

Temporal and Spatial Monitoring and Forecasting of Suspended Dust Using Google Earth Engine and Remote Sensing Data (Case Study: Qazvin Province)

M. Mansourmoghaddam¹, N. Naghipur², I. Rousta^{3*}, H.R. Ghaffarian³

1. Master of Remote Sensing, Department of Geography, Campus of Humanities and Social Sciences, Yazd University, Yazd, Iran.
2. M. Sc. Student, Department of Geography, Campus of Humanities and Social Sciences, Yazd University, Yazd, Iran.
3. Assistant Professor, Department of Geography, Campus of Humanities and Social Sciences, Yazd University, Yazd, Iran.

* Corresponding Author: irousta@yazd.ac.ir

Received date: 02/02/2022

Accepted date: 23/03/2022

 [10.22034/jdmal.2022.548083.1372](https://doi.org/10.22034/jdmal.2022.548083.1372)

Abstract

Dust, the main pillar of air pollution, has always been an important subject of study on several levels. Over the last few years, it has become increasingly concentrated in various regions. The present study, which uses Google Earth engine system and MODIS satellite data with 8-day temporal resolution and spatial resolution of 1km and 250m, as well as statistical methods such as correlation and averaging of Triple Exponential Smoothing (TES), to monitor and predict spatial and temporal changes of airborne dust in Qazvin province. For this purpose, using Aerosol Optical Depth Index (AOD) images, Optimal Vegetation Index (EVI) and Modis Heat Island (HI) change index, and preparing their temporal and spatial monitoring maps during the statistical period 2015-2020 and predict to 2030, the relationship between these factors was examined. The results of the present study showed an increase in the quantity of airborne dust in Qazvin province from 0.461 in 2015 to 0.603 in 2017. his rate was then reduced by 0.493 in 2018 and by 0.575 in 2019. The quantity of airborne dust, then fell slightly to 0.5366 in 2020. The results showed a negative relationship between precipitation, relative humidity and vegetation, and a positive relationship between wind speed, freezing days, temperature, variations in temperature islands and hours of sunshine with AOD. The present study also examined changes in airborne dust concentrations in two high- and low-risk classes, and predicted a high-risk class for 2030. This finding is helping policymakers and planners reduce dust pollution in cities through vegetation management and reduce the heat islands, as well as implement climate programs to manage precipitation and moisture in cities.

Keywords: AOD index; EVI index; HI; MODIS; Triple Exponential Smoothing





پایش و پیش‌بینی زمانی و مکانی گردوغبار معلق در جو در استان قزوین با استفاده از سامانه گوگل ارث انجین

محمد منصورمقدم^۱، نگار نقی‌پور^۲، ایمان روستا^{۳*}، حمیدرضا غفاریان^۳

۱. کارشناس ارشد سنجش‌ازدور، گروه جغرافیا، پردیس علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.
 ۲. دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش‌ازدور، گروه جغرافیا، پردیس علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.
 ۳. استادیار، گروه جغرافیا، پردیس علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.
- * نویسنده مسئول: irousta@yazd.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۰۳

doi [10.22034/jdmal.2022.548083.1372](https://doi.org/10.22034/jdmal.2022.548083.1372)

چکیده

گردوغبار به‌عنوان مهمترین رکن آلودگی هوا است که در سال‌های اخیر غلظت آن در مناطق مختلف افزایش یافته است. پژوهش حاضر، با استفاده از سامانه گوگل ارث انجین و داده‌های ماهواره‌ای مودیس با قدرت تفکیک زمانی ۸ روزه و قدرت تفکیک مکانی ۱ km و ۲۵۰ m و همچنین روش‌های آماری از جمله همبستگی و هموارسازی نمایی سه‌گانه، به پایش و پیش‌بینی تغییرات مکانی و زمانی گردوغبار معلق در جو استان قزوین پرداخت. بدین منظور، با استفاده از تصاویر شاخص عمق اپتیکی آئروسول (AOD)، شاخص بهینه پوشش گیاهی (EVI) و شاخص تغییرات جزیره حرارتی (HI) مودیس و تهیه نقشه‌های پایش زمانی و مکانی آنها در طول دوره آماری ۱۳۹۴-۱۳۹۹ و پیش‌بینی روند آن تا ۱۴۰۹، ارتباط این عوامل با یکدیگر بررسی شد. نتایج پژوهش حاضر نشان‌دهنده افزایش میزان گردوغبار معلق در جو در استان قزوین از ۰/۴۶۱ در سال ۱۳۹۴ به ۰/۶۰۳ در سال ۱۳۹۶ بود. این میزان، سپس در یک روند کاهشی به ۰/۴۹۳ در سال ۱۳۹۷ رسیده بود که مجدداً به ۰/۵۷۵ در سال ۱۳۹۸ افزایش یافت. میزان گردوغبار معلق در جو سپس با کاهشی اندک به ۰/۵۳۶ در سال ۱۳۹۹ رسید. نتایج بیانگر ارتباط منفی بارندگی، رطوبت نسبی و پوشش گیاهی و ارتباط مثبت سرعت باد، تعداد روزهای یخبندان، دما، تغییرات جزیره حرارتی و ساعات آفتابی با مقادیر AOD بود. پژوهش حاضر با بررسی تغییرات غلظت گردوغبار معلق در جو در دو کلاس پرخطر و کم‌خطر و پیش‌بینی آن، افزایش کلاس پرخطر برای این استان را برای سال ۱۴۰۹ پیش‌بینی کرد. نتایج پژوهش حاضر به تصمیم‌گیران و برنامه‌ریزان کمک می‌کند تا با مدیریت پوشش گیاهی و برنامه‌ریزی در جهت کاهش جزایر حرارتی شهرها و همچنین برنامه‌های مدیریت بارش و رطوبت سطح شهرها به کاهش آلودگی‌های ناشی از گردوغبار معلق در جو در شهرها کمک کنند.

واژگان کلیدی: شاخص عمق اپتیکی آئروسول؛ پوشش گیاهی بهبود یافته؛ جزیره حرارتی؛ مودیس؛ هموارسازی نمایی سه‌گانه



■ مقدمه

سامانه به دلیل سرعت پردازش داده باعث کاهش زمان پردازش داده به صورت دستی و همچنین به علت به روز بودن اطلاعات باعث دقیق بودن اطلاعات دریافتی از این سامانه می‌شود. استفاده از این سامانه باعث صرفه جویی در زمان و هزینه و نیروی انسانی می‌شود و از طرفی اطلاعات جامعی را در اختیار کاربر قرار داده که افزایش دسترسی فراگیر مشاهده زمین در این مقیاس قبلاً غیرقابل تصور بوده است (۳۲).

تعدادی از ویژگی‌های گردوغبار با توجه به تأثیرات آن می‌تواند هر دو جنبه فیزیکی شیمیایی را بر روی پوشش گیاهی داشته باشد ریزش گردوغبار روی گیاهان ممکن است برگ‌ها را از نظر فیزیکی خفه کند (۲۲). بنابراین، چیزی که اهمیت دارد، سطح مطلق رسوب است که تحت تأثیر گردوغبار، نرخ انتشار و شرایط سطح برگ می‌باشد. همچنین می‌تواند از نظر فیزیکی روزنه‌ها را مسدود کند. این امر موجب کند شدن روند رشد گیاه و یا آسیب رساندن به آن و تشدید خشکسالی در درازمدت می‌گردد (۱۰). پدیده گردوغبار ارتباط نزدیکی با شرایط اقلیمی محلی مثل بارندگی، دما و رطوبت نسبی همچنین ویژگی‌های سطح زمین مثل پوشش گیاهی، پوشش برف روی سطح زمین و بافت خاک دارد. در این راستا مطالعات مختلف حاکی از تأثیر و ارتباط پارامترهای مختلف اعم از اقلیمی، هواشناسی، زمین شناسی و حتی انسانی در وقوع این پدیده دارند. افزایش بارش و افزایش رطوبت نسبی با پدیده گردوغبار همبستگی منفی داشته و با افزایش یکی دیگری کاهش می‌یابد (۲۴، ۳۹). دمای هوا به عنوان یک معیار کلیدی بر میزان گردوغبار به صورت مستقیم و یا غیر مستقیم در ارتباط می‌باشد. افزایش دما می‌تواند به دو صورت بر افزایش میزان غلظت گردوغبار تأثیر بگذارد؛ نخست آنکه می‌تواند با کاهش بارندگی و از بین بردن رطوبت خاک باعث افزایش آن شود و دیگر اینکه با تأثیر بر پوشش گیاهی و از بین بردن آن باعث افزایش مقدار گردوغبار شود (۲۷، ۴۲).

ذرات آئروسول^۱ گردوغباری، فراوان‌ترین نوع ذرات معلق جو در کره زمین است (۱۷) و مهم‌ترین رکن آلودگی هوا و پدیده وارونگی هوا می‌باشد؛ به طوری که تقریباً ۳۰٪ از کل آلودگی‌های هوا را شامل می‌شود (۱۴). در حال حاضر چالش‌های بسیاری برای رفع این مشکل توسط بشریت مورد بحث قرار گرفته و پژوهش‌های فراوانی پیرامون این موضوع انجام شده است. گردوغبار^۲ که در هواشناسی عبارت است از ذرات بسیار کوچک، جامد و سبک سیلتی و رسی یا ماسه‌ای بسیار ریز که در اثر فرسایش بادی و بیابان‌زایی توسط باد در اتمسفر زمین وارد می‌شوند و تا مسافت بسیار طولانی انتقال می‌یابند و دید افقی را بین ۱ km تا ۲ km و یا کمتر محدود می‌کنند (۱۳). امروزه برای بررسی پدیده گردوغبار و منشأ آن سه روش وجود دارد که عبارتند از تحلیل آمار فراوانی، مدل‌های شبیه سازی و سنجش‌ازدور (۵۱). گردوغبار امروزه به یکی از اصلی‌ترین معضله‌های آلودگی هوا و محیط‌زیستی به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه تبدیل شده است (۴۴). این پدیده اغلب موجب کاهش دید به کمتر از ۱ کیلومتر می‌شود و در شدیدترین حالت غلظت ذرات معلق در هوا می‌تواند به بیش از 6000 mg/m^3 در هوا برسد (۷).

پایش مکانی و زمانی گردوغبار همچنین می‌تواند به پیش‌بینی روند آنچه در زمان و چه در مکان خاص منجر شده تا بتوان بهترین تصمیم را قبل از رسیدن به وضعیت بحرانی گرفت. شاخص اندازه‌گیری شاخص عمق اپتیک آئروسول (AOD^۳) سنجنده مودیس^۴، حساس به هر دو آئروسول‌های جاذب و غیر جاذب (UV^۵) است. سنجنده‌های مودیس بر روی ماهواره ترا^۶ در ۱۹۹۹ و بر روی ماهواره آکوا^۷ در ۲۰۰۲ نصب و راه‌اندازی شده‌اند.

سامانه گوگل ارث انجین^۸ طی سال‌های اخیر طرفداران زیادی بین پژوهشگران برای دریافت اطلاعات و داده برای بررسی موضوع‌های مختلف در زمینه‌های اقلیمی آب و هواشناسی و به‌طور کلی سنجش‌ازدور پیدا کرده است. این

⁵ Ultraviolet

⁶ Teraa

⁷ Aqua

⁸ Google Earth Engine

¹ Aerosol

² Dust

³ Aerosol Optical Depth

⁴ MODIS

که باعث افزایش دما و کاهش رطوبت نسبی شد و در نتیجه تبخیر و تبخیر را افزایش داد. در مقابل، خشک شدن خاک در دوره پایانی، افزایش قابل توجه فشار سطح دریا، همراه با افزایش شاخص نوسان اقیانوس اطلس شمالی، موجب بادهای شمال غربی از عرض‌های جغرافیایی بالاتر شد که دلیل عمده کاهش دما و افزایش رطوبت نسبی بود. این پژوهش با اثبات کاهش تجمع گردوغبار در EMME، به‌ویژه، در عراق و مصر نشان داد که تا چه حد روندهای AOD در منطقه EMME با تغییر شرایط آب و هوایی هواشناسی کنترل می‌شود (۴۱). پژوهشی دیگر، به بررسی و پایش تغییرات زمانی و مکانی ذرات معلق موجود در جو که گردوغبار نیز بخش عمده‌ای از ذرات معلق است پرداخت. در این مطالعه از AOD مودیس طی دوره آماری ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۷ جهت پایش و تحلیل تغییرات مکانی و زمانی غلظت آئروسول‌ها در نواحی جنوب شرق ایران استفاده شد. تغییرات زمانی AOD در مقیاس‌های زمانی ماهانه، فصلی و سالانه، بر اساس آزمون روند من-کندال^۴ تعیین شد و نتایج بیانگر وجود ارتباط قوی و معنی‌دار بین AOD و غلظت ذرات معلق (PM10) در سطح اطمینان ۹۵٪ آماری است. لذا این پژوهش اثبات کرد داده‌های AOD از دقت قابل قبولی برای بررسی و تحلیل تغییرات ذرات معلق جو در منطقه مطالعاتی برخوردار هستند. همچنین نشان داد که توزیع مکانی AOD در سطح منطقه مطالعاتی طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۷ نشان داد نواحی غربی و مرکزی، کمترین میزان AOD را به خود اختصاص داده و نواحی شمال شرقی، شرق و جنوبی تحت تأثیر غلظت بالاتری از AOD قرار گرفته‌اند (۳۰). ارتباط منفی بین پوشش گیاهی (۳، ۳۴) و جزایر حرارتی (۵۲) با مقادیر AOD نیز بیشتر در پژوهش‌های متعدد به اثبات رسیده است.

استان قزوین به دلیل وجود کارخانجات صنعتی و نیروگاه شهید رجایی و کارخانه سیمان و همچنین قرارگیری در مرز استان‌های تهران و البرز (۲۸) و نیز موقعیت قرارگیری و وجود بادهای فصلی و طوفان‌های شن و ماسه استان‌های

گردوغبار به‌عنوان اصلی‌ترین رکن در آلودگی هوا همواره مورد توجه پژوهشگران بوده و داده‌های مودیس در پایش گردوغبار و آلودگی هوا کاربردهای زیادی دارد (۱۲). امروزه به دلیل افزایش آلودگی هوا این موضوع بیش از پیش در حال گسترش و بررسی در سطوح مختلف آلودگی مورد بررسی قرار می‌گیرد (۳۸). یک پژوهش به‌منظور بررسی تغییرات مکانی و زمانی و ارتباط با متغیرهای هواشناسی با شاخص AOD در صحرای تیکله‌مکان^۱ چین به بررسی تغییرات آلودگی و رابطه آن با متغیرهای هواشناسی با استفاده از تصاویر مودیس و در سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۵، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۵ پرداخت. در این پژوهش، به‌منظور بررسی روابط بین ذرات معلق در هوا و عوامل هواشناسی، یک مدل جنگل تصادفی همراه با متغیرهای محیطی برای پیش‌بینی AOD استفاده شد. بر اساس نتایج این پژوهش، میانگین ماهانه AOD در آوریل به حداکثر خود رسیده و مقادیر AOD در بهار بیشتر از تابستان و در پاییز بیشتر از زمستان بود. که این فصلی بودن می‌تواند مربوط به طوفان‌های شن مکرر در بهار و اوایل تابستان باشد. این پژوهش همچنین نشان داد مقادیر AOD یک روند افزایشی تدریجی را تا سال ۲۰۱۰ و سپس تغییرات بزرگی را تا سال ۲۰۱۵ ثبت کرده و مقدار آن تمایل به افزایش از جنوب به شمال دارد. این پژوهش اثبات کرد که شاخص اقلیمی که بیشترین تأثیر را بر AOD دارد، رطوبت نسبی است (۲۰).

بررسی دیگری روند AOD را در منطقه مدیترانه شرقی و خاورمیانه (EMME^۲) با استفاده از داده‌های MERRA-2^۳ و مودیس بررسی کرد. در این پژوهش یک روند صعودی قابل توجه AOD در طول سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ و یک روند نزولی طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۷ نشان داده شده است. این پژوهش نشان داد که گردوغبار بادی عامل اصلی تغییرات AOD بوده و تغییرات زمستانی آن به عوامل هواشناسی در منطقه EMME مربوط می‌شود. بر اساس نتایج این پژوهش، در دوره زمانی اولیه کاهش قابل توجه فشار سطح دریا باعث وزش بادهای خشک و گرم جنوب شرقی از مناطق بیابانی در خاورمیانه به سمت EMME شد

³ Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications

⁴ Mann-Kendall

¹ Taklamakan

² Eastern Mediterranean and the Middle East

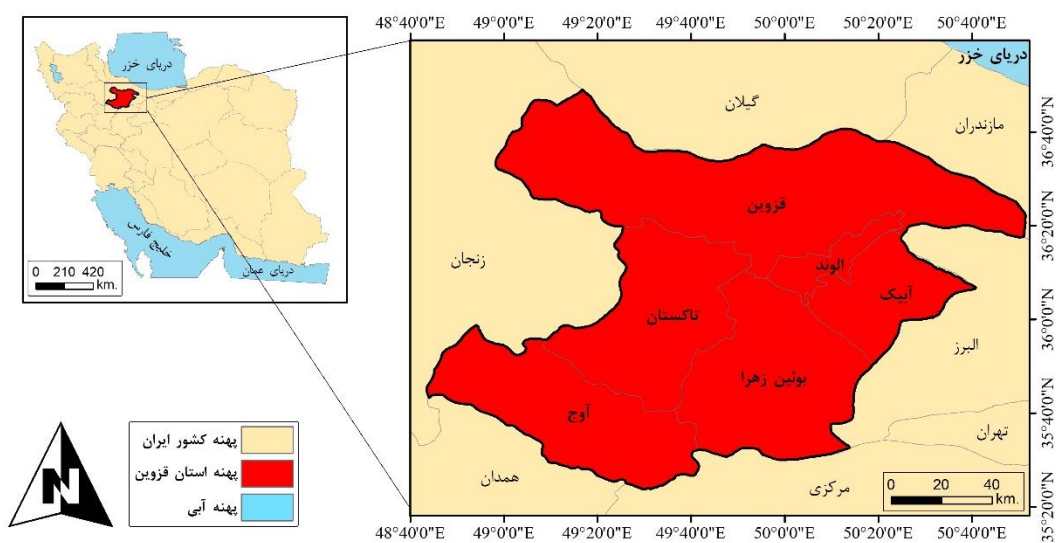
TES در پیش‌بینی دمای هوا را با خطای ۲٪ به اثبات رسانده‌اند.

■ مواد و روش

محدوده مورد بررسی

استان قزوین با مساحتی معادل 15623 km^2 ، برابر با ۱٪ از ایران، در حوزه مرکزی ایران بین $44^\circ 48'$ تا $51^\circ 50'$ و طول شرقی $24^\circ 35'$ تا $48^\circ 36'$ عرض شمالی نسبت به خط استوا قرار دارد (شکل ۱). قزوین در دامنه جنوبی رشته کوه‌های البرز واقع شده که به دلیل داشتن ارتفاعات متعدد و بارندگی‌های متوسط از نقاط معتدل کشور به‌شمار می‌آید. مرتفع‌ترین کوه‌های استان، سیاهلان، کی جکین، سفید کوه و سیاه کوه است که حداکثر ارتفاع و کوه‌های شمالی سیاهلان 4175 m از سطح دریا می‌باشد. محدوده‌ی مرکزی و شرق استان را دشت تشکیل می‌دهد که شیب آن از شمال غرب به جنوب شرق امتداد دارد و در پائین‌ترین نقطه 1130 m است. حداقل ارتفاع آن در شمال غربی و در بخش طارم سفلی و کناره‌های دریاچه سفید رود با ارتفاع 300 m از سطح دریا است (۳۷). میانگین بارش سالیانه در این استان، $284/6 \text{ mm}$ ، میانگین سرعت باد سالیانه در این استان، 7 km/h و میانگین دمای سالیانه هوای این استان نیز 14°C می‌باشد (۶).

مرکزی و جنوبی ایران (۳۱) که جهت آن به سمت استان قزوین است، در سال‌های اخیر شاهد آلودگی هوا در قسمت‌های مختلف استان به‌ویژه شهرستان آبیک و قزوین بوده است. همچنین در سنوات اخیر به دلیل ایجاد پدیده وارونگی هوا ذرات ریز و معلق در آسمان قزوین شرایط آلودگی را به حد بحرانی رسانیده است (۴۷). پژوهش حاضر با هدف بررسی روند زمانی و مکانی گردوغبار معلق در جو در استان قزوین با استفاده از سامانه گوگل ارث انجین و داده‌های ماهواره‌ای مودیس با شاخص AOD در ارتباط با شاخص پوشش گیاهی بهبود یافته EVI^۱ مودیس، تغییرات جزایر حرارتی شهری مودیس و معیارهای اقلیمی این استان انجام شد. با توجه به اینکه پژوهش‌های پیشین (۲)، وضعیت گردوغبار این منطقه را برای سال‌های ۲۰۰۰ (۱۳۷۹) تا ۲۰۱۴ (۱۳۹۳) و با استفاده از داده‌های سینوپتیک بررسی کرده‌اند، پژوهش حاضر، پایش گردوغبار معلق در جو را در طول دوره آماری ۶ ساله از ۱۳۹۴ تا سال ۱۳۹۹ و با استفاده از داده‌های سنجنش‌زودور انجام داد. علاوه بر آنکه غلظت گردوغبار معلق در جو برای استان قزوین در دو کلاس پرخطر بالای $0/5$ و کم‌خطر زیر $0/5$ (۱) تا سال ۱۴۰۹ با استفاده از الگوریتم هموارسازی نمای سه‌گانه (TES^۲) مورد بررسی و پیش‌بینی قرار گرفت. ایندیرانی^۳ و همکاران (۲۰۲۰)، در پژوهشی، دقت الگوریتم



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی استان قزوین

³ Indriani

¹ Enhanced Vegetation Index

² Triple Exponential Smoothing

داده‌های مورد استفاده

در پژوهش حاضر، از داده‌های ماهواره مودیس، که پژوهش‌های پیشین، دقت تصاویر AOD آن را، به‌منظور پایش گردوغبار را به اثبات رسانده‌اند (۳۰)، برای پایش وضعیت گردوغبار معلق در جو و پوشش گیاهی استان قزوین استفاده شده است. به‌منظور پایش گردوغبار معلق در جو، شاخص AOD و به‌منظور تحلیل روند تغییرات آن، از شاخص EVI و HI^۱ نیز استفاده شد. کلیه این تصاویر توسط سامانه گوگل‌ارث‌انجین استخراج شدند که ویژگی‌های آن در جدول ۱ ارائه شده است. پیکسل‌سایز داده‌های مورد استفاده، پیش از هرگونه تحلیل، از نظر ریاضی هم اندازه شده و در مناطقی که بر اثر اختلاف پیکسل‌سایز، کلیه محصول‌ها دارای داده یکنواخت نبودند، به‌منظور حفظ صحت تحلیل و خروجی‌های آماری، حذف شدند و صرفاً مناطق دارای داده در همه محصول‌ها مورد تحلیل قرار گرفتند.

محصول عمق اپتیکی آئروسول (AOD)

AOD، شاخص مهمی برای بررسی گردوغبار است و به توزیع آئروسول‌های گردوغبار موجود در جو (۱) و اندازه جرم ذرات معلق در یک ستون اتمسفر اشاره دارد (۵، ۴۸)، که تحت‌سلطه منابع انتشار نزدیک به سطح است (۱۵) و بنابراین مقادیر این محصول، بیانگر ذرات معلق در جو (فارغ از منشأ و مسیر حرکت) می‌باشد؛ به همین جهت در پژوهش حاضر از اصطلاح "ذرات معلق در جو" استفاده شد. AOD، شاخصی بدون واحد و بین صفر و است که از ۰/۱ تا ۰/۵ نشان‌دهنده صافی هوا و بیشتر از آن نشان‌دهنده غبار آلود بودن آن است (۱). به‌منظور محاسبه این شاخص برای استان قزوین، از محصول آماده MCD19A2 ورژن ۶ سنجنده مودیس ماهواره ترا بهره‌گیری شد. این محصول ویژگی‌های هندسی اتمسفر را نشان می‌دهد (۲۳). بدین منظور، تصاویر AOD روزانه محصول یاد شده برای کل استان قزوین و در سامانه گوگل‌ارث انجین فراخوانی شد. سپس این تصاویر ابتدا به‌صورت میانگین ماهیانه و سپس به‌صورت میانگین سالیانه محاسبه شدند.

خوارزمیک هموارسازی نمایی سه‌گانه (Triple Exponential Smoothing)

خوارزمیک (الگوریتم) TES، روشی مستقیم برای هموارسازی داده‌های سری زمانی است. این خوارزمیک، در طول زمان وزن کاهشی را به‌صورت نمایی به داده‌ها منتسب می‌کند (۱۱). پژوهش حاضر به‌منظور پیش‌بینی تغییر مساحت کلاس‌های گردوغبار معلق در جو در استان قزوین، از خوارزمیک TES استفاده نموده است. به‌منظور هموارسازی داده‌های سری زمانی و حذف داده‌های فرکانس بالا، این خوارزمیک سه مرتبه بر روی داده‌ها اعمال گشت (۱۸). بدین منظور، دنباله‌ای از داده‌های سری زمانی پژوهش به‌عنوان KT خوارزمیک در نظر گرفته شد. سپس چرخه تغییر فصلی L، مطابق با دوره زمانی مورد پیش‌بینی پژوهش که ۲ ساله است تنظیم شده و فرایند پیش‌بینی از T=0 آغاز شد. بدین ترتیب، خوارزمیک TES با استفاده از داده‌های سری زمانی موجود در زمان T که به‌عنوان ورودی KT قرار گرفت و محاسبه خط روند داده‌ها، بهترین‌ترین برآورد داده زمانی آینده را در زمان T+1 یعنی مقدار هموار شده را به‌عنوان خروجی، مشخص نمود. خروجی نهایی، برآورد پیش‌بینی شده‌ای برای مقدار K، بر اساس داده‌های قبل و تا از زمان T یعنی در زمان T+M بود که در آن، الزاماً M بزرگتر از صفر قرار داشت (۸). به‌منظور ارزیابی دقت خوارزمیک، مساحت کلاس‌های معلوم در سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ توسط داده‌های سری زمانی سال‌های قبل، پیش‌بینی شده و نتایج توسط معیار آماری خطای جذر میانگین مربعات (RMSE^۲) ارزیابی شد.

معیارهای اقلیمی

به‌منظور بررسی معیارهای اقلیمی از جمله میانگین دما، بیشینه سرعت وزش باد، تعداد ساعات آفتابی، تعداد روزهای یخبندان، رطوبت نسبی و بارندگی روزانه و ماهیانه مرتبط با استان قزوین و شهرستان‌های آن، سالنامه‌های آماری موجود، یعنی ۱۳۹۴، ۱۳۹۵، ۱۳۹۶، ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ از درگاه ملی آمار استخراج و مورد بهره‌برداری قرار گرفت (۴۳).

² Root Mean Square Error¹ Heat Islands

جدول ۱. میانگین غلظت گردوغبار معلق در جو استان قزوین در طول دوره آماری

شاخص	سنجنده-ماهواره	محصول	قدرت تفکیک مکانی	قدرت تفکیک زمانی (روز)
AOD		MCD19A2	۱km	۱
EVI	مودیس-ترا	MOD13Q1	۲۵۰m	۱۶
تغییرات HI		MOD11A2	۱km	۸

نیز از خروجی Scale که بیانگر شدت تغییرات جزیره حرارتی بود استفاده شد.

■ نتایج

نتایج پایش گردوغبار معلق در جو با استفاده از شاخص AOD

با استفاده از شاخص AOD، لایه اطلاعاتی و آمار تغییرات غلظت گردوغبار معلق در جو برای استان قزوین طی سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۹ به دست آمد (شکل ۲). بر اساس نتیجه‌های به دست آمده، روند غلظت گردوغبار معلق در جو در استان قزوین طی سه سال ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۶ افزایشی بوده و از ۰/۴۶۱ در سال ۱۳۹۴ به ۰/۵۴۲ در سال ۱۳۹۵ و ۰/۶۰۳ در سال ۱۳۹۶ رسیده است. میزان غلظت گردوغبار معلق در جو سپس در یک روند کاهشی، به ۰/۴۹۳ در سال ۱۳۹۷ رسیده و سپس مجدداً با افزایش به ۰/۵۷۵ در سال ۱۳۹۸ و کاهش اندک به ۰/۵۳۶ در سال ۱۳۹۹ تغییر یافته است.

تغییر غلظت گردوغبار معلق در جو به تفکیک شهرستان‌های قزوین (شکل ۳) بیانگر آن است که بیشترین مقدار تغییر غلظت گردوغبار معلق در جو استان قزوین در سال ۱۳۹۶ (مقدار ۰/۷) بوده است که این مقدار برای شهرستان‌های آبیک، الوند، بوئین‌زهره و تاکستان، ۰/۷، برای شهرستان‌های آوج و قزوین، ۰/۵ بوده است (جدول ۲).

میانگین مقادیر AOD در طول دوره آماری ۶ ساله (۱۳۹۴ تا ۱۳۹۹) برای استان قزوین در شکل ۴ نمایش داده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، از مجموع 357130 km^2 مساحت مورد بررسی در استان قزوین، 227238 km^2 در سال ۱۳۹۴ در کلاس کم‌خطر و 129892 km^2 در طبقه پر خطر غلظت گردوغبار معلق در جو قرار داشتند.

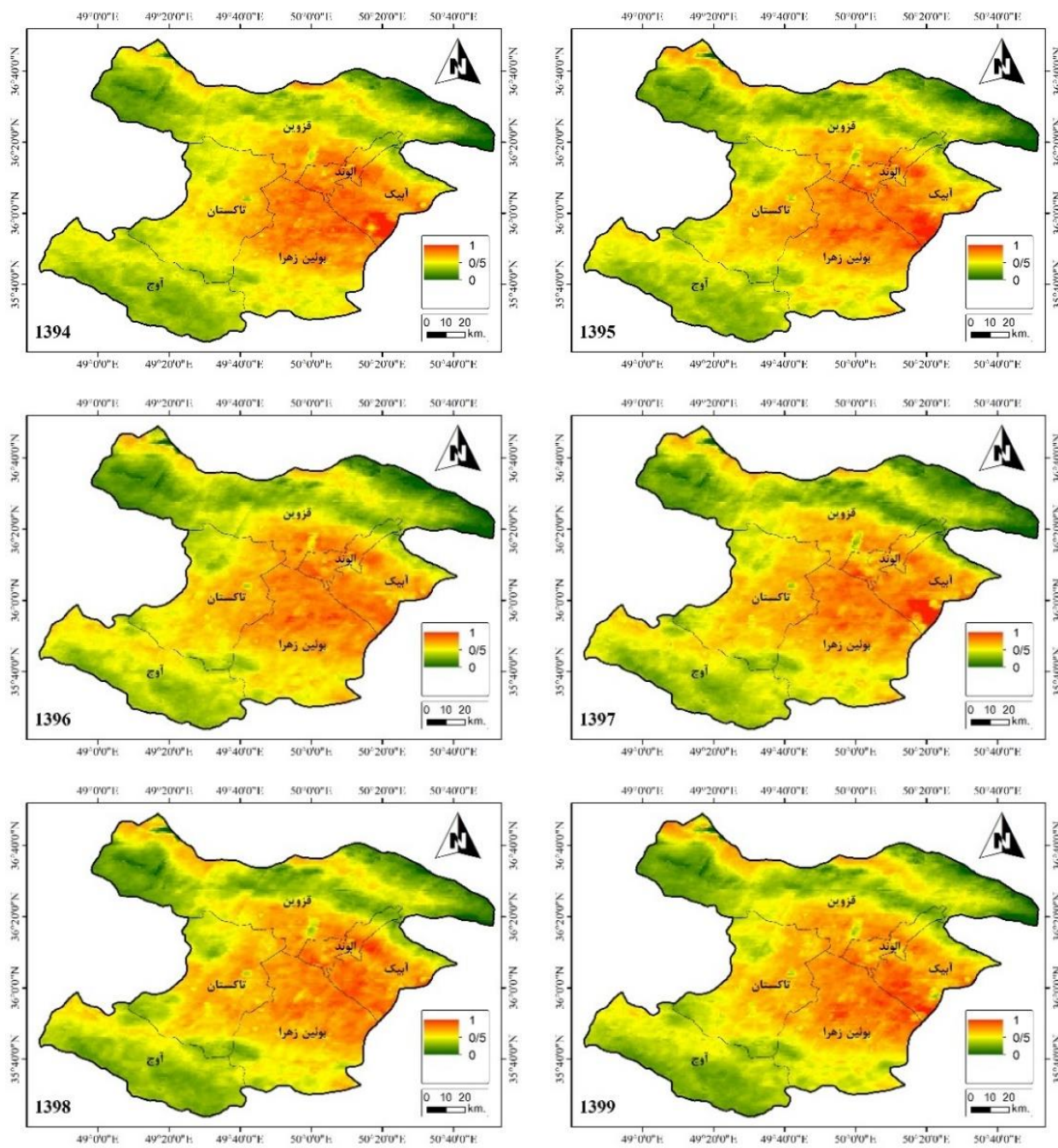
شاخص پوشش گیاهی بهبود یافته (EVI)

به منظور ارزیابی شرایط پوشش گیاهی استان قزوین، در پژوهش حاضر از محصول آماده شاخص EVI مودیس برای سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ استفاده شد که این شاخص ضمن نمایش مناسب تغییرات زمانی و مکانی پوشش گیاهی منطقه، اثرات زمینه خاک و گردوغبار روی پوشش گیاهی را نیز می‌کاهد (۳۵). این محصول از تصاویر MOD13Q1 مودیس ماهواره ترا با دوره بازدید ۱۶ روزه استخراج شد که معیار برداشت این تصاویر، میزان ابر کم، میزان زاویه دید کم و بالاترین مقدار این شاخص در پیکسل می‌باشد (۹). این تصاویر از وب سایت USGS ناسا دریافت شده و پس از اعمال عامل مقیاس^۱ ۰.۰۰۰۱ بر روی هر تصویر، مقدار EVI برای هر پیکسل به دست آمده و به صورت خروجی میانگین سالانه محاسبه شد.

جزیره گرمایی (HI)

به منظور پایش تغییرات جزیره حرارتی استان قزوین در پژوهش حاضر، تصاویر دمای سطح زمین شب، محصول MOD11A2 ورژن ۶ مودیس ماهواره ترا برای هر دوره ۱۶ روزه در سامانه گوگل ارث انجین فراخوانی شد. دو دوره تصویر ۸ روزه این محصول، دقیقاً برابر با محصول‌های دوره‌های ۱۶ روزه می‌باشد (۴۹) که از این نظر با تصاویر EVI استفاده شده نیز مطابقت داشت. بدین ترتیب پس از اخذ تصاویر دمای سطح زمین شب برای هر پیکسل، با استفاده از دستور رگرسیون خطی linear fit، لایه اطلاعاتی تغییرات دمایی برای هر پیکسل نیز در طول زمان محاسبه شد. به منظور تحلیل تغییرات جزیره حرارتی استان قزوین

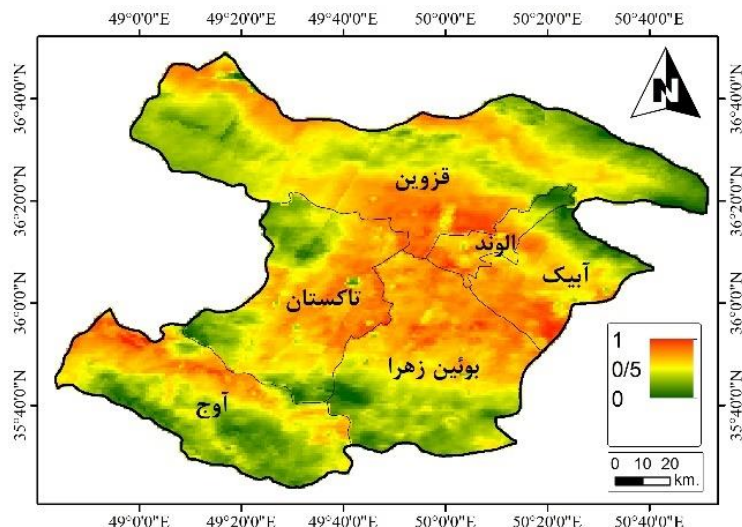
^۱ Scale Factor



شکل ۲. تغییرات غلظت گردوغبار معلق در جو برای سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۹ استان قزوین

جدول ۲. تغییرات میانگین مقادیر شاخص AOD برای دوره مطالعه ۶ ساله استان قزوین، به تفکیک شهرستان

شهرستان / سال	۱۳۹۹	۱۳۹۸	۱۳۹۷	۱۳۹۶	۱۳۹۵	۱۳۹۴
آبیک	۰/۷	۰/۷	۰/۶	۰/۷	۰/۷	۰/۶
آوج	۰/۴	۰/۵	۰/۴	۰/۵	۰/۵	۰/۴
الوند	۰/۶	۰/۷	۰/۶	۰/۷	۰/۷	۰/۶
بوئین‌زهرا	۰/۶	۰/۷	۰/۶	۰/۷	۰/۷	۰/۶
تاکستان	۰/۶	۰/۶	۰/۵	۰/۷	۰/۶	۰/۵
قزوین	۰/۵	۰/۵	۰/۴	۰/۵	۰/۵	۰/۴
میانگین	۰/۶	۰/۶	۰/۵	۰/۷	۰/۶	۰/۵



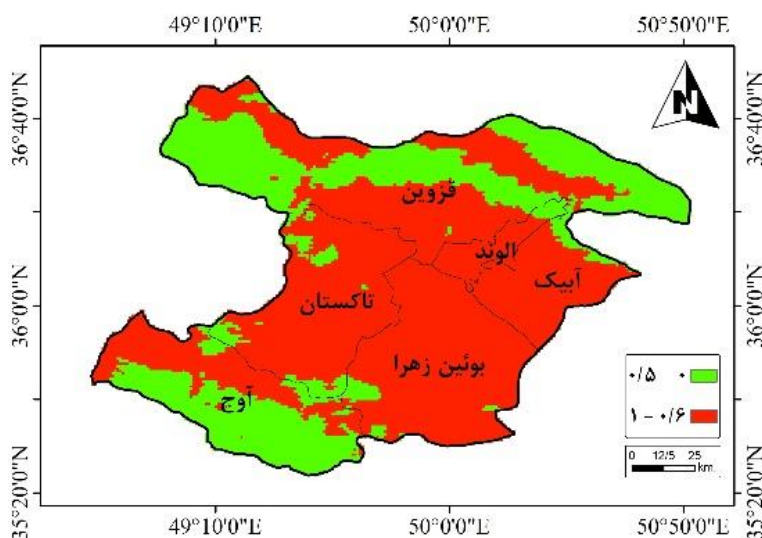
شکل ۳. نقشه تغییرات غلظت گردوغبار معلق در جو برای شهرستان‌های استان قزوین در طول دوره ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۹

افزایشی داشته و در بقیه سال‌ها کاهش یافته است. در طبقه پرخطر نیز تنها در همین دو سال روند کاهش مشاهده می‌شود و در بقیه سال‌ها نسبت به سال قبل افزایشی بوده است (جدول ۳).

بر اساس نتایج به دست آمده، از مجموع 357130 km^2 مساحت مورد بررسی در استان قزوین، 227238 km^2 در سال ۱۳۹۴ در کلاس کم‌خطر و 129892 km^2 در طبقه پرخطر غلظت گردوغبار معلق در جو قرار داشتند. طبقه کم‌خطر تنها دو بار در سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۹ روند

جدول ۳. مساحت طبقه‌های کم‌خطر (الف) و پرخطر (ب) گردوغبار معلق در جو استان قزوین در طول دوره مورد بررسی (km^2)

طبقه	۱۳۹۴	۱۳۹۵	۱۳۹۶	۱۳۹۷	۱۳۹۸	۱۳۹۹
الف	۲۲۷۲۳۸	۱۴۴۵۷۶	۹۲۲۷۲	۱۸۰۴۴۲	۱۳۰۸۷۰	۱۵۱۲۷۰
ب	۱۲۹۸۹۲	۲۱۲۵۵۴	۲۶۴۸۵۸	۱۷۶۶۸۸	۲۲۶۲۶۰	۲۰۵۸۶۰



شکل ۴. میانگین مقادیر AOD در طول دوره آماری برای استان قزوین در دو طبقه پرخطر و کم‌خطر

اساس نتایج به‌دست آمده از اعتبارسنجی عملکرد مدل پیش‌بینی کننده (جدول ۵)، خوارزمیک ETS، با مقدار RMSE حدوداً ۰/۳ طبقه‌های کم‌خطر و پرخطر غلظت گردوغبار معلق در جو را برای سال‌های معلوم ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹ پیش‌بینی کرده است.

پیش‌بینی خوارزمیک ETS، برای سال ۱۳۹۸ با ۰/۶٪ و برای سال ۱۳۹۹ با ۱۳/۷٪ اختلاف همراه بود. نتایج حاصل از پیش‌بینی تغییرات فضایی روند گردوغبار معلق در جو برای سال‌های آینده استان قزوین بیانگر افزایش طبقه پرخطر غلظت گردوغبار معلق در جو برای استان قزوین می‌باشد (شکل ۶). بدین صورت که مساحت طبقه کم‌خطر غلظت گردوغبار معلق در جو، در روندی همواره کاهشی برای سال ۱۴۰۹، 100262 km^2 پیش‌بینی شده و از طرفی، در همین دوره زمانی، مساحت طبقه پرخطر در روندی افزایشی، به 256868 km^2 پیش‌بینی شده است (جدول ۶).

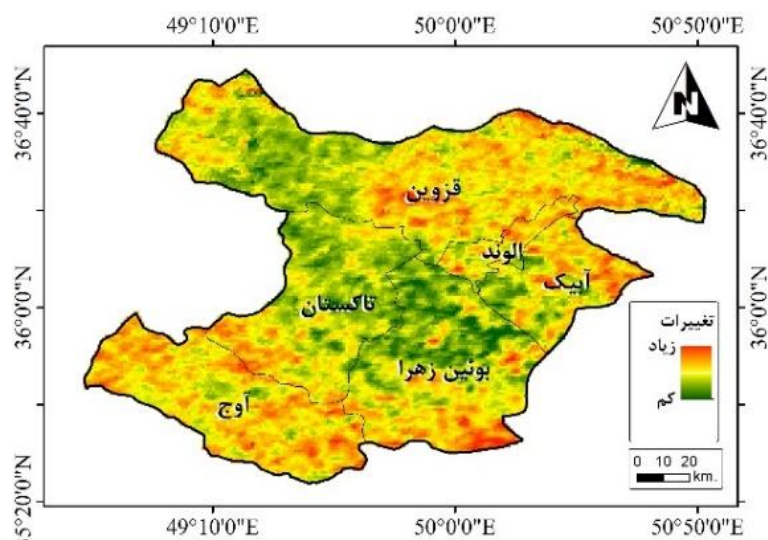
نقشه تغییرات AOD برای استان قزوین طی دوره مطالعاتی (۱۳۹۴ تا ۱۳۹۹) در شکل ۵ نمایش داده شده است. نتایج به‌دست آمده بیانگر آن است که در طول دوره آماری، شهرستان الوند با انحراف معیار ۶، بیشترین تغییرات گردوغبار معلق در جو را تجربه کرده است. پس از آن، شهرستان‌های آبیک، قزوین، بوئین‌زهرا و تاکستان به‌ترتیب در رتبه‌های دوم تا پنجم تغییر قرار گرفتند که بوئین‌زهرا با انحراف معیار ۴، نسبت به تاکستان، کمی تغییرات بیشتری را تجربه کرده است. تغییرات در شهرستان آوج نیز با انحراف معیار کمتر از ۱، از تمامی شهرستان‌ها کمتر بوده است (جدول ۴).

نتایج پیش‌بینی گردوغبار معلق در جو تا سال ۱۴۰۹

به‌منظور اعتبارسنجی مدل استفاده شده برای پیش‌بینی طبقه AOD برای استان قزوین، درآغاز این مدل برای سال‌های ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹ مورد ارزیابی قرار گرفت. بر

جدول ۴. میزان تغییر مساحت طبقه‌های کم‌خطر و پرخطر گردوغبار برای شهرستان‌های استان قزوین

انحراف معیار	الوند	آبیک	قزوین	بوئین‌زهرا	تاکستان	آوج
	۶	۵	۴	۴	۳	۰



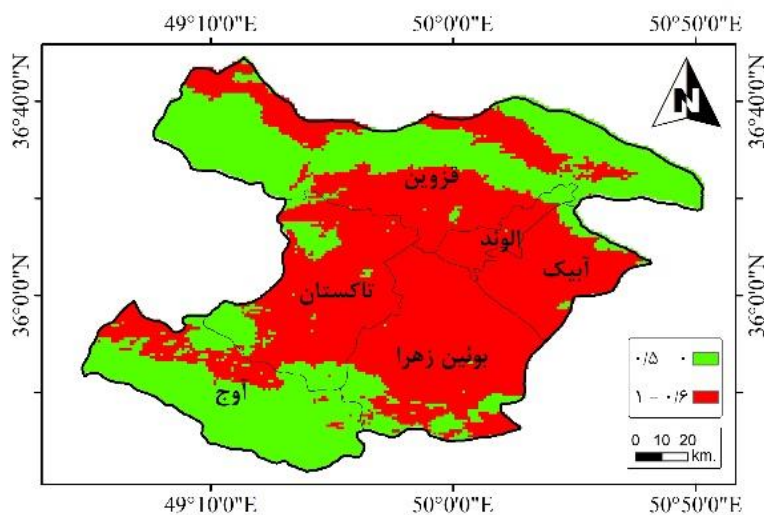
شکل ۵. نقشه تغییرات گردوغبار معلق در جو طی سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۹

جدول ۵. پیش‌بینی مساحت طبقه‌های کم‌خطر و پرخطر گردوغبار معلق در جو استان قزوین به‌منظور اعتبارسنجی (km^2)

طبقه	واقعی ۱۳۹۸	پیش‌بینی شده ۱۳۹۸	واقعی ۱۳۹۹	پیش‌بینی شده ۱۳۹۹
کم‌خطر	۱۳۰۸۷۰	۱۳۵۰۶۹	۱۵۱۲۷۰	۱۲۶۰۸۶
پرخطر	۲۲۶۲۶۰	۲۲۲۰۶۱	۲۳۱۰۴۴	۲۰۵۸۶۰

جدول ۶. پیش‌بینی مساحت طبقه‌های کم خطر و پرخطر گردوغبار معلق در جو تا سال ۱۴۰۹ (km²)

طبقه	۱۴۰۱	۱۴۰۳	۱۴۰۵	۱۴۰۷	۱۴۰۹
کم خطر	۱۳۵۲۹۱	۱۲۶۵۳۳	۱۱۷۷۷۶	۱۰۹۰۱۹	۱۰۰۲۶۲
پر خطر	۲۲۱۸۳۹	۲۳۰۵۹۷	۲۳۹۳۵۴	۲۴۸۱۱۱	۲۵۶۸۶۸

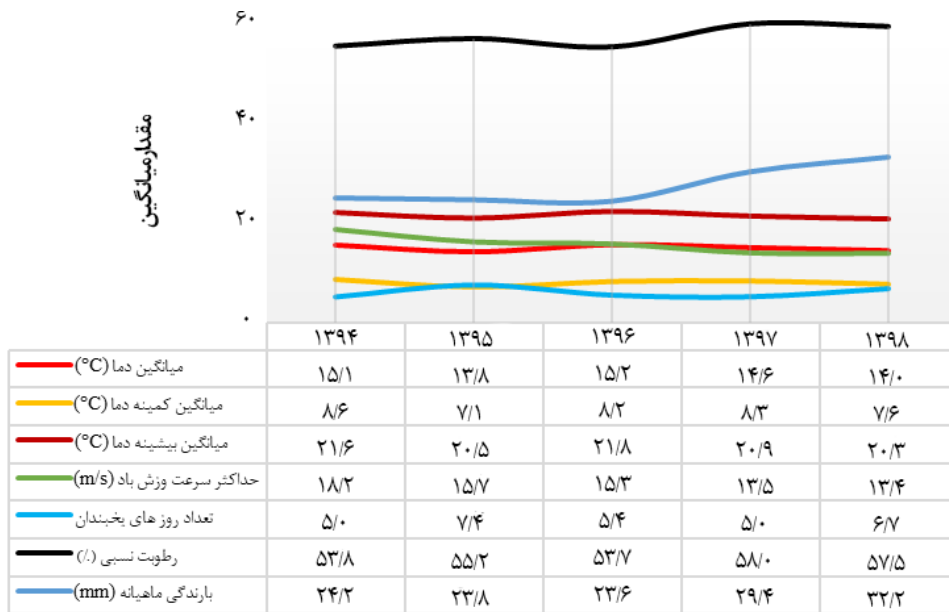


شکل ۶. نقشه پیش‌بینی فضایی تغییرات AOD برای استان قزوین تا سال ۱۴۰۹

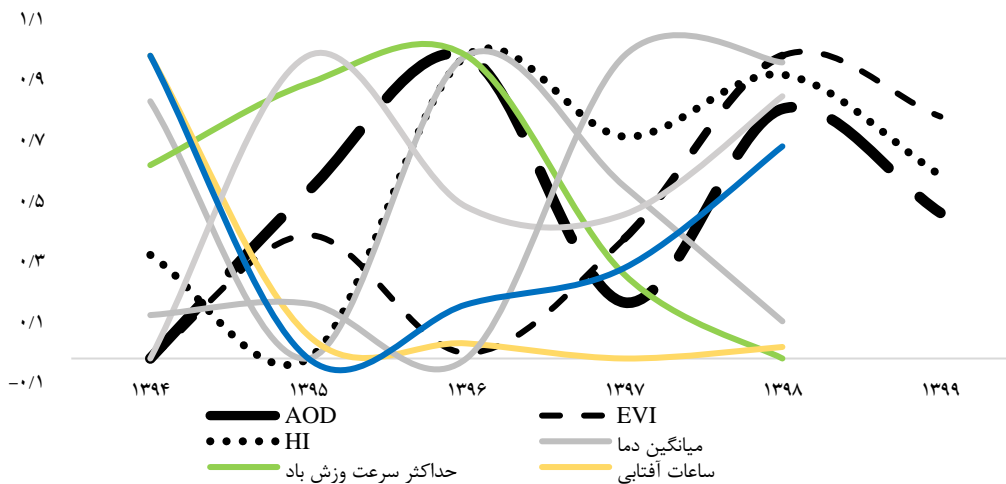
معیارهای اقلیمی

اندکی کاهش به ۵/۵٪ در سال ۱۳۹۸ رسیده است. بارندگی ماهیانه استان قزوین از ۲۴/۲ mm در سال ۱۳۹۴ به ۲۳/۶ mm در سال ۱۳۹۶ کاهش یافته است. سپس با شروع افزایش در سال ۱۳۹۷، به ۳۲/۲ mm در سال ۱۳۹۸ رسیده است (شکل ۷). نتایج همبستگی بین شاخص AOD و معیارهای اقلیمی و مقادیر دو شاخص EVI و تغییرات HI بیانگر آن است که شاخص AOD با مقادیر EVI در تمام سال‌ها ارتباط مثبت اما غیر معناداری (زیر ۵۰٪) از خود نشان داده است که بیشترین آن در سال ۱۳۹۷ با ۴۰٪ بوده است. شاخص AOD در سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۷ همبستگی مثبت بالای ۵۲٪ با مقادیر شاخص تغییرات HI داشته است که بیشترین مقدار آن در سال ۱۳۹۵، با ۹۰٪ بوده است (شکل ۸). روند کلی تغییرات مقادیر AOD، شاخص پوشش گیاهی EVI، شاخص جزیره حرارتی HI و دیگر متغیرهای اقلیمی در (شکل ۸) نمایش داده شده است.

بر پایه یافته‌های به‌دست آمده از استخراج معیارهای اقلیمی استان قزوین طی دوره ۱۳۹۴-۱۳۹۸، میانگین دمای این استان از سال ۱۳۹۴ به ۱۳۹۵ کاهش یافته و از $15/1^{\circ}\text{C}$ به $13/8^{\circ}\text{C}$ رسیده است. این معیار سپس در سال ۱۳۹۶ به $15/2^{\circ}\text{C}$ افزایش یافته و پس از آن با طی روند کاهشی مستمر تا سال ۱۳۹۹ به 14°C رسیده است. سرعت باد در این استان در تمام دوره آماری روند کاهشی طی کرده و از $18/2\text{ m/s}$ در سال ۱۳۹۴ به $13/4\text{ m/s}$ در سال ۱۳۹۸ کاهش پیدا کرده است. تعداد روزهای یخبندان در این استان در سال‌های ۱۳۹۴، ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷ با حدوداً ۵ روز یکسان بوده و در سال‌های ۱۳۹۵ و ۱۳۹۸، تعداد روزهای یخبندان حدوداً ۷ روز بوده است. رطوبت نسبی استان قزوین از $49/7\%$ در سال ۱۳۹۴ به $55/2\%$ در سال ۱۳۹۵ افزایش یافته و سپس به $53/7\%$ در سال ۱۳۹۶ کاهش یافته است. این در حالیکه این مقدار، در سال ۱۳۹۷ با رسیدن به 58% افزایش شدیدی یافته است و با



شکل ۷. میانگین معیارهای اقلیمی استخراج شده استان قزوین به تفکیک سال (۴۳)



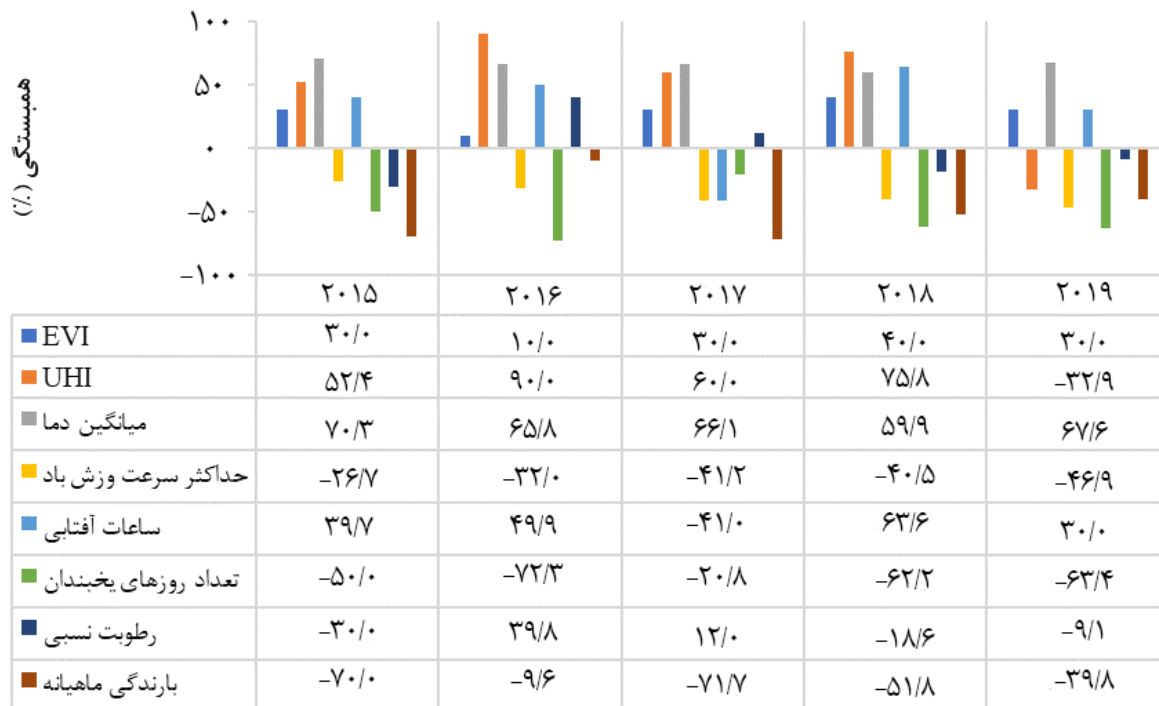
شکل ۸. روند تغییرات شاخص AOD و سایر پارامترهای مورد بررسی در پژوهش

منفی از خود نشان داد که در بقیه سال‌ها نیز گرچه مقادیر معناداری از همبستگی مشاهده نشد، اما ارتباط آنها منفی بود (شکل ۹).

پایش تغییرات EVI

تغییرات پوشش گیاهی به‌دست آمده از شاخص EVI برای استان قزوین به تفکیک شهرستان، طی دوره مورد مطالعه (شکل ۱۰) بیانگر آن است که میانگین این میزان در الوند با مقدار ۰/۲ بیش از بقیه شهرستان‌ها بوده و در آبیک و بوئین زهرا در سال ۱۳۹۸ افزایش یافته و سپس در سال ۱۳۹۹ در بوئین زهرا ۰ به ۰/۱ کاهش یافته است (جدول ۷).

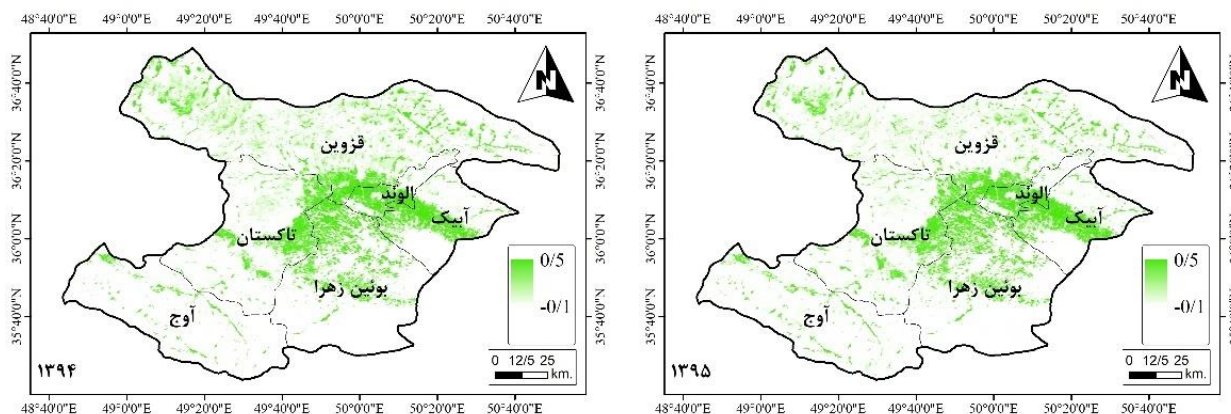
مقادیر AOD همچنین در تمام سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۸ همبستگی مثبت بالای ۰/۵۹ با میانگین دما داشته است که بیشترین میزان آن با ۰/۷۰/۳ در سال ۱۳۹۴ و کمترین آن در سال ۱۳۹۷، با ۰/۵۹/۹ بوده است. همبستگی مقادیر AOD با ساعات آفتابی فقط در سال ۱۳۹۷، با ۳۶/۱۶ معنادار بوده است در حالی که مقادیر شاخص AOD با تعداد روزهای یخبندان در سال ۱۳۹۴، ۱۳۹۵، ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ همبستگی منفی از خود نشان داده است. این شاخص همچنین با رطوبت نسبی همبستگی معناداری در هیچ یک از سال‌ها نشان نداد. شاخص AOD اما با میانگین بارندگی ماهانه سال‌های ۱۳۹۴، ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷ همبستگی



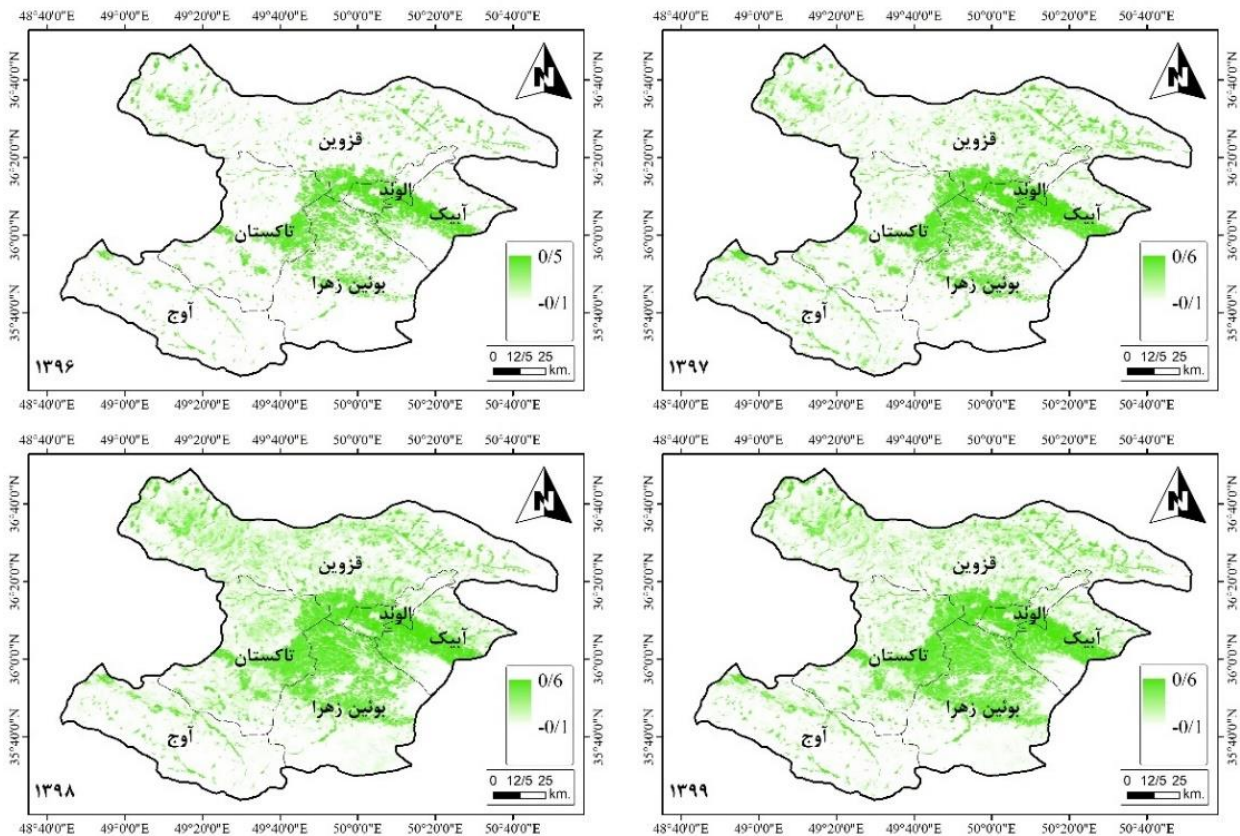
شکل ۹. همبستگی بین مقادیر شاخص AOD و سایر معیارهای اقلیمی استان قزوین برای سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۸ (همبستگی بالای ۵۰٪ در سطح ۹۵٪ معنادار است)

جدول ۷. میانگین مقادیر شاخص EVI برای دوره مطالعه ۶ ساله استان قزوین، به تفکیک شهرستان

شهرستان / سال	۱۳۹۹	۱۳۹۸	۱۳۹۷	۱۳۹۶	۱۳۹۵	۱۳۹۴
آبیک	۰/۲	۰/۲	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱
آوج	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱
الوند	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲
بوئین‌زهرا	۰/۱	۰/۲	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱
تاکستان	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱
قزوین	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱



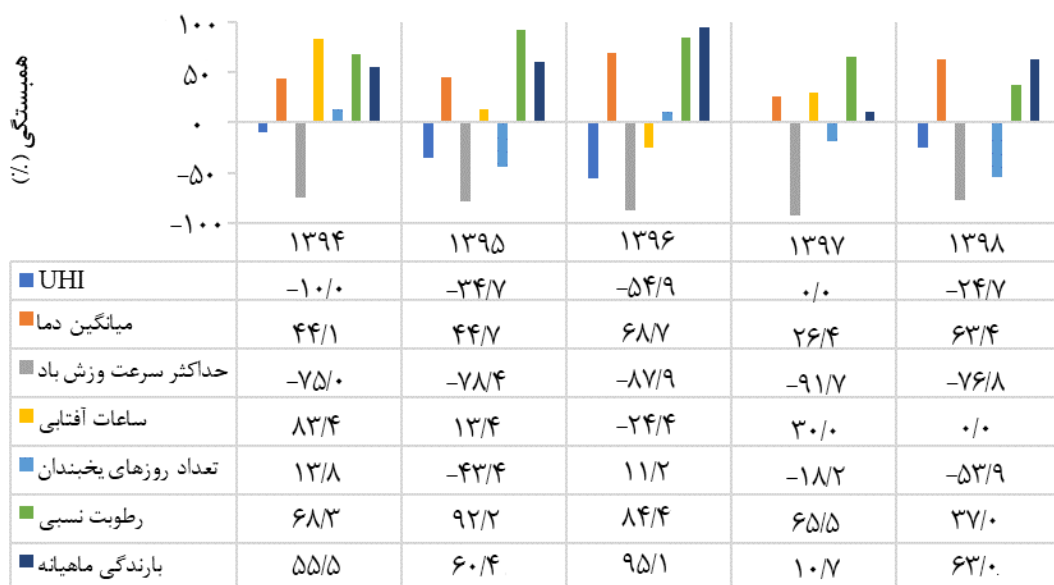
شکل ۱۰. تغییرات شاخص EVI برای سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۹ استان قزوین



ادامه شکل ۱۰. تغییرات شاخص EVI برای سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۹ استان قزوین

سال ۱۳۹۷ و معنادار بودن آن در سال ۱۳۹۶ می‌باشد. مقادیر EVI، در تمام سال‌ها با میانگین دما ارتباط مثبت داشته‌اند که این ارتباط، مجدداً در سال ۱۳۹۶ و ۱۳۹۸ معنادار به نظر می‌رسد (شکل ۱۱).

نتایج به‌دست آمده از مطالعه همبستگی بین مقادیر شاخص EVI و سایر معیارهای اقلیمی و شاخص تغییرات HI در استان قزوین، حاکی از ارتباط منفی این شاخص (EVI) و مقادیر شاخص تغییرات HI در تمامی سال‌ها بجز



شکل ۱۱. همبستگی بین مقادیر شاخص EVI و سایر معیارهای اقلیمی و تغییرات HI برای استان قزوین در سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۸ (همبستگی بالای ۵۰ درصد در سطح ۰/۰۵ معنادار است)

شهرستان‌های آبیک، الوند، بوئین‌زهرا و تاکستان در سال ۱۳۹۵ کاهش جزیره حرارتی به مقدار ۰/۱ را تجربه کرده و در بقیه سال‌ها بدون تغییر بوده‌اند. در حالی که شهرستان آوج، در دو دوره ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷ به میزان ۰/۱ افزایش جزایر حرارتی را تجربه کرده است. شهرستان قزوین، از منظر جزایر حرارتی در طول دوره آماری بدون تغییر بوده است (جدول ۸).

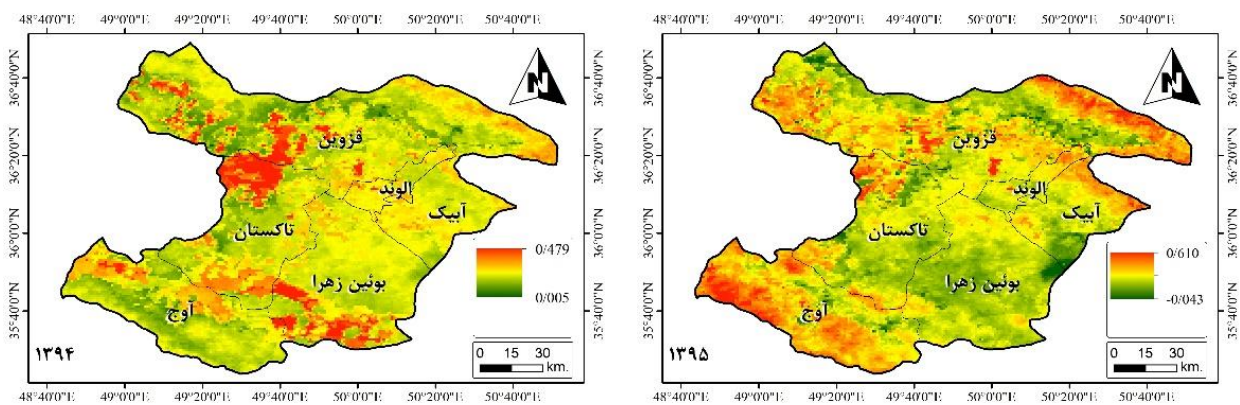
یافته‌های حاصل از ارزیابی همبستگی بین تغییرات HI و معیارهای اقلیمی در استان قزوین برای سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۸ بیانگر آن است که مقادیر این شاخص با میانگین دما در تمام سال‌ها ارتباط مثبت داشته است، اما این ارتباط در سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۸ با به ترتیب ۶۰٪ و ۷۰٪ معنادار و بالا بوده است (شکل ۱۳). این شاخص همچنین با بارندگی ماهیانه در تمامی سال‌ها ارتباط منفی داشته است که این ارتباط در سال ۱۳۹۴ با ۷۰٪ معنادارتر به نظر می‌رسد (شکل ۱۳).

بین مقادیر EVI با بیشینه سرعت وزش باد در تمام سال‌ها ارتباط منفی معناداری مشاهده شده است. بدین صورت که بیشترین ارتباط آن در سال ۱۳۹۷ و کمترین آن در سال ۱۳۹۴ بوده است. EVI همچنین در سال‌های ۱۳۹۴ با ساعات آفتابی و در سال ۱۳۹۸ با تعداد روزهای یخبندان به ترتیب ارتباط مثبت و منفی از خود نشان داده است. همبستگی بین EVI و رطوبت نسبی و میانگین بارندگی ماهیانه در سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۶ مثبت و معنادار بوده است. بیشینه همبستگی مثبت EVI و رطوبت نسبی در سال ۱۳۹۵ و با میانگین بارندگی ماهیانه در سال ۱۳۹۸ مشاهده شده است. EVI همچنین در سال‌های ۱۳۹۷ با رطوبت نسبی و در ۱۳۹۸ با میانگین بارندگی ماهیانه ارتباط مثبت معنی‌دار داشته است (شکل ۱۱).

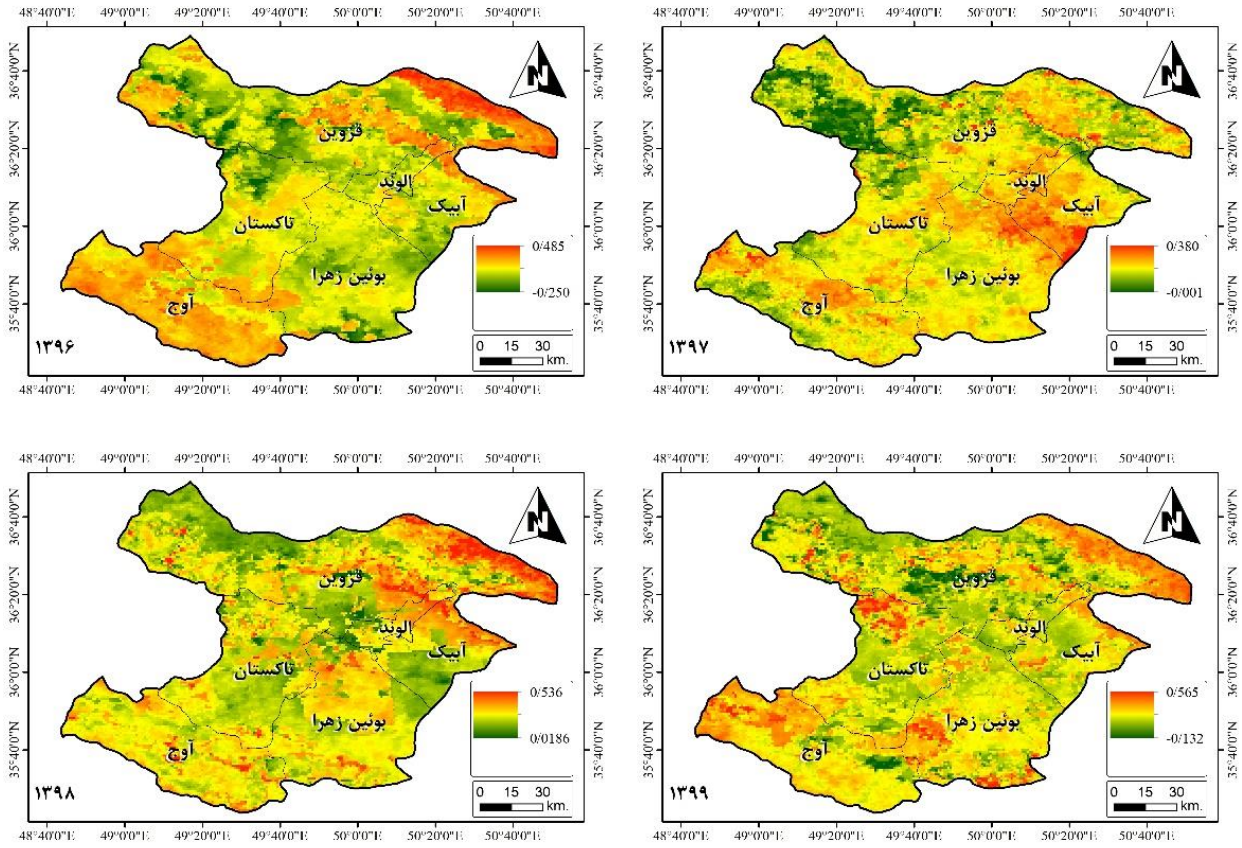
نتایج پایش جزیره حرارتی با استفاده از شاخص تغییرات HI شاخص تغییرات HI برای استان قزوین در طول دوره آماری مورد بررسی ۶ ساله (شکل ۱۲) بیانگر آن است که

جدول ۸. تغییرات میانگین مقادیر شاخص تغییرات HI برای دوره مطالعه ۶ ساله استان قزوین، به تفکیک شهرستان

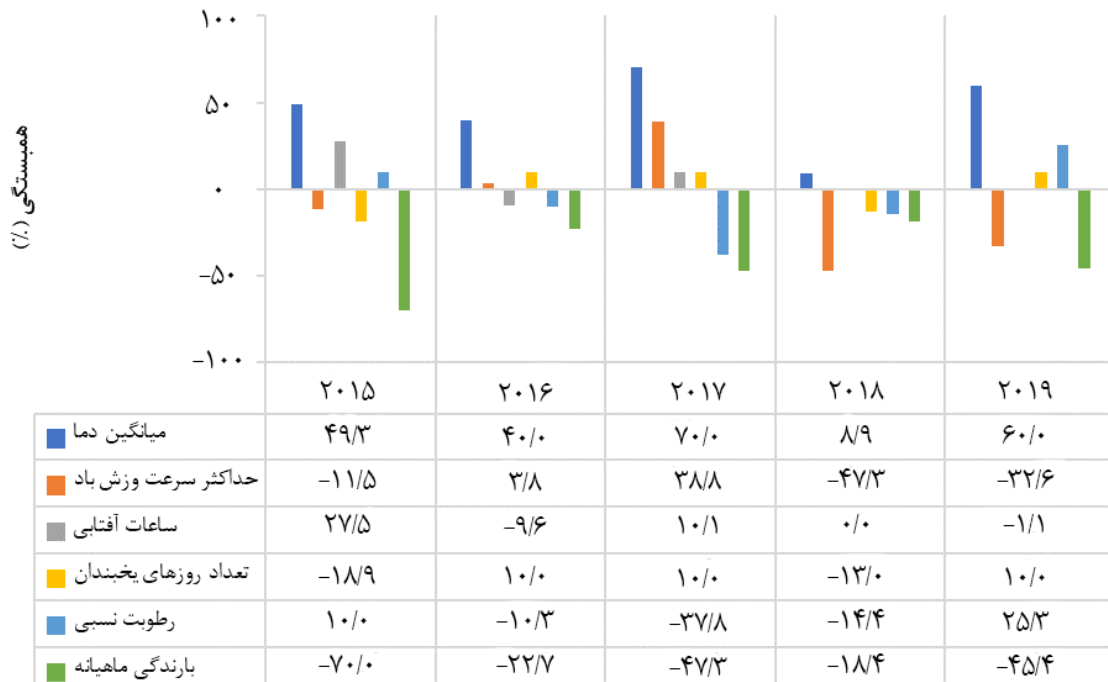
شهرستان / سال	۱۳۹۶	۱۳۹۷	۱۳۹۸	۱۳۹۹
آبیک	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲
آوج	۰/۳	۰/۲	۰/۳	۰/۲
الوند	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲
بوئین‌زهرا	۰/۱	۰/۲	۰/۲	۰/۲
تاکستان	۰/۱	۰/۲	۰/۲	۰/۲
قزوین	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲



شکل ۱۲. تغییرات جزیره حرارتی (HI) در طی دوره آماری ۶ ساله ۱۳۹۴-۱۳۹۹ استان قزوین



ادامه شکل ۱۲. تغییرات جزیره حرارتی (HI) در طی دوره آماری ۶ ساله ۱۳۹۴-۱۳۹۹ استان قزوین



شکل ۱۳. همبستگی بین مقادیر شاخص تغییرات HI و سایر معیارهای اقلیمی برای استان قزوین در سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۸ (همبستگی بالای ۵۰٪ در سطح ۹۵٪ معنادار است)

■ بحث و نتیجه‌گیری

بر پایه نتایج پژوهش حاضر، غلظت گردوغبار معلق در جو استان قزوین، از سال ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۶ در تمامی شهرستان‌ها بجز تاکستان، به میزان ۰/۱ مقدار AOD افزایشی بوده و در تاکستان این مقدار ۰/۲ بوده است. با توجه به اینکه در این سه سال میانگین بیشینه سرعت وزش باد با 21m/s و 22m/s و 21m/s از همه شهرستان‌های دیگر بیشتر بوده است، این افزایش احتمالاً با توجه به این دلیل، منطقی به نظر می‌رسد. چنانکه در دو سال ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶ نیز با میانگین سرعت باد یکسان، در تمام شهرستان بجز تاکستان، میانگین غلظت گردوغبار معلق در جو یکسان بوده است. ارتباط بین وزش باد و تغییرات غلظت گردوغبار در پژوهش‌های پیشین نیز به اثبات رسیده است (۴۱). در روندی مشابه، در تمامی شهرستان‌ها در سال ۱۳۹۷ برای بقیه شهرستان‌ها به اندازه ۰/۱ کاهش میانگین میزان غلظت گردوغبار معلق در جو مشاهده می‌شود که این کاهش در شهرستان تاکستان ۰/۲ بوده است. با توجه به پژوهش‌های پیشین که ارتباط بین رطوبت موجود و گردوغبار را به اثبات رسانده‌اند (۲۰، ۴۱، ۵۲)، این می‌تواند مرتبط با افزایش بارندگی و رطوبت نسبی در تمام شهرستان‌ها نسبت به سال‌های پیش باشد. چراکه میانگین بارندگی ماهانه و رطوبت نسبی در سال ۱۳۹۷ به ترتیب در شهرستان آبیک $10/4\%$ و $4/1\%$ ، در شهرستان آوج $7/74\%$ و $12/7\%$ ، در شهرستان الوند $5/58\%$ و $9/1\%$ ، در شهرستان تاکستان $6/27\%$ و $5/7\%$ و در شهرستان قزوین $7/21\%$ و $1/9\%$ افزایش را نسبت به دوره‌های قبل ثبت کرده است که با نتایج پژوهش‌های پیشین (۲۰، ۴۱، ۵۲) نیز مطابقت دارد. سال ۱۳۹۷، در تمام شهرستان‌ها کاهش HI و افزایش EVI نیز مشاهده شده است که با توجه به همبستگی مثبت HI و همبستگی منفی EVI با گردوغبار معلق در جو، این دو عامل نیز می‌توانند در کاهش غلظت گردوغبار معلق در جو در همین سال قزوین، تا حد زیادی اثرگذار بوده باشند. از آنجا که شاخص AOD بیانگر گردوغبار معلق در جو، فارغ از مسیر و منشأ بوده و وابسته به منابع انتشار سطح زمین است (۱، ۵، ۱۵، ۴۸)، مطالعه ارتباط با پوشش گیاهی در لحظه با تغییرات AOD نیز امکان‌پذیر است که

نتایج پژوهش‌هایی که پیشتر در همین رابطه انجام شده نیز اثباتی بر همین مدعاست (۳، ۴، ۳۴، ۳۶). همچنین همبستگی منفی و اثرگذاری بین شاخص EVI و گردوغبار معلق در جو نیز در پژوهش‌هایی که بیشتر با همین هدف انجام شده تایید شد است (۴۵، ۴۶). رابطه معکوس بین HI و پوشش گیاهی نیز در پژوهش‌های گوناگونی به اثبات رسیده است (۲۵، ۲۶، ۴۰، ۴۲). در سال ۱۳۹۷ همچنین بیشینه سرعت باد در شهرستان‌های آبیک، $36/6\%$ ، آوج $1/10\%$ ، بوئین‌زهر $5/2\%$ ، تاکستان و قزوین $1/9\%$ کاهش داشته و نیز ساعات آفتابی در این شهرستان‌ها برای آوج، $8/16\%$ ، بوئین‌زهر $5/1\%$ ، تاکستان، $6/3\%$ و قزوین $5/9\%$ کاهش یافته است که از آنجا که سرعت باد و ساعات آفتابی دو عامل مهم و اثرگذار بر تغییرات AOD می‌باشند (۲۱)، این دو معیار نیز در روند کاهشی غلظت گردوغبار معلق در جو در این استان دخیل بوده‌اند. برای شهرستان الوند، اطلاعات سرعت باد و برای شهرستان‌های آبیک و الوند اطلاعات تعداد روزهای آفتابی برای سال ۱۳۹۷ در دسترس نبود، اما با توجه به روند کاهشی غلظت گردوغبار معلق در جو در سال ۱۳۹۷ برای هر دو این شهرستان‌ها، برای شهرستان الوند کاهش بیشینه سرعت باد و برای هر دو شهرستان نیز کاهش ساعات آفتابی به‌ویژه در فصل تابستان که ساعت‌های آفتابی تأثیر بیشتری بر گردوغبار منطقه مورد مطالعه دارند (۲۹) را می‌توان حدس زد. تعداد روزهای یخبندان نیز برای تمام شهرستان‌ها از جمله آبیک با 24% ، آوج با $1/3\%$ ، الوند با $11/3\%$ ، بوئین‌زهر با $21/7\%$ ، تاکستان با 9% و قزوین با $17/3\%$ کاهش یافته است که خود می‌تواند دیگر عامل کاهش گردوغبار معلق در جو بوده و نشانگر افزایش این میزان در روزهای سرد و یخبندان است. رابطه مثبت گردوغبار معلق در جو و روزهای یخبندان نیز در پژوهش‌های پیشین تایید شده است (۵۰). در سال ۱۳۹۷ همچنین میانگین دمای شهرستان‌ها نسبت به دوره قبل نیز همواره کاهشی بوده است که با توجه به همبستگی بالای گردوغبار معلق در جو با میانگین دمای هوا (۲۱)، این عامل نیز در کنار دیگر عامل‌ها، بر کاهش گردوغبار معلق در جو در سال ۱۳۹۷ اثرگذار بوده است. ارتباط مثبت بین دمای هوا و گردوغبار نیز با نتایج

سال‌های ۲۰۲۲ (نزدیک‌ترین دوره پیش‌بینی) و ۱۴۰۹ (آخرین دوره پیش‌بینی شده) حاکی از افزایش در طبقه پرخطر یعنی مقادیر ۰/۶ تا ۱ این مقدار به ترتیب به میزان ۸٪ و ۲۵٪ و کاهش در طبقه کم‌خطر یعنی مقادیر صفر تا ۰/۵ به میزان ۱۱٪ و ۳۴٪ نسبت به سال ۱۳۹۹ می‌باشد. طبقه پرخطر برای سال‌های ۱۴۰۳، ۱۴۰۵ و ۱۴۰۷ نیز با به‌ترتیب ۱۲٪، ۱۷٪ و ۲۱٪ افزایش پیش‌بینی شده است. در حالیکه طبقه کم‌خطر برای همین سال‌ها نسبت به ۱۳۹۹ با به‌ترتیب ۱۶٪، ۲۲٪ و ۲۸٪ کاهش پیش‌بینی شده است که بیانگر وضعیت هشدار دهنده در آینده این استان است. نتایج پژوهش حاضر، بیانگر اثرگذاری متغیرهای اقلیمی همچون بارندگی و رطوبت نسبی، سرعت باد، تعداد روزهای یخبندان، دما، پوشش گیاهی، تغییرات جزیره حرارتی و ساعات آفتابی بر افزایش یا کاهش غلظت گردوغبار معلق در جو بود. پژوهش حاضر نشان داد بارندگی، رطوبت نسبی و پوشش گیاهی با گردوغبار معلق در جو رابطه منفی و سرعت باد، تعداد روزهای یخبندان، دما، تغییرات جزیره حرارتی و ساعات آفتابی با آن رابطه مثبت دارد. همچنین تغییرات غلظت گردوغبار معلق در جو را در دو طبقه پرخطر و کم‌خطر مورد بررسی قرار گرفته و بر اساس آن، این دو طبقه تا سال ۱۴۰۹ پیش‌بینی شد که نتایج حاکی از افزایش طبقه پرخطر برای این استان بود. نتایج پژوهش حاضر به تصمیم‌گیران و برنامه‌ریزان کمک می‌کند تا با مدیریت میزان پوشش گیاهی و برنامه‌ریزی صحیح در جهت کاهش جزایر حرارتی شهرها و همچنین برنامه‌های اقلیمی مدیریت بارش و رطوبت سطح شهرها به کاهش آلودگی‌های ناشی از گردوغبار در شهرها کمک کنند.

پژوهش‌های مشابه همخوانی دارد (۳۳). در سال ۱۳۹۸، شهرستان‌های آبیک، تاکستان و قزوین به میزان ۰/۱ افزایش در شاخص غلظت گردوغبار معلق در جو را تجربه کرده و این مقدار در سال ۱۳۹۹ برای هر سه این شهرستان‌ها بدون تغییر مانده است. این در حالیست که گرچه شهرستان‌های آوج، الوند و بوئین‌زهرها نیز در سال ۱۳۹۸ همین میزان افزایش را تجربه کرده‌اند، اما در سال ۱۳۹۹ مجدداً به میزان ۰/۱ کاهش این شاخص را نشان می‌دهند. با توجه به ارتباط نزدیک جزیره حرارتی و مقادیر AOD (۵۲)، افزایش میزان گردوغبار معلق در جو در سال ۱۳۹۸ می‌تواند به دلیل افزایش میزان HI در این سال باشد، چنانکه ضمن ثابت بودن میزان EVI در اکثر سال‌ها، میزان تغییرات HI در این سال نسبت به دوره قبل برای شهرستان‌های آوج با ۱۳/۲٪، الوند با ۷/۱٪، بوئین‌زهرها با ۱۰/۱٪، تاکستان با ۹/۹٪ و قزوین با ۲۳/۱٪ اختلاف، مثبت بوده است. این در حالیست که در سه شهرستان آوج، الوند و بوئین‌زهرها برای سال ۱۳۹۹، تغییرات HI با به ترتیب ۸٪/۲، ۱۱/۶٪ منفی بوده و کاهش گردوغبار معلق در جو برای این شهرستان‌ها در این سال را توجیه می‌کند. ارتباط بین گردوغبار، حرارت (۲۱) و جزیره حرارتی (۱۹)، بیشتر در پژوهش‌هایی که پیشتر انجام شده نیز به اثبات رسیده است. در سال ۱۳۹۸ همچنین شهرستان‌های استان قزوین از جمله آبیک، آوج، الوند، بوئین‌زهرها، تاکستان و قزوین با به‌ترتیب ۵۸/۳، ۱۰/۳٪، ۱۷/۳٪، ۳۰/۴٪، ۳۰/۳٪ و ۲۵/۴٪ افزایش در تعداد روزهای یخبندان همراه بوده‌اند که این خود می‌تواند عامل مهم دیگری در افزایش گردوغبار معلق در جو این سال باشد. پیش‌بینی طبقه‌های پر خطر و کم خطر غلظت گردوغبار معلق در جو برای

References

- Ackerman, T.P., Braverman, A.J., Diner, D.J., Anderson, T.L., Kahn, R.A., Martonchik, J.V., Penner, J.E., Rasch, P.J., Wielicki, B.A., & Yu, B. (2004). Integrating and interpreting aerosol observations and models within the PARAGON framework. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(10), 1523-1534.
- Alipour, N., Mesbahzadeh, T., Ahmadi, H., Malekian, A., & Jafari, M. (2018). Synoptic analysis of dust events and its relation with drought in Alborz and Qazvin provinces. *Geography & Regional Planning*, 8(2), 59-68. (in Farsi)

3. Berwal, S. (2018). Urban heat island formation with respect to aerosol load and land-cover variations over Delhi-NCR. in *AGU Fall Meeting Abstracts*.
4. Chi, Y., Zuo, S., Ren, Y., & Chen, K. (2019). The spatiotemporal pattern of the aerosol optical depth (AOD) on the canopies of various forest types in the exurban national park: a case in ningbo city, eastern China. *Advances in Meteorology*, 2019, 1-15.
5. Chu, D., Kaufman, Y., Ichoku, C., Remer, L., Tanré, D., & Holben, B. (2002). Validation of MODIS aerosol optical depth retrieval over land. *Geophysical research letters*, 29(12), MOD2-1-MOD2-4.
6. CustomWeather. (2022). *Climate & weather averages in Qazvin, Iran. Annual weather averages near Qazvin*. Retrieved from 08 Mar 2022, from <https://www.timeanddate.com/weather/iran/qazvin/climate>
7. Dastjerdi, J.K., Mousavi, S., & Kashki, A. (2012). Synoptic analysis of Ilam dust storms (1987-2005). *Geography and Environmental Planning*, 23(2), 15-34. (in Farsi)
8. Dev, S., AlSkaif, T., Hossari, M., Godina, R., Louwen, A., & Van Sark, W. (2018). Solar irradiance forecasting using triple exponential smoothing. *International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*. IEEE.
9. Didan, K. (2018). *MOD13Q1 v006*. Retrieved from 25 Jan 2022, from <https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13q1v006/>
10. Farmer, A.M. (1993). The effects of dust on vegetation-a review. *Environmental Pollution*, 79(1), 63-75.
11. Gardner Jr, E.S. (1985). Exponential smoothing: The state of the art. *Forecasting*, 4(1), 1-28.
12. Gavrouzou, M., Hatzianastassiou, N., Gkikas, A., Korras-Carraca, M.-B., & Mihalopoulos, N. (2021). A global climatology of dust aerosols based on satellite data: spatial, seasonal and inter-annual patterns over the period 2005–2019. *Remote Sensing*, 13(3), 359.
13. Goudie, A.S. (2009). Dust storms: Recent developments. *Environmental Management*, 90(1), 89-94.
14. Heald, C., Ridley, D., Kroll, J., Barrett, S., Cady-Pereira, K., Alvarado, M., & Holmes, C. (2014). Contrasting the direct radiative effect and direct radiative forcing of aerosols. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(11), 5513-5527.
15. Hu, Z. (2009). Spatial analysis of MODIS aerosol optical depth, PM_{2.5}, and chronic coronary heart disease. *Health Geographics*, 8(1), 27.
16. Indriani, R., Sugandha, A., Tripena, A., Larasati, N., Rokhman, A.F., & Bon, A.T. (2020). Forecasting of air temperature in Cilacap Regency with triple exponential smoothing (holt-winter) method, *5th NA International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Detroit, Michigan, USA*. August 2020. IEOM.
17. Jennings, S., (1994). *Atmospheric trace gases and aerosols*, in *Remote Sensing and Global Climate Change*. Springer. p. 223-252.
18. Kalekar, P.S. (2004). Time series forecasting using holt-winters exponential smoothing. *Kanwal Rekhi school of information Technology*, 4329008(13), 1-13.

19. Li, H., Meier, F., Lee, X., Chakraborty, T., Liu, J., Schaap, M., & Sodoudi, S. (2018). Interaction between urban heat island and urban pollution island during summer in Berlin. *Science of the Total Environment*, 636, 818-828.
20. Li, J., Ge, X., He, Q., & Abbas, A. (2021). Aerosol optical depth (AOD): spatial and temporal variations and association with meteorological covariates in Taklimakan desert, China. *PeerJ*, 9, e10542 .
21. Li, J., He, Q., Ge, X., Abbas ,A., & Jin, L. (2021). Spatio-temporal changes of AOD in Xinjiang of China from 2000 to 2019: Which factor is more influential, natural factor or human factor? *Plos One*, 16(8), e0253942.
22. Lin, W., Yu, X., Xu, D., Sun, T., & Sun, Y. (2021). Effect of Dust Deposition on Chlorophyll Concentration Estimation in Urban Plants from Reflectance and Vegetation Indexes. *Remote Sensing*, 13(18), 3570.
23. Lyapustin, A. *MCD19A2 v006*. Retrieved from 25 Jan 2022, from <https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd19a2v006/>
24. Mahmoodi Mahpash, N. & Souri, B. (2021). Comparison of concentration and trend of dust particles in relation to climatic variables in the western half of Iran. *Human & Environment*, 19(3), 17-29. (in Farsi)
25. Mansourmoghaddam, M., Rousta, I., Zamani, M.S., Mokhtari, M.H., Karimi Firoozjaei, M., & Alavipanah, S.K. (2022). Study and prediction of land surface temperature changes of Yazd city: assessing the proximity and changes of land cover. *RS and GIS for Natural Resources*, 12(4), 1-5. (in Farsi)
26. Mansourmoghaddam, M., Rousta, I., Zamani, M.S., Mokhtari, M.H., Karimi Firoozjaei, M., & Alavipanah, S.K. (2022). Investigating and modeling the effect of the composition and arrangement of the landscapes of Yazd city on the land surface temperature using machine learning and Landsat-8 and Sentinel-2 data. *Remote Sensing & GIS*. (in Farsi)
27. Masatoshi, Y. (2002). Climatology of yellow sand (Asian sand, Asian dust or Kosa) in East Asia. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 45(1), 59-70.
28. Meisam Malmir. (2020). *Abyek, misses a clean air*. Retrieved from 25 Jan 2022, from <https://irna.ir/xjxdfH> (in Farsi)
29. Mesbahzadeh, t., alipour, n., ahmadi, h., malekian, a., & jafari, m. (2018). Time evaluating of dust phenomenon in Alborz and Qazvin provinces. *Environmental Studies*, 44(2), 309-320. (in Farsi)
30. Mirakbari, M. & Ebrahimi Khusfi, Z. (2020). Investigation of spatial and temporal changes in atmospheric aerosol using aerosol optical depth in southeastern Iran. *Rs and Gis for Natural Resources (Applied Rs and Gis Techniques in Natural Resource Science)*, 11(3), 17-18. (in Farsi)
31. Momeni, S. (2018). *An overview of the causes, effects and methods of dealing with fine dust* .Retrieved from 25 Jan 2022, from tabnak.ir/003MQu (in Farsi)
32. Mutanga, O. & Kumar, L., *Google earth engine applications*. 2019, Multidisciplinary Digital Publishing Institute. p. 591.
33. Noguchi, K., Ueda, M., & Hayashi, H. (2019). Zonal correlation among dust ,water ice clouds and temperature in the martian atmosphere observed by MRO-MCS. *LPI Contributions*, 2089, 6135.

34. Pandey, A.K., Singh, S., Berwal, S., Kumar, D., Pandey, P., Prakash, A., Lodhi, N., Maithani, S., Jain, V.K., & Kumar, K. (2014). Spatio-temporal variations of urban heat island over Delhi. *Urban Climate*, 10, 119-133.
35. Pettorelli, N., Vik, J.O., Mysterud, A., Gaillard, J.-M., Tucker, C.J., & Stenseth, N.C. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*, 20(9), 503-510.
36. Pourhashemi, S., Boroghani, M., Zangane Asadi, M.A., & Amir Ahmadi, A. (2015). Analysis relation of vegetation cover on the number of dust event in Khorasan Razavi using geographic information system and remote sensing. *RS and GIS for Natural Resources*, 6(4), 33-45. (in Farsi)
37. Qazvin Municipality, (2019). *Qazvin province strategic planning document*. (in Farsi)
38. Ramanathan, V., Crutzen, P.J., Kiehl, J., & Rosenfeld, D. (2001). Aerosols, climate, and the hydrological cycle. *Science*, 294(5549), 2119-2124.
39. Rousta, I., Olafsson, H., Zhang, H., Moniruzzaman, M., Krzyszcak, J., & Baranowski, P. Anthropogenic factors affecting the vegetation dynamics in the arid Middle East. Preprints 2020, 2020100208.
40. Rousta, I., Sarif, M.O., Gupta, R.D., Olafsson, H., Ranagalage, M., Murayama, Y., Zhang, H., & Mushore, T.D. (2018). Spatiotemporal analysis of land use/land cover and its effects on surface urban heat island using Landsat data: A case study of Metropolitan City Tehran (1988–2018). *Sustainability*, 10(12), 4433.
41. Shaheen, A., Wu, R., Lelieveld, J., Yousefi, R., & Aldabash, M. (2021). Winter AOD trend changes over the Eastern Mediterranean and Middle East region. *Climatology*, 41(12), 5516-5535.
42. Soltani, M., Laux, P., Kunstmann, H., Stan, K., Sohrabi, M., Molanejad, M., Sabziparvar, A., SaadatAbadi, A.R., Ranjbar, F., & Rousta, I. (2016). Assessment of climate variations in temperature and precipitation extreme events over Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 126(3), 775-795.
43. Statistical Center of Iran. (2015-2019). *Statistical Yearbook of Qazvin Province*.
44. Taghavi, F., Oulad, E., Safarrad, T., & Irannejad, P. (2013). Identifying and monitoring dust storm in the western part of Iran using remote sensing techniques. *Earth and Space Physics*, 39(3), 83-96. (in Farsi)
45. Tariq, S., Nawaz, H., Ul-Haq, Z., & Mehmood, U. (2021). Investigating the relationship of aerosols with enhanced vegetation index and meteorological parameters over Pakistan. *Atmospheric Pollution Research*, 12(6), 101080.
46. Tariq, S., Qayyum, F., Ul-Haq, Z., & Mehmood, U. (2022). Long-term spatiotemporal trends in aerosol optical depth and its relationship with enhanced vegetation index and meteorological parameters over South Asia. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-18.
47. Tasnim. (2020). *Crisis management alert; The air in Qazvin will be heavily polluted in the next 5 days*. Retrieved from 25 Jan 2022, from <https://tn.ai/2418687> (in Farsi)
48. Van Donkelaar, A., Martin, R.V., & Park, R.J. (2006). Estimating ground-level PM2.5 using aerosol optical depth determined from satellite remote sensing. *Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D21).
49. Wan, Z. *MOD11A2 v006*. Retrieved from 25 Jan 2022, from <https://lpdaac.usgs.gov/products/mod11a2v006/>

50. Wang, N., Yao, T., Thompson, L., & Davis, M. (2006). Strong negative correlation between dust event frequency and air temperature over the northern Tibetan Plateau reflected by the Malan ice-core record. *Annals of Glaciology*, 43, 29-33.
51. Zhang, P., Lu, N.-m., Hu, X.-q., & Dong, C.-h. (2006). Identification and physical retrieval of dust storm using three MODIS thermal IR channels. *Global and Planetary Change*, 52(1-4), 197-206.
52. Zhou, J., Chen, Y., Wang, J., & Zhan, W. (2010). Maximum nighttime urban heat island (UHI) intensity simulation by integrating remotely sensed data and meteorological observations. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 4(1), 138-146.