

## **Investigating the Effects of Climate Change on the Mobility of Sand Dunes (Case study: Sabzevar City)**

M. Naeimi<sup>1\*</sup>, S. Zandifar<sup>1</sup>, M. Khosroshahi<sup>1</sup>, P. Ashouri<sup>2</sup>, H. R. Abbasi<sup>1</sup>

1. Faculty member of Desert Research Department, Research Institute of Forests and Rangelands, AREEO, Tehran.
2. Faculty member of Range Research Department, Research Institute of Forests and Rangelands, AREEO, Tehran.

\* Corresponding Author: naeimi@rifr-ac.ir

Received date: 07/10/2020

Accepted date: 31/12/2020

### **Abstract**

Sand dunes are one of the most dynamic geomorphic features of the earth's surface. Accordingly, identifying the factors affecting the mobility of sands and predicting their future status is essential to control dust. The study area was selected due to the location of Sabzevar city in the busiest railway line of the country, and the condition of sand dunes around this city. For this purpose, after calculating the percentage of erosive winds and drought index, the Lancaster index based on the average annual rainfall ratio and annual potential evapotranspiration for the period of 1990-2016 was calculated for analysis of sand dunes' mobility status. To predict the effect of climate change on the mobility of sand dunes, a sensitivity analysis test was carried out. The results show that the values of the Lancaster index in this station did not show the inactive status in this span time period. The results of the analysis of the relationship between drought index and mobility of sand dunes show a significant effect of drought on the mobility and activity of sand dunes. Finally, the results of sensitivity analysis showed that if the frequency of erosive winds and evapotranspiration potential increases by 30%, the activity of sand dunes in the Sabzevar station will increase by 38%. Also, due to the potential of solid particles in creating dust, the location of sand dunes, and the study of local dust at Sabzevar station, the priority is to stabilize the hills located in the east of the study area.

**Keywords:** Lancaster index; Climatic factors; Sensitivity Analysis; Wind erosion



## بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر تحرک پذیری تپه‌های ماسه‌ای در شهرستان سبزوار

مریم نعیمی<sup>۱\*</sup>، سمیرا زندی‌فر<sup>۱</sup>، محمد خسروشاهی<sup>۱</sup>، پروانه عشوری<sup>۲</sup>، حمیدرضا عباسی<sup>۱</sup>

۱. عضو هیأت علمی بخش بیابان، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.

۲. عضو هیأت علمی بخش مرتع، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.

\* نویسنده مسئول: [naeimi@rifr-ac.ir](mailto:naeimi@rifr-ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۱۱

### چکیده

تپه‌های ماسه‌ای از پویاترین عارضه‌های ژئومورفیک سطح زمین به شمار می‌روند. براین اساس، شناسایی عوامل مؤثر بر تحرک پذیری و پیش‌بینی وضعیت آن‌ها در آینده، به منظور کنترل فرسایش بادی ضروری است. با توجه به قرارگیری شهرستان سبزوار در مسیر پرتددترین خط‌آهن کشور و وجود تپه‌های ماسه‌ای در اطراف این شهرستان، این محدوده برای پژوهش حاضر انتخاب شد. بدین منظور، پس از محاسبه درصد فراوانی بادهای فرسایش‌زا و شاخص خشکی، با بهره‌گیری از شاخص لنکستر بر پایه نسبت میانگین بارندگی سالانه و تبخیر و تعرق پتانسیل سالانه، وضعیت تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای در دوره آماری ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۶ تحلیل شد. در ادامه، به منظور پیش‌بینی اثر تغییر اقلیم بر تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای از آزمون تحلیل حساسیت استفاده شد. مقادیر شاخص لنکستر در این ایستگاه وضعیت غیرفعال را در دوره آماری مورد بررسی نشان نداده است. بررسی ارتباط میان شاخص خشکی و تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای نشان گر تأثیر معنی دار خشکی بر میزان تحرک و فعالیت تپه‌های ماسه‌ای است. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که در صورت افزایش فراوانی بادهای فرساینده و تبخیر تعرق پتانسیل به مقدار ۳۰٪، فعالیت تپه‌های ماسه‌ای در ایستگاه سبزوار ۳۸٪ افزایش خواهد یافت. همچنین، با توجه به ظرفیت ذرات جامد در ایجاد گردوغبار، مکان قرارگیری تپه‌های ماسه‌ای و بررسی گل‌غبارهای محلی در ایستگاه سبزوار، اولویت تثبیت با تپه‌های واقع در شرق منطقه مطالعاتی است.

واژگان کلیدی: واژگان کلیدی: شاخص لنکستر، عوامل اقلیمی، تحلیل حساسیت، فرسایش بادی

## ■ مقدمه

تپه‌های ماسه‌ای نهشته‌ای از ماسه‌های متفاوت، به لحاظ شکل و اندازه، هستند که توسط باد ساخته می‌شوند (۴۲). آغاز فعالیت مجدد تپه‌های ماسه‌ای تثبیت‌شده یا نیمه‌تثبیت‌شده یکی از فرآیندهای اصلی بیابان‌زایی است که به تغییرات اقلیم حساس است (۵۳). جایجایی تپه‌های ماسه‌ای در طول زمان بر اثر ویژگی‌های سرعت، جهت و فراوانی باد و ویژگی‌های سطح زمین و مواد رسوب (۲، ۱۹ و ۲۶) است.

جایجایی این عارضه‌های ژئومورفیک خطرات بسیاری برای اکوسیستم‌های شکننده مناطق خشک و بیابانی و همچنین سکونتگاه‌ها، تأسیسات و به تبع آن اقتصاد و جوامع مقیم این مناطق به همراه دارند (۳۳). هر ساله بر اثر تحرک تپه‌های ماسه‌ای در اقلیم خشک و نیمه‌خشک میلیون‌ها تن گردوغبار در هوا پراکنده می‌شود (۳۷ و ۵۰). براین‌اساس، ذرات تپه‌های ماسه‌ای بخشی از دانه‌بندی ذره‌ای گردوغبار را تشکیل می‌دهد. مطالعات نشان می‌دهد که پس از یک توفان ذرات، بسته به اندازه قطرشان در هوا معلق و ماندگار می‌مانند (۴۳). این در حالی است که بسته به هدف مطالعات، که ممکن است تثبیت خاک یا بررسی اثرات آن بر سلامت باشد، دانه‌بندی ذرات با استفاده از تونل باد (۳۵) یا نمونه‌بردارها (۴۳) مورد تحلیل و بررسی قرار خواهد گرفت.

فراوانی رخداد‌های گردوغبار در بیشتر مناطق ایران (۲۰ و ۳۲)، به ویژه در جنوب‌شرقی استان سمنان، شمال‌غرب استان یزد و شمال‌شرق اصفهان (۴۰)، نواحی جنوبی و جنوب‌شرقی ایران (۸) و همچنین در شهرهای اهواز و کرمانشاه (۳۹) در سال‌های اخیر افزایش قابل توجهی داشته است. روند صعودی پدیده گردوغبار موجب شده تا پیامدهای آن بر محیط‌زیست (۱۲)، سلامت (۴۰) و تأسیسات زیربنایی همچون ریل‌های راه‌آهن (۲۱) گزارش شود. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که حرکت ماسه‌های روان بیش از ۷۵ عارضه نامطلوب در صنعت راه‌آهن ایجاد می‌کند؛ از جمله آن‌ها می‌توان بخش‌های نگهداری خطوط، مسدود شدن خطوط، کاهش سرعت سیر

و خسارت سرد شدن لوکوموتیوها را برشمرد (۲۱). از دیگر خسارات ناشی از توفان‌های ماسه‌ای بر خطوط آهن می‌توان به طولانی شدن سیر قطار، خارج شدن احتمالی قطار از خط، آلوده شدن فضای داخل واگن‌ها، عدم آرامش مسافران، عدم جذب مسافر و کالا، به‌خطرافتادن سلامت مسافران و مأمورین، هزینه ماسه‌روبی، افزایش مانور به‌لحاظ شکستگی در آلات ناقله و واگن‌ها، کاهش سرعت سیر قطارها، باز شدن باربندی و کج شدن و از گاباریت خارج شدن بارها اشاره کرد (۲۱).

در این میان، شرایط هواشناسی از مهم‌ترین فاکتورها برای تعدیل توفان‌های گردوغبار است (۴۷ و ۵۱). بنابراین لازم است اثر اقلیم در فعالیت تپه‌های ماسه‌ای پایش شود و به‌منظور پیش‌بینی احتمال تحرک تپه‌های ماسه‌ای و تشدید گردوغبار در دهه‌های آینده مطالعات لازم صورت گیرد (۹).

تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای اخیراً با استفاده از مطالعات میدانی (۱ و ۴۸)، شاخص‌های گوناگون شامل لنکستر (۳۰)، توسوآر (۴۵) و توسعه‌یافته توسط یژاک (۵۲) و آزمایش‌های تونل بادی (۲۵) بررسی شده است. بررسی شاخص لنکستر و آنالیز داده‌های<sup>۱</sup>GCM در منطقه کالاهاری در جنوب آفریقا، نشان داد که به احتمال زیاد، تپه‌های موجود در این منطقه در پایان قرن حاضر دوباره فعال خواهند شد (۴۱). بررسی تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای بند ریگ بلند کاشان با استفاده از شاخص لنکستر نشان می‌دهد که در بیشتر مناطق، تپه‌های ماسه‌ای از نوع فعال‌اند و تنها بخش کوچکی در شمال و بخشی در جنوب آن، دارای تپه‌های ماسه‌ای بسیار فعال است (۵) و (۴۴). نتایج تحقیقات بر روی فعالیت تپه‌های ماسه‌ای واقع در صحرای تیکله مکان، در شمال چین<sup>۲</sup>، با استفاده از شاخص لنکستر، نشان می‌دهد که فعالیت این تپه‌ها در طول دوره ۱۹۶۰ زیاد بوده، ولی از اواسط ۱۹۸۰ تا اواخر ۱۹۹۰ کاهش یافته است (۴۹). بررسی تغییرات زمانی - مکانی تپه‌های ساحلی ماسه‌ای در منطقه غرب کنارک در جنوب استان سیستان و بلوچستان نشان می‌دهد که این

شناخته می‌شود (۵۳). براین اساس، هدف پژوهش حاضر تحلیل شرایط فعلی و پیش‌بینی تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای با بررسی تغییرات اقلیمی در غرب استان خراسان رضوی است. ضرورت پیش‌بینی تحرک تپه‌های ماسه‌ای در این استان به دلیل فرارگیری پرترددترین جاده دسترسی منتهی به مشهد و اهمیت سلامت افراد در افزایش کیفیت هواست. براین اساس، درک نحوه تغییر و تحول آن‌ها در آینده نقش حیاتی در درک محیط و تغییرات محیطی این مناطق دارد.

## ■ مواد و روش‌ها

### منطقه مورد بررسی

منطقه مطالعاتی پژوهش حاضر شامل تپه‌های ماسه‌ای نزدیک به خط ریل آهن سبزوار-مشهد، واقع در غرب استان خراسان رضوی است (شکل ۱). ایستگاه‌های راه‌آهن سبزوار و نیشابور در امتداد تپه‌های ماسه‌ای با نام‌های خارتوران و عشق‌آباد قرار گرفته است. بررسی نتایج شمارش تعداد روزهای گردوغبار در دو ایستگاه سینوپتیک نیشابور و سبزوار نشان داد که به ترتیب تعداد ۱۷۶ و ۴۷۲ روز در کل دوره آماری ۲۷ ساله ثبت شده است. نظر به تعداد بیشتر روزهای همراه با رخداد گردوغبار در ایستگاه سبزوار، در ادامه بررسی عوامل اقلیمی مؤثر و پیش‌بینی شرایط در آینده صورت خواهد گرفت. گفتنی است فاصله ایستگاه سینوپتیک سبزوار تا تپه‌های ماسه‌ای خارتوران و عشق‌آباد به ترتیب ۴۷ km و ۷۰ km است. این در حالی است که ایستگاه سینوپتیک سبزوار در فاصله ۴۰ km از ریل‌آهن سبزوار-مشهد قرار گرفته است. ارتفاع، بارش و دمای میانگین روزانه (ایستگاه سبزوار) به ترتیب ۹۷۲ mm، ۱۷۴ و ۱۸/۲۹°C است و براساس روش اقلیمی دومارتن در منطقه خشک و بیابانی قرار می‌گیرد.

تپه‌های ماسه‌ای خارتوران با وسعت ۷۴۹۳۹ ha در جنوب‌غربی سبزوار در مختصات جغرافیایی ۵۹° ۵۶' طول شرقی و ۵۳° ۳۵' عرض شمالی واقع شده است. تپه‌های ماسه‌ای نیشابور-عشق‌آباد با وسعت ۱۴۴۰۴ ha در جنوب‌غربی نیشابور و جنوب‌شرقی سبزوار در مختصات جغرافیایی ۴۳° ۵۸' طول شرقی و ۳۵° ۵۸' عرض شمالی

تپه‌ها در طول سال‌های ۲۰۱۴-۱۹۹۱ تغییرات و جابجایی معادل ۱۷/۲٪ داشته‌اند (۲۸).

محققین با مطالعه روند طوفان‌های گردوغبار فلات تبت به این نتیجه رسیدند که طوفان‌های گردوغبار از دهه ۱۹۷۰ روند کاهشی داشته و کاهش سرعت بادهای سطح زمین، عامل مهمی در کاهش وقوع گردوغبار در منطقه بوده است (۲۷). بررسی علل روند تغییرات طوفان‌های گردوغبار ایران در دوره زمانی ۱۳۸۴-۱۳۶۴ در ۱۱۲ ایستگاه هواشناسی نشان می‌دهد که تعداد روزهای کل غبارناکی به ترتیب با تبخیر و تعرق، دما و بارش همبستگی دارد، ولی با ژئومورفولوژی و ارتفاع همبستگی ندارند (۳۴). بررسی آماری متغیرهای هواشناسی بر تحرک و ثبات تپه‌های ماسه‌ای ساحلی در شرق ایالت آیداهو آمریکا نشان داد که ۲۴٪ از مهاجرت تپه‌های شنی به دما، بارندگی و سرعت باد ارتباط دارد (۲۳). با مطالعه اثر رطوبت نسبی بر غلظت گردوغبار اتمسفری در نواحی نیمه‌خشک نتیجه گرفته شد که غلظت گردوغبار با افزایش رطوبت نسبی حداکثر تا ۲۵٪ افزایش و سپس کاهش می‌یابد (۱۵). مطالعات پیشین نشان می‌دهند که تغییر شرایط اقلیمی در عناصر بارندگی و سرعت باد منجر به تغییرات معنی‌داری در شاخص طوفان گردوغبار در مناطق خشک ایران مرکزی شده است (۱).

در این میان، استان خراسان رضوی دارای آب و هوای خشک و نیمه خشک است که در برخی سال‌ها بیش از ۷۰ رخداد گردوغبار در آن ثبت می‌شود. بررسی روند تغییرات نزدیک به سه دهه شاخص‌های اقلیمی در شهرستان‌های غرب استان خراسان رضوی نشان می‌دهد که با مساعد شدن شرایط اقلیمی برای افزایش گردوغبار، روند تغییرات DSI و روزهای با دید افقی کمتر از ۲۰۰ m در طول دوره مطالعاتی افزایشی بوده است (۳۶). تعداد زیاد گردوغبار در این منطقه نشان از برداشت زیاد در سطح استان دارد (۱۱) و اهمیت پژوهش در این زمینه را نشان می‌دهد. از دیدگاه مهندسی محیط‌زیست هر نوع تغییر ناشی از دخالت انسان بر شاخص‌های اقلیمی در سطح جهانی، منطقه‌ای و محلی، مانند افزایش دما یا کاهش بارندگی در بازه زمانی مشخص که منجر به تغییرات محیط‌زیستی، از جمله گسترش بیابان‌ها و افزایش گردوغبار، شود به‌عنوان تغییر اقلیم

واقع شده است. خصوصیات کلی این مجموعه شامل انواع تپه‌های ماسه‌ای است.

دانه‌بندی با سه تکرار در آزمایشگاه مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع انجام شد.

### روش پژوهش

#### داده‌های پژوهش

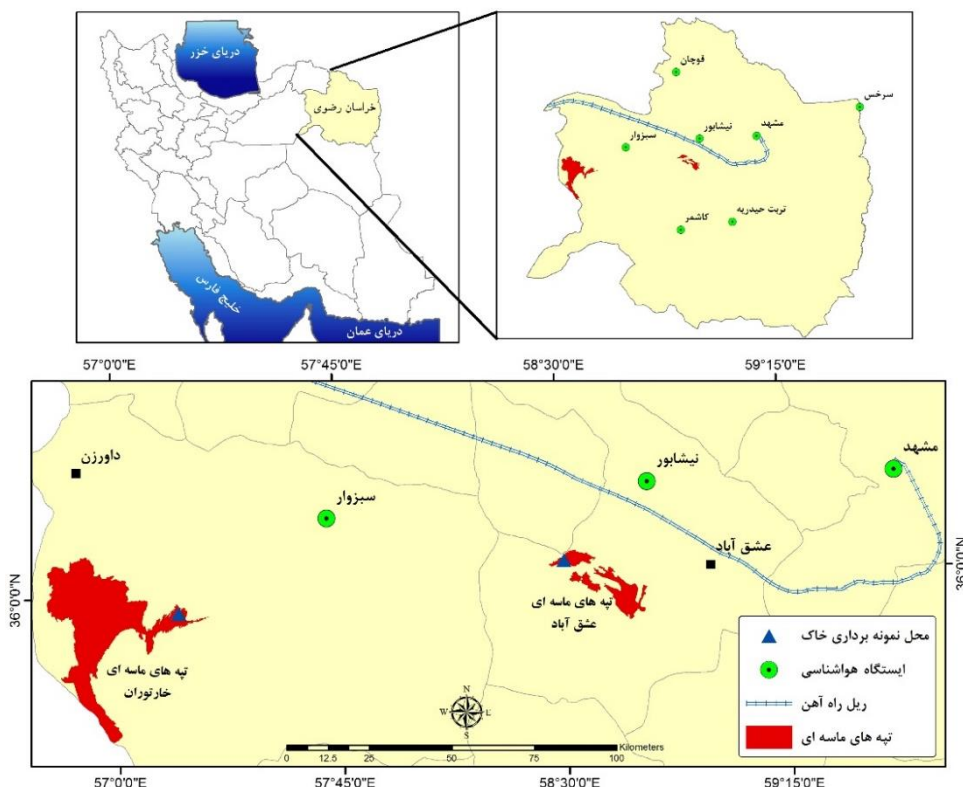
در پژوهش حاضر از داده‌های هواشناسی موجود مربوط به ایستگاه سینوپتیک سبزوار در بازه زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۶ استفاده شده است. این داده‌ها شامل مقادیر متوسط ماهیانه بارندگی، دما، سرعت بادهای سطحی، حداکثر سرعت باد، رطوبت نسبی و داده‌های ساعتی مربوط به میدان دید افقی و کد مربوط به پدیده‌های مختلف گردوغبارند.

فرض پژوهش حاضر اثرات تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای تحت تأثیر تغییر اقلیم در افزایش رخداد‌های گردوغبار بوده که براین اساس دانه‌بندی تپه‌های ماسه‌ای منطقه مطالعاتی به منظور تعیین پتانسیل ایجاد گردوغبار مورد مطالعه در ابتدا بررسی شد. براین اساس، نمونه‌های خاک (شکل ۱) از تپه‌های ماسه‌ای برداشت شده و آزمایش

### تحلیل شرایط اقلیمی منطقه مطالعاتی

به منظور درک تأثیر تغییر اقلیم بر ایجاد و تشدید پدیده گردوغبار به بررسی ارتباط میان تغییر شاخص‌های اقلیمی مورد مطالعه پرداخته شد (شکل ۲). براین اساس، در مرحله نخست براساس کدهای هواشناسی ثبت شده برای رخداد‌های گردوغبار داخلی شامل ۷ تا ۹ و ۳۰ تا ۳۵ (۴۷)، روزهای توأم با گردوغبار از سایر پدیده‌های هواشناسی تفکیک و مقدار متوسط این متغیر در مقیاس‌های زمانی ماهیانه، فصلی و سالیانه محاسبه شد.

در مرحله دوم، ارتباط تعداد روزهای غبارآلود در ایستگاه سبزوار با شاخص‌های اقلیمی شامل دمای متوسط، دمای حداقل، دمای حداکثر، بارندگی، رطوبت نسبی، تبخیر و تعرق پتانسیل، متوسط سرعت باد، فراوانی بادهای فرساینده در مقیاس ماهانه، فصلی و سالانه در کل دوره آماری و همچنین به دلیل اهمیت بیشتر در دهه آخر معادل سال‌های ۲۰۱۶-۲۰۰۷ مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی تپه‌های ماسه‌ای اطراف شهرستان سبزوار

در نهایت، با استفاده از روش‌های تجزیه و تحلیل رژیم بادی گلباد، سمت سرعت، فراوانی بادهای بیش از  $0.5 \text{ m/s}$  در جهات مختلف نشان داده شد. علاوه بر این، جهت وزش بادهای غالب منطقه نیز ارائه شد. تعیین جهت بادهای غبارآلود محلی، با استفاده از داده‌های ساعتی مربوط به سرعت و جهت باد در ساعات غبارآلود محلی صورت گرفت. درحالی‌که برای تعیین جهت بادهای فرامحلی از داده‌های مربوط به کد  $0.6$  استفاده شد که بیانگر گردوغبارهای نشأت گرفته از خارج ایستگاه است. پس از آماده‌سازی داده‌ها، با استفاده از نرم‌افزار WRPLOT نقشه گل‌غبارهای منطقه مطالعاتی تهیه شد (۳۸).

### بررسی تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای و ارتباط آن با شاخص خشکی<sup>۱</sup>

به منظور بررسی اثر تغییر اقلیم بر تحرک‌پذیری ماسه‌ها از روش لنکستر (۳۰) استفاده شد. اساس این شاخص دو فاکتور: (۱) درجه بادخیزی و (۲) رشد پوشش گیاهی بودند که به صورت نسبت بین متوسط بارندگی سالانه و تبخیر و تعرق پتانسیل سالانه بیان شد که به آن بارندگی مؤثر اطلاق شد.

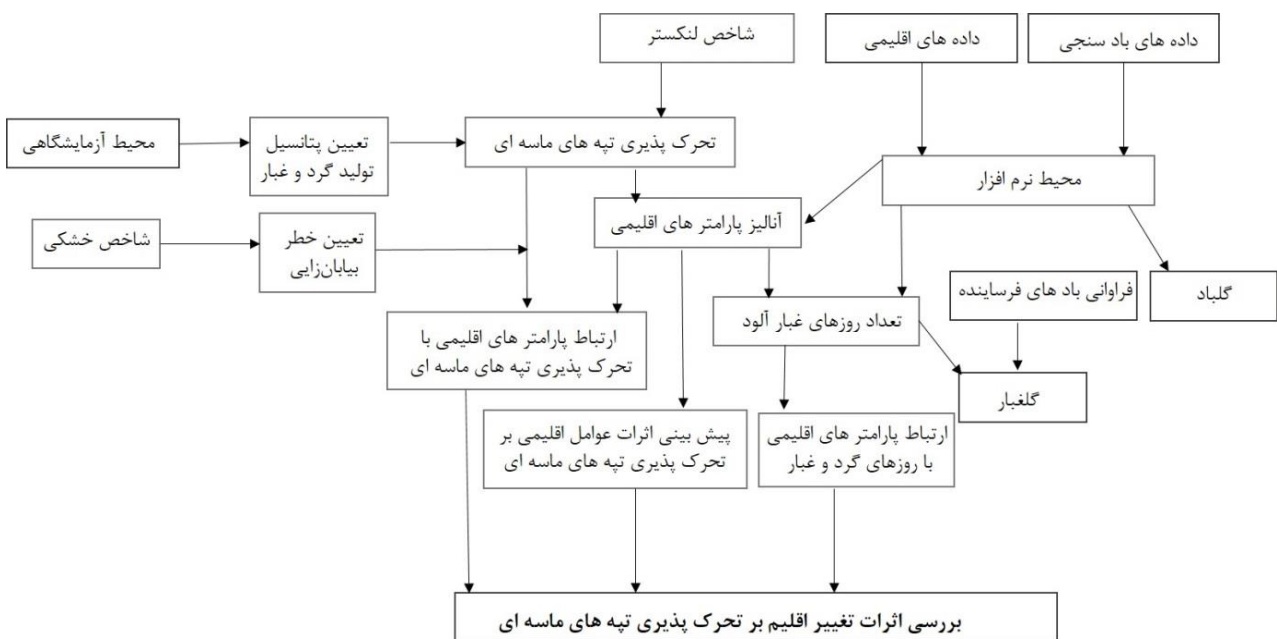
در ادامه، به منظور بررسی فراوانی بادهای فرساینده، در نظر گرفتن سرعت آستانه فرسایش بادی ارائه شده برای تپه‌های ماسه‌ای معادل  $6 \text{ m/s}$ ، که بادهای فرساینده نامیده شده است، تعداد بادهای با سرعت کمتر از  $6 \text{ m/s}$ ،  $7$  تا  $11$ ،  $15$  تا  $20$ ، بیشتر از  $20 \text{ m/s}$  و همچنین تعداد کل بادهای با سرعت بیشتر از  $6 \text{ m/s}$  با توجه به رابطه ۱ محاسبه شد.

$$Fwsi = \frac{f_i}{n} \times 100 \quad (1)$$

در رابطه مذکور،  $Fwsi$  درصد فراوانی بادهای  $f_i$  فراوانی بادهای در طبقه مورد نظر و  $n$  نیز تعداد کل بادهای را نشان می‌دهد. در ادامه، درصد فراوانی طبقات گوناگون سرعت باد برای آن مقیاس زمانی ماهیانه و سالیانه طبق رابطه ۲ محاسبه شد.

$$Fw = \frac{Fwsi}{n} \quad (2)$$

در رابطه ۲،  $Fw$  درصد فراوانی طبقات گوناگون سرعت باد،  $Fwsi$  درصد فراوانی بادهای برای هر طبقه و  $n$  تعداد کل بادهای در مقیاس زمانی مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۲. روندنمای مراحل انجام پژوهش

در این رابطه:  $Alu$ ، شاخص خشکی،  $P$ ، بارندگی و  $PET$ ، تبخیر و تعرق پتانسیل است. شاخص خشکی به عنوان روشی مؤثر برای تعیین وضعیت اقلیمی و خطر بیابان‌زایی کاربرد دارد. با توجه به اینکه تغییرات آب و هوایی بر تحرک‌پذیری ماسه‌ها تأثیرگذار بوده و این عوامل در روند بیابان‌زایی یک منطقه منعکس می‌شوند، لذا در این بخش به بررسی رابطه شاخص خشکی و پتانسیل تحرک‌پذیری ماسه‌ها پرداخته شد. همچنین خطر بیابان‌زایی منطقه طبق طبقه‌بندی شاخص خشکی که در (جدول ۲) ارائه شده، در بازه‌های زمانی مورد نظر بررسی شد.

در نهایت، به منظور بررسی ارتباط بین عناصر اقلیمی با تعداد روزهای غبارآلود و همچنین شاخص لنکستر از روش‌های آماری استفاده شد. روش‌های تعیین روند به دو دسته تقسیم می‌شوند: روش پارامتری و ناپارامتری. در این پژوهش از روش‌های پارامتری پیرسون استفاده شد. مقدار این ضریب بین ۱- تا ۱ تغییر می‌کند که بیشترین میزان به معنای همبستگی مثبت کامل، صفر به معنی نبود همبستگی، و کم‌ترین میزان به معنی همبستگی منفی کامل است.

در این مدل، میزان تحرک ماسه از رابطه ۳ تعیین شد.

$$M = W / (P/PET) \quad (3)$$

در این رابطه:  $M$ ، شاخص میزان تحرک‌پذیری رسوبات بادی،  $W$ ، درصد فراوانی بادهای با سرعت بیشتر از سرعت آستانه فرسایش معادل  $6 \text{ m/s}$ ، در ارتفاع  $10 \text{ m}$  از سطح زمین،  $P$ ، میانگین بارندگی سالیانه برحسب  $\text{mm}$ ،  $PET$ ، تبخیر و تعرق پتانسیل سالانه برحسب  $\text{mm}$  با استفاده از روش تورنت وایت محاسبه شد. شاخص  $M$  با روش لنکستر (رابطه ۲) محاسبه می‌شود (۱۸). در این روش با توجه به مقادیر محاسبه‌شده در رابطه ۳، شاخص حرکت تپه‌های ماسه‌ای  $M$  محاسبه و میزان فعالیت تپه‌های ماسه‌ای تعیین می‌شود (جدول ۱).

در ادامه، از شاخص خشکی یونپ<sup>۲</sup> کنوانسیون سازمان ملل متحد (۱۵) برای تعیین نوع اقلیم حاکم بر منطقه مطالعاتی و خطر بیابان‌زایی، با استفاده از رابطه ۳ استفاده شد.

$$Alu = P / PET \quad (4)$$

جدول ۱. مقادیر شاخص حرکت ماسه‌ای لنکستر

میزان فعالیت تپه‌های ماسه‌ای	مقدار عددی شاخص
غیرفعال	$M < 50$
فعال فقط در نوک تپه	$50 < M < 100$
فعال	$100 < M < 200$
کاملاً فعال	$200 < M$

جدول ۲. طبقه‌بندی اقلیمی براساس شاخص خشکی یونپ (۷)

خطر بیابان‌زایی	شاخص خشکی	نوع اقلیم
بیابان واقعی	$< 0.05$	فراخشک
بسیار شدید	$0.10 - 0.5/2$	خشک
شدید	$0.10 - 2/5$	نیمه‌خشک
متوسط	$0.10 - 5/65$	خشک نیمه‌مرطوب
کم	$0.10 - 65/75$	نیمه‌مرطوب
ندارد	$> 0.75$	مرطوب و بسیار مرطوب

و رخدادهای با منشأ فرامحلی از فراوانی ۷ برابر کمتر نسبت به وقایع محلی برخوردارند (شکل ۳). با توجه به شکل، بیشترین روزهای گردوغبار محلی و فرامحلی به ترتیب در سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۰۳ گزارش شده است. به منظور درک بهتر ارتباط داده‌های گردوغبار با مقادیر متوسط عوامل اقلیمی، نتایج تحلیل ضریب همبستگی در مقیاس ماهانه، فصلی و سالانه به ترتیب در کل دوره آماری و بازه زمانی دوم تفسیر شد (جدول‌های ۲ و ۳). نتایج تحلیل ضریب همبستگی داده‌های گردوغبار ماهانه، فصلی و سالانه در ایستگاه سبزواری نشان داد (جدول ۲) که تعداد روزهای غبارآلود در این ایستگاه طی کل دوره آماری رابطه معنی‌دار با تغییر پارامترهای اقلیمی دارد.

در مقیاس ماهانه، در بیش از نیمی از سال، بهمن تا مهر به استثنای تیر و شهریور، دو پارامتر سرعت باد و فراوانی بادهای فرساینده بیشترین تأثیر مستقیم بر وقایع گردوغبار را، در این زمان از سال، طی دوره آماری مورد بررسی نشان دادند. بررسی جزئی‌تر در مقیاس ماهانه در بازه زمانی دوم معادل ۲۰۱۶-۲۰۰۷ نشان داد که در ماه‌های اردیبهشت تا مرداد، دو پارامتر سرعت باد و بادهای فرساینده، از عوامل مؤثر در ایجاد وقایع گردوغبارند (جدول ۳). همچنین بررسی داده‌های فصلی طی کل دوره آماری نشان داد که وقوع گردوغبار در فصل زمستان و بهار ارتباط معناداری با پارامترهای سرعت باد، فراوانی بادهای فرساینده، رطوبت نسبی، دمای حداکثر و تبخیر و تعرق دارد (جدول ۳).

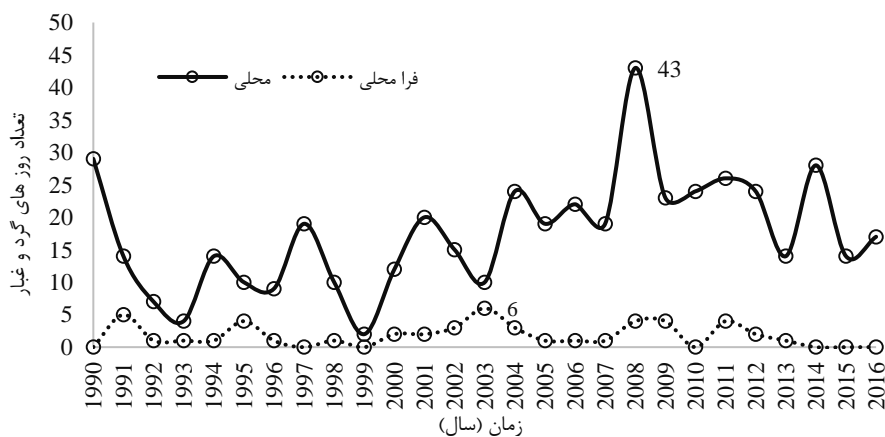
پیش‌بینی اثرات تغییر احتمالی عوامل اقلیمی بر تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای

با توجه به اثر عناصر اقلیمی در فعالیت تپه‌های ماسه‌ای و به‌منظور پیش‌بینی احتمال تحرک تپه‌های ماسه‌ای و تشدید گردوغبار در آینده، مطالعات اثر احتمالی تغییر عناصر اقلیمی بر تحرک‌پذیری ماسه‌ها به‌عنوان راهکار مدیریتی ارائه شد. بدین‌منظور، پس از محاسبه میزان فعالیت رسوبات بادی (رابطه ۱)، با استفاده از روش تحلیل حساسیت<sup>۱</sup>، مقدار تأثیرپذیری متغیرهای خروجی از متغیرهای ورودی مدل تعیین شد. در این روش متغیرهای بارندگی، تبخیر و تعرق و فراوانی بادهای فرساینده در دامنه ۳۰+ و ۳۰- درصد تغییر داده شد و تأثیر تغییرها بر مقدار شاخص حرکت ماسه محاسبه شد. براین‌اساس تأثیر کاهش یا افزایش متغیرهای یادشده بر وضعیت احتمالی تحرک ماسه در آینده مشخص شد. در روش تحلیل حساسیت با تغییر یک متغیر در دامنه مورد نظر، دیگر پارامترها باید بدون تغییر باشند، ولی با توجه به اینکه برخی از پارامترها، از جمله فراوانی بادهای فرساینده به‌طور قطع بر پارامتر تبخیر و تعرق اثرگذار خواهد بود بنابراین، تأثیر تغییر توأم این دو پارامتر نیز بر تحرک ماسه بررسی شد.

## نتایج و بحث

### تحلیل شرایط اقلیمی منطقه موردبررسی

نتایج شمارش کدهای گردوغبار نشان دادند که وقایع گردوغبار ثبت‌شده در ایستگاه مطالعاتی منشأ محلی دارد



شکل ۳. نتایج شمارش کدهای گردوغبار در ایستگاه سبزواری طی دوره آماری ۱۹۹۰-۲۰۱۶



در فصل پائیز نیز پارامتر متوسط سرعت باد به دلیل دارابودن ضریب همبستگی مثبت معنی دار تأثیر مستقیمی بر رخدادهای گردوغبار در این فصل دارد. درحالی که در فصل تابستان هیچ ارتباط قابل قبولی مابین داده‌های گردوغبار و پارامترهای اقلیمی وجود ندارد. همچنین، مقادیر ضریب همبستگی بین تعداد روزهای گردوغبار و پارامترهای متوسط سرعت باد و فراوانی بادهای فرساینده در فصل زمستان طی بازه زمانی دوم (جدول ۳) نشان دهنده رابطه مثبت قوی است. بررسی داده‌ها در مقیاس سالانه نیز بیانگر ارتباط قابل قبول مابین تعداد روزهای غبارآلود و پارامترهای سرعت باد و فراوانی بادهای فرساینده در کل دوره آماری است (جدول ۳)، درحالی که طی بازه زمانی دوم معادل ۲۰۰۷-۲۰۱۶ هیچ ارتباط معناداری بین رویدادهای گردوغبار و عوامل اقلیمی وجود ندارد (جدول ۴). بررسی جزئی‌تر در مقیاس ماهانه و فصلی در بازه زمانی دوم نشان داد در ماه‌های اردیبهشت تا مرداد و فصل زمستان (جدول ۴)، از عوامل مؤثر در ایجاد وقایع گردوغبار، دو متغیر سرعت باد و بادهای فرساینده بود. براین اساس، در ادامه به‌طور مجزا به تحلیل این نوع بادهای در سطح منطقه پرداخته شد. گفتنی است که بادهایی با سرعت بیش از آستانه فرسایش، بادهای فرساینده در نظر گرفته شده است. لازم به یادآوری است، انتخاب بازه زمانی دوم تنها به دلیل تمرکز بیشتر بر سال‌های انتهایی دوره و حذف موارد مؤثر در کل دوره آماری است. براین اساس، با مقایسه جدول ۳ و ۴ در بازه زمانی دوم، تنها اثرات بادهای فرساینده و سرعت باد به‌صورت فصلی و ماهیانه مشاهده می‌شود. نتایج حاصل از طبقه‌بندی سرعت باد نشان داد بادهای با سرعت کمتر از حد آستانه معادل  $6\text{ m/s}$  و بالاترین درصد فراوانی و بادهای بیشتر از  $20\text{ m/s}$  کم‌ترین فراوانی را دارند (جدول ۵)، این در حالی است که در ایستگاه سبزوار در طول دوره آماری ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۶ بادهای با سرعت بالای  $20\text{ m/s}$  به دلیل عدم وقوع ثبت نشده است. توزیع ماهانه سرعت بادهای با سرعت کمتر از حد آستانه حاکی از آن است که بیشترین وقایع باد در ماه‌های تیر و خرداد و سپس اردیبهشت در محدوده مطالعاتی وقوع یافته است.

درحالی که بادهای فرساینده در ماه‌های آبان و آذر کم‌ترین فراوانی را در سال دارند. نتایج این بخش پژوهش با نتایج بررسی پیشین (۳۸) مطابقت دارد. بررسی جهت بادهای غبارآلود محلی در ایستگاه سبزوار (شکل ۴) نشان داد که جهت این بادهای در طول سال و همچنین فصل بهار، تابستان و پاییز از سمت شرق است. در فصل زمستان بادهای غبارآلود از دو جهت شرق و غرب به سمت منطقه می‌وزند. با توجه به مطالعات پیشین (۳۸)، این دیاگرام، طبقه‌بندی و توزیع سمت و سرعت بادهای همراه با گردوغبار (بدون توجه به سرعت آن‌ها) را در ایستگاه هواشناسی منطقه مورد مطالعه در دوره آماری مورد نظر مشخص می‌کند. نتایج بررسی پدیده گردوغبار در ایستگاه سبزوار حاکی از روند افزایشی آن دارد. ارتباط معنی دار پارامترهای سرعت باد و فراوانی بادهای فرساینده با وقایع گردوغبار در ایستگاه مطالعاتی نیز مطرح شد. به‌طور کلی باد به‌عنوان نیروی دینامیک ایجادکننده گردوغبار است و نقش اساسی در شدت و فراوانی این پدیده دارد. مطالعات پیشین نیز (۴، ۷، ۱۳، ۱۴، ۱۶ و ۲۲) حاکی از وجود رابطه مثبت بین سرعت باد و گردوغبار است که مؤید تأثیر مستقیم سرعت باد بر فراوانی گردوغبار است. براساس مقادیر ضریب همبستگی، فراوانی بادهای فرساینده در ایستگاه سبزوار بیشترین تأثیر را بر رخدادهای گردوغبار دارد. به‌طوری‌که در این منطقه ۶۶٪ تغییرات در تعداد روزهای گردوغبار توسط بادهای با سرعت بالاتر از  $6\text{ m/s}$  کنترل می‌شود که در تطابق با مطالعات پیشین (۴۴) است.

در ادامه، با توجه به فرض پژوهش حاضر، مبنی بر پتانسیل تپه‌های ماسه‌ای در تولید گردوغبار دانه‌بندی تپه‌های ماسه‌ای در منطقه مورد مطالعه بررسی شد. نتایج دانه‌بندی نشان دادند که با احتساب ذرات ریز ماسه حدود ۲۷٪ از تپه‌های ماسه‌ای خارتوران و عشق‌آباد پتانسیل گردوغبار و قطر کمتر از  $0.125\text{ mm}$  دارند (شکل ۵). نتایج مطالعات پیشین نیز نشان می‌دهد که تپه‌های ماسه‌ای از جمله مناطق برداشت ذرات گردوغبار در مناطق بیابانی‌اند (۴۳).

جدول ۳. مقادیر ضریب همبستگی روزهای غبار آلود محلی و پارامترهای اقلیمی ماهانه و فصلی و سالانه طی دوره آماری ۲۰۱۶- در ایستگاه سبزوار ۱۹۹۰

بازه زمانی	دما متوسط	دما حداقل	دما حداکثر	فراوانی بادهای متوسط سرعت		رطوبت نسبی	بارندگی	تبخیر و تعرق
				بیشتر از ۶ m/s	باد			
دی <sup>۱</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-
بهمن	-۰/۱۱	-۰/۳۳	۰/۰۹	۰/۵۷**	۰/۵۱*	۰/۱۵	-۰/۴۴*	۰/۰۲
اسفند	۰/۳۹*	۰/۲۷	۰/۴۱*	۰/۴۶*	۰/۵**	۰/۰۹	-۰/۳۵	۰/۴۲*
فروردین	۰/۰۱	-۰/۰۹	۰/۱۴	۰/۴*	۰/۴۱*	-۰/۱۱	-۰/۰۵	۰/۱۱
اردیبهشت	۰/۳۵	*۰/۱۸	۰/۴۵*	۰/۵۴**	۰/۵۵**	-۰/۳۲	-۰/۴۴*	۰/۳۵
خرداد	۰/۳۲	۰/۲۴	۰/۴۱*	۰/۶۷**	۰/۶۹**	-۰/۲۴	۰/۰۱	-۰/۲۲
تیر	۰/۲۱	۰/۱۲	۰/۲۴	۰/۲۹	۰/۳۳	-۰/۰۶	-۰/۱۵	۰/۲۵
مرداد	۰/۱۴	-۰/۰۲	۰/۲۶	۰/۵۶**	۰/۵۷**	-۰/۱۹	۰/۱۲	۰/۱۵
شهریور	۰/۰۴	-۰/۰۲	۰/۱۲	۰/۱۹	۰/۱۸	-۰/۰۲	-۰/۱۴	۰/۰۲
مهر	۰/۲۵	۰/۲۴	۰/۲۴	۰/۴۳*	۰/۴۰*	-۰/۲۶	۰/۱۶	۰/۱۹
آبان	-	-	-	-	-	-	-	-
آذر	-	-	-	-	-	-	-	-
زمستان	۰/۰۸	-۰/۱۶	۰/۱۳	۰/۶۸*	۰/۶۸*	-۰/۰۸	-۰/۳۳	۰/۴۲*
بهار	۰/۴۲	۰/۱۴	۰/۵۰*	۰/۶۰**	۰/۶۲**	-۰/۴۶*	-۰/۳۰	۰/۴۴*
تابستان	۰/۱۷	-۰/۰۳	۰/۳۵	۰/۳۴	۰/۳۵	-۰/۰۵	-۰/۱۲	۰/۱۸
پاییز	-۰/۰۲	-۰/۰۴	-۰/۰۲	۰/۳۶	۰/۴۱*	-۰/۱۶	۰/۱۴	۰/۰۵
سالانه	۰/۰۴	-۰/۲۷	۰/۱۸	۰/۶۳**	۰/۶۷**	-۰/۰۸	-۰/۳۶	۰/۳۵

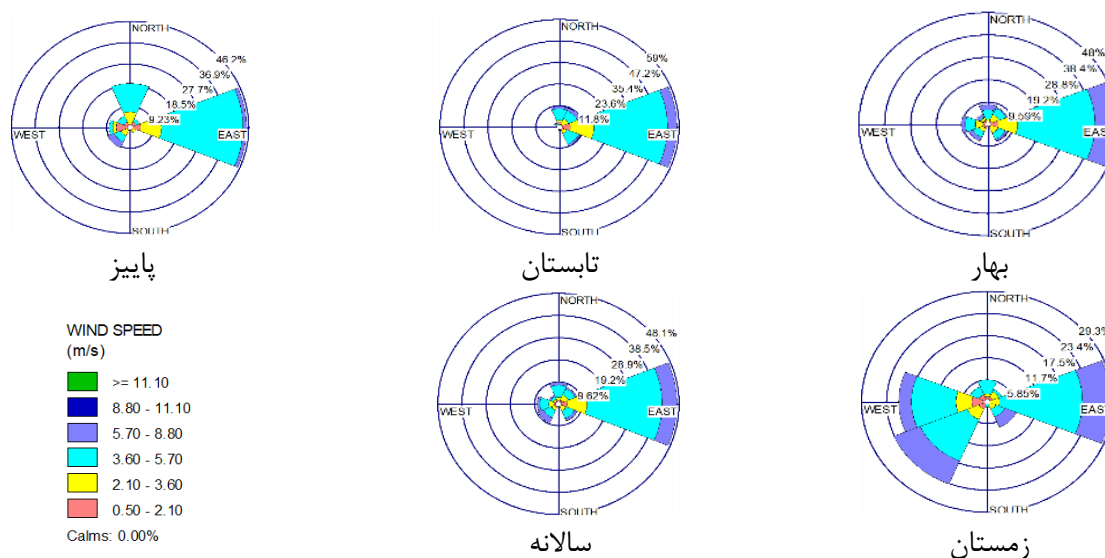
۱: تعداد دوازده روز اختلاف در تبدیل ماههای شمسی و میلادی می‌بایست مد نظر قرار گیرد.

جدول ۴. مقادیر ضریب همبستگی روزهای غبار آلود محلی و پارامترهای اقلیمی ماهانه و فصلی و سالانه در بازه زمانی دوم ۲۰۰۷- در ایستگاه سبزوار ۲۰۱۶

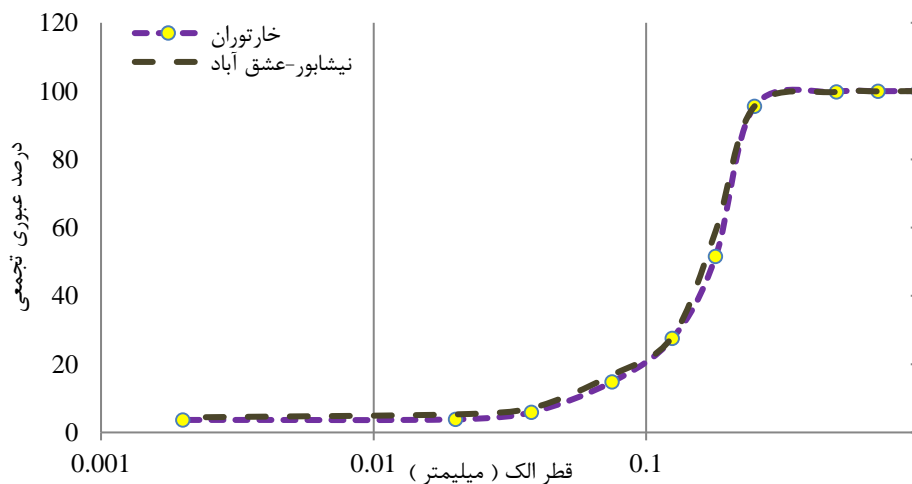
بازه زمانی	دما متوسط	دما حداقل	دما حداکثر	فراوانی بادهای متوسط سرعت		رطوبت نسبی	بارندگی	تبخیر و تعرق
				بیشتر از ۶ m/s	باد			
دی	-	-	-	-	-	-	-	-
بهمن	-	-	-	-	-	-	-	-
اسفند	۰/۲۶	۰/۰۱	۰/۳۱	۰/۳۸	۰/۵۶	۰/۴	-۰/۳۰	۰/۳۶
فروردین	۰/۲۸	۰/۲۷	۰/۲۲	۰/۱۸	۰/۲۵	-۰/۰۳	-۰/۲۱	۰/۳۴
اردیبهشت	۰/۲۱	-۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۷۱*	۰/۷۲*	-۰/۱۳	۰/۵۸	۰/۲۵
خرداد	۰/۳۲	۰/۲۶	۰/۴۴	۰/۷۱*	۰/۷۰*	۰/۱۷	-۰/۰۹	۰/۲۷
تیر	۰/۰۷	۰/۰۱	۰/۲۲	۰/۷۱*	۰/۶۸*	۰/۰۲	-۰/۲۱	۰/۰۱
مرداد	۰/۵۲	۰/۶۳	۰/۳۵	۰/۶۷*	۰/۵۴	-۰/۰۷	-۰/۱۸	۰/۵۴
شهریور	۰/۲۴	۰/۰۱	۰/۴۱	۰/۱۶	۰/۲۱	-۰/۲۹	-۰/۱۹	۰/۲۵
مهر	۰/۱۲	۰/۲۴	-۰/۰۳	-۰/۰۷	-۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۴۱	۰/۰۷
آبان	۰/۴۷	۰/۳۴	۰/۳۸	۰/۳۹	۰/۲۲	-۰/۵۷	-۰/۳۹	۰/۵۲
آذر	-	-	-	-	-	-	-	-
زمستان	-۰/۴۳	-۰/۴۵	-۰/۳۸	۰/۷۵*	۰/۷۳*	۰/۱۹	-۰/۰۶	۰/۲۴
بهار	۰/۵۱	۰/۳۲	۰/۵۷	۰/۶۲	۰/۶۰	-۰/۳۵	-۰/۱۹	۰/۵۰
تابستان	۰/۱۰	۰/۰۲	۰/۳۴	۰/۳۷	۰/۳۳	-۰/۱۱	-۰/۱۶	۰/۰۸
پاییز	۰/۳۳	۰/۳	۰/۲۲	-۰/۴۸	-۰/۴۵	-۰/۳۱	۰/۰۹	۰/۱۸
سالانه	-۰/۵۰	-۰/۵۰	۰/۴۰	۰/۵۸	۰/۵۸	۰/۳۱	-۰/۱۶	-۰/۰۴

جدول ۵. درصد فراوانی ماهیانه طبقات سرعت باد در ایستگاه هم‌دید (سینوپتیک) سبزوار طی دوره آماری ۱۹۹۰-۲۰۱۶

سرعت	باد					
	ماه	کم‌تر از ۶	۶-۱۰	۱۱-۱۵	۱۶-۲۰	بیشتر از ۲۰
دی	۹۰/۷۲	۸/۹۵	۰/۳۱	۰	۰	۹/۴۱
بهمن	۸۲/۲۴	۱۶/۷۰	۰/۹۷	۰/۰۴۳	۰	۱۷/۹۸
اسفند	۷۷/۵۴	۲۱/۰۵	۱/۳۲	۰/۰۷۱	۰	۲۲/۳۳
فروردین	۷۴/۶۵	۲۴/۰۱	۱/۳۱	۰/۰۱۷	۰	۲۵/۴۷
اردیبهشت	۶۹/۱۲	۲۹	۱/۸۳	۰/۰۳۲	۰	۳۰/۴۷
خرداد	۶۴/۴۵	۳۳/۴۷	۲	۰/۰۵۲	۰	۳۵/۵۸
تیر	۶۰/۷۱	۳۷/۸۴	۱/۴۳	۰	۰	۳۹/۴۱
مرداد	۶۹/۳۱	۳۰/۰۳	۰/۶۳	۰/۰۴۰	۰	۳۰/۴۳
شهریور	۷۴/۲۴	۲۵/۲۷	۰/۴۸	۰	۰	۲۶/۰۶
مهر	۸۱/۵۸	۱۷/۹۸	۰/۴۳	۰	۰	۱۸/۳۸
آبان	۸۶/۷۰	۱۲/۷۹	۰/۴۷	۰/۰۳۴	۰	۱۳/۶۳
آذر	۹۱/۹۱	۷/۹۹	۰/۰۹۱	۰	۰	۸/۲۳
میانگین	۷۶/۹۳	۲۲/۰۹	۰/۹۴	۰/۰۲۴	۰	۲۳/۱۱



شکل ۴. گل غبار محلی فصلی و سالانه در ایستگاه هم‌دید سبزوار طی دوره آماری ۱۹۹۰-۲۰۱۶



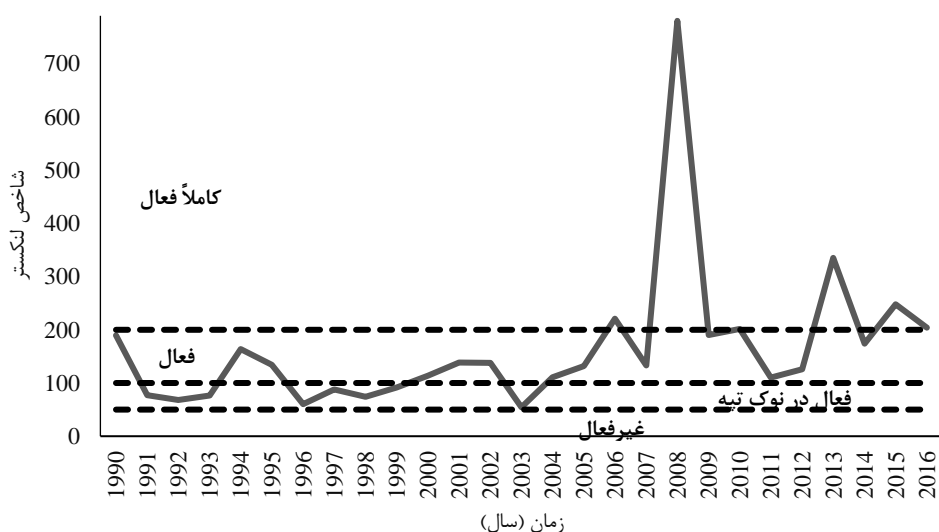
شکل ۵. دانه‌بندی تپه‌های ماسه‌ای خارتوران و نیشابور عشق‌آباد

منطقه مطالعاتی بیشتر شده و از سال ۲۰۱۰ تا آخر دوره آماری منطقه مورد مطالعه شدت خشکی بالاتری را تجربه کرده است. براین اساس، با کاهش مقدار شاخص خشکی یونپ و افزایش خشکی محیط بر میزان تحرک پذیری ماسه در کل منطقه مطالعاتی افزوده شده و خطر بیابان‌زایی در منطقه تشدید می‌شود. این موضوع در تطابق با شاخص لنکستر و پتانسیل تحرک پذیری 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 ۸). به عبارت دیگر، ۴۲٪ از افزایش فعالیت رسوبات بادی به دلیل تغییر در شرایط اقلیمی ناشی از تغییرات بارندگی و فراوانی سرعت باد این منطقه بوده است. بررسی نتایج حاصل از تحلیل همبستگی میان متغیرهای اقلیمی شاخص تحرک ماسه در ایستگاه سبزوار (شکل ۹) در بازه زمانی اول، دوم و کل دوره آماری نشان داد رابطه منفی معنی‌داری میان بارندگی و فعالیت تپه وجود دارد. به عنوان نمونه در سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۴ ارتباط قوی میان شاخص لنکستر و بارندگی کاملاً مشهود است. به طوری که در این سال‌ها کاهش بارندگی موجب افزایش مقدار شاخص تحرک تپه شده است.

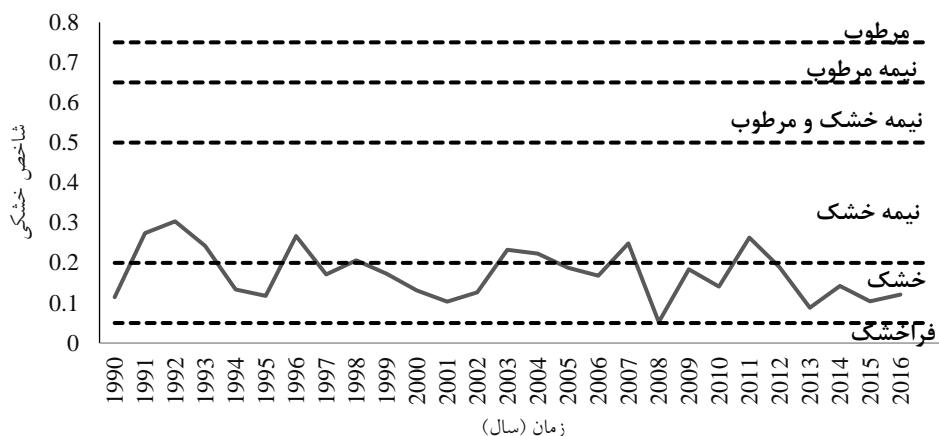
### میزان فعالیت تپه‌های ماسه‌ای و تغییرات زمانی شاخص خشکی

بررسی شاخص لنکستر در ایستگاه سبزوار نشان داد ۲۲٪ از فعالیت تپه‌ها به صورت کاملاً فعال، ۴۸٪ فعال و ۲۹٪ فعال در نوک تپه‌اند (شکل ۶)؛ همچنین، مقادیر شاخص لنکستر در این ایستگاه وضعیت غیرفعال را در دوره آماری مورد بررسی نشان نداد. تغییرات سالانه میزان شاخص لنکستر نشان داد که در سال ۲۰۰۸ بالاترین میزان تحرک تپه‌های ماسه‌ای در ایستگاه مطالعاتی وجود دارد، در حالی که در دهه اول دوره آماری معادل سال‌های ۲۰۰۶-۱۹۹۰ میزان فعالیت تپه ماسه‌ای در ایستگاه، نسبت به دوره بعد، یعنی ۲۰۱۶-۲۰۰۷، کمتر است. بررسی ارتباط فراوانی تعداد روزهای گردوغبار (شکل ۳) با شاخص لنکستر در ایستگاه هم‌دیدگی سبزوار نشان می‌دهد که بیشترین تعداد روز گردوغبار و شاخص لنکستر در سال ۲۰۰۸ در منطقه قابل مشاهده است. پیش‌تر نیز فعالیت تپه‌های ماسه‌ای با استفاده از شاخص لنکستر در ریگ بلند کاشان (۴) در وضعیت فعال گزارش شده است.

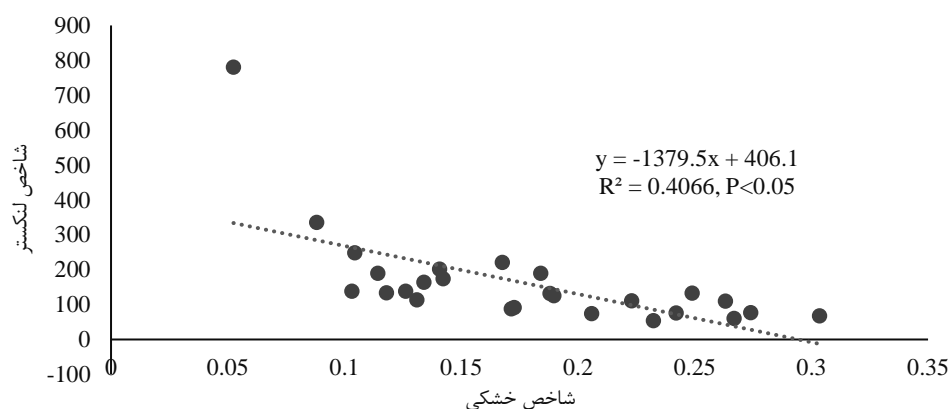
بررسی تغییرات سالانه شاخص خشکی یونپ در ایستگاه مطالعاتی نشان داد در ۶۷٪ کل دوره آماری با میانگین ۰/۰۵۲ ایستگاه مطالعاتی وضعیت آب و هوایی خشکی دارد (شکل ۷). از سال ۲۰۰۰ شدت خشکی در



شکل ۶. مقادیر شاخص لنکستر و وضعیت فعالیت تپه در ایستگاه سبزوار طی دوره آماری ۱۹۹۰-۲۰۱۶



شکل ۷. تغییرات سالیانه شاخص خشکی در ایستگاه هم‌دید سبزوار طی دوره آماری ۱۹۹۰-۲۰۱۶



شکل ۸. رابطه شاخص خشکی و تحرک پذیری ماسه‌ها در ایستگاه هم‌دید سبزوار طی دوره آماری ۱۹۹۰-۲۰۱۶

تأثیر معنی‌دار بر تحرک ماسه دارد. نتایج تحلیل ارتباط میان تبخیر و تعرق پتانسیل و شاخص لکستر نشان داد تبخیر و تعرق بعد از بارندگی دارای تأثیر قابل توجهی بر تحرک ماسه است که با نتایج مطالعات پیشین (۳۴) مطابقت دارد.

به‌طور کلی نتایج بررسی ارتباط میان شاخص تحرک ماسه و پارامترهای اقلیمی حاکی از آن است که پارامترهای بارندگی، بادهای فرساینده، سرعت باد و تبخیر و تعرق پتانسیل بیشترین تأثیر را بر تحرک ماسه در منطقه مطالعاتی دارند. همچنان که محققان دیگر نیز در مطالعه خود بر بررسی تأثیر پارامترهای اقلیمی بر تحرک تپه‌های ماسه‌ای نشان دادند که سرعت باد مؤثرترین پارامتر بر تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای است (۱، ۶، ۱۰، ۲۳، ۲۷ و ۳۱). با توجه به افزایش تعداد روزهای گردوغبار در منطقه مورد مطالعه که مشکلی برای محیط‌زیست منطقه محسوب

بررسی ارتباط میان فراوانی بادهای فرساینده و شاخص لکستر نشان داد که فراوانی بادهای فرساینده در ایستگاه سبزوار دارای تأثیر مستقیم و معنی‌دار بر تحرک‌پذیری تپه در بازه زمانی اول، دوم و کل دوره آماری است. همبستگی میان متوسط سرعت باد و شاخص تحرک تپه نشان داد که تأثیر فراوانی بادهای فرساینده نسبت به تمامی بادهای بیشتر است.

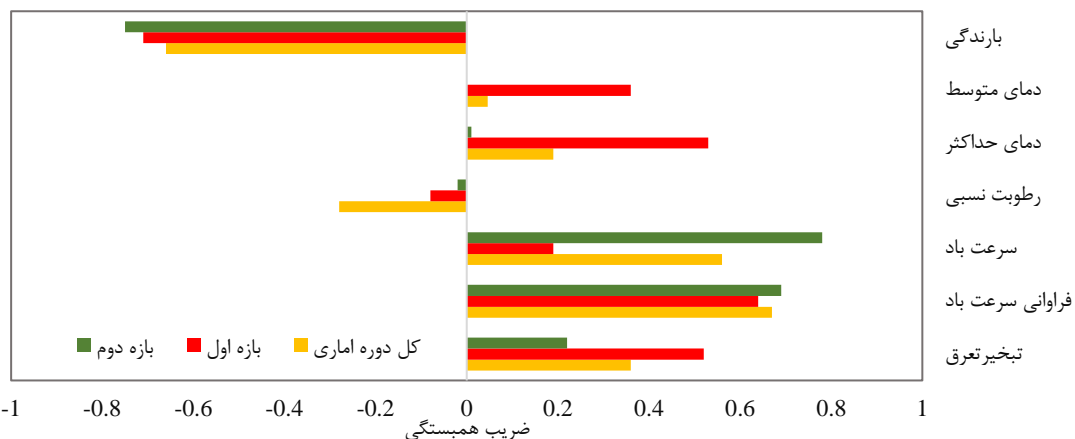
نتایج تحلیل رابطه دما و تحرک‌پذیری تپه نشان داد دما چندان تأثیر معنی‌داری بر تحرک ماسه ندارد. این در حالی است که نتایج پژوهش حاضر نشان داد که تأثیر دمای حداکثر بر تحرک ماسه در ایستگاه مطالعاتی بیشتر است که با گزارش مطالعات پیشین (۲۳ و ۳۴) همخوانی دارد. ضریب همبستگی میان رطوبت نسبی و شاخص لکستر نیز حاکی از تأثیر غیرمستقیم و معنی‌دار رطوبت نسبی جو بر تحرک‌پذیری تپه در ایستگاه در بازه زمانی اول و دوم

همچنین تغییرات ۳۰٪ توأم فراوانی بادهای فرساینده و تبخیر و تعرق در آینده، وضعیت فعالیت تپه در ایستگاه سبزواری از حالت فعال برابر ۱۶۴/۱۶ به کاملاً فعال، یعنی ۲۲۷/۰۱، تغییر خواهد یافت. وضعیت فعالیت تپه ماسه‌ای در ایستگاه مطالعاتی در اثر کاهش توأم دو پارامتر یاد شده به میزان ۳۰٪ در آینده سبب تغییر حالت تحرک تپه در ایستگاه سبزواری از حالت فعال به فعال در نوک تپه می‌شود. نتایج تحلیل حساسیت فعالیت تپه 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. براین 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 سبزواری به ترتیب ۳۸/۲۸٪ و ۴۲٪ افزایش و کاهش خواهد یافت. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت تحرک ماسه نسبت به تغییر بارندگی نشان داد که در صورت افزایش ۳۰٪ بارندگی فعالیت تپه ماسه‌ای در ایستگاه سبزواری ۳۷٪ در آینده کاهش خواهد یافت. درحالی 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 تحرک پذیری تپه‌های ماسه‌ای است (۸).

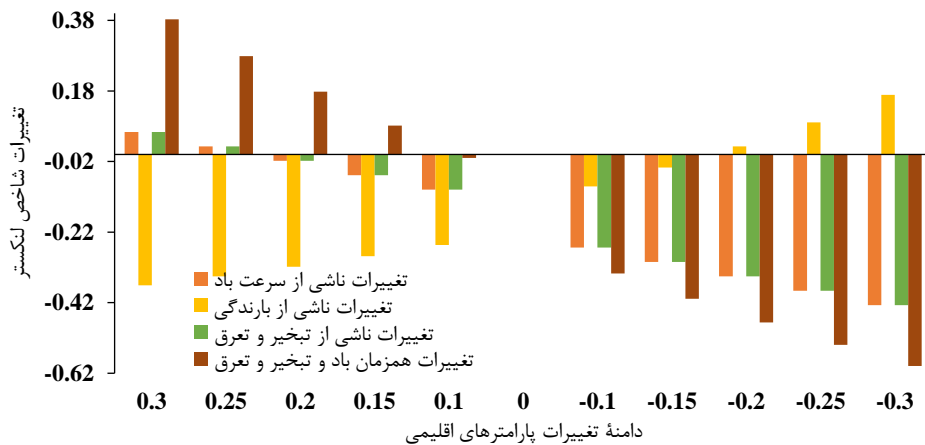
می‌شود، تغییر اقلیم (۵۱) از طریق بررسی و محاسبه تغییر متغیرهای اقلیمی (۸) بررسی شد. بررسی‌های پیشین در ارتباط با علل و پیامدهای تغییر ضرایب یا شاخص‌های اقلیمی در پهنه‌های آب و هوایی ایران (۳، ۱۷، ۱۸، ۲۴، ۲۹، ۴۶ و ۵۲)، نیز نشان می‌دهد که تغییر ویژگی‌های آب و هوایی از جمله افزایش ضریب خشکی می‌تواند از جمله دلایل تخریب سرزمین و به تبع آن افزایش رخدادهای گردوغبار به شمار آید.

### پیش‌بینی اثرات تغییر احتمالی عوامل اقلیمی بر تحرک پذیری تپه‌های ماسه‌ای

میزان حساسیت شاخص لنکستر به تغییرات هر یک از پارامترهای اقلیمی باد، باران، تبخیر و تعرق پتانسیل و تغییرات همزمان باد و تبخیر و تعرق پتانسیل در ایستگاه هم‌دید سبزواری در آینده بررسی شد (شکل ۱۰). نتایج حاصل از تحلیل حساسیت تحرک تپه نسبت به تغییرات متغیرهای اقلیمی بارندگی، فراوانی بادهای فرساینده و تبخیر و تعرق پتانسیل نشان داد حساسیت تپه‌های ماسه‌ای نسبت به تغییرات همزمان تبخیر و تعرق پتانسیل و فراوانی بادهای فرساینده بیشتر از دیگر متغیرها به صورت جداگانه است. براساس نتایج به دست آمده، در صورتی که در آینده فراوانی بادهای فرساینده و تبخیر و تعرق پتانسیل به میزان ۳۰٪ افزوده شود، فعالیت تپه ماسه‌ای در ایستگاه سبزواری ۳۸٪ افزایش خواهد یافت. همچنین میزان کاهش فعالیت تپه در اثر کاهش ۳۰٪ فراوانی بادهای فرساینده و تبخیر و تعرق پتانسیل در ایستگاه سبزواری ۵۹٪ خواهد بود.



شکل ۹. نتایج حاصل از تحلیل همبستگی پیرسون بین پارامترهای اقلیمی و شاخص لنکستر در ایستگاه هم‌دید سبزواری



شکل ۱۰. حساسیت شاخص لنگستر به تغییرات بارندگی، درصد بادهای فرساینده و تغییرات همزمان تبخیر و تعرق و درصد بادهای فرساینده در ایستگاه سبزوار طی دوره آماری ۲۰۱۶-۱۹۹۰

## نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به ارزیابی پاسخ تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای نزدیک به شهرستان سبزوار و پیش‌بینی وضعیت فعالیت آن‌ها در آینده، به سبب ایجاد زیرساخت مؤثر در جهت کاهش خسارات، حفظ سرمایه و بهبود کیفیت هوا در این بخش استراتژیک از کشور صورت گرفت. نتایج نشان داد که بیشترین خطر ناشی از تحرک تپه‌های ماسه‌ای، در بازه زمانی ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۶ است. براساس شاخص خشکی یونپ، ۷۵ درصد از این تغییرات به دلیل تغییر عناصر اقلیمی و به‌طور ویژه تغییرات بارندگی، بادهای فرساینده، سرعت باد و تبخیر و تعرق پتانسیل منطقه شناسایی شد. همچنین، نتایج پیش‌بینی بیانگر آن است که وضعیت تحرک رسوبات بادی از تپه‌های ماسه‌ای در ایستگاه مطالعاتی نسبت به کاهش عوامل اقلیمی، در مقایسه با افزایش آن‌ها، حساسیت بیشتری دارد. با توجه به نتایج، به‌کارگیری روش‌های نوین تثبیت خاک در منطقه مطالعاتی به منظور حفظ سرمایه و افزایش ایمنی توصیه می‌شوند. همچنین، با در نظرگیری پتانسیل ذرات جامد تشکیل‌دهنده تپه‌های ماسه‌ای خارتوران و

نیشابور-عشق‌آباد در ایجاد گردوغبار، مکان قرارگیری تپه‌های ماسه‌ای و بررسی گل‌غبارهای محلی در ایستگاه سبزوار می‌توان نتیجه‌گیری کرد که قرارگیری تپه‌های ماسه‌ای عشق‌آباد-نیشابور از جمله علل رخدادهای گردوغبار در این منطقه طی دوره آماری مورد بررسی‌اند. براین اساس، اولویت تثبیت با این تپه‌هاست. در نهایت، پایش تغییرات تپه‌های ماسه‌ای پس از تثبیت نیز به دلیل رژیم بادناکی منطقه پیشنهاد می‌شود.

## سپاسگزاری

پژوهش حاضر بخشی از طرح ملی «پایش عوامل اقلیمی مؤثر بر تشدید پدیده گردوغبار و ماسه‌های روان (فرسایش بادی)» زیر پروژه «استان خراسان رضوی» با کد مصوب-۹۶۱۰۴۷-۹۶۱۰۴۷-۱۲۷-۰۹-۰۹-۰۹ است. در اینجا از همکاری و مساعدت ریاست محترم مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، جناب آقای دکتر جلیلی، و راهنمایی‌های ارزنده مدیران و کارشناسان اداره هواشناسی استان خراسان رضوی، در راستای اعتلای بیشتر پژوهش قدردانی می‌شود.

## References

- Abbasi, H. R., Opp, C., Groll, M., Rohipour, H., & Gohardoust, A. (2019). Assessment of the distribution and activity of dunes in Iran based on mobility indices and ground data. *Aeolian Research*, 41, 100539.
- Abbasnejad, A., & Zahabnouri, S. (2012). Identification of forms of wind erosion in Rafsanjan plain. *Quantitative geomorphological research*, 1(2), 127-144. (in Farsi)

3. Abtahi, M., & Khosroshahi, M. (2019) Desert domain in Esfahan province by climatological factors, *Range and Desert Research*, 12 (3), 249-262. (in Farsi)
4. Aili, A., Kim Oanh, N.T., & Abuduwaili, J. (2016). Variation Trends of Dust Storms in Relation to Meteorological Conditions and Anthropogenic Impacts in the Northeast Edge of the Taklimakan Desert, China. *Air pollution*, 5(4), 127- 143.
5. Ahmadi Birgani, H., McQueen, K. G., Moeinaddini, M., & Naseri, H. (2017). Sand dune encroachment and desertification processes of the Rigboland Sand Sea, Central Iran. *Scientific reports*, 7(1), 1-10.
6. Alipour, N., Mesbahzadeh, T., Ahmadi, H., Malekian, A., & Jafari, M. (2018). Synoptic analysis of dust events and its relation with drought in Alborz and Qazvin provinces. *Geography (Regional Planning)*, 8(2), 59-68. (in Farsi)
7. Amgalan, G., Liu, G.R., Lin, T.H., & Kuo, T.H. (2017). Correlation between dust events in Mongolia and surface wind and precipitation. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 28(1), 23- 32.
8. Ashkenazy, Y., Yizhaq, H., & Tsoar, H., (2012) Sand dune mobility under climate change in the Kalahari and Australian Deserts. *Climatic Change*, 112(3), 1-23.
9. Bing, L.Z., Wenzhi, Y., & Rong, A. (2008) Characteristics and spatial heterogeneity of *Tamarix ramosissima* Nebkhas in desert-oasis ecotones. *Acta Ecologica Sinica*, 28(4), 1446-1455.
10. Bogle, R., Redsteer, M.H. & Vogel, J. (2015). Field measurement and analysis of climatic factors affecting dune mobility near Grand Falls on the Navajo Nation, southwestern United States. *Geomorphology*, 228, 41-51.
11. Boroghni, M., Moradi, H., Zanganeh Asadi, M.A., & Pourhashemi S. (2019). Evaluation of the role of drought on the frequency of dust in Khorasan Razavi province. *Environmental Science and Technology*, 21(5), 109- 121. (in Farsi)
12. Bouchani, M. H., & Fazeli, D. (2011). Environmental Challenges and Consequences - Dust and Its Consequences in Western Iran. *Political, Defense and Security Policy*, 2(3), 125 .(in Farsi)
13. Broomandi, P., Dabir, B., Bonakdarpour, B., & Rashidi, Y. (2017). Identification of dust storm origin in South- West of Iran. *Environmental Health Science & Engineering*, 15(1), 16-24.
14. Bryant, R.G., Bigg, G.R., Mahowald, N.M., Eckardt, F.D., & Ross, S.G. (2007). Dust emission response to climate in southern Africa. *Geophysical Research D: Atmospheres*, 112, D09207.
15. Csavina, J., Field, J., Félix, O., Corral-Avitia, A.Y., Sáez, A.E. & Betterton, E.A. (2014). Effect of wind speed and relative humidity on atmospheric dust concentrations in semi-arid climates. *Science of the Total Environment*, 487, 82-90.
16. Ebrahimi Khusfi, Z., Roustaei, F., Ebrahimi Khusfi, M., & Naghavi, S. (2020). Investigation of the relationship between dust storm index, climatic parameters, and normalized difference vegetation index using the ridge regression method in arid regions of Central Iran. *Arid land research and management*, 34(3), 239-263.
17. Ensafi Moghadam, T. (2004). An Investigation and assessment of climatological indices and determination of suitable index for climatological droughts in the Salt Lake Basin of Iran, *Range and Desert Research*, 11(4), 449- 473. (in Farsi)
18. 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.
19. Gharib Reza, M., & Motamed, A. (2004). A study of changes in coastal sand dunes of Sistan and Baluchestan province from 1967 to 1993, *Geographical Research Quarterly*, 36(50), 35-47. (in Farsi)



20. Ghavidel Rahimi, Y., Farajzadeh, M., & Lashni Zand, I. (2018). Analysis of temporal changes of dust storms in Khorramabad. *Applied Research in Geographical Sciences*, 18(51), 87-102. (in Farsi)
21. Ghazipour, M. (2005). Damage caused by wind erosion, the first national conference on wind erosion, Yazd, Yazd University. (in Farsi).
22. Hara, Y., Uno, I., & Wang, Z. (2006). Long-term variation of Asian dust and related climate factors. *Atmospheric Environment*, 40(35), 6730-6740.
23. 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.
24. Hosseini, M., Khosroshahi, M., Atapour, A., & Karami, A. (2006). Determination of the Climatic & Geological Deserts Characteristics in Tehran Province. *Range and Desert Research*, 13(2), 102-108. (in Farsi)
25. Houghton, J. T. (2001). *Climate Change: the scientific basis*, Cambridge University Press, Cambridge.
26. Jiang, H., Dun, H., Tong, D., & Huang, N. (2017). Sand transportation and reverse patterns over leeward face of sand dune. *Geomorphology*, 283, 41-47.
27. Kang, L., Huang, J., Chen, S., & Wang, X. (2016). Long-term trends of dust events over Tibetan Plateau during 1961-2010. *Atmospheric Environment*, 125, 188-198.
28. Khosravi, M., Fotuhi, S., & Piruzadeh, S. (2015). Investigation of temporal-spatial changes of coastal sand dunes using distance measurement (RS) studied: West Zarabad region. *Spatial analysis of environmental hazards*, 2(4), 1-14. (in Farsi)
29. Khosroshahi, M., Kashki, M.T., & Ensafi Moghaddam, T. (2009). Determination of climatological deserts in Iran. *Range and Desert Research*, 16(1), 96-113. (in Farsi)
30. Lancaster, N. (1985). Variations in wind velocity and sand transport on the windward flanks of desert sand dunes. *Sedimentology*, 32(4), 581-593.
31. Matsushima, D., Reiji, K., Yasunori, K., Ulgiichimeg, G., & Masato, S. (2020). A Method for Estimating the Threshold Wind Speed for Dust Emissions as a Function of Soil Moisture. *Boundary-Layer Meteorology*, 175(2), 237-257.
32. Mehrshahi, D., & Nekounam, Z. (2009). Statistical study of dust phenomenon and analysis of dust wind patterns in Sabzevar city. *Geographical Society of Iran*, 7(22), 83-104. (in Farsi)
33. Middleton, N. (2019). Variability and trends in dust storm frequency on decadal timescales: Climatic drivers and human impacts. *Geosciences*, 9(6), 261-271.
34. Mohammadkhan, S. (2017). Status and trends of dust storms in Iran from 1985 to 2005. *Iranian Natural Resources*, 70(2), 495-514. (in Farsi)
35. Naeimi, M., & Chu, J. (2017). Comparison of conventional and bio-treated methods as dust suppressants. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(29), 23341-23350.
36. Naeimi, M., Yousefi, M. J., Khosroshahi, M., Zandifar, S., & Ebrahimi Khosafi, Z. (2019). A Study of the Effects of Climatic Factors on Dust, Case Study: West of Khorasan Razavi Province. *Geographical Exploration of Desert Areas*, 7(2), 25-45. (in Farsi)
37. Negareh, H., & Latifi, L. (2009). Geomorphological analysis of the progress of sand dunes east of Sistan plain in recent droughts. *Geography and Development*, 6(12), 43-60. (in Farsi)

38. Omidvar, K., & Nekounam, Z. (2011). Application of rose and dust in analyzing dust phenomenon and determining the seasonal regime of winds associated with this phenomenon (Case study: Sabzevar). *Natural Geographical Research*, 76, 85-104. (in Farsi)
39. Rajaei, T., Rohani, N., Jabbari, E., & Mojaradi, B. (2020). Tracing and assessment of simultaneous dust storms in the cities of Ahvaz and Kermanshah in western Iran based on the new approach. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(12), 1-20.
40. Shahsavani A, Yarahmadi M, Jafarzade Haghhighifard N, Naimabadie A, Mahmoudian M, Saki H, Solat, M.H., Soleimani, Z., & Nadafi, K. (2011). Dust Storms: Environmental and Health impacts. *North Khorasan University of Medical Science*, 2(4), 45-56. (in Farsi)
41. Sharifikia, M., & Rabbani, F. (2020). Source routing and detection of dust storm in the Salt Lake basin of Qom in Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(14), 1-17.
42. Sparavigna, A. C. (2013). A study of moving sand dunes by means of satellite images. *Sciences*, 2.
43. Sweeney, M. R., Lu, H., Cui, M., Mason, J. A., Feng, H., & Xu, Z. (2016). Sand dunes as potential sources of dust in northern China. *Science China Earth Sciences*, 59(4), 760-769.
44. Tavakolifar, A. (2012). Morphology of sand dunes and their relation with wind regime (Case study: Arg Kashan), Master thesis, University of Kashan, Iran. (in Farsi)
45. Tsoar, H. (2005). Sand dunes mobility and stability in relation to climate. *Physical Journals*, 357(1), 50-56.
46. Teymouri, M., Abdullahi Mayvan, M., Nejad Hassan, B., & Geraie, P. (2011). Study of Drought Index Trend in Iran, Research Center for Drought and Drought in Agriculture and Natural Resources, Karaj: First National Conference on Drought and Climate Change, 883-888. (in Farsi)
47. Vali, A., & Roustaei, F. (2018). Investigation of the Wind Erosion Trend in Central Iran using Dust Storm Index in the Last Fifty Years, *Water and Soil Science*, 21(4), 189-200. (in Farsi)
48. Wang, X., Dong, Z., Liu, L., & Qu, J. (2004). Sand sea activity and interactions with climatic parameters in the Taklimakan Sand Sea, China, *Arid Environments*, 57(2), 225-238.
49. Wiggs, G.F.S., Livingstone, I., & Warren, A. (1996). The role of streamline curvature in sand dune dynamics: evidence from field and wind tunnel measurements, *Geomorphology*, 17(1-3), 29-46.
50. WMO, (1974). Manual on Codes. WMO Publ. 306, 1.
51. Yarahmadi, D., Nasiri, B., Khoshkish, A., & Nikbakht, H. (2015). Climatic fluctuations and dusty days in the west and southwest of Iran. *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 3(5), 19-28. (in Farsi)
52. 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.
53. Yizhaq H, Ashkenazy Y, Tsoar H (2009). Sand dune dynamics and climate change: a modeling approach. *Geophysical Research: Earth Surface*, 114(F1).
54. Yousefi, Y., & Masoompour Samakosh, J. (2014). Temporal-spatial variability of the severest dry spells in the north-west of Iran. *Desert*, 19(1), 17-25.
55. Zhang, W., Qu, J., Tang, L., Jing, Z., Bian, K., & Niu, Q. (2016). Environmental dynamics of a star dune. *Geomorphology*, 273(15), 28-38.