

صص ۷۲-۵۹

## بررسی پتانسیل ماهواره‌ی مودیس و سنتیل-۵ در برآورد میزان گرد و غبار (مطالعه موردی: استان خوزستان)

**حمیدرضا غفاریان مالمیری\***

دانشیار گروه جغرافیا، دانشگاه یزد، یزد، ایران

**ابوذر کیانی**

کارشناس ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، گروه جغرافیا، دانشگاه یزد، یزد، ایران

**فهیمه عربی علی آباد**

دکتری مدیریت مناطق خشک و بیابانی، یزد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۳/۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۷

### چکیده

آلاینده‌های هوا در سطح کلان شهرهای ایران از جمله چالش‌های جدی برای مدیران امر به شمار می‌رود که سلامت شهروندان را نیز تهدید می‌کند. نظارت بر آلودگی هوا یک وظیفه مهم در بهداشت عمومی است. هم‌چنین بدلیل تعداد محدود شبکه‌ی ایستگاه‌های نظارت زمینی، بررسی و پایش میزان دقیق آلودگی هوا در مناطق مختلف شهرهای کشور ناممکن است. از این‌رو، استفاده از تصاویر سنجش از دور در پایش مستمر میزان آلاینده‌های هوا با توجه به هزینه پایین، سرعت بالای پردازش، پوشش سطح وسیع، قدرت تفکیک زمانی مناسب و نیروی انسانی کم، مناسب و به صرفه خواهد بود. در این پژوهش تصاویر ماهواره‌ی سنتینل-۵ و سنجنده مودیس برای مطالعه تحلیلی از روند تغییرات زمانی - مکانی میزان گرد و غبار در سطح استان خوزستان استفاده شد. هدف این مطالعه استفاده از داده‌های ماهواره‌ای با وضوح نسبتاً بالا برای پایش محلی کیفیت و میزان آلودگی هوا و بررسی ارتباط تصاویر دو سنجنده سنتینل-۵ و مودیس است. یافته‌های پژوهش حاکی از مقادیر قابل توجهی AOD در چندین بخش از منطقه مورد مطالعه همچون شهرستان‌های اهواز، آبادان، خرمشهر، بندرماهشهر و باوی است. هم‌چنین میزان کمی ریزگردها در شهرستان‌های جنوب شرقی، شرق و شمال شرقی استان دیده می‌شود. با توجه به نتایج این پژوهش هر چه از سمت جنوب شرقی، شرق و شمال شرقی استان حرکت و به سمت بخش‌های جنوب و غرب استان پیش رفت میزان ریزگردها افزایش می‌یابد. با توجه به تجزیه و تحلیل صورت گرفته، همبستگی مثبت بالایی بین تصاویر هر دو سنجنده سنتینل-۵ و مودیس در تشخیص میزان گرد و غبار مشاهده شد، که نشانگر امکان آن‌ها در تشخیص این نوع آلاینده در سطح کل ایران است.

**واژگان کلیدی:** آلاینده‌های هوا، ریزگردها، تصاویر ماهواره‌ای، سنتینل-۵، ایستگاه‌های آلودگی سنج.

## مقدمه

هوا یکی از پنج عنصر ضروری (هوا، آب، غذا، گرما و نور) برای ادامه حیات انسان است. هر فرد روزانه نزدیک به ۲۲۰۰۰ بار تنفس می‌کند و تقریباً به ۱۵ کیلوگرم هوا در روز نیاز دارد. آلودگی هوا به معنای مخلوط شدن هوا با گازها، قطرات و ذراتی است که کیفیت هوا را کاهش می‌دهند [۲]. غبار حاصل از شخم زدن زمین به وسیله تراکتورها، ماشین‌ها و کامیون-هایی که در جاده‌های شنی یا خاکی حرکت می‌کنند، ریزش کوه و دود حاصل از آتش‌سوزی اکوسیستم‌های گیاهی و مزارع باعث آلودگی هوا می‌شود. در چند سال اخیر، پدیده خشکسالی و تأثیر آن بر افزایش غلظت ریزگردها در جو، منجر به تشدید آلودگی هوا شده است [۲]. امروزه آلودگی هوای محیط به عنوان یک چالش بسیار مهم در سطوح محلی، منطقه‌ای و بین‌المللی شناخته شده است. یافته‌های علمی نشانگر طیف گسترده‌ای از اثرات آلودگی هوا بر سلامت انسان است و مطالعات متعدد اثرات بهداشتی آلودگی هوا را نشان داده است [۸]. آلودگی هوا با توجه به پیامدهای زیان بار آن به یکی از ملموس‌ترین معضلات زیست محیطی در اکثر کشورهای جهان از جمله ایران و به طور خاص استان خوزستان تبدیل شده است که سالانه منجر به مرگ و میر هفت میلیون نفر و چهارمین عامل مرگ و میر زودرس در جهان می‌باشد. غلظت ذرات معلق موجود در جو از مهمترین شاخص‌های آلودگی هوا محسوب شده و به همین دلیل از بیشترین توجه نسبت به سایر آلاینده‌های جوی برخوردار است [۸]. گرد و غبار یا ریزگرد عبارت است از افزایش ذرات جامد در جو به طوری که موجب تیرگی نسبی هوا شده و میزان دید افقی یا دید عمومی کاهش یابد [۲۵]. مانند هر متغیر دیگری در جو، اگر میزان آنها از حد مجازی فراتر رود، یک حادثه چالش برانگیز جوی، خسارت‌زا و خطرناک خواهد بود. گرد و غبار یکی از پدیده‌های جوی است که آثار و پیامدهای زیست محیطی نامطلوبی را بر جای می‌گذارد [۱۶]. طوفان گرد و غبار در نتیجه سرعت زیاد باد و تلاطم آن بر روی سطح خاک بدون پوشش و مستعد فرسایش به وجود می‌آید. براساس تعریف WMO<sup>۱</sup> یک رخداد گرد و غبار را زمانی می‌توان طوفان گرد و غبار نامید که دید به کم‌تر از یک کیلومتر و سرعت باد به بیش از ۱۴ متر بر ثانیه برسد [۶].

پژوهش‌های زیادی درباره‌ی امکان سنجی کاربردهای سنجنده‌های ماهواره‌ای در پایش آلودگی هوا در پهنه‌های شهری انجام گرفته است. برای نمونه، شاخص AI (Aerosol Index) سنجنده TOMS<sup>۲</sup> در بررسی دگرگونی‌های فصلی و سالیانه غبار پهنه شهری در حیدرآباد هند با گستردگی تقریبی ۱۲۵ کیلومتر مربع بکار گرفته شده است. مقایسه آن با مقادیر زمینی AOD<sup>۳</sup> در طول موج ۳۸۰ نانومتر همبستگی  $R^2 = 0.7$  را نشان داده است [۱]. مقایسه AI و مقادیر زمینی AOD در طول موج‌های ۴۸۰ و ۵۵۰ نانومتر در پهنه صنعتی کوچک تیتو اسکالو ایتالیا به ترتیب دارای همبستگی  $R^2 = 0.7$  و  $R^2 = 0.91$  بوده است [۹]. لاتا و همکاران (۲۰۰۴) با بررسی تصاویر و داده‌های سه شهر پکن، شانگ‌های و فینیکس با استفاده از روش پردازش تصویر شاخص آلودگی PM<sub>2.5</sub> را تخمین زدند. کاسکوتیس و همکاران (۲۰۱۰) در تحلیل خود

<sup>۱</sup> World Meteorological Organization

<sup>۲</sup> Total Ozone Mapping Spectrometer

<sup>۳</sup> Aerosol Optical Depth

به ارزیابی ریزگردها در شهر آتن با استفاده از داده‌های دو ماهواره MODIS و MERIS با داده‌ها زمینی برای بازیابی ژرفای نوری ریزگردها AOD پرداختند و به یک وابستگی مثبت قوی میان AOD های بر مبنای سنجنده‌ها با داده‌های زمینی ( $R^2 = 0.91$ )  $PM_{2.5}$  دست یافتند. وانگ و همکاران (۲۰۱۰) شرایط برای شکل‌گیری طوفان‌های گرد و غبار را در مناطق خشک و بیابانی بسیار مناسب دانستند. در این مناطق به دلیل کمبود رطوبت و پوشش گیاهی، چسبندگی ذرات خاک به یکدیگر کاهش یافته و بادهای نسبتاً قوی می‌توانند ذرات با قطر کم‌تر از  $6/1$  میلی‌متر را به صورت معلق در هوا درآورند، که سبب بروز طوفان‌های گرد و غبار می‌شوند. فروغی و همکاران (۲۰۰۵) در پژوهش خود، همبستگی داده‌های مربوط به ضخامت نوری ریزگردهای مودیس با مقادیر زمینی  $PM_{2.5}$  را در ایالت تگزاس برای استفاده در سیستم پیش بینی کیفیت هوای زمان واقعی مورد بررسی قرار دادند. بررسی‌های اولیه دو مجموعه داده گردآوری شده در طول سه ماه ۲۰۰۳ و کل سال ۲۰۰۴ نشان‌دهنده همبستگی خطی  $0/95$  تا  $0/97$  در داده‌های گردآوری شده از سراسر تگزاس بوده است. آن‌ها در مطالعه‌ی دیگری بیان داشتند که از داده‌های مودیس می‌توان برای بازیابی آلودگی شدید هوا که در بخش‌های مرکزی ایالت متحده پیش از مهاجرت به تگزاس نشأت گرفته است و باعث هشدار سلامتی سازمان‌های وابسته شده است، استفاده کرد. نتایج آن‌ها حاکی از پیش بینی کیفیت هوا از مشاهدات ماهواره‌ای از راه دور می‌باشد. لاتا و همکاران (۲۰۰۴) در پژوهش خود با اندازه‌گیری زمینی  $PM_{2.5}$  موضوع خاص کیفیت هوا را در جایگاه‌های گوناگون مناطق شهری دنیا در ۲۶ مکان سیدنی، دهلی، هنگ کنگ، نیویورک و سوئیس بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد یک رابطه تجربی میان توده  $PM_{2.5}$  و AOD وجود دارد که نشان می‌دهد یک همبستگی قوی میان مقادیر زمینی و تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک متوسط روزانه با یک ضریب همبستگی خطی  $0/96$  وجود دارد. تصاویر ماهواره‌ای توانایی به کارگیری در مناطقی که اندازه‌گیری زمینی در دسترس نیست را در مطالعات متعددی نشان داده‌اند که بیانگر مزیت مناسب آن‌ها در پایش سطح زمین در سطوح گسترده است. اگر جابجایی و انتقال آلودگی هوا از یک پهنه به پهنه دیگر وجود داشته باشد، آنگاه اندازه‌گیری‌های روی زمین نمی‌توانند طبیعت این رخدادها را به دست آورند که شناسایی سرچشمه آلودگی‌ها را دشوار خواهد کرد. مطالعات زیادی نشان می‌دهند که شرایط کیفیت هوا در سیدنی و سوئیس خوب است در حالی که در هنگ کنگ و دهلی بد و در نیویورک در طول دوره پژوهش متوسط بوده است. تاتم (۲۰۰۴) داده‌های سنجنده مودیس را برای بررسی اپیدمیولوژی (همه گیرشناسی) و اثرات ریزگردها در موارد خاص بر سلامت عمومی بکار بردند. آن‌ها از داده‌های با قدرت تفکیک بیش‌تر در پژوهش خود جهت بررسی بهتر کرانه‌های مقادیر گوناگون آلاینده‌ها استفاده کردند. انگل کاکس و همکاران (۲۰۰۴) از داده‌های مودیس برای بررسی کیفیت هوای شهری استفاده کردند. آن‌ها از نگاره‌های رنگ واقعی کیفی و داده‌های کمی ژرفای نوری ریزگردهای حاصل از شبکه‌های بازیابی آژانس حفاظت ایالت متحده استفاده کردند و متوجه شدند که همبستگی این دو منبع اطلاعاتی وابسته به مکان است. در شرق و غرب میانه ایالت متحده، یک همبستگی خوب وجود داشته است، اما در غرب همبستگی ضعیف بوده است. امیدوار (۱۳۹۴) در مطالعه خود نشان داد طوفان‌های گرد

<sup>۴</sup> particulate matter

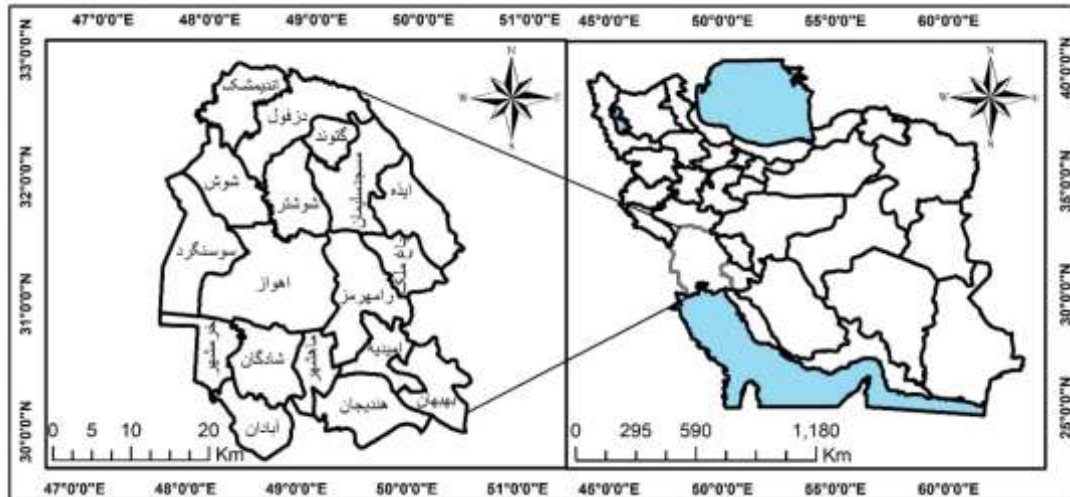
و غبار جزء بلاهای طبیعی هستند که در دهه اخیر به علت بهره‌برداری‌های غیر اصولی در مناطق خشک و نیمه خشک در سطوح جهانی، منطقه‌ای و محلی گسترش قابل توجهی داشته‌اند. موقتی (۱۳۹۲) با بررسی سنجش آلودگی هوای شهر تهران با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس نشان داد وابستگی مثبت میان این تصاویر با اندازه‌گیری زمینی وجود دارد که توانایی تصاویر این سنجنده را برای پایش آلودگی‌های از نوع ریزگردها را نشان می‌دهد. نتایج اکثر این مطالعات نشان می‌دهد تصاویر سنجنده مودیس در پایش مقادیر ریزگردها قابل اطمینان هستند. با این حال، با توجه به گسترش این نوع تصاویر سنجش از دوری که در حال گسترش هستند نیاز به پایش در سطوح مختلف و مقایسه با تصاویر قدیمی‌تر همچون مودیس وجود دارند. این امر سبب می‌شود تا در زمان در سترس نبودن تصاویر یک سنجنده بتواند تصاویر جایگزین را با علم به توانایی آن‌ها در کم‌ترین زمان ممکن برای پایش این آلاینده‌ها تشخیص داد.

آلودگی هوا و تأثیر این آلاینده‌ها بر روی سلامت تمامی موجودات زنده، تعیین میزان آلاینده‌ها برای جلوگیری از آسیب به شهروندان و همچنین اکوسیستم‌های گیاهی و یا حیات وحش طبیعی که از مضرات آن‌ها در امان نیستند، بسیار حائز اهمیت می‌باشد. از این رو، پژوهش حاضر با توجه به گسترش پدیده‌های ریزگرد طی سال‌های اخیر در سطح کشور ایران به ویژه استان‌های جنوب غرب همچون خوزستان که تعداد روزهای غبارآلود ناشی از ورود امواج گرد و غبار بین دو تا سه ماه در سال را نیز داشته‌اند، صورت گرفت. برای این پژوهش، تصاویر دو سنجنده مودیس و سنتیل-۵ در استان خوزستان استفاده شد. هدف از انجام این پژوهش، تشخیص میزان همبستگی محصول آئروسول هر دو سنجنده برای سال ۲۰۲۱ در پایش ریزگردهای استان خوزستان است.

## داده‌ها و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

استان خوزستان در جنوب غرب ایران و در کرانه خلیج فارس قرار دارد. این استان در عرض جغرافیایی ۵۷ درجه و ۲۹ دقیقه تا ۵۷ درجه و ۳۳ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی بین ۴۰ درجه و ۴۷ دقیقه تا ۵۰ دقیقه و ۳۳ درجه طول شرقی، با مساحت ۶۴۰۵۷ کیلومتر مربع، ۳/۹ درصد از مساحت ایران را شامل می‌شود (شکل ۱). خوزستان از شمال شرق به لرستان، از شرق به استان چهارمحال و بختیاری، از شمال غرب به ایلام، از جنوب شرقی به کهگیلویه و بویراحمد، از جنوب به بوشهر و خلیج فارس و از غرب به کشور عراق محدود می‌شود. تنها در بخش‌هایی از شمال و شرق استان و در همسایگی استان‌های لرستان و چهارمحال و بختیاری ارتفاعاتی به چشم می‌خورد که بلندترین آن‌ها کوه مینار با ارتفاع ۳۷۰۱ متر است که در مرز شمالی خوزستان و چهارمحال و بختیاری و در ارتفاعات زردکوه (از رشته کوه‌های زاگرس) قرار دارد.



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه

### داده‌های پژوهش

در این پژوهش از دو سری تصاویر سنجنش از دور شامل محصولات آلاینده‌گی‌های هوا از ماهواره سنتینل-۵ و داده‌های سنجنده مودیس استفاده شد. مودیس به عنوان یک ابزار کلیدی در پژوهش ماموریت‌های سیستم نظارتی زمین ناسا، با موفقیت در پردازنده ماهواره ترا و آکوا راه اندازی شد. مودیس تمام سطح زمین را در ۳۶ باند طیفی مورد پوشش قرار می‌دهد، با فاصله (۰٫۴۱۵ میکرومتر) به مادون قرمز (۱۴٫۲۳۵ میکرومتر) از این طیف به ترتیب با حوضه‌های فاصله‌ای ۱ کیلومتر، ۵۰۰ متر، ۲۵۰ متر دریافت می‌کند و می‌تواند همان منطقه در روی زمین را چهار بار در روز مشاهده کند، همچنین دارای ۳۶ باند طیفی بوده که اطلاعات کافی از ایجاد گرد و غبار را در اختیار کاربر قرار می‌دهد، ماهواره سنتینل-۵ در ۱۳ اکتبر ۲۰۱۷ جهت نظارت بر محیط زیست اروپا و پایش آلاینده‌های هوا در سراسر زمین در مدار زمین قرار گرفت [۲۰] و [۱۴]. آلاینده‌هایی که این ماهواره قادر به پایش آن‌ها است، عبارتند از منواکسیدکربن (CO)، دی اکسید کربن (CO<sub>2</sub>)، دی اکسید نیتروژن (NO<sub>2</sub>)، ازن (O<sub>3</sub>)، دی اکسید سولفور (SO<sub>2</sub>)، آئروسول‌های هوا، متان (CH<sub>4</sub>)، برمین منواکسید (BrO)، گلیوکسال (OCHCHO) و فرمالدهید (متانال، HCHO) [۵، ۱۲، ۱۱ و ۲۰]. محدوده طیفی باندهای این ماهواره بین ۲۷۰ تا ۳۲۰ نانومتر شامل باند ماوراء بنفش، ۳۱۰ تا ۵۰۰ نانومتر باندهای محدوده مرئی، ۶۷۵ تا ۷۷۵ نانومتر محدوده باندی مادون قرمز نزدیک و محدوده ۲۳۰۵ تا ۲۳۸۵ نانومتر محدوده مادون قرمز طول موج کوتاه هستند [۱۹ و ۱۴]. مشخصات کامل تر باندهای سنجنده سنتینل-۵ در جدول ۱ ارائه شده است. قدرت تفکیک زمانی سنتینل-۵ به صورت روزانه و با عرض برداشت حدود ۲۶۷۰ کیلومتر مربع است [۱۲]. این ماهواره محصول مشترک بین سازمان‌های فضایی اروپا و کشور هلند است که توسط دفتر فضایی هلند هدایت می‌شود.

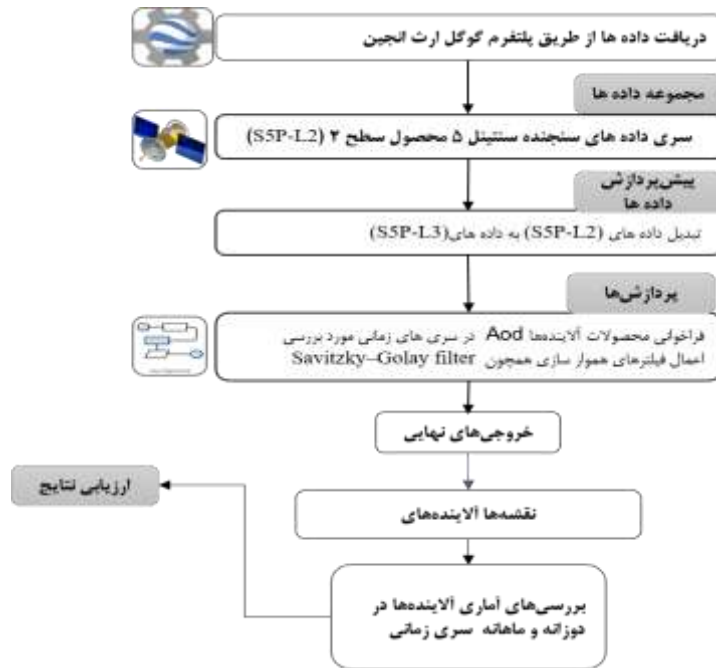
جدول ۱: مشخصات باندهای سنجنده سنتینل-۵

نام باندها	محدوده طیفی (نانومتر)	قدرت تفکیک مکانی	عرض برداشت تصویر	قدرت تفکیک طیفی	قدرت تفکیک زمانی	تاریخ قرار گرفتن در مدار زمین
UV	۲۷۰-۳۲۰	۷×۳/۵ km	۲۶۷۰ km	۰/۴۹	روزانه	۲۰۱۷/۱۳/۱۰
VIS	۳۲۰-۴۹۵	۷×۳/۵ km		۰/۵۴		
NIR	۶۷۵-۷۷۵	۷×۳/۵ km		۰/۳۸		
SWIR	۲۳۰۵-۲۳۸۵	۷×۷ km		۰/۲۵		

### روش پژوهش

در این مطالعه از داده‌های ماهواره سنتینل-۵ و مودیس، و توزیع زمانی و مکانی مربوط به پدیده گرد و غبار بر روی گستره استان خوزستان مربوط به سال ۲۰۲۱ استفاده گردید. ابتدا با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل و مودیس در گوگل ارث انجین و روش‌های سنجنش از دور، گرد و غبار آشکارسازی و میانگین گرد و غبار و همچنین بیش‌ترین مکان‌های آلوده شناسایی شد.

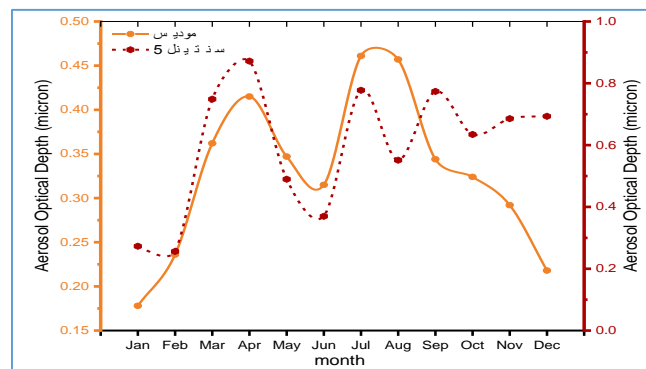
نمایی از روش انجام کار این پژوهش در شکل ۲ نشان داده شده است. این پژوهش پس از تهیه داده‌های آلاینده‌های سنجنش از دور (مودیس و سنتینل-۵) نقشه‌های پایش آلودگی هوا را از داده‌های ماهواره‌ای تهیه و مورد تحلیل و بررسی قرار می‌دهد. در این راستا ابتدا تصاویر ماهواره‌ای پایش پردازش می‌شوند که این پایش پردازش‌ها شامل تصحیح رادیومتریکی، تصحیح هندسی، تصحیح اتمسفری و شناسایی، حذف پیکسل‌های ابری خواهد بود. جهت پایش ریزگردها در سطح کل استان از سنجنده سنتینل-۵ و سنجنده مودیس در یک دوره زمانی ۱ ساله (سال ۲۰۲۱) و به صورت ماهانه صورت گرفت. سپس همبستگی هر دو سنجنده در برآورد میزان گرد و غبار در منطقه مورد مطالعه به صورت زمانی و مکانی بررسی گردید. در ادامه مقدار آلاینده‌ی ریزگردها در سطح شهرهای مختلف استان خوزستان با هر دو سنجنده سنتینل-۵ و مودیس به‌عنوان اهداف پژوهش مقایسه گردید.



شکل ۲: فلوجارت مراحل انجام پژوهش

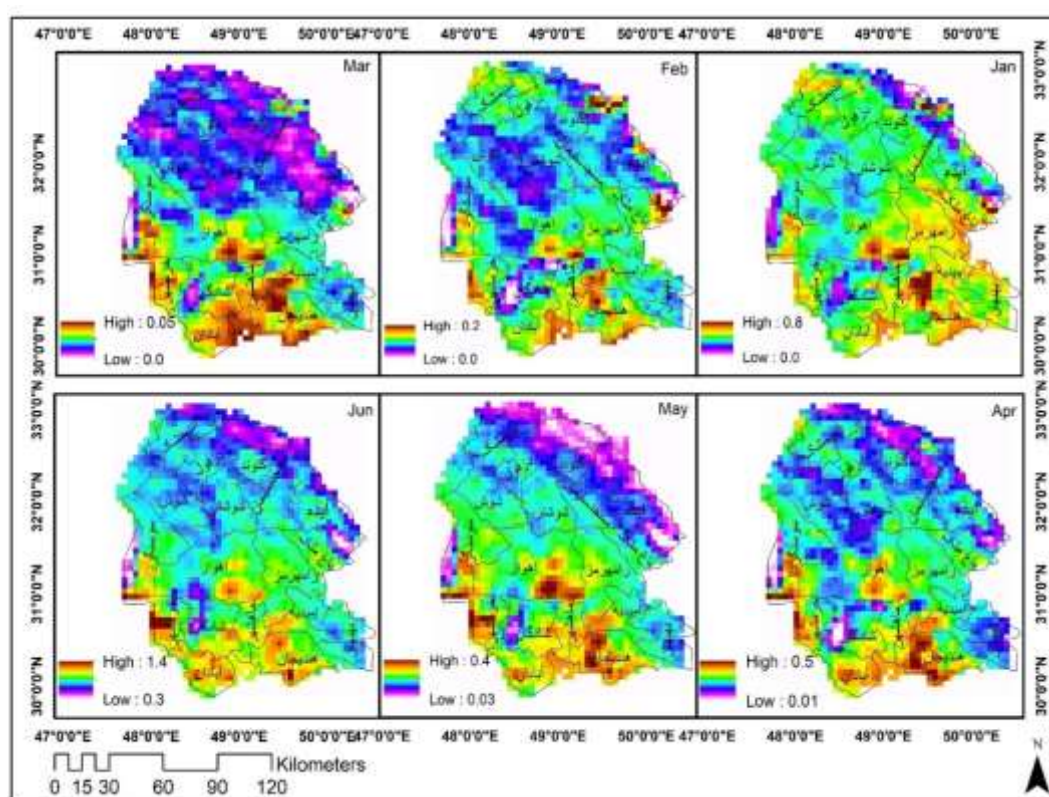
## نتایج و بحث

شکل ۳ مقادیر میانگین AOD ماهواره سنتینل-۵ و ماهواره مودیس را در روند سال ۲۰۲۱ در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد، در این تصویر نتایج AOD ماهواره مودیس به صورت نمودار نارنجی و نتایج ماهواره سنتینل-۵ به صورت نمودار قرمز نشان داده شده‌اند، این نتایج نشان می‌دهد میانگین مقادیر AOD ماهواره مودیس (بین ۰,۱۵ تا ۰,۴۷ میکرون) در سال ۲۰۲۱ بوده است که بیشترین میانگین ماهانه آلودگی در ماه‌های آپریل، جولای و آگوست با میانگین ماهانه ۰,۴۲ و ۰,۴۷ میکرون ثبت شده و کمترین میزان آلودگی نیز در ماه‌های ژانویه، فوریه و دسامبر با میانگین ماهانه کمتر از ۰,۲۵ میکرون ثبت شده است اما ماهواره سنتینل-۵ میانگین مقادیر ماهانه آن (بین ۰,۲۵ تا ۰,۴۵ میکرون) بوده که بیشترین میزان آن در ماه‌های مارس و آپریل و کمترین میزان آن در ماه‌های ژانویه و فوریه ثبت شده است، نتایج در هر دو سنجنده بیانگر بیشترین میزان گرد و غبار در ماه‌های آپریل، جولای و آگوست و کمترین میزان آن در ماه‌های ژانویه و فوریه در استان خوزستان می‌باشد.



شکل ۳: روند متوسط میانگین ماهانه AOD در سطح استان خوزستان

نقشه مکانی و توزیع فضایی میانگین ماهانه AOD در ۶ ماهه اول سال ۲۰۲۱ در شکل ۴ نشان داده شده است، در این تصاویر کمترین میزان آلودگی به رنگ صورتی و بیشترین میزان آن به رنگ قهوه‌ای نشان داده شده است، بیشترین پراکندگی مکانی و توزیع فضایی آلودگی در سطح استان خوزستان در ماه اول میلادی یعنی ژانویه می‌باشد، بیشترین میزان غلظت AOD در ماه ششم میلادی با ۱,۴ میکرون و سپس ماه اول میلادی با ۰,۸ میکرون بوده است اما کمترین میزان غلظت در ماه سوم میلادی (مارس) با ۰,۰۵ میکرون سپس ماه فوریه با ۰,۲ میکرون مشاهده شده است. نتایج نقشه مکانی و توزیع فضایی ۶ ماه اول سال مورد مطالعه نشان می‌دهد که شمال، مرکز و شرق استان خوزستان دارای کمترین میزان توزیع فضایی AOD و جنوب و غرب استان خوزستان دارای بیشترین میزان توزیع فضایی AOD می‌باشند.



شکل ۴: نقشه مکانی و توزیع فضایی میانگین ماهانه AOD سنجنده سنتینل-۵ به ترتیب در شش ماه نخست سال ۲۰۲۱.

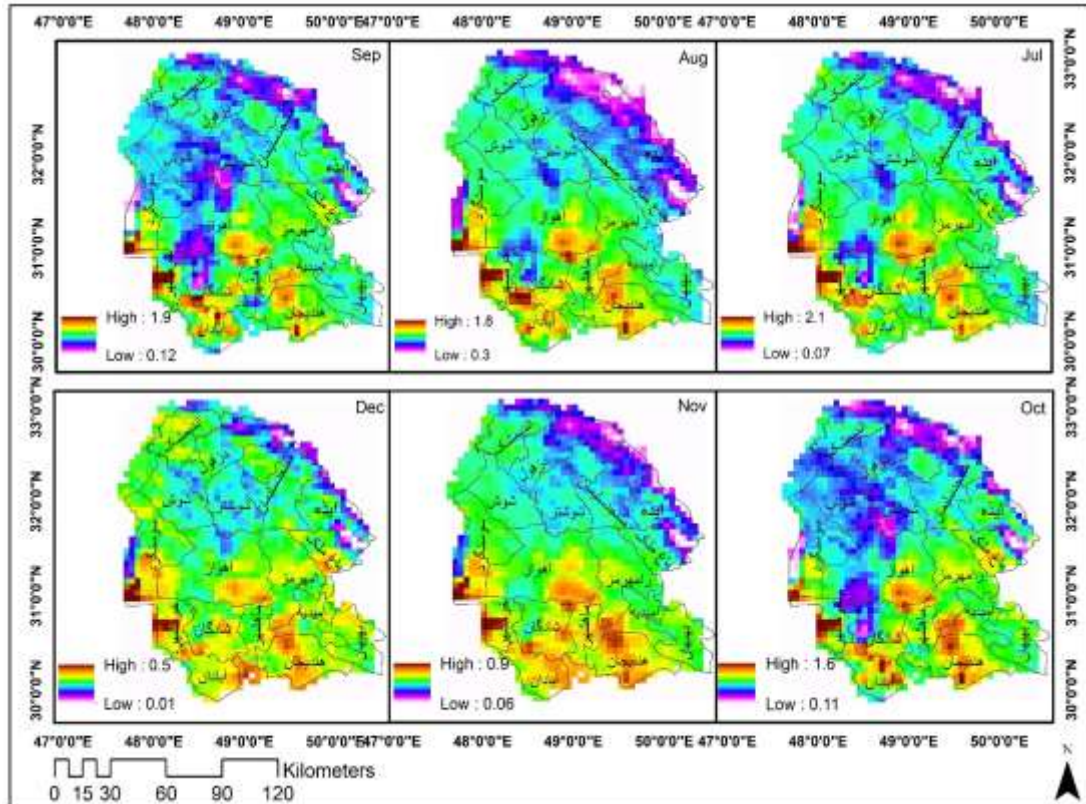
بیشترین میزان و کمترین میزان غلظت نقشه مکانی و توزیع فضایی AOD سنجنده سنتینل-۵ در شهرستان‌های مختلف استان خوزستان در طول ۶ ماه نخست سال ۲۰۲۱ در جدول ۲ نشان داده شده است.



## جدول ۲: توزیع زمانی و مکانی AOD

ماه	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun
بیشترین میزان	سوسنگرد، هندیجان، شادگان، رامهرمز، باغملک، سوسنگرد، جنوب اهواز، امیدیه، بهبهان	هندیجان، سوسنگرد، آبادان، ماهشهر، اهواز	جنوب اهواز، خرمشهر، آبادان، هندیجان، غرب امیدیه،	هندیجان، بندرماهشهر، آبادان، خرمشهر، رامشیر، اهواز	هندیجان، بندرماهشهر، آبادان، خرمشهر، سوسنگرد، اهواز، رامهرمز	هندیجان، بندرماهشهر، آبادان، خرمشهر، سوسنگرد، جنوب اهواز، غرب امیدیه
کمترین میزان	ایذه، شادگان، مسجدسلیمان، گتوند، شوشتر	شوش، شوشتر، مسجدسلیمان، ایذه، گتوند،	ایذه، مسجدسلیمان، شوش، شوشتر، دزفول، اندیمشک، گتوند، شمال اهواز، بهبهان	بهبهان، ایذه، اندیمشک، شوش، شوشتر، دزفول، گتوند، بهبهان، شادگان	ایذه، اندیمشک، مسجدسلیمان، دزفول، گتوند، بهبهان،	ایذه، اندیمشک، مسجدسلیمان، بهبهان، دزفول، شوش

نقشه مکانی و توزیع فضایی میانگین ماهانه AOD شش ماه دوم سال ۲۰۲۱ در شکل ۵ نشان داده شده است، در این تصاویر کمترین میزان آلودگی به رنگ صورتی و بیشترین میزان آن به رنگ قهوه‌ای نشان داده شده. نتایج شکل ۵ نشان می‌دهد که در ۶ ماه دوم سال مورد مطالعه، کمترین میزان غلظت AOD ثبت شده در ماه دسامبر با ۰٫۵ میکرون، سپس ماه نوامبر با ۰٫۹ میکرون بوده، همچنین بیشترین میزان غلظت ثبت شده در ماه جولای با ۲٫۱ میکرون، سپس سپتامبر با ۱٫۹ میکرون مشاهده شده است. نتایج ۶ ماه دوم سال نشان دهنده این است که شرق استان دارای کمترین میزان توزیع فضایی ریزگردها و جنوب استان دارای بیشترین میزان پراکندگی مکانی ریزگردها می‌باشد.



شکل ۵: نقشه مکانی و توزیع فضایی میانگین ماهانه AOD سنجنده ستینل-۵ به ترتیب در شش ماه دوم سال ۲۰۲۱

بیشترین میزان و کمترین میزان غلظت نقشه مکانی و توزیع فضایی AOD سنجنده سنتینل-۵ در شهرستان‌های مختلف استان خوزستان در طول ۶ ماه دوم سال ۲۰۲۱ در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳: توزیع زمانی و مکانی AOD

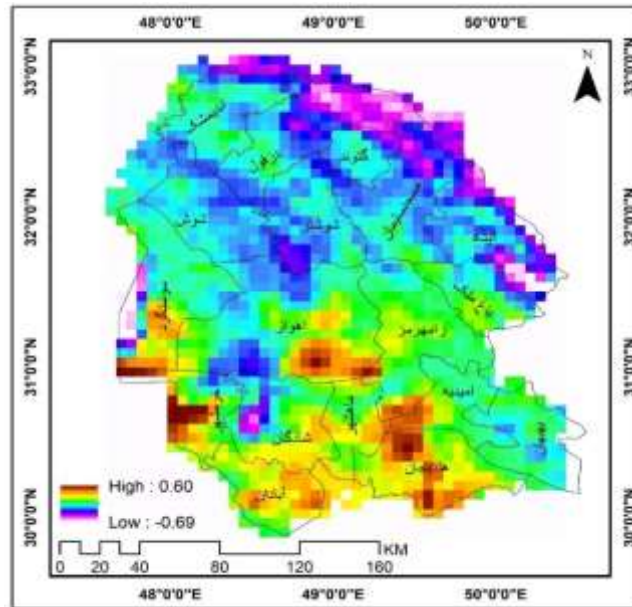
ماه	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Des
بیشترین میزان	هندیجان، بندرماهشهر، خرمشهر، جنوب‌اهواز، سوسنگرد، رامهرمز، باغملک، غرب‌امیدیه، شمال بهبهان	هندیجان، آبادان، ماهشهر، سوسنگرد، جنوب‌اهواز، غرب‌امیدیه	جنوب‌اهواز، آبادان، هندیجان، غرب-امیدیه	بندر-ماهشهر، آبادان، خرمشهر، باغملک، جنوب‌اهواز، سوسنگرد، غرب‌امیدیه	بندرماهشهر، هندیجان، آبادان، خرمشهر، جنوب‌اهواز، سوسنگرد، غرب‌امیدیه	بندرماهشهر، خرمشهر، جنوب‌اهواز، رامهرمز، باغملک، غرب‌امیدیه، شمال بهبهان
کمترین میزان	ایذه، شوشتر، شمال-دزفول	شوش، مسجدسلیمان، ایذه، باغملک، غرب دزفول و شمال اندیمشک، گتوند	شوش، غرب‌اهواز، شوش، گتوند، شرق دزفول	شوش، اندیکا، بهبهان، شوشتر و دزفول، اهواز، شوش، شوشتر، گتوند، دشت‌آزادگان	بهبهان، ایذه، اندیکا، باغملک، غرب مسجدسلیمان، لالی، دزفول	ایذه، شوشتر، شمال-دزفول

بیشترین مقادیر AOD ثبت شده توسط سنجنده سنتینل-۵ در طول ماه‌های مختلف سال ۲۰۲۱ در جدول ۴ به میکرون نشان داده شده است، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که میزان AOD در طول ماه‌های گرم سال بیشتر بوده و در طول ماه‌های سرد سال این میزان کمتر می‌شود، بیشترین میزان AOD در ماه سپتامبر با ۱,۹ میکرون و کمترین میزان آن در ماه مارس با ۰,۰۵ میکرون مشاهده شده است.

جدول ۴: بیشترین مقادیر AOD ثبت شده توسط سنجنده سنتینل-۵ در طول ماه‌های مختلف سال ۲۰۲۱

ماه	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Des
بیشترین میزان (میکرون)	۰,۸	۰,۲	۰,۰۵	۰,۵	۰,۴	۱,۴	۲,۱	۱,۸	۱,۹	۱,۶	۰,۹	۰,۵

با توجه به نقشه پراکندگی و توزیع فضایی و زمانی AOD در طول ماه‌های سال ۲۰۲۱ (شکل ۴ و ۵)، نقشه میانگین سالانه مقادیر AOD (شکل ۶) و نیز نتایج آماری AOD در منطقه مورد مطالعه می‌توان نتیجه گرفت که چندین شهرستان دارای مقادیر AOD قابل توجه بالاتری نسبت به سایر شهرستان‌ها هستند. بنابراین مقادیر بالای آلودگی در جنوب و جنوب غربی استان در طول سال قابل مشاهده می‌باشند که پراکندگی گرد و غبار بر آن‌ها غالب است، دلیل این امر می‌تواند ناشی از بیابان‌های خشک و بدون پوشش گیاهی عراق و عربستان باشد که باعث حرکت طوفان‌های گرد و غبار از این مناطق با سمت مناطقی از استان خوزستان شده است، اما در نواحی شمالی و شمال شرقی استان خوزستان کمترین میزان گرد و غبار در طول سال مورد مطالعه مشاهده شده است.



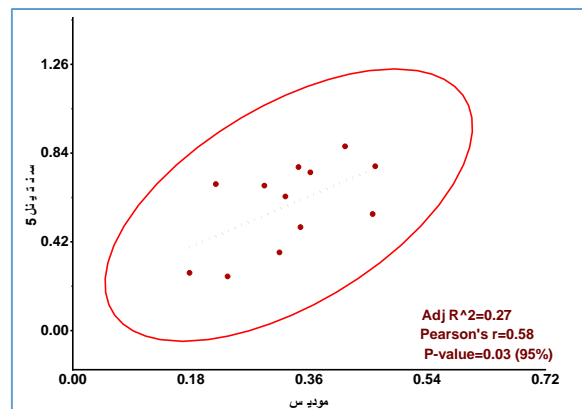
شکل ۶: میانگین و نقشه مکانی و توزیع فضایی AOD سال ۲۰۲۱ سنجنده سنتینل-۵

جدول ۵ بیشترین، کمترین و متوسط میانگین نقشه مکانی و توزیع فضایی AOD سنجنده سنتینل-۵ در شهرستان-های مختلف استان خوزستان، در طول سال مورد مطالعه نشان می‌دهد.

جدول ۵. بیشترین، کمترین و متوسط میانگین نقشه مکانی و توزیع فضایی AOD سنجنده سنتینل-۵ در شهرستان‌های مختلف استان خوزستان

زیاد	هندیجان سوسنگرد	ماهشهر	آبادان	جنوب شادگان	جنوب اهواز	غرب امیدیه	غرب خرمشهر
متوسط	اندیمشک	بهبهان	گتوند	مرکز دزفول	باغملک	رامهرمز	
کم	ایذه	مسجدسلیمان	شمال دزفول	شمال اهواز	شرق شوش	غرب شوشتر	

شکل ۷ نمودار همبستگی میان برآورد ریزگردها توسط تصاویر سنتینل-۵ و مودیس را نشان می‌دهد. با توجه به این نتایج، همبستگی خطی مثبت بین اندازه‌گیری AOD هر دو سنجنده وجود دارد. این همبستگی دارای ضریب قطعیت (تعیین)  $R^2 = 0.27$  و ضریب پیرسون  $0.58$  (شکل ۷) هستند که در سطح ۹۵ درصد با P-Value کم‌تر از  $0.05$  معنی‌دار است.



شکل ۷: همبستگی بین برآورد مقادیر ریزگردها در تصاویر سنجنده سنتینل-۵ و مودیس

بر اساس نتایج این پژوهش، امکان نظارت بر انتشار گرد و غبار در یک دوره زمانی یک ساله نشان داده شده است. نظارت بر کیفیت هوا در مناطقی مانند شهرها از اولویت‌بندی بیشتری برخوردار است. بنابراین این پژوهش نشان داده شده که رصد زمین مبتنی بر تصاویر سنجنش از دور می‌تواند برای نظارت بر کیفیت هوا به دلیل آلودگی هوا در مقیاس منطقه‌ای و ملی مورد استفاده قرار گیرد. استفاده یکپارچه از مجموعه داده‌های متعدد از ابزارهای ماهواره‌ای مانند سنتینل-۵ امکان تجزیه و تحلیل سری‌های زمانی مقادیر AOD را فراهم می‌کند. اگرچه تلاش‌های قابل توجهی برای تنظیم، کنترل و جلوگیری از انتشار آلودگی‌های گرد و غبار در سراسر ایران انجام شده است، اما نتایج این پژوهش نشان دهنده میزان بالای آلودگی هوا در سال ۲۰۲۱ در استان خوزستان است. همچنین همبستگی مناسب هر دو ماهواره‌ی سنتینل-۵ و مودیس در پایش ریزگردها می‌تواند با کم‌ترین زمان و هزینه ممکن صورت گیرد.

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش از تصاویر ماهواره‌ای برای تولید نقشه‌ها، نمودارها، در تخمین و ارزیابی میزان گرد و غبار در استان خوزستان برای ماه‌های ژانویه تا دسامبر ۲۰۲۱ استفاده شده است. بدین منظور، از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۵ و مودیس به‌منظور پایش میزان آلودگی هوا (AOD) استفاده شد. در این پژوهش افزون بر بررسی فراوانی پدیده گرد و غبار، شدت این پدیده در سطح شهرستان‌های مختلف استان خوزستان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان‌دهنده توزیع زمانی و مکانی متفاوت آلودگی هوا در شهرستان‌های خوزستان در چهار سطح زیر بود:

مناطق با آلودگی هوای بسیار زیاد نسبت به دیگر شهرستان‌های استان شامل شهرستان‌های هندیجان، آبادان، غرب امیدیه، جنوب کلانشهر اهواز، خرمشهر و جنوب هویزه که در وضعیت نامناسبی از لحاظ آلودگی هوا قرار دارند. بنابراین برنامه‌ریزی برای کاهش میزان آلودگی هوا در این شهرستان‌ها به‌منظور افزایش سلامت شهروندان باید در اولویت قرار گیرد.

مناطق با آلودگی هوای متوسط شامل شهرستان‌های باغملک، هفتکل و رامهرمز می‌باشند که از وضعیت نسبتاً مناسبی نسبت به شهرستان‌های گروه اول از لحاظ آلودگی هوا برخوردار هستند و برنامه‌ریزی برای این مناطق در جایگاه بعدی قرار دارد.

مناطق با آلودگی هوای کم شامل شهرستان‌های ایذه، مسجدسلیمان، غرب دزفول و شوش در این سطح هستند. این مناطق وضعیت مناسبی از لحاظ آلودگی هوا دارند.

مناطق با آلودگی هوای خیلی کم شامل مناطقی از شمال دزفول و شرق اندیکا که وضعیت مناسبی از نظر آلودگی هوا نسبت به سایر مناطق دارند.

نتایج پژوهش همچنین نشان می‌دهد که AOD به میزان قابل توجهی در بعضی از شهرستان‌ها نسبت به دیگر شهرستان‌های استان بالاتر است که این نشان می‌دهد حل معضل آلودگی هوا در استان خوزستان نیازمند توجه جدی دولت

و مدیران استانی و هم‌چنین اقداماتی در مقیاس محلات، مناطق و در مقیاس وسیع‌تر برای کنترل و کاهش آلودگی هوا است. محدودیت‌های اولویت‌دار و تأکید بر عوامل فضایی، پوشش گیاهی مناسب در زمین‌های بدون استفاده موجود، احیاء حوزه‌های آبی و نهرها باید در دستور کار قرار گیرد.

## منابع

- ۱- اسماعیلی، ا. (۱۳۹۴). پهنه‌بندی مراکز تولید غبار کشور با استفاده از فناوری سنجش از دور. پروژه کارشناسی‌ارشد دانشگاه شریف. اردکانی، م. (۱۳۹۶): اکولوژی. انتشارات دانشگاه تهران، چاپ نهم.
- ۲- امیدوار، ک. (۱۳۹۴): بررسی و تحلیل هم‌دید شدیدترین طوفان‌های سیاه و گرد و غباری در فصول مختلف استان یزد.
- ۳- تجریشی، م.، مغربی، م. (۱۳۹۰): بررسی کارکرد سنجنده‌های ماهواره‌ای در تشخیص ذرات معلق شهرهای بزرگ. اولین همایش تخصصی مهندسی محیط زیست، تهران، دانشگاه تهران، ۹-۱.
- ۴- قنبری، ا.، عیسی‌زاده، و. (۱۴۰۰): مدل سازی تراکم غلظت آلاینده ازن و اکسید نیتروژن در جی آی اس و مقایسه این غلظت آلاینده‌ها با پروداکت سنتینل - ۵ درسامانه گوگل ارث انجین - منطقه مورد مطالعه: شهر تهران. فصلنامه علمی- پژوهشی *اطلاعات جغرافیایی «سپهر»*، ۳۰(۱۱۸): ۴۷-۶۱.
- ۵- مهرابی، س. (۱۳۹۱): معرفی مدل‌های شبیه‌سازی و پیش‌بینی طوفان ریزگردها. اولین همایش ملی بیابان، مرکز تحقیقات بین‌المللی بیابان دانشگاه تهران.
- ۶- موقتی، س. (۱۳۹۲): بررسی امکان سنجش آلودگی هوای تهران با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس، پروژه کارشناسی ارشد.
- ۷- عابدی، س.، صالح، ا.، عابدی، س.، تهامی‌پور، م. (۱۳۹۲): ارائه الگوی پیش‌بینی آلودگی هوا (مطالعه موردی: شهر تهران). اولین همایش ملی محیط زیست، صنعت و اقتصاد، تهران.

- 8- Chenbin Liu., Francis T Sow, Yi Zou, Nongjian Tao. (2016): 'Particle Pollution Estimation Based On Image Analysis', <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC>.
- 9- Engel-Cox JA, Holloman HW, Coutant B, Raymond MH. Qualitative And Quantitative Evaluation Of MODIS Satellite Sensor Data For Regional And Urban Scale Air Quality. *Atmospheric Environment* (2004): 38: 2495-2509.
- 11- Ialongo, Iolanda, Henrik Virta, Henk Eskes, Jari Hovila, And John Douros. (2020): "Comparison Of TROPOMI/Sentinel-5 Precursor NO 2 Observations With Ground-Based Measurements In Helsinki." *Atmospheric Measurement Techniques* 13(1):205-18.
- 12- Kaplan, Gordana, And Zehra Yigit Avdan. "Space-Borne Air Pollution Observation From Sentinel-5p Tropomi: Relationship Between Pollutants, Geographical And Demographic Data." *International Journal Of Engineering And Geosciences* 5.3 (2020): 130-137.
- 13- Kaskaoutis, D. G., N. Sifakis, A. Retalis, And H. D. Kambezidis. (2010): "Aerosol Monitoring Over Athens Using Satellite And Ground-Based Measurements." *Advances In Meteorology* 2010.
- 14- Kleipool, Quintus, Antje Ludewig, Ljubiša Babić, Rolf Bartstra, Remco Braak, Werner Dierssen, Pieter-Jan Dewitte, Pepijn Kenter, Robin Landzaat, And Jonatan Leloux. 2018. "Pre-Launch Calibration Results Of The TROPOMI Payload On-Board The Sentinel-5 Precursor Satellite." *Atmospheric Measurement Techniques* 11(12):6439-79.
- 15- Krotkov, N. A., Carn, S. A., Krueger, A. J., Bhartia, P. K., And Yang, K.: Band Residual

- Difference Algorithm For Retrieval Of SOP From The Aura Ozone Monitoring Instrument (OMI), *IEEE T. Geosci. Remote*, 44, 1259–1266.
- 16- Tatem, Et Al. (2004): “Terra And Aqua: New Data For Epidemiology And Public Health.” *International Journal Of Applied Earth Observation And Geoinformation* 6(1):33–46.
- 17- Latha, K. Madhavi.Et Al. (2004): “Studies On Satellite And Ground-Based Measurements Of Aerosols Over Urban Environment.” *Journal Of Quantitative Spectroscopy And Radiative Transfer* 84(2):207–13.
- 18- Ludewig, Antje, Quintus Kleipool, Rolf Bartstra, Robin Landzaat, Jonatan Leloux, Erwin Loots, Peter Meijering, Emiel Van Der Plas, Nico Rozemeijer, And Frank Vonk. (2020): “In-Flight Calibration Results Of The TROPOMI Payload On Board The Sentinel-5 Precursor Satellite.” *Atmospheric Measurement Techniques* 13(7):3561–80.
- 19- Ludewig, Antje, Quintus Kleipool, Rolf Bartstra, Robin Landzaat, Jonatan Leloux, Erwin Loots, Peter Meijering, Emiel Van Der Plas, Nico Rozemeijer, And Frank Vonk. (2020): “In-Flight Calibration Results Of The TROPOMI Payload On Board The Sentinel-5 Precursor Satellite.” *Atmospheric Measurement Techniques* 13(7):3561–80.
- 20- S. Sima, M. Tajrishy, Using Satellite Data To Extract Volume–Area–Elevation Relationships For Urmia Lake, Iran, *Journal Of Great Lakes Research* 39 (2013) 90–99.
- 21- Sun, J.H., Zhao, L.N., Zhao, S. X. (2003): “An Integrated Modeling System Of Dust Storm Suitable To North China And Applications. *Climate Environment Research*. 8: 125– 142.”
- 22- Xulu, Sifiso, Nkanyiso Mbatha, And Kabir Peerbhay. "Burned Area Mapping Over The Southern Cape Forestry Region, South Africa Using Sentinel Data Within GEE Cloud Platform." *ISPRS International Journal Of Geo-Information* 10.8 (2021): 511.
- 23- Xulu, Sifiso, Nkanyiso Mbatha, And Kabir Peerbhay. (2021): “Burned Area Mapping Over The Southern Cape Forestry Region, South Africa Using Sentinel Data Within GEE Cloud Platform.” *ISPRS International Journal Of Geo-Information* 10(8):511.
- 24- Wang, Z., Chen, L., Tao, J., Zhang, Y., Su, L., (2010): Satellite-Based Stimulation Of Regional Particulate Matter (PM) In Beijing Using Vertical-And-RH Correcting Method. *Remote Sensing Of Environment*. 114. 50–63.