

پایش و پیش‌بینی عوامل اقلیمی مؤثر بر تحرک پذیری تپه‌های ماسه‌ای با استفاده از شاخص لنکستر (مطالعه موردی: دیر، استان بوشهر)

غلامرضا راهی^{۱*}، فاطمه بحرینی^۲، محمد خسروشاهی^۳، لیلا بیابانی^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۸/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۷/۱۲

چکیده

تپه‌های ماسه‌ای از مهم‌ترین و حساس‌ترین لندفرم‌های حساس به فرسایش بادی‌اند که میزان فعالیت آن‌ها بسته به شدت تأثیر عوامل متعدد اقلیمی و زمینی، متفاوت است. محدوده مطالعاتی، یکی از شهرستان‌های استان بوشهر در جنوب ایران قرار دارد که همواره فعالیت تپه‌های ماسه‌ای مشکلات فراوانی را برای مردم محلی ایجاد کرده است. به‌منظور کاهش خسارات ناشی از آن، شناسایی تپه‌های ماسه‌ای فعال و عوامل تأثیرگذار بر آن‌ها، امری ضروری است. لذا در این تحقیق، ابتدا روند پارامترهای اقلیمی بارندگی، دما، تبخیر و تعرق، سرعت باد و پدیده ریزگرد با منشأ محلی و غیرمحلی در مقیاس‌های سالانه مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور، از داده‌های ساعتی سرعت باد، کد پدیده‌های گردوغبار، داده‌های بارندگی، دمای هوا و تبخیر و تعرق ایستگاه دیر در دوره آماری ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۸ استفاده شد. سپس با محاسبه درصد فراوانی بادهای فرساینده و شاخص خشکی، با بهره‌گیری از شاخص لنکستر وضعیت تحرک‌پذیری ماسه‌های روان در منطقه، طی دوره آماری ۳۰ ساله مورد واکاوی قرار گرفت. به‌منظور پیش‌بینی اثر تغییر احتمالی عوامل اقلیمی بر تحرک‌پذیری ماسه‌های روان از آزمون تحلیل حساسیت استفاده شد. نتایج نشان داد میزان فعالیت تپه‌های ماسه‌ای طبق شاخص لنکستر طی دوره آماری ۳۰ ساله کاملاً فعال است و بر اساس شاخص خشکی منطقه در سه کلاس فراخشک، خشک و نیمه‌خشک و در معرض خطر بیابان‌زایی واقعی، بسیار شدید و شدید قرار دارند. بر اساس آزمون تحلیل حساسیت مشخص شد چنانچه در آینده درصد فراوانی بادهای بیشتر از آستانه فرسایش در منطقه دیر ۳۰٪ افزایش یابد، فعالیت و حرکت تپه‌های ماسه‌ای ۳۰٪ افزایش نشان می‌دهد، درحالی‌که با افزایش ۳۰٪ بارندگی ۲۳٪ کاهش در فعالیت تپه‌های ماسه‌ای مشاهده می‌شود.

کلیدواژه‌ها: تپه‌های ماسه‌ای، تحلیل حساسیت، دیر، شاخص لنکستر.

۱. استادیار پژوهشی، سازمان تات، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی، استان بوشهر، khrahi@yahoo.com

۲. دانش‌آموخته دکترای بیابان‌زدایی، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

۳. عضو هیئت‌علمی، سازمان تات، مؤسسه جنگل‌ها و مراتع و آبخیزداری کشور ایران، تهران، ایران

۴. دانشجوی دکتری مدیریت کنترل بیابان، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

* این مقاله برگرفته از طرح پژوهشی است.

مقدمه

تپه‌های ساحلی بخش مهمی از سیستم‌های تپه‌های ساحلی اند که دارای ارزش‌های ذاتی خود هستند و طیف وسیعی از خدمات را ارائه می‌دهند که نیاز به حفاظت در برابر امواج، طوفان‌ها و فرسایش دریا دارند. همچنین به‌عنوان مخازن تنوع زیستی که زیستگاه انحصاری را در جوامع تپه‌ای دارند، عمل می‌کنند. با وجود این، سیستم‌های تپه در سواحل توسعه‌یافته در طول قرن گذشته با کاهش شدید کیفیت ژئومورفولوژیکی و اکولوژیکی مواجه شده‌اند که بازسازی آن‌ها در این زمینه از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است (گارسالیوانو^۱ و همکاران، ۲۰۱۸). همچنین یکی از اشکال مورفولوژی مهم مناطق ساحلی به شمار می‌روند که در پشت ساحل تشکیل می‌شوند (حجازی و محمودی، ۲۰۱۷). این تپه‌ها زبیده اثرات متقابل امواج دریا، جریانات دریایی، وزش باد و مواد رسوبی موجود در ساحل اند (شایان و همکاران، ۲۰۱۴) تحرک تپه‌های ساحلی با واکنش‌های ژئومورفولوژیکی مرتبط با تغییر شرایط مرزی، به‌ویژه تأمین رسوب، پوشش باد و پوشش گیاهی و همچنین فعالیت‌های انسانی مشخص می‌شود (گائ^۲ و همکاران، ۲۰۲۰).

تپه‌های ماسه‌ای ساحلی مانعی در برابر امواج اند؛ علاوه بر این، مخزنی از شن و ماسه محسوب می‌شوند که می‌توانند منبع تغذیه ساحل باشند و آن را در برابر فرسایش حفظ کنند. همچنین این تپه‌های ماسه‌ای ساحلی اکوسیستم‌های گیاهی و جانوری خاص خود را تشکیل می‌دهند که دلیل دیگری بر اهمیت حفظ آن‌هاست (ویلیامز^۳ و همکاران، ۲۰۱۱). تپه‌های ساحلی که اولین و تنها خط دفاع فیزیکی برای جوامعی است که در معرض طوفان‌ها و موج‌های مخرب قرار دارند، لذا کاشت پوشش گیاهی روی آن‌ها به‌عنوان یکی از راه‌های افزایش ظرفیت حفاظتی پیشنهاد شده است (فیگین^۴ و همکاران، ۲۰۱۹).

نوع مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای در هر منطقه تابعی از

رژیم بادی آن منطقه، به‌ویژه جهت باد آن است. از آنجا که هر نوع از مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای در شرایط رژیم بادی متفاوتی توسعه می‌یابند، می‌توان بر اساس مطالعه میزان ثابت و تغییر جهت باد در هر منطقه در مقیاس‌های سالانه و فصلی، شرایط توسعه مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای مختلف را مشخص کرد (شهریار و طاهری‌نژاد، ۲۰۱۷). بر این اساس جوانا^۵ و همکاران (۲۰۰۸) معتقدند که عوامل اقلیمی نقش اصلی در کنترل مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای بر عهده دارند. به‌علاوه تانیگوچی^۶ و همکاران (۲۰۱۲) نظر دارند که اثر تغییرات دوره‌ای جهت وزش باد سبب تغییر شکل و مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای شده است. راهداری و همکاران (۲۰۲۱) 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 جهت باد در طول 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 است که کمترین و بالاترین مقادیر از ۰/۰۸ تا ۰/۹ با میانگین ۰/۲۷ ثبت شد. در نهایت، تپه‌های شنی برای مدت طولانی ثابت شده‌اند و شدت شاخص تحرک متأثر از تغییرات آب‌وهوایی است. نتایج بررسی گائ^۷ و همکاران (۲۰۲۰) در تحرک تپه‌های ساحلی نشان داد که مداخله انسان نقش عمده‌ای در تغییر تحرک تپه‌های ماسه‌ای در طول قرن گذشته داشته، درحالی‌که آب‌وهوا و طوفان‌ها نیز محرک‌های مهمی هستند. گارسالیوانو و همکاران (۲۰۱۸) وضعیت کنونی و احیای آینده سیستم‌های تپه‌های ساحلی در خط ساحلی کاتالونیا شمال غربی دریای مدیترانه را بررسی کردند؛ نتایج نشان داد که مناطق حفاظت‌شده طبیعی منطقه به‌ویژه دلتای ابرو به دلیل فشار انسان بر این سواحل توسعه یافته است. با این حال، ۳۰٪ از سواحل شنی منطقه دارای عرض بیش از ۳۵ متر است. اشکنذی^۷ و همکاران (۲۰۱۲) تحرک تپه‌های ماسه‌ای را تحت تأثیر تغییر

5. Johanna

6. Taniguchi

7. Ashkenazy

1. Garcia-Lozano

2. Gao

3. Williams

4. Feagin

آب‌وهوایی در بیابان‌های کالاهاری و استرالیا مطالعه کردند. آن‌ها نشان دادند که تغییرات پیش‌بینی‌شده در DP و بارش به‌طور کلی قابل توجه نیست و هر دو تپه‌های بیابانی مناطق مورد مطالعه به‌احتمال زیاد تا اواخر قرن بیست‌ویکم فعال نخواهند شد. با وجود این، تپه‌های استرالیا به‌دلیل کاهش بارندگی و افزایش قدرت باد نسبت به کالاهاری فعال‌ترند. دسیلوا و هسپ^۱ (۲۰۱۳) تغییرات مورفولوژیکی سواحل سانتا کاتارینا واقع در جنوب برزیل را بررسی کردند. نتایج نشان داد که عوامل انسانی مانند فشار چرا و قطع درختان منجر به پدیده پتانسیل حمل ماسه اوایل سال ۱۹۶۰ می‌شود و با افزایش بارندگی و پوشش گیاهی به میزان ۷۰٪ منجر به کاهش حمل ماسه در سواحل شده است. آرنس^۲ و همکاران (۲۰۰۵) دلیل بی‌ثباتی وسیع تپه‌های ساحلی در هلند را حذف پوشش گیاهی می‌دانند که منجر به افزایش گسترده فرایندهای بادی در منطقه شده و برای دستیابی به تحرک پایدار در تپه‌ها، ماسه‌ها باید در حرکت باشند. نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش ولی و روستایی (۲۰۱۷) با استفاده از شاخص طوفان گردوغبار برای پایش طولانی‌مدت فرسایش بادی با استفاده از داده‌های اقلیمی در ایران مرکزی حاکی از تشدید فرسایش بادی در سال‌های اخیر است، به‌طوری که بخش‌های مرکزی و جنوبی ایران مرکزی بیشترین شدت فرسایش بادی را نشان می‌دهند و با نزدیک شدن به شمال حوزه، از شدت فرسایش بادی کاسته می‌شود. نظری‌سامانی و همکاران (۲۰۲۰) با بررسی تغییرات مکانی فرسایش‌پذیری بادی اراضی در حاشیه دریاچه ارومیه نشان دادند که در قسمت‌های جنوب شرقی جزیره اسلامی و شمال غرب دریاچه ارومیه حساسیت اراضی بیشتر است. همچنین بیشترین مقدار پتانسیل حمل ماسه به‌ترتیب در ایستگاه‌های تبریز، خوی و ارومیه است. بر پایه وجود منابع تولید ماسه و انرژی باد در قسمت غربی و شمال غربی دریاچه ارومیه امکان شکل‌گیری تپه‌های ماسه‌ای و فرسایش بادی وجود دارد. نعیمی و همکاران (۲۰۲۱) با بررسی تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای سبزوار نشان دادند که شاخص خشکی تأثیر معنی‌دار بر میزان تحرک و فعالیت تپه‌های ماسه‌ای دارد و در صورت

مواد و روش

موقعیت محدوده مطالعاتی

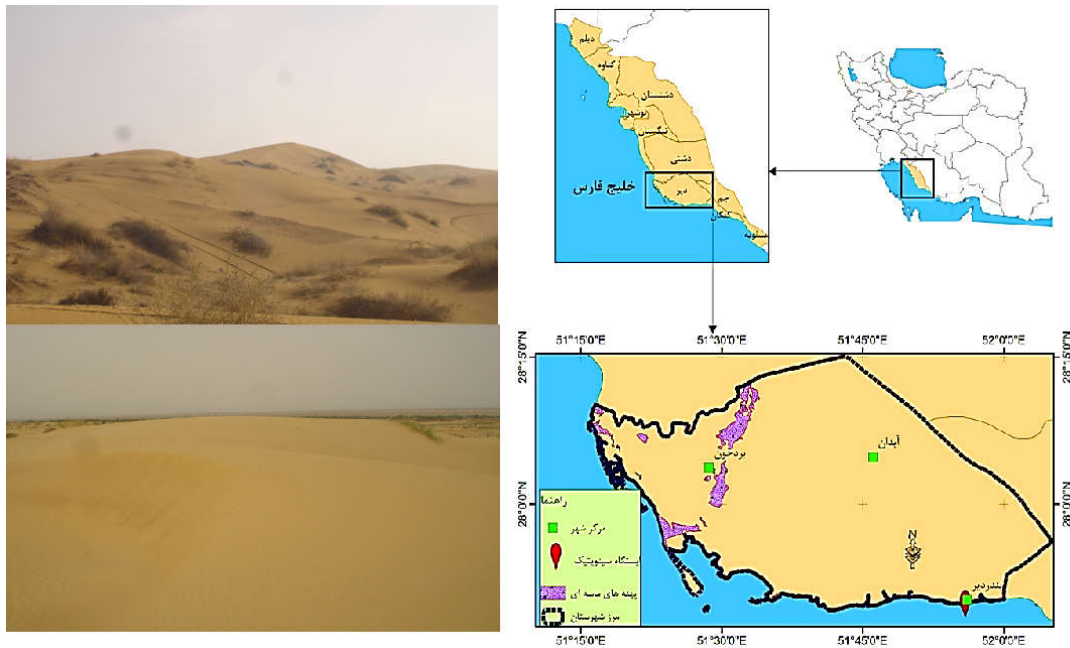
شهرستان دیر یکی از شهرستان‌های استان بوشهر در جنوب ایران و در ساحل خلیج فارس قرار دارد شکل (۱). جنس خاک منطقه قلیایی است و به همین علت گیاهان نمی‌توانند مواد مورد نیاز خود را جذب کنند؛ کمبود رطوبت زمین، حرارت زیاد هوا و کمبود مواد آلی نیز مزید بر علت شده است. همچنین وجود توده‌های نمکی سبب شور شدن آب‌های روان شده است. ناهماری‌های این منطقه جزء نواحی پست زاگرس جنوبی‌اند که ارتفاع آنها نسبت به زاگرس بلند، کمتر و قوس و چین‌ها نیز بسیار ملایم و به‌تدریج به طاقدیس و ناودیس‌ها ختم می‌شود. آب‌وهوای منطقه در بیشتر ایام سال در کنار ساحل گرم و مرطوب و در فواصل دورتر از ساحل گرم و خشک است. تنها رودخانه دائمی که از شهرستان عبور می‌کند، رودخانه مند است که در مرز شمالی شهرستان دیر با دشتی جریان دارد؛ سایر رودخانه‌ها فصلی بوده و در هنگام بارندگی جریان دارند. درجه‌حرارت در شهرستان دیر حداکثر میانگین دما ° ۷۴ سانتی‌گراد و کمترین معدل حداقل دمای سالانه ° ۲۲ سانتی‌گراد است. در فصل تابستان در زمان وزش بادهای گرم، دما به ° ۵۰ سانتی‌گراد نیز می‌رسد. سردترین هوا

1. Da Silva Hesp

2. Arens

رها شده، خورها و خلیج‌های کوچک، لندفرم‌هایی هستند که فرایند فرسایشی نقش اساسی در شکل‌گیری آن‌ها داشته است (احمدی و همکاران، ۲۰۱۴). نتایج حاصل از مطالعات مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای در منطقه نشان می‌دهد که بیشترین گسترش ارگ استان بوشهر در منطقه بردخون است که دارای شکل مشخص و منظمی نیست و تپه‌ها با اشکال مشخص و در بخش اصلی این ارگ قرار دارند و اکثراً نیمه‌فعال‌اند. تفسیر عکس‌های هوایی، تصاویر ماهواره‌ای و بازدید صحرایی از تپه‌های ماسه‌ای و همچنین فعالیت‌های کاوشی باد در آن نشان می‌دهد که تپه‌های ماسه‌ای موجود در ارگ، شامل اشکال پیش بارخانی، بارخان، بولک‌بارخانی، تپه‌های عرضی و نیکا هستند.

در اواخر دی و اوایل بهمن و گرم‌ترین زمان در تیر و مردادماه است. در این منطقه به‌لحاظ نزدیکی به دریا رطوبت زیاد بوده که حداکثر مطلق آن به ۱۰۰٪ و متوسط میزان رطوبت به ۵۶٪ نیز می‌رسد. مهم‌ترین واحدهای لندفرمی و ژئومورفولوژیکی محدوده مورد بررسی عبارت‌اند از: واحد دشت‌سر، واحد تپه‌ماهور، واحد کوهستان و لندفرم‌های منطقه کم‌عمق دریایی. نزدیکی برون‌زد واحدهای سنگی به دریا و شیب تند این بخش از ساحل باعث تشکیل دشت‌سر کوه‌رفتی، مخروط‌افکنه‌ها و مخروط‌افکنه‌های دریایی در واحد تپه‌ماهور شده است. فرایندهای رسوب‌گذاری یکی از فرایندهای مهم زایشی است که به‌واسطه اشکال مختلف ژئومورفولوژیکی تشکیل می‌شوند. لندفرم‌های بدلدند، کانال رودخانه، پیچانرود



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در ایران و استان بوشهر (دیر)
Figure (1): The location of the study area in Iran and Bushehr province (Dayer)

روش تحقیق

الف. اخذ آمار بلندمدت روزانه عناصر اقلیمی در

ایستگاه سینوپتیک

برای انجام تحقیق حاضر، مقادیر متوسط ماهیانه عناصر اقلیمی دما، بارندگی، تبخیر و تعرق، سرعت باد و کدهای مختلف هواشناسی پدیده گردوغبار در ایستگاه سینوپتیک

منطقه مورد مطالعه، برای دوره آماری (۱۹۸۹-۲۰۱۸) از سازمان هواشناسی کشور اخذ شد. به‌طور کلی، ۱۰۰ کد هواشناسی (۹۹-۰۰) توسط سازمان جهانی هواشناسی برای پدیده‌های مختلف تعریف شده که از بین آن‌ها، ۱۰ کد بیانگر گردوغبارهای محلی و یک کد (۰۶) بیانگر رویدادهای فرامحلی است. مقادیر میانگین سایر پارامترهای اقلیمی نیز برای مقیاس‌های زمانی مذکور برای تحلیل روند با رگرسیون

جدول (۳): طبقه‌بندی اقلیمی بر اساس شاخص خشکی یونپ

Table (3): UNEP Aridity index classification

نوع اقلیم	شاخص خشکی	خطر بیابان‌زایی
فراخشک	$R < 0.05$	بیابان واقعی
خشک	$0.05 < R < 0.2$	بسیار شدید
نیمه‌خشک	$0.2 < R < 0.5$	شدید
خشک نیمه‌مرطوب	$0.5 < R < 0.65$	متوسط
نیمه‌مرطوب	$0.65 < R < 0.75$	کم
مرطوب و بسیار مرطوب	$R < 0.75$	ندارد

ج. پیش‌بینی اثرات تغییر احتمالی عوامل اقلیمی بر

تحرک پذیری ماسه‌های روان

در نهایت، به منظور بررسی اثر احتمالی تغییر عناصر اقلیمی بر تحرک پذیری ماسه‌های روان و تشدید پدیده گردوغبار، پس از محاسبه میزان فعالیت رسوبات بادی، با استفاده از روش تحلیل حساسیت، میزان تأثیرپذیری متغیرهای خروجی از متغیرهای ورودی مدل تعیین شد. استفاده از آنالیز حساسیت برای تعیین روابط بین متغیرهای مدل با یکدیگر و نیز تعیین اولویت تأثیر پارامترها بر خروجی مدل مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به این موضوع و اینکه برخی از عناصر اقلیمی مانند بارندگی، بادهای فرساینده و تبخیر و تعرق در میزان تحرک ماسه‌های روان تأثیر بسزایی 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، هریک از اعداد در دامنه منفی تا مثبت ۳۰٪ تغییر داده شد. اعداد جدید در جدول جداگانه‌ای نوشته شد و شاخص تحرک‌پذیری ماسه‌ها در این شرایط محاسبه گردید.

نتایج

بررسی روند پارامترهای اقلیمی

تجزیه و تحلیل پارامترهای اقلیمی در ایستگاه دیر در طی دوره ۳۰ ساله، نشان‌دهنده تغییر مشخّص در کاهش بارش و افزایش دماست. در این ایستگاه شیب نمودار مربوط به خط رگرسیون بارندگی منفی و دما مثبت است که به روند کاهشی بارندگی (عدم معنی‌داری) و روند افزایشی و معنی‌دار دما در طول دوره آماری در این ایستگاه اشاره دارد. از نظر میزان

خطی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. محاسبه درصد فراوانی طبقات مختلف سرعت باد با در نظر گرفتن سرعت آستانه فرسایش بادی، بر اساس طبقات ۷ تا ۱۱، ۱۱ تا ۱۵، ۱۵ تا ۲۰، بیشتر از ۲۰ m/s و همچنین تعداد بادهای با سرعت کمتر از ۶ m/s محاسبه شد.

ب. محاسبه شاخص لنکستر و شاخص خشکی یونپ

در گام دوم، اقدام به محاسبه شاخص لنکستر^۱ (۱۹۸۸) برای بررسی میزان تحرک‌پذیری ماسه‌های روان منطقه مطالعاتی شد. بر این اساس دو عامل که تحرک تپه‌های ماسه‌ای را کاهش یا افزایش می‌دهند، مد نظر قرار گرفته است. عامل اول مربوط به درجه بادخیزی است (W) و عامل دوم که رشد پوشش گیاهی به آن بستگی دارد، به صورت نسبت بین متوسط بارندگی سالانه (P) و تبخیر پتانسیل (PET) سالانه بیان می‌شود که به این نسبت، «بارندگی مؤثر» نیز گفته می‌شود. به منظور تعیین فعالیت تپه‌های ماسه‌ای، با در نظر گرفتن ۳ عامل محیطی طبق رابطه (۱) به دست می‌آید (احمدی بیرگانی، ۲۰۰۸).

$$M = W / (P / PE) = (W \times PE) / P \quad (1)$$

در این رابطه، هریک از پارامترها عبارت اند 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 سالیانه برحسب میلی‌متر بر سال.

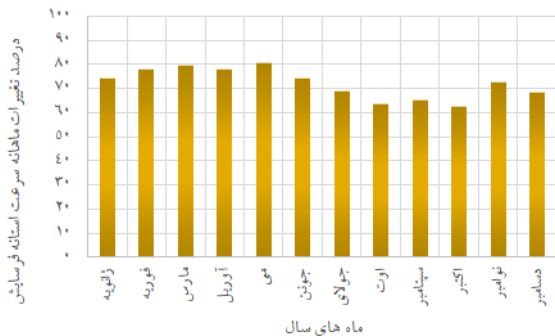
PE: تبخیر و تعرق پتانسیل سالانه برحسب میلی‌متر بر سال که در تحقیق حاضر با استفاده از روش تورنت وایت و بر اساس متوسط دمای ماهانه محاسبه شده است (جدول ۲).

جدول (۲): مقادیر شاخص لنکستر (M)

Table (2): Lancaster index values (M)

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

بازه زمانی بین ژانویه تا ژوئیه (دی تا مرداد) اتفاق می افتد و میزان فراوانی بادهای فرساینده در سایر ماهها کمتر از مقدار میانگین است. توزیع زمانی بادهای فرساینده به گونه ای است که با درصد کمی تفاوت در تمامی فصول سال رخ می دهد (شکل ۴). فصل بهار بالاترین میزان وقوع (۲۸٪) و در فصل پاییز کمترین (۲۳٪) میزان وقوع بادهای فرساینده در این ایستگاه است.

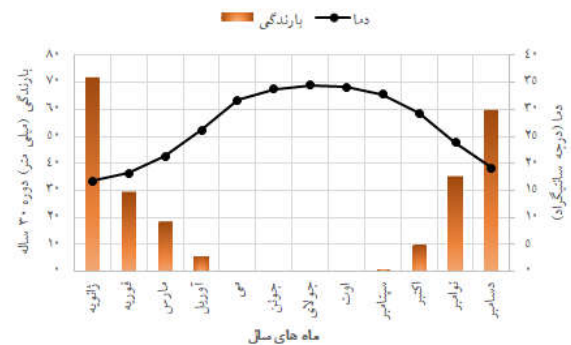


شکل (۴): نمودار تغییرات ماهانه سرعت بادهای بیشتر از سرعت آستانه فرسایش
Figure 4: Graph of monthly changes in wind speed higher than threshold erosion speed

بیشترین درصد فراوانی سرعت باد در ایستگاه دیر، مربوط به طبقه ۶-۱۰ m/s با ۵۱/۷۶٪ است (جدول ۴). همچنین میانگین درصد بادهای فرساینده یا بادهایی که قادر به تولید گردوغبارند، در بین تمامی ماههای سال بین ۶۲/۸۵٪ تا ۸۱/۱۴٪ متغیر است.

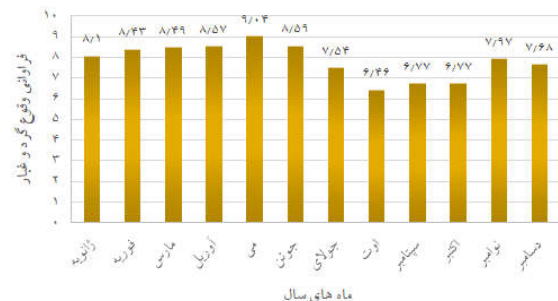
از نظر توزیع فراوانی ماهیانه برای پدیده گرد و خاک معلق در هوا بر اساس کدهای ۶ (فرامحلی) و ۷ (محلی) در ایستگاه دیر مشخص شد که بیشترین فراوانی ماهیانه، متعلق به ماههای گرم سال، یعنی ماههای ژوئن (خرداد)، ژوئیه (تیر) و اوت (مرداد) است (جدول ۵). دلیل این موضوع را می توان به وزش بادهای شدیدتر در این روزها و خشک بودن زمینهای دارای ذرات گرد و خاک، که باعث کاهش چسبندگی خاک می شود، مربوط دانست. در کل، روند افزایش وضعیت گرد و خاک از اواسط بهار رو به فزونی گذاشته، پس از طی زمان اوج خود در ماههای ژوئن و ژوئیه (خرداد و تیر) در ماههای سرد سال افول کرده، به حداقل خود می رسد. بنابراین طی ۳۰ سال گذشته پدیده طوفانهای گرد و خاک با منشأ فرامحلی و

بارش فصل زمستان دارای بارندگی بالاتری (۶۷/۶۹٪) نسبت به سایر فصول است (شکل ۲). گرم ترین فصل سال، تابستان، به طوری که ماههای ژوئن، ژوئیه و اوت (خرداد تا مرداد) با میانگین دمای بالاتر از ۳۰ درجه سانتی گراد، گرم ترین ماه سال هستند. میانگین رطوبت نسبی سالانه نوسان یکسانی داشته و با روند ضعیفی (عدم معنی داری) در حال افزایش است. بنابراین این گونه استنباط می شود که بارش سالانه و رطوبت نسبی در ایستگاه دیر بین سالهای ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۸ دارای روند نبوده و تغییرهای رخ داده در این دوره زمانی طبیعی است. تبخیر و تعرق نیز در طول دوره آماری به صورت کاهش و از نظر آماری در سطح ۹۵٪ معنادار نیست.



شکل (۲): نمودار ماهانه رابطه بین بارندگی و دما
Figure (2): graph of the relationship between monthly precipitation and temperature at Dayer station

میانگین حداکثر سرعت باد برای ایستگاه دیر ۷/۸۷ m/s و ۷۲/۵۱٪ سرعت غالب باد در این ایستگاه بالاتر از سرعت آستانه فرسایش (۶ m/s) است. همچنین میانگین سرعت باد در تمامی ماههای سال بالاتر از حد آستانه فرسایش می باشد و حداکثر سرعت باد مربوط به فصل بهار است (شکل ۳).



شکل (۳): تغییرات سرعت باد در ماههای مختلف
Figure (3): Wind speed changes in different months

نتایج حاصل از تحلیل بادهای فرساینده در ماههای مختلف نیز نشان داد که بیشترین بادهای فرساینده (بیش از ۶ m/s) در

محلی در منطقه مورد مطالعه، روند افزایشی داشته است (شکل

۵).

جدول (۴): درصد فراوانی ماهانه طبقات سرعت باد (m/s) (۱۹۸۹-۲۰۱۸)

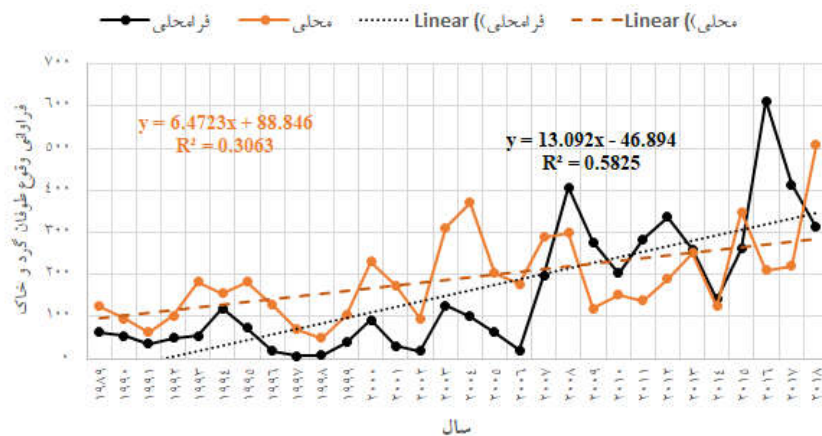
Table (4): Percentage of monthly frequency of wind speed (m/s) (1989-2018)

ماه	طبقه بند سرعت باد					>6	متوسط سرعت باد (m/s)
	<6	6-10	11-15	16-20	>20		
ژانویه	۲۵/۳۸	۴۹/۸۷	۲۱/۹	۲/۸۳	۰	۷۴/۶۱	۸/۱
فوریه	۲۱/۹۲	۴۹/۷۸	۲۴/۴۶	۳/۶۷	۰/۱۴	۷۸/۰۷	۸/۴۳
مارس	۲۰/۱	۵۳/۹۹	۲۲/۱۶	۳/۷۳	۰	۷۹/۸۹	۸/۴۹
آوریل	۲۱/۶۳	۵۱/۳۴	۲۳/۸۱	۳/۰۷	۰/۱۲	۷۸/۳۶	۸/۵۷
می	۱۸/۸۵	۵۰/۱۲	۲۵/۵۵	۵/۲۱	۰/۲۴	۸۱/۱۴	۹/۰۴
ژوئن	۲۵/۲۵	۴۷/۰۵	۲۱/۶۶	۵/۷۶	۰/۲۵	۷۴/۷۴	۸/۵۹
جولای	۳۱/۰۱	۵۱/۲۴	۱۴/۸۸	۲/۷۲	۰/۱۲	۶۸/۹۸	۷/۵۴
آگوست	۳۵/۸۵	۵۸/۹۳	۴/۷۱	۰/۴۹	۰	۶۴/۱۴	۶/۴۶
سپتامبر	۳۴/۶۲	۵۷/۱۲	۷/۵۸	۰/۳۹	۰/۲۶	۶۵/۳۷	۶/۷۷
اکتبر	۳۷/۱۴	۵۲/۷۹	۹/۳۱	۰/۷۴	۰	۶۲/۸۵	۶/۷۷
نوامبر	۲۶/۷۹	۵۰/۲۵	۲۰/۳۸	۲/۱۷	۰/۳۸	۷۳/۲	۷/۹۷
دسامبر	۳۱/۲۶	۴۸/۶۳	۱۷/۴۹	۲/۴۸	۰/۱۲	۶۸/۷۳	۷/۶۸
سالانه	۲۷/۴۸	۵۱/۷۶	۱۷/۸۳	۲/۸۷	۰/۱۳	۷۲/۵۱	۷/۸۷

جدول (۵): فراوانی وقوع پدیده گردوغبار فصلی

Table (5): Seasonal frequency of dust phenomenon

سال	بهار	تابستان	پاییز	زمستان	سال	بهار	تابستان	پاییز	زمستان
۱۹۸۹	۲۳	۷۹	۷	۱۶	۲۰۰۴	۱۲۲	۹۱	۷۲	۸۶
۱۹۹۰	۱۶	۴۲	۱۱	۲۶	۲۰۰۵	۶۱	۹۹	۲۴	۲۰
۱۹۹۱	۹	۳۷	۹	۹	۲۰۰۶	۵۲	۶۰	۱۴	۵۱
۱۹۹۲	۱۲	۱۸	۴	۱۵	۲۰۰۷	۱۱۸	۱۰۹	۲۹	۳۳
۱۹۹۳	۳۳	۶۸	۴۹	۳۳	۲۰۰۸	۹۴	۹۷	۴۷	۶۱
۱۹۹۴	۵۰	۶۵	۹	۳۱	۲۰۰۹	۴۸	۴۵	۱۲	۱۵
۱۹۹۵	۳۱	۷۱	۵۳	۲۸	۲۰۱۰	۶۹	۴۷	۱۰	۲۶
۱۹۹۶	۲۴	۵۳	۲۹	۲۲	۲۰۱۱	۳۱	۴۵	۳۸	۲۵
۱۹۹۷	۲۳	۳۳	۲	۱۲	۲۰۱۲	۷۵	۳۹	۷	۶۹
۱۹۹۸	۲۱	۲۳	۲۱	۱	۲۰۱۳	۶۷	۷۶	۴۹	۵۹
۱۹۹۹	۵۶	۲۲	۱۱	۱۶	۲۰۱۴	۴۳	۵۵	۵	۲۲
۲۰۰۰	۱۲۷	۵۳	۲۴	۲۶	۲۰۱۵	۲۱۹	۳۶	۲۹	۶۵
۲۰۰۱	۴۸	۷۹	۲۸	۱۹	۲۰۱۶	۱۴	۲۶	۱۴۶	۲۵
۲۰۰۲	۱۸	۴۸	۰	۳۰	۲۰۱۷	۴۵	۸۳	۶	۸۶
۲۰۰۳	۹۱	۱۰۰	۸۳	۳۷	۲۰۱۸	۲۸	۳۳۶	۳	۱۴۰



شکل (۵): نمودار روند تغییرات پدیده گردوغبار محلی و فرا محلی در دوره ۳۰ ساله (۱۹۸۹-۲۰۱۸)

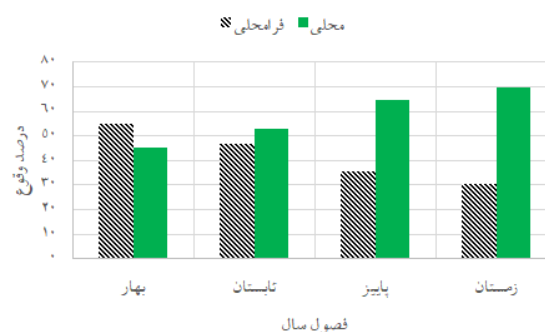
Figure (5): Graph of changes in local and non-local dust phenomena over 30-year period (1989-2018)

درصد وقوع ماهانه پارامترهای اقلیمی ایستگاه دیر در شکل (۷) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود بیشترین میزان رطوبت نسبی و بیشترین فراوانی وقوع پدیده گردوغبار مربوط به تابستان است. در واقع فصلی که بیشترین میزان وقوع پدیده گردوغبار را دارد، با فصلی که کمترین میزان رطوبت نسبی را دارد تطابق ندارد؛ به طوری که در زمان وقوع این پدیده میزان رطوبت نسبی بین ۵۳ تا ۶۳٪ در این ایستگاه متغیر است.

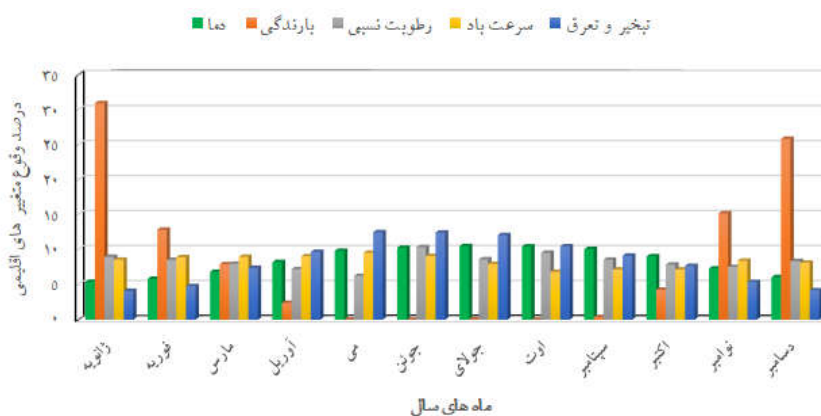
بررسی تحرک تپه‌های ماسه‌ای (شاخص لنکستر)

با استفاده از شاخص لنکستر از ایستگاه سینوپتیک دیر، میزان تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای محدوده این شهرستان به دست آمد. جدول (۶) درصد فعالیت تپه‌های ماسه‌ای را در کل بازه زمانی مورد بررسی نشان می‌دهد. بر اساس شکل (۸) میزان تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای دارای روند افزایشی بوده، به طوری که در سال‌های ۱۹۹۴، ۲۰۰۲، ۲۰۰۷، ۲۰۰۸، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۲ جهش در افزایش میزان تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای در منطقه مورد مطالعه مشاهده می‌شود.

به‌طور کلی احتمال وقوع پدیده طوفان گردوغبار در فصول مختلف سال در ایستگاه دیر به ترتیب، بهار ۳۶/۵۱٪، تابستان ۳۵/۸۲٪، پاییز ۱۲/۴۱٪ و زمستان ۱۵/۲۴٪ است. در این ایستگاه بیشترین وقوع پدیده طوفان گرد و خاک با منشأ فرامحلی به ترتیب در فصل بهار ۵۴/۹۲٪ می‌باشد و بیشترین پدیده طوفان گرد و خاک با منشأ محلی در فصل زمستان ۶۹/۷۱٪ رخ داده است (شکل ۶).



شکل (۶): درصد وقوع پدیده طوفان گردوغبار در فصول مختلف سال در بازه زمانی ۳۰ سال
Figure (6): Percentage of dust storm occurrence in different seasons over 30 years



شکل (۷): نمودار تغییرات ماهانه درصد وقوع پارامترهای اقلیمی در دوره ۳۰ ساله (۱۹۸۹-۲۰۱۸)

Figure (7): Graph of monthly changes in percentage of the occurrence of climatic parameters over 30 years (1989-2018)

فعال بودن رسوبات بادی و زمان اوج رخدادهای محلی دارای شرایط خشک، در سال‌های ۱۹۹۴، ۲۰۰۷، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۰ فراخشک و فقط در سال ۲۰۱۷ شرایط نیمه‌خشک بوده و این بدان معناست که شهرستان دیر در حدود ۱۳/۳۳٪ در معرض بیابان‌زایی واقعی، ۸۳/۳۳٪ از سال‌های آماری از نظر اقلیمی در

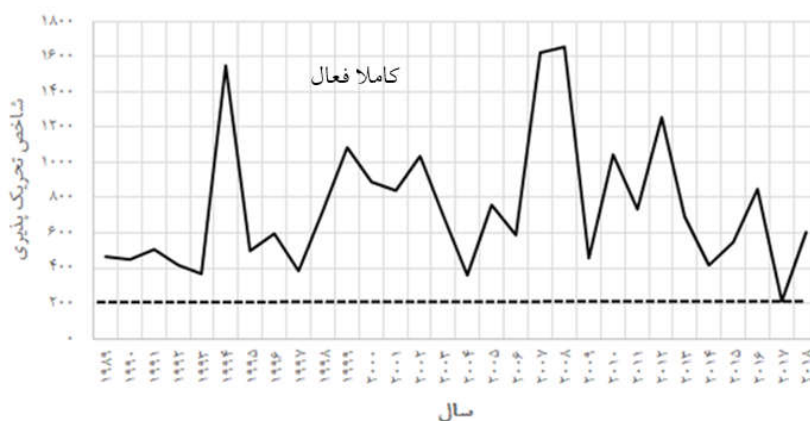
محاسبه شاخص خشکی از فاکتورهای مؤثر در محاسبه تحرک‌پذیری ماسه در ایستگاه دیر نشان داد که مقدار شاخص خشکی بر اساس تقسیم‌بندی یونپ در سه کلاس فراخشک، خشک و نیمه‌خشک قرار دارد (جدول ۳). بر اساس این شاخص شرایط اقلیمی حاکم در منطقه طی تمام سال‌ها به دلیل

معرض خطر بیابان‌زایی بسیار شدید و ۳/۳۳٪ در معرض خطر بیابان‌زایی 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 است و

جدول (۶): داده‌های اقلیمی مورد استفاده در تحلیل حساسیت تپه‌های ماسه‌ای

Table (6): Climatic data used in sensitivity analysis test of the sand dunes

سال	درصد بادهای فرساینده (W)	بارش (P)	تبخیر و تعرق پتانسیل (PET)	بارش مؤثر	شاخص لنکستر
۱۹۸۹	۵۶/۰۱	۲۳۲/۲	۱۹۱۵/۶۴۲	۰/۰۱۲	۴۶۲/۰۷۵۴
۱۹۹۰	۴۸/۹	۲۱۳	۱۹۴۹/۵۲۱	۰/۱	۴۴۷/۶۱۲۳
۱۹۹۱	۶۹/۳۹	۲۵۴/۳۷	۱۸۴۷/۵۶۴	۰/۱۳	۵۰۴/۰۴۸۳
۱۹۹۲	۵۱/۶۳	۲۳۴/۶۸	۱۹۰۸/۰۳۸	۰/۱۲	۴۱۹/۸۳۲۸
۱۹۹۳	۳۱/۶۹	۲۰۳/۹۹	۲۳۷۹/۶۹۲	۰/۰۸	۳۶۹/۷۲۷۷
۱۹۹۴	۶۶/۳۹	۱۰۳/۵۴	۲۴۱۳/۹۵۴	۰/۰۴	۱۵۴۷/۹۱۱
۱۹۹۵	۶۶/۹۳	۳۱۲/۸	۲۳۲۲/۲۸۶	۰/۱۳	۴۹۶/۹۷۴۴
۱۹۹۶	۶۷/۴۸	۲۶۱/۱	۲۳۱۶/۹۴۷	۰/۱۱	۵۹۸/۸۵۹۶
۱۹۹۷	۷۰/۷۶	۴۳۳/۱	۲۳۶۳/۰۶۶	۰/۱۸	۳۸۶/۱۰۵۸
۱۹۹۸	۶۳/۹۳	۲۰۵/۱۶	۲۳۴۰/۹۷۸	۰/۰۸	۷۲۹/۵۲۳۸
۱۹۹۹	۷۰/۴۹	۱۵۶/۱	۲۴۰۹/۴۰۱	۰/۰۶	۱۰۸۸/۰۴
۲۰۰۰	۷۶/۲۲	۲۰۳/۷	۲۳۶۷/۶۹۵	۰/۰۸	۸۸۶/۰۴۹۲
۲۰۰۱	۷۱/۰۳	۲۰۳/۸	۲۴۱۱/۷۵۳	۰/۰۸	۸۴۰/۶۶۰۹
۲۰۰۲	۷۰/۷۶	۱۶۲/۴	۲۳۷۶/۳۵	۰/۰۶	۱۰۳۵/۴۸۳
۲۰۰۳	۷۳/۴۹	۲۳۶/۴	۲۲۵۷/۳۸۱	۰/۱	۷۰۱/۸۲۴۵
۲۰۰۴	۷۱/۳۱	۴۶۶/۹	۲۳۶۰/۰۷۵	۰/۱۹	۳۶۰/۴۶۳۵
۲۰۰۵	۶۳/۱۱	۱۹۳/۸	۲۳۲۳/۳۸۳	۰/۰۸	۷۵۶/۶۵۴۹
۲۰۰۶	۶۴/۲	۲۴۸	۲۲۶۲/۱۹	۰/۱	۵۸۵/۶۸۵۲
۲۰۰۷	۶۶/۱۲	۹۲/۹	۲۲۸۲/۳۱۹	۰/۰۴	۱۶۲۴/۴۰۷
۲۰۰۸	۶۴/۲	۸۹	۲۲۹۴/۶۳۴	۰/۰۳	۱۶۵۵/۴۲۸
۲۰۰۹	۶۰/۶۵	۳۲۱/۹	۲۴۱۶/۰۴۹	۰/۱۳	۴۵۵/۲۵۶۹
۲۰۱۰	۴۷/۵۴	۱۰۴/۳	۲۲۹۸/۸۵۷	۰/۰۴	۱۰۴۷/۸۴۲
۲۰۱۱	۶۱/۲	۲۰۰/۷	۲۴۱۹/۳۸۳	۰/۰۸	۷۳۷/۷۷۵۳
۲۰۱۲	۵۳/۵۵	۱۰۱/۲	۲۳۷۷/۰۶	۰/۰۴	۱۲۵۷/۸۶۷
۲۰۱۳	۵۷/۳۷	۱۸۹/۶	۲۲۸۸/۰۹	۰/۰۸	۶۹۲/۴۲۵۳
۲۰۱۴	۶۶/۳۹	۳۷۰/۱	۲۳۱۱/۳۱۱	۰/۱۶	۴۱۴/۶۳۳۶
۲۰۱۵	۶۴/۴۸	۱۸۵/۳۷	۱۵۶۳/۳۱۸	۰/۱۱	۵۴۳/۷۹۹۵
۲۰۱۶	۶۶/۳۹	۱۲۲/۲۴	۱۵۵۵/۹۵۸	۰/۰۷	۸۴۵/۱۰۳
۲۰۱۷	۶۵/۳	۴۸۳/۳۴	۱۵۹۱/۴	۰/۳	۲۱۵/۰۰۲۴
۲۰۱۸	۶۰/۳۸	۱۵۴/۶	۱۵۴۰/۵۳۹	۰/۱	۶۰۱/۶۹۲۳
میانگین	۶۲/۹۱	۲۲۴/۶۴	۲۱۸۲/۱۶۱	۰/۱۲	۶۱۱/۱



شکل (۸): تغییرات زمانی فعالیت تپه‌های ماسه‌ای

Figure (8): Temporal changes of the sand dunes activity

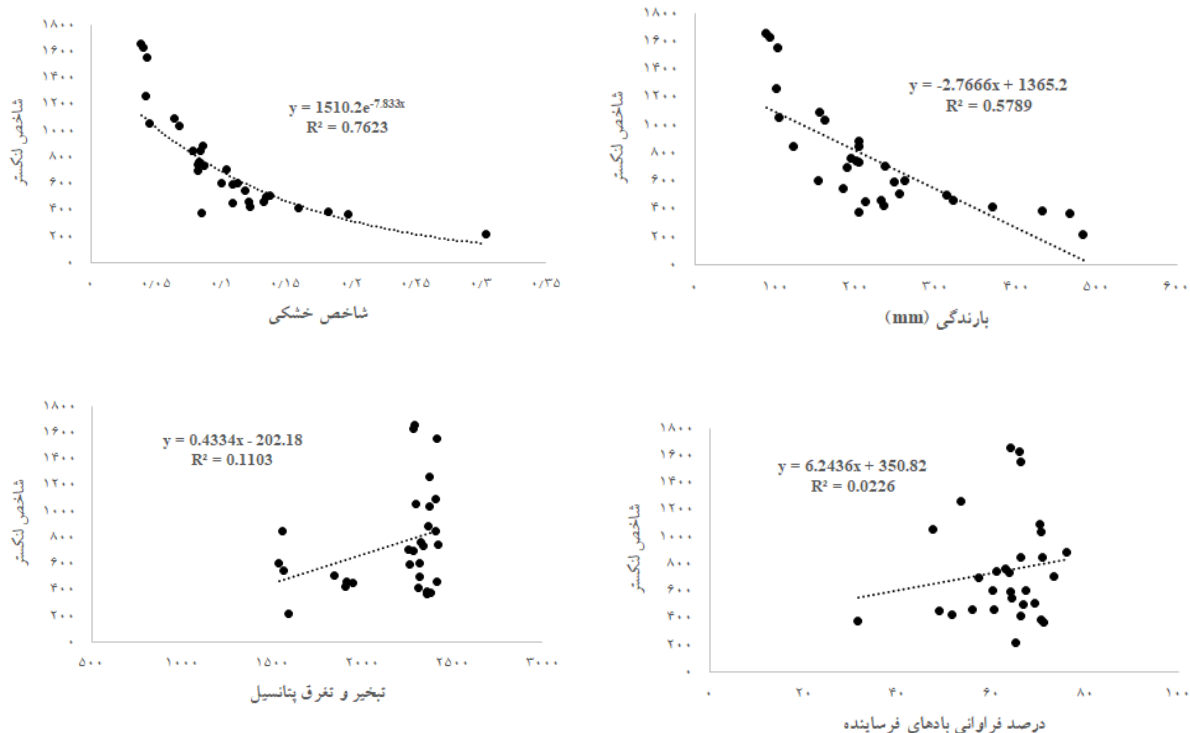
در آنالیز همبستگی پارامترهای اقلیمی و شاخص لنکستر در ایستگاه دیر، متغیر اقلیمی دما ($R=0/28, P_Value=0/12$)، سرعت باد ($R=-0/06, P_Value=0/75$)، تبخیر و تعرق ($R=0/33, P_Value=0/07$) و درصد فراوانی بادهای فرساینده ($R=0/15, P_Value=0/42$) در طی دوره ۳۰ ساله تأثیر معنادار بر شاخص لنکستر نداشته است. بارندگی ($R=0/0, P_Value=0/001$)، شاخص خشکی ($R=0/76, P_Value=0/001$) و رطوبت نسبی ($R=0/44, P_Value=0/01$) تأثیر معنی داری بر فعالیت حرکت تپه‌های ماسه‌ای در ایستگاه دیر در طی ۳۰ سال دوره مطالعاتی داشته است (شکل ۹).

پیش‌بینی اثرات تغییر احتمالی عوامل اقلیمی بر تحرک پذیری تپه‌های ماسه‌ای

برای بازه زمانی طولانی مدت (۱۹۸۹-۲۰۱۸)، مقدار متوسط بارندگی در ایستگاه دیر ۲۴۹/۳۱ میلی‌متر، تبخیر پتانسیل

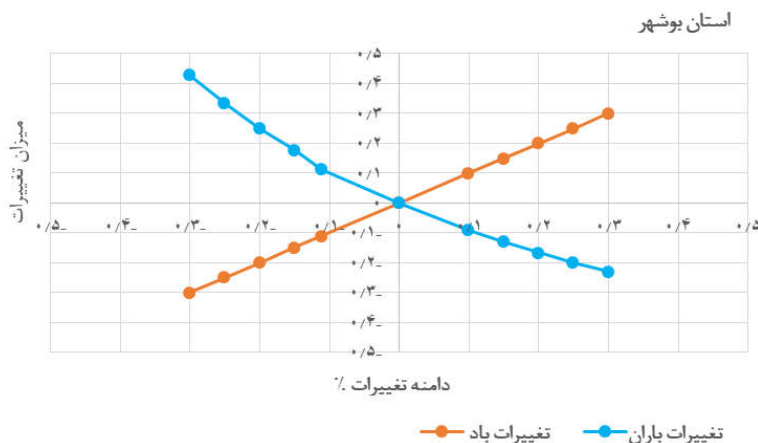
۱۹۰۳/۸۲۱ میلی‌متر، درصد بادهای فرسایش‌زا ۵۴/۱۸۵٪ و مقدار شاخص لنکستر ۴۱۸/۸۵ تخمین زده شده است. بر اساس آزمون تحلیل حساسیت مشخص شد چنانچه در آینده درصد فراوانی بادهای بیشتر از آستانه فرسایش در منطقه دیر ۳۰٪ افزایش یابد، فعالیت و حرکت تپه‌های ماسه‌ای ۳۰٪ افزایش می‌یابد، درحالی‌که با افزایش ۳۰٪ بارندگی ۲۳٪ کاهش در فعالیت تپه‌های ماسه‌ای مشاهده می‌شود. اگر بارندگی و درصد فراوانی بادهای بیشتر از آستانه فرسایش ۳۰٪ کاهش یابد، به ترتیب ۴۳٪ افزایش و ۳۰٪ کاهش در فعالیت و حرکت تپه‌های ماسه‌ای مشاهده خواهد شد (شکل ۱۰).

این اشاره به نقش مؤثر بارش در منطقه مورد مطالعه در ایجاد پوشش گیاهی، افزایش رطوبت خاک و در نهایت کاهش فعالیت و حرکت تپه‌های ماسه‌ای دارد.



شکل (۹): رابطه همبستگی پارامترهای مختلف اقلیمی بر شاخص تحرک پذیری ماسه‌ها

Figure (9): Correlation relationship between different climate parameters and sand mobility index



شکل (۱۰): نمودار حساسیت شاخص لانکستر نسبت به تغییرات بارش و بادهای بیشتر از آستانه فرسایش

Figure (10): Sensitivity analysis test of Lancaster index by changes in precipitation and winds with higher than threshold erosion speed

پارامترهای اقلیمی نتایج نشان داد که بارندگی و شاخص خشکی تأثیر معنی‌داری بر فعالیت حرکت تپه‌های ماسه‌ای در طی ۳۰ سال دوره مطالعاتی داشته است.

همچنین در این تحقیق، تلاش شد روند عوامل اقلیمی بارندگی، دما، تبخیر و تعرق، سرعت باد و پدیده ریزگرد با منشأ محلی و غیرمحلی در مقیاس‌های سالانه و ماهانه طی دوره آماری ۳۰ ساله (۱۹۸۹-۲۰۱۸) در این منطقه بررسی شد. نتایج تحقیق نشان داد که متغیر دما دارای روندی صعودی بوده، با این حال روند خاصی برای وضعیت بارندگی مشاهده نشده است. میانگین رطوبت نسبی سالانه نوسان کمی داشته و شاهد روند افزایشی اما با عدم معناداری است و افزایش در درجه حرارت به افزایش در میزان تبخیر و تعرق سالانه منجر شده است که این روند افزایشی در تبخیر و تعرق معنادار نیست. طوفان‌های گرد و خاک با منشأ فرامحلی و محلی در ایستگاه دیر، روند افزایشی و معنی‌دار داشته و پدیده گرد و خاک با منشأ محلی سهم بیشتری در طوفان گرد و خاک در این ایستگاه نشان می‌دهد. در این ایستگاه، شیب نمودار طوفان گردوغبار در مقیاس سالانه، داری نوسان زیادی بوده به طوری که در سال‌های ۲۰۱۶، ۲۰۱۸، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۵ جهش ناگهانی و افزایشی داشته است که رابطه مستقیم با افزایش بادهای با سرعت بیشتر از آستانه فرسایش و انتقال ذرات ماسه دارد و بستر مناسبی برای توزیع مکانی تپه‌های ماسه فراهم کرده است، به طوری که وزش باد در فصل تابستان و ریزافت بودن

بحث و نتیجه‌گیری

همواره در مناطق خشک و نیمه‌خشک فعالیت تپه‌های ماسه‌ای مشکلات فراوانی را برای مردم محلی ایجاد کرده است؛ بنابراین به منظور کاهش خسارات ناشی از آن، شناسایی تپه‌های ماسه‌ای فعال و تثبیت آن‌ها امری ضروری است. با محاسبه شاخص لانکستر، میزان فعالیت بالقوه تپه‌های ماسه‌ای تعیین و مناطق فعال از غیرفعال تفکیک شد. نتایج نشان داد که در منطقه مورد مطالعه در دوره آماری ۳۰ ساله میزان فعالیت تپه‌های ماسه‌ای کاملاً فعال بوده است. هرچند برخی اقدامات مدیریتی (از قبیل نهال‌کاری، جنگل‌کاری‌های دست‌کاشت بیابانی، مدیریت چرا و قرق)، طی ۳۰ سال گذشته، در زمینه تثبیت تپه‌های ماسه‌ای انجام شده، کافی نبوده و نیازمند مدیریت و برنامه‌ریزی جدید در این منطقه است.

به‌طور کلی، نتایج نشان داد که فعالیت تپه‌های ماسه‌ای در دوره ۳۰ ساله، روند افزایشی نشان داده است. دلیل جهش قابل توجه در میزان فعالیت تپه‌های ماسه‌ای در این سال‌ها را می‌توان به پارامتر بارندگی نسبت داد. نکته قابل توجه در این باره آن است که بیشترین میزان تحرک‌پذیری ماسه مربوط به سالی است که کمترین مقدار بارندگی مشاهده می‌شود. بنابراین می‌توان گفت که بیشترین میزان تحرک‌پذیری ماسه در منطقه مورد مطالعه هم‌زمان با کم‌باران‌ترین سال بوده است، به طوری که در آنالیز همبستگی تحرک‌پذیری ماسه با سایر

تحقیق یوسفی و همکاران (۲۰۲۱) در بررسی تحرک پذیری تپه‌های ماسه‌ای استان سمنان مشاهده کرد. نتایج تحقیق حاضر می‌تواند در راستای پیش‌بینی وضعیت آینده تپه‌های ماسه‌ای و تعیین اقدامات مدیریتی مناسب برای کنترل و کاهش خسارت احتمالی به سایر کاربری‌های موجود در منطقه مورد استفاده قرار گیرد. البته ذکر این نکته ضروری است که به دلیل فقدان ایستگاه هواشناسی با دوره آماری مناسب در منطقه مورد مطالعه، بسیاری از پارامترهای اقلیمی به روش میان‌یابی، از نزدیک‌ترین ایستگاه‌های مجاور به دست آمده و شاخص به کاررفته در این تحقیق، ممکن است به‌طور کامل فعالیت تپه‌های منطقه مورد مطالعه را برآورد نکرده باشد. این موضوع می‌تواند عاملی برای عدم تطابق کامل مدل به کاررفته در این تحقیق باشد. همچنین نقش فاکتور محتوای رطوبت خاک در این مطالعه در نظر گرفته نشده است و باید در مطالعات بعدی مورد بررسی قرار گیرد.

ذرات ماسه عامل دیگری در گسترش توزیع مکانی تحرک پذیری ماسه در منطقه است. مشابه نتایج این تحقیق در نتایج مطالعه خسروی و همکاران (۲۰۱۵) در بررسی تغییرات زمانی مکانی تپه‌های ساحلی ماسه‌ای در منطقه غرب زرآباد مشاهده شد که مساحت تپه‌های ماسه‌ای به دلیل وزش بادهای فصل تابستان و ریزافت بودن ذرات ماسه، فعالیت‌های انسانی، چرای بی‌رویه و... به میزان ۱۷٪ افزایش نشان داده بود.

همچنین بر اساس شاخص خشکی، شهرستان دیر در معرض خطر بیابان‌زایی بسیار شدید قرار داشته است که با نتایج زندگی‌فر و همکاران (۲۰۲۰) در شهرستان منجیل مطابقت دارد. بر اساس آزمون تحلیل حساسیت نیز مشخص شد تحرک پذیری ماسه نسبت به تغییرات افزایش یا کاهش ناشی از سایر پارامترهای اقلیمی حساس است، به طوری که با افزایش ۳۰٪ بارندگی وضعیت تپه‌ها از حالت کاملاً فعال به فعال تغییر خواهد کرد که نتایج مشابه را می‌توان در نتایج

منابع

- Ahmadi, M., Ramesht, M. H. and Darfashi, K., 2014. Investigation of shoreline change trends using remote sensing techniques and GIS, Case study: Bandar Dayer coast, Persian Gulf. *Geography and planning Environmental* 25 – 3, 1-12. (In Persian)
- Ahmadi Birgani, H., 2008. Simulation of sand dune movement using experimental and numerical methods (Case study: Erg Kashan). Master Thesis M.Sc. thesis, University of f Tehran, 91 pp.
- Arens, B., Geelen, L., Slings, R. and Wondergem, H., 2005. Restoration of dune mobility in the Netherlands, The First Conference Dunes and Estuaries. Koksijde, Belgium.
- Ashkenazy, Y., Yizhaq, H. and Tsoar, H., 2012. Sand dune mobility under climate change in the Kalahari and Australian Deserts. *Climatic Change* 112(3), 1-23.
- Da Silva, G.M. and Hesp, P.A., 2013. Increasing rainfall, decreasing winds, and historical changes in Santa Catarina dunefields, southern Brazil. *Journal Earth Surface Processes and Landforms* 38, 1036–1045.
- Feagin, R., Furman, M., Salgado, K., Martinez, M.L., Innocenti, R.A., Eubanks, K., Figlus, J., Huff, T.P., Sigren, J. and Silvae, R., 2019. The role of beach and sand dune vegetation in mediating wave run up erosion, Estuarine. *Coastal and Shelf Science* 219, 97–106.
- Gao, J., Kennedy, D. and Konlechner, T., 2020. Coastal dune mobility over the past century: A global review. Available at <https://doi.org/10.1177/0309133320919612-05-22/ArticleResearch.htm> (visited 22 May 2020).
- Garcia-Lozano, C. and Pintó, J., 2018. Current status and future restoration of coastal dune systems on the Catalan shoreline (Spain, NW Mediterranean Sea), *Journal of Coastal Conservation*, 22, 519–532.
- Hejazi, A. and Mahmoudi, Sh., 2017. Investigation of textural characteristics of sand dunes in the east of Jask city. *Sepehr Information Quarterly* 26(101), 129-119. (In Persian)
- Johanna, C.S., Hamish, A.M. and David, T.N., 2008. Meteorological controls on sand transport and dune morphology in a polar-desert: Victoria Valley, Antarctica. *Journal*

- Earth Surface 33, 1875–1891.
11. Khosravi, M., Fotouhi, P. and Piruzadeh, S., 2015. Study of temporal-spatial changes of sandy coastal hills using remote sensing (RS) studied: West Zarabad region. *Journal of Spatial Analysis of Environmental Hazards* 2 – 4, 1-14. (In Persian)
 12. Lancaster, N., 1998. Development of linear dunes in the southwestern Kalahari, southern Africa. *Journal Arid Environment* 14, 233–244.
 13. Naimi, M., Zandifar, S., Khosroshahi, M., Ashuri, P. and Abbasi, H.R., 2021. The effect of climate change on the mobility of sand dunes in Sabzevar city. *Journal of Desert Management, Research Article* 9, 1- 18. (In Persian)
 14. Nazari Samani, A., Rahdari, M. and Rahi, Gh. R., 2020. Evaluation of spatial changes of wind erosion of lands on the shores of Lake Urmia. *Journal of Desert Management* 15, 53-72. (In Persian)
 15. Rahdari, M.R. and Rodríguez-Seijo, A., 2021. Monitoring Sand Drift Potential and Sand Dune Mobility over the Last Three Decades (Khartouran Erg, Sabzevar, NE Iran). *Journal sustainability* 13 (9050):1–16. Available at: <https://doi.org/10.3390/su13169050>. htm (visited 12 August 2021).
 16. Shayan, S., Akbarian, M., Yamani, M., SharifiKia, M. and Maghsoudi, M., 2014. Marine hydrodynamics and its effect on the formation of coastal sand masses Case study: Makran west coast. *Journal of Geomorphological Research; Quantitative* 4, 104-76.(In Persian)
 17. Shahriar, A. and Taherinejad, K., 2017. The role of wind direction and wind homogeneity index in temporal development and determination of sand dunes morphology (Case study: Sadeghabad-Bafgh citadel). *Journal Quaternary Quarterly of Iran* 4 -2, 201-214 .(In Persian)
 18. Taniguchi, K., Endo, N. and 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.
 19. Vali, A. and Roustaei, F., 2017. A study of wind erosion trends in Central Iran using dust storm index in the last fifty years. *Water and Soil Sciences - Agricultural Science and Technology and Natural Resources* 21(4),189-200.(In Persian)
 20. Williams, A.T., Duck, R.W. and Phillips, M.R., 2011. Coastal dune vulnerability among selected Scottish systems. *Journal of Coastal Research*, 64, 1263-1267.
 21. Yousefi, A., Ghodrati, M. and Khosroshahi, M., 2021. Monitoring and forecasting of climatic factors affecting the mobility of sand dunes in Semnan province. *Journal of Soil and Water Resources Protection* 10- 4, 142-127. (In Persian)
 22. Zandifar, S., Khosroshahi, M., Ebrahimi Khosfi, Z. and Naimi, M., 2020. Predicting the mobility status of quick sands in the future based on the sensitivity analysis test (Case study: Manjil city). *Geographical studies of arid regions* 10 -39, 18-35. (In Persian)

Monitoring and Predicting the Effect of Climatic Factors on Sand-Mobility Using Lancaster Index: A Case Study of Dayer, Bushehr Province

Rahi Gholamreza^{1*}, Bahreini Fatemeh², Khosroshahi Mohammad³, Biabani Leila⁴

Received: 03/11/2021

Accepted: 04/10/2022

Extended Abstract

Introduction: As one of the most significant and sensitive landforms to wind erosion, sand dunes vary in their extent of activities based on the influence exerted on them by various climatic and terrestrial factors. The study area comprises a Bushehr province's county located in southern Iran, where sand dunes activity causes great problems for the local community. Therefore, the identification of active sand dunes by using wind regime of the region and the factors involved in their activity based on the Lancaster index, the aim of this research is.

Methodology: First, the trends of climate factors, including precipitation, temperature, potential evapotranspiration, wind velocity, and local and non-local-originated dust were investigated at an annual scale using the data concerning the hourly-based wind velocity, weather codes, monthly precipitation, temperature, and potential evapotranspiration data collected from Dayer meteorological station over a 30-year period (1989–2018). Then, the sand dunes' mobility status was examined by calculating the frequency of erosive wind and the aridity index over the whole study period using the Lancaster Index. Moreover, Sensitivity analysis was performed to predict the effect of meteorological parameters' potential changes on sand dunes' mobility.

Results: The study's results indicated that according to the Lancaster index, sand dunes were fully active during the 30-year period. Furthermore, the aridity index was found to be subjected to real, extremely serious, and serious risks of desertification in three classes hyper-arid, arid, and semi-arid, respectively. On the other hand, the results of sensitivity analysis suggested that if the frequency of upper-erosive-threshold winds would increase by 30% in the future, the sand dunes' activity and mobility would increase by 30%. However, if the precipitation rate increases by 30%, sand dunes' mobility, and activity will decrease by 23%. Moreover, no significant trend was observed in meteorological parameters, including precipitation, temperature, and potential evapotranspiration throughout the whole study period.

Conclusion: In general, an increasing trend was found in sand dunes activity during the 30-year study period, suggesting a direct correlation between such an increase and precipitation. Moreover, the study's results indicated that the management measures carried out over the past 30 years (for instance, planting seedlings, hand-planting afforestation, and grazing management) have proved insufficient, necessitating the application of new management policies in this regard.

Keywords: Sand Dunes, Sensitivity Analysis, Dayer, Lancaster index .

1. Research Assistant, Research and product development, Bushehr, Iran; khrahi@yahoo.com

2. Graduated PhD student, Faculty of Natural Resources and Geoscience, University of Kashan, Esfahan, Iran

3. Associate Professor, Research Institute of Forests and Rangelands, Tehran, Iran

4. PhD student, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Alborz, Iran

DOI: 10.22052/deej.2021.11.36.41