

# بررسی کاربرد سنجنده‌های ماهواره‌ای در تشخیص ذرات معلق شهرهای بزرگ

□ مهدی مغربی  
maghrebi@mehr.sharif.edu  
□ مسعود تجریشی  
tajrishy@sharif.edu

**چکیده**  
استفاده از سنجنده‌های ماهواره‌ای در پایش آلودگی هوا و ذرات معلق مزایای زیادی را نسبت به ایستگاه‌های زمینی سنجش آلودگی به همراه دارد. از این رو مدتهاست که کاربرد این سنجنده‌ها برای سنجش آلودگی هوا و به خصوص ذرات معلق غبار مورد توجه متخصصین و مدیران شهری قرار گرفته است. سنجنده‌های گوناگون با طول موج‌ها و دقت‌های متفاوت برای این منظور در دهه‌های اخیر مورد استفاده قرار گرفته‌اند، که از این میان می‌توان به دو سنجنده TOMS و MODIS اشاره کرد. مقایسه داده‌های این دو سنجنده با داده‌های ایستگاه‌های زمینی متعددی، حاکی از وجود ارتباط نزدیک و قابلیت بالای آنها دارد.

با توجه به معضل آلودگی هوا در شهرهای بزرگ و صنعتی کشور، امکان استفاده از اینگونه سنجنده‌های ماهواره‌ای کمک زیادی به پایش آلودگی می‌نماید. برای این منظور در چند دوره زمانی، مقادیر  $PM_{10}$  ایستگاه‌های زمینی سنجش آلودگی هوا در تهران با مقادیر بدست آمده از سنجنده MODIS مقایسه گردید که روند مثبتی را بین این دو نشان نمی‌داد. سنجنده TOMS نیز به دلیل ابعاد بزرگ پیکسل‌هایش برای مطالعه آلودگی شهرها مناسب تشخیص داده نشد. در این مقاله دلایل وجود خطا در پایش آلودگی هوا و میزان ذرات معلق در هوا توسط MODIS در هر دو بعد، تصاویر ماهواره و ایستگاه‌های زمینی تبیین شده است.

## کلمات کلیدی

آلودگی هوای شهر، ذرات معلق، سنجنده MODIS، سنجنده TOMS

## مقدمه

ذرات معلق یا PM اصطلاحی است که برای مجموعه ذرات جامد و قطرات مایعی که در جو است بکار می‌رود. ذرات معلق یکی از شاخص‌های آلودگی هواست که توسط ایستگاه‌های سنجش آلودگی نیز اندازه گرفته می‌شود. ذرات معلق علاوه بر مشکلات سلامتی برای انسانها باعث تاثیر بر روی مقدار تابش خورشید به زمین و تغییر سیستم زمین و جو، تاثیر روی

الگوهای جریان جوی، تغییر در دمای سطحی زمین و بارش و کاهش دید نیز می شود.

آنچه در مورد ذرات معلق در مبحث آلودگی هوا مهم است، ذرات معلق با قطر ذرات کوچک تر از ۱۰ میکرومتر (PM<sub>۱۰</sub>) است. دلیل این امر آنست که این گونه ذرات می توانند وارد سیستم تنفسی و نای شوند و از این طریق باعث مشکلات تنفسی بخصوص برای اقلشار حساس جامعه همچون کودکان و کهنسالان گردند. در این بین ذرات معلق با قطر ذرات کوچک تر از ۲/۵ میکرومتر (PM<sub>۲.۵</sub>) از اهمیت خاصی برخوردارند، زیرا این گونه ذرات توانایی وارد شدن به قسمتهای پایینی ریه را دارا هستند و خطرات تنفسی را برای اقلشار گوناگون جامعه بوجود می آورند [۶].

سنجنده های ماهواره ای زیادی با توانایی های مختلف برای شناسایی و تشخیص ذرات معلق وجود دارند. هر نوع از این سنجنده ها قوت و ضعف هایی در تشخیص ذرات معلق دارند. در گذشته سنجش ذرات معلق توسط سنسورهای عملیاتی همانند AVHRR و TOMS انجام می شد. این سنجنده ها ابتدا برای تحقیقات روی ذرات معلق طراحی نشده بودند. با این وجود برای چند دهه، این سنجنده ها اطلاعات اقلیم شناسی و آب وهوایی را فراهم نمودند که در درک نحوه انتشار ذرات معلق سهم به سزایی ایفا نمودند. در سیستم مشاهده ای جدید زمین، ناسا سنجنده MODIS را روی دو ماهواره TERRA و AQUA نصب نمود. MODIS اولین سنجنده تحقیقاتی کاربردی برای سنجش ذرات معلق روی خشکی ها بصورت جهانی است که از اواخر سال ۱۹۹۹ میلادی به فضا پرتاب شده است.

مطالعات زیادی در رابطه با امکانسنجی کاربرد سنجنده های ماهواره در پایش آلودگی هوا در مناطق شهری انجام گرفته است. به عنوان مثال شاخص AI سنجنده TOMS برای بررسی تغییرات فصلی و سالیانه غبار محیط شهری در حیدرآباد هند با وسعت تقریبی ۱۲۵ کیلومتر مربع بکار گرفته شده است. مقایسه آن با مقادیر زمینی AOD در طول موج ۳۸۰ نانومتر همبستگی  $R^2 = 0.7$  را نشان داده است [۱]. مقایسه AI و مقادیر زمینی AOD در طول موج های ۴۸۰ و ۵۵۰ نانومتر در منطقه صنعتی کوچک تیتو اسکالو (Tito scalo) ایتالیا همبستگی  $R^2 = 0.7$  و  $R^2 = 0.91$  را نشان داده است [۲].

• مطالعه کلیه داده های ۶ ماهه ایستگاه های زمینی و مقایسه آن با سنجنده MODIS/TERRA در آمریکا ارتباط قوی آن را در شرق این کشور نشان داده است [۳]. همچنین طبق مطالعات انجام گرفته امکان استفاده از تصاویر MODIS برای پیش بینی کیفیت هوا و مدیریت آن در ایالت تگزاس آمریکا نشان داده شده است [۴]. مقایسه داده های AOT سنجنده MODIS ماهواره های TERRA و AQUA با داده های ۷ ایستگاه زمینی در آلاباما آمریکا نیز همبستگی خوبی

بین AOT و PM<sub>۲.۵</sub> بصورت ساعتی ( $R^2 = 0.7$ ) و میانگین ماهیانه ( $R^2 > 0.9$ ) را نشان داده است [۵].

علاوه بر مطالعات انجام گرفته در سایر نقاط جهان، مطالعات اخیر در ایران حاکی از قابلیت بالای سنجنده های MODIS و TOMS برای تعیین مراکز غبار کشور و گسترش حدود بیابانزایی می باشد [۷].

## سنجنده های ماهواره ای ۱-۲ سنجنده MODIS

MODIS نصب شده روی ماهواره TERRA در تاریخ ۱۸ دسامبر ۱۹۹۹ برای نمایش جهانی اتمسفر، اکوسیستم زمین و دریاها پرتاب شد. همچنین در ۴ می ۲۰۰۲ ابزار مشابهی روی ماهواره AQUA نصب و پرتاب شد. MODIS نصب شده روی دو ماهواره در مدارهایی که همدیگر را تکمیل می کنند در حرکتند. حرکت TERRA و AQUA طوری است که از یک ناحیه زمین در حدود زمانی مشخصی عبور می کنند. به عنوان مثال AQUA در حدود ساعت ۱۰ صبح به ساعت جهانی و TERRA در حدود ساعت ۷:۳۰ صبح به ساعت جهانی از روی ایران می گذرند. MODIS نصب شده روی دو ماهواره با عرض دید ۲۳۳۰ کیلومتر تقریباً پوشش جهانی کاملی را در یک روز انجام می دهد.

## محصولات MODIS در سطوح زیر ارایه می شوند [۸]:

- سطح صفر شامل داده های خام MODIS است که به ایستگاه های زمینی ناسا برای پردازش منتقل می شوند.
- سطح یک شامل تصاویر با مختصات حاصل از ۳۶ باند MODIS به تفکیک باند است.
- سطح دو تصاویر عدد دار پارامترهای محاسبه شده به تفکیک نوع پارامتر و بصورت منطقه ای می باشد.
- سطح سه نقشه های جهانی سطح دو در میانگین روزانه، هشت روزه و ماهیانه با شبکه بندی مختصات دارمی باشد.

محصولات سطح یک و دو MODIS در قطعات پنج دقیقه ای از گردش ماهواره اند، در حالیکه سطح سوم بصورت جهانی و با شبکه بندی هستند. وضوح مکانی در سطح دوم بسته به پارامتر از ۱ تا ۱۰ کیلومتر متغیر است. در سطح سوم وضوح مکانی بسته به پارامتر از ۴/۶۳ کیلومتر تا ۱ درجه متغیر است.

ضخامت نوری ذرات معلق (AOT یا AOD) مقدار درجه بی بعدیست که مشخص می کند ذرات

معلق تا چه حد جلوی انتقال نور را می گیرند، و بصورت انتگرال ضریب خاموشی روی یک ستون عمودی هوا با سطح مقطع واحد بدست می آید. ضریب خاموشی میزان از بین رفتن نسبی اشعه در واحد طول مسیر است. مقدار AOD از صفر تا بیشتر از ۵ تغییر می کند، که مقادیر بزرگتر از واحد در گروه غبار مه سنگین طبقه بندی می شوند. MODIS از روابط متفاوتی برای محاسبه AOD روی سطح دریاها و خشکی ها استفاده می کند

## ۲-۲ سنجنده TOMS

TOMS سنجنده ایست که از سال ۱۹۷۸ روی ماهواره های مختلفی چون Nimbus، ADEOS (۱۹۹۶)، Meteors (۱۹۹۱)، Earth Probe (EP) (۱۹۹۶) نصب و کار می کند. داده های TOMS بصورت سطح سه و با شبکه بندی یکنواخت (وضوح طول جغرافیایی ۱/۲۵ درجه و وضوح عرض جغرافیایی ۱ درجه) است. این ابزار برای نمایش مقدار ازن جو زمین بوسیله مطالعه تابش های منعکس شده در محدوده فرابنفش پرتاب شد. علاوه بر این، این پرتوها حاوی اطلاعاتی در مورد خصوصیات پخش و جذب ذرات معلق است. AI که توسط TOMS تولید می شود، یکی از مفیدترین ابزارهای مطالعه رفتار ذرات معلق زیرا به وسیله آن توزیع مکانی و زمانی ذرات معلق تروپوسفر روی دریاها و خشکی ها را می توان تخمین زد. AI نشان دهنده آنست که تا چه مقدار تابش UV بازگشته از اتمسفر دارای ذرات معلق، از اتمسفر ملکولی خالص متفاوت است. شاخص ذرات معلق AI برای TOMS نصب شده روی EP بصورت زیر تعریف می شود:

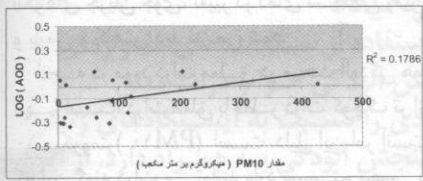
$$AI = -100 \left( \log_{10} \left( \frac{I_{331}}{I_{360}} \right)_{\text{measured}} - \log_{10} \left( \frac{I_{331}}{I_{360}} \right)_{\text{calculated}} \right)$$

که در آن  $I$  مقدار تابش منعکس شده در طول موج ثابت است.

مطابق با رابطه بالا، مقادیر مثبت AI نشان دهنده ذرات معلق جذب کننده (غبار، دود، فعالیت های آتش فشانی) و AI منفی نشان دهنده ذرات معلق غیرجاذب (سولفات) است. اگر ذرات معلق با قدرت جذب کنندگی کم امواج در نزدیکی سطح زمین باشند، خصوصیات پراکنش ذرات معلق بر خصوصیات جذب کنندگی آنها حاکم خواهد بود، و مقادیر AI منفی خواهد بود، مثل آنکه ذرات غیرجاذب هستند.

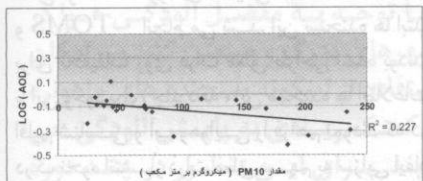
## ۳-۲ داده های مورد استفاده

برای این تحقیق داده های سنجنده TOMS به علت بزرگی بیش از حد پیکسل های آن (۱\*۱.۲۵)

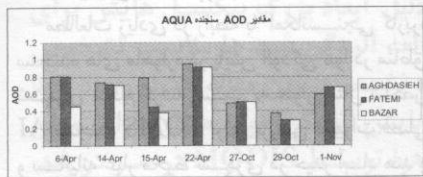


نمودار ۲: مقایسه داده های زمینی با سنجنده TERRA مابین ۶ تا ۲۲ آوریل ۲۰۰۴

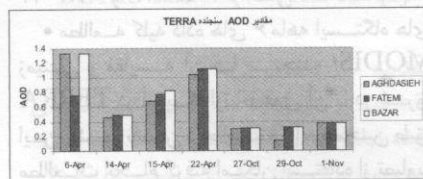
همانطور که از نمودار بالا مشخص است با توجه به نزدیکی دو ایستگاه فاطمی و بازار، مقادیر AOD آنها در بیشتر موارد مشابه است. این در حالیست که فاصله زیاد آنها با ایستگاه اقدسیه موجب قرارگیری آنها در پیکسل های متفاوت و در نتیجه مقادیر متفاوت AOD می باشد.



نمودار ۳: مقایسه داده های زمینی با سنجنده AQUA مابین ۶ تا ۲۲ آوریل ۲۰۰۴



نمودار ۴: مقایسه داده های سنجنده AQUA در ۳ ایستگاه در سال ۲۰۰۴



نمودار ۵: مقایسه داده های سنجنده TERRA در ۳ ایستگاه در سال ۲۰۰۴

ایستگاه	۶-Apr	۱۴-Apr	۱۵-Apr	۲۲-Apr	۲۷-Oct	۲۹-Oct	۱-Nov
AGHDASIEH	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
FATEMI	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
BAZAR	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7

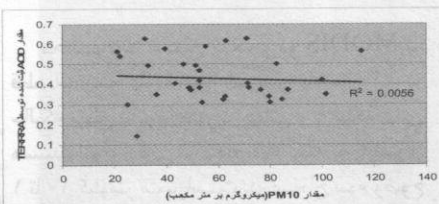
جدول ۱. داده های ثبت شده در ایستگاه های زمینی

همانطور که از جدول بالا مشخص می شود، ایستگاه های شرکت کنترل کیفیت هوا در رابطه با ذرات معلق مقدار PM<sub>10</sub> و ایستگاه های سازمان محیط زیست مقدار کل غبار را ثبت می کنند. در این جدول خانه های هاشور خورده نشان دهنده وجود داده و در دسترس بودن آنهاست. برای مقایسه مقدار AOD ثبت شده از سنجنده MODIS با داده های زمینی از پارامتر PM<sub>10</sub> شرکت کنترل کیفیت آلودگی هوا در سه ایستگاه اقدسیه، فاطمی و بازار استفاده گردید.

نمونه ای از پیکسل هایی که شهر تهران را پوشش داده اند، در شکل زیر آورده شده است. قابل ذکر است که مکان پیکسل ها در تصاویر روزهای مختلف تغییر می کند و ثابت نمی باشد. رنگ های گوناگون نشان دهنده مقادیر متفاوت AOD می باشد. همان گونه که از شکل زیر به خوبی قابل تشخیص می باشد، گاهی یک ایستگاه زمینی سنجنش آلودگی هوا در مرز مشترک دو پیکسل قرار می گیرد.

## نتایج حاصله

در دوره های زمانی ۲۰ اکتبر تا ۷ نوامبر ۲۰۰۴ (۲۸ مهر تا ۱۶ آبان ۱۳۸۳) و ۶ تا ۲۲ آوریل ۲۰۰۴ (۱۸ فروردین تا ۳ اردیبهشت) داده های سطح دو سنجنده MODIS به تفکیک TERRA و AQUA بفرز شهر تهران اخذ گردیده و پردازش شد. در تعدادی از روزها به علت ابرناکی، داده ای یافت نشد یا تعداد کمتری داده بدست آمد. مقادیر رقمی مربوط به AOD ثبت شده پیکسل ها با مقادیر ساعتی PM<sub>10</sub> ایستگاه متناظر زمینی سنجنش آلودگی هوا در ساعت متناظر با عبور ماهواره مقایسه گردید. مقایسه داده ها همبستگی ضعیفی بین آنها را نشان میدهد.



نمودار ۱: مقایسه داده های زمینی با سنجنده TERRA مابین ۲۰ اکتبر تا ۷ نوامبر ۲۰۰۴

درجه معادل ۱۰۰\*۱۲۵ کیلومتر) و اینکه هیچ گونه داده AOD زمینی در اختیار نبود، از موضوع کار حذف شد. با این وجود باید توجه داشت که تصاویر سنجنده TOMS داده های با ارزشی از تغییرات حال حاضر و دهه های گذشته غبار در سطح منطقه را ارائه می کند.

در این مطالعه پارامتر ضخامت نوری ذرات معلق یا AOD که منعکس کننده غلظت ذرات معلق می باشد، انتخاب گردید. داده های مورد نظر در سطح دوم با توجه به کیفیت بهتر وضوح تصویر انتخاب شد. این داده ها دارای پیکسل هایی با وضوح تصویر ۱۰\*۱۰ کیلومتر می باشند. داده های AOD سنجنده MODIS به تفکیک دو ماهواره TERRA و AQUA استخراج گردید تا امکان مقایسه بین این دو ماهواره وجود داشته باشد.

برای استخراج داده های AOD که دارای پسوند HDF می باشند، از نرم افزار HDFLOOK استفاده گردید [۹]. نرم افزار HDFLOOK توانایی به تصویر کشاندن ساختار یک فایل HDF را شامل دسته داده علمی (SDS)، آرایه های برداری و تصاویر رستری را داراست. بوسیله این نرم افزار امکان دسترسی به مقادیر پیکسل ها و مقادیر متناظر طول و عرض جغرافیایی آنها بصورت گرافیکی می باشد.

## ۳. منطقه مورد مطالعه

به عنوان مطالعه موردی با توجه به در دست بودن مقادیر سنجنش شده آلاینده های شهر تهران به بررسی آلودگی هوا در این شهر و مقایسه با تصاویر ماهواره ای موجود می پردازیم. در سراسر تهران در حال حاضر ۱۱ ایستگاه سنجنش آلودگی هوا همانطور که در شکل زیر نشان داده شده است مستقر می باشد. از این تعداد ۴ ایستگاه متعلق به سازمان کنترل کیفیت آلودگی هوای تهران و ۷ ایستگاه متعلق به سازمان حفاظت محیط زیست است. این ایستگاه ها در طول شبانه روز به فاصله زمانی یک ساعت میزان آلاینده هایی همچون O<sub>3</sub> و NO و NO<sub>2</sub> و SO<sub>2</sub> و CO و PM<sub>10</sub> را اندازه می گیرند.



شکل ۱. پراکندگی ایستگاه های سنجنش آلودگی هوا در سطح تهران

Radiative Transfer, ۸۴(۲۰۰۴), ۲۰۷-۲۱۳  
 [۳] Francesco Esposito, Giulia Pavese, Carmine Serio, A preliminary study on the correlation between TOMS aerosol index and ground-based measured aerosol optical depth, Journal of Atmospheric Environment, ۳۵(۲۰۰۱), ۵۰۹۳-۵۰۹۸

[۴] Jill A. Engel-Cox, Christopher H. Holloman, Basil W. Coutant, Raymond M. Hoff, Qualitative and quantitative evaluation of MODIS satellite sensor data for regional and urban scale air quality, Journal of Atmospheric Environment, ۳۸(۲۰۰۴), ۲۴۹۵-۲۵۰۹

[۵] Keith D. Hutchison, Application of MODIS satellite data and products for monitoring air quality in the state of Texas, Journal of Atmospheric Environment, ۳۷(۲۰۰۳), ۲۴۰۳-۲۴۱۲

[۶] Jun Wang, Sundar A. Christopher, Intercomparison between satellite-derived aerosol optical thickness and PM<sub>2.5</sub> mass: Implications for air quality studies, Journal of Geophysical Research Letters, Vol. ۳۰, No. ۲۱

[۷] Gonzalez, L., Deroo, C., ۲۰۰۳. HDFlook/ HDFlook MODIS handbook laboratoire d'optique Atmospherique, Universite des science et Technologies de Lille, France. Revised ۲۸ April ۲۰۰۳. Available at [http://WWW.loa-univ-lille.fr/hdflook/E\\_HDF.html](http://WWW.loa-univ-lille.fr/hdflook/E_HDF.html)

[۸] A. savtchenko, D. Ouzounov, S. Ahmad, G. Leptoukh, J. Koziana, D. Nickless, Terra and Aqua MODIS products available from NASA GES DAAC, Journal of Advances in Space Research, ۳۴(۲۰۰۴), ۷۱۰-۷۱۴

[۹] D. Ouzounov, A. Savtchenko, G. Leptoukh, B. Zhou, D. Ostrenga, C. Deroo, L. Gonzalez, Ges DAAC tools for accessing Terra and Aqua MODIS data, Journal of Advances in Space Research, ۳۳(۲۰۰۴), ۱۱۰۹-۱۱۱۳

• پیکسل های AOD ابعاد ۱۰\*۱۰ کیلومتری دارند و شهر تهران با مساحت تقریبی ۷۰۰ کیلومتر مربع توسط چند عدد از آنها پوشش داده می شود. در نتیجه یک پیکسل نماینده ۱۰۰ کیلومتر مربع است در حالیکه ایستگاه های زمینی سنجش آلودگی هوا در محدوده اطراف خود قابل استناد هستند.

• در بسیاری از مواقع ایستگاه زمینی در کناره ها و مرزهای پیکسل ها قرار می گیرند. در این حالت تفاوت مکانی بیشتر می شود.

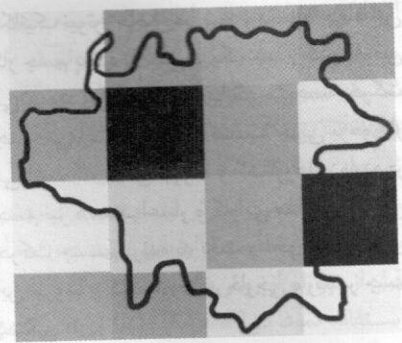
AERONET شبکه ایست دورتادور دنیا که مقادیر بدست آمده از ماهواره MODIS در آخرین مرحله از الگوریتم تولید AOD با مقادیر این شبکه در زمان و مکان یکسان مقایسه و واسنجی می شوند. در کشور ما بعلاوه وجود هیچ نوع از این سنجنده ها، مقادیر AOD تولید شده اعتبار کافی ندارند. ایستگاه های زمینی نیاز به کالیبراسیون و نگهداری برای اعتبار داده های خود هستند. در غیر این صورت باید عدم دقت آنها در نظر گرفته شود.

## نتیجه گیری

گرچه طی مقایسه ای که انجام گردید، رابطه روشنی مابین داده های تصاویر ماهواره ای و اندازه گیری های PM<sub>10</sub> زمینی بدست نیامد، ولی این به معنای عدم امکان کاربرد سنجنده های ماهواره ای در سنجش آلودگی هوا در ایران نخواهد بود. همانطور که از مقایسه دو سنجنده MODIS و TOMS مشخص شد، داده های این دو سنجنده با الگوریتم متفاوت همبستگی خوبی را با یکدیگر نشان دادند. با توجه به این مطالب روشن است که تصاویر ماهواره ای نسبت به یکدیگر در سری های زمانی و مکانی قابلیت کاربرد دارند. این موضوع بخصوص در رابطه با مطالعه غبار ورودی به شهرها از بیابان های اطراف بسیار حائز اهمیت می باشد. در انتها باید یادآوری کرد که سال به سال سنجنده های جدیدتر با وضوح و قدرت بالاتر ارائه می شوند، بطوریکه آینده روشنی در رابطه با سنجش ماهواره ای آلودگی هوا در برابر ما ترسیم می کنند.

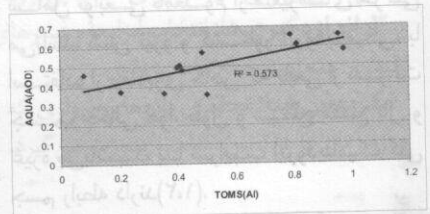
## منابع و مراجع:

- [۱] امید اسماعیلی، بهنه بندی مراکز تولید غبار کشور با استفاده از فناوری سنجش از دور، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف ۱۳۸۵
- [۲] K. Madhavi Latha, K.V.S. Badarinath, Studies on satellite and ground-based measurements of aerosol over urban environment, Journal of Quantitative Spectroscopy &

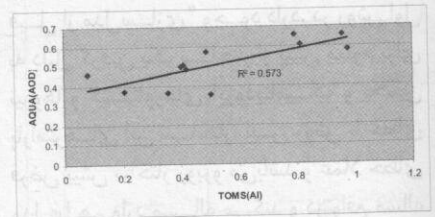


شکل ۲: نمونه ای از پیکسل هایی که شهر تهران را پوشش داده اند.

در ادامه داده های ماهیانه سنجنده های TOMS و MODIS به تفکیک AQUA و TERRA برفراز تهران با یکدیگر مقایسه گردیدند. این مقایسه حاکی از ارتباط خوب مقادیر ثبت شده ماهواره ها با هم دارد. قابل ذکر است که داده های ماهیانه MODIS در سطح سوم و با وضوح ۱\*۱ درجه جغرافیایی می باشند. از آنجا که اطلاعات ماهیانه MODIS و TOMS در ابعاد نزدیکی هستند (۱\*۱ درجه برای MODIS و ۱/۲۵\*۱ درجه برای TOMS) همبستگی نسبی خوبی برابر ۰/۵۷۳ با AQUA و ۰/۵۴۸۲ با TERRA برای محدوده شهر تهران بدست آمد.



نمودار ۶: وجود همبستگی نسبتاً خوبی بین میانگین ماهیانه TOMS و AQUA



نمودار ۷: وجود همبستگی نسبتاً خوبی بین میانگین ماهیانه TOMS و TERRA

## عوامل ایجاد خطا

برای بررسی عوامل عمده محتمل به وجود آورنده خطا و عدم امکان تخمین میزان آلودگی با استفاده از تصاویر ماهواره ای بررسی شده می توان عوامل زیر را نام برد: