

مطالعات جغرافیایی مناطق خشک

دوره ۱۳، شماره ۴۸، تابستان ۱۴۰۱

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۱۲ تأیید نهایی: ۱۴۰۱/۰۱/۳۰

صص ۲۰-۱

پژوهشی

پایش و پیش‌بینی عوامل اقلیمی مؤثر بر تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای با استفاده از شاخص لنکستر (مطالعه موردی: کویر سیرجان)

مهین حنیفه پور، دکتری مهندسی منابع طبیعی - بیابان‌زدایی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران
لیلا بیابانی، دانشجوی دکتری مهندسی منابع طبیعی - بیابان‌زدایی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران
حسن خسروی*، دانشیار، دانشگاه تهران / دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران
بهروز اکبرپور بناب، کارشناس هیدرو اقلیم - مهندسين مشاور آبخوان

چکیده

تپه‌های ماسه‌ای از مهم‌ترین و حساس‌ترین لندفرم‌های حساس به فرسایش بادی هستند که میزان فعالیت آن‌ها بسته به شدت تأثیر عوامل متعدد اقلیمی و زمینی، متفاوت است. پایش بلندمدت این عوامل به همراه وضعیت تحرک‌پذیری ماسه‌های روان در مناطق مختلف می‌تواند اثر قابل‌توجهی بر کاهش اثرات نامطلوب آن‌ها داشته باشد. محدوده مطالعاتی؛ کویر سیرجان در استان کرمان، شهرستان سیرجان قرار دارد. به این منظور، از داده‌های ساعتی سرعت باد، کد پدیده‌های گردوغبار، بارندگی و دمای هوای ایستگاه سینوپتیک سیرجان در دوره آماری ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۹ استفاده شد. داده‌های بارندگی و دما برای محاسبه مقدار تبخیر و تعرق به روش تورنت‌وایت استفاده شد. پس از محاسبه درصد فراوانی بادهای فرساینده و شاخص خشکی، با بهره‌گیری از شاخص لنکستر وضعیت تحرک‌پذیری ماسه‌های روان در منطقه مورد واکاوی قرار گرفت. به‌منظور پیش‌بینی اثر تغییر احتمالی عوامل اقلیمی بر تحرک‌پذیری ماسه‌های روان از آزمون تحلیل حساسیت استفاده شد. نتایج نشان داد حدود ۹۰٪ از سال‌های آماری از نظر اقلیمی در معرض خطر بیابان‌زایی بسیار شدید بوده است. بر این اساس، با کاهش مقدار شاخص خشکی یونپ و افزایش خشکی محیط بر میزان تحرک‌پذیری ماسه در کل منطقه مطالعاتی افزوده شده و خطر بیابان‌زایی در منطقه تشدید می‌شود. مقادیر شاخص سالیانه لنکستر در این ایستگاه نشان‌دهنده این است که وضعیت تپه‌های ماسه‌ای به‌صورت فعال فقط در نوک تپه است. بر اساس تحلیل حساسیت مشخص شد که در صورت افزایش ۳۰٪ فراوانی بادهای فرساینده و تبخیر و تعرق پتانسیل، فعالیت تپه‌های ماسه‌ای به میزان ۶۹٪ افزایش خواهد یافت و از حالت فعال فقط در نوک تپه به فعال تبدیل شده و وضعیت فعالیت تپه ماسه‌ای در ایستگاه مطالعاتی در اثر کاهش توأم دو پارامتر یادشده به همان مقدار، فعالیت تپه‌های ماسه‌ای ۵۱٪ کاهش و از حالت فعال فقط در نوک تپه به غیرفعال تغییر خواهد یافت.

واژگان کلیدی: شاخص لنکستر، بیابان‌زایی، تحلیل حساسیت، کویر سیرجان

۱- مقدمه

تپه‌های شنی مناطق وسیعی از سرزمین را در برمی‌گیرد و عمدتاً در مناطق خشک واقع شده است. اکثر تپه‌های تثبیت‌شده شنی ثابت در اواخر دوره یخبندان به‌صورت حداکثری فعال بودند (حس و همکاران^۱، ۲۰۰۳: ۳۳، فیتزیمونس و همکاران^۲، ۲۰۰۷a: ۵۵۲، ۲۰۰۷b: ۲۶۶۱ و استون و توماس^۳، ۲۰۰۸: ۱۶۷۰). یکی از عوامل تعدیل و تضعیف‌کننده عمل باد روی ماسه، پوشش گیاهی است (واسون و نانینگا^۴، ۱۹۸۶: ۵۰۷، باکلی^۵، ۱۹۸۷: ۴۳۰، ولف و نیکلینگ^۶، ۱۹۹۳: ۵۲، باکلی^۷، ۱۹۹۶: ۲۱۸، هاگن هولتز و ولف^۸، ۲۰۰۵: ۵۴ و اوکین^۹، ۲۰۰۸: ۳۶)، که رشد آن‌ها می‌تواند منجر به تثبیت تپه‌ها شود؛ بنابراین، هنگامی که میزان بارندگی برای حمایت از پوشش گیاهی کم است، ممکن است تپه‌های شنی دوباره فعال شوند (تسوار^{۱۰}، ۲۰۰۵: ۵۵). چندین نشانه برای فعال شدن مجدد تپه در دهه‌های گذشته گزارش شده است (الکساندر^{۱۱}، ۲۰۰۸: ۳، ماهس و مت^{۱۲}، ۱۹۹۳: ۹۰۷ و توماس و همکاران^{۱۳}، ۲۰۰۵: ۱۲۱۸). زمین‌شناسان معمولاً حرکت تپه‌ها را بر اساس شاخص‌های تحرک توصیف می‌کنند (واسون، ۱۹۸۴: ۴۲۱؛ تالبوت^{۱۴}، ۱۹۸۴: ۲۰۶؛ لنکستر^{۱۵}، ۱۹۸۸: ۲۳۶؛ تسور، ۲۰۰۵: ۵۳) که به پارامترهای اقلیمی مانند بارش، دما، تبخیر و تعرق (پتانسیل) بستگی دارد. با این حال سرعت باد و دینامیک تپه‌ها بسیار پیچیده‌تر است و شامل فرایندهای مختلف خود تعاملی است که نمی‌توان آن‌ها را با شاخص‌های تشخیصی ساده مدل‌سازی کرد؛ بنابراین، تغییر آینده در وضعیت پویای یک تپه به‌طور کلی با بررسی تغییرات در اندازه پارامترهای آب‌وهوایی تخمین زده می‌شود. بر این اساس، از نظر جوانا و همکاران^{۱۵} (۲۰۰۸) عوامل اقلیمی نقش اصلی را در کنترل مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای بر عهده دارند. به‌علاوه اثر تغییرات دوره‌ای جهت وزش باد سبب تغییر شکل و مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای می‌شود (تانگچی و همکاران^{۱۶}، ۲۰۱۲: ۲۸۸). تحقیقات آن‌ها نشان داد تپه‌های ماسه‌ای در اثر جریان باد در ماسه‌های روان و تراکم آن‌ها شکل گرفته و مورفولوژی آن‌ها از تغییرات فصلی جهات وزش باد تأثیر پذیرفته است.

مطالعات زیادی در زمینه‌های مختلف و مرتبط با تحرک‌پذیری رسوبات بادی بر اساس عوامل اقلیمی در داخل و خارج از کشور انجام شده است که می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد:

در بررسی توان حمل ماسه و حرکت تپه‌های ماسه‌ای در سه دهه گذشته در ارگ خارطوران واقع در شمال شرقی ایران نشان داد که بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۸ در حمل ماسه افزایش شدیدی رخ داده است که می‌تواند ناشی از تغییر سرعت باد در منطقه باشد. شاخص تغییرپذیری به مدت ۳۰ سال از ۰/۳ تا ۰/۶ متغیر بوده است. علاوه بر این، تحرک شن و ماسه مقدار ۰/۱ تا ۰/۴ را ثبت کرده که کمترین و بالاترین مقادیر از ۰/۰۸ تا ۰/۹ با میانگین ۰/۲۷ ثبت شد. در نهایت تپه‌های شنی برای مدت طولانی ثابت‌شده‌اند و شدت شاخص تحرک متأثر از تغییرات آب‌وهوایی است (راهداری و رودگوریز^{۱۷}، ۲۰۲۱: ۷).

مطالعه عباسی و همکاران^{۱۸} (۲۰۱۹) در توزیع و فعالیت تپه‌های شنی در ایران بر اساس شاخص‌های تحرک و داده‌های زمینی برای ارزیابی فعالیت تپه‌های ماسه‌ای ایران نشان داد که هر سه مدل در دشت سیستان، بیابان لوت و همچنین در مناطق زیرکوه قاین و دیهوک، تپه‌های شیب‌دار کاملاً فعال را شناسایی کردند.

اشکنزی و همکاران^{۱۹} (۲۰۱۴) تحرک تپه‌های ماسه‌ای را تحت تأثیر تغییر آب‌وهوایی در بیابان‌های کالاهاری و استرالیا را بر اساس مدل GFDL و CGCM3.1 مطالعه نمودند. آن‌ها نشان دادند که تغییرات پیش‌بینی‌شده در DP و بارش به‌طور کلی قابل توجه نیست و هر دو تپه‌های بیابانی استرالیا و کالاهاری به‌احتمال زیاد تا اواخر قرن بیست و یکم

1- Hesse et al
2- Fitzsimmons et al
3- Stone and Thomas
4- Wasson and Nanninga
5- Buckley
6- Wolfe and Nickling
7- Hugenholtz and Wolfe

8- Okin
9- Tsoar
10- Alexander
11- Muhs and Maat
12- Thomas et al
13- Talbot
14- Lancaster

15- Johanna etal
16- Taniguchi et al
17- Rahdari, and Rodríguez
18- Abbasi etal
19- Ashkenazy et al

فعال نخواهند شد. با این وجود، تپه‌های استرالیا به دلیل کاهش بارندگی و افزایش قدرت باد نسبت به کالاهاری فعال تر می‌باشند.

نتایج مطالعه دل‌واله و همکاران^۱ (۲۰۰۸) در بررسی فعالیت تپه‌های شنی در شمال شرقی پاتاگونیا نشان داد که به دلیل شرایط بادخیزی منطقه تحرک تپه‌ها زیاد اما تغییرات در سطح کل تپه‌های شنی فعال کم و حرکت به سمت شرق با سرعت متوسط است بنابراین، باد و بارندگی مؤثر به ترتیب به‌عنوان عوامل اصلی تنظیم‌کننده این روند به ترتیب در کوتاه‌مدت و بلندمدت ظاهر می‌شوند. اگرچه جهت‌گیری و موقعیت میدانی تپه‌های شنی با بادهای غربی غالب مطابقت دارد. نتایج تحقیقات بر روی فعالیت تپه‌های ماسه‌ای واقع در صحرای تاکلاماکان، در شمال چین، با استفاده از شاخص لنکستر، نشان می‌دهد که فعالیت این تپه‌ها در طول دوره ۱۹۶۰ تا ۱۹۸۰ زیاد بوده، ولی از اواسط ۱۹۸۰ تا اواخر ۱۹۹۰ کاهش یافته است (وانگ و همکاران، ۲۰۰۴: ۸۹).

تحلیل آماری مخاطرات ناشی از جابه‌جایی تپه‌های ماسه‌ای در دشت سیستان نشان داد که فقط بین طول برخان‌ها با میزان جابه‌جایی‌شان، رابطه‌ی معکوس برقرار است و بین سایر پارامترها و جابه‌جایی برخان‌ها رابطه‌ی معنی‌داری وجود ندارد که دلیل آن می‌تواند استقرار برخان‌ها در محدوده‌ی اراضی روستایی، نقش کاربری‌های مختلف اراضی و عوارض سطح زمین در میزان سرعت باد، مقدار تولید ماسه و در میزان جابه‌جایی برخان‌ها باشد (حیدری‌نسب و همکاران، ۱۳۹۷: ۵۹)

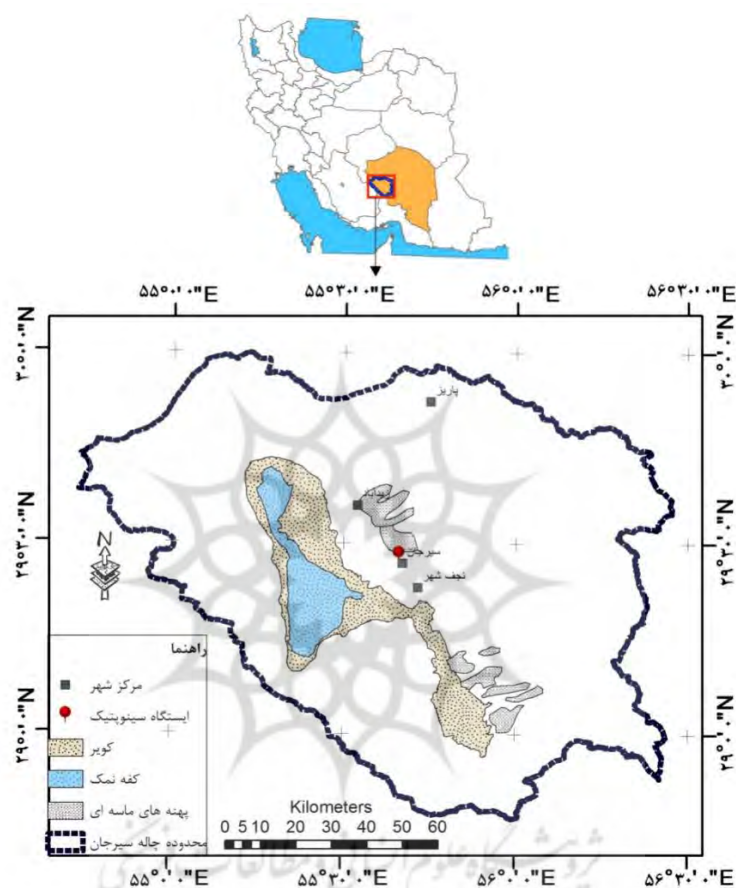
بررسی تغییرات مکانی فرسایش‌پذیری بادی اراضی در حاشیه دریاچه ارومیه نشان داد که در قسمت‌های جنوب‌شرقی جزیره اسلامی و شمال غرب دریاچه ارومیه حساسیت اراضی بیشتر است. همچنین بیشترین مقدار پتانسیل حمل ماسه به ترتیب در ایستگاه‌های تبریز، خوی و ارومیه است. بر پایه وجود منابع تولید ماسه و انرژی باد در قسمت غربی و شمال‌غربی دریاچه ارومیه امکان شکل‌گیری تپه‌های ماسه‌ای و فرسایش بادی وجود دارد (نظری‌سامانی و همکاران، ۱۳۹۹: ۵۳). نتایج تحلیل حساسیت تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای و فرسایش بادی وجود دارد (نظری‌سامانی و همکاران، ۱۳۹۹: ۵۳). فعالیت تپه‌های ماسه‌ای در ایستگاه سبزواری ۳۸٪ افزایش خواهد یافت (نعیمی و همکاران، ۱۴۰۰: ۱۳). از آنجاکه پدیده حرکت ماسه‌های روان به‌عنوان یکی از فرآیندهای مهم تخریب سرزمین و یک چالش جدی در ایران به شمار می‌رود و عوامل اقلیمی نیز در این پدیده نقش بسزایی دارند؛ از این رو بررسی و شناخت این عوامل از جنبه تأثیر آن‌ها بر بروز و تشدید تحرک‌پذیری ماسه‌های روان برای جلوگیری از تشدید بحران‌های زیست‌محیطی در آینده یک ضرورت انکارناپذیر است. آگاهی از وضعیت تپه‌های ماسه‌ای می‌تواند ما را در حفاظت از آن‌ها یاری دهد. بدین منظور، هدف از این تحقیق بررسی رژیم بادی منطقه و نیز شرایط اقلیمی و تأثیر آن بر میزان فعالیت تپه‌های ماسه‌ای بر اساس شاخص لنکستر و در نهایت با در نظر گرفتن شرایط گذشته، پیش‌بینی وضعیت تحرک این تپه‌های ماسه‌ای در آینده در کویر سیرجان می‌باشد.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش کویر سیرجان می‌باشد که مساحت آن برابر ۱۴۱۱۶ کیلومترمربع بوده و یکی از بزرگ‌ترین کویرهای آبخیز فلات مرکزی است که در یک فرورفتگی جوان، بین سنگ‌های رسوبی چین‌خورده در امتداد دامنه‌های شمال شرقی سلسله جبال زاگرس و رشته‌کوه‌های آتشفشانی زون سنندج - سیرجان قرار گرفته است (کلینسلی، ۱۳۸۱). کویر نمک سیرجان در محدوده‌ای به عرض ۲۸ درجه و ۴۶ دقیقه تا ۲۹ درجه و ۵۹ دقیقه شمالی

و طول ۵۴ درجه و ۵۷ دقیقه تا ۵۶ درجه و ۲۷ دقیقه شرقی گسترده شده است (شکل ۱). با توجه به آمارهای هواشناسی، حداکثر میانگین بارندگی ماهانه مربوط به فروردین به میزان ۴۰/۰ میلی‌متر و حداقل میانگین آن مربوط به مهرماه به میزان ۰/۴ میلی‌متر می‌باشد. متوسط بارندگی سالیانه برابر با ۱۳۷/۲ میلی‌متر و متوسط درجه حرارت سالیانه ۱۸/۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. همچنین باد غالب در منطقه در طول سال عمدتاً از جهت جنوب شرق می‌وزد که به‌طور متوسط ۲۲/۵ بار در طول سال اتفاق می‌افتد و سرعت متوسط آن ۴/۱ متر بر ثانیه است.



شکل ۱: موقعیت محدوده مطالعاتی اشکال ژئومورفولوژی اطراف کویر سیرجان

۲-۲- داده‌ها و روش‌ها

الف) اخذ پارامترهای اقلیمی

جهت انجام تحقیق حاضر نیاز به مقادیر متوسط ماهیانه‌ی عناصر اقلیمی دما و بارندگی و داده‌های ساعتی مربوط به میدان دید افقی، سرعت و جهت باد و کد پدیده‌های مختلف گردوغبار برای دوره‌ی آماری ۱۰ ساله (۱۳۹۹-۱۳۹۰) از سازمان هواشناسی کشور اخذ شده است.

با توجه به تعداد برداشت و ثبت اطلاعات ۸ بار در روز در ایستگاه‌های سینوپتیک شمارش تعداد پدیده و روز گردوغبار در ایستگاه‌های محدوده مطالعاتی صورت گرفت. مقادیر میانگین سایر پارامترهای اقلیمی نیز برای مقیاس‌های زمانی مذکور محاسبه شد تا ارتباط بین عوامل اقلیمی و تعداد روزهای غبارآلود در منطقه‌ی مطالعاتی بررسی شود (رابطه، ۱).
رابطه (۱) درصد فراوانی کلاس‌های سرعت باد × سرعت باد = شاخص بادناکی

محاسبه درصد فراوانی طبقات مختلف سرعت باد با در نظر گرفتن سرعت آستانه فرسایش بادی ارائه شده برای تپه‌های ماسه‌ای (۶ m/s)، تعداد بادهای با سرعت کمتر از ۶ m/s، ۷ تا ۱۱، ۱۱ تا ۱۵، ۱۵ تا ۲۰، بیشتر از ۲۰ m/s و همچنین تعداد کل بادهای با سرعت بیشتر از ۶ m/s محاسبه گردید (رابطه، ۲).

$$Fws_i = \frac{f_i}{n} \times 100$$

رابطه (۲)

$$Fws_i = \text{درصد فراوانی بادهای}$$

$$f_i = \text{فراوانی بادهای در طبقه سرعت مورد نظر}$$

$$n = \text{تعداد کل بادهای}$$

(ب) تعیین رژیم بادهای غبارآلود منطقه؛

به منظور تعیین جهت بادهای غبارآلود محلی از داده‌های ساعتی مربوط به سرعت و جهت باد در ساعات غبارآلود محلی استفاده گردید. در حالی که برای تعیین جهت بادهای فرامحلی از داده‌های مربوط به کد ۰۶ که بیانگر گردوغبارهای نشأت گرفته از خارج ایستگاه است، استفاده شد. پس از آماده‌سازی داده‌ها، با استفاده از نرم‌افزار WRPLOT نقشه‌ی گلبادهای منطقه‌ی مطالعاتی تهیه گردید.

(ج) محاسبه‌ی شاخص لنکستر و شاخص خشکی یونپ؛

محاسبه‌ی شاخص لنکستر جهت بررسی میزان تحرک پذیری ماسه‌های روان منطقه‌ی مطالعاتی انجام شد. بررسی تحرک تپه‌های ماسه‌ای و شنزارها در قسمت‌های مختلف جهان، شاخص‌های متفاوتی از فرسایش بادی و تحرک تپه‌های ماسه‌ای را نشان می‌دهد. همه‌ی آن‌ها بر اساس دو فاکتور که تحرک تپه‌های ماسه‌ای را کاهش یا افزایش می‌دهند، شکل گرفته‌اند:

فاکتور اول مربوط به درجه‌ی بادخیزی است (W) که به صورت درصد سالانه روزهایی که سرعت باد بیشتر از سرعت آستانه‌ی حرکت ماسه است، بیان می‌شود. اگر درجه‌ی بادخیزی (W) افزایش پیدا کند، بیش‌تر تپه‌های ماسه‌ای به صورت متحرک درمی‌آیند.

فاکتور دوم که رشد پوشش گیاهی به آن بستگی دارد، به صورت نسبت بین متوسط بارندگی سالانه‌ی (P) و تبخیر پتانسیل (PET) سالانه بیان می‌شود.

پایه و اساس این مدل که تحت عنوان شاخص تحرک تپه‌های ماسه‌ی لنکستر (Lancaster, 1988) شناخته می‌شود، به منظور تعیین فعالیت تپه‌های ماسه‌ای، با در نظر گرفتن ۳ عامل محیطی، رابطه (۳) را ارائه کرد (احمدی-بیرگانی، ۱۳۸۷)

$$M = W / (P / PE) = (W \times PE) / P \quad \text{رابطه (۳)}$$

در این رابطه، هر یک از پارامترها عبارتند از:

M: میزان فعالیت رسوبات بادی مانند تپه‌های ماسه‌ای

W: درصد فراوانی بادهای با سرعت بیش از سرعت آستانه فرسایش برحسب m/s در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین

P: میانگین بارندگی سالانه برحسب میلی‌متر بر سال.

PE: تبخیر و تعرق پتانسیل سالانه برحسب میلی‌متر بر سال که در تحقیق حاضر با استفاده از روش تورنت وایت و

بر اساس متوسط دمای ماهانه محاسبه شده است.

در این روش، با توجه به مقادیر محاسبه شده در رابطه (۳)، شاخص حرکت تپه‌های ماسه‌ای (M) محاسبه و با توجه به جدول ۱، میزان فعالیت تپه‌های ماسه‌ای تعیین می‌شود.

در این مرحله، از شاخص خشکی یونپ P/PE که توسط کنوانسیون سازمان ملل متحد برای مقابله با بیابان‌زایی نیز

تأیید شده، جهت تعیین نوع اقلیم حاکم بر منطقه و خطر بیابان‌زایی استفاده گردید.

جدول ۱: مقادیر شاخص حرکت ماسه‌های لنکستر (M)

میزان فعالیت تپه‌های ماسه‌ای	مقدار عددی شاخص حرکت ماسه M
غیرفعال	<۵۰
فعال فقط در نوک تپه	۵۰-۱۰۰
فعال	۱۰۰-۲۰۰
کاملاً فعال	>۲۰۰

د) تحلیل ارتباط بین عناصر اقلیمی و شاخص لنکستر

در این مرحله به منظور بررسی ارتباط بین عناصر اقلیمی و شاخص لنکستر از روش همبستگی پیرسون استفاده شد. همچنین برای بیان این که چند درصد از تغییرات در وضعیت تحرک تپه‌های ماسه‌ای متأثر از تغییرات شاخص خشکی بوده، از ضریب تعیین حاصل از برازش بین پارامترهای مذکور (R^2) استفاده شد و نمودار پراکنش نقطه‌ای حاصل، ارائه گردید. دامنه‌ی تغییرات R^2 بین ۰ تا ۱+ متغیر است و معیاری مناسب جهت سنجش ارتباط بین متغیرهای مختلف است.

ه) پیش‌بینی اثرات تغییر احتمالی عوامل اقلیمی بر تحرک‌پذیری ماسه‌های روان.

به منظور بررسی اثر احتمالی تغییر عناصر اقلیمی بر تحرک‌پذیری ماسه‌های روان و تشدید پدیده‌ی گردوغبار، پس از محاسبه‌ی میزان فعالیت رسوبات بادی، با استفاده از روش تحلیل حساسیت، میزان تأثیرپذیری متغیرهای خروجی از متغیرهای ورودی مدل تعیین می‌شود. استفاده از آنالیز حساسیت جهت تعیین روابط بین متغیرهای مدل با یکدیگر و نیز تعیین اولویت تأثیر پارامترها بر خروجی مدل مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به این موضوع و این که برخی از عناصر اقلیمی شاخص مانند باران، باد و تبخیر در میزان تحرک ماسه‌های روان تأثیر به سزایی دارند، بنابراین متغیرهای مورد نظر در دامنه‌ای معقول تغییر داده می‌شوند و اثر این تغییرات در خروجی مدل؛ یعنی میزان حرکت ماسه محاسبه می‌شود. پس از محاسبه میانگین عناصر اقلیمی، هر یک از اعداد در دامنه منفی تا مثبت ۳۰٪ تغییر داده شد. اعداد جدید در جدول جداگانه‌ای نوشته شده و شاخص تحرک‌پذیری ماسه‌ها در این شرایط محاسبه گردید.

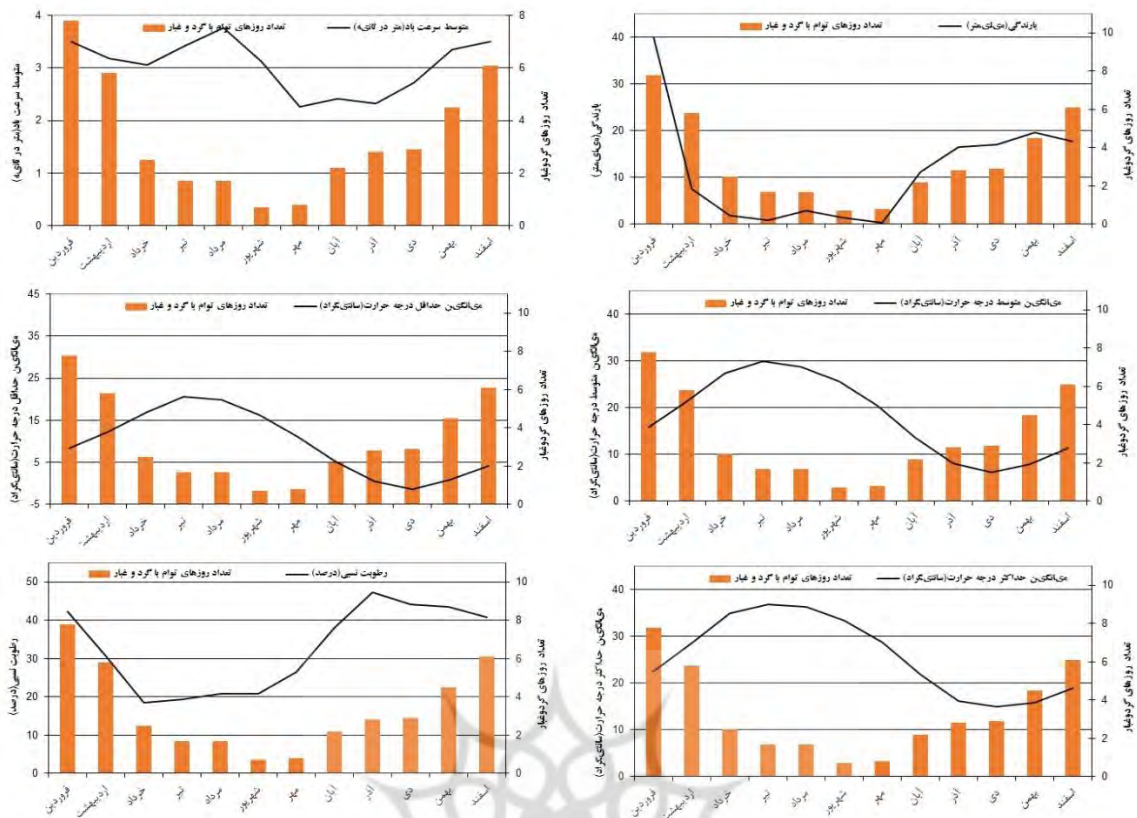
۳- یافته‌ها

جهت بررسی شرایط اقلیمی منطقه مورد مطالعه، تغییرات ماهیانه مقادیر میانگین تمام عناصر اقلیمی در برابر تعداد روزهای غبارآلود و همچنین در ایستگاه سینوپتیک سیرجان طی دوره آماری ۱۰ ساله (۱۳۹۹-۱۳۹۰) در جدول (۳) و شکل (۲) نشان داده شده است.

طبق جدول بیشترین میانگین متوسط درجه حرارت ماهیانه در خردادماه، میانگین حداکثر متوسط درجه حرارت در تیرماه و در فصل تابستان و میانگین حداقل درجه حرارت در دی‌ماه و در فصل زمستان در کویر سیرجان به وقوع پیوسته است. میانگین بارندگی سالیانه طی دوره آماری ۱۳۷/۲ میلی‌متر می‌باشد که پیشینه بارندگی در ماه فروردین در مقیاس فصلی در زمستان و کمینه آن مهرماه و در فصل تابستان بوده است. از نظر رطوبت نسبی پیشینه آن در مقیاس فصلی در زمستان و کمینه آن در تابستان می‌باشد. در مقیاس ماهیانه حداکثر سرعت شدیدترین باد منطقه مورد مطالعه، در تیرماه و جهت باد غالب در بیشتر ماه‌های سال جنوب‌شرقی می‌باشد. بیشترین و کمترین فراوانی تعداد روزهای توأم با گردوغبار به ترتیب در ماه‌های فروردین و شهریور به وقوع پیوسته است.

جدول ۳: میانگین ماهیانه پارامترهای اقلیمی در ایستگاه سینوپتیک کویر سیرجان طی دوره آماری ۱۰ساله (۱۳۹۰-۱۳۹۹)

پارامتر	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	سالانه
متوسط سرعت باد (متر در ثانیه)	۳۵۱	۳۱۸	۳۰۶	۳۴۲	۳۷۷	۳۱۲	۲۲۶	۲۴۱	۲۳۲	۲۷۲	۳۳۵	۳۵۰	۳۰۵
درصد باد آرام	۲۲٫۸	۲۶٫۸	۲۷٫۳	۲۳٫۳	۱۹٫۵	۲۵٫۹	۳۷٫۱	۳۴٫۳	۳۷٫۷	۳۱٫۶	۲۳٫۱	۲۴٫۱	۲۹٫۲
حداکثر سرعت شدیدترین باد (متر در ثانیه)	۲۰	۱۵	۱۶	۴۰	۱۵	۱۴	۱۰	۱۳	۱۱	۱۶	۱۸	۲۲	۴۰
سمت شدیدترین باد	۲۲۰	۱۸۰	۲۱۰	۴۰	۳۰	۳۰	۱۰	۳۰۰	۲۱۰	۲۱۰	۲۱۰	۲۴۰	۴۰
جهت باد غالب	SE	SW	SW	NE	N	NE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE
میانگین سرعت باد غالب (متر در ثانیه)	۴٫۴	۵٫۰	۴٫۵	۴٫۳	۵٫۵	۳٫۹	۳٫۶	۳٫۸	۴٫۰	۴٫۲	۴٫۳	۴٫۱	۴٫۱
درصد فراوانی باد غالب	۱۵٫۳	۱۴٫۳	۱۲٫۶	۱۳٫۴	۱۶٫۷	۱۳٫۳	۹٫۶	۱۴٫۱	۱۵٫۰	۱۵٫۳	۱۶٫۲	۱۳٫۸	۱۲٫۲
بارندگی (میلی‌متر)	۴۰٫۰	۷٫۶	۱٫۹	۰٫۹	۲٫۸	۱٫۴	۰٫۴	۱۱٫۲	۱۶٫۶	۱۷٫۱	۱۹٫۷	۱۷٫۸	۱۳۷٫۲
میانگین متوسط درجه حرارت (سانتی‌گراد)	۱۵٫۹	۲۱٫۳	۲۷٫۳	۲۹٫۹	۲۸٫۷	۲۵٫۶	۲۰٫۵	۱۳٫۵	۸٫۱	۶٫۲	۷٫۸	۱۱٫۴	۱۸٫۰
میانگین حداقل درجه حرارت (سانتی‌گراد)	۸٫۴	۱۲٫۳	۱۶٫۹	۲۰٫۷	۱۹٫۸	۱۶٫۳	۱۱٫۰	۵٫۱	۰٫۶	-۱٫۳	۱٫۰	۴٫۲	۹٫۶
میانگین حداکثر درجه حرارت (سانتی‌گراد)	۲۲٫۶	۲۸٫۶	۳۴٫۹	۳۶٫۹	۳۶٫۳	۳۳٫۴	۲۸٫۷	۲۱٫۹	۱۶٫۲	۱۴٫۹	۱۵٫۸	۱۹٫۰	۲۵٫۸
رطوبت نسبی (درصد)	۴۲٫۳	۳۰٫۸	۱۸٫۵	۱۹٫۴	۲۰٫۷	۲۰٫۷	۲۶٫۵	۳۸٫۰	۴۷٫۴	۴۴٫۱	۴۳٫۵	۴۰٫۸	۳۲٫۷
تعداد روزهای توأم با گردوغبار	۷۸	۵۸	۲۵	۱۷	۱۷	۷	۸	۲۲	۲۸	۲۹	۴۵	۶۱	۳۹۵
میانگین تعداد روزهای توأم با گردوغبار	۷٫۸	۵٫۸	۲٫۵	۱٫۷	۱٫۷	۰٫۷	۰٫۸	۲٫۲	۲٫۸	۲٫۹	۴٫۵	۶٫۱	۴۰



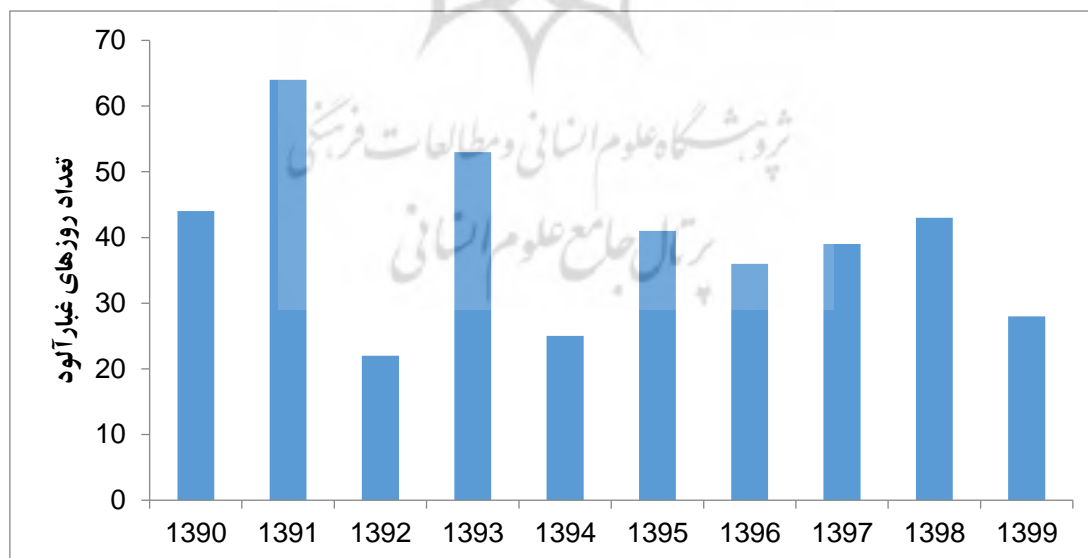
شکل ۲: مقادیر میانگین ماهیانه پارامترهای اقلیمی و تعداد روزهای گردوغبار در ایستگاه سینوپتیک کویر سیرجان طی دوره آماری ۱۰ساله (۱۳۹۹-۱۳۹۰)

نتایج حاصل از طبقه‌بندی درصد فراوانی سرعت باد نشان داد که حدود ۸۹ درصد بادهای دارای سرعتی کمتر از 6 m/s ، ۱۰٫۶ درصد بادهای با سرعتی بین $6-10 \text{ m/s}$ ، ۱٫۶ درصد بین $10-15 \text{ m/s}$ ، ۰٫۹ درصد بین $15-20 \text{ m/s}$ و حدود ۰٫۱ درصد با سرعت بیش از 20 m/s وزیده‌اند. همچنین بادهای با سرعت کمتر از حد آستانه معادل 6 m/s بالاترین درصد فراوانی و بادهای بیشتر از 20 m/s کمترین فراوانی را دارند (جدول ۴)، توزیع ماهانه سرعت بادهای با سرعت کمتر از حد آستانه حاکی از آن است که بیشترین وقایع باد در ماه‌های مرداد و اسفند در محدوده مطالعاتی وقوع یافته است. در حالی‌که بادهای فرساینده در ماه‌های مهر، آبان و آذر کمترین فراوانی را در سال دارند. نتایج این بخش پژوهش با نتایج بررسی پیشین نعیمی و همکاران (۱۴۰۰: ۱۵) و امیدوار و نکونام (۱۳۹۰: ۸۵) مطابقت دارد.

جدول ۴: درصد فراوانی طبقات مختلف سرعت باد در ایستگاه سینوپتیک کویر سیرجان طی دوره آماری ۱۰ساله (۱۳۹۰-۱۳۹۹)

ماه	طبقات سرعت باد	۶ >	۶-۱۰	۱۰-۱۵	۱۵-۲۰	۲۰ <	۶ <
فروردین	۸۵,۸۱۳	۱۲,۲۳۷	۱,۷۹۷	۰,۱۱۶	۰,۰۳۸	۱۴,۱۸۸	
اردیبهشت	۸۷,۷۸۸	۱۰,۶۳۷	۱,۴۹۸	۰,۰۷۷	۰,۰۰۰	۱۲,۲۱۲	
خرداد	۸۹,۸۴۶	۹,۳۰۵	۰,۷۷۲	۰,۰۷۷	۰,۰۰۰	۱۰,۱۵۴	
تیر	۸۶,۲۴۲	۱۲,۶۴۴	۱,۰۷۶	۰,۰۰۰	۰,۰۳۸	۱۳,۷۵۸	
مرداد	۸۱,۹۴۷	۱۶,۲۹۰	۱,۶۴۸	۰,۱۱۵	۰,۰۰۰	۱۸,۰۵۳	
شهریور	۸۹,۵۳۶	۹,۵۰۶	۰,۹۵۸	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۱۰,۴۶۴	
مهر	۹۵,۹۲۴	۳,۹۵۷	۰,۱۱۹	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۴,۰۷۶	
آبان	۹۴,۹۴۷	۴,۶۱۹	۰,۴۳۴	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۵,۰۵۳	
آذر	۹۵,۰۶۷	۴,۷۷۵	۰,۱۵۸	۰,۰۰۰	۰,۰۰۰	۴,۹۳۳	
دی	۹۱,۵۷۸	۷,۶۷۱	۰,۶۷۲	۰,۰۷۹	۰,۰۰۰	۸,۴۲۲	
بهمن	۸۷,۲۰۳	۱۱,۰۵۴	۱,۴۶۶	۰,۲۷۷	۰,۰۰۰	۱۲,۷۹۷	
اسفند	۸۴,۶۳۱	۱۳,۳۴۱	۱,۷۰۳	۰,۲۸۴	۰,۰۴۱	۱۵,۳۶۹	
سالانه	۸۸,۶۱۸	۱۰,۲۰۱	۱,۰۸۲	۰,۰۸۹	۰,۰۱۰	۱۱,۳۸۲	

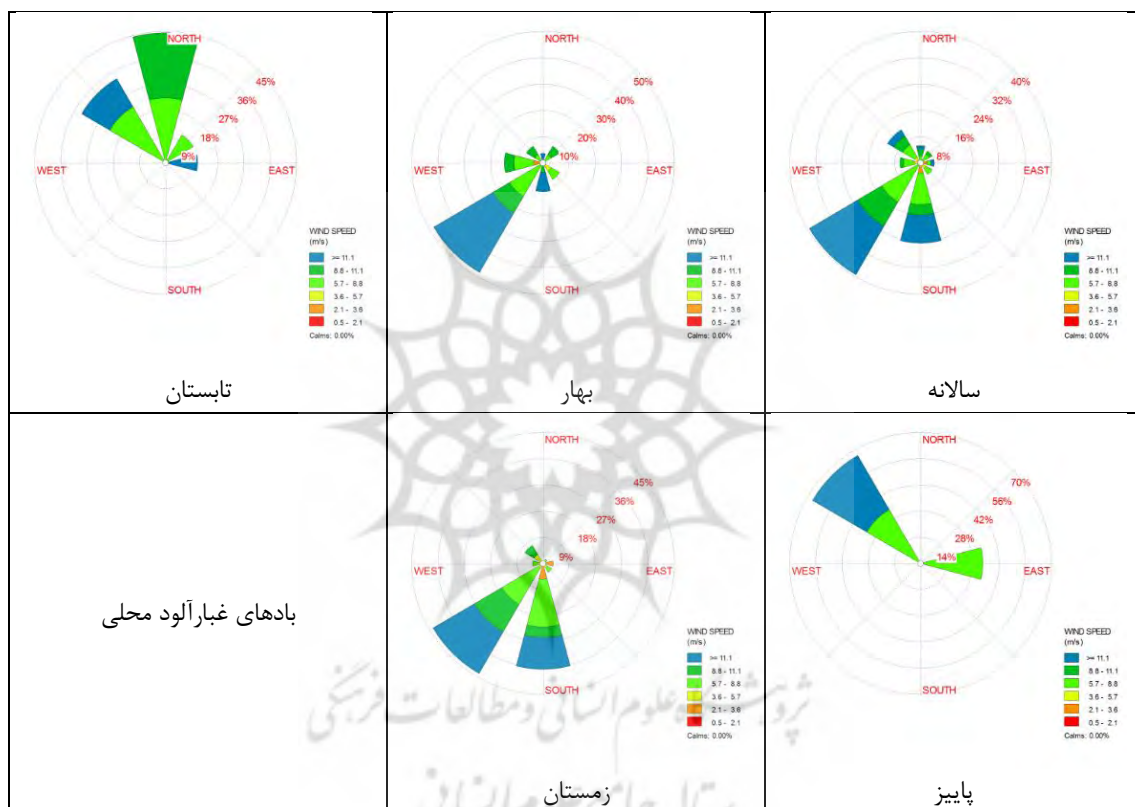
همان‌گونه که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، اوج رخدادهای محلی در سال‌های ۱۳۹۱ (۶۳ روز)، ۱۳۹۳ (۵۳ روز غبارآلود)، ۱۳۹۰ (۴۴ روز غبارآلود) و ۱۳۹۸ (۴۳ روز غبارآلود) به وقوع پیوسته و در سال ۱۳۹۲ (۲۲ روز غبارآلود) کمترین رخداد بوده است. روند کلی تغییرات روزهای توأم با گردوغبار، سیر نزولی داشته و این نتیجه می‌تواند بیانگر کاهش روند تخریب ناشی از رخداد فرسایش بادی و افزایش کیفیت هوا در این منطقه باشد.



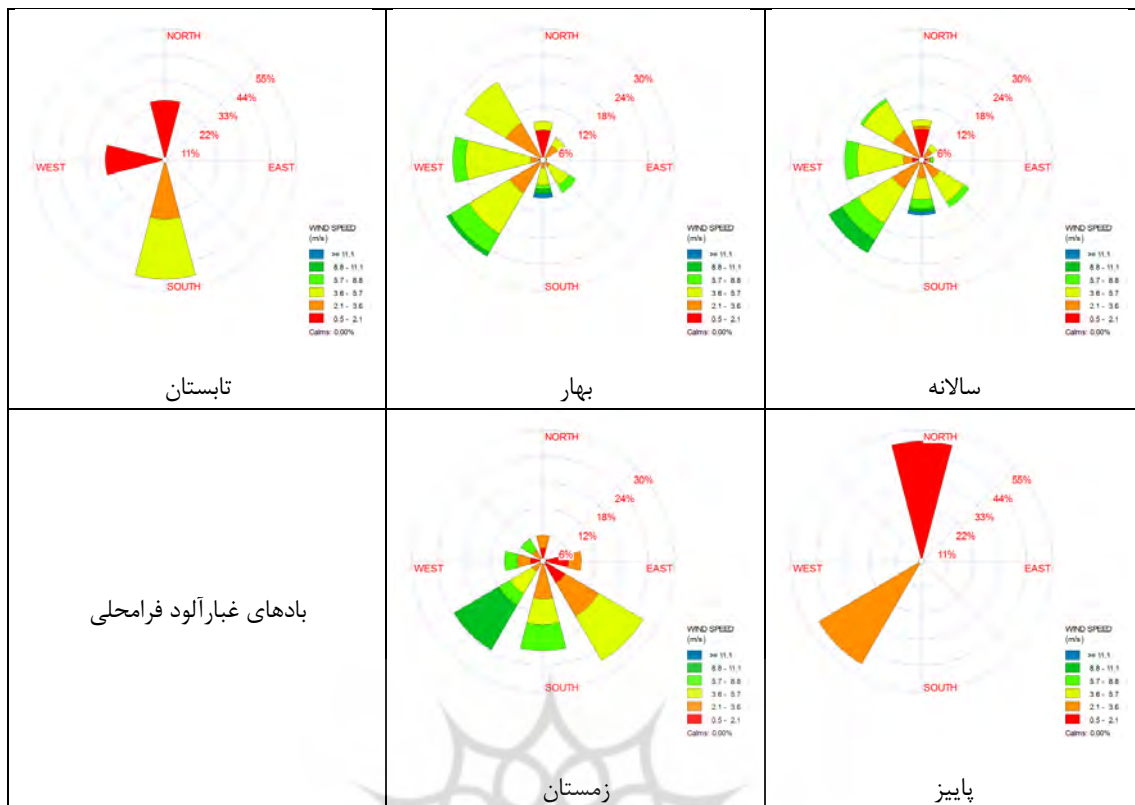
شکل ۳: تعداد روزهای غبارآلود محلی در کویر سیرجان طی دوره آماری ۱۰ساله (۱۳۹۰-۱۳۹۹)

بررسی جهت بادهای غبارآلود محلی در ایستگاه کویر سیرجان (شکل ۴) نشان داد که جهت این بادهای در طول سال و همچنین فصل بهار از سمت جنوب‌غربی است؛ ولی نکته‌ی حائز اهمیت این است که جهت یافتگی خاص نبکاها که

توسط باد تعیین می‌شود، نشان می‌دهد که بادهای جنوب‌غربی و غربی با مجموع ۴۲ درصد که از روی کویر سیرجان می‌گذرند و حاوی ذرات نمک و گچ هستند و در مجموع سرعت باد در سیرجان در دوره‌ی آماری مورد مطالعه طبق تجزیه و تحلیل‌های به‌عمل‌آمده، دارای یک‌روند افزایشی است (مقصودی و همکاران، ۱۳۹۴: ۱۱۳). در فصل تابستان بادهای غبارآلود از دو جهت شمال و شمال‌غربی، در فصل پاییز از سمت شمال‌غربی و در فصل زمستان از سمت جنوب و جنوب‌غربی به سمت منطقه می‌وزند. با توجه به مطالعات پیشین (امیدوار و نکونام، ۱۳۹۰: ۹۹) این دیاگرام، طبقه‌بندی و توزیع سمت و سرعت بادهای همراه با گردوغبار را در ایستگاه هواشناسی منطقه مورد مطالعه در دوره آماری مورد نظر مشخص می‌کند. بررسی جهت بادهای غبارآلود فرامحلی در شکل (۵) نشان داده شده است که جهت این بادهای نیز در طول سال و فصل بهار از جنوب‌غربی، در فصل تابستان از سمت جنوب، در فصل پاییز از دو جهت سمت شمال و جنوب‌غربی و در فصل زمستان از سه جهت جنوب، جنوب‌شرقی و جنوب‌غربی به سمت منطقه می‌وزند.



شکل ۴: جهت غالب بادهای غبارآلود محلی در کویر سیرجان طی دوره آماری ۱۰ساله (۱۳۹۹-۱۳۹۰)



شکل ۵: جهت غالب بادهای غبارآلود فرامحلی در کویر سیرجان طی دوره آماری ۱۰ساله (۱۳۹۰-۱۳۹۹)

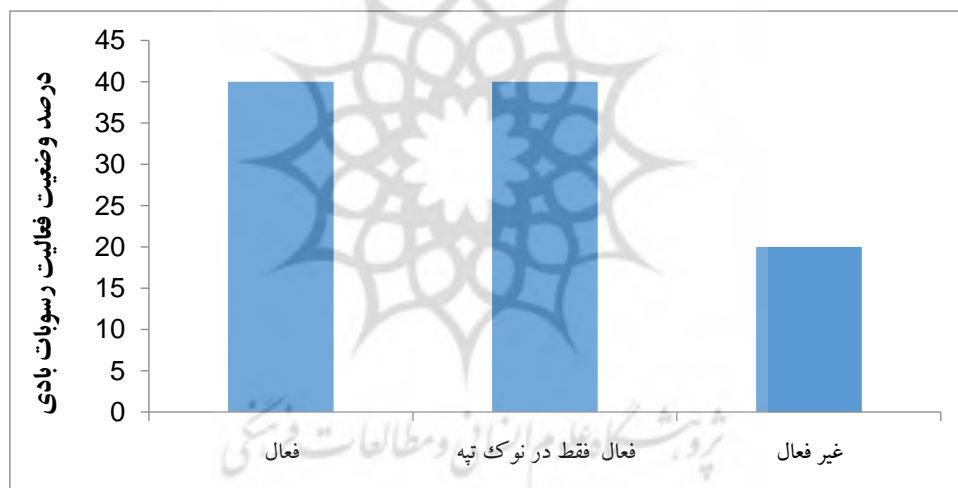
۳-۱- میزان فعالیت تپه‌های ماسه‌ای و تغییرات زمانی شاخص خشکی

با استفاده از شاخص اقلیمی مقادیر شاخص سالانه‌ی لنکستر مربوط به ایستگاه سینوپتیک کویر سیرجان که بیانگر میزان تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای محدوده‌ی این شهرستان است، در جدول (۵) و درصد فعالیت آن‌ها در کل بازه‌ی زمانی مورد بررسی نشان داده شده‌اند.

بر اساس نتایج مندرج در جدول (۶) و شکل (۶)، در ۴۰٪ سال‌های مطالعاتی (۴ سال) وضعیت تپه‌های ماسه‌ای فعال و در ۲۰٪ سال‌های بازه‌ی زمانی مورد بررسی (۲ سال) وضعیت تپه‌های ماسه‌ای غیرفعال بوده است. ۴۰٪ سال‌های مطالعاتی تپه‌ها وضعیتی پایدارتر نسبت به دیگر سال‌ها داشته‌اند که بیشترین میزان تحرک در رأس تپه‌ها بوده است. اگرچه وضعیت کلی تحرک ماسه‌های روان اطراف منطقه مطالعاتی در بیشتر سال‌ها غیرفعال و یا پایدار بوده است؛ اما تغییرات کمی شاخص لنکستر در برخی سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷ به مرز فعال شدن تپه‌ها نزدیک شده است.

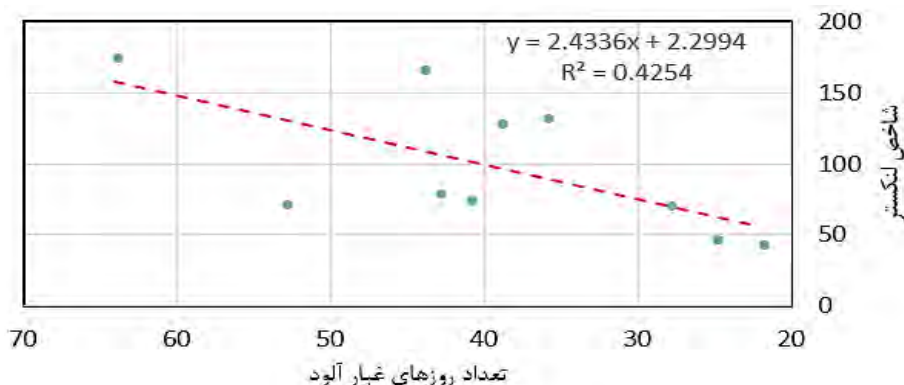
جدول ۵: شاخص لنکستر و داده‌های اقلیمی ایستگاه سینوپتیک کویر سیرجان طی دوره آماری ۱۰ساله (۱۳۹۰-۱۳۹۹)

سال	بارش (P) میلی‌متر	تبخیر و تعرق پتانسیل میلی‌متر	درصد فراوانی بادهای فرساینده (W)	P/PET	شاخص لنکستر (M)	میزان فعالیت تپه‌های ماسه‌ای
۱۳۹۰	۷۹٫۶	۱۰۰۹٫۴۳۹	۱۳٫۱	۰٫۰۸	۱۶۶٫۱	فعال
۱۳۹۱	۶۵٫۷۱	۹۷۸٫۴۲۳	۱۱٫۷	۰٫۰۷	۱۷۴٫۲	فعال
۱۳۹۲	۲۵۸٫۴۲	۹۸۸٫۴۳۳۷	۱۱٫۲	۰٫۲۶	۴۲٫۸	غیرفعال
۱۳۹۳	۱۴۶٫۷	۱۰۰۰٫۹۹۶	۱۰٫۵	۰٫۱۵	۷۱٫۳	فعال فقط در نوک تپه
۱۳۹۴	۱۱۸٫۵	۱۰۰۴٫۵۹۲	۵٫۵	۰٫۱۲	۴۶٫۹	غیرفعال
۱۳۹۵	۱۷۶٫۱	۱۰۱۸٫۱۶۱	۱۲٫۷	۰٫۱۷	۷۳٫۷	فعال فقط در نوک تپه
۱۳۹۶	۷۸٫۱	۹۸۶٫۷۵۹۲	۱۰٫۴	۰٫۰۸	۱۳۲٫۰	فعال
۱۳۹۷	۱۱۰٫۹	۱۰۲۳٫۱۵۶	۱۳٫۹	۰٫۱۱	۱۲۸٫۰	فعال
۱۳۹۸	۱۶۹٫۲	۱۰۳۲٫۱۲۷	۱۲٫۹	۰٫۱۶	۷۸٫۷	فعال فقط در نوک تپه
۱۳۹۹	۱۶۹٫۲۲	۱۰۰۷٫۲۱۶	۱۱٫۸	۰٫۱۷	۷۰٫۵	فعال فقط در نوک تپه
میانگین	۱۳۷٫۲	۱۰۰۱٫۹	۱۱٫۴	۰٫۱۴	۸۳٫۱	فعال فقط در نوک تپه



شکل ۶: میزان وضعیت فعالیت رسوبات بادی در ایستگاه سینوپتیک کویر سیرجان طی دوره آماری ۱۰ساله (۱۳۹۰-۱۳۹۹)

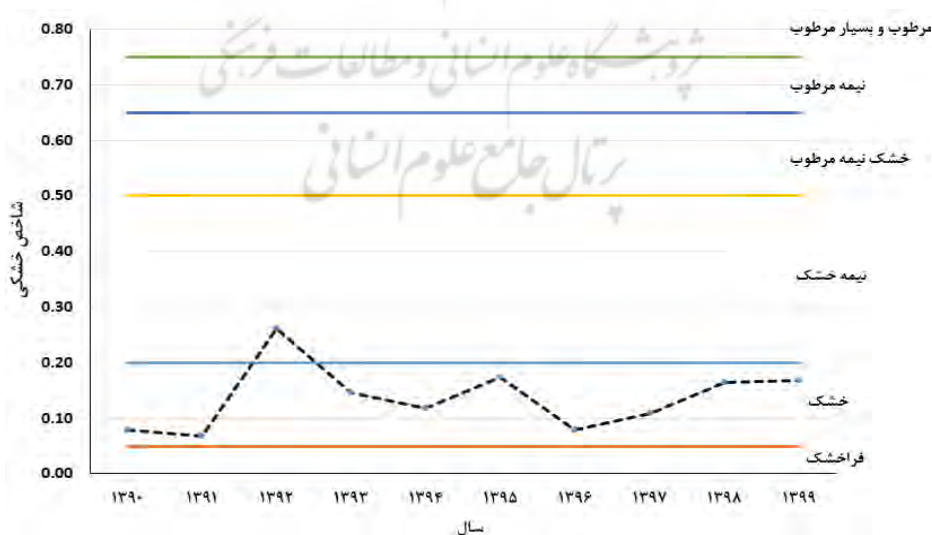
نتایج حاصل از تحلیل ارتباط بین شاخص لنکستر و تعداد روزهای غبارآلود محلی نشان داد که میزان تأثیرپذیری روزهای غبارآلود محلی منطقه‌ی مطالعاتی از فعالیت تپه‌های ماسه‌ای، ۴۲٪ بوده است (شکل ۷) که با توجه به جهت بادهای غالب غبارآلود، این نتیجه منطقی است. در حقیقت بر اساس نقشه‌ی گل‌غبارها و موقعیت کویر سیرجان می‌توان ادعان کرد که این کویر در کریدور جریان عبوری بادهای غبارآلود واقع شده است. همبستگی نسبتاً قوی و معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۰٪ بین تعداد روزهای غبارآلود محلی و شاخص لنکستر طی دوره آماری برقرار است.



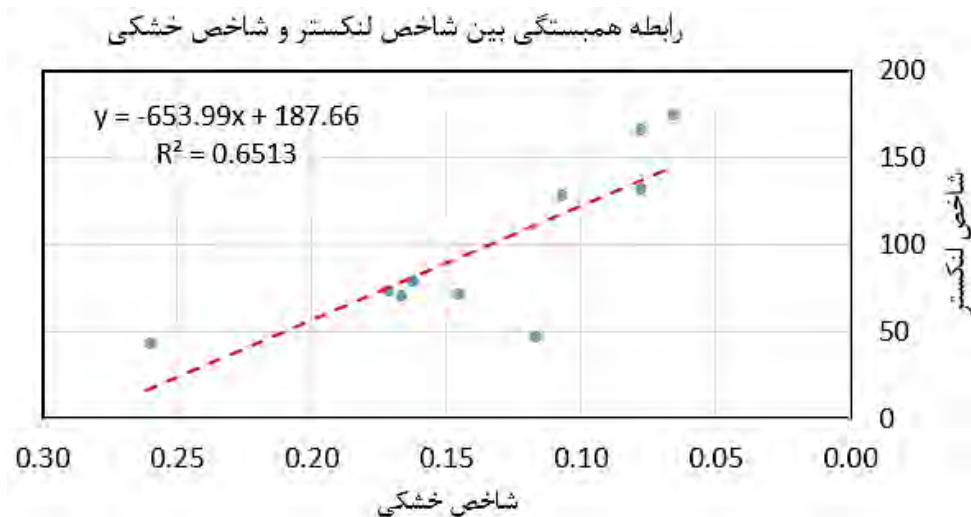
شکل ۷: رابطه همبستگی بین شاخص لنکستر و تعداد روزهای غبار آلود

شاخص خشکی بر اساس تعریف برنامه محیط‌زیست سازمان ملل متحد (UNEP) نسبت P/PE (نسبت بارندگی به تبخیر و تعرق) برای مقابله با بیابان‌زایی تأیید شده است. آنالیز شاخص خشکی ایستگاه مورد مطالعه و بر اساس جدول (۳) طبقه‌بندی شاخص خشکی در کویر سیرجان نشان داد که مقدار شاخص خشکی در دو کلاس خشک و نیمه‌خشک قرار دارند. بر اساس این شاخص شرایط اقلیمی حاکم در منطقه طی تمام سال‌ها به دلیل فعال بودن رسوبات بادی و زمان اوج رخدادهای محلی دارای شرایط خشک و فقط در سال ۱۳۹۲ شرایط نیمه‌خشک بوده است و این بدان معناست که کویر سیرجان در حدود ۹۰٪ از سال‌های آماری از نظر اقلیمی در معرض خطر بیابان‌زایی بسیار شدید بوده است (شکل، ۸). بر این اساس، با کاهش مقدار شاخص خشکی یونپ و افزایش خشکی محیط بر میزان تحرک‌پذیری ماسه در کل منطقه مطالعاتی افزوده شده و خطر بیابان‌زایی در منطقه تشدید می‌شود. این موضوع در تطابق با شاخص لنکستر و پتانسیل تحرک‌پذیری ماسه در این منطقه است.

نتایج حاصل از تحلیل رگرسیون دو متغیر بین شاخص لنکستر و شاخص خشکی نشان داد که ارتباط معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۵٪ آماری بین این متغیرها وجود داشت (شکل ۹). به عبارت دیگر، ۶۵٪ از افزایش فعالیت رسوبات بادی به دلیل تغییر در شرایط اقلیمی ناشی از تغییرات بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل این منطقه بوده است.



شکل ۸: تغییرات سالیانه شاخص خشکی در ایستگاه سینوپتیک کویر سیرجان طی دوره آماری ۱۰ساله (۱۳۹۰-۱۳۹۹)



شکل ۹: رابطه همبستگی بین شاخص لنکستر و شاخص خشکی

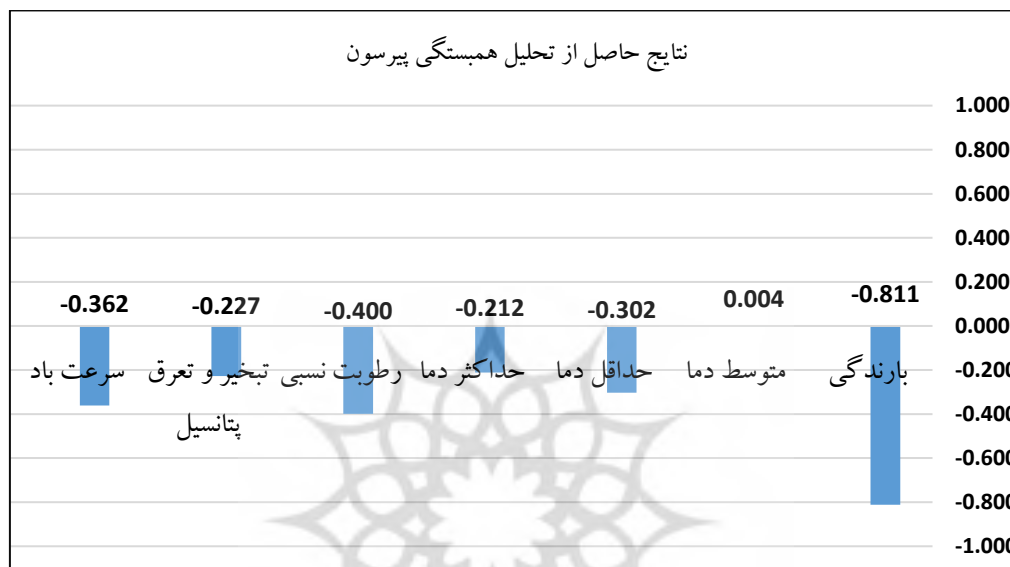
بررسی نتایج حاصل از تحلیل همبستگی میان متغیرهای اقلیمی شاخص تحرک ماسه در ایستگاه سینوپتیک کویر سیرجان (شکل ۱۰) در دوره آماری نشان داد رابطه منفی معنی‌داری میان بارندگی و فعالیت تپه وجود دارد. به طوری که طی دوره آماری مورد مطالعه کاهش بارندگی موجب افزایش مقدار شاخص تحرک تپه شده است؛ بنابراین بارندگی نقش کلیدی و مؤثری را بر تغییرپذیری شاخص لنکستر دارد؛ زیرا همبستگی بین این دو متغیر، -0.811 با سطح اطمینان 95% معنی‌دار شده است. بررسی منابع گذشته حاکی از آن است که در بازه زمانی $2017-1977$ ، نوسان فعالیت تپه‌های ماسه‌ای در برخی دیگر از مناطق ایران از جمله کویر زرین در استان یزد (شریفی پیچون و همکاران، $1399: 1$) و تپه‌های ماسه‌ای جنوب شرق استان قزوین (زندفر و همکاران، $1399: 10$) به وقوع پیوسته است. تغییرات رطوبتی و متفاوت بودن شدت خشکسالی در سال‌های مطالعاتی از علل مهم این نوسانات ذکر شده است.

نتایج تحلیل رابطه دما و تحرک پذیری تپه نشان داد دما چندان تأثیر معنی‌داری بر تحرک ماسه ندارد. این در حالی است که نتایج پژوهش حاضر نشان داد که تأثیر دمای حداکثر بر تحرک ماسه در ایستگاه مطالعاتی بیشتر است که با گزارش مطالعات پیشین (هور و همکاران، $2018: 29$ و محمدخان، $1396: 511$) همخوانی دارد.

ضریب همبستگی میان رطوبت نسبی و شاخص لنکستر نیز حاکی از تأثیر غیرمستقیم و معنی‌دار رطوبت نسبی جو بر تحرک پذیری تپه در ایستگاه سینوپتیک کویر سیرجان طی دوره آماری 10 ساله بر تحرک ماسه دارد. نتایج تحلیل ارتباط میان تبخیر و تعرق پتانسیل و شاخص لنکستر نشان داد تبخیر و تعرق بعد از بارندگی دارای تأثیر قابل توجهی بر تحرک ماسه است که با نتایج مطالعات پیشین (محمدخان، $1396: 511$) مطابقت دارد.

به طور کلی نتایج بررسی ارتباط میان شاخص تحرک ماسه و پارامترهای اقلیمی حاکی از آن است که پارامترهای بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل بیشترین تأثیر را بر تحرک ماسه در منطقه مطالعاتی دارند. با توجه به افزایش تعداد روزهای گردوغبار در منطقه مورد مطالعه که مشکلی برای محیط‌زیست منطقه محسوب می‌شود، تغییر اقلیم (یاراحمدی و همکاران، $1393: 19$) از طریق بررسی و محاسبه تغییر متغیرهای اقلیمی (اشکنزی و همکاران، $2012: 4$) بررسی شد. بررسی‌های پیشین در ارتباط با علل و پیامدهای تغییر ضرایب یا شاخص‌های اقلیمی در پهنه‌های آب‌وهوایی ایران (ابطحی و خسروشاهی، $1385: 249$ ؛ انصافی‌مقدم، $1386: 271$ ؛ قهرمان و بختیاری، $2009: 2009$ ؛ حسینی و همکاران، 1385 ؛ خسروشاهی و همکاران، $1388: 102$ ؛ تیموری و همکاران، $1390: 1$ ؛ یزاق و همکاران، $2007: 98$)، نیز نشان می‌دهد که تغییر ویژگی‌های آب‌وهوایی از جمله افزایش ضریب خشکی می‌تواند از جمله دلایل تخریب سرزمین و به تبع آن افزایش رخدادهای گردوغبار به شمار آید.

اگرچه تاکنون مطالعه‌ای راجع به وضعیت تحرک تپه‌های ماسه‌ای در کویر سیرجان انجام نشده و فقط مطالعات اندکی در خصوص ویژگی‌های اکوژئومورفولوژیکی نیکاهای این کویر انجام شده است؛ بنابراین نمی‌توان با نتایج پژوهش‌های انجام شده در این کویر مقایسه کرد اما یافته‌های حاصل از این تحقیق با نتایج برخی از پژوهشگران که به نقش عوامل اقلیمی به‌ویژه بارندگی و سرعت باد در غبارآلودتر شدن هوا اشاره کرده‌اند مطابقت دارد (ابراهیمی خوسف و همکاران، ۱۳۹۸: ۱؛ زندی‌فر و همکاران، ۱۳۹۹: ۱ و نعیمی و همکاران، ۱۴۰۰: ۸). این در حالی است که با نتایج غیرفعال شدن ریگ کاشان که در سال‌های اخیر گزارش شده است هم‌خوانی ندارد (توکلی‌فرد، ۱۳۹۱). دلیل آن را می‌توان به متفاوت بودن شرایط اقلیمی حاکم بر مناطق مختلف و شیوه‌های مدیریتی اعمال شده بر تثبیت تپه‌های ماسه‌های روان داد.



شکل ۱۰: تحلیل همبستگی پیرسون بین پارامترهای اقلیمی و شاخص لنکستر در ایستگاه سینوپتیک کویر سیرجان طی دوره آماری ۱۰ساله (۱۳۹۹-۱۳۹۰)

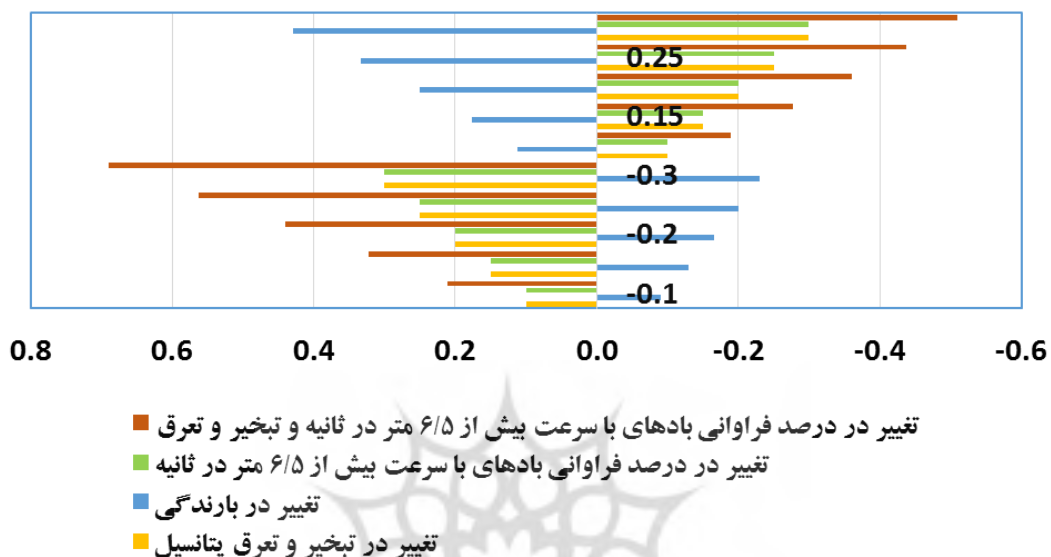
۳-۲- پیش‌بینی اثرات تغییر احتمالی عوامل اقلیمی بر تحرک پذیری تپه‌های ماسه‌ای

برای بازه‌ی زمانی طولانی‌مدت (۱۳۹۰-۱۳۹۹)، مقدار متوسط بارندگی در ایستگاه کویر سیرجان ۱۳۷/۲ میلی‌متر، تبخیر پتانسیل ۱۰۰۱/۹ میلی‌متر، درصد بادهای فرسایش‌زا ۱۱/۴٪ و مقدار شاخص لنکستر ۸۳/۱ تخمین زده شده است. تپه‌های ماسه‌ای کویر سیرجان که در محدوده‌ی این ایستگاه پراکنده شده‌اند، در گذشته اغلب وضعیت فعال در نوک تپه‌ها و کاملاً فعالی را تجربه کرده‌اند. میزان حساسیت شاخص لنکستر به تغییرات هر یک از پارامترهای اقلیمی باد، باران، تبخیر و تعرق پتانسیل و هم‌زمان باد و تبخیر و تعرق پتانسیل در ایستگاه سینوپتیک کویر سیرجان در آینده بررسی شد (شکل ۱۱). بر اساس آزمون تحلیل حساسیت مشخص شد که اگر در آینده، فراوانی بادهای فرساینده به میزان ۳۰٪ افزوده شود، فعالیت تپه‌های ماسه‌ای در ایستگاه کویر سیرجان ۳۰٪ افزایش خواهد یافت. همچنین میزان کاهش و افزایش فعالیت تپه در اثر کاهش و افزایش ۳۰٪ بارندگی به ترتیب ۴۳ و ۲۳٪ خواهد بود. همچنین تغییرات ۳۰٪ توأم فراوانی بادهای فرساینده در آینده، وضعیت فعالیت تپه در ایستگاه کویر سیرجان از حالت فعال فقط در نوک تپه برابر ۸۳/۱ به فعال، یعنی ۱۰۸ تغییر خواهد یافت.

نتایج تحلیل حساسیت فعالیت تپه‌های ماسه‌ای نسبت به تغییر هر یک از پارامترهای فراوانی بادهای فرساینده و تبخیر و تعرق پتانسیل در ایستگاه مطالعاتی نشان داد تأثیر این دو پارامتر بر فعالیت تپه یکسان خواهد بود. به این اساس در صورتی که به فراوانی بادهای فرساینده و یا تبخیر و تعرق پتانسیل در آینده ۳۰٪ افزوده یا کاسته شود، فعالیت تپه

ماسه‌ای در ایستگاه کویر سیرجان به ترتیب ۹۶٪ و ۵۱٪ افزایش و کاهش خواهد یافت. در حالی که کاهش بارندگی به همین میزان در ایستگاه‌های مطالعاتی به ترتیب سبب افزایش ۱۶٪ فعالیت تپه خواهد شد. محققان دیگر نیز در مطالعه خود بر پیش‌بینی تأثیر پارامترهای اقلیمی بر تحرک تپه‌های ماسه‌ای نشان دادند که کاهش بارندگی و سرعت باد مؤثرترین پارامتر بر تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای است.

دامنه تغییرات شاخص لنگستر



شکل ۱۱: پیش‌بینی وضعیت آینده تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای در محدوده‌ی کویر سیرجان با تغییرات عوامل اقلیمی

۴- بحث و نتیجه‌گیری

تپه‌های ماسه‌ای یکی از مهم‌ترین لندفرم‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌باشند که فعالیت آن‌ها همواره در مناطق خشک و نیمه‌خشک مشکلات فراوانی را برای مردم محلی ایجاد کرده است که میزان تحرک آن‌ها بسته به عوامل اقلیمی به‌ویژه سرعت و فراوانی بادهای فرسایش‌زا، بارندگی و میزان تبخیر و تفرق متغیر است؛ بنابراین، به‌منظور کاهش خسارات ناشی از آن، شناسایی تپه‌های ماسه‌ای فعال و تثبیت آن‌ها امری ضروری است؛ لذا پایش عوامل اقلیمی به همراه تحلیل رویدادهای گردوغبار می‌تواند گامی مثبت در راستای شناخت عوامل مؤثر بر فعالیت آن‌ها و پیش‌بینی وضعیت تحرک‌پذیریشان در آینده باشد و انجام پژوهش‌هایی با این محوریت جهت کاهش اثرات نامطلوب زیست‌محیطی مرتبط با آن‌ها، ضروری به نظر می‌رسد. در این پژوهش با در نظر گرفتن شرایط آب‌وهوایی و رژیم بادی کویر سیرجان طی دوره آماری ۱۰ ساله (۱۳۹۹-۱۳۹۰) وضعیت تحرک‌پذیری ماسه‌های روان محدوده‌ی کویر سیرجان در گذشته و پیش‌بینی شرایط آن‌ها در آینده مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که در منطقه مورد مطالعه، بیشتر اشکال ماسه‌ای از نوع فعال‌اند و ۹۰٪ از سال‌های آماری از نظر اقلیمی در معرض خطر بیابان‌زایی خیلی شدید قرار داشته است و ۶۵٪ از افزایش فعالیت رسوبات بادی به دلیل تغییر در شرایط اقلیمی ناشی از تغییرات بارندگی و تبخیر و تفرق پتانسیل این منطقه بوده است. پیش‌بینی می‌شود که تغییر توأم عناصر اقلیمی به‌ویژه سرعت بادهای فرسایش‌زا و تبخیر و تفرق در آینده بتواند شدت بیابان‌زایی را در این منطقه از کشور تحت تأثیر قرار دهد.

بارندگی، فراوانی بادهای فرساینده و تبخیر و تعرق پتانسیل به میزان ۳۰٪ افزوده شود، فعالیت تپه‌ماسه‌ای در ایستگاه کویر سیرجان به ترتیب ۲۳٪ کاهش و در دو پارامتر اقلیمی بعدی ۳۰٪ افزایش خواهد یافت همچنین با کاهش ۳۰٪ بارندگی ۴۳٪ فعالیت تپه‌های ماسه‌ای افزایش می‌یابد. اما تأثیر تبخیر و تعرق پتانسیل و بادهای فرساینده هم‌زمان در وضعیت تپه‌های ماسه‌ای بسیار مؤثر بوده به طوری که تغییرات ۳۰٪ توأم فراوانی بادهای فرساینده و تبخیر و تعرق در آینده، فعالیت تپه‌های ماسه‌ای ۶۹٪ افزایش و از حالت فعال فقط در نوک تپه به فعال تبدیل شده و در اثر کاهش توأم دو پارامتر یادشده به میزان ۳۰٪، فعالیت تپه‌های ماسه‌ای ۵۱٪ کاهش و از حالت فعال فقط در نوک تپه به غیرفعال تغییر خواهد یافت. نتایج پیش‌بینی بیانگر آن است که وضعیت تحرک رسوبات بادی ناشی از تپه‌ماسه‌ای در ایستگاه مطالعاتی نسبت به کاهش عوامل اقلیمی، در مقایسه با افزایش آن‌ها، حساسیت بیشتری دارد که با نتایج نعیمی و همکاران (۱۴۰۰) مطابقت دارد. با توجه به نتایج، به‌کارگیری روش‌های نوین تثبیت خاک در منطقه مطالعاتی به‌منظور حفظ سرمایه و افزایش ایمنی توصیه می‌شوند.

منابع

۱. ابراهیمی خوسفی، زهره، خسروشاهی، محمد، نعیمی، مریم، زندی‌فر، سمیرا، (۱۳۹۸)، ارزیابی و پایش تغییرات رطوبت تالاب میقان با استفاده از تکنیک دورسنجی و ارتباط آن با شاخص‌های خشکسالی هواشناسی. سنجش-ازدور و سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، دوره ۱۰، شماره ۲، صص ۱۴-۱.
۲. ابطحی، سیدمرتضی و خسروشاهی، محمد، (۱۳۸۴)، قلمرو بیابان‌های استان اصفهان از جنبه اقلیم شناسی، تحقیقات مرتع و بیابان ایران، دوره ۱۲، شماره ۳ (پیاپی ۲۰)، صص ۲۶۲-۲۴۹.
۳. احمدی بیرگانی، حسام، (۱۳۸۷)، شبیه‌سازی حرکت تپه‌ماسه‌ای به کمک روش‌های تجربی و عددی (مطالعه موردی: ارگ ریگ بلند کاشان)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی منابع طبیعی-بیابان‌زدایی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران.
۴. امیدوار، کمال و نکونام، زری، (۱۳۹۰)، کاربرد گلباد و گل‌غبار در تحلیل پدیده گردوخاک و تعیین رژیم فصلی بادهای همراه با این پدیده (مطالعه موردی: شهر سبزوار)، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی (پژوهش‌های جغرافیایی)، تابستان ۱۳۹۰، دوره ۴۳، شماره ۷۶، صص ۱۰۴-۸۵.
۵. انصافی‌مقدم، طاهره، (۱۳۸۶)، ارزیابی چند شاخص خشکسالی اقلیمی و تعیین مناسب‌ترین شاخص در حوضه دریاچه نمک، تحقیقات مرتع و بیابان ایران، تابستان ۱۳۸۶، دوره ۱۴، شماره ۲ (پیاپی ۲۷)، صص ۲۸۸-۲۷۱.
۶. تیموری، مهدی، عبدالهی مایوان، محبوبه، بتول‌نژاد، حسن و گرابی، پرویز، (۱۳۹۰)، بررسی روند شاخص خشکی در ایران، اولین کنفرانس ملی خشکسالی و تغییر اقلیم، کرج، ایران.
۷. توکلی‌فرد، اصغر، (۱۳۹۱)، مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای و ارتباط آن‌ها با رژیم باد (مطالعه موردی: ارگ کاشان). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه کاشان، ایران.
۸. حسینی، مجید، خسروشاهی، محمد، عطاپور، عباس و کرمی، سیدعزیز، (۱۳۸۵)، معرفی و تعیین ویژگی‌های بیابان‌های اقلیمی و زمین‌شناسی در استان تهران، تحقیقات مرتع و بیابان ایران، دوره ۱۳، شماره ۲ - شماره پیاپی ۲، صص ۱۰۸-۱۰۲.
۹. حیدری نسب، مهدی، کرم، امیر، نگارش، حسین و پهلوانروی، احمد. (۱۳۹۷)، تحلیل مخاطرات ناشی از جابه‌جایی تپه‌های ماسه‌ای در دشت سیستان. مطالعات جغرافیایی مناطق خشک. ۱۳۹۷؛ دوره ۹، شماره ۳۴، صص ۷۵-۵۹.

۹۰. خسروشاهی، محمد، کاشکی، محمدتقی و انصافی مقدم، طاهره، (۱۳۸۸)، قلمرو بیابان‌های اقلیم‌شناسی ایران، تحقیقات مرتع و بیابان ایران، بهار ۱۳۸۸، دوره ۱۶، شماره ۱ (پیاپی ۳۴)، صص ۹۶-۱۱۳.
۹۱. شریفی پیچون، محمد، غفاریان، حمیدرضا و میری، زینب، (۱۳۹۹)، بررسی مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای و انطباق آن با داده‌های باد در منطقه ریگ زرین، کاوش‌های جغرافیایی مناطق بیابانی، دوره ۸، شماره ۱، صص ۱-۲۲.
۹۲. زندی فر، سمیرا، خسروشاهی، محمد، ابراهیمی خوسفی، زهره و نعیمی، مریم، (۱۳۹۹)، بهره‌گیری از شاخص لنکستر برای واکاوی فعالیت تپه‌های ماسه‌ای در مناطق خشک و تحلیل حساسیت عوامل مؤثر بر آن (بررسی موردی: منطقه بوئین‌زهر، قزوین)، مجله مدیریت بیابان، دوره ۸، شماره ۱۶، صص ۱-۱۶.
۹۳. کلینسلی، دانیل (۱۳۸۱)، کویرهای ایران و خصوصیات ژئومورفولوژیکی و پالئوکیمااتولوژی آن (چاپ اول)، ترجمه: عباس پاشایی، تهران، انتشارات سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح، صص ۳۲۸.
۹۴. محمدخان، شیرین، (۱۳۹۶)، بررسی وضعیت و روند تغییرات طوفان‌های گردوغبار در ایران در دوره زمانی ۱۳۶۴ الی ۱۳۸۴، مرتع و آبخیزداری (منابع طبیعی ایران)، دوره ۷۰، شماره ۲، صص ۴۹۵-۵۱۴.
۹۵. مقصودی، مهران؛ پاریزی، اسماعیل و ویسی، عبدالکریم، (۱۳۹۴)، تحلیل مقایسه‌ای ویژگی‌های اکوتومورفولوژیکی نیکاهای سیرجان و شهرابک؛ مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، دوره ۶، شماره ۲۲، صص ۱۰۴-۱۲۰.
۹۶. نظری سامانی، علی‌اکبر، راهداری، محمدرضا و راهی غلامرضا، (۱۳۹۹)، ارزیابی تغییرات مکانی فرسایش‌پذیری بادی اراضی در حاشیه دریاچه ارومیه، نشریه مدیریت بیابان، دوره ۸، شماره ۱۵، صص ۷۲-۵۳.
۹۷. نعیمی، مریم، زندی فر، سمیرا، خسروشاهی، محمد، عشوری، پروانه و عباسی، حمیدرضا، (۱۴۰۰)، بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای در شهرستان سبزوار، نشریه مدیریت بیابان، دوره ۹، شماره ۲، صص ۱-۱۸.
۹۸. یاراحمدی، داریوش، نصیری، بهروز، خوش‌کیش، اسدالله و نیک‌بخت، حاتم، (۱۳۹۳)، تأثیر نوسانات آب‌وهوایی بر رخداد پدیده گردوغبار (مطالعه موردی گردوغبارهای غرب و جنوب‌غرب ایران)، مجله علمی پژوهشی مهندسی اکوسیستم بیابان، دوره ۳، شماره ۵، صص ۱۹-۲۸.
1. Abbasi, H.R., Opp, Ch., Groll, M., Gohardoust, A. (2019). Wind regime and sand transport in the Sistan and Registan regions (Iran/Afghanistan). *Zeitschrift für Geomorphologie*, 62(1), 41-57
 2. Alexander, W. R. G., (2007). Locally-developed climate model verified. *Water Wheel*, 6(1), 27-29.
 3. Ashkenazy, Y. Yizhaq, H., Tsoar, H. (2012). Sand dune mobility under climate change in the Kalahari and Australian deserts, June 2012 *Climatic Change*, 112(3), 1-23.
 4. Buckley, R. (1987). The effect of sparse vegetation on the transport of dune sand by wind. *Nature* 325, 426-428.
 5. Buckley, R., Sep. (1996). Effects of vegetation on the transport of dune sand. *Annals of Arid Zone*, 35 (3), 215-223.
 6. Del Valle, H, Rostagno, C, Coronato, F, et al. (2008). Sand dune activity in north-eastern Patagonia. *Journal of Arid Environments*, 72, 411-422.
 7. Fitzsimmons, K. E., Bowler, J. M., Rhodes, E. J., Magee, J. M., Jul. (2007a). Relationships between desert dunes during the late quaternary in the Lake Frome region, Strzelecki Desert, Australia. *J. Quaternary Science*, 22 (5), 549-558.
 8. Fitzsimmons, K. E., Rhodes, E. J., Magee, J. W., Barrows, T. T. (2007b). The timing of linear dune activity in the Strzelecki and Tirari Deserts, Australia. *Quat. Sci. Rev.* 26 (19-21), 2598-2616.

9. Fryberger, S. G. (1979). Dune forms and wind regime. 137-169. In: McKee, E. D. (Eds.), a study of global sand seas, United States Geological Survey Professional Paper, 1052p.
10. Ghahreman, N., & Bakhtiari, B. (2009). Solar radiation estimation from rainfall and temperature data in arid and semi-arid climates of Iran. *Desert*, 14(2), 141-150
11. Hesse, P. P., Humphreys, G. S., Selkirk, P. M., Adamson, D. A., Gore, D. B., Nobes, D. C., Price, D. M., Schwenninger, J. L., Smith, B., Tulau, M., Hemmings, F. (2003). Late Quaternary aeolian dunes on the presently humid Blue Mountains, eastern Australia. *Quaternary Intertropical*, 108, 13–32.
12. Hoover, R. H., Gaylord, D. R., & Cooper, C. M. (2018). Dune mobility in the St. Anthony Dune Field, Idaho, USA: effects of meteorological variables and lag time. *Geomorphology*, 309, 29-37.
13. Hugenholtz, C. H., Wolfe, S. A. (2005). Biogeomorphic model of dunefield activation and stabilization on the northern Great Plains. *Geomorphology* 70 (1-2), 53–70.
14. Johanna C. S., Hamish A. M., & David T. N. (2008). Meteorological controls on sand transport and dune morphology in a polar-desert: Victoria Valley, Antarctica. *Earth Surf. Process. Landforms* 33, 1875–1891.
15. Lancaster, N. (1988). Development of linear dunes in the southwestern Kalahari, southern Africa. *J. Arid Environ* 14, 233–244.
16. Muhs, D. R., Maat, P. B. (1993). The potential response of eolian sands to greenhouse warming and precipitation reduction on the Great Plains of the USA. *J. Arid Environ* 25, 905–918.
17. Okin, G. S. (2008). A new model of wind erosion in the presence of vegetation. *J. Geophys. Res.-Earth Surface* 113, *Journal of geophysical research*, 113, F02S10, 1-11
18. Rahdari, M.R., & Rodríguez-Sejjo, A. (2021). Monitoring Sand Drift Potential and Sand Dune Mobility over the Last Three Decades (Khartouran Erg, Sabzevar, NE Iran), *sustainability*, 13, 1-16.
19. Stone, A. E. C., Thomas, D. S. G. (2008). Linear dune accumulation chronologies from the southwest Kalahari, Namibia: challenges of reconstructing late Quaternary palaeoenvironments from aeolian landforms. *Quat. Sci. Rev.* 27, 1667–1681.
20. Talbot, M. R. (1984). Late Pleistocene rainfall and dune building in the Sahel. *Palaeoecology of Africa*, 16, 203–214.
21. Taniguchi, K., Endo, N., Sekiguchi, H. (2012). The effect of periodic changes in wind direction on the deformation and morphology of isolated sand dunes based on flume experiments and field data from the Western Sahara. *Geomorphology*, 179(15), 286-299.
22. Thomas, D. S. G., Knight, M., Wiggs, G. F. S. (2005). Remobilization of southern African desert dune systems by twenty-first century global warming. *Nature*, 435, 1218–1221.
23. Tsoar, H., Nov. (2005). Sand dunes mobility and stability in relation to climate. *Physica A*, 357 (1), pp50–56.
24. Wang, X., Dong, Z., Liu, L., Qu, J. (2004). Sand sea activity and interactions with climatic parameters in the Taklimakan Sand Sea, China. *Journal of Arid Environments*. 57, 85–98.
25. Wasson, R. J. (1984). Late Quaternary palaeoenvironments in the desert dune fields of Australia. In: Vogel, J. C. (Ed.), *Late Cainozoic Palaeoclimates of the Southern Hemisphere*. A. A. Balkema, Rotterdam, pp 419–432.
26. Wasson, R. J., Nanninga, P. M. (1986). Estimating wind transport of sand on vegetated surfaces. *Earth Surface Processes and Landforms* 11 (55), 505–514.
27. Wolfe, S. A., Nickling, W. C. (1993). The protective role of sparse vegetation in wind erosion. *Prog. Phys. Geog.* 17, 50–68.
28. Yizhaq, H., Ashkenazy, Y., & Tsoar, H. (2007), why do active and stabilized dunes coexist under the same climatic conditions? *Physical Review Letters*, 98 (18), 98–101.

Monitoring and forecasting of climatic factors affecting the mobility of sand dunes using Lancaster index (Case study: Sirjan desert)

Mahin Hanifehpour, PhD in Combating Desertification, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Iran

Leila Biabani, PhD Student of Desert Management and Control, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Iran

Hassan Khosravi*, Corresponding Author and Associate Professor in Combating Desertification, Faculty Natural Resources University of Tehran, Iran

Behrooz Akbarpoor Bonab, Expert in Hydro climate, Abkhan Consulting Engineers, Tehran, Iran

Abstract

Sand dunes are one of the most important landforms sensitive to wind erosion, the extent of which varies depending on the severity of the impact of various climatic and environmental factors. Sand dunes cover large areas of the land and are located mainly in arid areas. Long-term monitoring of these factors along with the mobility of sands dune in different areas can have a significant effect on reducing their adverse effects. The study area, Sirjan desert, is located in Kerman province. For this purpose, the hourly data of wind speed, dust phenomenon code, rainfall and air temperature of Sirjan synoptic station were used in the statistical period of 2011 to 2020. Rainfall and temperature data were used to calculate the amount of evapotranspiration by the Torment White method. After calculating the percentage of erosive winds and drought index, the mobility status of sand dunes in the area was investigated using the Lancaster index. Sensitivity analysis test was used to predict the effect of possible change of climatic factors on the mobility of moving sand dunes. About 90% of the statistical years were at high risk of desertification in terms of climate. Accordingly, with decreasing the amount of UNEP drought index and increasing environmental drought, the mobility of sand dunes in the whole study area and the risk of desertification will increase. The annual Lancaster index values at this station indicate that the status of active sand dunes is only at the top of the sand dunes. Based on the sensitivity analysis, it was found that if the frequency of erosive winds and evapotranspiration increases by 30%, the activity of sand dunes will increase by 69%. In other words, the active state of just at the top of the sand dunes will change to the active sand dune state. Due to the combined reduction of the two mentioned parameters by the same amount, the activity of sand dunes will decrease by 51% and will change from active only at the top of the sand dunes to inactive.

Keywords: Lancaster Index, Desertification, Sensitivity Analysis, Sirjan

* Email: hakhosravi@ut.ac.ir