلودگی هوای تهران و کلان‌شهرها شود (گزارش سالانه مرکز مطالعات و برنامه ریزی شهر تهران، ۱۳۸۷).

همچنین بسیاری از تحقیقات اپیدمی لوژی نشان دادند که قرار داشتن در معرض ذرات معلق موجب مرگ‌ومیرهای زودرس، سرطان ریه، سرطان خون، برونشیت، آسم و بسیاری دیگر از بیماری‌های تنفسی خواهد شد (Asgari, 1998, 54; Yunesian, 2002, 20; Pearson, 2000, 175; Gauderman, 2004, 1058).

اندازه‌گیری‌های ایستگاه‌های زمینی آلودگی‌سنج دارای دقت بالایی هستند، اما این اندازه-گیری‌ها تنها محدوده‌های اطراف ایستگاه اندازه‌گیری را پوشش می‌دهند. تنها با اتکا به اندازه-گیری‌های زمینی، پردازش مدل‌های پیچیده آلودگی هوا، که با در نظر گرفتن منبع، مسیر حرکت و خصوصیات شیمیایی انواع آلودگی‌ها اقدام به برآورد حجم آلودگی در مناطق مختلف می‌کنند، با مشکل مواجه می‌شوند(Kaufman, 1997, 16816). در اکثر شهرها و از جمله شهر تهران ایستگاه‌های سنجش آلودگی دارای توزیعی تنک و غیر همگن می‌باشند (قربانی، ۱۳۹۰، ۴۶). 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 سنجش‌ازدوری، همچون AOD[1]، در پایش هواویزها استفاده می‌شود، می‌گذرد و در طی گذشت این زمان تکنیک‌های سنجش‌ازدوری با بهبود و پیشرفت-های قابل ملاحظه‌ای مواجه شدند (Wang, 2010, 54). بهره بردن سنجش‌ازدور ماهواره‌ای هواویزها از پوشش مکانی و زمانی وسیع، این توانایی را در این تکنیک بوجود آورده است تا اطلاعات ارزشمندی برای مطالعات اپیدمیلوژی، کمک به طراحی شبکه اندازه‌گیری و برآورد

[1]. Aerosol Optical Depth

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

آلودگی هوا فراهم کند(Kaufman, 1997, 16817). به بیان دیگر اطلاعات فراوان با هزینه اندک از مزایای این روش می‌باشد. مودیس[1] (اسپکترورادیومتر تصویربردار با قدرت تفکیک متوسط) سنجنده‌ای است که توسط NASA در سال‌های ۱۹۹۹ و ۲۰۰۲ بوسیله دو ماهواره EOS در فضا قرار گرفت (NASA, 2009, 39). استفاده از باندهای ۱، ۳ و ۷ مودیس در بازیابی اطلاعات از هواویزها عمومیت فراوانی دارد (Remer, 2007, 16). اساس بازیابی اطلاعات از هواویز بر اختلاف بین بازتابندگی سطح و بازتابندگی رسیده به سنجنده استوار است (Kufman, 1998, 17055). این اختلاف اساس محاسبه عمق نوری هواویز را نیز تشکیل می‌دهد (Kufman, 1997, 16823).

به طور کلی در مطالعات سنجش‌ازدوری که هدف آنها برآورد و پیش‌بینی غلظت ذرات معلق می‌باشد، غالبا اطلاعات مورد نیاز آنها AOD، اطلاعات هواشناسی و اقلیم منطقه می باشد. در تحقیق‌های صورت گرفته معمولا از عمق نوری هواویز استخراج شده از تصاویر سنجنده مودیس استفاده شده‌است (Tian, 2010, 220).

مدل‌های زیادی توسط محققین به منظور برآورد غلظت ذرات معلق ارائه شده است. اما نکته‌ای که باید به آن اشاره کرد این است که مدل‌های تعریف شده کاربری جهانی نداشته و هر مدل تنها در منطقه‌ای که از مشاهدات مربوط به آن منطقه در تولید مدل استفاده شده است کارایی دارد(Martin, 2008, 7829) . تیان در سال ۲۰۱۰ از دو مدل برای پیش بینی غلظت ذرات معلق استفاده کرد، در مدل اول تنها از رگرسیون خطی بین مشاهدات AOD و غلظت ذرات معلق اندازه گیری شده در ایستگاه های زمینی استفاده کرده است (Tian, 2010, 223). او در مدل دوم از یک رابطه شبه تجربی بین AOD محاسبه شده از تصاویر مودیس و اطلاعات هواشناسی زمینی و ماهواره‌ای استفاده کرد. گوپتا نیز با استفاده از AOD و مدل‌های خطی به برآورد غلظت ذرات معلق با ابعاد کمتر از ۲,۵ میکرن پرداخته است (Gupta, 2006, 5888; 2008, 333).

ون دنکلار استفاده ازمدل GEOS-CHEM (مدلی که خصوصیات شیمیایی ذرات معلق را وارد محاسبات می‌کند) را موجب بهبود همبستگی مکانی بین PM-AOD دانست (Van Dankelaar, 2006, 77)، به نحوی که ضریب همبستگی در منطقه مورد مطالعه او از ۰/۲۹ تا ۰/۵۴-۰/۶۸ ارتقاء یافت. همچنین بویا معتقد است که با وارد کردن پارامترهای فصلی تاثیر زیادی در بهبود همبستگی بین AOD و غلظت ذرات معلق ایجاد می‌شود(Bouya, 2010, 730).

[1] . MODIS

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

انگل در سال ۲۰۰۶ بیان داشت که تحقیق‌ها در مناطق مختلف مورد مطالعه نشان دادند که ترکیب LIDAR و مشاهدات ماهواره‌ای مودیس و اندازه گیری های زمینی $PM_{2.5}$ می توانند اساس تشکیل نمایش سه بعدی از کیفیت هوا باشند. یکپارچه‌سازی و استفاده همزمان این سه نوع مشاهدات سودمندتر از استفاده جداگانه آنها می‌باشد. با ارسال سیستم Cloud and Aerosol Lidar for Pathfinder Spaceborne (CALIPSO) به فضا زمینه دسترسی به اطلاعات هواویزها توسط فناوری LIDAR مساعدتر شده است (Engel, 2006, 8066).

تحقیقات گذشته حکایت از موفقیت نسبی AOD در برآورد غلظت ذرات معلق دارد، اما مشکلاتی همچون قدرت تفکیک‌های نا مناسب AOD های استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای در محیط‌های شهری و وابسته بودن مدل‌های موجود به شرایط منطقه‌ای، از محدودیت‌های استفاده از این روش‌ها در محیط‌های شهری می‌باشد (Tian, 2010, 228).

از روش‌های دیگر برآورد غلظت ذرات معلق، محاسبه بازتابندگی ذرات معلق هواویزه می باشد. در مدل هواویزه به صورت مستقیم بین مقدار بازتابندگی ذرات معلق و غلظت آن در جو ارتباط برقرار می‌گردد. از مزایای این روش می‌توان به قابل استخراج بودن هواویزه در قدرت تفکیک‌های مناسب برای محیط‌های شهری اشاره کرد. (Ling-jun, 2007, 955) با استفاده از این روش به ضریب همبستگی ۰/۵۶ بین هواویزه و حجم ذرات معلق با قطر کمتر از ۱۰ میکرومتر (PM_{10}) در شهر پکن دست یافته است.

این تحقیق با هدف برآورد لحظه‌ای آلودگی ذرات معلق ($PM_{2.5}$) در شهر تهران و با روش هواویزه انجام شده است. در سال‌های اخیر، لزوم پایش و کنترل آلاینده‌های هوای تهران، در سطح وسیع و با روش‌هایی که از سرعت و هزینه کمتری برخوردار باشند، احساس می‌شود. در این راستا، تحقیق انجام شده در جهت کم کردن عدم قطعیت برآورد سنجش‌ازدوری غلظت ذرات معلق، صورت پذیرفته است.

داده‌های مورد استفاده

منطقه مورد مطالعه

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 و ۲ دقیقه شرقی تا ۵۱ درجه و ۳۶ دقیقه شرقی، به طول تقریبی ۵۰ کیلومتر و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۳۴ دقیقه شمالی تا ۳۵ درجه و ۵۰ دقیقه شمالی به عرض تقریبی ۳۰ کیلومتر گسترده شده است. ارتفاع شهر در شمالی‌ترین نقاط به ۱۸۰۰ متر و در جنوبی‌ترین نقاط به ۱۰۵۰ متر از

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

سطح دریا می رسد. تهران از شمال به نواحی کوهستانی و از جنوب به نواحی کویری منتهی شده‌است. نواحی شمالی از آب و هوای سرد و خشک و نواحی جنوبی از آب و هوای گرم و خشک برخوردارند.

اطلاعات ایستگاه‌های آلودگی‌سنج

غلظت ذرات معلق توسط ایستگاه‌های زمینی و در ارتفاع کمی از سطح زمین اندازه‌گیری می‌شود. پهنه‌بندی دقیق کیفیت هوا تنها با استفاده از داده‌های شبکه‌های اندازه‌گیری زمینی مقدور نیست، زیرا تعداد این ایستگاه‌ها بسیار اندک بوده و کل شهر را به خوبی پوشش نمی-دهند. این در حالیست که برای پوشش صحیح کیفیت هوای شهر تهران نصب ایستگاه‌های متعدد دیگر ضروری است، که خود مستلزم هزینه زیادی می‌باشد (قربانی، ۱۳۹۰، ۴۶).

شکل (۱) پراکندگی ایستگاه‌های اندازه‌گیری آلودگی هوای شهر تهران

اطلاعات مورد استفاده در این تحقیق، غلظت ذرات معلق با قطر کمتر از ۲/۵ میکرومتر می-باشد که از ایستگاه‌های آلودگی‌سنج هوا تحت نظارت سازمان محیط زیست تهران اخذ شده است. این ایستگاه‌ها، اطلاعات را در بازه‌های زمانی یک ساعته ثبت می‌کنند. اطلاعات به کار رفته در این تحقیق مربوط به فصل‌های تابستان و پاییز ۱۳۸۹ می‌باشد.

تصاویر سنجنده مودیس Terra

مودیس (اسپکترورادیومتر تصویربردار با قدرت تفکیک متوسط) سنجنده ای است که بر روی ماهواره (Terra (EOS AM-1 قرار داده شده است. Terra مودیس هر یک الی دو روز یکبار از

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

تمام سطح زمین تصویربرداری کرده و داده هایی در ۳۶ باند طیفی اخذ می‌کند. باندهای سنجنده مودیس در محدوده طیفی ۰,۴ تا ۱۴ میکرومتر با توان تفکیک مکانی ۲۵۰ و۵۰۰ و۱۰۰۰ متر قرار دارند (Remer, 2007, 15). سنجنده مودیس برای جاروب کردن در صفحه عمود بر صفحه حرکت ماهواره طراحی شده است. طول جاروب ماکزیمم ۵۵ درجه در دو طرف پاسو (۱۱۰ درجه) منجر به پهنای نواری ۲۳۳۰ کیلومتری که مرکز آن روی مسیر زمینی ماهواره قرار دارد، می‌شود. ارتفاع مداری طراحی شده ۷۰۵ کیلومتر می‌باشد. هر باند طیفی از یک آرایه خطی ۱۰ عنصری برای باندهای با توان تفکیک ۱۰۰۰ متر (باندهای ۸ تا ۳۶)، آرایه ۲۰ عنصری برای باندهای با توان تفکیک ۵۰۰ متر (باندهای ۳ تا ۷) و آرایه ۴۰ عنصری برای باندهای با توان تفکیک ۲۵۰ متر(باندهای ۱ تا ۲) استفاده می‌کند (Remer, 2007, 22).

روش تحقیق

انرژی رسیده به سنجنده در بالای جو در تمامی طول موج‌ها از سه منبع سطح زمین، جو و هواویز نشات می‌گیرد(Martin, 2008, 7830).

$$R(\theta) \approx R_m(\theta) + R_a(\theta) + R_s(\theta) \qquad (۱)$$

در این رابطه θ، $R_m(\theta)$، $R_a(\theta)$ و $R_s(\theta)$ به ترتیب زاویه پراکندگی، پراکندگی مولکولی(بازتابندگی جو)، بازتابندگی ناشی از هواویزها و بازتابندگی سطحی می‌باشد.

پراکندگی مولکولی با استفاده از روابط موجود قابل محاسبه است. اگر بتوان به طریقی سهم سطح زمین را در بازتابندگی کل رسیده به سنجنده محاسبه کرد، دست‌یابی به بازتابندگی ناشی از ذرات معلق امکان‌پذیر خواهد بود (Martin, 2008, 7831). بنابراین محاسبه بازتابندگی سطح از ضروریات اندازه‌گیری ماهواره‌ای هواویزها می‌باشد.

در طول موج ۲/۱۲ میکرومتر وجود هواویز و ذرات معلق تاثیر محسوسی بر مشاهدات ماهواره‌ای ندارد (Remer, 2007, 36). به این ترتیب در این طول موج امکان محاسبه بازتابندگی سطحی وجود دارد. اما در طول موج ۰/۶۴۴ میکرومتر تاثیر ذرات معلق بر اندازه-گیری‌های ماهواره‌ای محسوس می‌باشد (Remer, 2007, 36). بنابراین اگر در این طول موج بازتابندگی سطح مشخص باشد، می توان بازتابندگی ناشی از ذرات معلق را برآورد کرد. بر اساس مشاهدات توسط محققان، یک ارتباط بین بازتابندگی سطح در طول موج ۰/۶۴۴ و ۲/۱۲ میکرومتر مشاهده شده است که با استفاده از آن می‌توان بازتابندگی سطحی را در طول موج ۰/۶۴۴ میکرومتر محاسبه کرد (Kaufman, 1997, 16823).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

مراحل آماده سازی و پردازش تصاویر در این تحقیق بدین شکل است: ۱) انجام تست ابر، که از روش آستانه‌گذاری دمای درخشندگی استفاده می‌شود. ۲) استخراج بازتابندگی سطحی، که با استفاده از روابط تجربی موجود بین بازتابندگی در طول موج‌های مرئی و ۲/۱۲ میکرومتر صورت می‌پذیرد. ۳) برآورد سهم بازتابندگی ناشی از ذرات معلق، با روش هواویزه.

استخراج بازتابندگی سطحی

در استخراج پارامترهای جوی از سنجنده مودیس و یا هر سنجنده دیگری، چالش اصلی جداسازی سهم‌های بازتایندگی سطح، جو و هواویز از بازتابندگی کل می‌باشد (Robert, 2009, 15). در سطوح اقیانوس و سطوح تیره در طول موج‌های قرمز و بالاتر، فرض ناچیز بودن بازتابندگی سطح تقریب خوبی می‌باشد (Remer, 2007, 18). اما برای سطوح خشکی در طول موج‌های مرئی و مادون قرمز مقدار بازتابندگی از مقدار صفر فاصله گرفته و بر اساس نوع پوشش سطح، مقادیر متنوعی از بازتابندگی‌ها توسط سنجنده ثبت می‌گردد (Robert, 2009, 19).

باید توجه داشت که خطایی کوچک در برآورد بازتابندگی سطح، موجب خطای زیادی در استخراج پارامترهای جوی می‌شود. به عنوان مثال خطایی در حد ۰/۰۱ در برآورد بازتابندگی سطح، موجب خطایی در حدود ۰/۱ در برآورد عمق نوری هواویز می‌شود (Remer, 2007, 21). با این حساب دقت محصولات هواویزی سنجش از دور تا حد زیادی وابسته به دقت برآورد بازتابندگی سطح می‌باشد (Martin, 2008, 7830).

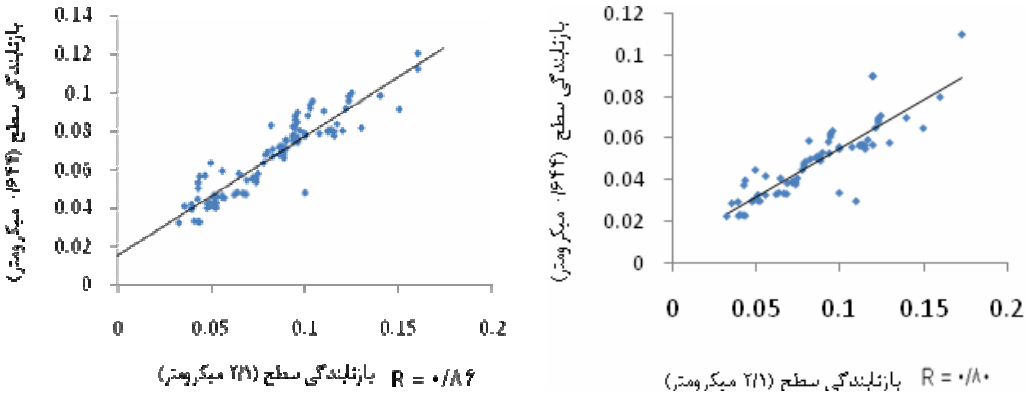
کافمن در سال ۱۹۹۷با مشاهده بازتابندگی در سطوح پوشیده از گیاه و تیره به یک ارتباط بین بازتابندگی این سطوح در طول موج‌های مرئی و SWIR پی برد. با شبیه سازی مدل‌های گیاهی، مشخص شد دلیل این ارتباط جذب نور در ناحیه مرئی و تابش نور در طول موج‌های مادون قرمز در گیاهان می‌باشد (Kaufman, 1997, 16824). بر اساس نتایج این تحقیق‌ها، نسبت بازتابندگی‌ها در سطوح تیره یا پوشیده از گیاه در طول موج‌های ۰/۶۴۴ و ۲/۱۲ میکرومتر تقریبا مقداری ثابت است.

$$\rho_{0.66}{}^{s} \approx \rho_{2.12}/2 \qquad (۲)$$

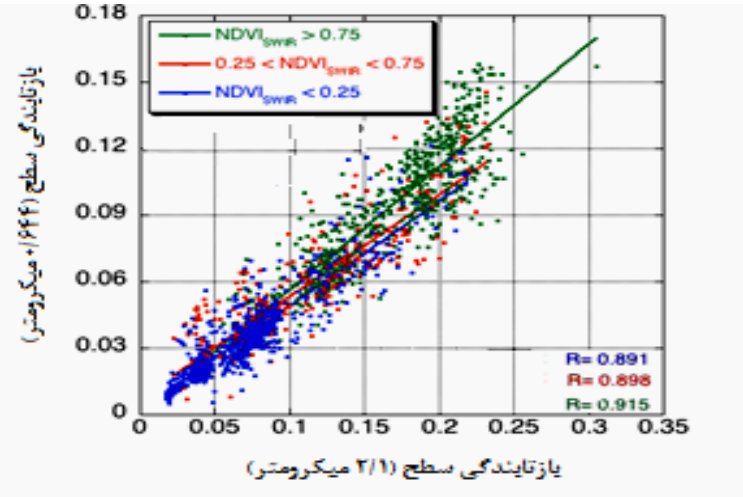
در این رابطه $\rho_{0.66}{}^{s}$ و $\rho_{2.12}$ به ترتیب بازتابندگی سطح در طول موج ۰/۶۴۴ و بازتابندگی ظاهری در طول موج ۲/۱۲ میکرومتر می‌باشد. مقدار این نسبت برای سطوح روشن-تر تغییر می‌کند (Kaufman, 1997, 16824).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

بسیاری از پژوهشگران از جمله (Robert, 2009,55;, Remer, 2007, 55) به بررسی ارتباط بین بازتابندگی سطحی در طول موج ۰/۶۴۴ و ۲/۱۲ میکرومتر بر اساس تغییرات پوشش گیاهی و تقسیم مناطق به شهری و غیر شهری پرداخته‌اند.



شکل (۲) میزان همبستگی بین بازتابندگی سطح در طول موج‌های ۰/۶۴۴ و ۲/۱۲ میکرومتر در محیط شهری، تصویر سمت چپ و راست به ترتیب نشان‌دهنده تغییرات بازتابندگی‌ها در فصل زمستان و تابستان می‌باشند (بازسازی شده از کار (Robert, 2009, 42)).



شکل (۳) چگونگی تغییرات بازتابندگی سطوح مختلف در باندهای ۲/۱۲ و ۰/۶۴۴ میکرومتر. خط آبی: مناطق با پوشش گیاهی کم وتنک (ضریب همبستگی ۰/۸۹۱) ، خط قرمز: مناطق با پوشش گیاهی متوسط (ضریب همبستگی ۰/۸۹۸)، خط سبز: مناطق با پوشش گیاهی فراوان (ضریب همبستگی ۰/۹۱۵) (بازسازی شده از کار (Remer, 2007, 43)).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

با توجه به شکل (۲) همبستگی بین بازتابندگی سطح در طول موج ۰/۶۴۴ و ۲/۱۲ میکرومتر برای محیط شهری در فصل تابستان بیشتر از فصل زمستان می‌باشد که از دلایل آن می‌توان به بیشتر بودن پوشش گیاهی در فصل تابستان نسبت به فصل زمستان اشاره کرد (Robert, 2009, 67).

از مهمترین کاربردهای بازتابندگی سطحی، استفاده از آن در استخراج AOD از تصاویر ماهواره‌ای می‌باشد. بنابراین برای آنکه بتوان از مدل محاسبه بازتابندگی سطحی در هر مکانی و با هر سطح از پوشش گیاهی استفاده کرد، مدل‌ها بر اساس تقسیم‌بندی مقدار $NDVI_{SWIR}$ منطقه مورد مطالعه توسعه یافته‌اند. در شکل (۳) همبستگی بین این بازتابندگی‌ها با توجه به تقسیم بندی پوشش سطح از نظر میزان پوشش گیاهی و مقدار $NDVI_{SWIR}$ دیده می‌شود.

(۳)

$$NDVI_{SWIR} = \frac{\rho_{1.24} - \rho_{2.12}}{\rho_{1.24} + \rho_{2.12}}$$

$\rho_{1.24}$ و $\rho_{2.12}$ به ترتیب بازتابندگی در طول موج‌های ۱/۲۴ و ۲/۱۲ میکرومتر می‌باشد. دلیل استفاده از $NDVI_{SWIR}$، حساسیت کمتر طول موج‌های استفاده شده در این شاخص به ذرات معلق نسبت به $NDVI_{MIR}$ می‌باشد. $NDVI_{SWIR}$ در صورت عدم وجود هواویز هم‌خوانی خوبی با $NDVI_{MIR}$ دارد (Robert, 2009, 42).

سطوح شهری و از جمله سطح شهر تهران معمولا در حالت $NDVI_{SWIR} < ۰/۲۵$ قرار می‌گیرند، و همانطور که در شکل (۳) دیده می‌شود، در این محدوده $NDVI_{SWIR}$ ، همبستگی بین بازتابندگی سطح در طول موج‌های ۰/۶۴۴ و ۲/۱۲ میکرومتر در حدود ۰/۸۹ می‌باشد.

هندسه تصویر برداری و زاویه پراکنده‌سازی نیز به عنوان دیگر عوامل تاثیر گذار در ارتباط بین بازتابندگی در طول موج مرئی و SWIR در داده‌های ماهواره‌ای مطرح می‌باشند (Remer, 2007, 42). بنا به پیشنهاد (Remer, 2007, 42) و (Gatebe, 2002, 814) بهتر است در برآورد بازتابندگی سطحی در طول موج مرئی با استفاده از بازتابندگی در طول موج ۲/۱۲ میکرومتر، زاویه پراکنده‌سازی نیز لحاظ شود. بیشترین همبستگی بین بازتابندگی سطحی در طول موج ۰/۶۴۴ و ۲/۱۲ میکرومتر در زاویه پراکنده‌سازی Θ روی می‌دهد (Remer,2007, 42 Robert,2009, 42).

با توجه به پرهزینه بودن اندازه‌گیری بازتابندگی سطحی در طول موج ۰/۶۴۴ در سطح شهر، و معتبر بودن روابطی که توسط (Remer, 2007, 42-45) و (Robert, 2009, 39-50) ارائه شد وهمچنین با توجه به استفاده بسیار از این روابط و یا مشابه آنها توسط افرادی چون (Kawta,

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

(2007 و (Zhang, 2010)، در این تحقیق نیز از این روابط برای محاسبه بازتابندگی سطحی استفاده می‌شود.

روابط ارائه شده برای محاسبه بازتابندگی سطح در طول موج ۰/۶۴۴ میکرومتر که معروف به روابط Levy هستند، به صورت زیر می‌باشد(Robert, 2009, 45; Remer, 2007, 42).

(۴)

$$\rho^{S}_{0.66} = f(\rho_{2.12}) = \rho_{2.12} \times slope_{0.66/2.12} + yint_{0.66/2.12}$$

$$slope_{0.66/2.12} = slope^{NDVI_{SWIR}}_{0.66/2.12} + 0.002 - 0.27 \quad (۵)$$

$$slope^{NDVI_{SWIR}}_{0.66/2.12} = 0.48\rho_{2.12}; NDVI_{SWIR} < 0.25 \quad (۶)$$

$$y\mathrm{int}_{0.66/2.12} = -0.00025\Theta + .033$$

محاسبه Θ بر اساس رابطه زیر انجام می‌پذیرد.

$$\Theta = \cos^{-1}(-\cos\theta_0 \cos\theta + \sin\theta_0 \sin\theta \cos\varphi)$$

در این رابطه θ_0، θ و φ به ترتیب زاویه خورشیدی، زاویه زنیتی و زاویه آزیموت می‌باشد.

برآورد بازتابندگی ذرات معلق

مدل هواویزه بر اساس رابطه ۷ نوشته می‌شود.

$$ACR_1 = \rho_1 - \rho_1^{*} - m_\lambda \quad (۷)$$

ρ_1^{*}، ρ_1 و m_λ به ترتیب بازتابندگی سطح در طول موج ۰/۶۴۴میکرومتر، بازتابندگی ظاهری در طول موج ۰/۶۴۴ میکرومتر و پراکنده‌سازی و جذب مولکول‌های هوا می‌باشد. لازم به ذکر است که این رابطه در حالت جو پایدار صادق است (Ling-jun, 2007, 957). یک رگرسیون خطی بین هواویزه و غلظت ذرات معلق به صورت زیر خواهد بود.

$$ACR = K \times PM + b = \rho_1 - \rho_1^{*} - m_\lambda \quad (۸)$$

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

در این رابطه تمامی پارامترها به جزء m_λ در دسترس هستند. بنابراین رابطه به صورت زیر تبدیل می‌شود.

$$\rho_1 - \rho_1^* = K \times PM + (b + m_\lambda) \quad (۹)$$

در رابطه نهایی m_λ به عنوان یک پارامتر نامعین در معادله وجود دارد و ممکن است تاثیر منفی بر نتیجه رگرسیون بگذارد. به منظور بررسی چگونگی تاثیر مولکول‌های هوا بر مشاهدات و تاثیر نادیده گرفتن آن در یک محیط محدود مانند تهران بر روش هواویزه، از تئوری پراکنش ریلی استفاده شده است. عمق نوری پراکنش ریلی از رابطه (Buchotlz, 1995, 2770) محاسبه می‌شود.

$$\tau_{Ray}(\lambda) = A.\lambda^{-(B+C\lambda+\frac{\lambda}{D})}.\frac{P(z)}{P_0} \quad (۱۰)$$

$$P(Z) = P_0.\exp\left[\frac{-29.87.g.0.75.Z}{8.315.(T_{Surf} - g.075.Z}\right] \quad (۱۱)$$

در این روابط A، B، C و D مقادیر ثابت هستند و g و P_0 برای تهران به ترتیب مقدار ms^{-2} ۹/۷۷۵ و Pa ۱۰۰۸ می‌باشد. همچنین T_{Surf} و Z به ترتیب دمای سطح زمین و ارتفاع منطقه از سطح دریا می‌باشد

با توجه به رابطه ۱۱ نسبت عمق نوری پراکنش ریلی برای دو نقطه مطابق با رابطه۱۲ خواهد بود(Buchotlz, 1995, 2772). با این حساب اگر حداکثر اختلاف ارتفاع و دما در محیط شهری تهران به ترتیب ۸۰۰ متر و ۵ درجه در نظر بگیریم، عدد ۱/۰۵ محاسبه می‌شود.

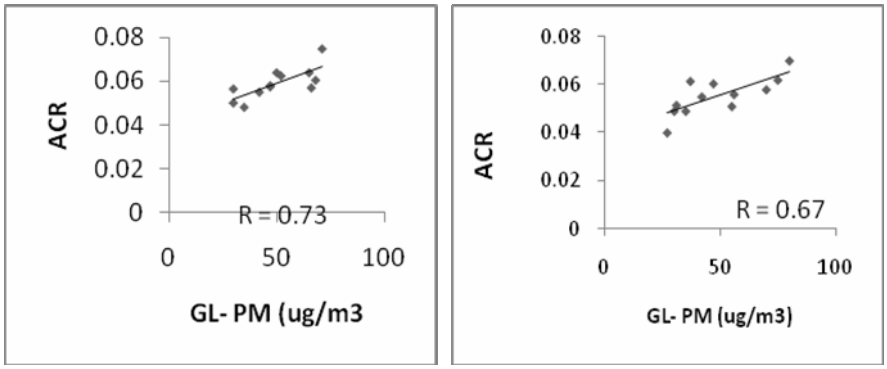
$$\frac{\tau_{Ray}^2(\lambda)}{\tau_{Ray}^1(\lambda)} = \frac{P(Z)^2}{P(Z)^1} \qquad \frac{\tau_{Ray}^2(\lambda)}{\tau_{Ray}^1(\lambda)} = 1.05 \quad (۱۲)$$

با توجه به این نتایج، تاثیر در نظر نگرفتن پراکنش ریلی در تخمین بازتابندگی هواویزها محسوس نخواهد بود و با توجه به سایر عدم قطعیت‌های سنجش‌ازدوری دیگر قابل اغماض خواهد بود.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

بحث و نتایج

توانایی مدل هواویزه در برآورد غلظت ذرات معلق جو در تعدادی از روزهای تابستان و پاییز ۸۹ مورد آزمون قرار گرفت. پوشش گیاهی سطح شهر تهران در فصل تابستان در اوج خود قرار دارد و رفته رفته با شروع پاییز رو به کم شدن می‌گذارد. این روند به نحوی است که در اواخر پاییز و اوایل زمستان این پوشش به حداقل خود می‌رسد. در جدول (۱) نتایج حاصل از اعمال مدل مودیس هواویزه به نمایش در آمده است. این نتایج از محاسبه بازتابندگی ذرات معلق در ایستگاه‌های چشمه، قائم، سوهانک، رازی، بهاران، شهید بهشتی، علم‌وصنعت، شهر ری، شکوفه، سلامت و منطقه ۱۵ از تصاویر مودیس کسب شده است.



شکل (۴) تغییرات GL-[$PM_{2.5}$] برحسب هواویزه محاسبه شده از تصاویر مودیس . شکل چپ مربوط به روز ۱۳۸۹/۶/۱۲ و شکل سمت راست مربوط به روز ۱۳۸۹/۷/۵ می‌باشد.

جدول (۱) همبستگی بین هواویزه و غلظت ساعتی ذرات معلق ($PM_{2.5}$)

تاریخ	۱۳۸۹/۶/۱۲	۱۳۸۹/۶/۱۶	۱۳۸۹/۶/۱۸	۱۳۸۹/۶/۲۳	۱۳۸۹/۷/۳	۱۳۸۹/۷/۴
ضریب همبستگی	۰/۶۷	۰/۶۸	۰/۶۳	۰/۶۸	۰/۶۰	۰/۶۵
میانگین PM (ug/m3)	۴۵	۴۰	۴۰	۴۵	۴۶	۴۰
تاریخ	۱۳۸۹/۷/۵	۱۳۸۹/۷/۱۲	۱۳۸۹/۷/۱۴	۱۳۸۹/۷/۱۶	۱۳۸۹/۷/۱۷	۱۳۸۹/۷/۳۰
ضریب همبستگی	۰/۷۳	۰/۶۷	۰/۶۸	۰/۵۷	۰/۵۳	۰/۴۷
میانگین PMI(ug/m3)	۵۰	۵۷	۵۹	۵۳	۴۳	۵۳
تاریخ	۱۳۸۹/۸/۲۶	۱۳۸۹/۸/۲۶	۱۳۸۹/۸/۳۰	۱۳۸۹/۹/۱۴	۱۳۸۹/۹/۱۹	۱۳۸۹/۱۰/۹
ضریب همبستگی	۰/۴۸	۰/۲۶	۰/۵۲	۰/۴۰	۰/۵۴	۰/۴۱
میانگین PM(ug/m3)	۶۳	۶۷	۶۳	۶۶	۷۸	۱۰۲

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

همانطور که قبلا نیز توضیح داده شده است محاسبه بازتابندگی سطح در فصل تابستان نسبت به فصل زمستان، با دقت بیشتری امکان‌پذیر است. با توجه به این نکته و با استفاده از روش توضیح داده شده هواویزه، در فصل تابستان برآورد بازتابندگی ناشی از ذرات معلق و هواویزها با دقت بهتری انجام می‌پذیرد. نتایج حاصله در جدول (۱) نیز نشان‌دهنده آن است که در فصل تابستان همبستگی بیشتری بین بازتابندگی برآورده شده بازتابندگی و غلظت ذرات معلق محاسبه شده است و با پیش‌روی به سوی زمستان از مقدار همبستگی مذکور کاسته شده است.

بالاترین همبستگی بین غلظت ذرات معلق($PM_{2.5}$) و هواویزه در بین روزهایی که در این تحقیق از تصاویر ماهواره‌ای آنها استفاده شد، مربوط به ۵ مهر با مقدار ۰/۷۳ بود و این در حالی است که در ماه‌های آبان و آذر ضریب همبستگی کاهش یافته و به مقدار کمتری از ۰/۴ می‌رسد. البته شاید به نظر برسد همبستگی در حد ۰/۶ تا ۰/۷ در کل مقدار بالایی نباشد، ولی باید به این نکته توجه داشت که با توجه به عدم قطعیت‌های موجود در برآورد غلظت ذرات معلق با روش‌های سنجش‌ازدوری، امکان دست‌یابی به دقت‌های بالاتر دشوار است. همچنین استفاده از این روش در فصولی که پوشش گیاهی از سطح زمین برچیده شده است و به ویژه فصل زمستان، نتیجه‌بخش نخواهد بود.

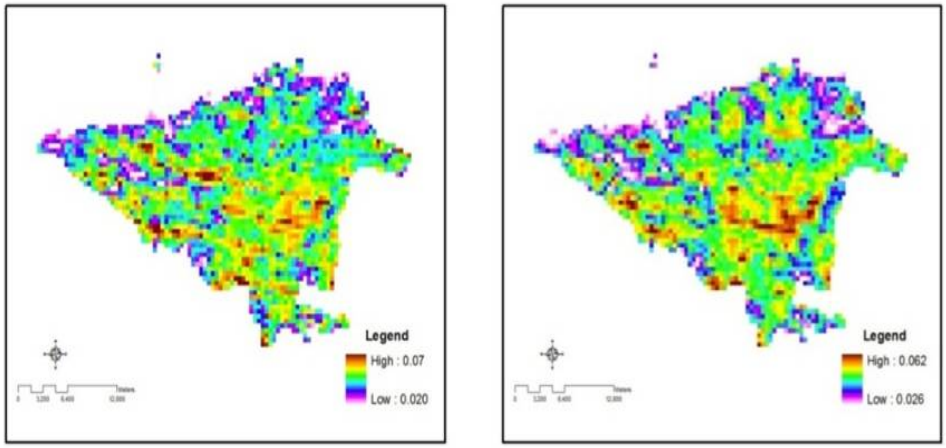
نقشه توزیع ذرات معلق تهران

با توجه به اینکه همبستگی نسبتا خوبی بین هواویزه و غلظت ذرات معلق به صورت روزانه و بویژه در فصل تابستان دیده شده است، می‌توان از این مدل برای تولید نقشه‌های توزیع ذرات معلق در سطح شهر استفاده کرد. در شکل (۵) نقشه بازتابندگی ذرات معلق ($PM_{2.5}$) به نمایش در آمده است.

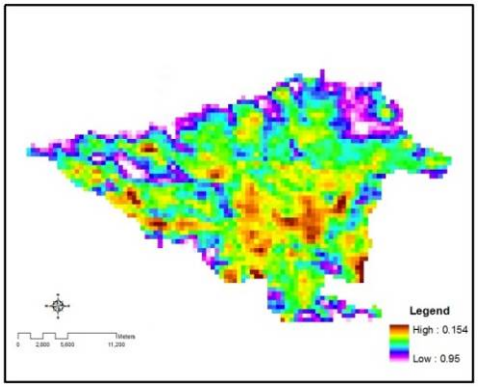
توزیع لحظه‌ای آلودگی می‌تواند متاثر از شرایط مختلف محیطی و آب‌وهوایی باشد، به عنوان مثال جهت و سرعت باد در پراکندگی آلودگی در سطح شهر نقش دارد. برای اینکه نقش و تاثیر شرایط محیطی و آب‌وهوایی در کیفیت نقشه توزیع آلودگی به حداقل برسد، می‌توان از تجمیع تصاویر چند روز مختلف استفاده نمود. به این صورت که با جمع مقدار بازتابندگی ناشی از ذرات معلق برای پیکسل‌های متناظر در روزهای مختلف (تصاویر مختلف) نقشه‌ای به دست می‌آید که در آن پیکسل‌های آلوده نمایان‌تر خواهند شد. در این حالت شرایط آب‌وهوایی کمترین تاثیر را در نقشه نهایی خواهد داشت. در تصویر زیر نقشه توزیع آلودگی با استفاده از

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

۲۰ تصویر انتخابی و به صورت تجمیعی از تاریخ ۵ شهریور تا ۱۵ مهر ۱۳۸۹ به نمایش در آمده است.



شکل (۵) توزیع بازتابندگی ناشی از ذرات معلق با قطر کمتر از ۲/۵ میکرومتر در طول‌موج ۰/۶۴۴ میکرومتر در سطح شهر تهران استخراج شده از تصویر مودیس با قدرت تفکیک ۵۰۰ متر در دو تاریخ (۶) نقشه بازتابندگی ذرات معلق ($PM_{2.5}$) ۶/۱۶ (تصویر راست) و ۷/۱۲ سال ۸۹ (تصویر چپ)شکل



شکل (۷) توزیع بازتابندگی ناشی از ذرات معلق با استفاده از ۲۰ تصویر انتخابی و به صورت تجمیعی از تاریخ ۱۰ شهریور تا ۲۰ مهر ۱۳۸۹

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

همانطور که در شکل ۷ دیده می‌شود آلودگی مناطق مرکزی تهران بیشتر از سایر مناطق می‌باشد. مناطق مرکزی تهران دارای تراکم جمعیتی و سازه‌ای بیشتری نسبت به سایر مناطق می‌باشد و آلودگی در آن تراکم به دام می‌افتد و به مرور زمان به مقدار آن افزوده می‌شود.

منابع خطا

تاثیر مولکول‌های هوا از جمله منابع خطا در این پژوهش می‌باشد. تاثیر مولکول‌های هوا از نقطه‌ای به نقطه دیگر متفاوت است (Ling-lung, 2007, 959)، اما در این تحقیق تاثیر آن در یک روز برای کل سطح شهر تهران یکسان در نظر گرفته شده است. از دیگر موارد عدم قطعیت می‌توان به خطای موجود در فرض تعیین بازتابندگی سطح اشاره کرد. بازتابندگی در طول موج ۰/۶۴۴ میکرومتر تابع بازتابندگی در طول موج۲/۱۲ میکرومتر در نظر گرفته شده است. اما این مسئله به شدت تحت تاثیر شرایط پوشش زمینی می‌باشد. این فرض در سطوح با بازتابندگی کم، عملکرد بهتری دارد. مورد دیگر از عدم قطعیت‌هایی که باعث ایجاد خطا در محاسبات می‌شود، چگونگی اندازه‌گیری غلظت ذرات معلق توسط ایستگاه‌های آلودگی‌سنج می‌باشد. زیرا ایستگاه‌ها معمولا تا ارتفاع ۱۰ متری سطح زمین و تنها محدوده اطراف به خود را پوشش می‌دهند، و این در حالیست که در داده‌های ماهواره‌ای میانگینی از تاثیر حضور ذرات معلق در محدوده تحت پوشش هر پیکسل (به عنوان مثال ۵۰۰ متر در ۵۰۰ متر) موجود است.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق از روش هواویزه برای برآورد روزانه غلظت ذرات معلق هوای تهران استفاده شده است. از نقاط قوت این روش نسبت به روش‌هایی که از عمق نوری هواویز استفاده می‌کنند می‌توان به عدم استفاده از Look-up table اشاره کرد. زیرا استفاده از این پیش‌فرض‌ها می‌تواند دریچه‌ای برای ورود خطا به محاسبات باشد (Ling-lung, 2007, 959).

هواویزه در فصل تابستان دارای ارتباط معناداری با تغییرات غلظت ذرات معلق بوده و این ارتباط نشان دهنده آن بود که در روزهایی که پوشش گیاهی در سطح شهر تهران موجود است (اواسط بهار، تابستان و اوایل پاییز)، این روش قادر خواهد بود با همبستگی نسبتا خوبی (تا R=0.7) به صورت روزانه غلظت ذرات معلق را برآورد کند.

از نتایج این مدل می‌توان در تجزیه و تحلیل‌های کلی توزیع آلودگی استفاده کرد. در نقشه تولید شده از توزیع آلودگی دیده می‌شود که مرکز و جنوب غربی تهران آلودگی بیشتری دارد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

منابع و ماخذ

۱. قربانی، رضوان، (۱۳۹۰) **اعتبار سنجی داده‌های سنجنده مودیس در رابطه با آلودگی‌های جوی در مناطق شهری**، پایان نامه کارشناسی ارشد سنجش‌ازدور به راهنمایی دکتر محمدرضا مباشری ، دانشکده نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی

۲. گزارش سالانه مرکز مطالعات و برنامه ریزی شهر تهران، ۱۳۸۷

Asgari, MM. A. DuBois and M .Asgari, (1998) ***Association of ambient air quality with children's lung functions in urban and rural Iran***. Arch Environ Health; 53-222

Bucholtz, A., (1995) ***Rayleigh-scattering calculation for the terrestrial atmosphere. Applied optic***, 34: 2765-2773

Bouya, Z., G. Box and M. Box, (2010) ***Seasonal variability of aerosol optical properties in Darwin, Australia***, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 72 726–739

Engel, J.A., and R.M. Hoff, (2006) ***Integrating Lidar and Satellite Optical Depth with Ambient Monitoring for 3-Dimensional Particulate Characterization***; Atmos. Environ., 40, 8056-8067.

Gauderman, W.G., E. Avol, F .Gilliland, H. Vora, D. Thomas, K. Berhane, R. McConnell, N. Kuenzli, F. Lurmann, E .Rappaport and D. Margolis, (2004) ***The effect of air pollution on lungdevelopment from 10 to 18 years of age***. N.Engl.J.Med. 351, 11, 1057-1067

Gatebe, C. K. And M.King, (2001) ***Sensitivity of off-nadir zenith angles to correlation between visible and near-infrared reflectance for use in remote sensing of aerosol over land***. Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing 39(4): 805-819,

Gupta, P. and S. Christopher, (2008) ***Seven year particulate matter air quality assessment from surface and satellite measurements***, Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, Vol. 8, no. 1, 327-365

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

Gupta, P., S. Christopher, J. Wang, R. Gehri, Y. Lee and N. Kumar, (2006) ***Satellite remote sensing of particulate matter and air quality assessment over global cities***. Atmospheric Environment, 40, 5880–5892

NASA, http:// MODIS. gsfc. NASA. Gov /sci_ team/meetings /200610 /atmos Agenda. pdf

Kaufman, Y.J. and D. Tanre, (1998) ***Remote sensing of tropospheric aerosols from EOS*** MODIS ***overland***. Geophs Res, 102: 17051–17067

Kaufman, Y.J., (1997) ***Passive remote sensing of tropospheric aerosol and atmospheric correction for the aerosol effect***. Journal of Geophysical Research 102, 16815–16830

Kawta, V. and K. Takemata, (2007) ***The Valldation of Aerosol Optical Thicness Retried by Band Correlation Metod from MODIS Image Data isprs***,

Ling-jun, L., Y. Wang, Q. Zhang, T. Yu, Y. Zhao and J. Jin, (2007) ***Spatial distribution of aerosol pollution based on*** MODIS ***data over, Beijing***, China, Journal of Environmental Sciences 19955–960

Martin, R., (2008) "***Review satellite remote sensing of surface air quality. Atmospheric Environment***", 42, 7823–7843

Pearson, R.L., (2000) ***Distance-weighted traffic density in proximity to a home is a risk factor for leukemia and other childhood cancers.*** J. Air Waste Manag. Assoc, 50(2):175-80

Remer, A. and J. Kaufman, (2007) ***ALGORITHM FOR REMOTE SENSING OF TROPOSPHERIC AEROSOL FROM MODIS: Collection 5 Product ID***: MOD04/MYD04, NASA/GSFC

Robert, C. and A. Levy, (2009) ***ALGORITHM FOR REMOTE SENSING OF TROPOSPHERIC AEROSOL OVER DARK TARGETS FROM MODIS:*** Collections 005 and 051: Revision 2; Feb 2009, NASA/GSFC

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

Tian, J. and D. Chen, (2010) A ***semi-empirical model for predicting hourly round-level fine particulate matter (PM2. 5) concentration in southern Ontario from satellite remote sensing and ground-based meteorological measurements***. Remote Sensing of Environment, 114, 221–229

Taylor, M. and J.E. Penner, (1994) ***Response of the climate system to atmospheric aerosols and greenhouse gases [J]***. Nature, 369: 734–737

Van Dankelaar, V., R. Martin and R.J. Park, (2006*)* ***Estimating ground-level PM .5 with aerosol optical depth determined from satellite remote sensing***. JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, 111.69-77

Wang, Z., L. Chen, J. Tao, Y. Zhang and L. Su, (2010) ***Satellite-based stimation of regional particulate matter (PM) in Beijing using vertical-and-RH correcting metho*d.** Remote Sensing of Environment, 114, 50–63

Zhang, X. Q., (2010) ***RETRIEVAL OF AEROSOL OPTICAL DEPTH OVER URBAN AREAS USING TERRA/*** *MODIS* ***DATA", International Archives of the Photogrammetry***, Remote Sensing and Spatial Information Science, Volume XXXVIII, Part 8, Kyoto Japan

Yunesian, M. and H. Malek Afzali, (2002) ***Air pollution mortality in elderly in Tehran, Iran***. Payesh, Journal of the Iranian Institute for Health Sciences Research 1: 19-24

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]