پژوهش های آبخیزداری
شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱

تأثیر تغییرات سنجه‌های اقلیمی بر تحرک و پایداری تپه‌های ماسه‌ای در آبخیز دریاچهٔ ارومیه، ایستگاه مهاباد

احمد نجفی‌ایگدیر[1*]، علیرضا مجیدی[2]

۱- استادیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع‌طبیعی استان آذربایجان‌غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ارومیه، ایران

۲- استادیار بخش تحقیقات هیدرولوژی و توسعه منابع آب، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

چکیدهٔ مبسوط

مقدمه و هدف

تپه‌های ماسه‌ای با ساختار منحصر به فردی که دارند می‌توانند متحرک یا ثابت باشند که عامل اصلی پایداری آنها، وجود پوشش گیاهی است. ویژگی خاص تپه‌های ماسه‌ای و رسانایی هیدرولیکی زیاد آنها باعث افزایش سرعت نفوذ آب باران می‌شود. با خشکی ذرات ماسه و از بین رفتن انسجام میان دانه‌ها، پوشش گیاهی ضعیف و فرسایش بادی را در پی خواهد داشت. با توجه به حاکم شدن شرایط جدید اقلیمی در حوزه‌های حاشیه دریاچه ارومیه، هدف این پژوهش، شناسایی و بررسی تپه‌های ماسه‌ای جدید و روند حرکتی آنها در این نواحی است. بنابراین، به‌دلیل نبودن تپه‌های ماسه‌ای و شکل‌گیری نشدن آنها در سطح استان فقط ایستگاه هواشناسی مهاباد از نظر وضعیت باد و شاخص لنکستر بررسی شد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، برای بررسی اثر تغییرات اقلیم (باد و بارش) بر فعالیت ماسه‌ها و به‌منظور پیش‌بینی احتمال تحرک تپه‌های ماسه‌ای و ماسه‌زارها و گرد و غبار ناشی از آن‌ها، از روش جهانی لنکستر استفاده شد. بر اساس شاخص لنکستر رابطهٔ میان تحرک ماسه و متغیرهای اقلیمی مدل‌سازی شد. سپس، ذرات شن و ماسه به‌دنبال بادهای با سرعت بیشتر از آستانهٔ فرسایش حرکت می‌کنند که با بارش مؤثر رابطهٔ معکوس دارد. ازاین رو، داده‌های لازم شامل آمار بارش، دما، باد و رطوبت نسبی ایستگاه مهاباد از اداره کل هواشناسی استان تهیه شد.

نوع مقاله: پژوهشی

***مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی:** Homanh45@gmail.com

استناد: نجفی‌ایگدیر، ا.، مجیدی، ع. ۱۴۰۳. تأثیر تغییرات سنجه‌های اقلیمی بر تحرک و پایداری تپه‌های ماسه‌ای در آبخیز دریاچهٔ ارومیه، ایستگاه مهاباد. پژوهش‌های آبخیزداری، ۳۸ (۱): ۷۷-۶۱.

شناسهٔ دیجیتال: 10.22092/WMRJ.2024.364663.1568

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۲۳، **تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۲/۱۱/۰۱، **تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۲/۱۲/۲۸، **تاریخ انتشار:** ۱۴۰۳/۱۰/۱۲

پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۴، دورهٔ ۳۸، شمارهٔ ۱، شمارهٔ پیاپی ۱۴۶، بهار ۱۴۰۴، صفحه‌های ۶۱ تا ۷۷.

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس

© نویسندگان

همچنین، به‌منظور تعیین سال‌های خشک و تر و اثرات آن بر افزایش یا کاهش روزهای همراه با گرد و غبار، از شاخص SPEI استفاده شد. تبخیر و تعرق بالقوه، فراوانی و تداوم رخداد پدیده خشکسالی‌های هواشناسی با استفاده از شاخص SPEI محاسبه شد. برای تعیین وضعیت اقلیمی و خطر بیابان‌زایی، از شاخص خشکی (AI) استفاده شد. بر اساس اندازه‌های بارش و تبخیر و تعرق بالقوه، شاخص خشکی با استفاده از روش تورنت وایت محاسبه شد و بر مبنای تقسیم‌بندی شاخص یونپ (UNEP) وضعیت بیابان‌زایی منطقه مشخص شد. این شاخص ابزاری مؤثر برای تعیین وضعیت اقلیمی و خطر بیابان‌زایی مناطق گوناگون است.

نتایج و بحث

در این پژوهش، با استفاده از شاخص SPEI، داده‌های تبخیر و تعرق بالقوه، فراوانی و تداوم رخداد پدیده خشکسالی‌های هواشناسی تهیه شد. نتایج نشان داد که مجموع تبخیر و تعرق بالقوه در ایستگاه مهاباد ۷۵۵/۹۸ میلی‌متر در سال بود که روند آن افزایشی بود. همچنین، ۸۴٪ از بادهای ثبت‌شده در این ایستگاه سرعت کمتر از ۶ متر در ثانیه داشتند. در این میان، تمرکز شدیدترین بادهای مشاهده‌شده در ماه‌های (Mar)، (Feb) و (Apr) به‌ترتیب ۱۲/۱، ۱۱/۲و ۱۰/۱٪ بود. همچنین، ۲۷٪ از بادهای غالب سرعت ۶ تا ۱۰ متر در ثانیه داشتند و کمتر از ۱٪ از بادهای غالب نیز سرعت ۱۰ تا ۱۲ متر در ثانیه داشتند. براساس شاخص لنکستر تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای موجود در منطقه، در بازهٔ زمانی ۳۳ سال کمتر از ۵۰ بود و وضعیت آنها غیرفعال بود. رابطهٔ میان شاخص لنکستر با درصد بادهای بیشتر از آستانهٔ فرسایش و اندازهٔ تبخیر و تعرق مستقیم بود اما، با اندازهٔ بارش برعکس بود. در منطقهٔ مهاباد، آهنگ تغییرات شاخص لنکستر نسبت به افزایش یا کاهش درصد بادها با سرعت بیشتر از حد آستانهٔ فرسایش، به یک اندازه بود. تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای تابعی از تغییرات تبخیر و تعرق بالقوه منطقه بوده و با آن رابطه مستقیم دارد. بنابراین، با افزایش تبخیر و تعرق بالقوه، تحرک‌پذیری نیز افزایش می‌یابد. شاخص خشکی به‌دست آمده مطابق با تقسیم‌بندی ارائه شده در یونپ (UNEP)، نشان داد که تمام ایستگاه‌های هواشناسی استان در وضعیت نیمه‌خشک تا مرطوب هستند. بر این اساس منطقهٔ مهاباد با خطر متوسط بیابان‌زایی و نیمه‌مرطوب مواجه است که خطر بیابان‌زایی آن را تهدید می‌کند.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

با بررسی‌های انجام شده در سطح استان آذربایجان‌غربی، مناطقی که تپه‌های ماسه‌ای شاخصی داشته باشند و یا در حال تشکیل باشند، تاکنون گزارش‌نشده است. ولی در بازدیدهای انجام‌شده از ساحل دریاچهٔ ارومیه و در محدودهٔ شهرستان مهاباد، نشانه‌های کوچکی از شکل‌گیری تپه‌های ماسه‌ای دیده شد که یک سال بعد به‌دلیل قرار گرفتن در محدودهٔ تغییرات سالانهٔ سطح آب دریاچه و جریان آب از اطراف ساحل از بین رفتند. در این پژوهش، ضمن شناخت روند تغییرات عناصر اقلیمی و همبستگی موجود میان این عامل‌ها به‌عنوان متغیرهای مستقل، اثرات احتمالی تغییر اقلیم بر پدیده گرد و غبار و تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای موجود نیز بررسی شد. در تمام سال‌های آماری، تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای موجود در منطقه کمتر از ۵۰ بود و شاخص لنکستر به‌دست آمده برای ایستگاه همدید مهاباد، وضعیت غیرفعال را نشان داد. همچنین، براساس تحلیل حساسیت شاخص لنکستر، کاهش تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای با کاهش اندازهٔ تبخیر و تعرق بالقوه بیشتر از نرخ افزایش آن در حالت افزایش تبخیر و تعرق بالقوه بود. بر مبنای تقسیم‌بندی شاخص یونپ (UNEP)، منطقه مهاباد با شاخص خشکی نیمه‌مرطوب و با کمترین اندازهٔ تبخیر و تعرق، با خطر متوسط بیابان‌زایی مواجه است. ازاین‌رو، با در نظر گرفتن شرایط اقلیمی حاکم، توصیه می‌شود در استفاده از زمین بسیار دقت شود و از روش‌های بهینهٔ آبیاری در کشاورزی استفاده شود.

واژگان کلیدی: **تپه‌های ماسه‌ای، تغییر اقلیم، شاخص استاندارد بارش-تبخیر و تعرق بالقوه، شاخص لنکستر**

مقدمه

در دنیا تپه‌های ماسه‌ای به‌شکل فعال، نیمه‌فعال و یا غیرفعال (تثبیت‌شده به‌وسیلهٔ پوشش گیاهی) هستند. تپه‌های ماسه‌ای تثبیت‌شده بیانگر وجود اقلیم خشک در گذشته است که شرایط فعالی داشته‌اند. بسیاری از زمین‌شناسان و زمین‌ریخت‌شناسان تحرک تپه‌های ماسه‌ای در طول کواترنر فوقانی را به افزایش خشکی مرتبط می‌دانند، در حالی که پایداری به‌وسیلهٔ پوشش گیاهی در طول دوره‌های مرطوب رخ می‌دهد (سارنتین ۱۹۷۸). مفهوم تشکیل تپه‌های شنی فعال در شرایط خشک و تثبیت طبیعی در طول دوره‌های مرطوب، مبتنی بر تعامل شناخته‌شده دما با بارش به‌عنوان یک عامل تعیین‌کننده میانگین تولید خالص سالانه زیست توده اولیه است (لاونرو ۱۹۷۹). بدیهی است که تمام تپه‌های شنی ثابت، در گذشته فعال بوده‌اند و با تغییر آب و هوا تثبیت شده‌اند. اکثر دانشمندان از تغییر آب و هوا به‌عنوان تغییر در اندازهٔ بارندگی و دما یاد می‌کنند. دما و بارش دو عنصر مهم آب و هوایی هستند که بر رشد پوشش گیاهی تأثیر می‌گذارند (هوتن و همکاران ۲۰۰۱). بنابراین، انتظار می‌رود تپه‌های ماسه‌ای در بیابان‌های گرم که بدون پوشش گیاهی هستند فعال باشند، در حالی که تپه‌های کنار ساحل که رطوبت و عموماً پوشش گیاهی دارند، تثبیت شده باشند. با این حال، نمونه‌های زیادی از تپه‌های شنی فعال در مناطق مرطوب (هانتر و همکاران ۱۹۸۳)، و تپه‌های تثبیت‌شده در مناطق خشک (سور و همکاران ۲۰۲۰) وجود دارد. هدف این پژوهش، تبیین پدیدهٔ تپه‌های ماسه‌ای فعال در مناطق مرطوب و شن‌های تثبیت‌شده در اقلیم‌های خشک و تبیین تأثیر تغییر اقلیم بر تحرک و پایداری تپه‌های ماسه‌ای بود. در بخش‌های مختلف جهان، شاخص‌های گوناگونی از فرسایش بادی و تحرک تپه‌های ماسه‌ای بررسی‌شده است که همهٔ آنها بر اساس دو عامل، تحرک تپه‌های ماسه‌ای را کاهش یا افزایش می‌دهند (شپل و همکاران ۱۹۶۲). عامل اول، درجهٔ بادخیزی است (W) که به‌شکل درصد سالانهٔ روزهایی که سرعت باد بیشتر از سرعت حد آستانه حرکت شن و ماسه است، بیان می‌شود. در صورت افزایش وزش باد، بیشتر تپه‌های شنی فعال خواهند شد. عامل دوم که به رشد پوشش گیاهی کمک می‌کند، نسبت میان میانگین سالانهٔ بارندگی (P) و تبخیر بالقوه سالانه (PET) است. به منظور بررسی اثر تغییر اقلیم بر تحرک‌پذیری ماسه‌ها، لنکستر (۱۹۸۸) روش خود را ارائه داد که بر اساس متغیرهای باد و تبخیر و تعرق بالقوه بود. در آفریقای‌جنوبی، اندازه‌های بحرانی این شاخص برای تپه‌های شنی کاملاً فعال و بدون پوشش گیاهی، بیش از ۲۰۰ بود و برای تپه‌های شنی گیاهی غیرفعال، کمتر از ۵۰ بود. این شاخص (M) به‌طور گسترده‌ای به‌وسیلهٔ زمین‌شناسان و زمین‌ریخت‌شناسان برای تعیین فعال یا ثابت بودن تپه‌های شنی و تأثیر قابل انتظار تغییرات آب و هوا بر میدان‌های تپه‌ای استفاده‌شده است (مک‌تینش ۱۹۹۰).

در ایران نصرتی (۲۰۱۴) در ۴۱ ایستگاه هواشناسی همدید در گسترهٔ اقلیم‌های گوناگون، خشک‌سالی هواشناسی را با استفاده از شاخص بارش و تبخیر و تعرق استانداردشده SPEI و مقایسهٔ آن با شاخص بارش استاندارد شده SPI، بررسی کرد. نتایج این پژوهشگر نشان داد، همبستگی شاخص بارش استانداردشده و شاخص بارش تبخیر و تعرق استانداردشده، معنی‌دار بود. اما، شاخص بارش تبخیر و تعرق استانداردشده پاسخ سریع‌تری نسبت به خشک‌سالی نشان داد. همچنین، او گزارش کرد که با افزایش مقیاس زمانی، تداوم خشک‌سالی نیز افزایش یافته است. با توجه به اهمیت تبخیر و تعرق در بیلان آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک، شاخص بارش تبخیر و تعرق استانداردشده می‌تواند شاخص مناسبی در پژوهش‌های خشک‌سالی باشد. نعیمی و همکاران (۲۰۲۱) در پژوهشی تأثیر تغییر اقلیم بر تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای در شهرستان سبزوار را بررسی کردند. این پژوهشگران دریافتند که بر اساس شاخص خشکی یونپ، ۷۵٪ از تغییرات سطح زمین و تحرک تپه‌های ماسه‌ای، به‌دلیل تغییر عناصر اقلیمی و به‌طور ویژه تغییرات بارندگی، بادهای فرساینده، سرعت باد و تبخیر و تعرق بالقوه منطقه بود. همچنین، در دورهٔ آماری بررسی‌شده اندازه‌های شاخص لنکستر در ایستگاه نامبرده بیانگر

وضعیت غیرفعال نبود. در نهایت، نتیجه گرفتند که رابطهٔ میان شاخص خشکی و تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای نشانگر تأثیر معنی‌دار خشکی بر اندازهٔ تحرک و فعالیت تپه‌های ماسه‌ای بود. در پژوهش فوق، نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که با افزایش فراوانی بادهای فرساینده و تبخیر تعرق بالقوه به اندازهٔ ۳۰٪، فعالیت تپه‌های ماسه‌ای در ایستگاه سبزوار ۳۸٪ افزایش خواهد یافت. در استان بوشهر در منطقهٔ دیر، نتایج پژوهش راهی و همکاران (۲۰۲۲) نشان داد که اندازهٔ فعالیت تپه‌های ماسه‌ای بر پایهٔ شاخص لنکستر در دورهٔ آماری ۳۰ ساله کاملاً فعـال بود و بر اساس شاخص خشکی منطقهٔ مطالعه‌شده در سه طبقهٔ فراخشک، خشک و نیمه‌خشک و در وضعیت خطر بیابـان‌زایـی واقعـی، بسیار شدید و شدید بود. در پژوهش فوق، بر اساس آزمون تحلیل حساسیت، مشخص شد، چنانچه چنانچه در آینده فراوانی بادهای با سرعت بیش از حد آستانهٔ فرسایش در منطقهٔ دیر، ۳۰٪ افزایش یابد، فعالیت و حرکت تپه‌های ماسه‌ای نیز ۳۰٪ افزایش خواهد یافت، در حالی‌کـه بـا ۳۰٪ افزایش بارندگی، ۲۳٪ فعالیت تپه‌های ماسه‌ای کاهش خواهد یافت. در کویر سیرجان، حنیفه‌پور و همکاران (۲۰۲۲)، عامل‌های اقلیمی مؤثر بر تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای را با استفاده از شاخص لنکستر، پایش و پیش‌بینی کردند و نتیجه گرفتند که وضعیت بیشتر تپه‌های ماسه‌ای فعال بود و ۹۰٪ از سال‌های آماری از نظر اقلیمی در وضعیت خطر بیابان‌زایی خیلی شدید بود و ۶۵٪ از افزایش فعالیت رسوبات بادی نیز به‌دلیل تغییر شرایط اقلیمی ناشی از تغییرات بارندگی و تبخیر و تعرق بالقوه در منطقهٔ مطالعه‌شده بود. این پژوهشگران پیش‌بینی کردند که تغییر هم‌زمان عناصر اقلیمی به‌ویژه سرعت بادهای فرسایش‌زا و تبخیر و تعرق در آینده می‌تواند بر شدت بیابان‌زایی در این منطقه از کشور، تأثیرگذار باشد. در استان سمنان و در شهرستان دامغان، یوسفی‌مبرهن و همکاران (۲۰۲۱) در تحقیقی بر اساس نتایج به‌دست آمده از شاخص لنکستر، گزارش کردند که با بیشترین شاخص، وضعیت فعالیت رسوبات بادی در این شهرستان، کاملاً فعال بود. ازاین‌رو، اقدام برای کاهش خسارت‌های ناشی از فعالیت تپه‌های ماسه‌ای در این شهرستان بسیار ضروری است. همچنین، نتایج پیش بینی اثرات تغییر احتمالی عامل‌های اقلیمی بر تحرک‌پذیری ماسه‌های روان در ایستگاه منتخب استان سمنان به‌وسیلهٔ این پژوهشگران، نشان داد که حساسیت تحرک‌پذیری ماسه نسبت به تغییرات افزایشی باران بیشتر از سرعت باد و نسبت به تغییرات کاهشی باران کمتر از سرعت باد بود. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که اگر اندازه‌های میانگین سرعت باد ۲۰٪ در آینده کاهش یابد و یا اندازهٔ بارندگی به اندازهٔ ۲۰٪ افزایش یابد، وضعیت تپه‌ها از حالت کاملاً فعال به فعال تغییر خواهند کرد.

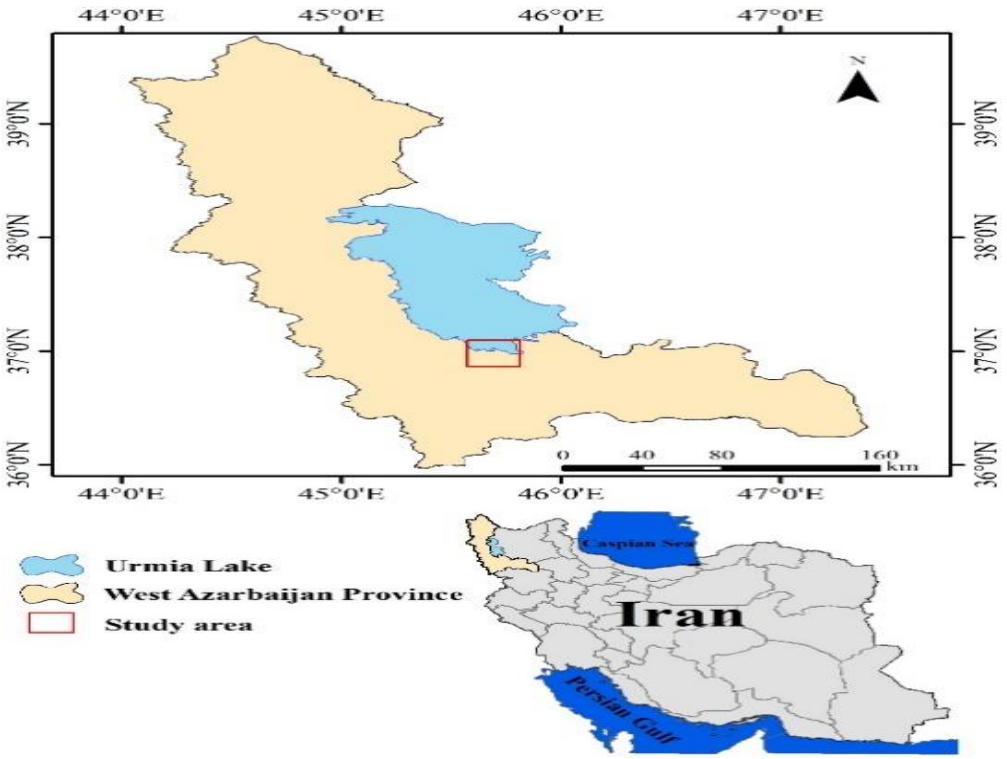
استان آذربایجان غربی در شمال‌غرب ایران و در منطقهٔ نیمه‌خشک است و از نظر اقلیمی وجود تپه‌های ماسه‌ای در آن قابل انتظار نیست و می‌توان گفت که تمام پژوهش‌ها و بررسی‌هایی که در این زمینه انجام‌شده است در مناطق خشک بوده است. ولی با توجه به شرایط خشکی و کم بارشی که اخیرا حاکم شده شرایط تغییر یافته است. با کاهش بارش و کاهش ورودی رودها، دریاچهٔ ارومیه به خشکی گراییده و مناطق خشک وسیع و گسترده در سواحل آن نمایان شده است. بنابراین، امکان تشکیل ماسه خشک و روان و به تبع آن ایجاد تپه ماسه‌ای در محدودهٔ دریاچه و سواحل آن دور از انتظار نیست. با توجه به حاکم شدن شرایط جدید اقلیمی در منطقه، شناسایی و بررسی تپه‌های ماسه‌ای جدید و روند حرکتی آنها از اهداف پژوهش می‌باشد. بنابراین، به‌دلیل نبودن تپه‌های ماسه‌ای و شکل‌گیری نشدن آنها در سطح استان و در ساحل دریاچهٔ ارومیه (با چشم‌انداز ساحل گسترده و کم شیب)، فقط ایستگاه هواشناسی مهاباد از نظر وضعیت باد و شاخص لنکستر و وجود تپه ماسه‌ای بررسی شد.

مواد و روش‌ها

منطقهٔ مطالعه‌شده

استان آذربایجان‌غربی با در نظر گرفتن وسعت دریاچهٔ ارومیه، ۴۳۶۶۰ کیلومتر مربع مساحت دارد. این استان که در شمال‌غرب ایران است، ۲/۶۵٪ از مساحت کل

کشور را در بر می‌گیرد. استان آذربایجان‌غربی از طرف شمال و شمال‌شرق با جمهوری آذربایجان و ارمنستان، از غرب با کشورهای ترکیه و عراق، از جنوب با استان کردستان و از شرق با استان آذربایجان‌شرقی و زنجان همسایه است. موقعیت استان آذربایجان‌غربی در شکل ۱، نشان‌داده شده است. با توجه به گستردگی و کم‌شیب بودن ساحل دریاچهٔ ارومیه و فراوانی بیشتر رخدادهای گرد و غبار در ایستگاه مهاباد، این پژوهش در محدودهٔ شهرستان مهاباد انجام شد.



شکل ۱- موقعیت منطقهٔ مطالعه‌شده.

Figure 1- Location of the study area.

داده‌های استفاده شده

بر اساس اطلاعات دریافت شده از اداره کل هواشناسی استان آذربایجان‌غربی، مشخص شد که تعداد ۱۳ ایستگاه همدید فعال در سطح این استان وجود دارد که اکثر آنها به تازگی تأسیس شده و اطلاعات دورهٔ آماری کوتاه‌مدت دارند. بررسی اطلاعات ثبت شدهٔ این ایستگاه‌ها نشان داد که فقط هفت ایستگاه همدید از ایستگاه‌های هواشناسی نامبرده، دورهٔ آماری بلندمدت ۳۳ ساله (۱۹۸۷-۲۰۱۹) دارند که ایستگاه مهاباد نیز در فهرست ایستگاه‌های با دورهٔ بلندمدت آماری بود. برای بررسی وضعیت خشک‌سالی از شاخص خشک‌سالی SPEI استفاده شد. به‌منظور بررسی اثر تغییرات اقلیم (باد و بارش) بر فعالیت ماسه‌ها و به‌منظور پیش‌بینی احتمال تحرک تپه‌های ماسه‌ای و ماسه‌زارها و گرد و غبار ناشی از آن‌ها، از روش جهانی لنکستر استفاده شد. همچنین، برای شناخت وضعیت بیابان‌زایی منطقه نیز از شاخص یونپ (UNEP)، استفاده شد. ازاین‌رو، داده‌های لازم شامل آمار بارش، دما، باد، رطوبت نسبی و تبخیر و تعرق ایستگاه مهاباد از اداره کل هواشناسی استان جمع‌آوری شد.

روش پژوهش

بررسی تبخیر و تعرق بالقوه و خشک‌سالی‌ها

به‌منظور تعیین سال‌های خشک و تر و بررسی اثرات آن بر افزایش یا کاهش روزهای همراه با گرد و غبار، از شاخص SPEI استفاده شد. با توجه به اینکه در شاخص SPEI افزون بر بارش، تبخیر و تعرق نیز در نظر گرفته

می‌شود، لذا، مناطقی با ناهنجاری مثبت دما، حتی در شرایط بارش مناسب، ممکن است در محدودهٔ مناطق خشک‌سالی قرار گیرند. در شاخص SPEI یک تعادل آبی اقلیمی در اندازه‌های زمانی گوناگون (K) به‌کار گرفته می‌شود که مبتنی بر تفاوت اندازهٔ بارش با اندازهٔ تبخیر و تعرق است. این شاخص بر پایهٔ بارش و تبخیر و تعرق بالقوه، بیلان آب را برای محاسبهٔ شاخص خشک‌سالی لحاظ می‌کند و مبتنی بر محاسبهٔ بیلان آب اقلیمی است و برای محاسبه آن به داده‌های ماهانهٔ بارندگی و دمای هوا نیاز است (رابطه ۱).

$$Di = Pi - PETi \qquad (۱)$$

Pi: اندازهٔ بارش (میلی‌متر)، PET: اندازهٔ تبخیر و تعرق بالقوه (میلی‌متر) است که از روش تورنت‌وایت محاسبه می‌شود.

با استفاده از روش تورنت‌وایت، تبخیر و تعرق بالقوه برای هر یک از ماه‌های سال محاسبه شد. اساس این روش دمای میانگین ماهانه بود. نتایج شدت خشک‌سالی با استفاده از روش SPEI در جدول ۱، آورده‌شده است.

جدول ۱- طبقه‌بندی شاخص استاندارد بارش-تبخیر و تعرق بالقوه (SPEI).

Table 1- Classification of standardized precipitation evapotranspiration index.

SPEI Values	Drought Classes	Row
>2.0	Extremely Wet	1
1.0 to 1.99	Severely Wet	2
1.0 to 1.49	Moderately Wet	3
-0.99 to 0.99	Near Normal	4
-1.49 to -1.0	Moderately Dry	5
-1.99 to -1.5	Severely Dry	6
< -2.0	Extremely Dry	7

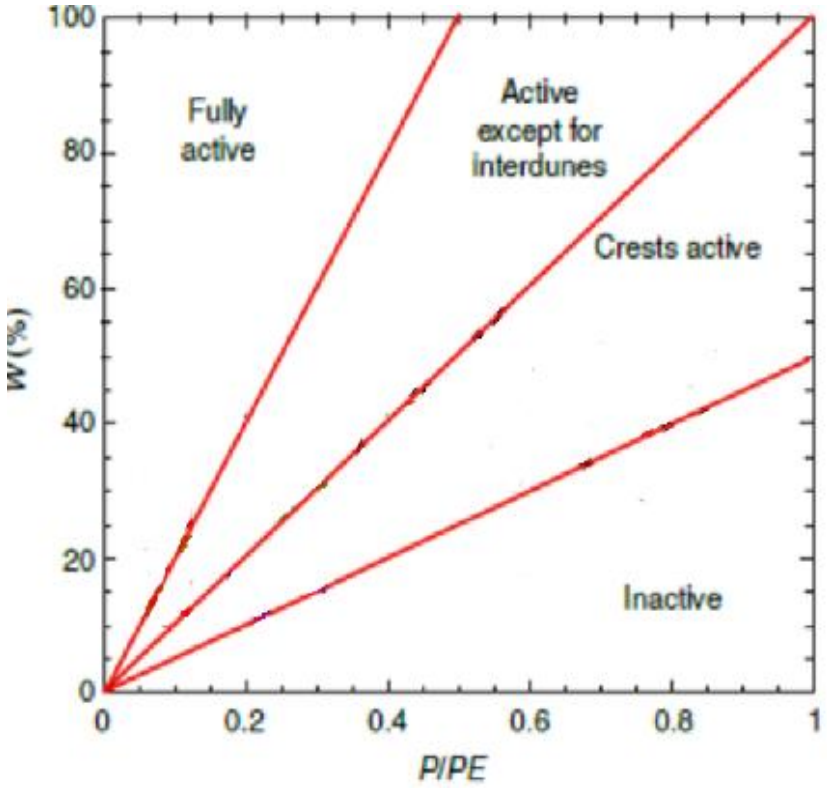
بررسی تحرک‌پذیری ماسه‌های روان

برای بررسی اثر تغییر اقلیم، به‌ویژه باد و بارش بر فعالیت ماسه‌ها و به‌منظور پیش‌بینی احتمال تحرک تپه‌های ماسه‌ای و ماسه‌زارها و گرد و غبار ناشی از آن‌ها، از روش جهانی لنکستر استفاده شد. از این روش می‌توان برای پیش‌بینی دهه‌های آینده نیز استفاده کرد. در بخش‌های مختلف جهان، شاخص‌های گوناگونی از فرسایش بادی و تحرک تپه‌های ماسه‌ای بررسی‌شده است که همهٔ آنها بر اساس دو عامل، تحرک تپه‌های ماسه‌ای را کاهش یا افزایش می‌دهند. عامل اول، درجهٔ بادخیزی است (W) که به‌شکل درصد سالانهٔ روزهایی که سرعت باد بیشتر از سرعت حد آستانه حرکت ماسه است، بیان می‌شود. اگر درجهٔ بادخیزی (W) افزایش یابد، بیشتر تپه‌های ماسه‌ای متحرک خواهند بود. عامل دوم که به رشد پوشش گیاهی کمک می‌کند، به‌شکل نسبت بین میانگین سالانهٔ بارندگی (P) و تبخیر بالقوه (PET) سالانه بیان می‌شود که به آن، نسبت بارندگی مؤثر نیز گفته می‌شود. اساس این مدل با عنوان شاخص تحرک تپه‌های ماسه‌ای لنکستر شناخته می‌شود (لنکستر ۱۹۸۸). این شاخص، بر پایهٔ مدل توسعه‌یافتهٔ فرسایش بادی چپیل و همکاران پیشنهادشده است (شپل و همکاران ۱۹۶۳). در این مدل، اندازهٔ تحرک ماسه (M) با استفاده از رابطهٔ ۲ محاسبه شد.

$$M = \frac{W}{P/PET} \qquad (۲)$$

M: اندازهٔ فعالیت رسوبات بادی، W: درصد فراوانی بادهای با سرعت بیشتر از سرعت آستانهٔ فرسایش (m/s) در بلندی ۱۰ متری از سطح زمین، P: میانگین سالانهٔ بارندگی (میلی‌متر)، PE: تبخیر و تعرق بالقوه سالانه (میلی‌متر) است.

شاخص M به‌طور گسترده‌ای به‌وسیلهٔ زمین‌شناسان و زمین‌ریخت‌شناسان برای تعیین تپه‌های ماسه‌ای فعال یا تثبیت‌شده استفاده شده است. درجه‌بندی تجربی این شاخص (M) عبارت است از، <۵۰، تپه‌های شنی غیرفعال و سطوح شن و ماسه به‌وسیلهٔ پوشش گیاهی تثبیت شده، ۵۰-۱۰۰، فعال فقط در مناطق تاج تپه‌های شنی، ۱۰۰-۲۰۰، تپه‌های شنی فعال اما، مناطق میان تپه‌های ماسه‌ای به‌وسیلهٔ پوشش گیاهی تثبیت‌شده و > ۲۰۰، تپه‌های شنی به‌طور کامل فعال است. این شاخص، به‌خوبی نشان‌دهندهٔ متغیرهای اقلیمی و محیط‌های زمین‌ریختی از دیدگاه فعالیت ماسه‌ها است. پس از محاسبهٔ شاخص تحرک‌پذیری ماسه‌ها، اندازه‌های به‌دست آمده در نمودار تحرک‌پذیری ماسه‌ها رسم شد تا شاخص فعالیت آنها با یکدیگر مقایسه شوند. نمودار تعیین اندازهٔ تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای در شکل ۲، نشان‌داده شده است.



شکل۲ - نمودار تعیین اندازهٔ تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای.

Figure 2- Sand dunes mobility determination chart.

پیش‌بینی اثر تغییرات احتمالی عامل‌های اقلیمی بر تحرک‌پذیری ماسه‌های روان

بیشتر تغییرات سطح زمین و جابه‌جایی‌های تپه‌های ماسه‌ای به‌دلیل تغییر در عناصر اقلیمی مثل سرعت باد و تبخیر و تعرق است. برای بررسی اثر احتمالی تغییر عناصر اقلیمی بر تحرک‌پذیری ماسه‌های روان و تشدید پدیدهٔ گرد و غبار، پس از محاسبهٔ اندازهٔ فعالیت رسوبات بادی، با استفاده از روش تحلیل حساسیت، اندازهٔ تأثیرپذیری متغیرهای خروجی از متغیرهای ورودی مدل، تعیین شد. به بیان دیگر، تحلیل حساسیت روشی برای تغییر دادن ورودی‌های یک مدل آماری به‌شکل سازمان یافته (سیستماتیک) است که بتوان تأثیرات این متغییرها را در خروجی مدل پیش‌بینی کرد. استفاده از تحلیل حساسیت به‌منظور تعیین رابطه‌های میان متغیرهای مدل با یکدیگر و همچنین برای تعیین اولویت تأثیر سنجه‌ها بر خروجی مدل استفاده‌شده است. از آنجایی که برخی از عناصر اقلیمی شاخص مانند باران، باد و تبخیر در اندازهٔ تحرک ماسه‌های روان تأثیر به‌سزایی دارند، ازاین‌رو، متغیرهای مدنظر در دامنه‌ای قابل قبول تغییرداده شدند. سپس، اثر این تغییرات در خروجی مدل یعنی اندازهٔ حرکت ماسه محاسبه شد. به این ترتیب، حساسیت تحرک‌پذیری ماسه‌ها در مقابل افزایش یا کاهش هر یک از متغیرها مشخص شد. چنانچه اندازهٔ باران در آینده کاهش یا افزایش یابد و یا اینکه مسایل گرمایش جهانی منجر به تبخیر بیشتر و یا کاهش یا افزایش اندازهٔ باد شود وضعیت احتمالی این تغییرات مشخص می‌شود.

شاخص خشکی و خطر بیابان‌زایی

شاخص خشکی (AI)، نسبت بارش به تبخیر و تعرق (P/PE) است (برنامهٔ محیط زیست سازمان ملل متحد ۱۹۹۱). این شاخص به‌وسیلهٔ کنواسیون سازمان ملل متحد برای مقابله با بیابان‌زایی (UNCCD) نیز پیشنهادشده است. این شاخص یک ابزار پژوهش علمی

ساده اما موثر برای تعیین وضعیت اقلیمی و خطر بیابان-زایی مناطق گوناگون است. در این پژوهش، شاخص خشکی با روش یونپ UNEP و با استفاده از رابطهٔ ۳، محاسبه شد.

$$AI = P/Eto \quad (۳)$$

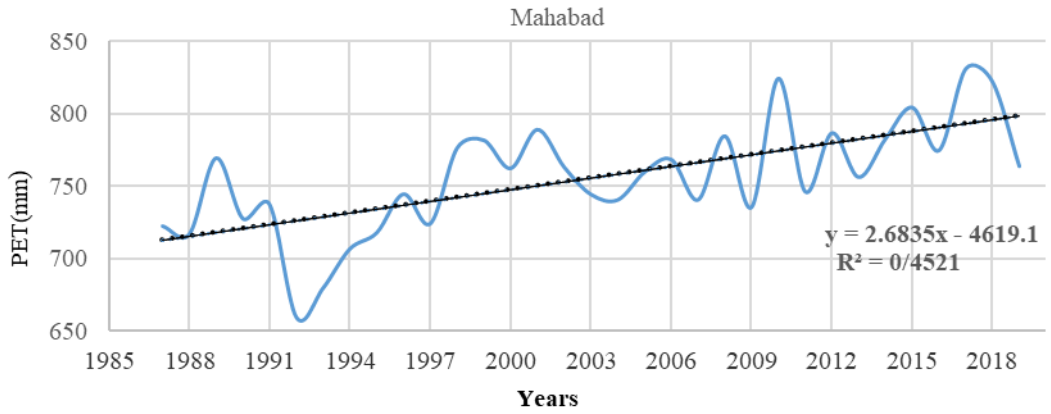
AI: شاخص خشکی، ET_0: تبخیر و تعرق گیاه مرجع و P، مقدار بارش است.

در شرایط $AI<0.03$ = اقلیم منطقه فراخشک، $0.03 \leq AI< 0.20$ = اقلیم منطقه خشک، $0.20 \leq AI< 0.50$ = اقلیم منطقه نیمه‌خشک، $0.50 \leq AI< 0.65$ = اقلیم منطقه نیمه‌مرطوب و $0.65 \leq AI$ = اقلیم منطقه مرطوب است.

نتایج و بحث

تبخیر و تعرق بالقوه و خشک‌سالی‌ها

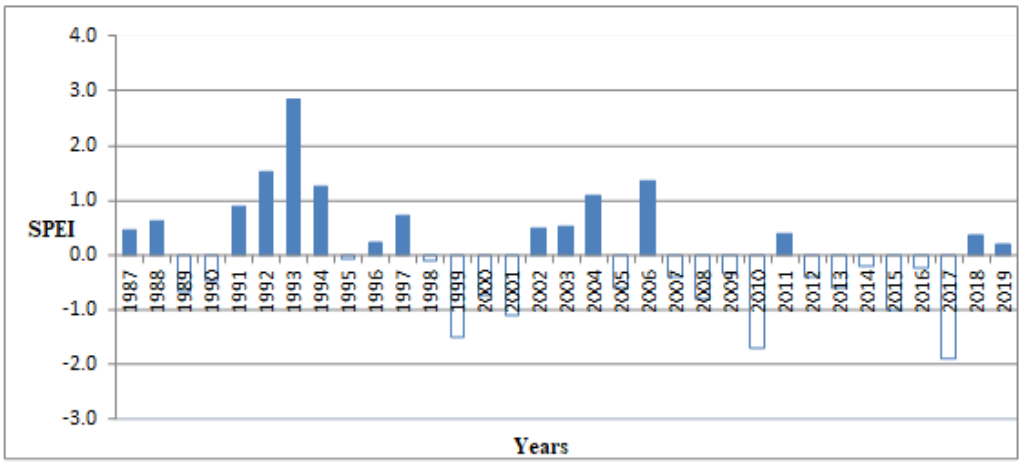
در این پژوهش محاسبات تبخیر و تعرق بالقوه و فراوانی و تداوم رخداد پدیدهٔ خشک‌سالی‌های هواشناسی، با استفاده از شاخص SPEI در گام‌های زمانی گوناگون، انجام شد. سپس، نتایج آن در گام زمانی ۱۲ ماهه برای ایستگاه مهاباد در نظر گرفته شد. بررسی نتایج تبخیر و تعرق بالقوه ایستگاه هواشناسی مهاباد نشان داد که مجموع تبخیر و تعرق بالقوه در این منطقه ۷۵۵/۹۸ میلی‌متر در سال و روند آن افزایشی بود. تبخیر و تعرق بالقوه سالانه در ایستگاه هواشناسی مهاباد در شکل ۳، نشان‌داده شده است.



شکل۳ - نمودار روند مجموع تبخیر و تعرق بالقوه سالانه در ایستگاه هواشناسی مهاباد.

Figure 2- Graph of total annual potential evapotranspiration trend in Mahabad Meteorological Station.

بر اساس شاخص خشک‌سالی SPEI، دو دورهٔ خشک‌سالی در منطقه مشاهده شد. اولین دوره به مدت چهار سال (۱۹۹۸-۲۰۰۱) رخداده است و طولانی‌ترین دورهٔ خشکی از سال ۲۰۰۷ شروع‌شده و تا سال ۲۰۱۷ ادامه‌داشته است که در طول این دوره فقط سال ۲۰۱۱ مرطوب بوده است. هر چند که در دورهٔ پژوهش‌شده دو دورهٔ کوتاه مرطوب نیز وجود داشت. توزیع شاخص خشک‌سالی SPEI در گام زمانی ۱۲ ماهه در شکل ۴ نشان‌داده شده است.



شکل۴- نمودار شاخص SPEI ایستگاه هواشناسی مهاباد.

Figure 4 - SPEI index diagram of Mahabad Meteorological Station.

تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای

با بررسی‌های انجام‌شده در سطح استان آذربایجان‌غربی مناطقی که تپه‌های ماسه‌ای شاخصی داشته باشند و یا در حال تشکیل باشند، تاکنون گزارش‌نشده است. ولی در بازدیدهای انجام‌شده از ساحل دریاچهٔ ارومیه نشانه‌های کوچکی از شکل‌گیری تپه‌های ماسه‌ای دیده شد که یک سال بعد به‌دلیل قرار گرفتن در محدودهٔ تغییرات سالانهٔ سطح آب دریاچه و جریان آب از اطراف ساحل از بین رفته‌اند (شکل ۵). بنابراین، به‌دلیل نبودن و عدم شکل‌گیری آنها در سطح استان، فقط ایستگاه هواشناسی مهاباد به‌دلیل داشتن زمین‌های ساحلی خشک و گسترده، از نظر وضعیت باد و شاخص لنکستر بررسی شد.

شکل ۵ - نمایی از شروع شکل‌گیری تپه ماسه‌ای در ساحل دریاچهٔ ارومیه.

Figure 5- A view of the beginning of the sand dune formation on the Lake Shore.

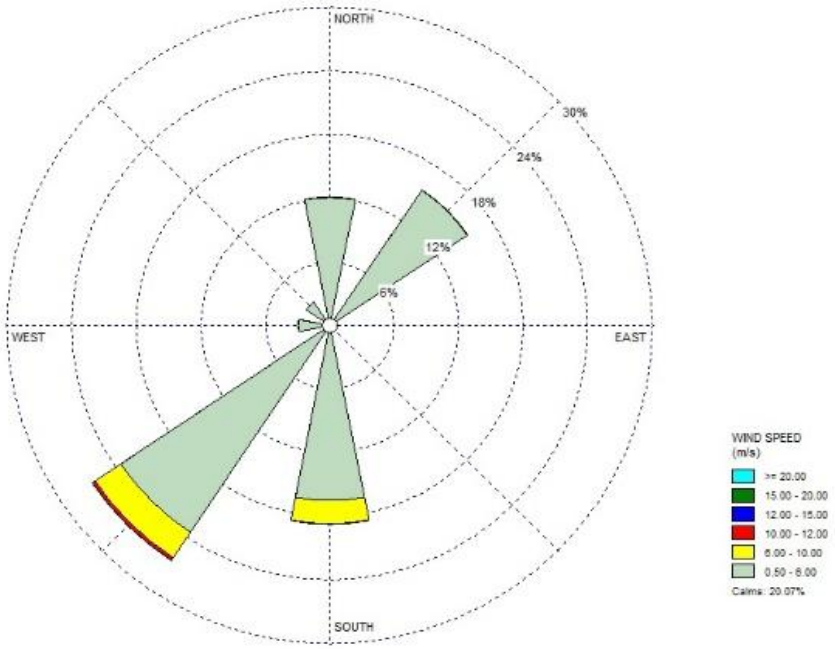
جدول ۲- درصد فراوانی ماهانهٔ طبقه‌های سرعت باد در ایستگاه هواشناسی مهاباد (۲۰۱۹-۱۹۸۷).

Table 2- The percentage of monthly frequency of wind speed classes in Mahabad Meteorological Station (1987-2019).

Month	<6	6--10	10--15	15--20	>20	>6%	mean
Jan	90.7	8.3	0.8	0	0	9.1	2.09
Feb	88.8	10.6	0.55	0.05	0	11.2	2.44
Mar	87.9	10.2	1.9	0	0	12.1	2.09
Apr	89.9	9.4	0.7	0	0	10.1	2.79
May	95.5	4.6	0.3	0.24	0	5.14	2.35
Jun	98.3	1.7	0	0	0	1.7	2.12
Jul	99.9	0.1	0	0	0	0.1	1.9
Aug	99.9	0.1	0	0	0	0.1	1.83
Sep	98.5	1.6	0	0	0	1.6	1.88
Oct	95.7	4.1	0.1	0	0	4.2	1.83
Nov	93.25	6.45	0.3	0	0	6.75	1.75
Dec	92.8	6.75	0.45	0	0	7.2	1.86

محاسبهٔ شاخص لنکستر

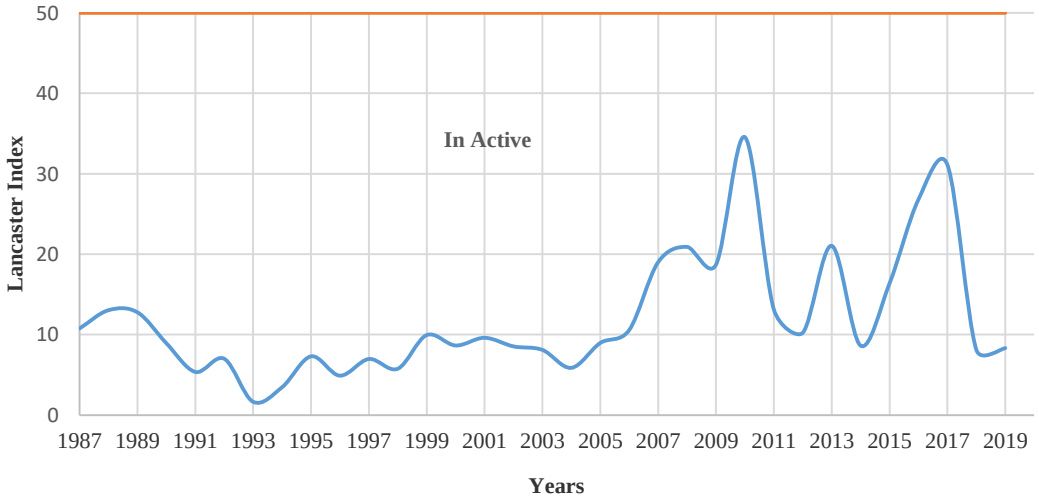
در این پژوهش، برای محاسبهٔ شاخص تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای موجود در منطقه از اطلاعات هواشناسی ایستگاه همدید مهاباد استفاده شد. آمار درصد ماهانه بادها با سرعت بیشتر از سطح آستانه فرسایش (>6 m/sec) در ایستگاه هواشناسی مهاباد در بازهٔ زمانی (۲۰۱۹-۱۹۸۷) در جدول ۲ آورده‌شده است. بر پایهٔ نتایج این جدول، ۸۴٪ از بادهای ثبت‌شده در این ایستگاه سرعت کمتر از ۶ متر در ثانیه داشتند. در این میان، تمرکز شدیدترین بادهای مشاهده‌ای در ماه‌های (Mar)، (Feb) و (Apr) به‌ترتیب ۱۲/۱، ۱۱/۲ و ۱۰/۱٪ بود. جهت و تواتر بادهای بیشتر از ۶ متر در ثانیه ایستگاه هواشناسی مهاباد در گلباد شکل ۶ نشان‌داده شده است. بر اساس این گلباد، جهت جغرافیایی باد غالب در این ایستگاه جنوب-جنوب‌غربی بود و ۲۷٪ از بادهای ثبت‌شده در این ایستگاه از این نوع بادها بود. همچنین، سرعت ۲۷٪ از بادهای غالب (۶-۱۰) متر در ثانیه بود. در این میان، سرعت کمتر از ۱٪ از بادهای غالب نیز (۱۰-۱۲) متر بود.



شکل ۶- گلباد ایستگاه مهاباد برای بادهای با سرعت بیشتر از ۶ متر در ثانیه (۲۰۱۹-۱۹۸۷).

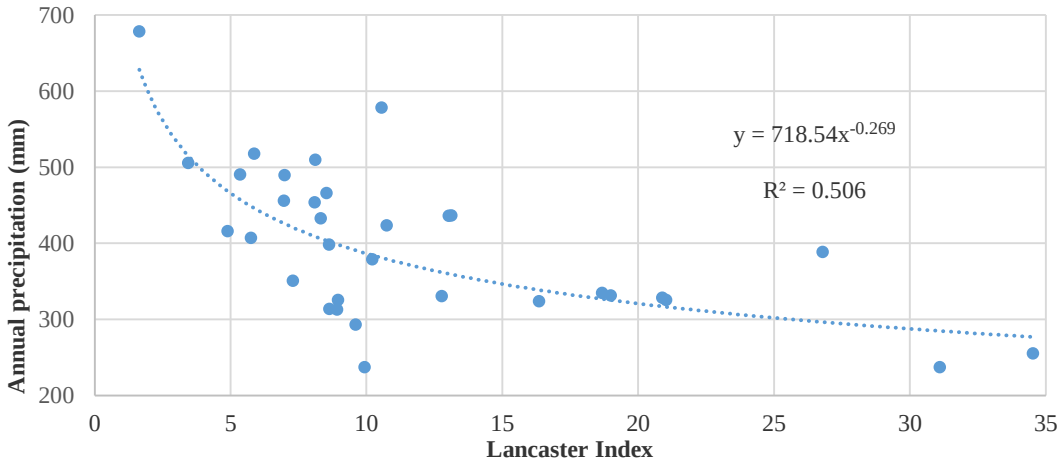
Figure 6- Wind Rose for Mahabad station for winds with speed greater than 6 meters per second (1987-2019).

تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای موجود در منطقه، در بازهٔ زمانی ۳۳ سال کمتر از ۵۰ بود که مشخص می‌شود که در وضعیت غیر فعال هستند (شکل ۷). بررسی همبستگی میان مجموع بارش سالانه ایستگاه مهاباد با شاخص لنکستر در شکل ۸ نشان‌داده شده است. این نمودار نشان می‌دهد که با افزایش اندازهٔ بارش، شاخص لنکستر کاهش یافت.



شکل ۷- نمودار تغییرات سالانه شاخص لنکستر در ایستگاه هواشناسی مهاباد (۲۰۱۹-۱۹۸۷).

Figure 7- Chart of annual changes of Lancaster Index at Mahabad meteorological station (1987-2019).



شکل ۸- نمودار همبستگی میان شاخص لنکستر و مجموع بارش سالانه در ایستگاه مهاباد (۲۰۱۹-۱۹۸۷).

Figure 8- Correlation diagram between Lancaster Index and total annual precipitation in Mahabad station (1987-2019).

تحلیل حساسیت شاخص لنکستر در منطقهٔ مهاباد

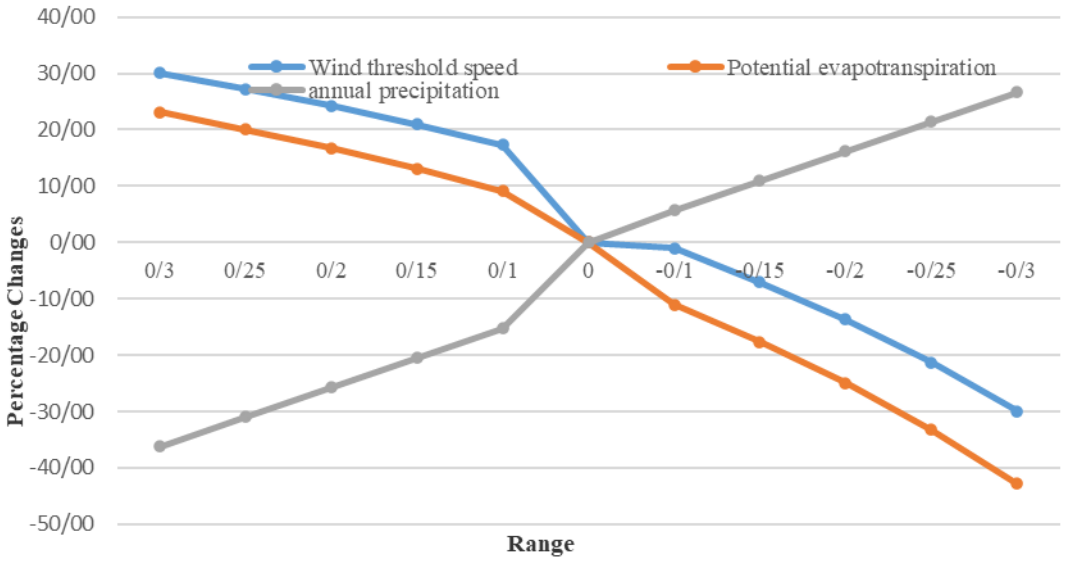
به‌منظور پیش‌بینی اندازهٔ تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای منطقهٔ مهاباد، حساسیت سنجه‌های اقلیمی مؤثر بر تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای در قالب شاخص لنکستر و در دامنهٔ تغییرات ۳۰ تا ۳۰- تحلیل شد. نتایج این تحلیل در جدول ۳ آورده‌شده است. بر پایهٔ نتایج مشاهده شده در این جدول، میان شاخص لنکستر با درصد بادهای بیشتر از حد آستانهٔ فرسایش و اندازهٔ تبخیر و تعرق، رابطهٔ مستقیم و با میزان بارش، رابطهٔ عکس وجود دارد. آهنگ تغییرات شاخص لنکستر نسبت به افزایش یا کاهش درصد بادهای با سرعت بیش از حد آستانهٔ فرسایش در منطقهٔ مهاباد به یک اندازه بود.

آهنگ تغییرات تحرک تپه‌های ماسه‌ای منطقهٔ مهاباد نسبت به افزایش یا کاهش اندازهٔ تبخیر و تعرق بالقوه منطقه نیز تقریباً یکسان بود، با این تفاوت که کاهش تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای با کاهش اندازهٔ تبخیر و تعرق بالقوه بیشتر از نرخ افزایش آن در حالت افزایش تبخیر و تعرق بالقوه است. حساسیت شاخص لنکستر نسبت به تغییرات عامل‌های اقلیمی در نمودار شکل ۹ نشان‌داده شده است.

جدول ۳- حساسیت شاخص لنکستر نسبت به تغییرات عامل‌های اقلیمی برای تپه‌های ماسه‌ای.

Table 3- Lancaster Index sensitivity to the changes of climatic factors for sand dunes.

W	M	Percentage Changes	PET	M	Percentage Changes	P	M	Percentage Changes	Range
7.37	13.98	0.30	982.8	13.98	0.23	438.50	8.27	0.23	0.3
7.09	13.44	0.27	945.0	13.44	0.20	458.44	8.60	0.20	0.25
6.80	12.90	0.24	907.2	12.90	0.17	478.37	8.96	0.17	0.2
6.52	12.37	0.21	869.4	12.37	0.13	498.30	9.35	0.13	0.15
6.24	11.83	0.17	831.6	11.83	0.09	518.23	9.78	0.09	0.1
0.00	0.00		0.0			0.00			0
5.10	9.68	-0.01	680.4	9.68	-0.11	358.78	11.95	-0.11	-0.1
4.82	9.14	-0.07	642.6	9.14	-0.18	338.84	12.65	-0.18	-0.15
4.54	8.60	-0.14	604.8	8.60	-0.25	318.91	13.44	-0.25	-0.2
4.25	8.06	-0.21	567.0	8.06	-0.33	298.98	14.34	-0.33	-0.25
3.97	7.53	-0.30	529.2	7.53	-0.43	279.05	15.36	-0.43	-0.3



شکل ۹- نمودار حساسیت شاخص لنکستر نسبت به تغییرات متغیرهای اقلیمی برای تپه‌های ماسه‌ای مهاباد.

Figure 9- Sensitivity diagram of Lancaster Index to the changes of climatic variables for Mahabad sand dunes.

نتایج شاخص خشکی و خطر بیابان‌زایی

باتوجه به وجود اندازه‌های بارش مشاهده‌ای ایستگاه‌های هواشناسی در سطح استان و محاسبهٔ اندازه تبخیر و تعرق بالقوه با استفاده از روش نورنت‌وایت برای تمام ایستگاه‌های هواشناسی مدنظر، شاخص خشکی برای هر کدام از این ایستگاه‌ها محاسبه شد. سپس، برمبنای تقسیم‌بندی شاخص یونپ، وضعیت بیابان‌زایی هر کدام از ایستگاه‌ها مشخص و نتایج آن در جدول ۴ آورده شده است. بر پایهٔ نتایج مشاهده شده در این جدول، تمام ایستگاه‌های هواشناسی استان در وضعیت نیمه‌خشک تا مرطوب قرار دارند. ایستگاه‌های جنوبی استان نیمه‌مرطوب تا مرطوب بوده، در حالی که مناطق مرکزی و شمالی استان نیمه‌خشک هستند و در طبقهٔ خطر شدید قرار گرفتند. در این بررسی، منطقهٔ مهاباد نیز با خطر متوسط بیابان‌زایی و نیمه‌مرطوب مواجه بود که خطر بیابان‌زایی آن را تهدید می‌کند.

جدول ۴- وضعیت خطر بیابان‌زایی در سطح ایستگاه‌های هواشناسی استان و ایستگاه مهاباد براساس شاخص یونپ.

Table 4- Desertification risk status of meteorological stations of the province and Mahabad station based on UNEP Index.

Station	P	PET	P/PET	Dry Index (AI)	Desertification
Urmia	311.94	1181.3	0.46	Semi Dry	Severe
Piranshahr	673.17	1236.1	0.87	Wet	--
Tekab	323.18	1168.1	0.50	Semi Dry	Severe
Khoy	266.88	1097.9	0.36	Semi Dry	Severe
Sardasht	831.18	1336.2	1.07	Wet	--
Makou	304.08	1157.6	0.46	Semi Dry	Severe
Mahabad	397.03	1051	0.53	Semi-wet	Moderate Risk

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

تغییر اقلیم مهمترین عامل تهدید بشر و نابودگر محیط‌زیست شناخته‌شده است. پدیده‌هایی مانند خشک‌سالی‌های گسترده، سیل‌های ویران‌گر، آتش‌سوزی و همچنین گرد و غبار در مقیاس بزرگ، بخشی از پیامدهای تغییر اقلیم است (ولایت‌زاده ۲۰۲۰). طوفان‌های گرد و غبار از پدیده‌های متداول در بسیاری از نقاط جهان است که خطرهای جدی برای محیط‌زیست، اقتصاد و بهداشت به‌همراه دارد. رخداد پدیدهٔ گرد و غبار عمدتاً در قلمروهای اقلیمی خشک و نیمه‌خشک مشاهده می‌شود. این پدیده همبستگی خطی و مستقیمی با متغیرهای اقلیمی دارد و امروزه با قبول رخداد تغییر اقلیم، انتظار می‌رود فراوانی و شدت طوفان‌های گرد و غبار در اکثر کشورهای که در کمربند نیمه‌خشک هستند، افزایش یابد.

ایران به‌دلیل قرار گرفتن در کمربند خشک و نیمه‌خشک در معرض ساختارهای پرشمار گرد و غبار محلی و فرامحلی است (راشکی و همکاران ۲۱۳). همچنین، در چند سال اخیر، طوفان‌های گرد و غبار به‌شکل بحرانی جدی استان‌های کشور را درگیرکرده است و پیامدهای خطرناکی را در زمینه‌های زیست محیطی، بهداشتی و اقتصادی برای ساکنان این استان‌ها به‌وجود آورده است (کریمی و همکاران ۲۰۱۱).

بررسی داده‌های مشاهده‌ای مجموع سالانهٔ بارش در ایستگاه هواشناسی مهاباد در بازهٔ زمانی (۱۹۸۷-۲۰۱۹) نشان داد که روند این داده‌ها افزایشی یا کاهشی معنی‌دار نبود ولی بر اساس دمای سالانه و تغییرات سرعت باد، روند این داده‌ها افزایشی بود. همچنین، روند تعداد روزهای همراه با گرد و غبار نیز افزایشی بود.

با بررسی‌های انجام‌شده در سطح استان آذربایجان‌غربی، مناطقی که تپه ماسه‌ای شاخص داشته باشند و یا در حال تشکیل باشند، تاکنون گزارش‌نشده است. ولی در بازدیدهای میدانی از ساحل دریاچهٔ ارومیه و در محدوده شهرستان مهاباد، نشانه‌های کوچکی از شکل‌گیری تپه‌های ماسه‌ای دیده شد که یک سال بعد به‌دلیل بودن قرار گرفتن در محدودهٔ تغییرات سالانهٔ سطح آب دریاچه و جریان آب از اطراف ساحل، از بین رفتند. ازاین‌رو، به‌دلیل نبودن تپه ماسه‌ای و شکل‌گیری آن در سطح استان، فقط ایستگاه هواشناسی مهاباد از نظر وضعیت باد و شاخص لنکستر بررسی شد. شاخص لنکستر برای ایستگاه همدید مهاباد در تمام سال‌های آماری وضعیت غیرفعال را نشان داد. همچنین، در تمام سال‌های بررسی‌شده، تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای موجود در منطقه کمتر از ۵۰ بود که بیانگر وضعیت غیرفعال است.

بر اساس تحلیل حساسیت سنجه‌های اقلیمی مؤثر بر تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای در قالب شاخص لنکستر، میان شاخص لنکستر با درصد بادهای با سرعت بیشتر از حد آستانهٔ فرسایش و اندازهٔ تبخیر و تعرق، رابطهٔ مستقیم بود و با اندازهٔ بارش، رابطهٔ عکس بود. نرخ تغییرات شاخص لنکستر نسبت به افزایش یا کاهش درصد بادهای با سرعت بیشتر از حد آستانهٔ فرسایش در منطقهٔ مهاباد به یک اندازه بود. آهنگ تغییرات تحرک تپه‌های ماسه‌ای منطقهٔ مهاباد نسبت به افزایش یا کاهش اندازهٔ تبخیر و تعرق بالقوه منطقه نیز تقریباً یکسان بود. اما، کاهش تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای با کاهش اندازهٔ تبخیر و تعرق بالقوه بیشتر از نرخ افزایش آن در حالت افزایش تبخیر و تعرق بالقوه بود (شکل ۹). بر مبنای تقسیم‌بندی شاخص یونپ، تمام ایستگاه‌های هواشناسی استان در وضعیت نیمه‌خشک تا مرطوب بودند. بر این اساس، مناطق جنوبی استان نیمه‌مرطوب تا مرطوب بود در حالی که، مناطق مرکزی و شمالی استان نیمه‌خشک و در طبقهٔ خطر شدید بودند. در این بررسی، منطقهٔ مهاباد نیز با خطر متوسط بیابان‌زایی و نیمه‌مرطوب مواجه بود که خطر بیابان‌زایی آن را تهدید می‌کند. بررسی‌های انجام‌شده در مناطق گوناگون کشور و حتی کشورهای خارجی بیانگر نبودن شرایط مشابه با منطقهٔ مطالعه‌شده (منطقه مهاباد) است و دلیل آن شدت کم تبخیر و تعرق و همچنین، بارندگی مناسب است که شرایط را برای تشکیل تپه ماسه‌ای از بین برده است. ولی بر مبنای شاخص یونپ، منطقه با بیابان‌زایی مواجه است که با ادامه روند موجود و تشدید فعالیت‌های ویرانگر انسانی و تشدید گرد و غبار، احتمال تشکیل تپه ماسه‌ای بعید به‌نظر نمی‌رسد.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش، از طریق مکاتبه با نویسندهٔ مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

نویسندهٔ اول: مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/ آماری، نگارش نسخهٔ اولیهٔ مقاله.

نویسندهٔ دوم: مشاوره، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج.

فهرست منابع

effects of climate change on the mobility of sand dunes (Case study: Sabzevar City). Desert Management. 9(2):1-18. (InPersian). https://doi.org/10.22034/jdmal.2021.246296

Nosrati K. 2014. Assessment of standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) for drought identification in different climates of Iran. Environmental Sciences. 12(4): 63-74. (In Persian).

Rahi G, Bahreini F, Khosroshahi M. 2022. Monitoring and predicting the effect of climatic factors on sand-mobility using Lancaster Index: A case study of dayer, Bushehr Province. Desert Ecosystem Engineering. 11(36): 41-54. (In Persian).https://doi.org/10.22052/deej.2021.11.36.41

Rashki A, Kaskaoutis DG, Goudie AS, Kahn RA. 2013. Dryness of ephemeral lakes and consequences for dust activity: The case of the Hamoun Drainage Basin, southeastern Iran. Science of the Total Environment. 463-464: 552-564.
https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.06.045

Sarnthein M. 1978. Sand deserts during glacial maximum and climatic optimum. Nature. 272(5648):43-46.
https://doi.org/10.1038/272043a0.

Tsoar H, Møller JT. 2020. The role of vegetation in the formation of linear sand dunes. Aeolian Geomorphology. pp. 75-96 .

Velayatzadeh M. 2020. Introducing the causes, origins and effects of dust in Iran. Journal of Air Pollution and Health. 5(1): 63-70.

Yousefi Mobarhan E, Ghodrati M, Khosroshahi M. 2021. Monitoring and forecasting of effective climatic factors on the mobility of sand dunes in Semnan Province. Journal of Water and Soil Resources Conservation. 10(4): 127-142. (In Persian). https://doi.org/10.30495/wsrcj.2021.

Chepil WS, Siddoway FH, Armbrust DV. 1962. Climatic factor for estimating wind erodibility of farm fields. Journal of Soil and Water Conservation. 17(4): 162-165.

Chepil WS, Woodruff NP. 1963. The physics of wind erosion and its control. Advances an Agronomy.15:211-302.
https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60400-9

Hanifehpour M, Biabani L, Khosravi H, Akbarpour-Bonab B. 2022. Monitoring and prediction of climatic factors affecting the mobility of sand dunes using the Lancaster Index (Case study: Sirjan Desert). Geographical Studies of Dry Areas. 48(13): 1-20. (In Persian). https://doi.org/10.22034/jargs.2023.373929.0

Houghton JT, Ding YDJG, Griggs DJ. 2001. Climate change 2001. The scientific basis. Cambridge: Cambridge university press. 881 (9).

Hunter RE, Richmond BM, Rho Alpha TAU. 1983. Storm-controlled oblique dunes of the Oregon Coast. Geological Society of America Bulletin.94(12):1450-1465.
https://doi.org/10.1130/0016-7606(1983)94%3C1450:SODOTO%3E2.0.CO;2

Karimi V, Karami E, Keshavarz M. 2018. Climate change and agriculture: Impacts and adaptive responses in Iran. Journal of Integrative Agriculture.17(1):1-15.
https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61794-5

Lancaster, N. 1988. Development of linear dunes in the southwestern Kalahari, southern Africa. Journal of Arid Environs. 14: 233–244.

Lauenroth WK, In Perspective in Grassland Ecology, edited by N. French, Springer-Verlag, New York.

McTainsh GH, Lynch AW, Burgess RC. 1990. Wind erosion in eastern Australia. Soil Research. 28(2):323-339.
https://doi.org/10.1071/SR9900323

Naemi M, Zandifar S, Khosroshahi M, Ashoori P, Abbasi H. 2021. Investigating the

Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

Watershed Management Research

ISSN: 2981- 2038

Agricultural Research, Education and Extension Organization

The Effect of Changes in Climate parameters on the Mobility and Stability of Sand Dunes in the Watershed of Lake Urmia - Mahabad Station

Ahmad Najafi Igdir [1*], Alireza Majidi [2]

1- Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, West Azerbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Urmia, Iran

2- Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Research Institute, AREEO, Tehran, Iran

Extended Abstract

Introduction and Goal

Sand dunes with their unique system can be mobile or stable, and the main factor influencing their stability is the presence of vegetation cover. The unique characteristics of sand dunes and their high hydraulic conductivity increase the rate of rainwater infiltration. With the drying of sand particles and the loss of cohesion between grains, weak vegetation and wind erosion will occur. Considering the new climatic conditions prevailing in the areas surrounding Urmia Lake, the aim of this research is to identify and examine the new sand dunes and their movement trends in these regions. Therefore, due to the absence and their formation at the provincial level, only the Mahabad meteorological station was examined regarding wind conditions and the Lancaster index.

Research materials and Methods

In this research, to examine the effect of climate changes (wind and precipitation) on sand activity and to predict the likelihood of mobility of sand dunes and sand fields, as well as the dust generated from them, the global Lancaster method was used. Based on the Lancaster index, the relationship between sand mobility and climatic variables was modeled. Then, sand and dust particles move following winds with speeds exceeding the erosion threshold, which has an inverse relationship with effective precipitation. Therefore, the necessary data including precipitation statistics, temperature, wind, and relative humidity of the Mahabad station were obtained from the Provincial Meteorological Organization. Also, in order to determine dry and wet years and their effects on the increase or decrease of dust days, the SPEI index was used. Potential evapotranspiration, frequency, and continuity of meteorological droughts can be calculated using the SPEI index. To determine the climatic status and the risk of desertification, the aridity index (AI) was used. Considering the precipitation and potential evapotranspiration measurements, the aridity index was calculated using the Torrent-White method, and the desertification status of the region was determined according to the UNEP classification. This index is an effective tool for determining the climatic status and desertification risk of various regions.

Article Type: Research Article
*Corresponding Author E-mail: homanh45@gmail.com
Citation: Najafi Igdir, A., Majidi, A.R. 2024. The Effect of Changes in Climate Parameters on the Mobility and Stability of Sand Dunes in the Watershed of Lake Urmia - Mahabad Station. Watershed Management Research. 38(1): 61-77.
DOI: 10.22092/WMRJ.2024.364663.1568
Received: 13 January 2024, **received in revised form:** 21 January 2024, **Accepted:** 18 March 2024
Published online: 01 January 2025
Watershed Management Research, Vol. 38, No.1, Ser. No:146, spring 2025, pp. 61-77.
Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center
©Author(s)

Results and Discussion

In this research, using the SPEI index, data on potential evapotranspiration, frequency, and duration of meteorological drought events were collected. The results showed that the total potential evapotranspiration at the Mahabad station was 755.98 mm per year, with an increasing trend. About 84% of the winds recorded in this station have a speed of less than 6 m per second. Meanwhile, the concentration of the strongest observed winds is in the months of (Mar), (Feb) and (Apr) with 12.1, 11.2 and 10.1 percent, respectively. Additionally, 27% of the prevailing winds had speeds between 6 to 10 meters per second, while less than 1% of the prevailing winds had speeds between 10 to 12 meters per second. According to the Lancaster index, the mobility of the existing sand dunes in the area over a 33-year period was less than 50, indicating that their status was inactive. The relationship between the Lancaster index and the percentage of winds exceeding the erosion threshold was direct, while it was inverse with the amount of precipitation. In the Mahabad region, the rate of changes in the Lancaster index in relation to the increase or decrease in the percentage of winds exceeding the erosion threshold was equal. The mobility of the sand dunes is a function of changes in potential evapotranspiration in the area and has a direct relationship with it. Therefore, with an increase in potential evapotranspiration, mobility also increases. The aridity index obtained, according to the classification provided by UNEP, showed that all meteorological stations in the province are in a semi-arid to humid status. Consequently, the Mahabad region faces a medium risk of desertification, which threatens its semi-humid status.

Conclusion and Suggestions

Based on the studies conducted in West Azerbaijan Province, areas with significant sand dunes or those currently forming have not been reported so far. However, during visits to the shores of Lake Urmia and within the boundaries of Mahabad County, small signs of sand dune formation were observed, which disappeared a year later due to being within the range of annual water level fluctuations of the lake and the flow of water from the surrounding shore. In this study, while recognizing the trend of changes in climatic elements and the correlation between these factors as independent variables, the possible effects of climate change on the dust phenomenon and the mobility of existing sand dunes have been investigated. In all statistical years, the mobility of existing sand dunes in the region was less than 50 and the Lancaster index obtained for the Mahabad synoptic station showed an inactive state. Also, based on the sensitivity analysis of the Lancaster index, the decrease in the mobility of sand dunes with a decrease in the potential evapotranspiration was greater than the rate of increase in mobility under conditions of increased potential evapotranspiration. Based on the UNEP index classification, the Mahabad region has a semi-humid aridity index with the lowest level of evapotranspiration, facing a medium risk of desertification. Therefore, considering the prevailing climatic conditions, it is recommended to be extremely careful and sensitive in land use and to use optimal irrigation methods in agriculture and drinking.

Keywords: Climate change, Lancaster index, Sand Dunes, Standard index of precipitation-evapotranspiration potential

Article Type: The Effect of Changes in Climate parameters on the Mobility and Stability of Sand Dunes in the Watershed of Lake Urmia - Mahabad Station.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' Contribution

Ahmad Najafi Igdir 1: Conceptualization, software/statistical analyses, writing the first draft of the article. Alireza Majidi 2: Consulting, editing and reviewing the article, control of result.