

صص ۵۳-۶۶

تحلیل اثر پدیده خشک‌سالی بر رخدادهای گردوغبار مناطق مختلف استان قزوین

سمیرا زندی فر

استادیار بخش بیابان، موسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

محمد خسروشاهی

دانشیار گروه تحقیقات بیابان، موسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

زهرا ابراهیمی خوسفی*

دانشیار گروه علوم و مهندسی محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه جیرفت، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۹/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۷/۱۱

چکیده

این مطالعه باهدف بررسی تأثیر خشک‌سالی بر رخدادهای گردوغبار شهرستان‌های مختلف استان قزوین انجام شد. از داده‌های بارندگی و دما به منظور محاسبه شاخص بارش و تبخیر-تعرق استاندارد شده (SPEI) و از داده‌های سه‌ساعته رخدادهای گردوغبار برای محاسبه تعداد روزهای غبارآلود در ایستگاه‌های مطالعاتی استفاده گردید. بر اساس ضریب همبستگی اسپیرمن، میزان اثرپذیری رخدادهای گردوغبار از پدیده خشک‌سالی با در نظر گرفتن تأخیرهای زمانی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. حداکثر میزان همبستگی بین SPEI و تعداد روزهای غبارآلود در شهرستان قزوین بدون در نظر گرفتن تأخیر زمانی برابر با $-0/38$ و در سطح اطمینان ۹۹٪، معنی‌دار نشان داده شد که بیانگر اثرپذیری هم‌زمان رخدادهای گردوغبار از پدیده خشک‌سالی در مرکز استان است. نتایج همچنین نشان داد که زمان پاسخگویی رخدادهای گردوغبار به خشک‌سالی هواشناسی با تأخیر یک‌ساله در شهرستان معلم کلایه در سطح اطمینان ۹۰٪ معنی‌دار است ($r=-0/52$). این در حالی است که در سایر شهرستان‌های استان قزوین، ارتباط معنی‌داری بین دو پدیده رخدادهای گردوغبار و خشک‌سالی هواشناسی مشاهده نشد.

واژگان کلیدی: روزهای غبارآلود، کیفیت هوا، شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده، خشک‌سالی هواشناسی.

مقدمه

گردوغبار به ذرات کوچک‌تر از $0/6$ میلی‌متر گفته می‌شود که می‌توانند به مدت طولانی در هوا به صورت معلق باقی بمانند، توفان‌های گردوغبار ایجاد کنند و حتی مناطق دوردست را تحت تأثیر قرار دهند؛ این در حالی است که ماسه به ذرات خاکی با قطر $0/6$ تا 1 میلی‌متر اطلاق می‌شود که چون از ذرات درشت‌تر تشکیل شده‌اند، فقط در مجاورت سطح زمین حرکت می‌کنند و وارد طبقات بالاتر اتمسفر نمی‌شوند (آرامی و همکاران، ۱۳۹۷). وقوع پدیده گردوغبار از جمله

وقایع معمول در نواحی خشک و نیمه‌خشک و مناطق بیابانی هست (درگاهیان و همکاران، ۱۳۹۷؛ خسروشاهی و همکاران، ۱۳۹۹). بسته به غلظت گردوغبار تولید شده، آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از این پدیده بر سلامت انسان و محیط‌زیست اثرات نامطلوبی برجا گذاشته است (احتمایی و همکاران، ۱۳۹۸؛ خوش‌اخلاق و همکاران، ۱۳۹۲).

یکی از عوامل مؤثر بر تشدید فعالیت رخدادهای گردوغبار، پدیده خشک‌سالی است (Kandakji et al. 2021; Hamzeh et al. 2021; Arcusa et al. 2020) که بسته به شرایط محیطی مناطق مختلف، زمان اثرپذیری واقعه گردوغبار از این پدیده اقلیمی متفاوت است. درک چگونگی تأثیر خشک‌سالی بر رخدادهای گردوغبار نیازمند تحلیل داده‌های طولانی مدت مربوط به هر دو پدیده خشک‌سالی و توفان‌های گردوغبار است (Javadian et al. 2019). اخیراً گزارش شده که خشک‌سالی نقش مهمی در پیش‌بینی مکانی منابع تولید گردوغبار در مناطق خشک ایران مرکزی (Nafarzadegan et al. 2021) و همچنین پیش‌بینی روند تغییرات زمانی آن در نیمه غربی ایران داشته است (Ebrahimi-Khusfi et al. 2021). رابطه بین خشک‌سالی و روند فراوانی توفان‌های غرب و جنوب غرب ایران برای دوره آماری ۲۰۱۴-۱۹۹۰ توسط (Ansari Ghoghghar et al. 2021) مورد بررسی قرار گرفته است. آن‌ها دریافتند که در بسیاری از ایستگاه‌های سینوپتیک واقع در این منطقه همبستگی معنی‌داری بین شاخص بارش استاندارد شده (SPI)^۱ و روند تغییرات فراوانی توفان‌های این منطقه از کشور وجود دارد. (Roustaei et al. 2021) با استفاده از روش همبستگی متقاطع به بررسی ارتباط بین شاخص استاندارد شده توفان گردوغبار (SDSI)^۲ و SPI در مناطق خشک جنوب ایران طی بازه زمانی ۵۰ ساله (۲۰۱۴-۱۹۶۵) پرداختند. در این مطالعه، حداکثر ضریب همبستگی معنی‌دار بین SPI و SDSI در سری‌های زمانی ۱۲ ماهه SPI و سری زمانی ۱۸ ماهه SDSI مشاهده شد که برابر با ۰/۲۲- بود؛ به عبارت دیگر، تغییر در رخدادهای گردوغبار مناطق جنوب ایران متأثر از تغییرات طولانی مدت پدیده خشک‌سالی بوده است. اثر تأخیری خشک‌سالی بر گردوغبارهای به وقوع پیوسته در مناطق جنوب شرق ایران نیز در مطالعه انجام شده توسط (Ebrahimi-Khusfi et al. 2021) نیز به اثبات رسیده است. (Javadian et al. 2019) به منظور بررسی اثر خشک‌سالی هواشناسی بر توفان‌های گردوغبار جنوب غرب ایران به ترتیب از شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI)^۳ و عمق اپتیکی آئروسول‌ها (AOD)^۴ استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۸، AOD همبستگی منفی قوی با شاخص خشک‌سالی ۶ ماهه ($r = -0/62$) داشته است. با بررسی ارتباط میان SPI و فراوانی روزهای همراه با گردوغبار در استان‌های قزوین و البرز مشخص شد که در ایستگاه کرج همبستگی معناداری میان این دو پدیده در مقیاس سالانه و ماهانه وجود نداشته درحالی‌که در ایستگاه قزوین میان روزهای همراه با گردوغبار و مقادیر SPI در بازه ۱۸ ماهه، همبستگی ضعیفی در سطح اطمینان ۹۰٪ وجود داشته است (علی پور و همکاران،

^۱ Standardized Precipitation Index

^۲Sever Dust Storm Index

^۳Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index

^۴Aerosol Optical Depth

۱۳۹۷). در یک بررسی، میزان تأثیرپذیری توفان‌های گردوغبار ایران از نوسانات اقلیمی و -SPEI با استفاده از ضریب همبستگی اسپیرمن و روند تغییرات آن‌ها بر اساس آزمون من-کندال برای دوره آماری ۲۰۱۴-۱۹۹۰ تجزیه و تحلیل شده است (Araghinejad et al. 2019). این محققین دریافتند که از ۳۷ ایستگاه هواشناسی مورد بررسی در ایران، ۶ ایستگاه اردبیل، بیرجند، مشهد، سبزوار، یزد و سمنان دارای روند نزولی، ۵ ایستگاه دارای روند افزایشی معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵٪ و ۲۱ ایستگاه دارای روند افزایشی معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۹٪ بوده‌اند. حداکثر میزان همبستگی بین فراوانی روزهای غبارآلود و SPEI برابر با ۰/۵۷- بوده است. در تحلیل اثر پارامترهای اقلیمی و خشک‌سالی هواشناسی بر رخدادهای داخلی شهرستان قزوین مشخص شد که روند تغییرات سالانه بارندگی و رطوبت نسبی در شهرستان قزوین، افزایشی و روند تغییرات سالانه سرعت باد و دمای متوسط هوا، کاهش یافته است. همچنین بررسی روند تغییرات ماهانه رخدادهای گردوغبار نشان داد که تنها در ماه ژوئیه روند کاهشی شدیدی در وقوع پدیده فرسایش بادی و انتشار ذرات گردوغبار داخلی، رخ داده است. در مقیاس فصلی به‌استثنای فصل زمستان که بدون روند گزارش شده است، در سایر فصول، از شدت وقوع این رویدادها به میزان قابل توجهی کاسته شده است. اثر خشک‌سالی هواشناسی بر رخداد فرسایش بادی در سطح اطمینان ۹۹ درصد، ۱۱ درصد برآورد شد (زندگی فر و همکاران، ۱۳۹۹). ناصر زاده و احمدی (۱۳۹۱) عملکرد شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی را برای بازه زمانی مشترک ۸۴-۱۳۸۳ تا ۹۱-۱۳۹۰ در استان قزوین مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که شاخص‌های بارندگی استاندارد شده و شاخص دهک‌ها از مناسب‌ترین شاخص‌ها جهت ارزیابی وضعیت خشک‌سالی در منطقه مطالعاتی آن‌ها است. قاسمی و همکاران (۱۴۰۰) با استفاده از دو شاخص SPI و SPEI به پایش و ارزیابی خشک‌سالی هواشناسی دامنه‌های جنوبی البرز در بازه زمانی ۹۷-۱۳۶۶ پرداختند. نتایج این بررسی عملکرد بهتر SPEI را در مقایسه با SPI جهت ارزیابی شرایط خشک‌سالی البرز جنوبی نشان داد. همچنین، این پژوهشگران دریافتند که خشک‌سالی کوتاه مدت در نواحی شرقی و خشک‌سالی بلند مدت در نواحی مرکزی و غرب البرز جنوبی بیشتر بوده است.

نتایج حاصل از پایش و پهنه‌بندی خصوصیات خشک‌سالی هواشناسی با استفاده از مدل زنجیره مارکوف و روش‌های زمین آمار در استان قزوین نشان داد با افزایش مقیاس زمانی، مقادیر مثبت و منفی از نظر فراوانی کاهش و از نظر تداوم افزایش می‌یابند. بر اساس مدل گوسی در مقیاس‌های زمانی ۱، ۶، ۹، ۱۲ و ۲۴ ماهه و مدل نمایی در مقیاس‌های زمانی ۳ و ۴۸ ماهه، مناسب‌ترین مدل‌ها جهت برازش واریوگرام انتخاب گردید. همچنین نتایج نشان داد با افزایش مقیاس زمانی، وسعت خشک‌سالی و همچنین وضعیت خشک‌سالی‌ها از شرق به غرب استان کاهش یافته است (مقصود و همکاران، ۱۳۹۵).

نظر به اینکه آگاهی از وضعیت رخدادهای گردوغبار و میزان تأثیرپذیری آن از پدیده خشک‌سالی در مناطق مختلف نیازمند پایش و بررسی مداوم است و تاکنون مطالعه‌ای راجع به تحلیل نوسانات تعداد روزهای غبارآلود داخلی (INDD)^۹

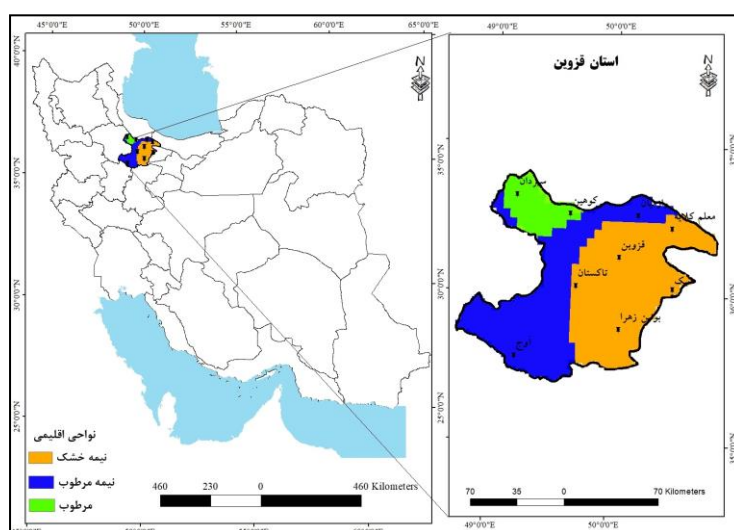
^۹Internal Dusty Days

و میزان تأثیرپذیری آن از وضعیت خشک‌سالی هواشناسی در استان قزوین انجام نشده است، در این پژوهش به این مهم پرداخته شده است. تحلیل وضعیت این دو پدیده می‌تواند درک ما را نسبت به میزان تأثیرپذیری رخداد‌های گردوغبار از پدیده خشک‌سالی در زمان‌های مختلف افزایش دهد. بر این اساس پژوهش حاضر باهدف اصلی تحلیل وضعیت خشک‌سالی و رخداد‌های گردوغبار و کشف همبستگی بین این دو پدیده در نواحی مختلف استان به انجام رسیده است. یافته‌های این پژوهش به شناسایی بهتر مناطقی که در مهر و موم‌های گذشته بیشتر در معرض خطر پدیده فرسایش بادی و خشک‌سالی بوده‌اند، کمک می‌کند و لذا مدیران و تصمیم‌گیرندگان بهتر می‌توانند استراتژی‌های مناسب را جهت مبارزه با خطرات آلودگی هوا در این مناطق تدوین نمایند.

داده‌ها و روش‌ها

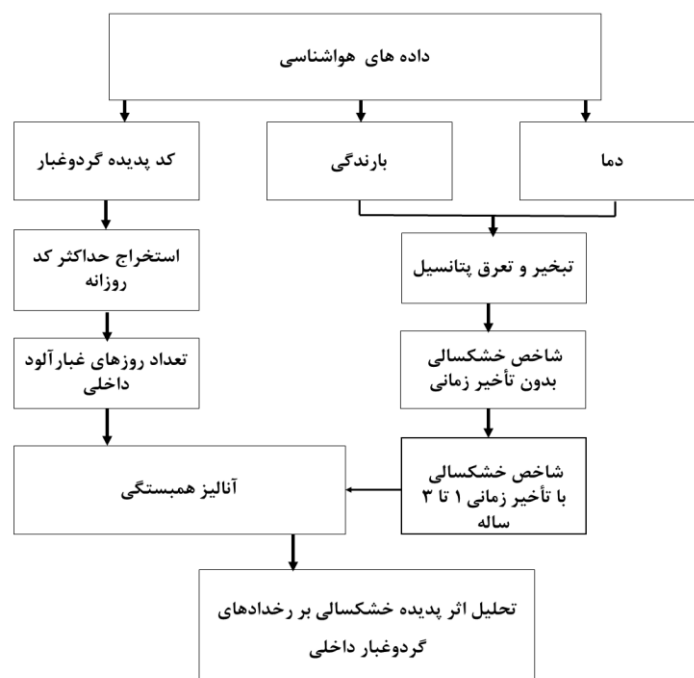
منطقه مورد مطالعه

استان قزوین به‌عنوان منطقه مطالعاتی پژوهش حاضر انتخاب شده است. از دیدگاه زمین‌شناسی، این استان در فصل مشترک البرز باختری و لبه شمالی ایران مرکزی قرار دارد و از دیدگاه ریخت‌شناسی، کوه‌های شمال قزوین از یک سری چین‌ها و راندگی‌های خاوری - باختری ساخته شده است که به سمت جنوب رانده شده‌اند. بخش شمالی دشت قزوین سیمای پهنه‌های کوهپایه‌ای را دارد که به‌تدریج به پهنه مسطح دشت قزوین می‌رسد که با نهشته‌های آبرفتی جوان و گاهی با ریخت‌های کویری چون پوسته نمکی، کفه رسی و تپه‌های ماسه‌ای پوشیده شده است. بر اساس شاخص خشکی یونپ، این استان دارای ۳ ناحیه اقلیمی نیمه‌خشک، نیمه مرطوب و مرطوب است (Ebrahimi-Khusfi et al. 2021) که سطح بیشتر آن در منطقه نیمه‌خشک واقع شده است. نقشه پهنه‌های اقلیمی و پراکنش ایستگاه‌های همدید در شکل (۱) و روش کلی تحقیق در شکل (۲) نشان داده شده است.



مأخذ: نگارندگان

شکل ۱: موقعیت ایستگاه‌های همدید و پهنه‌های اقلیمی استان قزوین



مأخذ: نگارندگان

شکل ۲: مراحل کلی روش پژوهش حاضر

محاسبه تعداد روزهای غبارآلود داخلی (INDD)

در مطالعه حاضر از تعداد روزهای غبارآلود داخلی به عنوان معیاری جهت سنجش فعالیت توفان‌های شن و گردوغبار در مناطق مطالعاتی استفاده شد. بدین منظور، داده‌های ساعتی مربوط به کد پدیده گردوغبار (کدهای ۰۷ تا ۰۹؛ ۳۰ تا ۳۵ و ۹۸) برای ایستگاه‌های همدید استان قزوین از سازمان هواشناسی این استان برای بازه زمانی (۲۰۱۶-۲۰۰۶) اخذ شد. سپس تعداد روزهای غبارآلود ماهانه با در نظر گرفتن حداکثر یک کد روزانه در مقیاس ماهانه، فصلی و سالانه برای تمام ایستگاه‌های مطالعاتی محاسبه شد.

محاسبه شاخص بارش-تبخیر و تعرق پتانسیل استاندارد (SPEI)

با توجه به اینکه در برخی از پژوهش‌ها، اثر خشک‌سالی هواشناسی بر تشدید رخداد‌های گردوغبار به اثبات رسیده است، انتظار می‌رود که یکی از عوامل مؤثر بر تغییر فعالیت فرسایش بادی در شهرستان‌های استان قزوین، وقوع پدیده خشک‌سالی باشد. به همین دلیل این موضوع با استفاده از یکی از کارآمدترین شاخص‌های ارزیابی وضعیت خشک‌سالی و ترسالی به نام شاخص بارش-تبخیر و تعرق پتانسیل استاندارد مورد بررسی قرار گرفت. این شاخص در ابتدا توسط ویسنته-سرانو^۶ (۲۰۱۰) ارائه شده و به عنوان یک شاخص اقلیمی معرفی گردیده است. این شاخص مبتنی بر محاسبه

^۶Vicente-serrano et al.

ترازمندی آب اقلیمی^۲ است و برای محاسبه به داده‌های ماهانه بارندگی و دمای هوا نیاز دارد. معادله ترازمندی آب اقلیمی به صورت زیر تعریف شده است:

$$D_i = P_i - PET_i \quad \text{رابطه (۱)}$$

که P و PET به ترتیب بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل، D اختلاف آن‌ها و I شماره ماه مورد نظر است. معادلات مختلفی برای محاسبه PET وجود دارد که در استفاده از هر یک از آن‌ها محدودیتی برای SPEI وجود ندارد. در نسخه نخست SPEI از روش ساده تورنت‌وایت^۸ (۱۹۴۸) استفاده شد ولی در نسخه دوم آن (در صورت عدم محدودیت داده) توصیه شده است که از روش پنمن-ماتیت فائو آن و همکاران^۹ (۱۹۹۸) استفاده شود که در پژوهش حاضر از روش تورنت وایت استفاده گردید. در این روش، تبخیر-تعرق پتانسیل برای هر یک از ماه‌های سال برحسب میلی‌متر با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$PET_i = 1.6 \times \left(\frac{10T_i}{I} \right)^a \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} (0.2 \times T_i)^{1.514}$$

$$a = \left(\frac{6.75 \times 10^{-7}}{I^{-3}} - \frac{7.71 \times 10^{-5}}{I^{-2}} + \frac{1.79 \times 10^{-2}}{I} \right) + 0.49$$

پس از آن مجموع مقادیر متوالی سری D در پنجره‌های زمانی مختلف محاسبه می‌شود. اگر X سری تجمعی D در پنجره زمانی معین باشد، در مرحله بعد یک توزیع نرمال مناسب بر سری X برازش می‌یابد. طبق بررسی‌های ویسنته سرانو (۲۰۱۰) توزیع لوگ-لوژیستیک^{۱۰} سه پارامتری، کارایی مناسبی در مدل‌سازی سری X دارد. فرم تابع چگالی احتمال توزیع مذکور به صورت زیر بیان شده است: (رابطه ۳)

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} \left[1 + \left(\frac{x-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta} \right]^{-2} \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن α ، β و γ به ترتیب پارامترهای مقیاس، شکل و مبدأ و X سری تجمعی مقادیر D در پنجره زمانی معین است. پارامترهای این تابع با استفاده از روش L-گشتاور با استفاده از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$\beta = \frac{2w_1 - w_0}{6w_1 - w_0 - 6w_2} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$\alpha = \frac{(w_0 - 2w_1)\beta}{\Gamma(1 + \frac{1}{\beta}) \Gamma(1 - \frac{1}{\beta})} \quad \text{رابطه (۵)}$$

معادله تبدیل‌کننده توزیع لوگ-لوژیستیک به توزیع نرمال استاندارد به صورت زیر است:

$$SPEI = W - \frac{C_0 - C_1W + C_2W^2}{1 + d_1W - d_2W^2 + d_3W^3} \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$W = \sqrt{-2\ln(p)} \quad \text{for } p \leq 0.5$$

^۲Climatic Water Balance

^۸Thornthwaite

^۹Allen et al.

^{۱۰}Log-Logistic

بر اساس این شاخص، دوره خشک‌سالی هنگامی اتفاق می‌افتد که SPEI به‌طور مستمر منفی و به مقدار ۱- یا کمتر برسد و هنگامی پایان می‌یابد که SPEI مثبت شود. کلاس‌های رطوبتی شاخص SPEI در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱: مقیاس طبقه‌بندی شدت ترسالی و خشک‌سالی در روش شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده

وضعیت رخداد	SPEI
ترسالی بسیار شدید	بیشتر از ۲
ترسالی شدید	۱/۵ تا ۱/۹۹
ترسالی معمولی	۱ تا ۱/۴۹
سال نرمال	۰/۹۹ تا ۰/۹۹
خشک‌سالی معمولی	-۱ تا -۱/۴۹
خشک‌سالی شدید	-۱/۵ تا -۱/۹۹
خشک‌سالی بسیار شدید	کمتر از -۲

(Mckee et al. 1993)

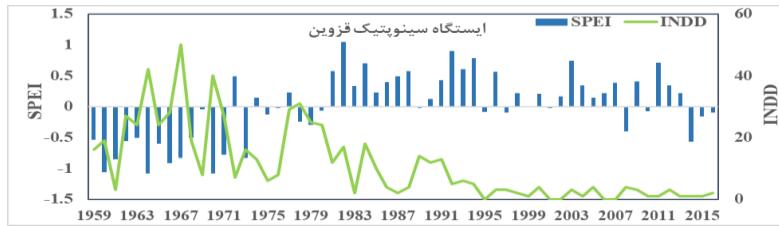
تحلیل ارتباط بین دو پدیده گردوغبار و خشک‌سالی هواشناسی

با توجه به اینکه، وقوع پدیده فرسایش بادی ممکن است هم‌زمان با وقوع خشک‌سالی‌ها در یک منطقه نباشد، در این پژوهش اثر خشک‌سالی بر INDD با در نظر گرفتن تأخیرهای زمانی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور ابتدا وضعیت نرمال و یا غیر نرمال بودن داده‌های مربوط به INDD و SPEI با استفاده از آزمون کولموگروف - اسمیرنوف مورد بررسی قرار گرفت و سپس میزان همبستگی بین آن‌ها محاسبه گردید. در نهایت، نمودار پراکنش نقطه‌ای بین SPEI و تعداد روزهای غبارآلود برای تأخیرهای زمانی معنی‌دار ترسیم گردید تا بر اساس ضریب تعیین (R^2) حاصل از برازش متغیرهای وابسته و مستقل مشخص شود که چند درصد از تغییرات در تعداد روزهای غبارآلود به دلیل وقوع پدیده خشک‌سالی هواشناسی بوده است.

بحث و یافته‌ها

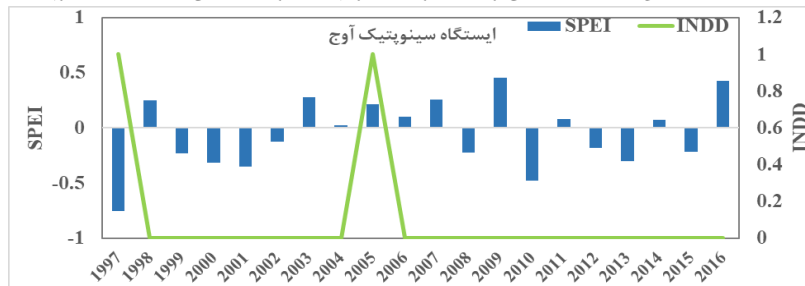
وضعیت خشک‌سالی هواشناسی و تعداد روزهای غبارآلود در نواحی مختلف استان قزوین

نتایج حاصل از این بررسی برای ایستگاه‌های مطالعاتی در شکل (۳) تا (۸) نشان داده شده است. همچنین در این پژوهش اثر خشک‌سالی بر تعداد روزهای غبارآلود محلی با در نظر گرفتن تأخیرهای زمانی یک تا سه ساله نیز مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در جدول (۲) ارائه شده است.



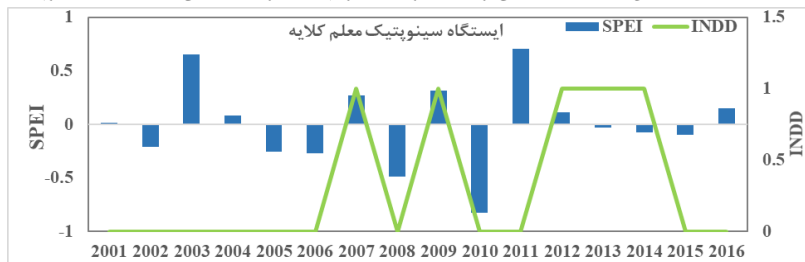
مأخذ: نگارندگان

شکل ۳: مقادیر شاخص‌های خشک‌سالی و تعداد روزهای توأم با گردوغبار محلی در ایستگاه سینوپتیک قزوین



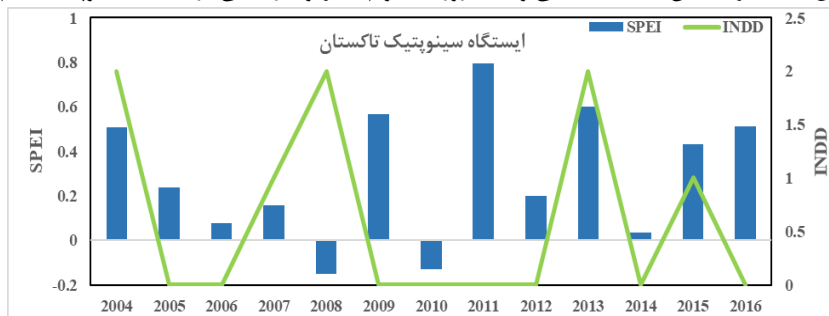
مأخذ: نگارندگان

شکل ۴: مقادیر شاخص‌های خشک‌سالی و تعداد روزهای توأم با گردوغبار محلی در ایستگاه سینوپتیک آوج



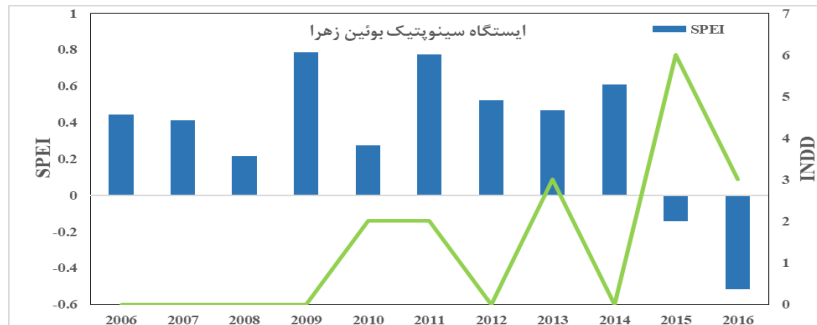
مأخذ: نگارندگان

شکل ۵: مقادیر شاخص‌های خشک‌سالی و تعداد روزهای توأم با گردوغبار محلی در ایستگاه سینوپتیک معلم کلایه



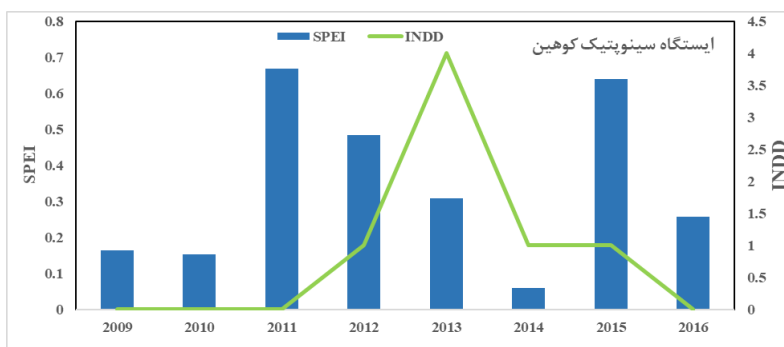
مأخذ: نگارندگان

شکل ۶: مقادیر شاخص‌های خشک‌سالی و تعداد روزهای توأم با گردوغبار محلی در ایستگاه سینوپتیک تاکستان



مأخذ: نگارندگان

شکل ۷: مقادیر شاخص‌های خشک‌سالی و تعداد روزهای توأم با گردوغبار محلی در ایستگاه سینوپتیک بوئین زهرا



مأخذ: نگارندگان

شکل ۸: مقادیر شاخص‌های خشک‌سالی و تعداد روزهای توأم با گردوغبار محلی در ایستگاه سینوپتیک کوهین

بررسی ارتباط دو پدیده خشک‌سالی و گردوغبار در ایستگاه‌های سینوپتیک استان قزوین

نتایج حاصل از بررسی توزیع داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف - اسمیرنوف (جدول ۲) نشان داد که در تمام ایستگاه‌ها به جز ایستگاه بوئین زهرا، داده‌های مربوط به SPEI از تابع توزیع نرمال تبعیت می‌کند ($Sig > 0.05$)؛ در حالی که توزیع داده‌های INDD تابع توزیع نرمال نیست ($Sig < 0.05$)؛ لذا از ضریب همبستگی اسپیرمن جهت آنالیز همبستگی بین این دو متغیر استفاده شد. نتایج حاصل از تحلیل همبستگی اسپیرمن بین شاخص خشک‌سالی هواشناسی و تعداد روزهای غبارآلود برای تمام ایستگاه‌های سینوپتیک استان قزوین در شرایط بدون تأخیر زمانی و تأخیرهای زمانی یک تا سه ساله در جدول (۳) آورده شده است.

جدول ۲. نتایج حاصل از آزمون کولموگروف-اسمینوف جهت بررسی توزیع داده‌های SPEI و INDD در ایستگاه‌های سینوپتیک استان

قزوین

نام ایستگاه	پارامتر مورد بررسی	درجه آزادی	Sig.
قزوین	SPEI	۵۸	۰/۲
	INDD		۰/۰۰۰۱
اوج	SPEI	۲۰	۰/۲
	INDD		۰/۰۰۰۲
کلايه	SPEI	۱۶	۰/۲
	INDD		۰/۰۰۰۱
تاکستان	SPEI	۱۳	۰/۲
	INDD		۰/۰۰۰۳
بوئین زهرا	SPEI	۱۱	۰/۰۳
	INDD		۰/۰۰۲
کوهین	SPEI	۸	۰/۲
	INDD		۰/۰۰۸

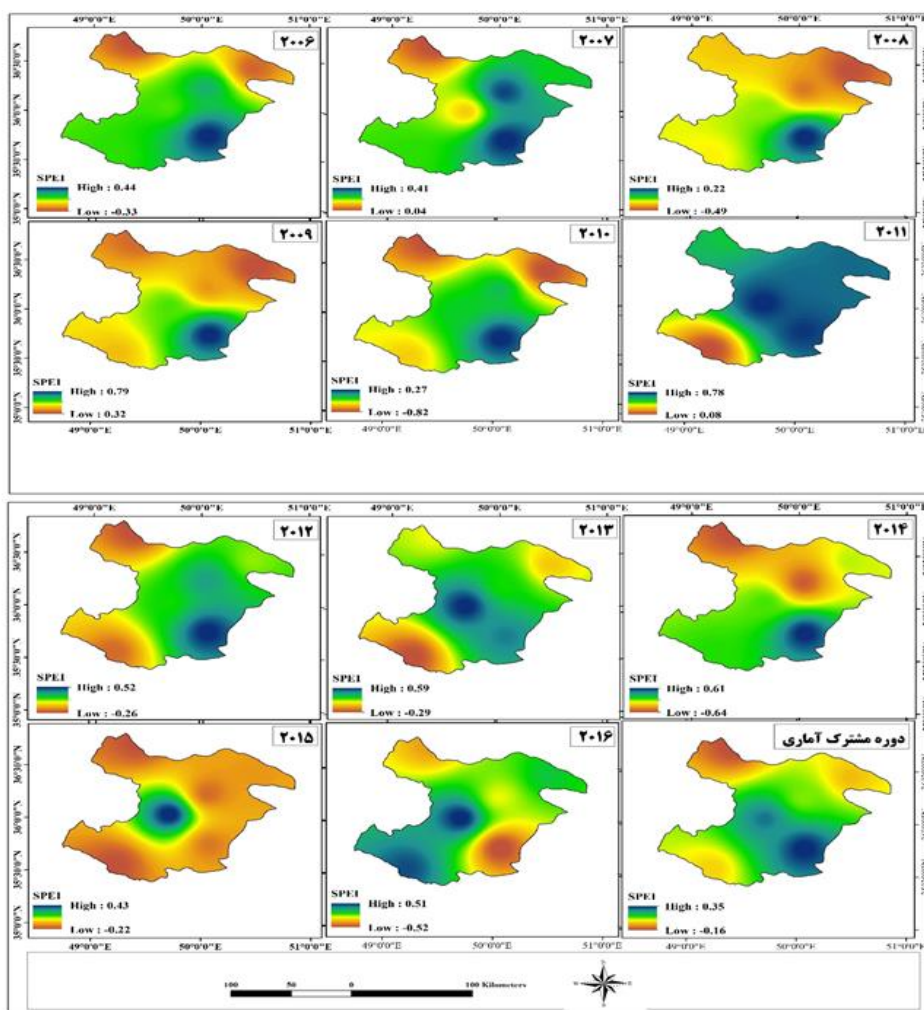
مأخذ: نگارندگان

جدول ۳: ضرایب همبستگی بین شاخص خشک‌سالی هواشناسی و تعداد روزهای توأم با گردوغبار با تأخیرهای زمانی مختلف در ایستگاه‌های سینوپتیک استان قزوین

ایستگاه	تأخیرهای زمانی (سال)			
	۰	۱	۲	۳
قزوین	-۰/۳۸**	-۰/۳۵**	-۰/۲۱	-۰/۱۷
معلم کلایه	۰/۰۳۷	-۰/۵۳*	۰/۳۵	-۰/۱۳
تاکستان	۰/۰۱۶	-۰/۰۷	-۰/۱۹	۰/۱۷
بوئین زهرا	-۰/۰۹	۰/۰۳	-۰/۰۲	-۰/۱۶
کوهین	۰/۱۱	-۰/۴۶	۰/۲۵	۰/۱۱

مآخذ: نگارندگان

به‌منظور درک بهتر وضعیت خشک‌سالی در استان قزوین، نقشه پهنه‌بندی شده SPEI برای مهر و موم‌های مشترک آماری ایستگاه‌های مطالعاتی با استفاده از روش وزن دهی فاصله معکوس تهیه گردید که نقشه‌های تولید شده در شکل (۹) نشان داده شده است.



مآخذ: نگارندگان

شکل ۹: نقشه پهنه‌بندی شاخص خشک‌سالی SPEI استان قزوین در بازه زمانی مشترک (۲۰۰۶-۲۰۱۶)

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که در ایستگاه سینوپتیک قزوین، شدیدترین خشک‌سالی‌های هواشناسی بر اساس شاخص SPEI، در مهر و موم‌های ابتدایی دوره آماری مورد بررسی به‌ویژه در مهر و موم‌های ۱۹۶۴ و ۱۹۷۰ رخ داده است. در مهر و موم‌های پایانی، شدیدترین خشک‌سالی‌ها در مهر و موم‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۴ به وقوع پیوسته است (شکل ۳). در این بازه زمانی، بیشترین تعداد روزهای توأم با گردوغبار محلی متعلق به مهر و موم‌های ۱۹۶۷ (۵۰ روز) و ۱۹۶۴ (۴۲ روز) و کمترین آن مربوط به مهر و موم‌های ۱۹۹۵، ۲۰۰۱، ۲۰۰۲، ۲۰۰۶ و ۲۰۰۷ (بدون روز غبارآلود) بوده است. این در حالی است که در سال ۱۹۸۲ که ترسالی بر این منطقه حاکم بوده $SPEI >$ ، تعداد روزهای غبارآلود محلی ۱۷ روز گزارش شده است. تداوم خشک‌سالی‌ها در مهر و موم‌های ابتدایی بازه زمانی مورد بررسی (۱۹۷۵-۱۹۵۹) و تداوم ترسالی‌ها در بازه زمانی (۱۹۹۶-۱۹۷۶)، بیشتر از سایر مهر و موم‌های آماری مورد بررسی بوده است. گرچه زمان اوج فعالیت توفان‌های شن و گردوغبار متعلق به مهر و موم‌های ابتدایی بازه زمانی مورد مطالعه بوده است و سال وقوع آن‌ها دقیقاً منطبق با سال وقوع خشک‌سالی‌های شدید در منطقه نبوده است؛ ارتباط معکوس و معنی‌داری بین شاخص خشک‌سالی و تعداد روزهای غبارآلود بدون در نظر گرفتن تأخیر زمانی (جدول ۳) به دست آمده است. ضریب همبستگی بین شاخص SPEI و تعداد روزهای غبارآلود $-0/38$ و در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار شده است. زندی فر و همکاران (۱۳۹۹) میزان همبستگی بین SPEI و شاخص توفان گردوغبار را برای شهرستان قزوین طی بازه زمانی ۲۰۱۶-۱۹۵۹ برابر با $-0/33$ گزارش کرده‌اند که با نتایج ارائه شده در پژوهش حاضر انطباق خوبی دارد و اختلاف اندک بین نتایج ارائه شده به دلیل نوع معیار استفاده شده برای بررسی وضعیت رخدادهای گردوغبار است. همچنین نتایج نشان داد که ارتباط معنی‌داری بین شاخص خشک‌سالی و تعداد روزهای غبارآلود داخلی در تأخیر زمانی یک‌ساله وجود دارد. ضرایب همبستگی بین این دو پارامتر در تأخیرهای زمانی یک، دو و سه ساله به ترتیب $-0/35$ ، $-0/21$ و $-0/17$ به دست آمد که در مقایسه با ضریب همبستگی بین شاخص SPEI و تعداد روزهای غبارآلود بدون تأخیر زمانی، کمتر بوده است. (Roustaei et al. 2021) حداکثر ضریب همبستگی معنی‌دار بین شاخص استاندارد شده توفان گردوغبار (SDSI) و SPI را برای مناطق خشک جنوب ایران در سری‌های زمانی ۱۲ ماهه SPI و سری زمانی ۱۸ ماهه SDSI گزارش کرده‌اند و اذعان داده‌اند که تغییر در رخدادهای گردوغبار مناطق جنوب ایران متأثر از تغییرات طولانی مدت پدیده خشک‌سالی بوده است. لذا یافته‌های این پژوهشگران راجع به اثر تأخیری خشک‌سالی بر پدیده گردوغبار با یافته‌های پژوهش حاضر مطابقت دارد. شایان ذکر است که روند تغییرات خشک‌سالی‌ها و ترسالی‌ها و تغییر فراوانی گردوغبارهای داخلی قزوین برای مهر و موم‌های (۲۰۱۴-۲۰۰۰) که توسط علی پور و همکاران (۱۳۹۶) ارائه شده است، با نتایج به دست آمده از این پژوهش مطابقت دارد که دال بر صحت نتایج به دست آمده از این مرحله از پژوهش حاضر است.

در شهرستان آوج نیز تداوم خشک‌سالی‌ها در بازه زمانی ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۲ بیشتر از سایر مهر و موم‌های مورد بررسی بوده است (شکل ۴)؛ به طوری که شدیدترین وضعیت خشک‌سالی حاکم بر این شهرستان متعلق به سال ۱۹۹۷ بوده که تنها یک رخداد گردوغبار برای این سال گزارش شده است. گرچه در سال ۲۰۰۵ نیز یک روز توأم با گردوغبار محلی به ثبت رسیده است اما این رویدادها هیچ ارتباطی با وضعیت خشک‌سالی و یا ترسالی بودن این منطقه نداشته‌اند (جدول ۳).

در شهرستان‌های معلم کلایه و تاکستان، شدیدترین خشک‌سالی‌ها در مهر و موم‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۰ به وقوع پیوسته (شکل ۵ و ۶). با مقایسه نتایج پهنه‌بندی خشک‌سالی ارائه شده برای استان قزوین (شکل ۹) با نتایج ارائه شده توسط ناصر زاده و احمدی (۱۳۹۱) مشخص شد که انطباق خوبی از نظر مناطق تحت تأثیر خشک‌سالی در سال ۲۰۰۸ وجود دارد؛ به عبارت دیگر این پژوهشگران نشان دادند که نواحی شمالی استان قزوین در این سال بیشتر در معرض پدیده خشک‌سالی هواشناسی بوده است که تا حدودی می‌تواند مؤید یافته‌های این پژوهش باشد. همچنین بر اساس یافته‌های این پژوهش، اثر معنی‌دار خشک‌سالی با تأخیر یک‌ساله بر تعداد رویدادهای گردوغبار معلم کلایه مشاهده شد (۰/۵۲-). گرچه در مهر و موم‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶، شهرستان بوئین زهرا با خشک‌سالی هواشناسی مواجه بوده و وضعیت خشک‌سالی ۲۰۱۶ شدیدتر از خشک‌سالی ۲۰۱۵ بوده است؛ تعداد روزهای توأم با گردوغبار محلی در این دو سال به ترتیب ۶ و ۳ روز بوده که به دلیل وقوع پدیده خشک‌سالی نبوده است (شکل ۷). ضریب همبستگی بین شاخص SPEI و تعداد روزهای غبارآلود در این منطقه بدون در نظر گرفتن تأخیر زمانی، ۰/۰۹- و غیر معنی‌دار بوده است. در سایر تأخیرهای زمانی نیز ارتباط معنی‌داری بین SPEI و INDD مشاهده نشد (جدول ۳). شهرستان کوهین، در مهر و موم‌های اخیر با خشک‌سالی هواشناسی مواجه نبوده و تعداد محدود روزهای غبارآلود این منطقه متأثر از وضعیت خشک‌سالی هواشناسی نبوده است (جدول ۳).

نتیجه‌گیری

در دهه‌های گذشته تغییرات اقلیم و وقوع خشک‌سالی‌ها و ترسالی‌های متناوب، اثرات قابل‌توجهی بر تغییر شدت و فراوانی توفان‌های گردوغبار در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان گذاشته است. با توجه به متفاوت بودن وضعیت اقلیمی و میزان حساسیت مناطق مختلف به توفان‌های گردوغبار، تحلیل این دو پدیده و تعیین زمان تأثیرپذیری این رخدادهای از پدیده خشک‌سالی برای این مناطق ضروری به نظر می‌رسد. لذا این مطالعه باهدف بررسی تأثیر خشک‌سالی بر رخدادهای گردوغبار شهرستان‌های مختلف استان قزوین انجام شد. نتایج این مطالعه نشان داد که ضریب اثرپذیری وقایع گردوغبار با منشأ محلی از تغییر وضعیت خشک‌سالی‌ها و ترسالی‌ها در شهرستان قزوین، ۱۴٪ بوده است و که پاسخ رخدادهای فرسایش بادی به خشک‌سالی هواشناسی در این منطقه بلافاصله پس از وقوع این بالای طبیعی بوده است. با توجه به اینکه این رخدادهای ماهیت تکرارشونده دارند و ممکن است در دوره‌های آتی، تشدید وقوع پدیده فرسایش بادی به‌ویژه در مناطق با حساسیت پذیری بالا رخ دهد، پیشنهاد

می‌شود که ضمن شناسایی کانون‌های تولید گردوغبار، احتمال وقوع توفان‌های شن و گردوغبار برای آینده با استفاده از مدل‌های آماری دقیق پیش‌بینی شود تا بتوان اقدامات لازم برای کاهش اثرات منفی احتمالی ناشی از وقوع آن‌ها را در مناطق مختلف استان انجام داد. ارزیابی شاخص خشک‌سالی SPEI و INDD بر اساس شاخص‌های استخراج شده از داده‌های ماهواره‌ای می‌تواند به درک بیشتر مناطق تحت تأثیر این دو پدیده کمک بیشتری نماید که پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی، این موضوع نیز مورد توجه پژوهشگران قرار بگیرد.

منابع

- ۱- آرامی، سید عبدالحسین. اونق، مجید، محمدیان بهیمنی، علی. اکبری، مهری و زراسوندی، علیرضا. ۱۳۹۶. تحلیل مطالعات مخاطره گردوغبار در جنوب غرب ایران در دوره ۲۲ ساله (۲۰۱۷-۱۹۹۶): نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال پنجم، شماره ۱، صص ۳۹-۶۶.
- ۲- احتیامی ندا، قناتی نوید، نظریور احد، بابایی نژاد تیمور، جیمز واتس مایکل. (۱۳۹۸): ارزیابی پتانسیل ریسک اکولوژیکی و سلامت انسانی برخی از فلزات سنگین در گردوغبار خیابانی شهر ایلام. مجله علوم آب‌وخاک. ۲۳ (۴): ۱۹۷-۱۸۳.
- ۳- خسروشاهی محمد، ابراهیمی خوسفی زهره، گوهردوست آزاده، لطفی نسب اصل سکینه، درگاهیان فاطمه و کاشی زنوزی لیلا. (۱۳۹۹): پایش تغییرات سطح تالاب گاوخونی و ارتباط آن با پدیده گرد و غبار و حرکت تپه‌های ماسه‌ای پیرامون آن. نشریه مدیریت بیابان، دوره ۸، شماره ۱۵، ۱۶۰-۱۳۹.
- ۴- خوش‌اخلاق فرامرزی، نجفی محمد سعید، زمان زاده سید محمد، شیرازی محمدحسن، صمدی مهدی. (۱۳۹۲): بررسی ترکیبات بار گردوغبار در غرب و جنوب غرب ایران. جغرافیا و مخاطرات محیطی. دوره ۲، شماره ۶، ۱۷-۳۶.
- ۵- درگاهیان فاطمه، لطفی نسب اصل سکینه، خسروشاهی محمد. (۱۳۹۷): تحلیل نقش کانون‌های گردوغبار داخلی در ایجاد شرایط بحرانی در اهواز با تأکید بر کانون جنوب شرق. تحقیقات حمایت و حفاظت جنگل‌ها و مراتع ایران، ۱۷۰-۱۵۷.
- ۶- زندی فر سمیرا، ابراهیمی خوسفی زهره، خسروشاهی محمد، نعیمی مریم. (۱۳۹۹): تحلیل اثر پارامترهای اقلیمی و خشک‌سالی‌های هواشناسی بر رخدادهای گردوغبار داخلی (مطالعه موردی: شهرستان قزوین). علوم آب‌وخاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی). ۲۴ (۳)، ۲۳۹-۲۵۶.
- ۷- علی پور، ناهید. مصباح زاده، طیبه. احمدی، حسن. ملکیان، آرش و جعفری، محمد. (۱۳۹۷): تحلیل سینوپتیکی وقایع گردوغبار و ارتباط آن با خشک‌سالی در استان‌های قزوین و البرز. فصل‌نامه جغرافیا و برنامه‌ریزی منطقه‌ای، شماره ۳۰، صفحه ۶۸-۵۶.
- ۸- قاسمی پوریا، کرباسی مسعود، زمانی نوری مسعود و سرائی تبریزی مهدی. (۱۴۰۰): پایش و پهنه‌بندی خشک‌سالی در البرز جنوبی، جغرافیا و مطالعات محیطی، ۱۰ (۳۹)، ۸۵-۹۸.
- ۹- مقصود فاطمه، ملکیان آرش، محسنی ساروی محسن، بذرافشان ام‌البین. پایش و پهنه‌بندی خصوصیات خشک‌سالی هواشناسی با استفاده از مدل زنجیره مارکوف و روش‌های زمین‌آمار (مطالعه موردی: استان قزوین). (۱۳۹۵): مرتع و آبخیزداری (منابع طبیعی ایران). ۶۹ (۴)، ۱۰۷۵-۱۰۹۹.
- ۱۰- ناصر زاده، محمدحسین و احمدی، اسماعیل. (۱۳۹۱): بررسی عملکرد شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی در ارزیابی خشک‌سالی و پهنه‌بندی آن در استان قزوین. نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی. ۱۲ (۲۷)، ۱۶۲-۱۴۱.

11- Allen, R. G. Pereira, L. S. Raes, D. & Smith, M. (1998): Crop Evapotranspiration-Guidelines For Computing Crop Water Requirements-FAO Irrigation And Drainage Paper 56. Fao, Rome, 300(9), D05109.

- 12- Ansari Ghojghar, M. Pourgholam-Amiji, M. & Araghinejad, S. (2021): Investigating The Relationship Between Drought And Trend Of The Frequency Of Dust Storms In The West And Southwest Of Iran. *Iranian Journal Of Soil And Water Research*, 51(11), 2839-2852.
- 13- Araghinejad, S. Ansari Ghojghar, M. Pourgholam Amigi, M. Liaghat, A. & Bazrafshan, J. (2019): The Effect Of Climate Fluctuation On Frequency Of Dust Storms In Iran. *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 7(21), 13-32.
- 14- Arcusa, S. H. McKay, N. P. Routson, C. C. & Munoz, S. E. (2020): Dust-Drought Interactions Over The Last 15,000 Years: A Network Of Lake Sediment Records From The San Juan Mountains, Colorado. *The Holocene*, 30(4), 559-574.
- 15- Ebrahimi-Khusfi, Z. Mirakbari, M. & Soleimani-Sardo, M. (2021): Aridity Index Variations And Dust Events In Iran From 1990 To 2018. *Annals Of The American Association Of Geographers*, 1-18.
- 16- Ebrahimi-Khusfi, Z. Taghizadeh-Mehrjardi, R. Roustaei, F. Ebrahimi-Khusfi, M. Mosavi, A. H. Heung, B... . Scholten, T. (2021): Determining The Contribution Of Environmental Factors In Controlling Dust Pollution During Cold And Warm Months Of Western Iran Using Different Data Mining Algorithms And Game Theory. *Ecological Indicators*, 132, 108287.
- 17- Hamzeh, N. H. Kaskaoutis, D. G. Rashki, A. & Mohammadpour, K. (2021): Long-Term Variability Of Dust Events In Southwestern Iran And Its Relationship With The Drought. *Atmosphere*, 12(10), 1350.
- 18- Javadian, M. Behrangi, A. & Sorooshian, A. (2019): Impact Of Drought On Dust Storms: Case Study Over Southwest Iran. *Environmental Research Letters*, 14(12), 124029.
- 19- Javadian, M. Behrangi, A. & Sorooshian, A. (2019): Impact Of Drought On Dust Storms: Case Study Over Southwest Iran. *Environmental Research Letters*, 14(12), 124029.
- 20- Kandakji, T. Gill, T. E. & Lee, J. A. (2021): Drought And Land Use/Land Cover Impact On Dust Sources In Southern Great Plains And Chihuahuan Desert Of The US: Inferring Anthropogenic Effect. *Science Of The Total Environment*, 755, 142461.
- 21- Mckee, T. B. Doesken, N. J. & Kleist, J. (1993): *The Relationship Of Drought Frequency And Duration To Time Scales*. Paper Presented At The Proceedings Of The 8th Conference On Applied Climatology.
- 22- Nafarzadegan, A. R. Ebrahimi-Khusfi, Z. & Kazemi, M. (2021): Spatial Characterization Of Dust Emission Prone Arid Regions Using Feature Extraction And Predictive Algorithms. *Applied Geography*, 133, 102495.
- 23- Roustaei, F. Ebrahimi Khusfi, Z. Kousari, M. & Mokhtari, M. (2021): Investigating Lagged Cross-Correlation Between Wind Erosion And Drought In Southern Iran's Arid Regions Investigating Lagged Cross-Correlation Between Wind Erosion And Drought In Southern Iran's Arid Regions. *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 3(2), 29-42.
- 24- Thornthwaite, C. W. (1948): An Approach Toward A Rational Classification Of Climate. *Geographical Review*, 38(1), 55-94.
- 25- Vicente-Serrano, S. M. Beguería, S. & López-Moreno, J. I. (2010): A Multiscalar Drought Index Sensitive To Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal Of Climate*, 23(7), 1696-1718.