

Spatial analysis of the relationship between aerosols and precipitation in Iran

Delbasteh, S.¹ | Mirmousavi, S.H.²  | Raispour, K.³  | Khosravi, Y.²

1. PhD student of Climatology, Zanjan University, Iran.
2. Associate Professor, Faculty member of Zanjan University, Iran.
3. Assistant Professor, Faculty member of Zanjan University, Iran.

Corresponding Author E-mail: hossein.mirmousavi@znu.ac.ir

(Received: 14 May 2024, Revised: 02 Oct 2024, Accepted: 22 Oct 2024, Published online: 09 Apr 2025)

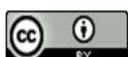
Abstract

Airborne particles have a significant effect on the characteristics of precipitation and directly affect the climate of the region and human life. Aerosols, which play an essential role in cloud formation and radiation balance regulation, can affect the intensity, frequency, geographical distribution, extent, and timing of precipitation. However, due to variations in aerosol properties, different types of precipitation, vertical distribution of aerosols, and meteorological conditions, discrepancies are observed among the results of current studies. Scientific advances in recent research have produced significant developments, but understanding the effects of aerosols on precipitation remains challenging and complex. In this research, the AOD index and geographically weighted regression model have been used to investigate the relationship and possible impact of aerosols on precipitation in Iran. For this purpose, the daily data of the Modis Mod08 product and the daily rainfall data during the statistical period of 2000-2022 were used. Also, to reveal the type of aerosols affecting precipitation, daily data of the MERRA-2 model and multivariate regression method model were used. The results showed that considering all three cases, i.e. the relationship between AOD index values with precipitation on the same rainy day, AOD index values one day before precipitation with precipitation the next day, and AOD index values two days before precipitation with precipitation on the given day. Opinion, there is a correlation between these two variables in all three situations at a minimum of 0.3 to a maximum of 55.7. The results of analyzing the spatial distribution of significant pixels showed that this distribution has a special pattern in such a way that most of these pixels are located in the three regions of the southeast (Kerman, Sistan and Baluchistan, and Hormozgan provinces), the western region (Kurdistan province, Hamadan and Lorestan) and the northeast region (Khorasan, Semnan and the eastern part of Mazandaran) are concentrated. In the investigation of the types of aerosols effective in precipitation, it was found that the most effective types of aerosols in precipitation in these areas were dust particles with diameters of PM10 and PM2.5. Also, comparing the amount of precipitation with the AOD index on a rainy day shows that on the days when the index value is high (values close to 1 and more), the amount of precipitation that occurred in one day has increased significantly. In other words, with the increase in the density of aerosols, more intense rains have occurred.

Keywords: AOD index, spatial analysis, precipitation, aerosol, Iran

Cite this article: Delbasteh, S. , Mirmousavi, S. H. , Raispour, K. and Khosravi, Y. (2025). Spatial analysis of the relationship between aerosols and precipitation in Iran. Journal of the Nivar, 49(128-129), 46-67. DOI: <https://doi.org/10.30467/nivar.2024.457519.1291>

E-mail: (1) somayehdelbaste@gmail.com (2) khosravi@znu.ac.ir (3) Raispour@znu.ac.ir



تحلیل فضایی رابطه آئروسول ها با بارش در ایران

سمیه دلبنسته^۱ | سیدحسین میرموسوی^۲ | کوهزاد رییس پور^۳ | یونس خسروی^۲

۱. دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، دانشگاه زنجان، ایران.

۲. دانشیار، عضو هیات علمی دانشگاه زنجان، ایران.

۳. استادیار، عضو هیات علمی دانشگاه زنجان، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: hossein.mirmousavi@znu.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۲۵، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۱۱، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۰۱، انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۰۱/۲۰)

چکیده

ذرات معلق در هوا تأثیر چشمگیری بر ویژگی‌های بارش دارند و به‌طور مستقیم بر آب و هوای منطقه و زندگی انسان‌ها اثر می‌گذارند. آئروسول‌ها که نقش اساسی در تشکیل ابر و تنظیم تعادل تابشی دارند، می‌توانند شدت، فراوانی، توزیع جغرافیایی، وسعت و زمان بارش را تحت تأثیر قرار دهند. با این حال، به دلیل تنوع در ویژگی‌های آئروسول‌ها، انواع مختلف بارش، توزیع عمودی ذرات معلق و شرایط هواشناسی، اختلافاتی میان نتایج مطالعات کنونی مشاهده می‌شود. پیشرفت‌های علمی در تحقیقات اخیر تحولات چشمگیری ایجاد کرده است، اما درک اثرات آئروسول‌ها بر بارش همچنان چالش‌برانگیز و پیچیده باقی مانده است. در این پژوهش برای بررسی ارتباط و تأثیر احتمالی آئروسول‌ها بر بارش در ایران از شاخص AOD و مدل رگرسیون موزون جغرافیایی استفاده شده است. برای این منظور از داده‌های روزانه محصول Mod08 مادیس و داده‌های روزانه بارش در طی دوره آماری ۲۰۰۰-۲۰۲۲ استفاده شد. همچنین به منظور آشکارسازی نوع آئروسول‌های تأثیرگذار بر بارش از داده‌های روزانه مدل MERRA-2 و مدل روش رگرسیون چند متغیره استفاده شد. نتایج نشان داد که با در نظر گرفتن هر سه حالت یعنی رابطه بین مقادیر شاخص AOD با بارش در همان روز بارشی، مقادیر شاخص AOD یک روز قبل از بارش با بارش روز بعد و مقادیر شاخص AOD دو روز قبل از بارش با بارش در روز مورد نظر، همبستگی بین این دو متغیر در هر سه حال به میزان حداقل ۰/۳ تا حداکثر ۵۵/۷ وجود دارد. نتایج حاصل از بررسی پراکنش فضایی پیکسل‌های معنی‌دار نشان داد که این پراکنش از الگوی خاصی برخوردار است به نحوی که اکثر این پیکسل‌ها در سه ناحیه جنوب شرق (استان‌های کرمان، سیستان و بلوچستان و هرمزگان)، ناحیه غرب (استان کردستان، همدان و لرستان) و ناحیه شمال شرق (استان‌های خراسان، سمنان و بخش شرقی استان مازندران) متمرکز شده‌اند. در بررسی انواع آئروسول‌های موثر در بارش هم مشخص شد که بیشترین نوع آئروسول‌های موثر در بارش این مناطق ذرات گرد و غبار با قطرهای PM10 و PM2.5 بودند. هم‌چنین مقایسه مقادیر بارش با شاخص AOD در روز بارشی نشان می‌دهد در روزهایی که مقدار شاخص بالا می‌باشد (مقادیر نزدیک به ۱ و بیشتر) مقدار بارش رخ داده در یک روز نیز به میزان قابل توجهی افزایش پیدا نموده است. به عبارت دیگر با افزایش تراکم آئروسول‌ها، بارش‌های شدیدتری رخ داده است.

کلیدواژه‌ها: شاخص AOD، تحلیل فضایی، بارش، آئروسول، ایران

۱. مقدمه

طبیعی مانند گرد و غبار صحرا، نمک دریا، فوران‌های آتشفشانی و سوختن زیست توده و همچنین منابع انسانی از جمله فعالیت‌های صنعتی، حمل و نقل و احتراق سوخت‌های

آئروسول‌ها ذرات کوچک و معلق در جو هستند که می‌توانند بیش از یک هفته در هوا باقی بمانند. این ذرات از منابع

استناد: دلبنسته، سمیه؛ میرموسوی، سیدحسین؛ رییس پور، کوهزاد؛ و خسروی، یونس. (۱۴۰۴). تحلیل فضایی رابطه آئروسول‌ها با بارش در ایران. مجله نیوار، ۴۹ (۱۲۹-۱۲۸)،

DOI: <https://doi.org/10.30467/nivar.2024.457519.1291>

رایانامه: (۱) somayehdelbaste@gmail.com (۲) khosravi@znu.ac.ir (۳) Raispour@znu.ac.ir

ناشر: سازمان هواشناسی کشور.



DOI: <https://doi.org/10.30467/nivar.2024.457519.1291>

فسیلی منشاء می گیرند. آئروسول ها به دلیل ویژگی های فیزیکی خود می توانند به صورت عمودی به ارتفاعات بالاتر (۴-۶ کیلومتر) منتقل شوند و قابلیت انتقال در بین قاره ها را دارند (لنوبل و همکاران ۲۰۱۳). ذرات آئروسول نقش مهمی در الگوهای تشکیل ابر و بارش دارند، زیرا غلظت و توزیع اندازه قطرات ابر را تغییر می دهند و بر فرآیندهای میکروفیزیکی و تشعشعی آن تأثیر می گذارند. این به نوبه خود بر تعادل تابشی زمین تأثیر می گذارد و منجر به تغییر در ویژگی های ابر و الگوهای بارش می شود (لی و همکاران ۲۰۱۹). همچنین بخشی از تابش که توسط آئروسول ها به فضا منعکس نشده، عمدتاً توسط هواویزهای کربنی جذب شده و سبب گرم شدن هوا در بالای سطح زمین می شود که این امر سبب تثبیت جو در پایین شده و تولید ابرهای همرفتی و بارش را سرکوب می کند (روزنفلد و همکاران ۲۰۰۸ و هوانگ و همکاران ۲۰۰۹). در حقیقت سرکوب بارندگی توسط آئروسول ها بیشتر به اثر تابشی آئروسول ها مربوط می شود (لی و همکاران ۲۰۱۹).

در پژوهش های متعددی که در دنیا در راستای ارتباط میان آئروسول ها با بارش انجام شده و با توجه به تنوع در نتایج کار محققان می توان به پیچیدگی نظام حاکم بر این رابطه اشاره نمود. در مطالعات مختلف، پیوندهای متفاوتی از رابطه بین شاخص عمق اپتیکی آئروسول ها (AOD) و بارش نشان داده شده است. نتایج برخی پژوهش ها رابطه مثبت و نتایج برخی دیگر رابطه منفی میان بارش را با شاخص AOD نشان می دهد. از آن جمله روزنفلد (۱۹۹۹) و رامانتان و همکاران (۲۰۰۵) در مطالعات خود نشان دادند که در محیط هایی که غلظت آئروسول ها بالا است احتمال رخداد بارش کم شده است این در حالی است که برخی مطالعات دیگر به این نتیجه رسیده اند که با افزایش غلظت هواویز میزان رخداد بارش نیز افزایش پیدا نموده است (لین و همکاران ۲۰۰۶ و آندریه و همکاران ۲۰۰۷). کورن و همکاران (۲۰۰۸) نیز معتقدند که اگرچه آئروسول ها ممکن است برای افزایش تشکیل ابر، در شاخص AOD های پایین عمل کنند، اما اثر تابشی ذرات معلق در هوا ممکن است بر اثرات میکروفیزیکی در

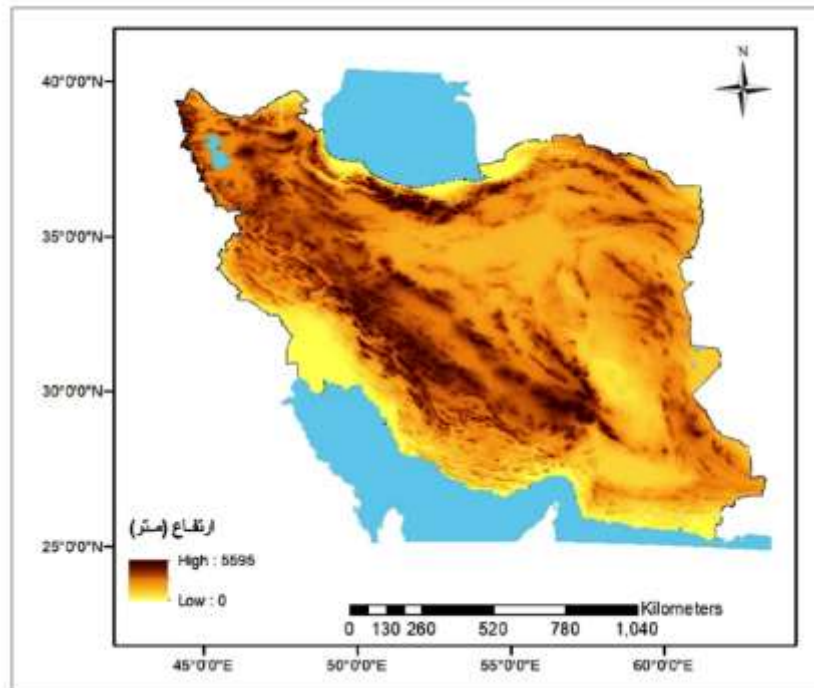
شاخص AOD های بالا غالب شود و تشکیل ابر را سرکوب کند. نتایج برخی از پژوهش ها نیز نشان می دهد که تنها برخی از آئروسول ها با توجه به ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خود می توانند بر بارش اثرگذار باشند. از جمله هواویزهایی که در پژوهش های مختلف به تأثیرات آن بر ابر و بارش اشاره شده است می توان به ذرات گرد و غبار، کربن سیاه، سولفاتها و نمک دریا اشاره نمود (عبدمنافی و همکاران ۲۰۱۵ و گونکالس و همکاران ۲۰۱۵). علاوه بر این گونکالس و همکاران (۲۰۱۵) در پژوهشی به بررسی تأثیر هواویز بیوماس بر بارش در آمازون مرکزی پرداختند به این نتیجه رسیدند که تأثیر آئروسول ها بر سیستم های بارشی بر اساس میزان ناپایداری جوی تعدیل می شود. برای جوهای با ناپایداری کمتر، هرچه غلظت هواویز بیشتر باشد، میزان بارش در منطقه کمتر است. در مقابل برای موارد ناپایدارتر، غلظت بیشتر کربن سیاه با بارش بیشتر، افزایش مقدار یخ و سلولهای بارشی بزرگتر همراه است که این یافته ارتباط با سیستم های طولانی مدت را نشان می دهد. نتایج مطالعات وانگ و همکاران (۲۰۱۶) نیز نشان داد که با افزایش عمق نوری آئروسول ها، در بارش های از نوع همرفتی میزان بارندگی ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد. آنها در مطالعات خود مطرح نمودند که بخش نزولی روند احتمالاً به دلیل اثر تابشی آئروسول ها است. مروری بر پژوهش های انجام شده توسط محققین داخلی نشان می دهد پژوهش های متعددی در زمینه آئروسول ها انجام شده است که از جمله آنها می توان به مطالعات حسینی قهفرخی و همکاران (۱۳۹۰) در زمینه بررسی نقش آئروسول ها در تشکیل ابر و بارش در قسمت های مرکزی و جنوب ایران اشاره نمود. نتایج حاصل از پژوهش آنها نشان دهنده اثر محسوس آئروسول ها در بارش، در ماه ها و سال های پر بارش بوده است. از مطالعات دیگر در زمینه آئروسول ها به مطالعات امیدوار و امیدی (۱۳۹۲) می توان اشاره نمود که به تحلیل پدیده گرد و غبار در جنوب و مرکز استان فارس پرداخته اند و به این نتیجه رسیدند که اکثر روزهای همراه با گرد و غبار در ایستگاه های جنوب و مرکز استان فارس در فصول بهار و تابستان اتفاق می افتد. حاتمی بهمن بیگلو و

دارد. همچنین کاهش بارش در حالت آلوده در مناطق پایین دست جریان باد شبیه سازی شد، که دلیل آن کاهش شعاع بلورهای یخ است که به کاهش فرآیند یخ زدگی و تولید گویچه برف منجر می شود. همچنین بررسی تغییرات ساعتی بارش نشان داد که در ساعت هایی که رطوبت نسبی جو زیاد است و بخار آب به اندازه کافی در جو وجود دارد، افزایش تعداد آتروسل های آب دوست سبب افزایش بارش سطحی می شود در صورتی که ساعت هایی که رطوبت نسبی جو کم است، کاهش بارش و گاهی توقف کامل بارش وجود دارد. بررسی پژوهش های انجام شده نشان داد که بخش وسیعی از این مطالعات به پراکنش زمانی و مکانی آتروسل ها و کانونهای انتشار آنها پرداخته اند و توجه کمی به تاثیر گذاری این پدیده بر پارامترهای جوی نظیر بارش شده است. مطالعات محدودی هم که در این زمینه وجود دارد عمدتاً در بخش های کوچکی از ایران انجام شده است و نتایج آنها امکان تعمیم به کل پهنه ایران را فراهم نمی کند. بنابراین در پژوهش حاضر سعی بر آن شده است تا با استفاده از داده های ایستگاههای هواشناسی و همچنین تصاویر ماهواره های بروز ارتباط بین آتروسل ها با بارش در ایران مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد و بر اساس نتایج حاصل الگوهای حاکم بر روابط بین این دو پدیده شناسایی و معرفی گردد.

۲. روش تحقیق

محدوده مورد مطالعه در پژوهش حاضر کشور ایران است. ایران یکی از کشورهای وسیع جهان است که در محدوده ۲۵ درجه و سه دقیقه الی ۳۹ درجه و ۴۷ دقیقه عرض شمالی و ۴۴ درجه و پنج دقیقه الی ۶۳ درجه و ۱۸ دقیقه طول شرقی واقع شده است. ایران در نیمکره شمالی، نیمکره شرقی در قاره آسیا و در قسمت غربی فلات ایران واقع شده و جزو کشورهای خاور میانه محسوب می شود. مساحت کشور ایران ۱۶۴۸۱۹۵ کیلومتر مربع است (شکل ۱).

همکاران (۱۳۹۳) در پژوهشی به پایش مکانی و زمانی پدیده های آب و هوایی مرتبط با گرد و غبار در شهرهای ایران پرداختند. نتایج مطالعات آنها نشان داد که پدیده ی غبار در نواحی ساحلی خلیج فارس فراوانی سالانه بیشتری نسبت به سایر نقاط دارد و در این مناطق میزان غبار در ساعات قبل از ظهر از فراوانی بیشتری نسبت به بعد از ظهر دارد. رئیس پور و همکاران (۱۳۹۳) به مطالعه اقلیم شناسی سینوپتیکی گرد و غبارهای غرب و جنوب غرب ایران پرداختند. نتایج حاصل از تحلیل آماری این پژوهش بیانگر آن است که رویدادهای گردوغباری، به لحاظ بیشینه فراوانی فصلی در فصول پاییز و زمستان و ماهانه در ماه های فوریه، ژانویه و مارس رخ داده است. همچنین تعداد روزهای گردوغباری از جنوب منطقه ی مورد مطالعه به سمت شمال آن کاهش می یابد. بر اساس نتایج حاصل از این مطالعه استقرار الگوهای سینوپتیکی بر روی بیابانهای غربی همجوار، شرایط دینامیکی لازم را برای تشکیل گردوغبار، افزایش تمرکز گرد و غبار و انتقال آن به غرب جنوب غرب ایران فراهم نموده است. توانگرریزی و همکاران (۱۳۹۴) در مطالعه به بررسی نقش آتروسل ها در فرایند تشکیل ابر و بارش با استفاده از مدل WRF به این نتیجه رسیدند که در قسمت هایی که غلظت ریزگردها افزایش یافته، اختلاف بارش بین سناریو مورد مطالعه مثبت است. بنابراین امکان دارد این ذرات منجر به افزایش بارش شده باشند. علاوه بر این به نظر می رسد در نزدیک ساحل که به مقدار قابل توجهی ریزگرد و ذرات نمک دریا وجود داشت، توده ای با آب دوستی مناسب در جو ایجاد شده و منجر به افزایش بارش و پوشش ابر در این ناحیه شده است. زارعی و همکاران (۱۳۹۶) در پژوهشی به بررسی تاثیر آتروسل ها بر بارش در شرایط رطوبت های نسبی متفاوت پرداختند. نتایج شبیه سازی های حاصل از مدل WRF نشان داد که توزیع مکانی بارش در دو حالت پاک و آلوده متفاوت است. به طوری که در جو آلوده در برخی مناطق فراسنج های شدیدتری وجود دارد که بارش های شدیدتری را نیز در پی



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی و ارتفاعی منطقه مورد مطالعه بر مبنای مدل ارتفاعی رقومی ۹۰ متر srtm (منبع: نگارندگان ۱۴۰۳)

جهت انجام تحلیل های رگرسیونی انتخاب شد. در انتخاب روزها سعی گردید انتخاب به گونه ای باشد که از تمامی ماه های سال باشد چرا که گستردگی منطقه مطالعاتی (ایران) و تنوع نوع بارش و سیستم های جوی موثر در آن بایستی در انتخاب این روزها مد نظر قرار گرفته می شد. پس از بررسی و مشخص شدن روزها در گام بعدی به آشکارسازی نوع آئروسول ها و پراکندگی های زمانی و مکانی آنها پرداخته شد. برای تحقق این هدف در تاریخ های مشخص شده اقدام به دانلود تصاویر مربوط به هواویز های مختلف نظیر کربن سیاه، سولفات، گرد و غبار، دی اکسید سولفور و نمک دریا گردید (جدول ۱).

در پژوهش حاضر به منظور آشکار سازی ارتباط میان دو متغیر شاخص AOD (مستقل) و بارش (وابسته) از داده های روزانه محصول Mod08 سنجنده مادیس و داده های روزانه بارش ماهواره GPM استفاده شده است. برای انتخاب روزهای بارشی سعی گردید تا شرایط وجود شاخص AOD در روز قبل بارش و وجود بارش در روز مورد نظر لحاظ گردد. برای انتخاب روزهایی با بارش فراگیر جهت تعیین روزهای نمونه برای تحلیل رابطه هواویز با بارش از داده های بارش روزانه تعداد ۲۸۵ ایستگاه هواشناسی سینوپتیک در طی دوره آماری بین سالهای ۲۰۰۰-۲۰۲۲ استفاده گردید و روزهای بارشی که در آن مقدار شاخص AOD بالای ۰/۳ بود

جدول ۱: اطلاعات تصاویر مورد استفاده در پژوهش (منبع: نگارندگان ۱۴۰۳)

متغیر	واحدها	منبع	قدرت تفکیک زمانی	قدرت تفکیک مکانی (درجه)	شروع	پایان
Combined Dark Target and Deep Blue AOD at 0.55 micron for Land and Ocean: Mean (MOD08 D3 v6.1)	ضریب	MODIS, Terra	روزانه	۱	۲۰۰۰	۲۰۲۰
Daily accumulated precipitation (combined microwave-IR) estimate-Final Run (GPM-3IMERGDF v060)	میلی متر	GPM	روزانه	۰/۱	۲۰۰۰	۲۰۲۰
Black Carbon Column Mass Density, time average (M2T1NXAER v5.12.04)	کیلوگرم بر مترمربع	MERRA-2	روزانه	۰/۰۵-۰/۶۲۵	۲۰۰۰	۲۰۲۰
SO4 Column Mass Density, (ENSEMBLE), time average (M2T1NXAER v5.12.04)	کیلوگرم بر مترمربع	MERRA-2	روزانه	۰/۰۵-۰/۶۲۵	۲۰۰۰	۲۰۲۰
SO2 Column Mass Density, (ENSEMBLE), time average (M2T1NXAER v5.12.04)	کیلوگرم بر مترمربع	MERRA-2	روزانه	۰/۰۵-۰/۶۲۵	۲۰۰۰	۲۰۲۰
Dust Column Mass Density -PM2.5, time average (M2T1NXAER v5.12.04)	کیلوگرم بر مترمربع	MERRA-2	روزانه	۰/۰۵-۰/۶۲۵	۲۰۰۰	۲۰۲۰
Dust Scattering AOT 550nm -PM1.0 um,), time average (M2T1NXAER v5.12.04)	ضریب	MERRA-2	روزانه	۰/۰۵-۰/۶۲۵	۲۰۰۰	۲۰۲۰
Sea Salt Column Mass Density-PM2.5.time average (M2T1NXAER v5.12.4)	کیلوگرم بر مترمربع	MERRA-2	روزانه	۰/۰۵-۰/۶۲۵	۲۰۰۰	۲۰۲۰

جغرافیایی بر اساس رابطه زیر محاسبه می شود (بحری و همکاران، ۱۳۹۸):

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_k \beta_k(u_i, v_i) x_{ik} + \varepsilon_i \quad (1)$$

در این رابطه y_i متغیر وابسته، x_{ik} متغیر مستقل، (u_i, v_i) طول و عرض جغرافیایی آمین نقطه، $\beta_k(u_i, v_i)$ مقداری تحقق یافته از تابع پیوسته $\beta_k(u, v)$ در نقطه i می باشد. روش رگرسیون موزون جغرافیایی همان روش حداقل مربعات وزنی است با این تفاوت که به مشاهدات بر اساس محل قرارگیری شان نسبت به نقطه i وزن داده می شود. وزن دهی مشاهدات در برآیند تخمین ثابت نیست و با توجه به مکان مشاهده از نقطه i تغییر می کند. برآورد رگرسیون وزن دار جغرافیایی به صورت زیر تعریف می شود:

(۲)

$$\beta(u_i, v_i) = (X^T W(u_i, v_i) X)^{-1} (X^T W(u_i, v_i) y)$$

در این رابطه $\beta(u_i, v_i)$ برداری حاوی برآورد متغیرهای $n \times n$ ماتریسی $w(u_i, v_i)$ است و $\beta_j, j=0, 1, \dots, k$ است که خارج از قطر اصلی آن صفر هستند و عناصر وزن های جغرافیایی n مشاهده برای نقطه مرجع i را نشان می دهند:

در این پژوهش به منظور آشکارسازی ارتباط فضایی بین انواع مختلف آئروسول ها با بارش در نواحی مختلف ایران، در مرحله نخست از مدل رگرسیون موزون جغرافیایی^۱ (GWR) استفاده شد و همبستگی میان شاخص AOD و بارش به صورت تحلیل پیکسلی مورد بررسی قرار گرفت. دلیل استفاده از روش رگرسیون موزون جغرافیایی در این پژوهش این است که مدل های رگرسیونی معمولی یا همان کلی برای متغیر های مستقل و وابسته مکانی تنها میانگینی از داده های غیر فضایی را ارائه می دهند بدین جهت برخی از واقعیت های فضایی پنهان می ماند و در نهایت منجر به نتیجه منطقی و قابل قبولی برای داده های مکانی نخواهد شد در حقیقت ناهمگونی های مکانی که بین برخی عناصر اقلیمی و پدیده ها وجود دارد، باعث می شود که اندازه گیری یا تخمین روابط بین متغیرها از مکانی به مکان دیگر متفاوت باشد که اگر این ناهمگنی در نظر گرفته نشود و از یک مدل رگرسیونی معمولی برای تبیین و توضیح روابط میان متغیر وابسته و مستقل استفاده شود به طور حتم تخمین دقیقی از روابط موجود، بدست نخواهد آمد. مدل رگرسیون موزون جغرافیایی تعمیم یافته ای از مدل های رگرسیون چند متغیره است، به طوری که به مشاهدات نزدیک تر وزن بیشتر و به مشاهدات دورتر وزن کمتری اختصاص داده می شود. مدل رگرسیون موزون

¹ Geographically Weighted Regression

انتخاب نوع هواویز های ذکر شده در جدول ۱ بر مبنی بهره گیری از نتایج پژوهشگران دیگر در این حوضه است که یافته ها حاکی از آن است که برخی آئروسول ها دارای ارتباط معنادار با بارش بوده و بسته به شرایط هر مکان درجه تاثیر گذاری آئروسول ها متفاوت می باشد. برای بررسی درجه تاثیر گذاری هر آئروسول در روزهای نمونه از روش رگرسیون چند متغیره استفاده شد. رگرسیون چند متغیری روشی برای تحلیل حضور دو یا چند متغیر مستقل در تغییرات یک متغیر وابسته به شمار می آید. در این پژوهش از رگرسیون چند متغیره بر اساس رابطه زیر استفاده شده است (عساکره ۱۳۹۰):

$$y = a + \sum_{i=1}^k (b_i x_i + e_i) \quad (10)$$

که در آن y متغیر وابسته، α عرض از مبدا، b_i ضرایب تخمینی برای متغیر مستقل x_{ik} ، k تعداد متغیرهای مستقل و e جزء خطا است.

۳. بحث

بررسی نتایج حاصل از خروجی مدل رگرسیون موزون جغرافیایی برای تحلیل رابطه شاخص AOD با بارش در روز بارشی (حالت اول) نشان می دهد که از مجموع پیکسل های مورد بررسی در این حالت ۵۲/۲ درصد از پیکسل ها نشان دهنده رابطه معنی دار بین بارش و شاخص AOD می باشند. بررسی مقادیر همبستگی بین این دو متغیر نیز نشان می دهد مقادیر همبستگی، حداقل ۰/۳۱ و حداکثر ۰/۵۰ می باشد (جدول ۱). بالا بودن فراوانی مقادیر همبستگی بین ۰/۳ تا ۰/۴ گویای این واقعیت است که بین دو متغیر بارش و آئروسول های موجود در روز بارش از نظر آماری هر چند معنی داری قابل قبولی وجود دارد ولی به اندازه کافی از همبستگی بالایی برخوردار نیست و این موضوع نشان می دهد رابطه بین ذرات معلق در هوا و بارش پیچیده و چند وجهی است و پدیده بارش نه تنها تحت تأثیر خواص فیزیکی و شیمیایی آئروسول ها می باشد بلکه شرایط جوی و محیطی نیز در رخداد آن بسیار موثر است (روزنفلد و همکاران ۲۰۰۱). در این رابطه لی و

$$w(u_i, v_i) = \begin{bmatrix} w_1(u_i, v_i) & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & w_n(u_i, v_i) \end{bmatrix} \quad (3)$$

در ماتریس $w_n(u_i, v_i)$ وزن داده شده به مشاهده n برای تخمین زدن نقطه مرجع i است.

نتایج پژوهش های متعدد نشان می دهد تراکم آئروسول ها در روزهای قبل از بارش می تواند نوع، شدت و الگوی بارش و ابر تاثیرات متفاوتی بگذارد. بنابراین لازم است تا جهت تعیین ارتباط بین آئروسول ها و بارش رابطه بین این دو متغیر در روزهای قبل از رخداد بارش نیز مورد بررسی قرار گیرد (ژانگ و همکاران ۲۰۰۸ و وینجو و همکاران ۲۰۱۴). برای این منظور در این پژوهش سه حالت بصورت زیر در نظر گرفته شد:

۱. رابطه شاخص AOD با بارش در همان روز بارشی
۲. رابطه شاخص AOD یک روز قبل با بارش روز بعد
۳. رابطه شاخص AOD دو روز قبل با بارش دو روز بعد از آن

علت بررسی تاثیرات شاخص AOD در سه حالت مذکور، شناسایی بیشترین تاثیر شاخص AOD بر بارش در واحد زمان بر اساس مطالعه اولیه بر روی داده ها می باشد. خروجی نهایی مدل GWR برای هر یک از ۳ حالت بیان شده در تمام روزهای انتخابی با اعمال شرط اصلی زیر، در جهت یافتن الگو و یا رابطه ای معنادار آماده گردید:

(۵)

$$1) \text{ AOD} \geq 0/3, \text{ Pre} \geq 1\text{mm}, \text{ } 3 < -6,$$

$$2) \text{ Residual} < 6, \text{ } 4 \text{ R2} \geq 0/3$$

در گام بعدی برای تفکیک و مشخص نمودن رابطه های غالب معنادار در حالت های ۳ گانه ذکر شده از ۴ رابطه بصورت زیر استفاده گردید:

$$6) \text{ (Pre} \geq 1\text{mm}, \text{ Aod} \geq 0/4, \text{ } 0/3 \leq \text{R2} < 0/5)$$

$$7) \text{ (Pre} \geq 1\text{mm}, \text{ } 0/3 \leq \text{Aod} < 0/4, \text{ } 0/3 \leq \text{R2} < 0/5)$$

$$8) \text{ (Pre} \geq 1\text{mm}, \text{ Aod} \geq 0/4, \text{ R2} \geq 0/5)$$

$$9) \text{ (Pre} \geq 1\text{mm}, \text{ } 0/3 \leq \text{Aod} < 0/4, \text{ R2} \geq 0/5)$$

در هوا، مانند آلاینده ها و گرد و غبار، می توانند خواص ابر را با افزایش تعداد قطرات در آن تغییر داده و زمینه را برای بارش شدیدتر فراهم نماید (تیگن و همکاران، ۲۰۱۹). علاوه بر این، آتروسل ها می توانند مقدار بخار آب را در جو افزایش دهند و منجر به بارش شدیدتر شوند. افزایش چگالی ذرات معلق در هوا همچنین می تواند الگوهای گردش جوی را تغییر دهند و باعث بارندگی های مکرر و شدیدتر شوند (ساتو و همکاران ۲۰۱۹).

بررسی پراکندگی فضایی رابطه میان بارش و شاخص AOD در روز بارشی برای هر چهار رابطه غالب اول (حالت اول) مورد مطالعه نشان دهنده توزیع هایی متفاوتی برای هر کدام از این رابطه ها می باشد. پراکندگی مکانی رابطه غالب اول در حالت اول که ۵۲٪ از پیکسل ها را شامل می شود نسبت به سایر حالت ها گسترده تر بوده و در بخش های مختلف کشور قابل مشاهده است اما بیشترین تعداد پیکسل های معنی دار در استانهای سیستان و بلوچستان، کرمان و هرمزگان متمرکز شده است (شکل ۲).

همکاران (۲۰۱۹) نیز در مطالعات خود به نتیجه رسیدند که تأثیر ذرات معلق در هوا بر بارش تحت تأثیر عواملی مانند دما، رطوبت، پایداری جو و توپوگرافی است. این عوامل برای تعیین شکل گیری، رشد و توسعه ابرها با هم تعامل دارند که به نوبه خود بر وقوع و توزیع بارش تأثیر می گذارند (جدول ۲).

هم چنین مقایسه مقادیر بارش با شاخص AOD در روز بارشی نشان می دهد در روزهایی که مقدار شاخص بالا می باشد (مقادیر نزدیک به ۱ و بیشتر) مقدار بارش رخ داده در یک روز نیز به میزان قابل توجهی افزایش پیدا نموده است. به عبارت دیگر با افزایش تراکم آتروسل ها، بارش های شدیدتری رخ داده است به عنوان نمونه می توان به بارش های روز دوم آگوست ۲۰۰۴ و روز هفتم ماه می ۲۰۰۷ اشاره نمود. این موضوع می تواند نشان دهد افزایش شدت تراکم آتروسل ها در صورتی که سایر شرایط جوی و محیطی نیز فراهم باشد می تواند مقدار بارش را افزایش دهد. در این رابطه نتایج برخی از مطالعات نشان می دهد که ذرات معلق

جدول ۲: نمونه خروجی مدل رگرسیون موزون جغرافیایی داده های مربوط به رابطه شاخص AOD با بارش در روز بارشی در حالت اول (منبع: نگارندگان ۱۴۰۳)

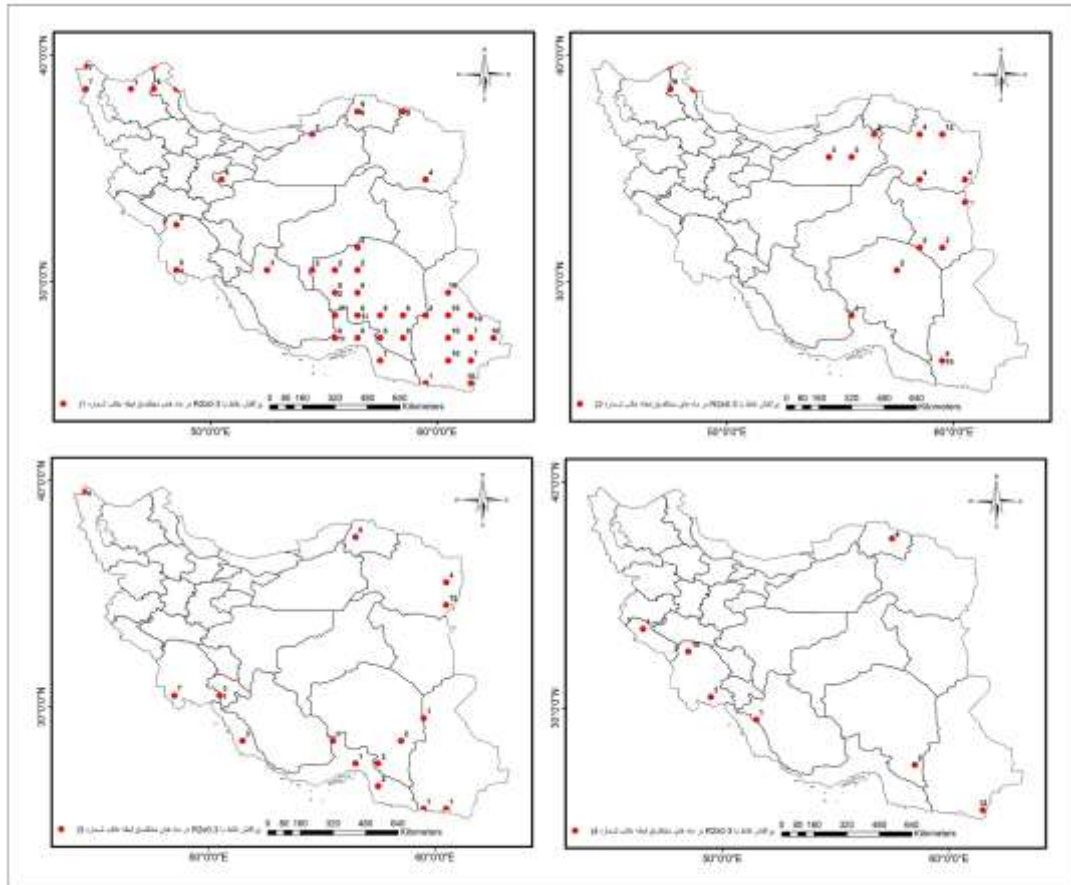
تاریخ	X	Y	بارش	AOD	همبستگی	تاریخ	X	Y	بارش	AOD	همبستگی
۲۰۰۰/۰۹/۱۱	۵۶/۵	۳۷/۵	۴/۶۵	۰/۶۴	۰/۴۵	۲۰۰۹/۰۷/۲۷	۴۴/۵	۳۸/۵	۲/۸۹	۰/۴۲	۰/۳۵
۲۰۰۰/۰۹/۱۱	۵۸/۵	۳۷/۵	۵/۰۵	۰/۵۶	۰/۴۵	۲۰۰۹/۰۷/۲۷	۴۶/۵	۳۸/۵	۱/۸۸	۰/۴۵	۰/۳۵
۲۰۰۱/۰۵/۰۳	۴۸/۵	۳۲/۵	۷/۳۵	۰/۵۷	۰/۳۴	۲۰۰۹/۰۷/۲۷	۶۱/۵	۲۷/۵	۲/۵۷	۰/۴۱	۰/۳۵
۲۰۰۲/۰۶/۲۹	۵۴/۵	۳۷/۵	۴/۵۴	۱/۰۷	۰/۳۷	۲۰۰۹/۰۷/۲۷	۶۱/۵	۲۶/۵	۲/۴۹	۰/۴۲	۰/۳۵
۲۰۰۲/۰۶/۲۹	۵۶/۵	۳۷/۵	۱/۳۱	۰/۴۵	۰/۵۰	۲۰۱۲/۰۲/۲۵	۵۴/۵	۳۶/۵	۳/۷۹	۰/۴۳	۰/۳۶
۲۰۰۴/۰۶/۲۳	۴۷/۵	۳۹/۵	۱/۵۲	۰/۴۹	۰/۴۹	۲۰۱۲/۰۴/۲۰	۴۸/۵	۳۰/۵	۱/۱۶	۰/۴۳	۰/۴۱
۲۰۰۴/۰۶/۲۳	۴۷/۵	۳۸/۵	۶/۵۷	۰/۴۴	۰/۳۹	۲۰۱۲/۰۴/۲۱	۵۹/۵	۳۴/۵	۱۳/۹۶	۰/۴۳	۰/۴۳
۲۰۰۴/۰۸/۰۲	۵۵/۵	۲۹/۵	۱/۲۵	۰/۷۳	۰/۳۸	۲۰۱۳/۰۱/۱۱	۵۷/۵	۲۶/۵	۳/۱۷	۰/۶۹	۰/۳۶
۲۰۰۴/۰۸/۰۲	۵۶/۵	۲۹/۵	۱/۲۸	۰/۷۱	۰/۳۸	۲۰۱۴/۰۹/۲۱	۴۸/۵	۳۸/۵	۱/۴۶	۰/۴۲	۰/۳۸
۲۰۰۴/۰۸/۰۲	۵۶/۵	۲۸/۵	۱۰/۰۸	۰/۷۵	۰/۳۸	۲۰۱۵/۰۱/۱۹	۵۹/۵	۲۵/۵	۳/۸۲	۰/۵۰	۰/۴۴
۲۰۰۴/۰۸/۰۲	۵۷/۵	۲۸/۵	۹/۴۷	۰/۶۴	۰/۳۸	۲۰۱۵/۰۲/۲۱	۵۹/۵	۲۸/۵	۱/۴۰	۰/۷۲	۰/۴۹
۲۰۰۴/۰۸/۰۲	۵۸/۵	۲۸/۵	۱/۴۰	۰/۴۳	۰/۳۸	۲۰۱۵/۱۱/۱۰	۵۵/۵	۲۸/۵	۳/۹۹	۰/۵۳	۰/۳۴
۲۰۰۴/۰۸/۰۲	۵۵/۵	۲۷/۵	۴/۳۱	۱/۲۹	۰/۳۸	۲۰۱۵/۱۱/۱۰	۵۶/۵	۲۸/۵	۵/۳۰	۰/۵۵	۰/۳۳
۲۰۰۴/۰۸/۰۲	۵۶/۵	۲۷/۵	۱۱/۲۱	۱/۰۲	۰/۳۸	۲۰۱۵/۱۱/۱۰	۵۵/۵	۲۷/۵	۵/۵۹	۰/۵۴	۰/۴۰
۲۰۰۴/۰۸/۰۲	۵۷/۵	۲۷/۵	۳/۷۹	۰/۸۰	۰/۳۸	۲۰۱۸/۰۵/۳۱	۴۸/۵	۳۰/۵	۸/۸۹	۱/۲۷	۰/۳۴
۲۰۰۴/۰۸/۰۲	۵۸/۵	۲۷/۵	۴/۵۳	۰/۵۷	۰/۳۸	۲۰۱۸/۰۱/۰۵	۶۰/۵	۲۹/۵	۲/۸۵	۰/۵۹	۰/۳۱
۲۰۰۷/۰۳/۲۵	۵۲/۵	۳۰/۵	۳/۳۲	۰/۵۵	۰/۳۹	۲۰۱۹/۱۰/۰۵	۶۰/۵	۲۸/۵	۱/۶۴	۰/۶۲	۰/۳۱
۲۰۰۷/۰۵/۱۷	۵۰/۵	۳۴/۵	۱۱/۹۷	۱/۱۰	۰/۳۲	۲۰۱۹/۱۰/۰۵	۶۱/۵	۲۸/۵	۹/۳۷	۰/۷۰	۰/۳۱

۲۰۰۹/۰۲/۲۸	۵۶/۵	۳۱/۵	۴/۹۷	۰/۶۳	۰/۴۸	۲۰۱۹/۱۰/۰۵	۶۲/۵	۲۸/۵	۳/۴۶	۰/۵۵	۰/۳۱
۲۰۰۹/۰۲/۲۸	۵۴/۵	۳۰/۵	۶/۸۵	۰/۹۰	۰/۳۳	۲۰۱۹/۱۰/۰۵	۶۰/۵	۲۷/۵	۴/۹۷	۰/۷۸	۰/۳۱
۲۰۰۹/۰۲/۲۸	۵۵/۵	۳۰/۵	۴/۹۴	۰/۷۰	۰/۴۵	۲۰۱۹/۱۰/۰۵	۶۲/۵	۲۷/۵	۵/۹۰	۰/۷۱	۰/۳۱
۲۰۰۹/۰۲/۲۸	۵۶/۵	۳۰/۵	۵/۰۸	۰/۴۹	۰/۴۹	۲۰۱۹/۱۰/۰۵	۶۰/۵	۲۶/۵	۴/۰۹	۰/۶۲	۰/۳۱
۲۰۰۹/۰۲/۲۸	۵۵/۵	۲۹/۵	۵/۳۹	۰/۵۱	۰/۴۶	۲۰۱۹/۱۰/۰۵	۶۱/۵	۲۵/۵	۳/۹۱	۰/۵۷	۰/۳۱

می تواند به دلیل حاکمیت شرایط جوی خاص در این منطقه و همچنین ویژگی های سطح زمین باشد. در این رابطه سینفلد و پانندیس (۲۰۱۶) معتقدند که آئروسول ها به طور قابل توجهی بر شکل گیری ابرها و الگوهای بارش تأثیر می گذارند. به این صورت که به عنوان هسته های تراکم ابرها عمل می کنند و بر خواص میکروفیزیکی ابرها تأثیر می گذارند و به طور بالقوه منجر به تغییر در میزان بارش می شوند. شمال شرق ایران در معرض طوفان های گرد و غبار ناشی از بیابان های منطقه ای مانند کویر قره قوم و منابع گرد و غبار محلی است. از طرف دیگر توپوگرافی پیچیده رشته کوه های البرز و کپه داغ می تواند مسیرهای انتقال گرد و غبار و غلظت آئروسول های محلی را تحت تأثیر قرار دهد و موجب افزایش تعاملات بین آئروسول و بارش شود (دوستان ۱۳۹۷). پراکنندگی مکانی رابطه غالب سوم (حالت اول) با ۱۸/۹٪ پیکسل های معنی دار تراکم مناسبی را در استانهای هرمزگان، نواحی جنوبی استان کرمان و سیستان و بلوچستان در ماه های ژانویه و فوریه نشان می دهد. با مشاهده نقشه مربوط به رابطه غالب چهارم این حالت می توان دریافت که پراکنندگی پیکسل های این رابطه در استانهای ایلام، خوزستان و بوشهر و... مشاهده می شود. فراوانی مقادیر پیکسل های معنی دار در این رابطه نسبتاً کم تر از سایر حالت ها می باشد (۷/۸ درصد).

از لحاظ پراکنش زمانی نیز معنی داری رابطه بین بارش و شاخص AOD در شش ماه سال شامل ماههای جولای، آگوست، نوامبر، دسامبر، ژانویه و فوریه قابل مشاهده است. رابطه بین ذرات معلق در هوا و بارش در جنوب شرق ایران به دلیل ترکیب منحصر به فرد شرایط جوی و ویژگی های سطح زمین در منطقه نسبت به سایر مناطق قوی تر است. در این رابطه نتایج مطالعات حسینی و رستمی (۱۳۹۷) نشان می دهد که غلظت بالای آئروسول ها در جنوب شرق ایران می تواند ناشی از فعالیت سامانه های جوی نظیر کم فشار موسمی در تابستان و پرفشار سبیری در زمستان و همچنین وجود توپوگرافی خاص این منطقه باشد. تراکم بالای ذرات معلق مخصوصاً در زمان هایی که سامانه های جوی کم فشار فعالیت دارند می تواند باعث تاثیرگذاری بر فرایند بارش در این منطقه باشد.

بررسی نتایج حاصل از مدل برای رابطه غالب دوم (حالت اول) نشان دهنده وجود رابطه معنادار در ۲۱/۱٪ پیکسل ها می باشد. از نظر توزیع فضایی این پیکسل های معنی دار عمدتاً در شمال شرق کشور در استانهای خراسان رضوی، جنوبی و سمنان قرار دارند. از نظر زمانی نیز در ماه های فوریه و آوریل این پیکسل ها از بیشترین فراوانی برخوردار می باشند. بالا بودن تعداد پیکسل های معنی دار در زمینه رابطه بین ذرات معلق هوا و بارش در شرق و شمال شرق ایران در حالت اول



شکل ۲: نقشه پراکندگی زمانی و مکانی رابطه میان بارش و شاخص AOD در روز بارشی (حالت اول) برای چهار رابطه غالب مورد مطالعه (منبع: نگارندگان ۱۴۰۳)

۲۰۱۸ با افزایش مقدار شاخص AOD به مقدار ۱ میزان بارش در روز بعد افزایش نسبتاً زیادی در مقایسه با سایر روزها داشته است. در این زمینه نتایج مطالعات زارعی و همکاران (۱۳۹۶) نیز نشان می دهد غلظت بالای آئروسول ها روز قبل موجب افزایش شدت بارش در بخش هایی از منطقه مورد مطالعه خود در نیمه شمالی ایران شده است. آنها معتقدند که در مقادیر بالای ذرات معلق با توقف بارش گرم و چگالش بیشتر بخار آب، گرمای نهان بیشتری آزاد شود که سبب تقویت فراسنج ها شده و شدت بارش را بیشتر می کند. هم چنین نتیجه بررسی حالت اول در این پژوهش با نتایج حاصل از مطالعات وانگ و همکاران (۲۰۲۰) و لیو و همکاران (۲۰۱۹) همسو می باشد.

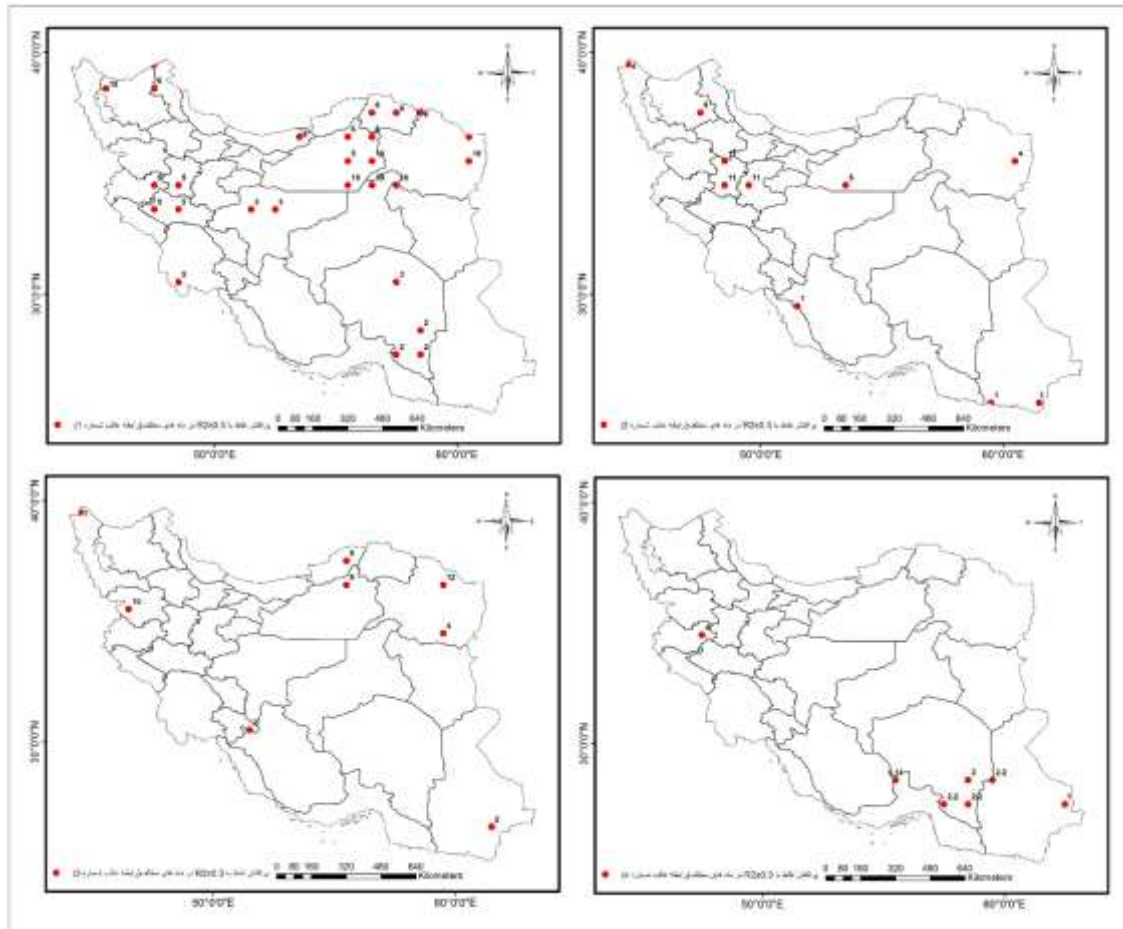
به منظور بررسی رابطه بارش و شاخص AOD یک روز قبل (حالت دوم) تعداد ۶۱۷۳ دیتا پیکسل وارد مدل GWR شد و تحلیل همبستگی فضایی بر روی آنها انجام شد. نتایج حاصل از خروجی مدل نشان داد از مجموع پیکسل های مورد بررسی در این حالت ۵۵/۷ درصد از پیکسل ها نشان دهنده رابطه معنی دار بین بارش و شاخص AOD یک روز قبل از رویدادهای بارندگی می باشد (جدول ۳). بررسی مقادیر همبستگی نشان می دهد بین بارش و شاخص AOD یک روز قبل حداقل ۰/۳۱ و حداکثر ۰/۵ رابطه معنی دار وجود دارد. بررسی مقادیر AOD نیز نشان می دهد در روزهایی که مقدار شاخص از ۰/۸ بیشتر شده است شدت بارش افزایش زیادی را پیدا نموده است. به عنوان نمونه در روز سی ام ماه می سال

جدول ۳: نمونه خروجی مدل رگرسیون موزون جغرافیایی داده های مربوط به رابطه بارش با شاخص AOD یک روز قبل از وقوع بارش در حالت دوم (منبع: نگارندگان ۱۴۰۳)

تاریخ	x	Y	AOD	بارش	همبستگی	تاریخ	x	y	AOD	بارش	همبستگی
۲۰۱۲/۰۲/۲۵	۵۸/۵	۲۷/۵	۰/۶۶	۲/۱۴	۰/۳۳	۲۰۰۰/۱۱/۰۶	۵۸/۵	۳۷/۵	۰/۷۲	۲/۱۸	۰/۴۵
۲۰۱۵/۰۲/۲۱	۵۸/۵	۲۸/۵	۰/۸۵	۱۲/۷۲	۰/۳۲	۲۰۰۰/۱۱/۰۶	۵۵/۵	۳۶/۵	۰/۵۲	۴/۱۰	۰/۳۷
۲۰۱۵/۰۲/۲۱	۶۲/۵	۲۸/۵	۰/۵۰	۷/۱۶	۰/۳۲	۲۰۰۰/۱۱/۰۶	۵۶/۵	۳۶/۵	۰/۴۴	۱/۶۰	۰/۴۰
۲۰۱۵/۰۲/۲۱	۵۷/۵	۲۷/۵	۰/۷۰	۴/۴۲	۰/۳۲	۲۰۰۲/۰۶/۲۸	۵۴/۵	۳۷/۵	۱	۷/۵۴	۰/۳۴
۲۰۰۳/۰۳/۲۸	۵۱/۵	۳۳/۵	۰/۵۷	۴/۴۰	۰/۳۳	۲۰۰۲/۰۶/۲۸	۵۶/۵	۳۷/۵	۰/۶۷	۱/۳۱	۰/۵۰
۲۰۰۳/۰۳/۲۸	۵۲/۵	۳۳/۵	۰/۵۰	۱/۱۴	۰/۳۱	۲۰۱۲/۰۶/۱۷	۴۷/۵	۳۹/۵	۰/۴۴	۳/۵۸	۰/۳۴
۲۰۰۷/۰۳/۲۶	۶۱/۵	۳۱/۵	۰/۸۱	۷/۱۱	۰/۴۹	۲۰۱۲/۰۶/۱۷	۴۷/۵	۳۸/۵	۰/۵۷	۱۰/۰۶	۰/۳۱
۲۰۰۷/۰۳/۲۶	۵۷/۵	۳۰/۵	۰/۷۱	۳/۴۵	۰/۴۰	۲۰۱۹/۰۷/۲۲	۶۱/۵	۳۱/۵	۰/۴۳	۸/۱۶	۰/۴۲
۲۰۰۷/۰۳/۲۶	۶۲/۵	۲۸/۵	۰/۴۳	۱/۹۸	۰/۴۵	۲۰۱۱/۰۹/۲۰	۵۳/۵	۳۶/۵	۰/۶۴	۴/۶۳	۰/۵۰
۲۰۰۸/۰۳/۳۱	۴۷/۵	۳۹/۵	۰/۸۳	۳/۶۷	۰/۳۴	۲۰۱۴/۱۰/۲۱	۶۰/۵	۳۶/۵	۰/۷۵	۴/۱۹	۰/۳۸
۲۰۱۶/۰۵/۰۴	۵۵/۵	۳۵/۵	۰/۵۹	۱/۹۷	۰/۳۱	۲۰۱۴/۱۰/۲۱	۵۶/۵	۳۵/۵	۰/۵۷	۶/۲۴	۰/۳۸
۲۰۱۶/۰۵/۰۴	۴۷/۵	۳۴/۵	۰/۴۸	۴/۰۴	۰/۴۴	۲۰۱۴/۱۰/۲۱	۶۰/۵	۳۵/۵	۰/۵۸	۴/۰۸	۰/۳۸
۲۰۱۶/۰۵/۰۴	۴۸/۵	۳۴/۵	۰/۶۶	۱/۴۲	۰/۳۴	۲۰۱۴/۱۰/۲۱	۵۵/۵	۳۴/۵	۰/۵۸	۶/۸۶	۰/۳۸
۲۰۱۶/۰۵/۰۴	۴۷/۵	۳۳/۵	۰/۵۶	۶۳/۱	۰/۴۱	۲۰۱۴/۱۰/۲۱	۵۶/۵	۳۴/۵	۰/۴۸	۱/۱۹	۰/۳۸
۲۰۱۶/۰۵/۰۴	۴۸/۵	۳۳/۵	۰/۵۰	۱/۲۳	۰/۳۳	۲۰۱۴/۱۰/۲۱	۵۷/۵	۳۴/۵	۰/۴۶	۱/۹۴	۰/۳۸
۲۰۱۸/۰۵/۳۰	۴۸/۵	۳۰/۵	۱	۸/۸۹	۰/۳۵	۲۰۱۹/۱۰/۲۰	۴۵/۵	۳۸/۵	۰/۵۴	۲/۴۱	۰/۴۱
۲۰۰۰/۱۱/۰۶	۵۷/۵	۳۷/۵	۰/۶۰	۶/۶۸	۰/۴۵	۲۰۱۹/۱۰/۲۰	۴۵/۵	۳۷/۵	۰/۴۵	۲/۰۵	۰/۴۸

غالب سوم، استان کرمان در ماه فوریه بیشترین مقادیر پیکسل های معنی دار به خود اختصاص داده اند (شکل ۳). وجود پیکسل های معنی دار در غرب ایران می تواند ناشی از قرار گیری در مسیر توده هوای کم فشار غربی باشد که با خود ریزگردها را از بیابان های سوریه و عراق منتقل می کند. در این رابطه مطالعات یاراحمدی و همکاران (۱۳۹۳) نشان داد که بادهای غربی عاملی هستند که گرد و غبار و سایر ذرات معلق در هوا را از مناطق کویری خاورمیانه به جنوب غرب و غرب ایران منتقل می کنند. تراکم این ذرات معلق همراه با رطوبت ناشی از بادهای غربی می تواند در رخداد بارش های این بخش از ایران موثر باشد (انصافی مقدم و همکاران ۱۳۹۶).

بررسی پراکنندگی مکانی رابطه میان دو متغیر، بارش با شاخص AOD یک روز قبل از وقوع بارش نشان می دهد که استانهای خراسان شمالی و رضوی و استان سمنان با پراکنش زمانی در ماه های ژوئن و اکتبر، استان کرمان در ماه فوریه و در استانهای غربی همچون کرمانشاه، همدان و لرستان در ماه می و نیز استان اصفهان در ماه مارس بیشتر مقادیر پیکسل های معنی دار در رابطه غالب اول (۵۵/۷ درصد) را به خود اختصاص داده اند. در رابطه های غالب دوم و سوم تعداد محدود پیکسل ها (۱۸/۰۳ و ۱۳/۱ درصد) عمدتاً در نواحی خاصی متمرکز نبوده و تنها در چهار ناحیه از فراوانی بیشتری نسبت به سایر نقاط برخوردار بودند. استانهای همدان و مرکزی (رابطه غالب دوم) در ماه نوامبر و جنوب سیستان و بلوچستان (رابطه غالب دوم) در ماه ژانویه و همچنین در رابطه



شکل ۳: نقشه پراکنندگی زمانی و مکانی رابطه میان بارش و شاخص AOD یا روز قبل از وقوع بارش برای چهار رابطه مورد مطالعه (منبع: نگارندگان ۱۴۰۳)

دو متغیر را نشان می‌دهند (جدول ۴). بررسی نتایج حاصل از مدل نشان داد که در اکثر پیکسل‌ها با افزایش مقدار شاخص AOD در دو روز قبل از بارش مقدار بارش کاهش نسبتاً زیادی داشته است در حالی که بر عکس با کاهش مقدار شاخص AOD در دو روز قبل میزان بارش افزایش معنی‌داری را نشان می‌دهد. به عنوان نمونه در روز اول ماه ژوئن سال ۲۰۱۸ مقدار شاخص AOD به ۲/۲۷ رسیده است که مقدار بسیار بالایی است در حالی که مقدار بارش رخ داده در دو روز بعد ۱/۹۴ میلی‌متر می‌باشد. در حالی که در ۲۵ آگوست ۲۰۱۵ با شاخص AOD ۰/۴۳ مقدار بارش ۱۶/۹۸ میلی‌متر بوده است. چنین نتیجه‌ای در بسیاری از روزهای بارشی مورد مطالعه تکرار شده است (جدول ۴). این نتیجه همسو با نتایج وانگ و چن (۲۰۱۷) و کیم و لی (۲۰۱۸) می‌باشد.

نتایج برخی از مطالعات نشان داده است که بین شاخص AOD روزهای قبل از بارش و مقدار بارش رابطه معناداری وجود دارد. بدین صورت که مقادیر بالای AOD دو روز قبل از بارش با کاهش میزان بارندگی همراه است، در حالی که مقادیر پایین AOD با افزایش مقادیر بارندگی همراه است. در این زمینه می‌توان به مطالعات وانگ و چن (۲۰۱۷) و کیم و لی (۲۰۱۸) اشاره نمود. بر این مبنای پژوهش حاضر نیز به بررسی رابطه شاخص AOD دو روز قبل از بارش و مقدار بارش پرداخته شده است. برای این منظور از تعداد ۶۰۲۶ دیتا پیکسل برای اجرای مدل رگرسیون موزون جغرافیایی استفاده شد. خروجی حاصل از مدل نشان داد که در رابطه غالب اول ۴۹/۱ درصد، رابطه غالب دوم ۲۱/۱ درصد، رابطه غالب سوم ۱۷/۳ درصد و رابطه غالب چهارم ۱۲/۵ درصد از پیکسل‌ها معنی‌داری ارتباط بین این

جدول ۴: نمونه خروجی مدل رگرسیون موزون جغرافیایی داده های مربوط به رابطه بارش با شاخص AOD دو روز قبل از وقوع بارش در حالت سوم (منبع: نگارندگان ۱۴۰۳)

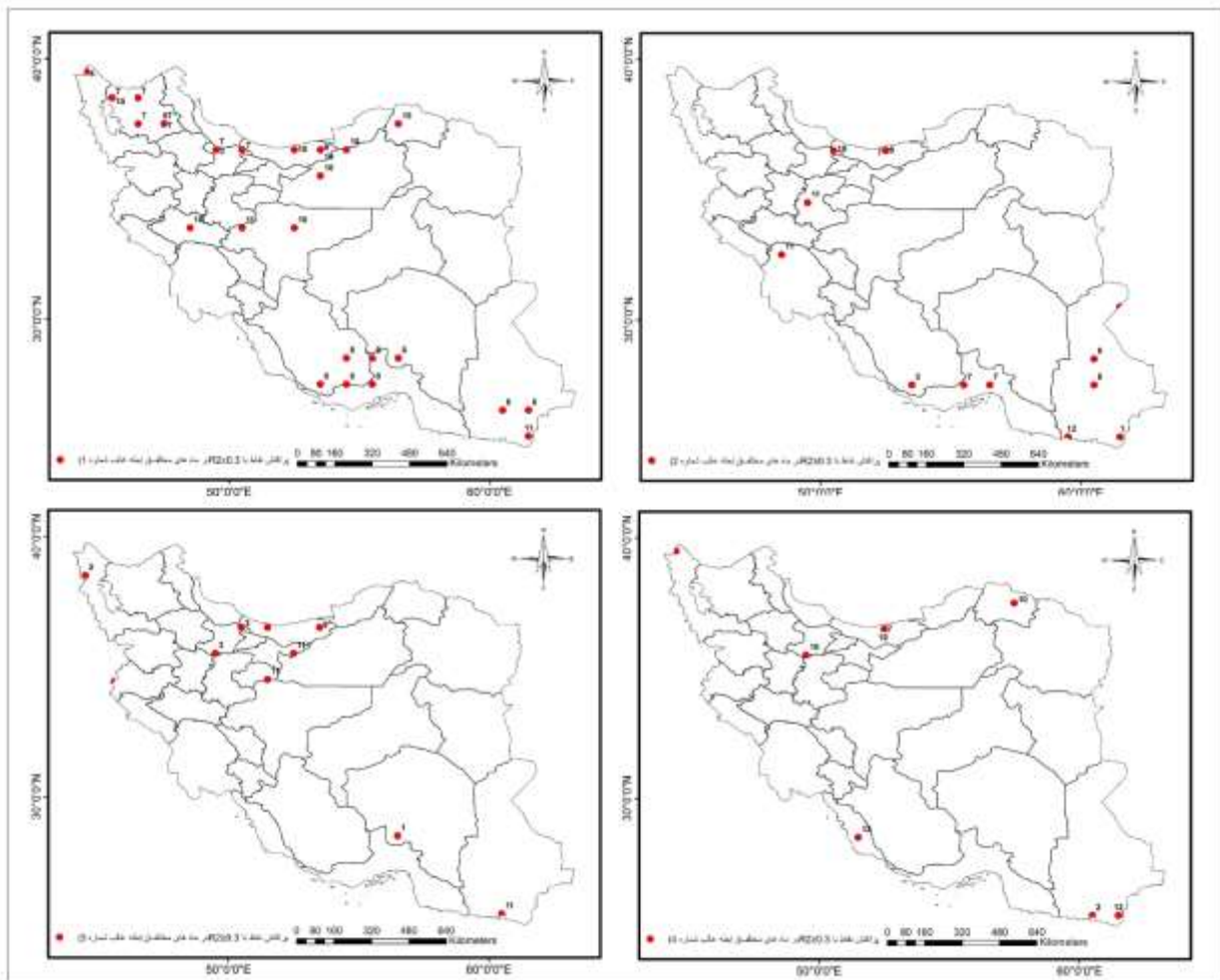
تاریخ بارش	X	Y	بارش	AOD	AOD تاریخ	همبستگی
۲۰۰۱/۱۰/۱۸	۵۶/۵	۳۷/۵	۵/۰۲	۰/۴۵	۲۰۰۱/۱۰/۱۶	۴۷/۰
۲۰۰۲/۱۱/۰۷	۶۱/۵	۲۵/۵	۱۵/۴۶	۰/۴۲	۲۰۰۲/۱۱/۰۵	۰/۴۳
۲۰۰۵/۰۶/۳۰	۶۱/۵	۳۱/۵	۹/۳۷	۰/۷۹	۲۰۰۵/۰۶/۲۸	۰/۴۷
۲۰۰۵/۱۱/۰۷	۵۰/۵	۳۳/۵	۸/۲۷	۰/۴۲	۲۰۰۵/۱۱/۰۵	۰/۴۱
۲۰۰۷/۰۳/۲۸	۴۹/۵	۳۶/۵	۱/۹۴	۰/۴۱	۲۰۰۷/۰۳/۲۶	۰/۴۳
۲۰۰۷/۰۶/۲۶	۶۰/۵	۲۶/۵	۸/۴۳	۰/۴۳	۲۰۰۷/۰۶/۲۴	۰/۴۵
۲۰۱۰/۰۸/۲۶	۴۷/۵	۳۷/۵	۷/۳۵	۰/۶۵	۲۰۱۰/۰۸/۲۴	۰/۳۶
۲۰۱۱/۰۹/۲۲	۵۳/۵	۳۶/۵	۱۳	۰/۶۴	۲۰۱۱/۰۹/۲۰	۰/۴۹
۲۰۱۳/۰۸/۱۳	۵۴/۵	۲۸/۵	۱/۷۴	۰/۸۵	۲۰۱۳/۰۸/۱۱	۰/۴۳
۲۰۱۳/۰۸/۱۳	۵۵/۵	۲۸/۵	۱/۲۸	۰/۹۸	۲۰۱۳/۰۸/۱۱	۰/۴۳
۲۰۱۳/۰۸/۱۳	۵۶/۵	۲۸/۵	۶/۱۸	۰/۸۰	۲۰۱۳/۰۸/۱۱	۰/۴۳
۲۰۱۳/۰۸/۱۳	۵۳/۵	۲۷/۵	۲/۴۹	۱/۰۷	۲۰۱۳/۰۸/۱۱	۰/۴۳
۲۰۱۳/۰۸/۱۳	۵۴/۵	۲۷/۵	۲/۱۵	۱/۲۱	۲۰۱۳/۰۸/۱۱	۰/۴۳
۲۰۱۳/۰۸/۱۳	۵۵/۵	۲۷/۵	۲/۴۸	۱/۱۹	۲۰۱۳/۰۸/۱۱	۰/۴۳
۲۰۱۳/۰۸/۱۳	۶۱/۵	۲۶/۵	۲/۱۴	۰/۴۸	۲۰۱۳/۰۸/۱۱	۰/۴۳
۲۰۱۴/۰۷/۰۵	۴۵/۵	۳۸/۵	۲/۴۱	۰/۶۸	۲۰۱۴/۰۷/۰۳	۰/۵۰
۲۰۱۴/۰۷/۰۵	۴۶/۵	۳۸/۵	۳/۱۴	۰/۶۸	۲۰۱۴/۰۷/۰۳	۰/۴۷
۲۰۱۴/۰۷/۰۵	۴۶/۵	۳۷/۵	۲/۸۹	۰/۶۲	۲۰۱۴/۰۷/۰۳	۰/۴۶
۲۰۱۴/۰۷/۰۵	۴۷/۵	۳۷/۵	۴/۲۲	۰/۶۳	۲۰۱۴/۰۷/۰۳	۰/۴۳
۲۰۱۵/۰۸/۲۵	۴۴/۵	۳۹/۵	۱۶/۹۸	۰/۴۳	۲۰۱۵/۰۸/۲۳	۰/۴۵
۲۰۱۸/۰۶/۰۱	۵۹/۵	۳۷/۵	۱/۹۴	۲/۲۷	۲۰۱۸/۰۵/۳۰	۰/۳۵
۲۰۱۹/۱۰/۲۲	۵۲/۵	۳۶/۵	۶/۸۶	۰/۷۴	۲۰۱۹/۱۰/۲۰	۰/۴۸
۲۰۱۹/۱۰/۲۲	۵۳/۵	۳۶/۵	۲/۳۳	۰/۶۸	۲۰۱۹/۱۰/۲۰	۰/۴۶
۲۰۱۹/۱۰/۲۲	۵۴/۵	۳۶/۵	۱/۵۲	۰/۵۴	۲۰۱۹/۱۰/۲۰	۰/۴۲
۲۰۱۹/۱۰/۲۲	۵۳/۵	۳۵/۵	۸/۸۲	۰/۷۵	۲۰۱۹/۱۰/۲۰	۰/۴۳
۲۰۱۹/۱۰/۲۲	۵۲/۵	۳۳/۵	۱/۹۷	۰/۵۳	۲۰۱۹/۱۰/۲۰	۰/۳۰
۲۰۲۰/۰۷/۲۵	۴۷/۵	۳۷/۵	۳/۱۴	۰/۵۳	۲۰۲۰/۰۷/۲۳	۰/۳۲
۲۰۲۰/۰۷/۲۵	۴۹/۵	۳۶/۵	۶/۲۲	۰/۷۲	۲۰۲۰/۰۷/۲۳	۰/۳۲
۲۰۲۰/۰۷/۲۵	۵۰/۵	۳۶/۵	۳/۸۷	۰/۵۰	۲۰۲۰/۰۷/۲۳	۰/۳۴
۲۰۲۰/۱۰/۰۲	۴۵/۵	۳۸/۵	۱/۳۷	۰/۸۵	۲۰۲۰/۰۹/۳۰	۰/۳۷
۲۰۲۰/۱۰/۰۲	۴۸/۵	۳۳/۵	۱/۸۳	۰/۴۱	۲۰۲۰/۰۹/۳۰	۰/۳۷

همچنین جنوب استانهای فارس و کرمان، شمال و غرب استان هرمزگان در ماه آگوست و جنوب شرق سیستان و بلوچستان در ماه ژوئن و نوامبر از فراوانی قابل قبولی برای بررسی ارتباط میان دو متغیر برخوردار می باشند. استان سیستان و بلوچستان در ماه ژوئن، دسامبر و ژانویه، هرمزگان

بررسی پراکنندگی فضایی رابطه بارش با شاخص AOD دو روز قبل از وقوع بارش نشان می دهد که رابطه غالب اول با ۴۹/۱ درصد از کل پیکسل ها در استانهای آذربایجان غربی و شرقی، گلستان، خراسان شمالی و سمنان با پراکنش زمانی در ماه های آگوست، اکتبر، جولای و سپتامبر مشاهده شد.

گسترده‌گی فضایی کمتری برخوردار بوده و عموماً در نیمه شمالی ایران متمرکز شده اند (شکل ۴).

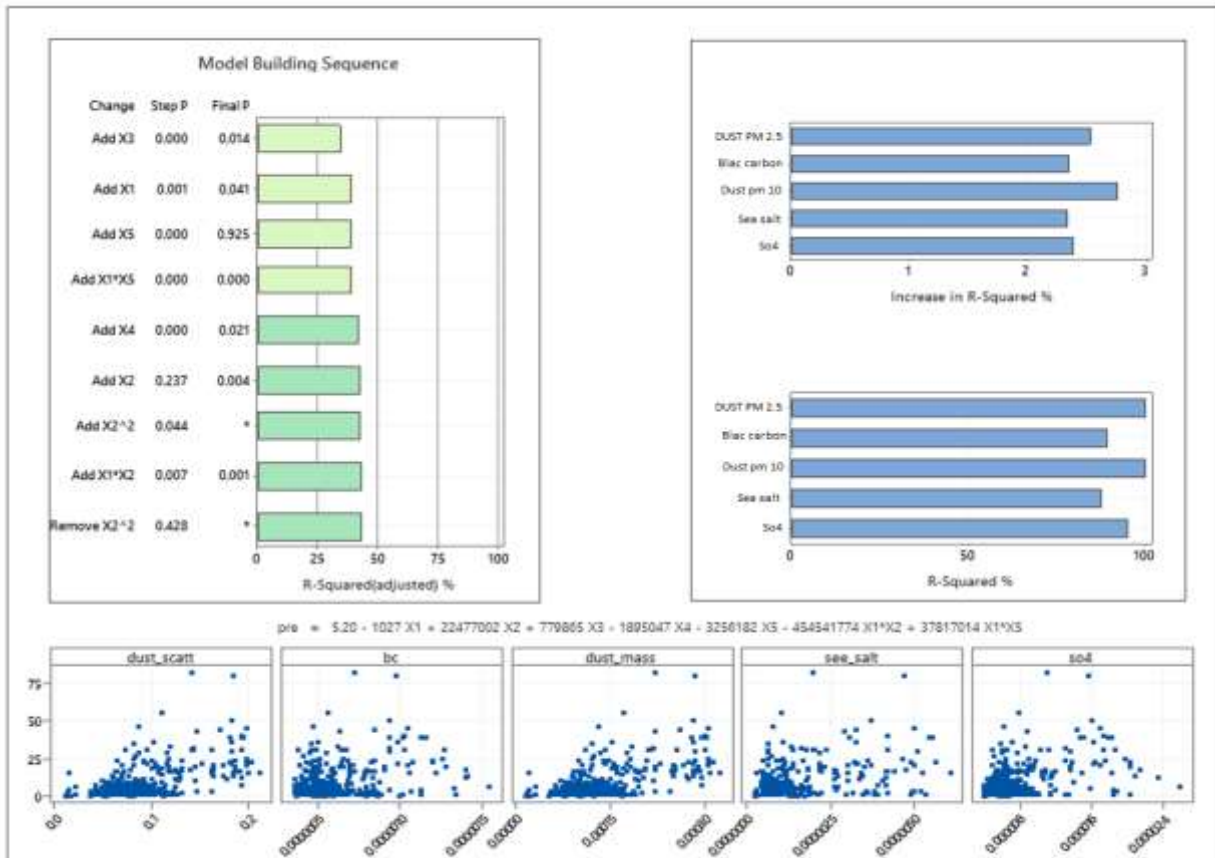
در ماه جولای نشان دهنده رابطه غالب دوم می باشند. در رابطه های سوم و چهارم تعداد پیکسلهای معنی دار از



شکل ۴: نقشه پراکنده‌گی زمانی و مکانی رابطه میان بارش و شاخص AOD با دو روز قبل از وقوع بارش برای چهار رابطه غالب مورد مطالعه (منبع: نگارندگان ۱۴۰۳)

با قطر $PM_{2.5}$ ، کربن سیاه (Black carbon)، سولفات (SO_4) و نمک دریا (sea salt) بیشترین تاثیر را در بارش های ایران دارند. در بین این پنج نوع نیز ذرات گرد و غبار بیشترین ضریب همبستگی را با بارش نشان دادند (شکل ۵). در این رابطه نتایج پژوهش روزنفلد و همکاران (۲۰۰۱) نیز نشان می دهد که وجود ذرات گرد و غبار در جو می تواند بر الگوهای بارش در مقیاس منطقه ای و جهانی تاثیر بگذارد. در مناطق خشک و نیمه خشک، ذرات گرد و غبار توسط باد از بیابان ها به مناطق دیگر منتقل شده و به عنوان هسته تراکم به طور بالقوه باعث افزایش بارش در مناطق بادگیر می شوند.

نتایج پژوهش های مختلف نشان می دهد که نوع آئروسول ها می تواند تأثیر قابل توجهی بر بارش داشته باشند زیرا گونه های مختلف آئروسول اثرات متفاوتی بر فرآیندهای میکروفیزیکی ابر و در نتیجه بر بارندگی دارند (آندره و روزنفلد ۲۰۰۸ و لی و همکاران ۲۰۱۱). به همین دلیل در پژوهش حاضر نیز با استفاده از رگرسیون چند متغیره نسبت به بررسی انواع آئروسول های موثر در بارش در ایران اقدام گردید. بررسی نتایج حاصل از خروجی مدل رگرسیون چند متغیره نشان می دهد در بین انواع مختلف آئروسول ها، پنج نوع شامل ذرات گرد و غبار با قطر PM_{10} ، توده گرد و غبار



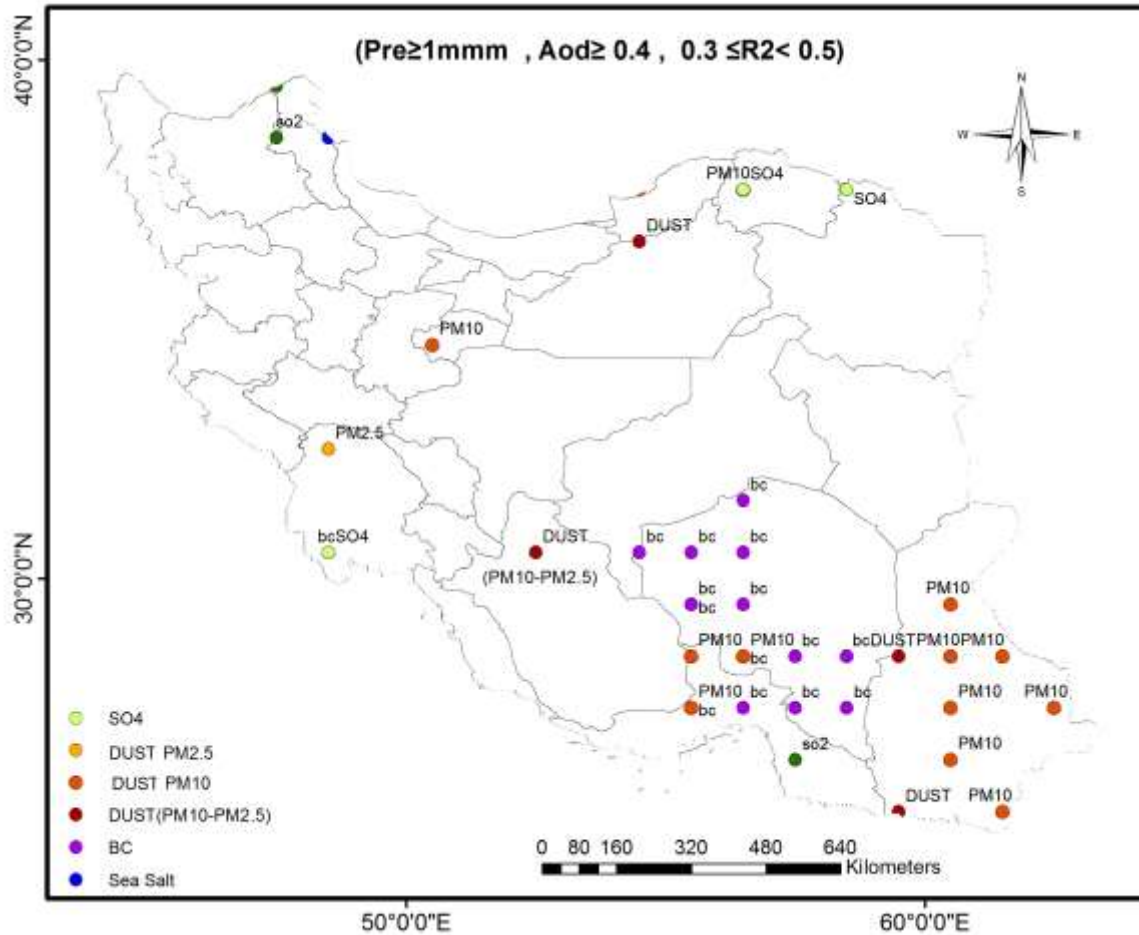
شکل ۵: نمودار رگرسیون چند متغیره انواع آئروسول های موثر در بارش در ایران (منبع: نگارندگان ۱۴۰۳)

گیاهی و ناپایدار، منبع قابل توجهی از ذرات گرد و غبار است. دشت لوت، واقع در بخش مرکزی و شرقی استان کرمان، یکی دیگر از منابع اصلی گرد و غبار است که با شرایط فوق خشک و کمبود پوشش گیاهی عامل اصلی افزایش تراکم گرد و غبار در این مناطق است (علیزاده چوپری و همکاران ۱۳۹۵). هم چنین نتایج مطالعات متعدد نشان می دهد وجود هواویزهایی از نوع سولفات و کربن سیاه در ایران را می توان به موقعیت ساحلی منطقه، منابع طبیعی مانند فیتوپلانکتون های دریایی و منابع انسانی از جمله آلودگی ناشی از سوخت های فسیلی نسبت داد (رئیس پور و خسروی ۱۴۰۰ و ترکاشوند ۱۳۹۶). نتایج برخی از مطالعات نشان می دهد که وجود هواویزهایی از نوع کربن سیاه می تواند موجب افزایش بارش شود. در این زمینه می توان به پژوهشی که توسط بوند و همکاران (۲۰۱۳) انجام شده است اشاره نمود که در مطالعات خود به این نتیجه رسیدند که آئروسول های کربن سیاه می توانند در برخی موارد با افزایش همرفت و تشکیل ابر

بررسی نحوه توزیع فضایی این آئروسول ها در روزهای بارشی مورد مطالعه (حالت اول) در این پژوهش نشان می دهد که بیشترین فراوانی این ذرات در سه استان سیستان و بلوچستان، کرمان و هرمزگان می باشد. تاثیرگذارترین آئروسول ها بر بارش این نواحی به ترتیب در استان سیستان و بلوچستان شامل ذرات ریزگرد (با قطر PM_{10}) در استان کرمان از نوع کربن سیاه (BC) و در استان هرمزگان PM_{10} و کربن سیاه می باشد (شکل ۶). غلظت بالای ذرات گرد و غبار در استان های سیستان و بلوچستان را می توان به عوامل متعددی نسبت داد که در درجه اول به موقعیت جغرافیایی، آب و هوا و ویژگی های سطح زمین مربوط می شود. یکی از دلایل اصلی افزایش سطح گرد و غبار در این استان نزدیکی آن به مناطق عمده کویری مانند حوضه سیستان و کویر دشت لوت است. حوضه سیستان که در شرق ایران و غرب افغانستان قرار دارد، به دلیل آب و هوای خشک، بادهای شدید و مناطق وسیعی از خاک عاری از پوشش

بر بارش می تواند پیچیده تر باشد. وجود مقادیر خاصی از این ذرات معلق در جو و نحوه توزیع جغرافیایی آن می تواند منجر به تغییرات منطقه ای در تأثیر آنها بر الگوهای بارش شود.

زمانی که گرما را در ارتفاعات بالاتر جذب می کنند، بارش را افزایش دهند. علاوه بر این راماناتان و همکاران (۲۰۰۱) نیز معتقدند که اثرات ترکیبی سولفات و آئروسول های کربن سیاه



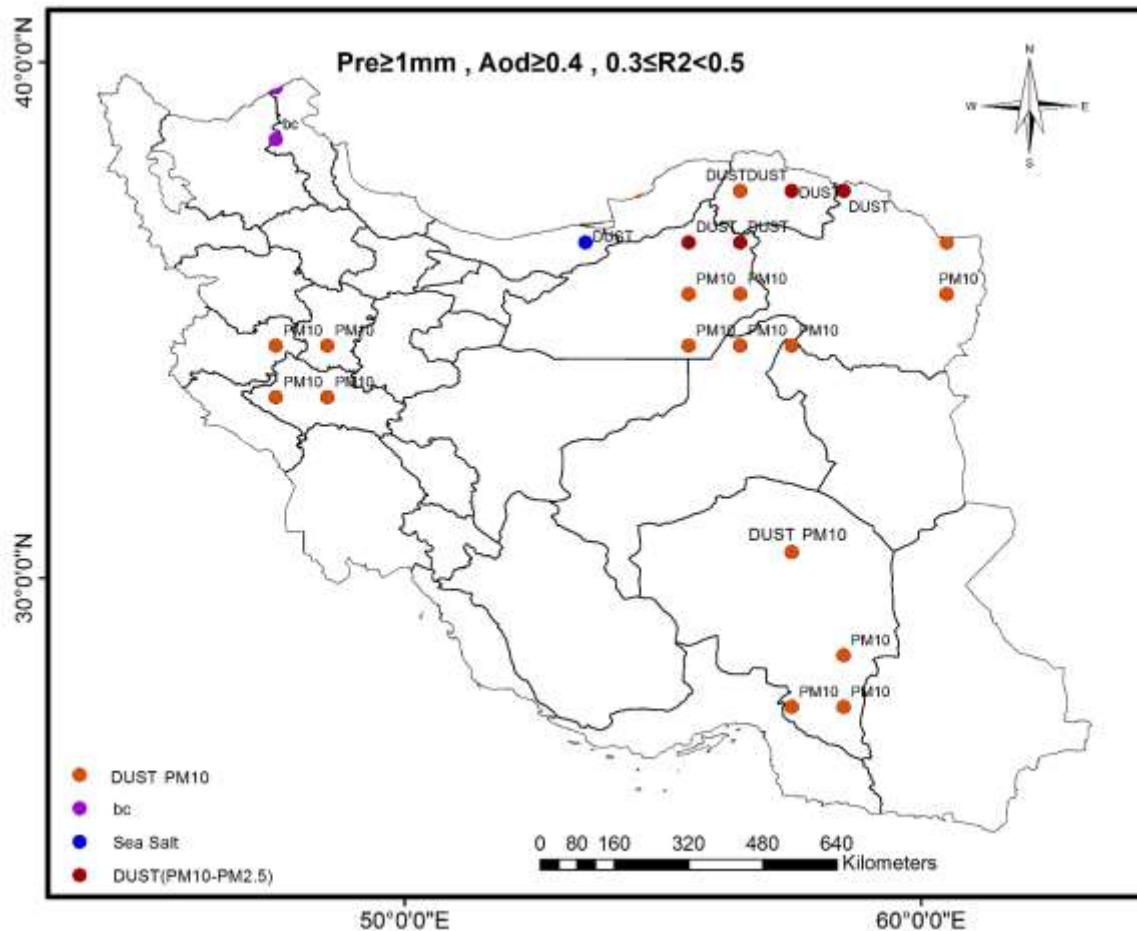
شکل ۶: نقشه پراکندگی مکانی انواع آئروسول های موثر در روز بارشی در حالت اول (منبع: نگارندگان ۱۴۰۳)

ایران و استان کرمان که در مجاورت این منابع گرد و غبار قرار گرفته اند، به طور ویژه تحت تأثیر قرار می گیرند. طبق مطالعه زارعی و همکاران (۱۳۹۶) رویدادهای گرد و غبار بسته به شرایط محیطی در مناطق مختلف می توانند به طور قابل توجهی بر خواص میکروفیزیکی ابرها اثر گذاشته و در نتیجه بر الگوهای بارندگی تأثیر بگذارند. مطالعاتی که به طور خاص بر شمال شرق و غرب استان کرمان متمرکز شده اند، نشان داده اند که تغییرات فصلی در شدت طوفان گرد و غبار می تواند بر الگوهای بارندگی فصلی تأثیر بگذارد. به عنوان نمونه در طول بهار و اوایل تابستان، زمانی که طوفان های گرد

بررسی پراکندگی مکانی آئروسول ها در زمینه رابطه شاخص AOD روز قبل با بارش (حالت دوم) در این پژوهش نشان می دهد که تمرکز اصلی در سه ناحیه شامل غرب، شمال شرق و در جنوب ایران (استان کرمان) می باشد. نکته قابل تامل این است که از نظر نوع آئروسول های موثر در بارش در حالت دوم عمدتاً از نوع ذرات گرد و غبار با قطر PM10 می باشد (شکل ۷). این موضوع نشان می دهد در رخداد بارش های ایران نقش ذرات گرد و غبار بسیار پر رنگ تر از سایر انواع آئروسول ها می باشد. در ایران، طوفان های گرد و غبار یک پدیده رایج است که اغلب از مناطق خشک و نیمه خشک مجاور منشاء می گیرد. مناطق شمال شرق، غرب

دارد (رضایی بنفشه و همکاران ۱۳۹۹).

و غبار به دلیل وزش بادهای سیستان بیشتر است، تأثیر محسوسی بر ویژگی های ابر و به طور بالقوه بر الگوهای بارش



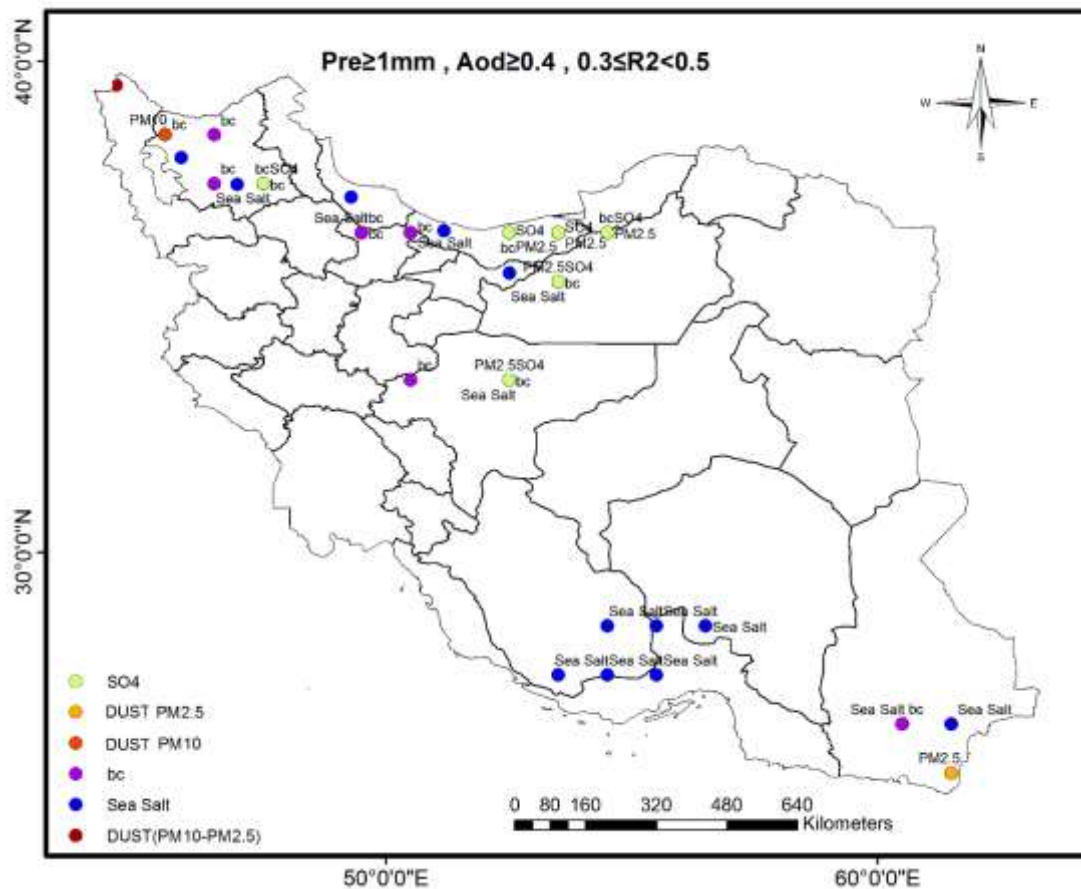
شکل ۷: نقشه پراکندگی مکانی انواع آئروسول های موثر در بارش روز نمونه و شاخص AOD روز قبل در حالت دوم (منبع: نگارندگان ۱۴۰۳)

باشد که در تحلیل های رگرسیونی از معنی داری بالایی برخوردار بوده است. در مناطق ساحلی، تبخیر آب دریا منجر به انتشار ذرات آئروسول نمک دریا در جو می شود (گنگ ۲۰۰۳). این ذرات می توانند به عنوان هسته های متراکم ابر عمل کنند و سطوحی را برای بخار آب فراهم کنند تا متراکم شده و قطرات ابر را تشکیل دهند (آندرا و روزنفلد ۲۰۰۸). وجود این ذرات نمک دریایی می تواند تشکیل ابرها و احتمال بارش را افزایش دهد (روزنفلد و همکاران ۲۰۱۴). گروه دوم از آئروسول های موثر در بارش کربن سیاه و سولفات می باشد که بیشترین فراوانی کربن سیاه در استان

بررسی نقشه های مربوط به رابطه بارش با شاخص AOD روز قبل از آن (حالت سوم) نشان می دهد برخلاف حالت های اول و دوم در این حالت یعنی دو روز قبل از رخداد بارش، آئروسول های موثر در بارش از تنوع بیشتری برخوردار می باشند ضمن اینکه حضور گرد و غبار با قطر PM10 نسبتاً کمتر می باشد. در نقشه حالت سوم در جنوب ایران شامل بخش های جنوبی استان های فارس و کرمان و هم چنین استان هرمزگان و جنوب سیستان و بلوچستان عمده تا آئروسول ها از نوع نمک دریا مشاهده می شود (شکل ۸). این نوع آئروسول در حاشیه شرقی دریاچه ارومیه و حاشیه جنوبی دریای خزر نیز از آئروسول های موثر در بارش این مناطق می

مازندران و بخش شمالی سمنان قابل مشاهده است (شکل ۸).

آذربایجان شرقی و جنوب استان های گیلان و مازندران می باشد. بیشترین میزان تراکم سولفات نیز بخش شرقی استان



شکل ۸: نقشه پراکندگی مکانی انواع آئروسول های موثر در بارش روز نمونه و شاخص AOD دو روز قبل در حالت سوم (منبع: نگارندگان ۱۴۰۳)

صنعتی و دود آتش سوزی جنگل ها) قرار دارد، بررسی رابطه بین آئروسول ها و بارش از اهمیت ویژه ای برخوردار است. تحلیل فضایی این رابطه اطلاعات ارزشمندی در مورد توزیع فضایی و زمانی آئروسول ها و تأثیر آن ها بر الگوهای بارش در سراسر کشور ارائه می دهد. در این پژوهش، رابطه میان شاخص AOD و بارش در ایران با استفاده از داده های روزانه سنجنده مادیس و داده های روزانه بارش ماهواره GPM مورد بررسی قرار گرفت. برای تحلیل این رابطه، از داده های ۲۸۵ ایستگاه سینوپتیک در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ استفاده شد و روزهای بارشی با شاخص AOD جهت انجام تحلیل های رگرسیونی انتخاب شدند. در این مطالعه از مدل رگرسیون موزون جغرافیایی به دلیل قابلیت آن در آشکارسازی ناهمگنی های فضایی استفاده شد. نتایج حاصل از این مطالعه

آئروسول های سولفات و کربن سیاه که عمدتاً از منابع انسانی مانند احتراق سوخت های فسیلی و فعالیت های صنعتی منشأ می گیرند، به عنوان هسته های تراکم ابر عمل می کنند و می توانند باعث تشکیل ابر و بارش شوند هر چند که در برخی موارد تراکم بالای این ذرات منجر به تشکیل قطرات کوچکتر در ابر شده و موجب کاهش احتمال بارش می شود (روزنفلد و همکاران ۲۰۰۸).

۴. نتیجه گیری

آئروسول ها به عنوان یکی از مهم ترین ذرات معلق در اتمسفر تأثیر قابل توجهی بر اقلیم مناطق مختلف دارند. در ایران، که به دلیل موقعیت جغرافیایی خاص و عوامل انسانی، تحت تأثیر منابع مختلف آئروسول ها (از جمله گرد و غبار، آلاینده های

معنی دار در ماههای فصل تابستان نظیر جولای و آگوست می تواند ناشی از فعال بودن کم فشار موسمی و همچنین وزش بادهای ۱۲۰ روزه باشد که هم می تواند رطوبت و هم ذرات گرد و غبار را با خود به این مناطق منتقل کرده و در صورت وجود سایر شرایط منجر به بارش شود. وجود معنی دار در ماههای فصول سرد نظیر نوامبر، دسامبر، ژانویه و فوریه نیز می تواند ناشی از فعال بودن سامانه کم فشار غربی و هم چنین کم فشار سودانی باشد که در این ماهها ضمن وارد نمودن رطوبت، مقادیر زیادی ریزگرد را از بیابان های سوریه، عراق و عربستان از سمت جنوب غرب وارد ایران می کند. بطور کلی نتایج این پژوهش نشان داد که بین آئروسول ها و بارش در ایران رابطه معنی داری وجود دارد و در اثر حضور این ذرات مخصوصا در مناطق جغرافیایی خاص نظیر شمال شرق و جنوب شرق ایران در رفتار این متغیر تاثیر گذاشته و باعث تغییرات در شدت و مقدار آن می شود. اما با توجه به اینکه بارش متغیری پیچیده است و در فرایند رخداد آن عوامل متعددی دخالت دارد بنابراین لازم است جهت روشن شدن ابعاد مختلف این موضوع پژوهش های بیشتری در این زمینه انجام شود.

منابع

۱. انصافی مقدم، ط.، خوش اخلاق، ف.، شمسی پور، ع.ا.، اخوان، ر.، صفرراد، ط.، و امیراصلاتی، ف. (۱۳۹۶)، پایش و ارزیابی اثرات گردوغبار بر تغییرات بارش در جنوب غرب ایران با استفاده از سنجش از دور و GIS، نشریه سنجش از دور و GIS ایران، شماره ۲۹(۲)، صفحات ۷۹-۹۸.
۲. امیدوار، ک.، امید، ز. (۱۳۹۲)، تحلیل پدیده گردوغبار در جنوب و مرکز استان فارس، کاوش های جغرافیایی مناطق بیابانی، سال اول، شماره اول، صفحات ۸۵-۱۱۴.
۳. بحری، ع.، خسروی، ی.، توکلی، آ. (۱۳۹۸)، مقایسه عملکرد روش رگرسیون وزن دار جغرافیایی و روش حداقل مربعات برای مدل سازی روابط فضایی

نشان داد که با در نظر گرفتن هر سه حالت یعنی رابطه بین مقادیر شاخص AOD با بارش در همان روز بارشی، مقادیر شاخص AOD یک روز قبل از بارش با بارش روز بعد و مقادیر شاخص AOD دو روز قبل از بارش با بارش در روز مورد نظر، همبستگی بین این دو متغیر در هر سه حالت به میزان حداقل ۰/۳ تا حداکثر ۵۵/۷ وجود دارد. تحلیل فضایی رگرسیون موزون جغرافیایی بر روی داده های مورد بررسی در دوره مطالعه نیز نشان داد در حالت اول ۵۲ درصد، حالت دوم ۵۵/۷ درصد و حالت سوم ۴۹/۱ درصد از مجموع پیکسل های مورد بررسی در مدل از نظر رابطه بین این دو متغیر معنی دار هستند که این موضوع ارتباط بین بارش و آئروسول ها در ایران را به خوبی نشان می دهد. بررسی رابطه بین مقادیر بارش و شاخص AOD در روزهای بارشی نشان می دهد که افزایش تراکم آئروسول ها می تواند موجب بارش های شدیدتر شود. نتایج حاصل از بررسی پراکنش فضایی پیکسل های معنی دار در حالت های اول و دو نشان داد که این پراکنش از الگوی خاصی برخوردار است به نحوی که اکثرا این پیکسل ها در سه ناحیه جنوب شرق (استان های کرمان، سیستان و بلوچستان و هرمزگان)، ناحیه غرب (استان کردستان، همدان و لرستان) و ناحیه شمال شرق (استان های خراسان، سمنان و بخش شرقی استان مازندران) متمرکز شده اند. در بررسی انواع آئروسول های موثر در بارش هم مشخص شد که بیشترین نوع آئروسول های موثر در بارش این مناطق ذرات گرد و غبار با قطر های PM10 و PM2.5 بودند این موضوع به خوبی نشان می دهد به دلیل وجود بیابان های مجاور ایران نظیر بیابان ترکمنستان در شمال شرق، بیابان های عربستان و سوریه در جنوب غرب و بیابان های خشک بلوچستان پاکستان در جنوب شرق همراه با منابع داخلی ریزگردها نظیر دشت لوت و دشت کویر، ایران در طول سال با تراکم بالایی از این نوع آئروسول ها مواجه است و این می تواند الگو و رفتارهای بارشی ایران را دستخوش تغییر کند. نتایج حاصل از تحلیل پراکنش زمانی آئروسول های موثر در بارش نشان داد که اکثرا این معنی داری رابطه در شش ماه سال شامل ماههای جولای، آگوست، نوامبر، دسامبر، ژانویه و فوریه برقرار است. وجود

استفاده از داده‌های مدل مبنای NASA/MERRA-2، فصلنامه علوم محیطی، شماره ۱۹(۳)، صفحات ۹۹-۱۲۲.

۱۲. رئیس پور، ک.، (۱۳۹۳)، اقلیم‌شناسی سینوپتیکی، ماهوارهای گرد و غبارهای غرب و جنوب غرب ایران، رساله ی دکتری در رشته‌ی جغرافیای طبیعی گرایش اقلیم‌شناسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، صفحه ۲۶۵.

۱۳. زارعی، ف.، قرایلو، م.،، علیزاده چوبری، ا.، (۱۳۹۶)، تأثیر هواویزها بر بارش در شرایط رطوبت‌های نسبی متفاوت: مطالعه موردی، مجله ژئوفیزیک ایران، شماره ۱۱(۲)، صفحات ۱۳۵-۱۵۵.

۱۴. عبدمنافی، د.،، حجام، س.،، مشکوتی، ا.ح.،، وظیفه دوست، م.، (۱۳۹۷)، تأثیر آلودگی‌های ذره‌ای هوای تهران بر روی مشخصه ابر و بارش، علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیست، شماره یک، صفحات ۱۳۰-۱۱۹.

۱۵. عساکره، ح.، (۱۳۹۰)، مبانی اقلیم‌شناسی آماری، انتشارات دانشگاه زنجان، طیف نگار، چاپ اول، صفحه ۵۵۰.

۱۶. یاراحمدی، د.،، نصیری، ب.،، خوش کیش، ا.،، نیکبخت، ح.، (۱۳۹۳)، تأثیر نوسانات آب و هوایی بر رخداد پدیده گرد و غبار (مطالعه موردی گرد و غبارهای غرب و جنوب غرب ایران)، مهندسی اکوسیستم بیابان، شماره ۳(۵)، صفحات ۱۹-۲۸.

17. Andreae, M. O., Rosenfeld, D., Artaxo, P., Costa, A. A., Frank, G. P., Longo, K. M., & Silva-Dias, M. A. F., 2007. Smoking rain clouds over the Amazon. *Science*, 303(5662), PP. 1337-1342.

18. Andreae, M. O., & Rosenfeld, D., 2008. Aerosol-cloud-precipitation interactions. Part 1. The nature and sources of cloud-active aerosols. *Earth Science Reviews*, 89(1-2), pp. 13-41.

19. Bond, T. C., Doherty, S. J., Fahey, D. W., Forster, P. M., Berntsen, T., DeAngelo, B. J & Zender, C. S., 2013. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *Journal of*

دمای سطح دریای عمان. نشریه علمی پژوهشی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی، سال هفتم، شماره سوم، صفحات ۱۷۲-۱۵۹.

۴. ترکاشوند، م.ق.، (۱۳۹۷)، مدل سازی گردش منطقه ای جو در رخداد شدیدترین توفان ریزگرد بهاره غرب ایران، تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، شماره ۵(۲)، صفحات ۱۹-۳۴.

۵. توانگرریزی، س.، (۱۳۹۴)، بررسی نقش آتروسل های جوی در فرایند تشکیل ابر و بارش با استفاده از مدل عددی WRF_Chem، پایان نامه کارشناسی ارشد هواشناسی، دانشگاه یزد، ۱۸۰ صفحه.

۶. حاتمی بهمن بیگلر خ.ک.،، موحدی، س.،، نارنگی فرد، م.، (۱۳۹۳)، پایش مکانی و زمانی پدیده‌های آب و هوایی مرتبط با گرد و غبار در شهرهای ایران، فصلنامه جغرافیا و مطالعات محیطی، سال سوم، شماره یازدهم، صفحات ۳۷-۴۸.

۷. حسینی قهفرخی، ل.، (۱۳۹۰)، مطالعه نقش آروسول ها در تشکیل ابر و بارش در قسمت های مرکزی و جنوب ایران با استفاده از اطلاعات ماهواره ای (۱۳۹۳)، پایان نامه کارشناسی ارشد در رشته هواشناسی، صفحه ۲۱۰.

۸. حسینی، س.ا.،، رستمی، د.، (۱۳۹۷)، واکاوی و ردیابی پدیده گردوغبار در جنوب و جنوب شرق ایران با استفاده از مدل HYSPLIT و اصول سنجش ازدور. تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۵(۳)، ۱۰۹-۱۰۳.

۹. دوستان، ر.، (۱۳۹۷)، تحلیل همدید گرد و غبار شمال شرق ایران، مخاطرات محیط طبیعی، شماره ۷(۱۶)، صفحات ۲۳-۴۴.

۱۰. رضایی بنفشه، م.،، جهانبخش، س.،، آب خرابات، ش.،، رسولی، ع.،، ا.، کریمی، م.، (۱۳۹۹)، نقش بادهای ۱۲۰ روزه سیستان در نوسانات رطوبت شرق و جنوب شرق ایران، جغرافیا و برنامه ریزی، شماره ۲۴(۷۳)، صفحات ۱۹۹-۲۱۷.

۱۱. رئیس پور، ک.،، خسروی، ی.، (۱۴۰۰)، پایش بلندمدت غلظت آلاینده کربن سیاه (BC) در ایران با

- Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 111, D19.
30. Lin, Y. L., Farley, R. D., & Orville, H. D., 2006. Aerosol effects on convective storms and precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D19), D19204.
 31. Liu, Y., Zhao, C., Zhang, M., Li, J., Chen, J., & Leung, L. R., 2019. Aerosol optical depth and precipitation in China. *Journal of Hydrology*, 529, pp. 123-133.
 32. Li, Z., Niu, F., Fan, J., Liu, Y., Rosenfeld, D., & Ding, Y., (2011). Long-term impacts of aerosols on the vertical development of clouds and precipitation. *Nature Geoscience*, 4(12), pp. 888-894.
 33. Rosenfeld, D., et al., 2001. Flood or drought: An overview of precipitation extremes affected by aerosols. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D24), pp. 3221-3243.
 34. Rosenfeld Daniel., 1999. TRMM Observed First Direct Evidence of Smoke from Forest Fires Inhibiting Rainfall. *Geophysical Research Letters*, 26, 20, pp. 3105-3108.
 35. Rosenfeld, D., & Lensky, I. M., 2008. Clouds and aerosols: A review of the indirect radiative effect. *International Journal of Climatology*, 28(1), pp.13-41.
 36. Ramanathan, V., Crutzen, P. J., Kiehl, J. T., & Rosenfeld, D., 2001. Aerosols, climate, and the hydrological cycle. *Science*, 294(5549), pp. 2119-2124.
 37. Ramanathan, V., Crutzen, P. J., Kiehl, J. T., & Rosenfeld, D., 2005. Atmospheric Brown Clouds: Impacts on South Asian Climate and Hydrological Cycle. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, 102(15), pp. 5326-5333.
 38. Sato, Y., Goto, D., Michibata, T., Suzuki, K., Takemura, T., Tomita, H., & Nakajima, T., 2018. Aerosol effects on cloud water amounts were successfully simulated by a global cloud-system resolving model. *Nature Communications*, 9(1), 985, pp.1-7.
 39. Tegen, I., Neubauer, D., Ferrachat, S., Siegenthaler-Le Drian, C., Bey, I., Schutgens, N., Stier, P., Watson-Parris, D., Stanelle, T., Schmidt, H., Rast, S., Kokkola, H., Schultz, M., Schroeder, S., Daskalakis, N., Barthel, S., Heinold, B., & Lohmann, U., 2019. Aerosol-cloud interactions and their radiative forcing with the global aerosol-
Geophysical Research: Atmospheres, 118(11), pp. 5380-5552.
 20. Guo, J., Liu, H., Li, Z., Rosenfeld, D., Mengjiao, J., Weixin, X., Jiang, Jonathan H., He, J., Chen, D., Min Min, z., 2018. Aerosol-induced changes in the vertical structure of precipitation: a perspective of TRMM precipitation radar. *Atmos. Chem. Phys*, 18, pp. 13329-13343.
 21. Gharibzadeh, M., Alam, K., Bidokhti, A. A., Abedini, Y., & Masoumi, A., 2017. Radiative effects and optical properties of aerosols over Zanjan, Iran. *Atmospheric Pollution Research*, 8(1), pp 14-22.
 22. Gonçalves, W. A., Machado, L. A. T., Kirstetter, P.-E., 2015. Influence of biomass aerosol on precipitation over the Central Amazon: an observational study. *Atmos. Chem. Phys*, 15, pp 6789-6800.
 23. Gong, S. L., 2003. A parameterization of sea-salt aerosol radiative properties and their effects on climate. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D15), pp. 1-8.
 24. Koren, I., Martins, J. V., Remer, L., Afargan, H., 2008. Smoke Inhibition Versus Inhibition of Clouds over the Amazon, *Science*, 321, pp. 946-949.
 25. Kim, J., & Lee, S., 2018. Aerosol optical depth and precipitation in the southeastern United States. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 75(10), PP. 3455-3468.
 26. Li Zhanqing, Wang Yuan, Guo Jianping, Zhao Chuanfeng, Cribb Maureen C, Dong Xiquan, Fan Jiwen, Gong Daoyi, Huang Jianping, Jiang Mengjiao., 2019. East asian study of tropospheric aerosols and their impact on regional clouds, precipitation, and climate (EAST-AIRCPC). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 23, PP. 13026-13054.
 27. Li, Z., Liu, L., Zhang, Y., Wang, Y., Sun, J., Wang, Z., & Ding, A., 2019. Aerosol-cloud interactions: Observations, modeling, and implications for climate. *Annual Review of Environment and Resources*, 44, PP. 369-397.
 28. Lenoble, Jacqueline, Lorraine Remer, and Didier Tanré. *Aerosol Remote Sensing*. Springer., 2013. p. 390.
 29. Lin John C, Matsui T, Pielke Sr RA, Kummerow C., 2006. Effects of biomass-burning-derived aerosols on precipitation and clouds in the Amazon Basin: A satellite-based empirical study.

41. Wang, J., Zhang, Q., Huang, J., Liu, C., Zhao, T., & Zhang, L., 2020. Aerosol optical depth and precipitation frequency in the United States. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 59(1), pp. 111-124.
42. Wang, J., & Chen, L., 2017. Aerosol optical depth and precipitation in the eastern United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(12), pp. 6465-6478.
40. Wang Yuan, Ma Po-Lun, Jiang Jonathan H, Su Hui, Rasch Philip J., 2016. Toward reconciling the influence of atmospheric aerosols and greenhouse gases on light precipitation changes in Eastern China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121,10, pp. 5878-5887.