



## Studying the relationship between aerosols and precipitation in the southeast region of Iran

Somia Delbasteh<sup>1</sup> , Seyed Hossein Mirmosavi<sup>2\*</sup> , Koohzad Raispour<sup>3</sup> ,  
Younes Khosravi<sup>4</sup> 

<sup>1</sup> PhD student, Zanjan University, Zanjan, Iran, email: somayehdelbaste@gmail.com

<sup>2</sup> Associate Professor, Department of Geography, Zanjan University, Zanjan, Iran, hossein.mirmousavi@znu.ac.ir

<sup>3</sup> Assistant Professor, Department of Geography, Zanjan University, Zanjan, Iran, Raispour@znu.ac.ir

<sup>4</sup> Associate Professor, Department of Geography, Zanjan University, Zanjan, Iran, khosravi@znu.ac.ir

### Article Info

**Article type:**  
Research Full Paper

**Article history:**  
Received: 2024-6-3  
Accepted: 2024-9-15

**Keywords:**  
Precipitation  
Geographically w. regression  
AOD index  
Southeast of Iran

### ABSTRACT

Aerosols have a significant impact on cloud formation and behavior, ultimately influencing precipitation patterns. Understanding this relationship is crucial for predicting and mitigating the effects of climate change. These particles play an important role in the complex interaction between atmospheric conditions and precipitation patterns. Therefore, the objective of this study is to investigate and analyze the relationship between different types of aerosols and precipitation in Southeast Iran. For this purpose, daily precipitation data from 43 meteorological stations over the statistical period from 2000 to 2022 were used, and rainy days with an AOD index value above 0.3 were selected for regression analysis. In this study, to reveal the spatial relationship between various types of aerosols and precipitation in Southeast Iran, a geographically weighted regression model was first applied, and the correlation between the AOD index and precipitation was examined through cell-by-cell analysis. The results showed that the correlation between aerosols and precipitation in Southeast Iran ranges from a minimum of 0.3 to a maximum of 0.96. Additionally, the comparison of precipitation values with the AOD index on rainy days indicates that the highest frequency of precipitation occurred at specific aerosol densities, with 84.61% of significant cell precipitation occurring when the AOD index ranged between 0.5 and 0.8. At higher values, the frequency of precipitation significantly decreased. This finding suggests that an increase in aerosol concentration beyond an AOD value of 0.8 leads to a reduction in precipitation frequency in Southeast Iran.

**Cite this article:** Delbasteh, S., Mirmosavi, S.H., Raispour, K., Khosravi, Y. (2024). Studying the relationship between aerosols and precipitation in the southeast region of Iran. *Journal of the Climate Change Research*, 5 (19), 97-116.



©The author(s)

Publisher: Golestan University

Doi: 10.30488/CCR.2024.460836.1222



نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی



فصلنامه علمی دانشگاه گلستان

سال پنجم / شماره مسلسل نوزدهم / پاییز ۱۴۰۳ / صفحات: ۹۷-۱۱۶



## مطالعه رابطه آئروسول‌ها با بارش در منطقه جنوب شرق ایران

سمیه دل‌بسته<sup>۱</sup>، سیدحسین میرموسوی<sup>۲\*</sup>، کوهزاد رئیس‌پور<sup>۳</sup>، یونس خسروی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی دکتری، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران، رایانامه: somayehdelbaste@gmail.com

<sup>۲</sup>دانشیار، گروه جغرافیا، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران، رایانامه: hossein.mirmousavi@znu.ac.ir

<sup>۳</sup>استادیار، گروه جغرافیا، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران، رایانامه: Raisipour@znu.ac.ir

<sup>۴</sup>دانشیار، گروه جغرافیا، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران، رایانامه: khosravi@znu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
<p><b>نوع مقاله:</b> مقاله کامل علمی</p> <p><b>تاریخ دریافت:</b> ۱۴۰۳/۳/۱۴ <b>تاریخ پذیرش:</b> ۱۴۰۳/۶/۲۵</p> <p><b>واژه‌های کلیدی:</b> بارش آئروسول‌ها رگرسیون موزون جغرافیایی شاخص AOD جنوب‌شرق ایران</p>	<p>آئروسول‌ها تأثیر قابل توجهی بر شکل‌گیری و رفتار ابرها دارند و در نهایت بر الگوهای بارش تأثیر می‌گذارند. درک این رابطه برای پیش‌بینی و کاهش اثرات تغییرات آب و هوا بسیار مهم است. این ذرات نقش مهمی در رابطه پیچیده بین شرایط جوی و الگوهای بارش دارند. از این‌رو هدف از پژوهش حاضر، بررسی و تحلیل رابطه انواع آئروسول‌ها با بارش در جنوب شرق ایران است. برای این منظور از داده‌های بارش روزانه تعداد ۴۳ ایستگاه هواشناسی در طی دوره آماری بین سال‌های ۲۰۰۰-۲۰۲۲ استفاده گردید و روزهای بارشی که در آن مقدار شاخص AOD بالای ۰/۳ بود جهت انجام تحلیل‌های رگرسیونی انتخاب شد. در این پژوهش به منظور آشکارسازی ارتباط فضایی بین انواع مختلف آئروسول‌ها با بارش در منطقه جنوب‌شرق ایران، در مرحله نخست از مدل رگرسیون موزون جغرافیایی استفاده شد و همبستگی میان شاخص AOD و بارش به صورت تحلیل یاخته‌ای مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد همبستگی بین آئروسول‌ها با بارش در جنوب شرق ایران به میزان حداقل ۰/۳ تا حداکثر ۰/۹۶ وجود دارد. هم‌چنین مقایسه مقادیر بارش با شاخص AOD در روز بارشی نشان می‌دهد بیشترین فراوانی بارش‌های رخ داده در تراکم‌هایی بخصوصی از آئروسول‌ها می‌باشد به نحوی که ۸۴/۶۱ درصد از بارش‌های یاخته‌های معنی‌دار در شاخص AOD با مقادیر بین ۰/۵ تا ۰/۸ اتفاق افتاده است و در مقادیر بالاتر از این مقدار فراوانی بارش‌ها بطور قابل توجهی کم شده است. این موضوع می‌تواند نشان دهد افزایش شدت تراکم آئروسول‌ها از AOD ۰/۸ به بالا باعث کاهش فراوانی بارش در منطقه جنوب شرق ایران می‌شود.</p>

**استناد:** دل‌بسته، سمیه؛ میرموسوی، سیدحسین؛ رئیس‌پور، کوهزاد؛ خسروی، یونس. (۱۴۰۳). مطالعه رابطه آئروسول‌ها با بارش در منطقه جنوب شرق ایران. نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۵ (۱۹)، ۹۷-۱۱۶.

Doi: 10.30488/CCR.2024.460836.1222

ناشر: دانشگاه گلستان  
© نویسندگان.



## مقدمه

آئروسول‌ها، نقش مهمی در فرآیندهای جوی و تغییرات آب و هوایی دارند. این ذرات می‌توانند طبیعی یا انسانی باشند و تأثیرات متنوعی بر محیط‌زیست و اقلیم داشته باشند. یکی از جنبه‌های مهم بررسی آئروسول‌ها، رابطه آنها با بارش و فرآیندهای مربوط به تشکیل ابرهاست. آئروسول‌ها می‌توانند به عنوان هسته‌های تراکم ابر عمل کرده و در تشکیل قطرات ابر مؤثر باشند. این فرآیند می‌تواند منجر به تغییر در خصوصیات ابرها، میزان و نوع بارش شود. آئروسول‌های مختلف، بسته به ترکیب شیمیایی و اندازه‌شان، تأثیرات متفاوتی بر فرآیندهای میکروفیزیکی ابرها دارند. مروری بر مطالعات انجام شده در سطح جهان نشان می‌دهد که رابطه بین ذرات معلق در هوا و بارش پیچیده و چند وجهی است به نحوی که نتایج برخی از مطالعات نشان دهنده همبستگی مثبت و نتایج برخی دیگر نشان دهنده همبستگی منفی بین این دو متغیر می‌باشد. کورن و همکاران (۲۰۱۲) معتقدند که آئروسول‌ها می‌توانند به عنوان هسته‌های تراکمی در ابر عمل کنند، تعداد قطرات ابر را افزایش داده و اندازه آنها را تغییر دهند. این عامل می‌تواند منجر به افزایش مقدار بارش شود، زیرا قطرات کوچکتر احتمال بیشتری دارد که با هم برخورد کرده و ادغام شوند و قطرات بزرگتری را تشکیل دهند که در نهایت به صورت بارش نازل شوند (روزنفلد، ۲۰۰۰:۱۷۹۳). در مقابل چنین نتیجه‌ای آندرا و همکاران (۲۰۰۴) نیز به این نتیجه رسیدند که آئروسول‌ها می‌توانند با کاهش تعداد قطرات بزرگ، بارش را سرکوب کرده و در نتیجه مقدار آن را کاهش دهند. چنین نتایج متفاوتی نشان می‌دهد رابطه بین این دو متغیر بسیار پیچیده بوده و در کنار اثر آئروسول‌ها در بارش نباید از نقش عوامل دیگر غافل شد. نتایج برخی از پژوهش‌ها نیز نشان می‌دهد آئروسول‌ها علاوه بر تأثیر مستقیم بر ویژگی‌های ابر، می‌توانند به طور غیرمستقیم با تغییر الگوهای گردش اتمسفر و شیب دما بر بارش تأثیر بگذارند. هوانگ و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه خود به این نتیجه رسیدند که آئروسول‌ها با کاهش تابش خورشید

و خنک کردن سطح زمین، تضاد دمایی بین خشکی و دریا را کاهش می‌دهند. این کاهش تضاد دمایی باعث تضعیف بادهای موسمی و در نهایت کاهش بارندگی در مناطق موسمی مانند هند می‌شود. همچنین آئروسول‌ها از طریق تأثیر بر ویژگی‌های ابرها و تشکیل بارندگی نیز می‌توانند در کاهش بارش مؤثر باشند. به طور مشابه، تسای و همکاران (۲۰۲۴) نیز نشان دادند که آئروسول‌ها می‌توانند بادهای موسمی زمستانی آسیای شرقی را با افزایش گرادیان دما بین استوا و قطب‌ها تقویت کنند و در نتیجه مقدار و شدت بارش را افزایش دهند. علاوه بر این رابطه بین ذرات معلق در هوا و بارش به طور قابل توجهی در مناطق مختلف و رژیم‌های آب و هوایی متفاوت است. کلی و همکاران (۲۰۱۳) دریافتند که آئروسول‌ها می‌توانند بارش را در ایالات متحده افزایش دهند به این دلیل که این ذرات معلق در هوا می‌توانند به عنوان هسته‌های تراکم عمل کنند. زمانی که آئروسول‌ها وارد اتمسفر می‌شوند، قطرات ریز آب را به دور خود جمع می‌کنند و در اثر آن ابرهای ضخیم‌تر و با ذرات بیشتر شکل می‌گیرند. در برخی مناطق، این تراکم بیشتر می‌تواند موجب افزایش احتمال بارش شود. در واقع، آئروسول‌ها نقش مهمی در فرآیند تشکیل ابرها ایفا می‌کنند و بسته به شرایط جوی، می‌توانند به بارندگی بیشتر در برخی مناطق منجر شوند در حالی که لیو و همکاران (۲۰۲۰) همبستگی منفی بین ذرات معلق در هوا و بارش را در چین شناسایی کردند. بر اساس مطالعات آنها ذرات معلق یا آئروسول‌ها می‌توانند تابش خورشید را کاهش داده و سطح زمین را خنک‌تر کنند. این کاهش تابش خورشیدی باعث کاهش تبخیر و در نتیجه کاهش رطوبت در اتمسفر می‌شود، که در نهایت به کاهش تشکیل ابرها و بارندگی منجر می‌گردد. علاوه بر این، آئروسول‌ها می‌توانند ابرهایی با قطرات کوچکتر ایجاد کنند که بارش را به تأخیر می‌اندازند یا باعث کاهش شدت آن می‌شوند. این عوامل باعث می‌شود که در مناطقی مثل چین، افزایش ذرات معلق با کاهش بارندگی همراه باشد.

ماه‌های فوریه، ژانویه و مارس رخ داده است. همچنین تعداد روزهای گردوغباری از جنوب منطقه مورد مطالعه به سمت شمال آن کاهش می‌یابد. 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. در زمینه رابطه بین آئروسول‌ها و بارش مطالعات بسیار محدودی انجام شده است. از جمله این مطالعات می‌توان به حسینی قهفرخی و همکاران (۱۳۹۰) در زمینه بررسی نقش آئروسول‌ها در تشکیل ابر و بارش در قسمت‌های مرکزی و جنوب ایران اشاره نمود. نتایج حاصل از پژوهش آنها نشان دهنده اثر محسوس آئروسول‌ها در بارش، در ماه‌ها و سال‌های پر بارش بوده است. توانگرریزی و همکاران (۱۳۹۴) در بررسی نقش آئروسول‌ها در فرایند تشکیل ابر و بارش با استفاده از مدل WRF به این نتیجه رسیدند که در قسمت‌هایی 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 می‌رسد 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 آئروسول‌ها بر بارش در شرایط رطوبت‌های نسبی متفاوت پرداختند. نتایج شبیه‌سازی‌های 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 فراسنج‌های شدیدتری وجود دارد که بارش‌های شدیدتری را نیز در پی دارد. همچنین کاهش بارش در حالت آلوده در مناطق پایین دست جریان باد شبیه سازی شده که دلیل آن کاهش شعاع بلورهای یخ است که به کاهش فرآیند یخ زدگی و تولید گویچه برف منجر می‌شود.

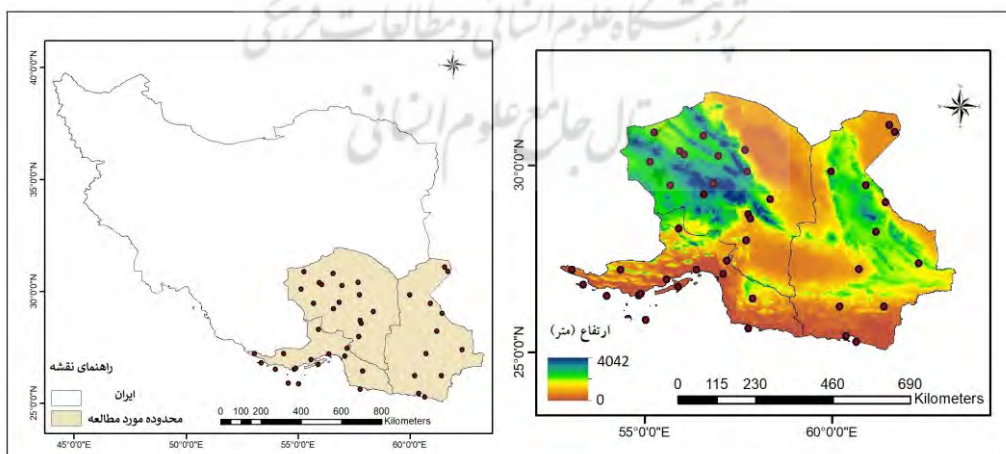
این تغییرات منطقه‌ای در پیچیدگی فعل و انفعالات آئروسول-بارش، نیاز به تحقیقات بیشتر برای درک مکانیسم‌های اساسی موثر در این زمینه را برجسته می‌کند. برخی از پژوهشگران معتقدند که استفاده از مدل‌های آب و هوایی می‌تواند برای نشان دادن دقیق برهم‌کنش‌های آئروسول-بارش موثر واقع شود (بوچر و همکاران، ۲۰۱۳: ۵۷۸). بر این اساس نتایج مطالعات زابلر و همکاران (۲۰۱۱) نشان داد که حتی مدل‌های آب و هوایی پیشرفته نیز می‌توانند نتایج متفاوتی را هنگام شبیه‌سازی اثرات آئروسول بر بارش ایجاد کنند. چنین نتایج متفاوتی می‌تواند ناشی از محدودیت داده‌های در دسترس برای ورود به مدل‌ها باشد. این محدودیت‌های مدل‌سازی بر نیاز به تحقیق و توسعه مداوم طرح‌های تعامل آئروسول-ابر پیچیده‌تر تأکید می‌کند. مروری بر پژوهش‌های انجام شده توسط محققین داخلی نشان می‌دهد پژوهش‌های متعددی در زمینه آئروسول‌ها انجام شده است. اکثر این پژوهش‌ها صرفاً توزیع زمانی و مکانی و منبع انتشار این پدیده را مورد بررسی قرار داده اند که از آن جمله می‌توان به مطالعات امیدوار و امیدی (۱۳۹۲) 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 ایستگاه‌های جنوب و مرکز استان فارس در فصول بهار و تابستان اتفاق می‌افتد. حاتمی بهمن بیگلو و همکاران (۱۳۹۳) در پژوهشی به پایش مکانی و زمانی پدیده‌های آب و هوایی مرتبط با گرد و غبار در شهرهای ایران پرداختند. نتایج مطالعات آنها نشان داد که پدیده 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 گردو 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

شرق ایران یکی از مناطق خشک و نیمه‌خشک است که به طور گسترده‌ای تحت تأثیر پدیده‌های گردوغبار و بارش‌های پراکنده قرار دارد. الگوی زمانی گردوغبار بیشتر در بهار و تابستان و همزمان با فعال شدن بادهای ۱۲۰ روزه سیستان مشهود است. این بادهای که از اواخر بهار تا اوایل پاییز ادامه دارند، گردوغبار را از بیابان‌های داخلی و کشورهای مجاور به این منطقه انتقال می‌دهند. خشکی سطح زمین و نبود پوشش گیاهی، به افزایش طوفان‌های گردوغبار کمک می‌کند که در این دوره زمانی به اوج خود می‌رسند (علیزاده چوبری و همکاران، ۲۰۱۴: ۳۲۸). از نظر الگوی مکانی، بیشترین فراوانی گردوغبار در مناطق مرزی جنوب شرق ایران، به‌ویژه استان‌های سیستان و بلوچستان و کرمان مشاهده می‌شود که به دلیل مجاورت با بیابان‌های افغانستان و پاکستان و بادهای موسمی است. بارش در این منطقه به طور کلی محدود و در ماه‌های زمستان و اوایل بهار رخ می‌دهد. اما بارش در سال‌های اخیر به دلیل تغییرات اقلیمی و خشکسالی کاهش یافته و الگوهای بارش نامنظم‌تر شده‌اند (رشکی و همکاران، ۲۰۱۳: ۱۵۸۰). نوسانات شدید در میزان و توزیع مکانی بارش، به‌خصوص در ارتفاعات و مناطق کوهپایه‌ای، قابل مشاهده است (خلیلی و رحیمی، ۲۰۱۷: ۹۰۸).

مروری بر پژوهش‌های انجام شده در ایران نشان می‌دهد در زمینه رابطه بین آئروسول‌ها با بارش مطالعات انجام شده بسیار کم و ناکافی می‌باشد و اکثر این مطالعات تأثیرگذاری انواع آئروسول‌ها بر بارش مورد توجه قرار نداده‌اند. بنابراین پژوهش حاضر در منطقه جنوب‌شرق ایران به عنوان یکی از مهم‌ترین کانون‌های تراکم آئروسول‌ها (مخصوصاً گردوغبار) با هدف بررسی رابطه بین آئروسول‌ها با بارش و تعیین انواع آئروسول‌های موثر بر بارش انجام گرفته است و سعی شده است تا ضمن شناسایی این ارتباط، نسبت به تحلیل میزان اثرگذاری هر کدام از انواع مختلف این ذرات پرداخته شود.

### داده و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه در این پژوهش شامل منطقه جنوب شرقی ایران می‌باشد که از نظر مختصات جغرافیایی بین عرضهای جغرافیایی ۲۵ درجه و ۳۱ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۵۷ درجه و ۶۳ درجه شرقی قرار دارد و بلندترین نقطه منطقه آتشفشان تفتان است که در استان سیستان و بلوچستان واقع شده و دارای ارتفاع ۴۰۴۲ متر و پست‌ترین نقطه منطقه، نواحی ساحلی خلیج فارس و خلیج عمان است که در سطح دریا قرار دارند (شکل ۱). منطقه جنوب



شکل ۱ نقشه موقعیت و پراکندگی ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه‌ی منطقه‌ی جنوب‌شرق ایران

(وابسته) از داده‌های روزانه محصول Mod08 سنجنده مادیس و داده‌های روزانه بارش ماهواره GPM استفاده

در پژوهش حاضر به منظور آشکارسازی ارتباط میان دو متغیر شاخص AOD (مستقل) و بارش

فراگیر جهت تعیین روزهای نمونه برای تحلیل رابطه آئروسول‌ها با بارش از داده‌های بارش روزانه تعداد ۴۳ ایستگاه هواشناسی در طی دوره آماری بین سالهای ۲۰۲۲-۲۰۰۰ استفاده گردید و روزهای بارشی که در آن مقدار شاخص AOD بالای ۰/۳ بود جهت انجام تحلیل‌های رگرسیونی انتخاب شد. در انتخاب روزها سعی گردید انتخاب به گونه ای باشد که از اکثر ماه‌های سال باشد. پس از بررسی و مشخص شدن روزها در گام بعدی به آشکارسازی نوع آئروسول‌ها و پراکندگی‌های زمانی و مکانی آنها پرداخته شد. برای تحقق این هدف در تاریخ‌های مشخص شده اقدام به دانلود تصاویر مربوط به هواویزهای مختلف نظیر کربن سیاه، سولفات، گرد و غبار، دی اکسید سولفور و نمک دریا گردید (جدول ۱).

شده است. برای ارزیابی دقت داده‌های GPM، از شاخص‌های آماری مانند میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE)، بایاس (BIAS) و ضریب تعیین ( $R^2$ ) استفاده شده است. این شاخص‌ها میزان تطابق داده‌های بارش برآورد شده توسط ماهواره GPM با داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی را ارزیابی می‌کنند. در فرآیند اعتبارسنجی مشخص شد که برخی ایستگاه‌ها دارای خطا هستند. به منظور برطرف نمودن این خطاها، از روش‌های تعدیل داده‌ها مانند اصلاح انحرافات بر اساس بایاس و اعمال ضرایب تصحیح برای ایستگاه‌هایی که اختلاف بیشتری نشان می‌دادند، 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

جدول ۱: اطلاعات تصاویر و داده‌های مورد استفاده در پژوهش

متغیر	واحد‌ها	منبع	تفکیک زمانی	تفکیک مکانی درجه
Combined AOD	ضریب	MODIS, Terra	روزانه	1
Daily accumulated precipitation	میلی متر	GPM	روزانه	0.1
Black Carbon Column Mass Density	کیلوگرم بر مترمربع	MERRA-2	روزانه	0.5×0.625
SO4 Column Mass Density	کیلوگرم بر مترمربع	MERRA-2	روزانه	0.5×0.625
SO2 Column Mass Density	کیلوگرم بر مترمربع	MERRA-2	روزانه	0.5×0.625
Dust Column Mass Density PM2.5	کیلوگرم بر مترمربع	MERRA-2	روزانه	0.5×0.625
Dust Scattering PM1.0 um	ضریب	MERRA-2	روزانه	0.5×0.625
Sea Salt Column Mass Density	کیلوگرم بر مترمربع	MERRA-2	روزانه	0.5×0.625

جغرافیایی (GWR) استفاده شد و همبستگی میان شاخص AOD و بارش به صورت تحلیل یاخته‌ی مورد بررسی قرار گرفت. دلیل استفاده از روش رگرسیون موزون جغرافیایی در این پژوهش این است که مدل‌های رگرسیونی معمولی یا همان کلی برای متغیرهای مستقل و وابسته مکانی تنها میانگینی از داده‌های غیرفضایی را ارائه می‌دهند بدین جهت برخی از واقعیت‌های فضایی پنهان می‌ماند و در نهایت منجر به نتیجه منطقی و قابل قبولی برای داده‌های مکانی

برای اجرای مدل‌های تحلیل مکانی اولین گام یکسان سازی داده‌های ورودی است و بدون این کار امکان پیاده سازی مدل وجود ندارد. بنابراین در پژوهش حاضر نیز ورود داده‌ها به مدل GWR با استفاده از ابزارهای موجود در نرم افزار ARC GIS نظیر Resample نسبت به این کار اقدام شده است. در این پژوهش به منظور آشکارسازی ارتباط فضایی بین انواع مختلف آئروسول‌ها با بارش در منطقه جنوبشرق ایران، در مرحله نخست از مدل رگرسیون موزون

<sup>۱</sup> Geographically Weighted Regression

نتایج پژوهش‌های متعدد نشان می‌دهد اثر آتروسول‌ها بر بارش با تاخیر زمانی همراه است بنابراین لازم است تا جهت تعیین ارتباط بین آتروسول‌ها و بارش رابطه بین این دو متغیر در روزهای قبل از رخداد بارش نیز مورد بررسی قرار گیرد (زائو و همکاران، ۲۰۲۰: ۱ و چاوز و باروس، ۲۰۲۳: ۱۷). برای این منظور در این پژوهش سه حالت بصورت زیر در نظر گرفته شد:

- رابطه شاخص AOD با بارش در همان روز بارشی
- رابطه شاخص AOD یک روز قبل با بارش روز بعد
- 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 داده‌ها می‌باشد. خروجی نهایی مدل GWR برای هر یک از ۳ حالت بیان شده در تمام روزهای انتخابی با اعمال ۴ شرط اصلی زیر، در جهت یافتن الگو و یا رابطه ای معنادار آماده گردید:

(۵)

$$1) AOD \geq 0/3, 2) Pre \geq 1mm, 3) Residual < -6, 4) R2 \geq 0/3$$

رگام بعدی برای تفکیک و مشخص نمودن رابطه‌های غالب معنادار در حالت‌های ۳ گانه ذکر شده از ۴ رابطه بصورت زیر استفاده گردید:

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

(۷)

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

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

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

انتخاب نوع هواویزهای ذکر شده در جدول ۱ بر مبنی بهره‌گیری از نتایج پژوهشگران دیگر در این حوضه است که یافته‌ها حاکی از آن است که برخی آتروسول‌ها دارای ارتباط معنادار با بارش بوده و بسته به شرایط هر مکان درجه تاثیرگذاری آتروسول‌ها متفاوت می‌باشد. برای بررسی درجه تاثیرگذاری هر آتروسول در روزهای نمونه از روش رگرسیون چند متغیره استفاده شد. رگرسیون چند متغیره روشی برای تحلیل حضور دو یا چند متغیر مستقل در

نخواهد شد در حقیقت ناهمگونی‌های مکانی که بین برخی عناصر اقلیمی و پدیده‌ها وجود دارد، باعث می‌شود که اندازه‌گیری یا تخمین روابط بین متغیرها از مکانی به مکان دیگر متفاوت باشد که اگر این ناهمگنی در نظر گرفته نشود و از یک مدل رگرسیون 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 یافته‌ای از مدل‌های رگرسیون چند متغیره است، به طوری که به مشاهدات نزدیک‌تر وزن بیشتر و به مشاهدات دورتر وزن کم‌تری اختصاص داده می‌شود. مدل رگرسیون موزون جغرافیایی بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود (بحری و همکاران، ۱۳۹۸: ۱۶۳):

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

در این رابطه  $y_i$  متغیر وابسته،  $x_{ik}$  متغیر مستقل،  $(u_i, v_i)$  طول و عرض جغرافیایی  $i$  امین نقطه،  $(\beta_k(u_i, v_i))$  مقداری تحقق یافته از تابع پیوسته  $(u, v)$  در نقطه  $i$  می‌باشد. 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 می‌شود. وزن دهی مشاهدات در برآیند تخمین ثابت نیست و با توجه به مکان مشاهده از نقطه  $i$  تغییر می‌کند. برآورد رگرسیون وزن دار جغرافیایی به صورت زیر تعریف می‌شود:

شود:

(۲)

$$\beta(u_i, v_i) = (XTW(u_i, v_i)X)^{-1}XTW(u_i, v_i)$$

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

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

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

می‌باشد (جدول ۱). بالا بودن فراوانی مقادیر همبستگی بین ۰/۳ تا ۰/۴ گویای این واقعیت است که بین دو متغیر بارش و آئروسول‌های موجود در روز بارش از نظر آماری هر چند معنی‌داری قابل قبولی وجود دارد ولی به اندازه کافی از همبستگی بالایی برخوردار نیست و این موضوع نشان می‌دهد رابطه بین آئروسول‌ها در هوا و بارش پیچیده و چند وجهی است و پدیده بارش نه تنها تحت تأثیر خواص فیزیکی و شیمیایی آئروسول‌ها می‌باشد بلکه شرایط جوی و محیطی نیز در رخداد آن بسیار موثر است (روزنفلد و همکاران، ۲۰۰۱: ۲۱۱۹). در این رابطه دهاری و همکاران (۲۰۲۰) نیز در مطالعات خود به نتیجه رسیدند که تأثیر آئروسول‌ها در هوا بر بارش تحت تأثیر عواملی مانند دما، رطوبت، پایداری جو و توپوگرافی است. این عوامل در شکل‌گیری، رشد و توسعه ابرها با هم تعامل دارند که به نوبه خود بر وقوع و توزیع بارش تأثیر می‌گذارند (جدول ۲).

تغییرات یک متغیر وابسته به شمار می‌آید. 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،  $\alpha$  عرض از مبدا،  $b_i$  ضرایب تخمینی برای متغیر مستقل  $X_{ik}$ ،  $k$  تعداد متغیرهای مستقل و  $e$  جزء خطا است.

### نتایج و بحث

بررسی نتایج حاصل از خروجی مدل رگرسیون موزون جغرافیایی برای تحلیل رابطه شاخص AOD با بارش در روز بارشی (حالت اول) نشان می‌دهد که از مجموع ۷۳۵۱ داده یاخته وارد شده در مدل برای حالت اول، ۷۲/۹۷ درصد از یاخته‌ها نشان‌دهنده رابطه معنی‌دار بین بارش و شاخص AOD می‌باشند. بررسی مقادیر همبستگی بین این دو متغیر نیز نشان می‌دهد مقادیر همبستگی، حداقل ۰/۳۱ و حداکثر ۰/۴۹.

جدول ۲: نمونه‌ای از خروجی ۷۵۳۱ یاخته مدل رگرسیون موزون جغرافیایی حالت اول

ردیف	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	استان	مقدار بارش	AOD	سطح معنی‌داری	همبستگی
۱	۵۷/۵	۲۶/۵	هرمزگان	۳/۱۷	۰/۶۹	۰/۰۵	۰/۳۶
۲	۵۵/۵	۳۰/۵	کرمان	۴/۹۴	۰/۷۰	۰/۰۵	۰/۴۵
۳	۵۹/۵	۲۵/۵	سیستان و بلوچستان	۳۰/۸۲	۰/۵۰	۰/۰۵	۰/۴۴
۴	۵۵/۵	۲۸/۵	هرمزگان	۳/۹۹	۰/۵۳	۰/۰۵	۰/۳۴
۵	۵۶/۵	۲۸/۵	کرمان	۵/۳۰	۰/۵۵	۰/۰۵	۰/۳۳
۶	۶۰/۵	۲۹/۵	سیستان و بلوچستان	۲/۸۵	۰/۵۹	۰/۰۵	۰/۳۱

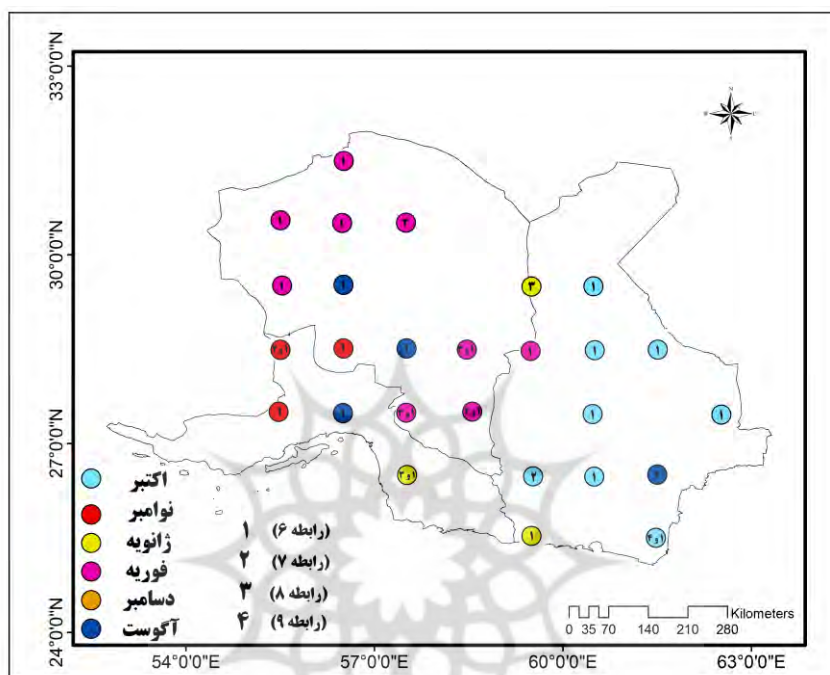
تراکم آئروسول‌ها تعداد قطرات بزرگ در ابر کاهش می‌یابد و این موضوع باعث کاهش شدت بارش می‌شود. وانگ (۲۰۱۳) نیز معتقد است که افزایش چگالی ذرات معلق در هوا می‌تواند الگوهای گردش جوی را تغییر دهند و باعث تغییرات در فراوانی و شدت بارش شود. بررسی پراکندگی فضایی رابطه میان بارش و شاخص AOD در روز بارشی برای هر چهار رابطه غالب اول (حالت اول) مورد مطالعه نشان دهنده توزیع‌هایی متفاوتی برای هر کدام از این رابطه‌ها می‌باشد. پراکندگی مکانی حالت اول که بیشترین مقادیر یاخته‌های معنی‌دار (یاخته‌هایی با مقادیر LocalR2

همچنین مقایسه مقادیر بارش با شاخص AOD در روز بارشی نشان می‌دهد بیشترین فراوانی بارش‌های رخ داده در تراکم‌هایی بخصوصی از آئروسول‌ها می‌باشد به نحوی که ۸۴/۶۱ درصد از بارش‌های یاخته‌های معنی‌دار در شاخص AOD با مقادیر بین ۰/۵ تا ۰/۸ اتفاق افتاده است و در مقادیر بالاتر از این مقدار فراوانی بارش‌ها بطور قابل توجهی کم شده است. این موضوع می‌تواند نشان دهد افزایش شدت تراکم آئروسول‌ها از AOD ۰/۸ به بالا باعث کاهش فراوانی بارش می‌شود. در این رابطه نتایج مطالعات سان و همکاران (۲۰۲۲) نیز نشان داد که با افزایش شدت



یاخته‌های معنی دار از نظر رابطه بین آئروسول‌ها با بارش در استان سیستان و بلوچستان و جنوب شرق استان کرمان نشان دهنده نقش موثر گرد و غبارهای موجود در این منطقه به عنوان آئروسول‌های غالب می باشد (شکل ۲).

بیشتر از ۰/۳ در سطح معنی داری ۰/۰۵ (درصد) را شامل می شود نسبت به سایر حالت‌ها گسترده تر بوده و در بخش‌های مختلفی از منطقه مورد مطالعه قابل مشاهده است اما بیشترین تعداد یاخته‌های معنی دار در استانهای سیستان و بلوچستان و کرمان متمرکز شده است. در حالت دوم و سوم هم بالا بودن تراکم



شکل ۲: نقشه پراکنده‌گی زمانی و مکانی رابطه میان بارش و شاخص AOD در حالت اول

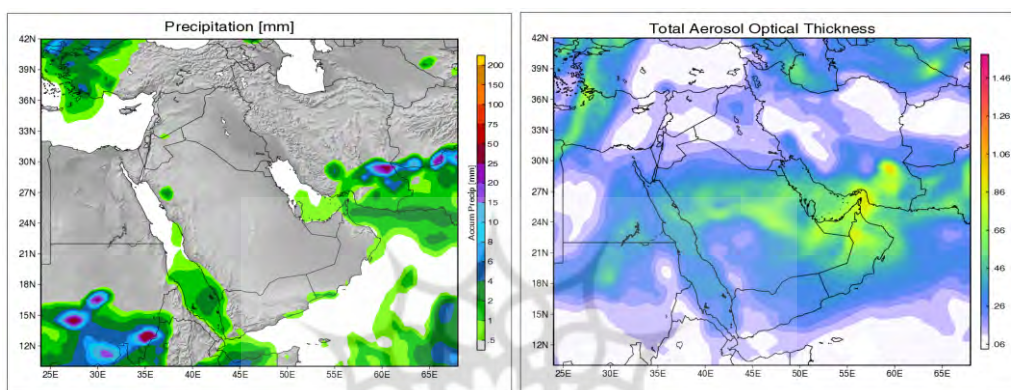
متمرکز کنند و تأثیر آنها بر الگوهای بارش را افزایش دهند. بررسی نقشه‌های مجموع عمق اپتیکی آئروسول‌ها با مقادیر بارش نشان می دهد در اکثر روزهای مورد مطالعه در این پژوهش پراکنش جغرافیایی مقادیر هر دو پدیده با همدیگر انطباق زیادی دارد به نوعی که در مناطقی از جنوب شرق ایران که مقادیر بالا می باشد، مقادیر بارش این مناطق نیز بالا می باشد (شکل ۳).

به منظور بررسی رابطه بارش و شاخص AOD یک روز قبل (حالت دوم) تعداد ۶۱۷۳ داده یاخته وارد مدل GWR شد و تحلیل همبستگی فضایی بر روی آنها انجام شد. نتایج حاصل از خروجی مدل نشان داد از مجموع یاخته‌های مورد بررسی در این حالت ۴۱/۸۵ درصد از یاخته‌ها نشان دهنده رابطه معنی دار

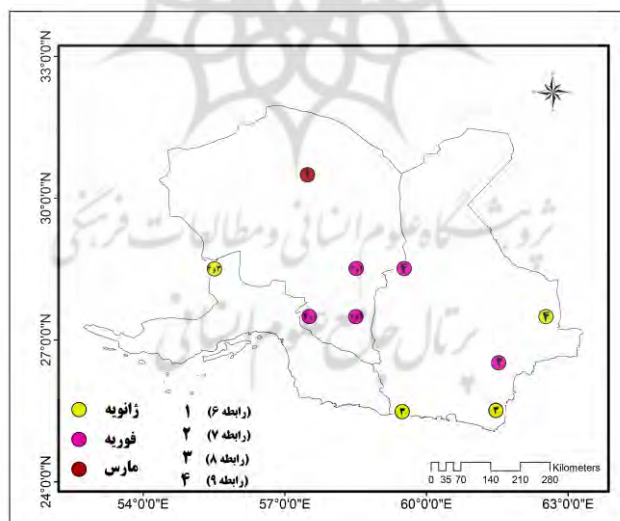
از لحاظ پراکنش زمانی، معنی داری رابطه بین بارش و شاخص AOD در پنج ماه سال نیمه سرد شامل ماههای اکتبر تا ژانویه و یک ماه در نیمه گرم سال (ماه آگوست) قابل مشاهده است. رابطه بین ذرات معلق در هوا و بارش در جنوب شرق ایران را می توان به ترکیب منحصر به فرد شرایط جوی و ویژگی‌های سطح زمین در منطقه نسبت داد. در این رابطه نتایج مطالعات حسینی و همکاران (۲۰۲۰) نشان می دهد که غلظت بالای آئروسول‌ها در جنوب شرق ایران، گردش جوی قوی و وجود توپوگرافی خاص در آن به همبستگی مثبت بین AOD با بارش کمک می کند. توپوگرافی منطقه نیز نقش مهمی در رابطه بین ذرات معلق در هوا و بارش دارد. کوه‌ها و دره‌های منطقه می توانند ذرات معلق در هوا را به دام انداخته و

معنی‌دار وجود دارد و نشان می‌دهد یک روز قبل از بارش زمانی که تراکم آئروسول‌ها در مقادیر پایین قرار دارد شدت بارش در روز بعد بیشتر می‌شود. در این زمینه نتایج مطالعات آلبرشت (۱۹۸۹) و روزنفلد (۲۰۰۸) نشان می‌دهد که در مقادیر غلظت کمتر ذرات آئروسول‌ها در روز قبل از بارش رطوبت موجود در ابر امکان تراکم بیشتری را پیدا نموده و در نتیجه با افزایش و رشد قطرات متراکم شده در ابر بارش با شدت بیشتری انجام می‌شود.

بین بارش و شاخص AOD یک روز قبل از رویدادهای بارندگی می‌باشد (جدول ۳). بررسی مقادیر همبستگی نشان می‌دهد بین بارش و شاخص AOD یک روز قبل حداقل ۰/۶۳ و حداکثر ۰/۹۶ رابطه معنی‌دار وجود دارد. بررسی مقادیر AOD نیز نشان می‌دهد در روزهایی که مقادیر شاخص بین ۰/۳۲ تا ۰/۳۶ قرار دارد شدت بارش افزایش زیادی را پیدا نموده است. این ویژگی در بیش از ۵۰ درصد یاخته‌های



شکل ۳: نقشه میانگین مجموع ضخامت اپتیکی آئروسول‌ها و مقادیر بارش در حالت اول



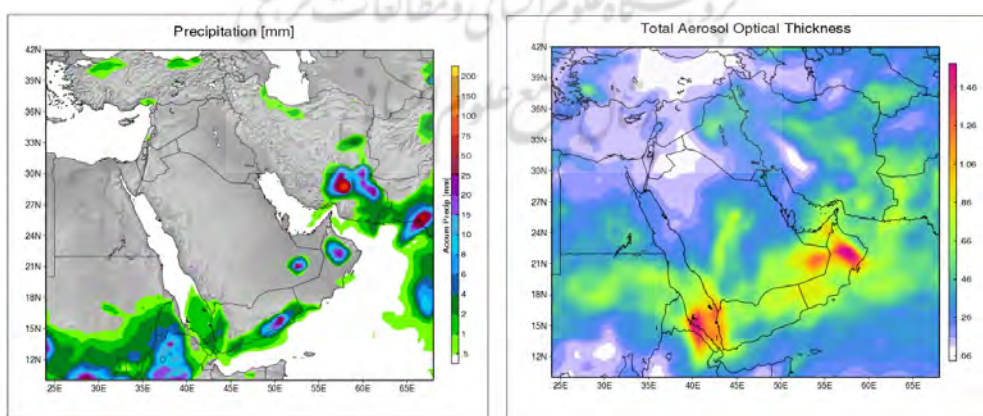
شکل ۴: نقشه پراکندگی زمانی و مکانی رابطه میان بارش و شاخص AOD در حالت دوم

جدول ۳: نمونه‌ای از ۶۱۷۳ یاخته خروجی مدل رگرسیون موزون جغرافیایی حالت دوم

ردیف	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	استان	AOD	مقدار بارش	سطح معنی‌داری	همبستگی
۱	۶۲/۵	۲۷/۵	سیستان و بلوچستان	۰/۳۵	۱۹/۰۱	۰/۰۵	۰/۹۶
۲	۵۵/۵	۲۸/۵	کرمان	۰/۳۲	۱۱/۰۲	۰/۰۵	۰/۹۶
۳	۵۸/۵	۲۸/۵	کرمان	۰/۳۶	۱۰/۲۴	۰/۰۵	۰/۶۴
۴	۵۹/۵	۲۸/۵	کرمان	۰/۳۲	۱/۴۰	۰/۰۵	۰/۶۶
۵	۵۷/۵	۲۷/۵	کرمان	۰/۳۹	۶/۱۹	۰/۰۵	۰/۶۳
۶	۵۸/۵	۲۷/۵	کرمان	۰/۳۹	۳/۰۳	۰/۰۵	۰/۶۶

می باشد. هم چنین نتایج مطالعات مایشات و آواد (۲۰۱۵) نیز نشان داد کم فشار سودانی عامل اصلی انتقال ذرات گرد و غبار با خود در طول مسیری که طی می کنند می باشد و این انتقال از طریق تقویت ترف دریاى سرخ در تروپوسفر پایینی انجام می شود. بنابراین چنین به نظر می رسد که وجود آئروسول‌ها در روز قبل بارش نیز ناشی از انتقال آنها توسط این سامانه کم فشار باشد که موجب افزایش تراکم در رطوبت موجود در ابرها و بارش در روز بعد می‌شود. علیجانی و رییس پور (۱۳۹۰) نیز معتقدند که در دوره سرد سال با استقرار پرفشار سبیری با هسته مرکزی ۱۰۴۰ میلی بار بر روی دریای خزر و حاکمیت شرایط کم فشار در منطقه سیستان موجب ریزش هوای سرد از این پرفشار به سیستان شده و این عامل باعث انتقال ذرات گرد و غبار به این منطقه می‌شود.

بررسی پراکندگی مکانی رابطه میان دو متغیر، بارش با شاخص AOD یک روز قبل از وقوع بارش نشان می دهد که بیشترین تراکم یاخته‌های معنی دار در استانهای کرمان و سیستان و بلوچستان قابل مشاهده است. از نظر زمانی در حالت دوم سه ماه فصل زمستان (ژانویه، فوریه و مارس) معنی دار بودند (شکل ۴). وجود یاخته‌های معنی داری در فصل زمستان نشان می‌دهد وجود آئروسول‌ها یک روز قبل از فعال شدن سامانه‌های بارز در این منطقه موجب تقویت فرایند تراکم و افزایش شدت بارش در روز بعد می شود. بر اساس مطالعات لشکری (۱۳۸۴) عامل اصلی بارش‌های زمستانه در جنوب شرق ایران تقویت کم فشار سودانی و انتقال آن از روی دریای سرخ و خلیج عدن به خلیج فارس و ورود آن از طریق تنگه هرمز به استان‌های سیستان و بلوچستان، هرمزگان و کرمان



شکل ۵: نقشه میانگین مجموع ضخامت اپتیکی آئروسول‌ها و مقادیر بارش در حالت دوم

حاصل از این پژوهش در زمینه رابطه بین آئروسول‌های یک روز قبل از بارش با شدت بارش روز بعد همسو با

هر چند در مورد اثرات آئروسول‌ها در پژوهش‌های داخلی نتایج خاصی قابل مشاهده نیست ولی نتایج

مجاور ایران نظیر شرق پاکستان و در همسایگان جنوبی ایران نیز مصداق دارد و بطوری که نقشه ضخامت اپتیکی آئروسول‌ها با نقشه بارش انطباق و همخوانی زیادی را نشان می‌دهد (شکل ۵).

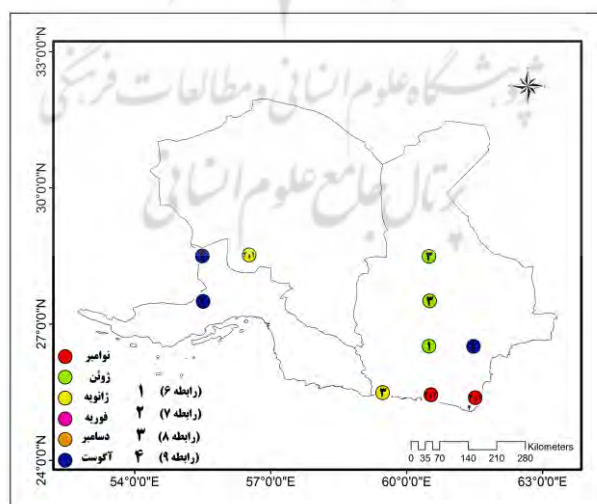
به منظور بررسی اثرات آئروسول‌های روزهای قبل بر بارش در پژوهش حاضر به بررسی رابطه شاخص AOD دو روز قبل از بارش پرداخته شده است. برای این منظور از تعداد ۶۰۲۶ داده یاخته برای اجرای مدل رگرسیون موزون جغرافیایی استفاده شد. خروجی حاصل از مدل نشان داد که در این حالت ۴۰ درصد از یاخته‌ها، معنی داری ارتباط بین این دو متغیر را نشان می‌دهند (جدول ۴).

نتایج پژوهشی روزنفلد و لینسکی (۱۹۹۸) و روزنفلد و وودلی (۲۰۰۰) می‌باشد به نحوی که نتایج حاصل از مطالعات این محققین نیز نشان می‌دهد افزایش تراکم آئروسول‌ها در روز قبل از بارش به دلیل بالا رفتن تعداد هستک‌های تراکمی موجب کاهش رشد ذرات تراکمی شده و بارش را سرکوب می‌کند در حالی که وجود مقادیر آئروسول‌ها با تراکم کمتر، موجب تقویت و بزرگتر شدن قطر قطرات بارش می‌شود.

بررسی نقشه میانگین ضخامت اپتیکی آئروسول‌ها با میانگین مقادیر بارش در محدوده مورد مطالعه نیز نشان می‌دهد در منطقه جنوبشرق ایران در محدوده‌هایی که آئروسول‌ها حضور دارند رخداد بارش نیز قابل مشاهده است. این موضوع حتی در مناطق

جدول ۴: نمونه‌ای از ۶۰۲۶ یاخته خروجی مدل رگرسیون موزون جغرافیایی داده‌های مربوط حالت سوم

ردیف	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	استان	مقدار بارش	AOD	سطح معنی داری	همبستگی
۱	۵۵/۵	۲۸/۵	هرمزگان	۱/۲۸	۰/۹۸	۰/۰۵	۰/۴۳
۲	۵۵/۵	۲۷/۵	هرمزگان	۲/۴۸	۱/۱۹	۰/۰۵	۰/۴۳
۳	۵۶/۵	۲۸/۵	کرمان	۶/۱۸	۰/۸۰	۰/۰۵	۰/۴۳
۴	۶۰/۵	۲۶/۵	سیستان و بلوچستان	۸/۴۳	۰/۴۳	۰/۰۵	۰/۴۵
۵	۶۱/۵	۲۵/۵	سیستان و بلوچستان	۱۵/۴۶	۰/۴۲	۰/۰۵	۰/۴۳
۶	۶۱/۵	۲۶/۵	سیستان و بلوچستان	۲/۱۴	۰/۴۸	۰/۰۵	۰/۴۳



شکل ۶: نقشه پراکندگی زمانی و مکانی رابطه میان بارش و شاخص AOD در حالت سوم

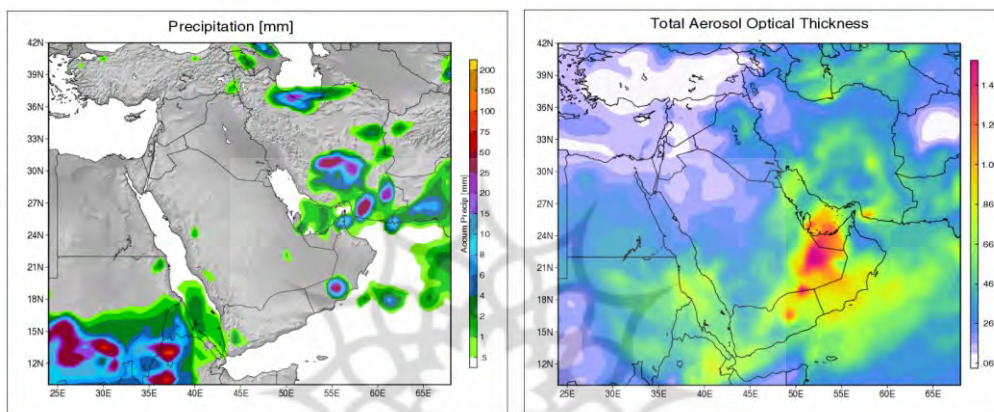
از بارش مقدار بارش، کاهش نسبتاً زیادی داشته است در حالی که برعکس با کاهش مقدار شاخص AOD در

بررسی نتایج حاصل از مدل نشان داد که در برخی از یاخته‌ها با افزایش مقدار شاخص AOD در دو روز قبل

حالت سوم مورد مطالعه نشان می‌دهد که بیشترین تراکم در استان سیستان و بلوچستان می‌باشد. بعد از این استان، شرق استان هرمزگان و جنوب استان کرمان در اولویت‌های بعدی، دارای یاخته‌های معنی‌دار از نظر رابطه بین تراکم آئروسول‌ها دو روز قبل از بارش با بارش روز مورد نظر قرار دارند. از نظر توزیع ماهانه یاخته‌های معنی‌دار نیز دو ماه ژوئن و آگوست در نیمه گرم سال و چهار ماه نوامبر، دسامبر، ژانویه و فوریه بالاترین مقادیر را به خود اختصاص داده اند (شکل ۶).

دو روز قبل میزان بارش افزایش معنی‌داری را نشان می‌دهد. به عنوان نمونه در روز سیزدهم ماه سپتامبر سال ۲۰۱۳ مقدار شاخص AOD به ۱/۱۹ رسیده است که مقدار نسبتاً بالایی است در حالی که مقدار بارش رخ داده در دو روز بعد ۲/۴۸ میلی‌متر می‌باشد. در حالی که در ۸ نوامبر ۲۰۰۲ با شاخص AOD ۰/۴۲ مقدار بارش ۱۵/۴۶ میلی‌متر بوده است. چنین نتیجه ای در بسیاری از روزهای بارشی مورد مطالعه (۸۳/۳۳ درصد) تکرار شده است (جدول ۴).

بررسی پراکنش مکانی یاخته‌های معنی‌دار در



شکل ۷: نقشه میانگین شاخص AOD و میانگین مقادیر بارش در حالت

چند متغیره نشان می‌دهد در بین انواع مختلف آئروسول‌ها، پنج نوع شامل ذرات گرد و غبار با قطر  $PM_{10}$ ، توده گرد و غبار با قطر  $PM_{2.5}$ ، کربن سیاه (Black carbon)، سولفات ( $SO_4$ ) و نمک دریا (Sea salt) بیشترین تاثیر را در بارش‌های جنوب‌شرق ایران دارند (جدول ۵). در بین این پنج نوع نیز ذرات گرد و غبار  $PM_{2.5}$  بیشترین ضریب همبستگی را با بارش نشان دادند. دلیل بالا بودن میزان همبستگی ذرات  $PM_{2.5}$  با بارش می‌تواند ناشی از آن باشد که این ذرات عمدتاً در اتمسفر به عنوان هسته‌های تراکم عمل کند که مولکول‌های آب در اتمسفر به دور آنها جمع شده و تشکیل قطرات بزرگتر را می‌دهند. هر چه تعداد بیشتری از این ذرات در جو وجود داشته باشد، احتمال تشکیل قطرات آب و ابرها بیشتر است. این فرآیند منجر به تشکیل ابرهای با قطرات ریزتر و فراوان‌تر می‌شود که در نهایت به بارش منجر می‌گردد.

بررسی نقشه میانگین شاخص AOD با میانگین مقادیر بارش در حالت سوم در طی دوره مورد مطالعه نیز به خوبی نشان می‌دهد مناطقی که دارای مقادیر بالاتری از آئروسول‌ها هستند بارش بیشتری را نسبت به سایر مناطق دریافت نموده اند و این موضوع بخوبی نشان می‌دهد تا چه اندازه وجود آئروسول‌ها در رخداد بارش می‌تواند نقش داشته باشد (شکل ۷).

نتایج پژوهش‌های مختلف نشان می‌دهد که نوع آئروسول‌ها می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر بارش داشته باشند. زیرا گونه‌های مختلف آئروسول اثرات متفاوتی بر فرآیندهای میکروفیزیکی ابر و در نتیجه بر بارندگی دارند (برگ و همکاران، ۲۰۰۶: ۴۳۴؛ تاکمورا و همکاران، ۲۰۰۵: ۲). به همین دلیل در پژوهش حاضر نیز با استفاده از رگرسیون چند متغیره نسبت به بررسی انواع آئروسول‌های موثر در بارش در ایران اقدام گردید. بررسی نتایج حاصل از خروجی مدل رگرسیون

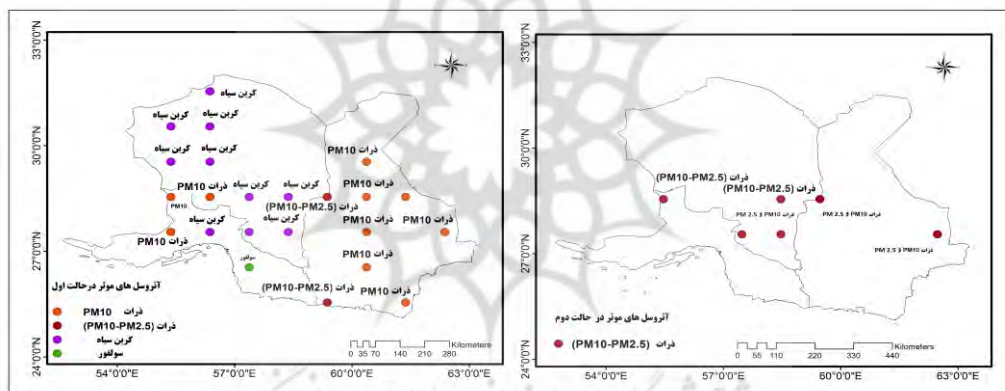
باد از بیابان‌ها به مناطق دیگر منتقل شده و به عنوان هستک تراکم به‌طور بالقوه باعث افزایش بارش در مناطق بادگیر می‌شوند.

بررسی نحوه توزیع فضایی این آئروسول‌ها در روزهای بارشی مورد مطالعه (حالت اول) در این پژوهش نشان می‌دهد که بیشترین فراوانی این ذرات در سه استان سیستان و بلوچستان، کرمان و هرمزگان می‌باشد.

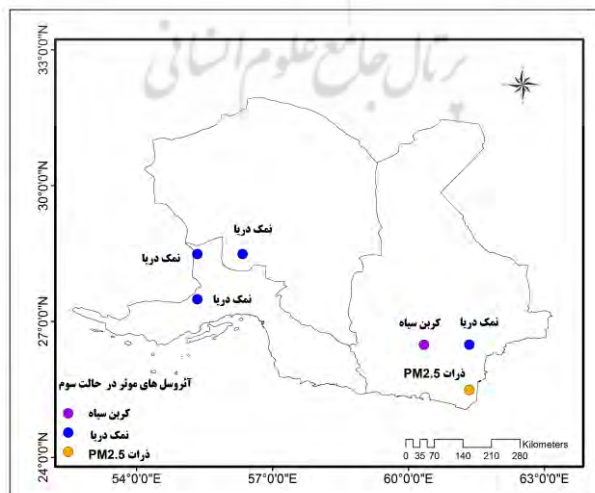
این پدیده در تحقیقات متعددی مورد بررسی قرار گرفته است که نشان می‌دهد ذرات  $PM_{2.5}$  می‌توانند فعالیت ابرسازی را تحریک کنند (فن و همکاران، ۲۰۱۵: ۲۴۶). در این رابطه نتایج پژوهش روزنفلد و همکاران (۲۰۰۱) نیز نشان می‌دهد که وجود ذرات گرد و غبار ( $PM_{2.5}$ ) در اتمسفر می‌تواند بر الگوهای بارش در مقیاس منطقه‌ای و جهانی تأثیر بگذارد. در مناطق خشک و نیمه خشک، ذرات گرد و غبار توسط

جدول ۵: خروجی مدل رگرسیون چند متغیره انواع آئروسول‌های موثر در بارش در منطقه جنوبشرق ایران

متغیر مستقل	ضریب رگرسیون ( $\beta$ )	آماره t	سطح معناداری (p-value)	ضریب همبستگی (r)	انحراف استاندارد
ذرات $PM_{10}$	۰/۸۷	۲/۸	۰/۰۵	۰/۸۹۵	۰/۰۷
ذرات ( $PM_{2.5}$ )	۰/۹۴	۳/۵	۰/۰۵	۰/۹۳۶	۰/۰۵
کربن سیاه	۰/۸۶	۲/۶۵	۰/۰۵	۰/۸۷۵	۰/۰۸
سولفات ( $SO_4$ )	۰/۸۹	۲/۹	۰/۰۵	۰/۹۱۱	۰/۰۶
نمک دریا	۰/۷۶	۱/۹	۰/۰۵	۰/۷۵۶	۰/۱



شکل ۸: نقشه پراکنده مکانی انواع آئروسول‌های موثر در حالت اول و دوم مورد مطالعه

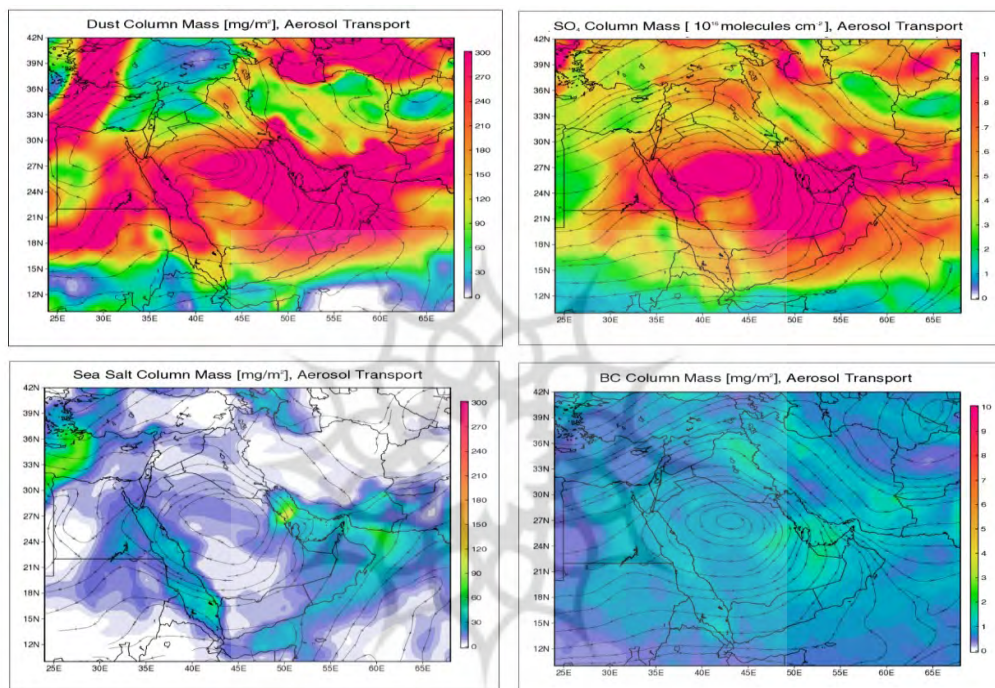


شکل ۹: نقشه پراکنده مکانی انواع آئروسول‌های موثر در حالت سوم مورد مطالعه

می‌شود.

هم‌چنین نتایج مطالعات متعدد نشان می‌دهد وجود هواویزهایی از نوع سولفات و کربن سیاه در ایران را می‌توان به موقعیت ساحلی منطقه، منابع طبیعی مانند فیتوپلانکتون‌های دریایی و منابع انسانی از جمله آلودگی ناشی از سوخت‌های فسیلی نسبت داد (رئیس‌پور و خسروی، ۹۹:۱۴۰۰ و ترکاشوند، ۲۰:۱۳۹۶).

تاثیرگذارترین آئروسول‌ها 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 می‌باشد (شکل ۸ و ۹). غلظت بالای ذرات گرد و غبار در استان‌های سیستان و بلوچستان را می‌توان به عوامل متعددی نسبت داد که در درجه اول به موقعیت جغرافیایی، آب و هوا و ویژگی‌های سطح زمین مربوط



شکل ۱۰: نقشه‌های پراکندگی مکانی انواع آئروسول‌های موثر در هر سه حالت مورد مطالعه

تواند منجر به تغییرات منطقه‌ای در تأثیر آنها بر الگوهای بارش شود.

بررسی پراکندگی مکانی آئروسول‌ها در هر سه حالت مورد بررسی در این پژوهش نشان می‌دهد که تمرکز اصلی عمدتاً در استان سیستان و بلوچستان و سپس استان هرمزگان و شرق استان کرمان می‌باشد. نکته قابل تامل این است که از نظر نوع آئروسول‌های موثر در بارش بیشترین میزان در اولویت اول از نوع ذرات گرد و غبار با قطر  $PM_{2.5}$  و  $PM_{10}$  می‌باشد (شکل ۸ و ۱۰). این موضوع نشان می‌دهد در رخداد بارش‌های ایران نقش ذرات گرد و غبار بسیار پررنگ‌تر از سایر انواع آئروسول‌ها می‌باشد. در ایران،

نتایج برخی از مطالعات نشان می‌دهد که وجود هواویزهایی از نوع کربن سیاه می‌تواند موجب افزایش بارش شود. در این زمینه می‌توان به پژوهشی که توسط بائر و همکاران (۲۰۱۰) انجام شده است اشاره نمود که در مطالعات خود به این نتیجه رسیدند که آئروسول‌های کربن سیاه می‌توانند در برخی موارد با افزایش همرفت و تشکیل ابر زمانی که گرما را در ارتفاعات بالاتر جذب می‌کنند، بارش را افزایش دهند. علاوه بر این راماناتان و همکاران (۲۰۰۱) نیز معتقدند که اثرات ترکیبی سولفات و آئروسول‌های کربن سیاه بر بارش می‌تواند پیچیده‌تر باشد. وجود مقادیر خاصی از این ذرات معلق در جو و نحوه توزیع جغرافیایی آن می‌تواند

کربن سیاه در استان کرمان و استان هرمزگان می‌باشد (شکل ۹). آئروسول‌های سولفات و کربن سیاه که عمدتاً از منابع انسانی مانند احتراق سوخت‌های فسیلی و فعالیت‌های صنعتی منشأ می‌گیرند، به عنوان هسته‌های تراکم ابر عمل می‌کنند و می‌توانند 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 می‌شود (روزنفلد و همکاران، ۲۰۰۸:۹۲۶).

### جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

آئروسول‌ها به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ذرات معلق در اتمسفر تأثیر قابل‌توجهی بر اقلیم مناطق مختلف دارند. در ایران، که به دلیل موقعیت جغرافیایی خاص و عوامل انسانی، تحت تأثیر منابع مختلف آئروسول‌ها (از جمله گرد و غبار، آلاینده‌های صنعتی و دود آتش‌سوزی جنگل‌ها) قرار دارد، بررسی رابطه بین آئروسول‌ها و بارش از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تحلیل فضایی این رابطه اطلاعات ارزشمندی در مورد توزیع فضایی و زمانی آئروسول‌ها و تأثیر آن‌ها بر الگوهای بارش در سراسر کشور ارائه می‌دهد. در این پژوهش، رابطه میان شاخص AOD و بارش در منطقه جنوب شرق ایران با استفاده از داده‌های روزانه سنجنده مادیس و داده‌های روزانه بارش ماهواره GPM مورد بررسی قرار گرفت. برای تحلیل این رابطه، از داده‌های ۴۳ ایستگاه هواشناسی در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ استفاده شد و روزهای بارشی با شاخص AOD جهت انجام تحلیل‌های رگرسیونی انتخاب شدند. در این مطالعه از مدل رگرسیون موزون جغرافیایی به دلیل قابلیت آن در آشکارسازی ناهمگنی‌های فضایی استفاده شد. نتایج حاصل از این مطالعه 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

طوفان‌های گرد و غبار یک پدیده رایج است که اغلب از مناطق خشک و نیمه خشک مجاور منشاء می‌گیرد. منطقه جنوب‌شرق ایران از مناطقی است که در کانون اصلی ریزگرد‌های داخلی و خارجی قرار گرفته است. طبق مطالعه زارعی و همکاران (۱۳۹۶) رویدادهای گرد و غبار بسته به شرایط محیطی در مناطق مختلف می‌توانند 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 می‌تواند بر الگوهای بارندگی فصلی تأثیر بگذارد. به عنوان نمونه در طول بهار و اوایل تابستان، زمانی که طوفان‌های گرد و غبار به دلیل وزش بادهای سیستان بیشتر است، تأثیر محسوسی بر ویژگی‌های ابر و به طور بالقوه بر الگوهای بارش دارد (رضایی بنفشه و همکاران، ۲۰۱۴:۱۳۹۹).

بررسی نقشه‌های مربوط به رابطه بارش با شاخص AOD دو روز قبل از آن (حالت سوم) نشان می‌دهد برخلاف حالت‌های اول و دوم در این حالت یعنی دو روز قبل از رخداد بارش، آئروسول‌های موثر در بارش از تنوع بیشتری برخوردار می‌باشند ضمن اینکه حضور گرد و غبار با قطر PM10 نسبتاً کمتر می‌باشد. در نقشه حالت سوم در جنوب ایران شامل بخش‌های جنوبی استان‌های فارس و کرمان و هم چنین استان هرمزگان و جنوب سیستان و بلوچستان عمدتاً آئروسول‌ها از نوع نمک دریا مشاهده می‌شود (شکل ۹). در مناطق ساحلی، تبخیر آب دریا منجر به انتشار ذرات آئروسول نمک دریا در جو می‌شود (فنگ و همکاران، ۲۰۱۷:۱). این ذرات می‌توانند به عنوان هسته‌های متراکم ابر عمل کنند و سطوحی را برای بخار آب فراهم کنند تا متراکم شده و قطرات ابر را تشکیل دهند (باولین و همکاران، ۲۰۱۹:۱). وجود این ذرات نمک دریایی می‌تواند تشکیل ابرها و احتمال بارش را افزایش دهد (گو و همکاران، ۲۰۲۲:۲). گروه دوم از آئروسول‌های موثر در بارش کربن سیاه و سولفات می‌باشد که بیشترین فراوانی



خشک بلوچستان پاکستان در جنوب شرق همراه با منابع داخلی ریزگردها نظیر دشت لوت در طول سال با تراکم بالایی از این نوع آئروسول‌ها مواجه است و این می‌تواند الگو و رفتارهای بارشی این منطقه را دستخوش تغییر کند. نتایج حاصل از تحلیل پراکنش زمانی آئروسول‌های موثر در بارش نشان داد که اکثر این معنی داری رابطه در شش ماه سال شامل ماههای جولای، آگوست، نوامبر، دسامبر، ژانویه و فوریه برقرار است. وجود معنی داری در ماههای فصل تابستان نظیر جون و آگوست می‌تواند ناشی از فعال بودن کم فشار موسمی و همچنین وزش بادهای ۱۲۰ روزه باشد که هم می‌تواند 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 می‌تواند ناشی از فعال بودن سامانه کم فشار کم فشار سودانی باشد که در این ماهها ضمن وارد نمودن رطوبت، مقادیر زیادی ریزگرد را از بیابان‌های سوریه، عراق و عربستان از سمت خلیج فارس وارد ایران می‌کند. بطور کلی نتایج این پژوهش نشان داد که بین آئروسول‌ها و بارش در جنوب شرق ایران رابطه معنی داری وجود دارد و در اثر حضور این ذرات در جنوب شرق ایران در رفتار بارش تاثیر گذاشته و باعث تغییرات در شدت و مقدار آن می‌شود. 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 پژوهش‌های بیشتری در این زمینه انجام شود.

۰/۳ تا حداکثر ۰/۹۶ وجود دارد. تحلیل فضایی رگرسیون موزون جغرافیایی بر روی داده‌های مورد بررسی در دوره مطالعه نیز نشان داد در حالت اول ۷۲/۹۷ درصد، حالت دوم ۴۱/۸۵ درصد و حالت سوم ۴۰ درصد از مجموع یاخته‌های مورد بررسی در مدل از نظر رابطه بین این دو متغیر معنی دار هستند که این موضوع ارتباط بین بارش و آئروسول‌ها در این منطقه از ایران را به خوبی نشان می‌دهد. بررسی رابطه بین مقادیر بارش و شاخص AOD در روزهای بارشی نشان می‌دهد که افزایش تراکم آئروسول‌ها از آستانه خاصی به بعد می‌تواند موجب کاهش فراوانی بارش شود. چنین یافته‌ای در مطالعات جیانگ و همکاران (۲۰۱۶) ژائو و همکاران (۲۰۱۹) نیز مطرح شده است به نحوی که آنها در مطالعات خود نشان دادند که افزایش غلظت آئروسول‌ها می‌تواند منجر به افزایش رقابت برای جذب رطوبت در اطراف این ذرات شده و با کوچکتر شدن اندازه ذرات بارش کاهش می‌یابد. نتایج حاصل از بررسی پراکنش فضایی یاخته‌های معنی دار در حالت‌های اول و دو نشان داد که این پراکنش از الگوی خاصی برخوردار است به نحوی که اکثر این یاخته‌ها در جنوب شرق ایران اکثر در محدوده استان سیستان و بلوچستان و بعد از آن در کرمان و هرمزگان 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 این موضوع به خوبی نشان می‌دهد به دلیل وجود بیابان‌های مجاور جنوب شرق ایران نظیر بیابان‌های

## منابع

۱. امیدوار، کمال، امیدی، زهرا. ۱۳۹۲. تحلیل پدیده گردوغبار در جنوب و مرکز استان فارس، کاوش‌های جغرافیایی مناطق بیابانی، سال اول، شماره اول، صفحات ۸۵-۱۱۴.
۲. بحری، علی، خسروی، یونس، توکلی، آزاده. ۱۳۹۸. مقایسه عملکرد روش رگرسیون وزن دار جغرافیایی و روش حداقل مربعات برای مدل سازی روابط فضایی دمای سطح دریای عمان. نشریه علمی پژوهشی
۳. ترکاشوند، محمد قاسم. 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.
۴. توانگرریزی، ساناز. ۱۳۹۴. بررسی نقش آئروسول‌ها ی جوی در فرایند تشکیل ابر و بارش با استفاده از مدل

- مدرس علوم انسانی، شماره پیاپی ۳۸، صفحات ۱۹۶-۱۶۹.
14. Alizadeh-Choobari, O., Zawar-Reza, P and Sturman, A, 2014, The wind of 120 days and dust storm activity over the Sistan Basin, Atmospheric Research, Volume 143, 328-341.
15. Andreae MO, Rosenfeld D, Artaxo P, Costa AA, Frank GP, Longo KM, Silva-Dias MA, 2004, Smoking rain clouds over the Amazon. Science, 303(5662), 1337-1342.
16. Albrecht, B. A, 1989, Aerosols, Cloud Microphysics, and Fractional Cloudiness. Science, 245(4923), 1227-1230.
17. Bauer, S., Menon, S., Koch, D., Bond, T., & Tsigaridis, K, 2010, A global modeling study on carbonaceous aerosol microphysical characteristics and radiative effects. Atmospheric Chemistry and Physics, 10(15), 7439-7456.
18. Baolin, J., Wenshi, L., Fangzhou, L., Baojun, C, 2019, Simulation of the effects of sea-salt aerosols on cloud ice and precipitation of a tropical cyclone, Atmospheric Science Letters, Vol 20, Issue 9, 1-9.
19. Berg, W., T. L'Ecuyer, and C. Kummerow, 2006, Rainfall climate regimes: The relationship of regional TRMM rainfall biases to the environment, J. Appl. Meteorol. Climatol., 45(3), 434-454.
20. Chavez Steven P., Barros Ana P. 2023. Aerosol indirect effects on orographic clouds and precipitation, Frontiers in Earth Science, 11, 1-20.
21. Dahari, N., Latif, M.T., Muda, K. and Hussein, N, 2020, Influence of Meteorological Variables on Suburban Atmospheric PM2.5 in the Southern Region of Peninsular Malaysia. Aerosol Air Qual. Res. 20: 14-25.
22. Feng, L., Shen, H., Zhu, Y, 2017, Insight into Generation and Evolution of Sea-Salt Aerosols from Field Measurements in Diversified WRF Chem. پایان نامه کارشناسی ارشد هواشناسی، دانشگاه یزد، صفحه ۱۸۰.
۵. حاتمی بهمن بیگلو خداکرم، موحدی، سعید، نارنگی فرد، مهدی. 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 ۴۸-۳۷.
۶. ۶. حسینی قهفرخی، لیلیا. ۱۳۹۰. مطالعه نقش آبروسل ها در تشکیل ابر و بارش در قسمت های مرکزی و جنوب ایران با استفاده از اطلاعات ماهواره ای، پایان نامه کارشناسی ارشد در رشته هواشناسی، صفحه ۲۱۰.
۷. رضایی بنفشه، مجید، جهانبخش اصل، سعید، آب خرابات، شعیب، رسولی، علی اکبر، کریمی، مصطفی. ۱۳۹۹. نقش بادهای ۱۲۰ روزه سیستان در نوسانات رطوبت شرق و جنوب شرق ایران، جغرافیا و برنامه‌ریزی، شماره ۲۴(۷۳)، صفحات ۱۹۹-۲۱۷.
۸. رئیس پور، کوهزاد، خسروی، یونس. ۱۴۰۰. پایش بلندمدت غلظت آلاینده کربن سیاه (BC) در ایران با استفاده از داده‌های مدل مبنای NASA/MERRA-2، فصلنامه علوم محیطی، شماره ۱۹(۳)، صفحات ۹۹-۱۲۲.
۹. رئیس پور، کوهزاد. ۱۳۹۳. اقلیم‌شناسی سینوپتیکی، ماهواره‌های گرد و غبارهای غرب و جنوب غرب ایران، رساله ی دکتری در رشته‌ی جغرافیای طبیعی گرایش اقلیم‌شناسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، صفحه ۲۶۵.
۱۰. زارعی، فاطمه، قزایلو، مریم، علیزاده چوبری، امید. ۱۳۹۶. تأثیر هواویزها بر بارش در شرایط رطوبت‌های نسبی متفاوت: مطالعه موردی، مجله ژئوفیزیک ایران، شماره ۱۱(۲)، صفحات ۱۳۵-۱۵۵.
۱۱. علیجانی، بهلول، کوهزاد رئیس پور. ۱۳۹۰. تحلیل آماری و همبستگی توفان‌های گرد و غبار در جنوب شرق ایران (مطالعه موردی: منطقه سیستان)، مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، شماره ۵، صفحات ۱۲۹-۱۰۷.
۱۲. عساکره، حسین. ۱۳۹۰. مبانی اقلیم‌شناسی آماری، انتشارات دانشگاه زنجان. طیف نگار، چاپ اول، صفحه ۵۵۰.
۱۳. لشکری، حسن. ۱۳۸۴. تحلیل سینوپتیکی دو نمونه از الگوی بارشهای زمستانه جنوب شرق ایران، فصلنامه

33. Rosenfeld, D, 2008, Suppression of Rain and Snow by Urban and Industrial Air Pollution. *Science*, 287, Issue 5459, 1793-1796.
34. Rosenfeld, D., Andreae, M. O., Asmi, A., Chin, M., de Reus, M., Dubovik, O & Yu, F, 2001. Aerosol forcing of precipitation, clouds, and circulation. *Science*, 294(5549), 2119-2124.
35. Rosenfeld, D., and W. L. Woodley, 2000. Convective clouds with sustained highly supercooled liquid water down to 37C, *Nature*, 405, 440-442.
36. Rosenfeld, D., and I. Lensky, 1998. Satellite-based insights into precipitation formation processes in continental and maritime convective clouds, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 79, 2457-2476.
37. Ramanathan, V., Crutzen, P. J., Kiehl, J. T., & Rosenfeld, D, 2001, Aerosols, climate, and the hydrological cycle. *Science*, 294(5549), 2119-2124.
38. Sun, N., Fu, Y., Zhong, L. 2022. Aerosol effects on the vertical structure of precipitation in East China. *npj Clim Atmos Sci* 5, 60, 1-9.
39. Stevens, B., and G. Feingold, 2009, Untangling aerosol effects on clouds and precipitation in a buffered system, *Nature*, 461, 607-613.
40. Takemura, T., Nozawa, T., Emori, S., Nakajima, T.Y. and Nakajima, T. 2005. Simulation of climate response to aerosol direct and indirect effects with aerosol transport-radiation model, *J. Geophys. Res.*, 110, 1-16.
41. Tsai, I., Yang, S., Shiu, C., Chen, Y., Chen, C., Lee, W., & Hsu, H. 2024. Aerosol impacts on the East Asian winter monsoon: Insights from TaiESM1 and CMIP6 simulations. *International Journal of Climatology*, 1-17.
42. Wang, M., and Penner, J. 2009. Aerosol indirect forcing in a global model with particle nucleation, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 239-260.
43. Wang, c, 2013. Impact of anthropogenic absorbing aerosols on clouds and precipitation: A review of recent Marine and Coastal Atmospheres. *Sci Rep* 7, 1-12.
23. Guo, J., Luo, Yang, J., Furtado, K., Lei, H, 2022, Effects of anthropogenic and sea salt aerosols on a heavy rainfall event during the early-summer rainy season over coastal Southern China, *Atmospheric Research*, 265, 1-15.
24. Huang, KT., Sui, CH., Lo, MH, 2023, Effects of anthropogenic aerosols on the evolution of Indian summer monsoon. *Terr Atmos Ocean Sci* 34, 10, 1-23.
25. Jiang, M., Z. Li, B. Wan, and M. Cribb, 2016, Impact of aerosols on precipitation from deep convective clouds in eastern China, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121, 9607-9620.
26. Khalili, A., & Rahimi, D. (2017). The synoptic patterns of dust storms in Southeastern Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 130(3-4), 905-917.
27. Kelly, G.M., Taubman, B.F., Perry, L.B., Sherman, J.P., Soulé, P.T. and Sheridan, P.J, 2013, Relationships between aerosols and precipitation in the southern Appalachian Mountains. *Int. J. Climatol.*, 33: 3016-3028.
28. Koren, I., Altaratz, O., Remer, L, 2012, Aerosol-induced intensification of rain from the tropics to the mid-latitudes. *Nature Geosci.* 5, 118-122.
29. Liu, Y., Zhou, Y. & Lu, J, 2020. Exploring the relationship between air pollution and meteorological conditions in China under environmental governance. *Sci Rep* 10, 1-11.
30. Mashat, A.S. and A.M. Awad, 2015. Synoptic characteristics of the primary widespread winter dust patterns over the northern Arabian Peninsula, *Air Quality Atmosphere & Health*, 9: 503-516.
31. Rashki, A., Arjmand, M., & Kaskaoutis, D. G. (2013). Assessment of dust storms duration and frequency in southwestern Iran from 2000 to 2011. *Natural Hazards*, 65(3), 1577-1593.
32. Rosenfeld D, 2000, Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution, *Science*, 287(5459):1793-6.

- PM2.5 over Typical Regions of China. *Atmosphere* 11(9): 906, 1-15.
47. Zhang, A., Lu, X., & Zhang, Q. 2008. Aerosol effects on precipitation: A review. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 70(13), 1598-1614.
48. Zubler, E. M., U. Lohmann, D. Lüthi, C. Schär, and A. Muhlbauer, 2011, Statistical Analysis of Aerosol Effects on Simulated Mixed-Phase Clouds and Precipitation in the Alps. *J. Atmos. Sci.*, 68, 1474–1492.
- progresses, *Atmospheric Research*, Volume 122, 237-249.
44. Winju, I., Kim, J., & Kim, S. 2014. Effects of aerosols on precipitation: A review and future research needs. *Atmospheric Research*, 143, 269-284.
45. Zhao, A.D., Stevenson, D.S. & Bollasina, M.A. 2019. The role of anthropogenic aerosols in future precipitation extremes over the Asian Monsoon Region. *Clim Dyn* 52, 6257–6278.
46. Zhao, Xin, Yue Sun, Chuanfeng Zhao, and Huifei Jiang, 2020. Impact of Precipitation with Different Intensity on

