

**Sensitivity of geomorphological facies using wind tunnel**  
**Case study: Gonabad TownShip**

Malihe Mohammadnia<sup>1</sup>, Abolghasem AmirAhmadi<sup>2\*</sup>, MohammadAli Zangane Asadi<sup>3</sup>.

1- PhD of Geomorphology, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

2- Professor Department of Natural Geography, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

3- Associate Professor Department of Natural Geography, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

**Received: 26 December 2021**

**Accepted: 25 April 2022**

**Extended Abstract**

**Introduction**

Wind is one of the important causes of erosion in arid and semi-arid regions, which due to the limited vegetation in these areas, is able to move portable particles and results in wind erosion. Erosion defines as the transfer of discontinuous sediment from the earth's surface by water or wind. Wind erosion is a process that occurs because of increased speed and due to wind turbulence on a surface free of cover and as one of the main factors of land degradation and limiting soil fertility has created serious problems in many parts of the world, including Iran. Therefore, there is a serious problem against sustainable production and management of agricultural lands. The process of wind erosion destroys the soil and makes it inaccessible.

In arid and desert areas, soil erosion and particle transport are more affected by wind than other factors. Wind erosion and deposition of materials by wind or wind erosion occurs in more than one third of the land surface. Soil displacement and its destruction in such areas is very important; Due to the climatic conditions of these areas, soil is formed late. Wind erosion first picks up loose soil without vegetation and during the course of the attack, the impact of moving particles by the wind intensifies the erosion and increases the damage, and finally leaves the transported material in the form of sand dunes.

**Methodology**

In this study, the physical-laboratory method of wind tunnel was used to estimate the amount of erosion and sedimentation of geomorphological facies of Gonabad city compared to wind erosion. Firstly, the landform units and their types were distinguished and after identifying the facies, one square meter was taken from the surface soil and the samples were transferred to the wind tunnel aerodynamics laboratory of Hakim Sabzevari University for analysis. Then, in order to measure the amount of sedimentation of lands through wind erosion measuring device, first the erosion threshold for each sample was determined and the sediments were exposed to wind erosion for ten minutes and its erodibility was determined. To measure the wind erosion threshold, initially the tray was filled with sediment and weighed, and the sediment sample was placed inside the wind tunnel and the wind tunnel was lit at a base speed of 4 meters per second. Then the speed was increased to reach the wind erosion threshold. Wind erosion threshold is the speed at which the first sediments begin to move. At the wind tunnel threshold speed remained on for ten minutes and the sediments were exposed to wind. After this time, re-sedimentation of weight and after calculating the percentage of pebbles in each facies, the amount of winding was

---

\*. Corresponding Author (Email: [amirahmadi@hsu.ac.ir](mailto:amirahmadi@hsu.ac.ir))

estimated. Three samples of each facies were placed in the wind tunnel and the average velocity of the winding threshold was considered as the wind erosion threshold of the facies.

### **Results and discussion**

The results of measuring the amount of eroded soil of geomorphological facies were estimated for the erosion threshold speed of each facies. Wind erosion threshold varies from 6 m / s in sand dunes to 15 m / s in low and high plains and relatively high water erosion and new deposits. Wind gauge was measured between 20 g / m<sup>2</sup> in earthen hills with low and high erosion and moderate erosion up to 350 g / min in 10 minutes in sand dunes.

Examination of wind erosion threshold map in different facies and its adaptation to sand transport flow direction show that in sand dunes facies with threshold velocity of 6 m / s dominant direction of northwest flow was consequently threatening in north part It is in the way of communication. However, part of this facies is located in the north of Gonabad, which can be hazardous due to the location of industrial settlements and the establishment of industries for moving sand.

### **Conclusion**

Lowland plains with relatively high water erosion and new deposits with a threshold speed of 15 meters per second are resistant to wind erosion and sand dunes with a threshold speed of 6 meters per second (12 knots) have the most sensitive facies and the highest amount erosion (350 g / m<sup>2</sup> in ten minutes). After that, plains with gentle slopes without elevations and facies of earthen hills with elevations and thresholds with a threshold speed of 10 meters per second were estimated from areas sensitive to wind erosion in the region. The adaptation of the sand dunes to the speed of different thresholds showed that the city of Gonabad is prone to wind erosion by being located in the sensitive facies of a plain with a gentle slope and without elevation and the direction of the northern flow of sand in this facade. The results of calculating the wind erosion threshold in the study area showed a threshold speed of 6-15 m / s in different facies. The most sensitive facies are sand dunes (6 m / s) followed by plains facies with gentle slopes without elevation and elevation of earth hills with elevation and wind erosion (threshold speed 10 m / s). Considering that the city of Gonabad and Beidokht, as the two most important population centers, are located in the facies of plains with gentle slopes and without slopes and heights, special attention should be paid to this facies for stabilization. Also, sand dunes cover a large part of the city and in terms of location, are located on the main road north to south of the country (Mashhad-Zahedan) and also has the lowest erosion threshold and the highest wind volume. Management of these lands and planning to stabilize this facies seems to be necessary. An overview of the wind erosion susceptibility map showed that the northern areas of the city have more potential than the southern areas. As moving toward south, wind erosion decreases, and the topographic factor plays an important role. Due to the fact that the study area is one of the arid regions in terms of climate, so the unfavorable climate has prevented the establishment of vegetation and has intensified wind erosion in the region .It is suggested that in areas where the soil surface has hardened (floodplain facies and clay soils) and gravelly lands (sandy plains) the most important action to prevent wind erosion is to maintain this cover and prevent from damage cover.

**Keywords:** Sensitivity, wind erosion, Sand Rose, wind tunnel, Gonabad Township.

## سنجش و برآورد حساسیت‌پذیری رخصاره‌های ژئومورفولوژی با استفاده از تونل باد مطالعه موردی: شهرستان گناباد

ملیحه محمدنیا - دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران  
ابوالقاسم امیراحمدی<sup>۱</sup> - استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران  
محمدعلی زنگنه اسدی - دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۰۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۰۵

### چکیده

فرسایش بادی یکی از مشکلات زیست‌محیطی به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور است. با توجه به قرارگیری شهرستان گناباد در منطقه خشک و نیمه‌خشک و وقوع طوفان‌های گرد و غبار در این منطقه هدف این تحقیق برآورد آستانه فرسایش‌پذیری خاک و میزان فرسایش خاک در این منطقه است. در این پژوهش برای برآورد توان فرسایشی رخصاره‌های ژئومورفولوژی شهرستان گناباد، خاک سطحی رخصاره‌های مختلف به مدت ده دقیقه در معرض فرسایش بادی قرار گرفت و آستانه فرسایش و مقدار فرسایش‌پذیری آن برآورد شد. توان حمل ماسه نیز با استفاده از نمودار گلماسه بررسی شد. نتایج برآورد آستانه فرسایش بادی در منطقه مورد مطالعه نشان داد سرعت آستانه فرسایش بادی ۶-۱۵ متر بر ثانیه در رخصاره‌های مختلف متغیر است. تپه‌های ماسه‌ای با سرعت آستانه ۶ متر بر ثانیه حساس‌ترین رخصاره و پس از آن دشتهایی با شیب ملایم و بدون پستی و بلندی و تپه‌های خاکی با پستی و بلندی با سرعت آستانه ۱۰ متر بر ثانیه از مناطق حساس به فرسایش بادی در منطقه برآورد شد. شهر گناباد با قرارگرفتن در رخصاره حساس دشتهایی با شیب ملایم و بدون پستی و بلندی مستعد فرسایش بادی است. همچنین، انطباق گلماسه‌ها با نقشه برآورد سرعت آستانه فرسایش بادی نشان داد در رخصاره تپه‌های ماسه‌ای جهت جریان ماسه شمال غربی است و تپه‌هایی که در شرق جاده آسیایی (جاده شمال به جنوب) قرار دارد همواره تهدیدی جدی برای این جاده و تأسیسات اطراف آن محسوب می‌شود.

واژگان کلیدی: تونل باد، حساسیت‌پذیری، شهرستان گناباد، فرسایش بادی، گلماسه.

## مقدمه

فرسایش یکی از مهم‌ترین مشکلات تخریب در اکوسیستم‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک بوده (تانگ، ۲۰۱۱: ۱۵۴) و زمانی رخ می‌دهد که سرعت باد از آستانه فرسایش سطح خاک خشک بیشتر شود و همچنین سطح زمین به وسیله پوشش گیاهی، پستی و بلندی‌های زمین، یا موانع دیگر حفاظت نشده باشد (امین و عظیم‌زاده، ۱۳۹۴: ۹۱). فرسایش بادی به‌عنوان یکی از عوامل اصلی تخریب سرزمین و محدودکننده حاصل‌خیزی خاک مشکلات جدی در بسیاری از نقاط دنیا از جمله ایران به‌وجود آورده است (اسدزاده و همکاران، ۱۳۹۶: ۱۲۶). بنابراین، چالشی جدی در برابر تولید پایدار و مدیریت اراضی کشاورزی محسوب می‌شود (حنیفه‌پور و مشهدی، ۱۳۹۲: ۱۰۰). فرایند فرسایش بادی موجب تخریب خاک و از دسترس خارج شدن آن می‌شود (حیدری‌نسب و همکاران، ۱۳۹۸: ۱۵۰). در مناطق خشک و بیابانی فرسایش خاک و انتقال ذرات بیش از هر عاملی تحت تأثیر نیروی باد است (سعدالدین و همکاران، ۱۳۸۹: ۶۴). فرسایش، حمل و رسوب مواد توسط باد یا همان فرسایش بادی در بیش از یک‌سوم اراضی سطح زمین به‌وجود می‌آید (قائمی‌نیا، ۱۳۹۴: ۳۵۶). جابه‌جایی خاک و از بین رفتن آن در چنین مناطقی دارای اهمیت شایانی است؛ زیرا با توجه به شرایط اقلیمی حاکم بر چنین مناطقی تشکیل خاک کند است (ابراهیمی درچه و همکاران، ۱۳۸۹: ۲). فرسایش بادی نخست خاک سست و بدون پوشش گیاهی را برداشت می‌نماید و در طی مسیر حمل برخورد ذرات جابه‌جا توسط باد باعث تشدید فرسایش و افزایش خسارات می‌شود و در نهایت مواد حمل‌شده را به‌صورت پهنه‌ها و تپه‌های ماسه‌ای برجای می‌گذارد (محمدخان و کشفی، ۱۳۹۴: ۶۰). فرسایش بادی و معضلات مربوط به آن هر ساله خسارات سنگینی به بخش‌های محیط زیستی، اجتماعی، و سلامت جامعه وارد می‌کند (جعفری شالکوهی و همکاران، ۱۳۹۴: ۲۷۳). از پیامدهای مخاطره‌آمیز فرسایش بادی می‌توان به تشکیل طوفان‌های گرد و غبار (زوبک و ون پلت، ۲۰۰۶: ۲۶)، تخلیه ذرات حاصل‌خیز خاک (شرت و همکاران، ۲۰۰۷: ۶۲۱) و ایجاد پوششی مزاحم بر سطح اراضی زراعی و غیر زراعی (موحدان و همکاران، ۱۳۹۲: ۵۶) و درنهایت حرکت ماسه‌های روان اشاره کرد. هنگامی که سرعت باد از یک آستانه مشخص بیشتر شود فعالیت تخریبی آن آغاز می‌شود (هانگن، ۱۹۷۶: ۱۱۳). بیش از دوسوم مساحت کشور ایران به دلایل مختلف، از جمله موقعیت جغرافیایی و دوری از پهنه‌های وسیع آبی، در شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک قرار دارد (سلطانی گرد فرامرزی و مروتی، ۱۴۰۰: ۲۱). در زمینه فرسایش بادی و طوفان‌های گرد و غبار مطالعات زیادی در داخل و خارج از ایران انجام شده است. فیستر و ریس (۲۰۰۹) با استفاده از تونل باد قابل حمل میزان فرسایش بادی را در حوضه Ebro برآورد کردند. برای ارزیابی نرخ از دست رفتن خاک در سه محل نمونه‌ها ارزیابی شد. نتایج نشان داد محل‌هایی که سطح زمین بدون تغییر بوده کمترین میزان فرسایش بادی را داشته است. کوسوماناری (۲۰۱۴) با بررسی ۱۱ نمونه خاک در هفت مکان مختلف فضای سبز در شهر یوگیکارتای اندونزی و با اندازه‌گیری پارامترهای مختلف از جمله بافت خاک، ساختار خاک، و نفوذپذیری آن مقدار فرسایش را محاسبه کردند و به این نتیجه رسیدند که مقدار فرسایش‌پذیری در دامنه تغییرات ۰/۱۶ تا ۰/۲۹ قرار دارد. وب و همکاران (۲۰۱۶) به برآورد آستانه فرسایش بادی در پنج مکان در نیومکزیکو پرداختند. نتایج نشان داد در فصول و مکان‌هایی که رطوبت خاک بیشتر است آستانه فرسایش بادی افزایش چشم‌گیری داشته است.

ایازی و همکاران (۱۳۹۵) به بررسی توان رسوب‌زایی در رخساره‌های ژئومورفولوژیکی در آران با استفاده از تونل باد و مدل اریفر پرداختند. نتایج به‌دست‌آمده از تونل باد نشان داد که بیشترین سرعت آستانه فرسایش در شرایط طبیعی متعلق به رخساره پوسته‌های سخت و خشک دشت رسی است. امین و تقی‌زاده مهرجردی (۱۳۹۵) به بررسی پتانسیل فرسایش‌پذیری بادی خاک در دشت یزد- اردکان پرداختند. نتایج نشان داد که مقدار فرسایش‌پذیری در هر دو مدل در اراضی دشت سرپوشیده با بافت ریزدانه متوسط تا زیاد است. صارمی نائینی (۱۳۹۵)، با استفاده از تحلیل فراوانی سمت و

سرعت باد و محاسبه پتانسیل حمل ماسه با بهره‌گیری از گلباد، گل طوفان، و گلماسه چشم‌اندازی از فرسایش بادی در سطح استان یزد را ارائه داد. نتایج نشان داد که توزیع زمانی بادهای فرساینده به گونه‌ای است که عمده آن‌ها در فصول بهار و تابستان رخ می‌دهد. ایلدرمی و مرادی (۱۳۹۶) در پژوهشی با هدف ارزیابی شدت فرسایش بادی در دشت قهاند همدان با به‌کارگیری مدل IRIF.E.A نقشه شدت فرسایش بادی منطقه را تهیه کردند. در بررسی‌های به‌عمل‌آمده از کل نقشه مشخص شد که بیش از ۶۹ درصد از منطقه در کلاس فرسایشی شدید و خیلی شدید قرار دارد. نورزاده حداد و لندی (۱۳۹۷) به مطالعه حساسیت منابع تولید ریزگرد به پوشش سنگریزه‌ای در سطح خاک در اراضی غربی استان خوزستان پرداختند. نتایج حاکی از آن بود که سه پوشش متفاوت سنگریزه‌ای در طوفان با سرعت‌های ایجادشده تفاوت معنی‌دار آماری از نظر میانگین هدررفت خاک با هم ندارند ولی با افزایش میزان سرعت طوفان، میانگین هدررفت خاک در همه مناطق مورد آزمایش افزایش یافته است و با ایجاد پوشش سنگریزه‌ای در سطح خاک، هدررفت خاک کاهش یافته است. ظهرابی و همکاران (۱۳۹۸) به بررسی خصوصیات خاک و تأثیر آن در فرسایش بادی و سرعت آستانه در کاون‌های تولید گرد و غبار استان البرز پرداختند. نتایج نشان داد که رطوبت مهم‌ترین پارامتر مؤثر بر سرعت آستانه فرسایش بادی است.

«تأثیرگذاری ویژگی‌های خاک بر شدت فرسایش بادی در مناطق مختلف استان کرمان» نام پژوهشی است که شهبابی‌نژاد و همکاران (۱۳۹۹) داده‌اند. در این پژوهش با استفاده از تونل باد شدت فرسایش بادی در خاک‌های مختلف استان کرمان اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد ویژگی‌های خاک از طریق تأثیر بر فرسایش بادی در مهار فرسایش بادی اهمیت دارد. محمدیان بهبهانی و بوعلی (۱۳۹۹) به ارزیابی شدت فرسایش بادی در دشت سگری اصفهان با استفاده از دو مدل WEHI و IRIFR پرداختند. نتایج تجزیه و تحلیل انجام‌شده نشان داد مدل IRIFR برای شرایط اقلیمی خشک در ایران از کارایی خوبی برخوردار است. زنگنه تبار و همکاران (۱۴۰۰) به تحلیل بادهای فرساینده در قلمرو بیابان لوت با استفاده از گل طوفان و گلماسه پرداختند. نتایج نشان داد که جهت بادهای ایستگاه‌های شهداد و بم با جهت کلوته‌ها در غرب بیابان لوت انطباق دارد. «ارزیابی اثرات تغییر کاربری اراضی محدوده شهرهای میبد و اردکان بر شدت فرسایش بادی» نام پژوهشی است که صارمی نائینی (۱۴۰۰) انجام داده‌اند. در این پژوهش تأثیر تغییر کاربری اراضی بر افزایش شدت فرسایش بادی مطالعه شد و مشخص گردید طی سی سال گذشته ساخت‌وسازهای انسانی و ایجاد جزایر حرارتی باعث افزایش سرعت باد شده است.

با توجه به فرارگرفتن شهرستان گناباد در منطقه خشک و نیمه‌خشک و وقوع طوفان‌های گرد و غبار در منطقه، هدف این تحقیق تخمین آستانه و میزان فرسایش بادی در رخساره‌های ژئومورفولوژی شهرستان گناباد با استفاده از دستگاه سنجش فرسایش بادی است. تاکنون هیچ مطالعه‌ای در این زمینه در این شهرستان انجام نشده است.

## مواد و روش‌ها

هدف کلی در پژوهش پیش رو بررسی شدت فرسایش بادی در شهرستان گناباد است. در این راستا رخساره‌های ژئومورفولوژی به‌عنوان واحد کاری در نظر گرفته شد. در منطقه ۱۷ رخساره ژئومورفولوژی با توجه به ساختار ناهمواری، پوشش گیاهی، و سایر خصوصیات مورفولوژیکی شناسایی شد تا مناطق مستعد فرسایش بادی مشخص شود. سپس، مناطق کوهستانی و فاقد پوشش خاکی و مناطقی که پتانسیل ایجاد گرد و غبار نداشتند از نمونه‌برداری حذف شدند و عملیات برداشت نمونه از ۱۴ رخساره باقی‌مانده انجام گرفت. از هر رخساره سه نمونه رسوب برداشت شد و در نهایت متوسط میزان فرسایش سه تکرار به کل سطح رخساره تعمیم داده شد. نقاط با استفاده از دستگاه GPS گارمین شناسایی و عملیات برداشت در سطح منطقه به روش سیستمی - تصادفی انجام شد. جهت انتخاب نقاط برداشت، منطقه به

گریدهایی ۲×۲ کیلومتر مربع تقسیم شد و مناطقی که امکان دسترسی به آن فراهم بود مناطق برداشت انتخاب گردید. سپس، مساحت یک متر مربع از خاک سطحی که در معرض فرسایش بادی قرار داشت به‌عنوان نمونه برداشت شد. در مجموع، ۴۲ نمونه رسوب از این مناطق برداشت شد. نمونه‌ها در پاکت ریخته و کدبندی و به آزمایشگاه تونل باد دانشگاه حکیم سبزواری منتقل شد. از محل نمونه‌برداری قبل از برداشت عکس‌برداری شد تا درصد پوشش گیاهی و درصد سنگریزه آن محاسبه و نتایج دقیق‌تری ارائه شود.

#### جدول شماره ۱. ویژگی رخساره‌های ژئومورفولوژی مورد بررسی

شماره نمونه	نام رخساره	ویژگی نمونه
۱	تپه‌های ماسه‌ای	خاک‌های عمیق با پوشش کم تا متوسط تاغ و قیچ
۲	کفه‌های رسی - نمکی	خاک‌های بسیار عمیق با بافت متوسط تا خیلی سنگین و شوری و قلیائیت زیاد
۳	تپه‌های آهکی - دولومیتی کم‌ارتفاع با رخنمون سنگی و فرسایش آبی	اراضی بدون پوشش گیاهی با خاک‌های خیلی کم‌عمق
۴	تپه‌های خاکی با پستی و بلندی و فرسایش بادی	پوشش کم تا متوسط گیاهان استپی
۵	تپه‌های مارنی - رسی - گچی	پوشش کم گیاهان استپی مقاوم به شوری
۶	دشت ریگی ریزدانه	پوشش خاکی خیلی کم‌عمق تا کم‌عمق سنگریزه‌دار غیر یکنواخت
۷	دشت‌هایی با پستی و بلندی و فرسایش آبی کم و سنگریزه زیاد	خاک‌های کم‌عمق تا نیمه عمیق بدون تکامل پروفیلی
۸	دشت‌های با شیب ملایم و بدون پستی و بلندی	خاک‌های خیلی عمیق تکامل یافته با بافت متوسط تا خیلی سنگین
۹	دشت‌های نسبتاً مسطح با شوری متوسط	اراضی نسبتاً مسطح با فرسایش آبی و شوری متوسط تا زیاد
۱۰	واریزه‌های قدیمی ریزدانه	خاک‌های کم‌عمق تا نسبتاً عمیق بر روی مارن‌های گچی و نمکی
۱۱	واریزه‌های قدیمی با بافت متوسط	خاک‌های کم‌عمق سنگریزه‌دار با بافت سبک تا متوسط و بدون تکامل پروفیل
۱۲	واریزه‌های جدید	خاک‌های کم‌عمق تا نسبتاً عمیق سنگریزه‌دار با بافت متوسط و پوشش موس گیاهان استپی
۱۳	دشت‌هایی با پستی و بلندی و فرسایش آبی نسبتاً زیاد	خاک‌های کم‌عمق تا نیمه‌عمیق سنگریزه‌دار در برخی قسمت‌ها با افق کلسیک
۱۴	دشت‌های سیلابی با آبراهه کم‌عمق	خاک‌های بسیار عمیق با بافت متوسط تا سنگین و شوری و قلیائیت متوسط و پوشش متوسط گیاهان استپی

#### برآورد سرعت آستانه فرسایش بادی در شرایط آزمایشگاهی به کمک تونل باد

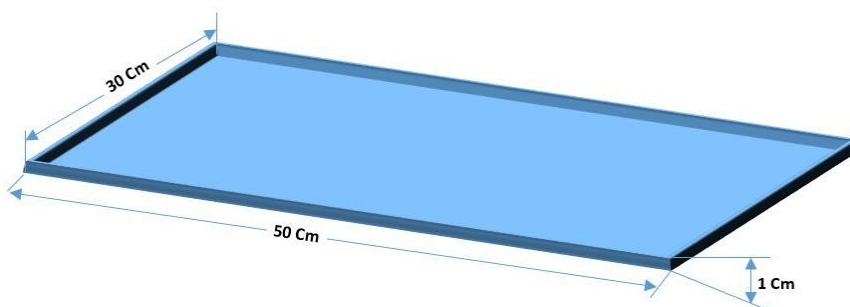
دستگاه سنجش فرسایش بادی در واقع نوعی تونل باد است که در ایران طراحی و ساخته شده است و به کمک آن می‌توان بسیاری از عوامل مؤثر در فرسایش‌پذیری خاک از جمله سرعت آستانه فرسایش بادی را برآورد کرد. تونل باد موجود قادر به اندازه‌گیری باد با سرعت حداکثر ۳۰ متر بر ثانیه است. ابعاد محفظه آزمایش تونل ۴۰×۴۰ سانتی‌متر و جنس آن پلکسی‌گلس است و برای اندازه‌گیری سرعت متوسط از لوله پیتوت استفاده می‌شود.



شکل شماره ۱. تونل باد مورد استفاده جهت اندازه‌گیری آستانه فرسایش بادی

جهت قراردادن نمونه رسوبات در داخل تونل دو سینی در ابعاد  $30 \times 50$  و  $30 \times 100$  و ارتفاع ۱ سانتی‌متر طراحی و با استفاده از ورق گالوانیزه ساخته شد. نخست برای انتخاب سینی، تست اولیه از یک نمونه مشخص صورت گرفت. به این ترتیب که هر دو سینی طراحی شده از رسوب پر و در تونل قرار داده شد و آستانه فرسایش بادی در هر دو نمونه محاسبه شد. با توجه به نتایج نزدیک دو سینی، برای سهولت انجام کار، از سینی  $50$  سانتی‌متر به‌عنوان سینی منتخب در آزمایش‌ها استفاده شد.

برای برآورد آستانه فرسایش بادی، نخست سینی طراحی شده از رسوب پر و توزین و نمونه رسوب داخل تونل باد گذاشته شد و با سرعت پایه ۴ متر بر ثانیه تونل باد روشن گردید. سپس، سرعت افزایش داده شد تا به آستانه فرسایش بادی برسد. آستانه فرسایش بادی سرعتی است که اولین رسوبات شروع به حرکت نمایند. در سرعت آستانه به‌دست‌آمده تونل باد به مدت ده دقیقه روشن ماند و رسوبات در معرض بادبردگی قرار گرفتند. پس از این زمان، رسوبات مجدداً وزن‌دهی شدند و پس از محاسبه درصد سنگ‌ریزه در هر رخصاره میزان بادبردگی برآورد شد. از هر رخصاره سه نمونه در تونل باد قرار داده شد که میانگین سرعت آستانه بادبردگی آستانه فرسایش بادی رخصاره در نظر گرفته شد.



شکل شماره ۲. تصویر شماتیک سینی طراحی شده برای قرارگرفتن رسوبات در تونل باد

## گلباد

ساده‌ترین روش آماری برای نمایش داده‌های بادسنجی گلبادها هستند که در آن‌ها اطلاعات کلاس‌های مختلف سرعت باد در جهات مختلف جغرافیایی نمایش داده می‌شود. بدین منظور، ابتدا کل موارد دیده‌بانی باد را معادل ۱۰۰ درصد قرار داده می‌شود و درصد فراوانی حالت آرام، یعنی مواردی که باد وجود نداشته یا سرعت آن کمتر از یک گره ( $0.5$  متر بر ثانیه) است، تعیین می‌شود و فراوانی بقیه مواردی که باد از جهت معین وزش داشته محاسبه می‌شود. سرانجام، با رسم دایره‌ای که معرف ایستگاه مزبور است جهات مشخص شده باد، با بازوهایی که طول آن متناسب با فراوانی جهت‌های تعیین شده است، ترسیم می‌شود (رفاهی، ۱۳۸۳: ۲۶). در این مطالعه برای ایستگاه سینوپتیک گناباد با داشتن دوره آماری ۲۷ ساله (دوره آماری ۱۳۷۱-۱۳۹۷) نمودار گلباد با نرم‌افزار RosePro 3.0 رسم شد.

## بررسی جریان حمل ماسه با استفاده از گلماسه

فرای برگر و دین (۱۹۷۹) چندین شاخص به شرح زیر از ترسیم گلماسه استخراج کرده‌اند که می‌تواند در برآورد میزان غبارناکی یا طوفانی بودن منطقه و همچنین تعیین جهت حرکت ماسه مفید باشد.

<sup>۱</sup> TDP: عبارت از یک مقدار اسکالر یا عددی است که از مجموع مقادیر توان حمل باد<sup>۲</sup> (DP) در جهات مختلف حاصل می‌آید و در واقع شاخصی است که بیانگر کل انرژی باد جهت حمل ماسه در منطقه یا ایستگاه مورد نظر است. ذکر این نکته لازم است که فرای برگر و دین و دیگر محققانی که در این زمینه مطالعه کرده‌اند مقادیر حاصل از معادله<sup>۱</sup> لتو را برای جهات مختلف (بازوهای گلماسه) به عنوان میزان حمل ماسه<sup>۳</sup> منظور کرده و مجموع آن‌ها را به عنوان پتانسیل حمل ماسه (DP) نام‌گذاری کرده‌اند. در صورتی که در این نرم‌افزار مشابه مطالعات صورت گرفته توسط اختصاصی (۱۳۸۳) هر یک از بازوهای گلماسه پتانسیل حمل ماسه (DP) در جهت مورد نظر قلمداد شده و مجموع آن‌ها پتانسیل نهایی حمل ماسه (TDP) نام‌گذاری شده است.

<sup>۴</sup> RDP: بیانگر مقدار یا اندازه بردار برآیند (بردار منتجه) توان حمل ماسه است که از جمع برداری مقادیر DP در جهات مختلف ۸ یا شانزدهگانه حاصل می‌آید و وضعیت نهایی حمل ماسه را در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد.

$$RDP = \sqrt{C^2 + D^2} \quad \text{رابطه ۱}$$

$$C = \sum_{i=1}^{8 \text{ OR } 16} (DP_i) \sin \phi_i \quad \text{رابطه ۲}$$

$$D = \sum_{i=1}^{8 \text{ OR } 16} (DP_i) \cos \phi_i \quad \text{رابطه ۳}$$

<sup>۵</sup> RDD: جهت خالص حرکت ماسه (جهت بردار منتجه) را در طول سال، ماه، یا فصل مورد نظر نشان می‌دهد و با استفاده از رابطه<sup>۴</sup> به دست می‌آید.

$$RDD = \text{Arc tan}(C/D) \quad \text{رابطه ۴}$$

<sup>۱</sup> UDI: شاخص همگنی جهت حمل ماسه که عبارت است از نسبت مقدار نهایی حمل ماسه (اندازه بردار منتجه) به کل توان حمل ماسه.

$$UDI = RDP / DPt \quad \text{رابطه ۵}$$

هرچه این مقدار به عدد یک نزدیک‌تر باشد، بادهای یک‌جهتی در منطقه زیادتر بوده و برعکس هر چه مقدار این نسبت به سمت صفر تمایل پیدا کند، بادهای قدرتمند چندجهتی بر منطقه حاکم خواهد شد.

به منظور تحلیل توان حمل ماسه توسط باد و ترسیم گلماسه در رخساره‌های مختلف، نقشه تخمین آستانه فرسایش بادی در منطقه تهیه و نمودار گلماسه مربوط به هر آستانه با استفاده از نرم‌افزار گلماسه<sup>۷</sup> ترسیم شد. به‌رغم وجود فرسایش بادی و ایجاد مشکلاتی در شهرستان گناباد، این اولین مطالعه موردی در زمینه فرسایش‌پذیری خاک در این شهرستان است.

1. Total Drift Potential

2. Sand drift potential

3. Sand drift

4. Resultant Drift Potential، مقدار جریان نهایی حمل ماسه،

5. Resultant Drift Direction، جهت حمل ماسه،

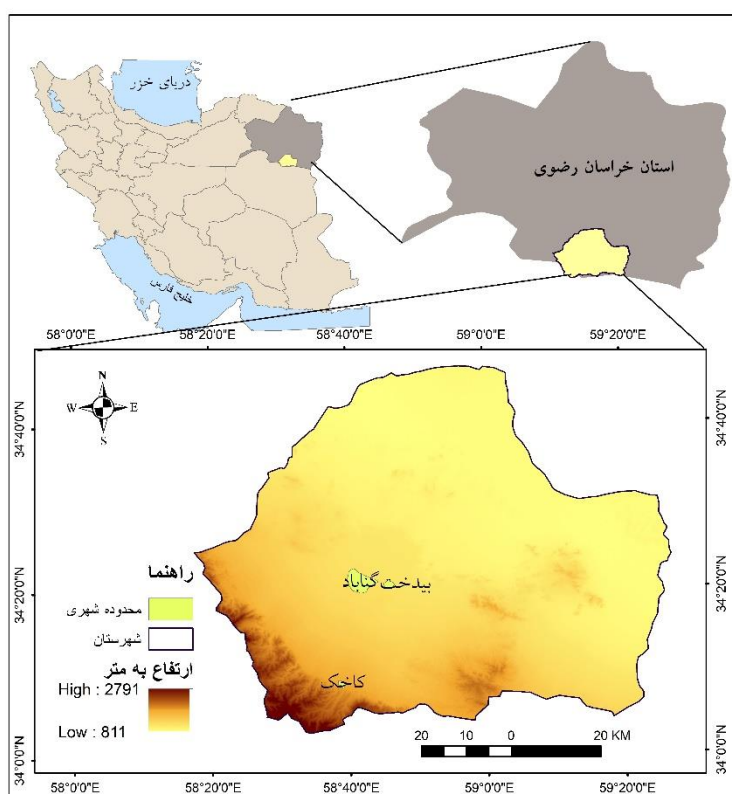
6. Uni Directional Index

7. Sand Rose Ggraph3



## محدوده مورد مطالعه

منطقه مورد بررسی شهرستان گناباد به مرکزیت شهر گناباد، یکی از شهرستان‌های استان خراسان رضوی، است که گستره آن از ۵۸ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۵۹ درجه طول شرقی و از ۳۴ درجه تا ۳۴ درجه و ۵۰ دقیقه عرض شمالی است (شکل ۱). مساحت گناباد بیش از ۵۷۰۰ کیلومتر مربع است. این شهرستان از سمت شرق به شهرستان خواف، از شمال و شمال غرب به تربت حیدریه و کاشمر، از سمت غرب و جنوب غرب به شهرستان فردوس، و از جنوب به قائن محدود است. مرکز این شهرستان در فاصله ۲۷۰ کیلومتری از مرکز استان واقع بوده و ارتفاع آن به‌طور متوسط ۱۱۰۵ متر از سطح دریا و براساس طبقه‌بندی اقلیمی دوماتون جزو اقلیم خشک است.



شکل شماره ۳. منطقه مورد مطالعه

## بحث و یافته‌ها

نتایج حاصل از برآورد مقدار خاک فرسایش‌یافته رخصاره‌های ژئومورفولوژی به ازای سرعت آستانه فرسایش هر رخصاره در جدول ۱ آورده شده است. آستانه فرسایش بادی از ۶ متر بر ثانیه در تپه‌های ماسه‌ای تا ۱۵ متر بر ثانیه در دشت‌هایی با پستی و بلندی و فرسایش آبی نسبتاً زیاد و واریزه‌های جدید متغیر است. بادبردگی نیز بین ۲۰ گرم در متر مربع در تپه‌های خاکی با پستی و بلندی و فرسایش متوسط تا ۳۵۰ گرم در ده دقیقه در تپه‌های ماسه‌ای اندازه‌گیری شد. دشت‌هایی با پستی و بلندی و فرسایش آبی نسبتاً زیاد و واریزه‌های جدید با سرعت آستانه ۱۵ متر بر ثانیه نسبت به فرسایش بادی مقاوم‌اند و میزان فرسایش آن‌ها به ترتیب در سرعت ۱۵ متر بر ثانیه ۶۲ و ۱۶۷ گرم در متر مربع در ده دقیقه است.

جدول شماره ۲. مقدار فرسایش بادی در رخساره‌های مختلف اراضی شهرستان گناباد به ازای سرعت آستانه هر رخساره

شماره نمونه	نام رخساره	آستانه فرسایش		میزان فرسایش <sup>۱</sup>	مساحت <sup>۲</sup>
		گره	متر بر ثانیه		
۱	تپه‌های ماسه‌ای	۱۲	۶	۳۵۰	۵۷۸٫۵
۲	کفه‌های رسی - نمکی	۲۴	۱۲٫۵	۱۱۲	۶۱۶٫۸
۳	تپه‌های آهکی - دولومیتی کم ارتفاع با رخمون سنگی و فرسایش آبی	۲۴	۱۲٫۵	۳۵	۳۹۰٫۹
۴	تپه‌های خاکی با پستی و بلندی و فرسایش بادی	۱۹	۱۰	۲۰	۱۲۸٫۹
۵	تپه‌های مارنی - رسی - گچی	۲۱	۱۱	۱۵۰	۱۹۴٫۵
۶	دشت ریگی ریزدانه	۲۶	۱۳٫۵	۲۹	۱۲۴٫۷
۷	دشت‌هایی با پستی و بلندی و فرسایش آبی کم و سنگریزه زیاد	۲۴	۱۲٫۵	۸۰	۵۳۹
۸	دشت‌هایی با شیب ملایم و بدون پستی و بلندی	۱۹	۱۰	۱۱۸	۳۳۹٫۸
۹	دشت‌های نسبتاً مسطح با شوری متوسط	۲۳	۱۲	۱۷۰	۹۵٫۹
۱۰	واریزه‌های قدیمی ریزدانه	۲۳	۱۲	۱۱۷	۳۰۱٫۸
۱۱	واریزه‌های قدیمی با بافت متوسط	۲۵	۱۳	۱۰۰	۱۴۷٫۲
۱۲	واریزه‌های جدید	۲۹	۱۵	۱۶۷	۷۳۶٫۴
۱۳	دشت‌هایی با پستی و بلندی و فرسایش آبی نسبتاً زیاد	۲۹	۱۵	۶۲	۲۱۱٫۱۱
۱۴	دشت‌های سیلابی با آبراهه کم عمق	۲۷	۱۴	۸۲	۱۹۴٫۲۳

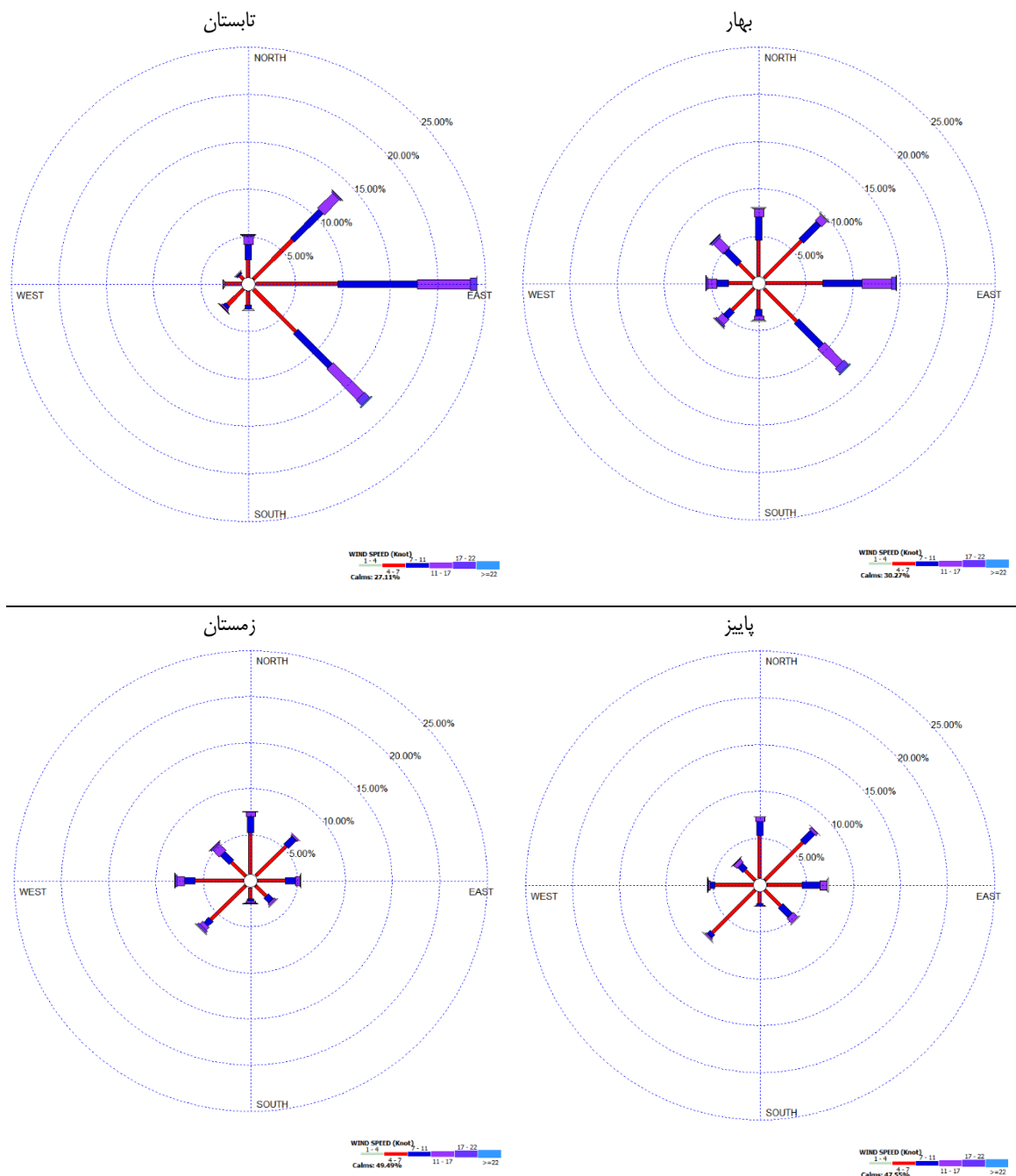
به منظور تحلیل فراوانی باد کلیه بادهایی با سرعت بیشتر از یک گره مطالعه شدند و فراوانی کلاس‌های مختلف سرعت باد تعریف شده بر اساس مقیاس بوفورت در جهات مختلف هشتگانه محاسبه و گلبادهای آن به صورت سالانه و فصلی ترسیم شدند. بیشترین فراوانی را در بادهایی با سرعت ۴-۷ متر بر ثانیه شاهد هستیم و در کلیه فصول نیز فراوانی وزش بادهای مربوط به دو کلاس ۴-۷ و ۷-۱۱ بیشتر از سایر کلاس‌ها بوده و تقریباً می‌توان گفت اغلب بادهایی که در منطقه در طول سال می‌وزند دارای دامنه سرعتی بین ۴ الی ۱۱ متر بر ثانیه‌اند.

جدول شماره ۳. فراوانی کلاس‌های سرعت باد در فصول مختلف سال در ایستگاه سینوپتیک گناباد (دوره آماری ۱۳۷۱-۱۳۹۷)

کلاس‌های باد	بهار	تابستان	پاییز	زمستان	سالانه
۱-۴	۶۳	۴۰	۳۷	۸۵	۲۲۵
۴-۷	۴۸۲۶	۴۷۹۵	۴۷۸۵	۴۶۵۲	۱۹۰۵۸
۷-۱۱	۳۰۳۷	۳۱۸۱	۱۱۶۶	۱۶۲۸	۹۰۱۲
۱۱-۱۷	۲۰۵۲	۱۹۹۶	۴۴۹	۸۲۴	۵۳۲۱
۱۷-۲۲	۳۸۱	۲۵۵	۶۴	۱۸۰	۸۸۴
۲۲>=	۹۵	۲۱	۱۲	۴۸	۱۷۶
بادهای آرام	۵۳۷۲	۵۵۰۷	۹۴۲۵	۹۲۲۰	۲۹۵۲۴
داده‌های ناقص	۳۰۹۵	۳۳۴۰	۳۱۹۲	۲۸۵۹	۱۲۴۸۶
جمع	۱۸۹۲۱	۱۹۱۳۵	۱۹۱۳۴	۱۹۴۹۶	۷۶۶۸۶

۱. گرم در مترمربع در ده دقیقه

۲. کیلومتر مربع

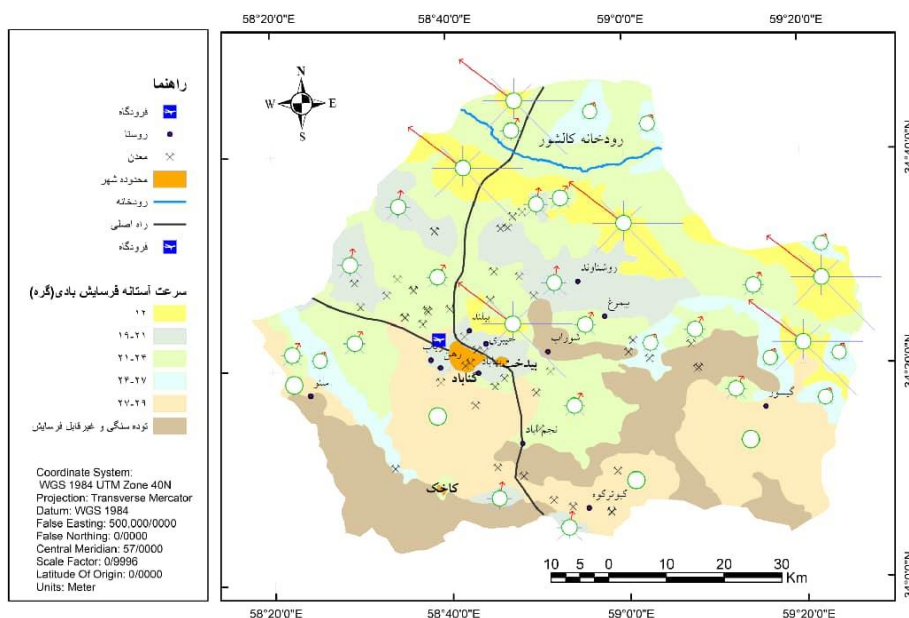


شکل شماره ۴. وضعیت بادناکی در فصول مختلف سال (۱۳۷۱-۱۳۹۷)

به‌منظور تحلیل توان حمل باد و برآورد جریان حمل ماسه از نرم‌افزار گلماسه استفاده شد. به این ترتیب، مقدار نهایی جریان حمل ماسه و جهت نهایی آن در بادهایی با سرعت‌های آستانه‌گونگون تعیین شد. روند کلی سالانه‌ی جریان حمل ماسه در بادهایی با سرعت متوسط ۱۲ متر بر ثانیه شمال غربی است که با جهت حرکت تپه‌های ماسه‌ای در منطقه منطبق است. در بهار و تابستان تقریباً جهت حرکت ماسه‌های روان در قطاع غرب تا شمال غرب است. اما در پاییز و زمستان، شرق تا شمال شرقی است. بیشترین حمل ماسه در بهار و تابستان برآورد شده است و در زمستان کاهش می‌یابد و در فصل پاییز به حداقل آن می‌رسد. حداکثر دبی رسوب در فصل تابستان اتفاق می‌افتد که مقدار آن ۳/۶ کیلوگرم بر متر در ثانیه است.

بررسی نقشه آستانه فرسایش بادی در رخساره‌های مختلف و انطباق آن با جهت جریان حمل ماسه در آستانه‌های مختلف نشان می‌دهد در رخساره تپه‌های ماسه‌ای با سرعت آستانه ۶ متر بر ثانیه جهت غالب جریان حمل به سمت شمال غرب بوده؛ در نتیجه در قسمت شمال منطقه تهدیدی در راه ارتباطی به‌شمار می‌آید. اما بخشی از این رخساره در شمال شهر گناباد واقع شده که با توجه به موقعیت شهرک صنعتی و استقرار صنایع در جهت حرکت ماسه‌های روان می‌تواند مخاطره ایجاد کند. روند کلی جریان حمل ماسه شمال غربی است که با جهت حرکت تپه‌های ماسه‌ای در منطقه منطبق است (شکل ۶).

رخساره دشت‌هایی با شیب ملایم و بدون پستی و بلندی نیز با آستانه ۱۰ متر بر ثانیه و جهت جریان شمالی ماسه از مناطق حساس به فرسایش بادی در منطقه است؛ با توجه به قرارگیری شهرهای گناباد و بیدخت و روشنوند در این قسمت و جهت گلماسه، این مراکز جمعیتی تحت تأثیر این رخساره بوده و به‌شدت از بادهای با سرعت بالاتر از ۱۰ متر متأثر می‌شوند. بنابراین، گرچه این رخساره آستانه بالاتری نسبت به تپه‌های ماسه‌ای دارد، به لحاظ اهمیت، در درجه بالاتری قرار گرفته و نیازمند توجه خاص برای تثبیت این اراضی است.



شکل شماره ۵. جهت جریان حمل ماسه بر روی نقشه برآورد آستانه فرسایش بادی در رخساره‌های مختلف ژئومورفولوژی



شکل شماره ۶. جهت حرکت ماسه‌های روان بر روی تپه‌های ماسه‌ای منطقه مورد مطالعه

### نتیجه‌گیری

در دهه‌های اخیر، به علت کاهش بارندگی و افزایش خشک‌سالی‌ها، طوفان‌های گرد و غبار بیشتر مناطق کشور را دربر گرفته و خسارات فراوانی به اکوسیستم وارد کرده است. با توجه به قرارگیری شهرستان گناباد در جنوب استان خراسان رضوی و موقعیت اقلیمی خشک و نیمه‌خشک آن، این شهرستان مستعد فرسایش بادی است. بنابراین، ضرورت ایجاد می‌کند برای برنامه‌های حفاظتی کنترل خاک و مبارزه با بیابان‌زایی، شناخت دقیقی از رخصاره‌های مستعد فرسایش در منطقه صورت گیرد.

نظر به اهمیت موضوع، در این تحقیق، به برآورد میزان حساسیت‌پذیری رخصاره‌های ژئومورفولوژی شهرستان گناباد نسبت به فرسایش بادی پرداخته شده است. در این پژوهش از مدل فیزیکی دستگاه سنجش فرسایش بادی به‌عنوان روشی نسبتاً آسان و در عین حال دقیق برای برآورد توان فرسایش بادی و مقدار رسوب‌دهی اراضی استفاده شد. نتیجه پژوهش ایازی و همکاران (۱۳۹۵) نیز مؤید استفاده از تونل باد به‌عنوان روشی دقیق برای برآورد حساسیت‌پذیری خاک است. در این پژوهش، نقشه رخصاره‌های ژئومورفولوژی منطقه پایه کار در نظر گرفته شد و از ۱۴ رخصاره مستعد فرسایش نمونه‌برداری و آستانه فرسایش بادی و میزان فرسایش آن با استفاده از تونل باد برآورد شد.

نتایج برآورد آستانه فرسایش بادی در منطقه مورد مطالعه نشان‌دهنده سرعت آستانه ۱۵-۶ متر بر ثانیه در رخصاره‌های مختلف است. حساس‌ترین رخصاره تپه‌های ماسه‌ای با آستانه سرعت ۶ متر بر ثانیه برآورد شد و پس از آن رخصاره دشت‌هایی با شیب ملایم و بدون پستی و بلندی و رخصاره تپه‌های خاکی با پستی و بلندی و فرسایش بادی با سرعت آستانه ۱۰ متر بر ثانیه از رخصاره‌های حساس در منطقه تخمین زده شد. شهر گناباد و بیدخت به‌عنوان دو مرکز جمعیتی مهم این شهرستان در رخصاره دشت‌هایی با شیب ملایم و بدون پستی و بلندی واقع شده است. در این راستا توجه ویژه به این رخصاره برای تثبیت ضروری است.

تپه‌های ماسه‌ای بخش عظیمی از مساحت شهرستان را دربر گرفته است. به لحاظ موقعیت، این رخصاره در مسیر جاده اصلی شمال به جنوب کشور (مشهد- زاهدان) قرار دارد. همچنین، پایین‌ترین آستانه فرسایش و بیشترین حجم بادبردگی را به خود اختصاص داده است. بنابراین، مدیریت این اراضی و برنامه‌ریزی برای تثبیت این رخصاره ضروری است. بررسی نقشه برآورد آستانه فرسایش بادی و توپوگرافی منطقه نشان داد مناطق شمال شهرستان پتانسیل فرسایش‌پذیری بیشتری نسبت به مناطق جنوبی دارد. هر چه به سمت جنوب پیش می‌رویم آستانه فرسایش بادی افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه منطقه مورد مطالعه از نظر اقلیمی جزو مناطق خشک است، اقلیم نامناسب از استقرار پوشش گیاهی جلوگیری کرده و به تشدید فرسایش بادی در منطقه دامن زده است. در مناطقی که سطح خاک سله بسته (رخصاره دشت‌های سیلابی و کفه‌های رسی) و اراضی سنگریزه دارد (دشت‌های ریگی) مهم‌ترین اقدام برای جلوگیری از فرسایش بادی حفظ این پوشش و جلوگیری از تخریب پوشش سطحی آن است.

### تقدیر و تشکر

این مقاله مستخرج از طرح پژوهشی شماره ۹۶۰۱۱۸۴۰ صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور است. نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از حمایت‌های این صندوق تقدیر و تشکر کنند.

### منابع

۱) ابراهیمی درچه، خ؛ جنت رستمی، م؛ جلالی، م. و جعفریان، آ. (۱۳۸۹). برآورد فرسایش بادی با کمک روش IRIFR.E.A، همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری گروه مهندسی آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی، ۸ و ۹ اردیبهشت‌ماه ۱۳۸۹، صص

- (۲) اختصاصی، م. ر. (۱۳۸۳). بررسی مورفومتری و مورفودینامیک رخساره‌های فرسایش بادی در دشت یزد، رساله دکتری دانشگاه تهران.
- (۳) اسدزاده، ف.؛ خدادادی، م. و احسان ملاح، ا. (۱۳۹۶). پیش‌بینی حساسیت به فرسایش نهشته‌های بادی با استفاده از مدل‌های توزیع اندازه ذرات در بخشی از ساحل غربی دریاچه ارومیه، فصل‌نامه تحقیقات مرتع و بیابان ایران، شماره ۱، صص ۱۲۶-۱۴۱.
- (۴) امین، پ. و تقی‌زاده مهرجردی، ر. (۱۳۹۵). بررسی پتانسیل فرسایش‌پذیری خاک در مناطق خشک و فراخشک مرکزی ایران (مطالعه موردی: دشت یزد- اردکان)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال ۵، شماره ۲، صص ۲۰-۳۵.
- (۵) امین، پ. و عظیم‌زاده، ح. ر. (۱۳۹۴). بررسی تأثیر سنگ‌فرش بیابانی بر روی سرعت آستانه فرسایش بادی و فرسایش‌پذیری بادی خاک (مطالعه موردی: حوضه ابراهیم‌آباد مهریز یزد)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال ۴، شماره ۲، صص ۹۰-۱۰۴.
- (۶) ایازی، ز.؛ مصباح‌زاده، ط.؛ احمدی، ح. و مشهدی، ن. (۱۳۹۵). بررسی توان رسوب‌سنجی در رخساره‌های ژئومورفولوژی با استفاده از تونل باد و مدل اریفر (مطالعه موردی: آران کاشان)، نشریه مدیریت بیابان، شماره ۸، صص ۷۰-۸۳.
- (۷) ایلدرمی، ع. و مرادی، م. (۱۳۹۶). ارزیابی شدت فرسایش بادی با بهره‌گیری از مدل IRIF.E.A (بررسی موردی: دشت قهاوند همدان)، نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی، سال ۲۱، شماره ۶۰، صص ۳۵-۵۲.
- (۸) حنیفه‌پور، م. و مشهدی، ن. (۱۳۹۲). بررسی میزان مقاومت اراضی کشاورزی به فرسایش بادی در جنوب شرقی دامغان، فصل‌نامه جغرافیا و مطالعات محیطی، سال ۲، شماره ۶، صص ۱۰۰-۱۱۰.
- (۹) حیدری‌نسب، م.؛ کرم، ا.؛ نگارش، ح. و پهلوان‌روی، ا. (۱۳۹۸). تحلیل مورفومتریک تپه‌های ماسه‌ای و سرعت جابه‌جایی آن‌ها در دشت سیستان، کاوش‌های جغرافیایی مناطق بیابانی، سال ۷، شماره ۱، صص ۱۴۹-۱۶۴.
- (۱۰) جعفری شالکوهی، ع.؛ وفایان، م.؛ روشن‌ضمیر، م. ع. و میرمحمدصادقی، م. (۱۳۹۴). ارزیابی عوامل مؤثر بر تثبیت خاک‌های ریزدانه در برابر باد به‌منظور جلوگیری از پیدایش ریزگردها، نشریه علوم آب و خاک، سال ۱۹، شماره ۷۳، صص ۲۷۳-۲۸۵.
- (۱۱) رفاهی، ح. ق. (۱۳۸۳). فرسایش بادی و کنترل آن، تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
- (۱۲) زنگنه تبار، س.؛ مقصودی، م.؛ منبری، ف. و حسینی، م. (۱۴۰۰). تحلیل فرسایش بادی و پتانسیل حمل ماسه‌های روان واقع در قلمرو بیابان لوت، پژوهش‌های فرسایش محیطی، ش ۴۱، صص ۱-۱۹.
- (۱۳) سعدالدین، ا.؛ اختری، د. و نورا، ن. (۱۳۸۹). پیش‌بینی اثرات سناریوهای مدیریت پوشش گیاهی بر خطر فرسایش بادی (مطالعه موردی جنوب دشت ورامین)، مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد ۱۷، شماره ۱، صص ۶۳-۸۰.
- (۱۴) سلطانی‌گرد فرامرزی، س. و مروتی، م. (۱۴۰۰). مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی، و کانی‌شناسی گرد و غبار اتمسفری شهر یزد در مرکز ایران، فصل‌نامه پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دوره ۵۳، شماره ۱، صص ۲۱-۳۶.
- (۱۵) شهبانی‌نژاد، ن.؛ محمودآبادی، م.؛ جلالیان، ا. و چاوشی، ا. (۱۳۹۹). تأثیرگذاری ویژگی‌های خاک بر شدت فرسایش بادی در مناطق مختلف استان کرمان، نشریه علوم آب و خاک، شماره ۳، صص ۲۰۹-۲۲۲.
- (۱۶) صارمی نائینی، م. ع. (۱۳۹۵). برآورد فراوانی سرعت و جهت بادهای فرساینده و مولد طوفان‌های گردوغبار و ریزگردها در سطح استان یزد با استفاده از تحلیل گلباد، گل طوفان، و گلماسه، نشریه مدیریت بیابان، شماره ۸، صص ۹۶-۱۰۶.
- (۱۷) صارمی نائینی، م. ع. (۱۴۰۰). ارزیابی اثرات تغییر کاربری اراضی محدوده شهرهای میبد و اردکان بر شدت فرسایش بادی، مجله منابع طبیعی ایران، دوره ۷۴، شماره ۱، صص ۱۲۱-۱۳۵.
- (۱۸) ظهراپی، ص.؛ خسروی، ح.؛ مصباح‌زاده، ط.؛ جعفری، م. و دستورانی، م. (۱۳۹۸). بررسی سرعت آستانه فرسایش بادی و تأثیرپذیری آن از خصوصیات خاک در کانون تولید گرد و غبار استان البرز، فصل‌نامه مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، دوره ۱۰، شماره ۳۸، صص ۱-۱۳.
- (۱۹) قائمی‌نیا، ع. م. (۱۳۹۴). معرفی و ارزیابی قابلیت‌ها و محدودیت‌های تله رسوب‌گیر فرسایش بادی EDST، فصل‌نامه تحقیقات مرتع و بیابان ایران، جلد ۲۲، شماره ۲، صص ۳۵۶-۳۷۲.
- (۲۰) محمدخان، ش. و کشفی، ف. س. (۱۳۹۴). جهات انتقال ماسه‌های بادی منطقه اردستان از طریق مقایسه زمانی مورفومتری تپه‌های ماسه‌ای و ویژگی‌های باد، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال ۴، شماره ۱، صص ۵۹-۷۴.
- (۲۱) محمدیان بهبهانی، ع. و بوعلی، ع. (۱۳۹۹). ارزیابی مقایسه‌ای مدل‌سازی شدت فرسایش بادی با استفاده از دو مدل WEHI

- و IRIFR به‌منظور ارائه برنامه مدیریت دشت سگزی اصفهان، نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، شماره ۴، صص ۱۴۷-۱۲۹.
- (۲۲) موحدان، م.؛ عباسی، ن. و کرامتی طرقي، م. (۱۳۹۲). بررسی آزمایشگاهی اثر پلی وینیل استات بر فرسایش بادی خاک‌های مختلف در برابر ماسه، مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد ۲۰، شماره ۱، صص ۵۵-۷۶.
- (۲۳) نورزاده حداد، م. و لندی، ا. (۱۳۹۷). مطالعه کانی‌شناسی و حساسیت منابع تولید ریزگرد به پوشش سنگریزه‌ای در سطح خاک، مطالعه موردی اراضی غربی استان خوزستان، فصل‌نامه فضای جغرافیایی/هر، سال ۱۸، شماره ۴، صص ۶۴-۷۴.
- 24) Afkhami, H.; Riahi, S.; Ehdai, A. and Rosta, H. (2014). Evaluation of water and wind erosion using IRIFR and MPSIAC models (Case study: Ganj Castle Basin), *Iranian Journal of Applied Geomorphology*, Year 2, Issue 3, pp. 90-108.
- 25) Amin, P. and Azimzadeh, H. R. (2015). The effect of desert pavement on soil wind erodibility and wind erosion threshold velocity (Case Study: Ebrahimabad basin of Mehriz (Yazd)). *Quantitative Geomorphological Research*, 4(2): 90-104.
- 26) Amin, P. and Taghizadeh Mehrjerdi, R. (2015). Investigation of soil erodibility potential in arid and arid regions of central Iran (Case study: Yazd-Ardakan plain), *Quantitative Geomorphological Research*, Fifth Year, No. 2, pp. 20-35.
- 27) Asadzadeh, F.; Khodadadi, M. and Ehsan Malahat, A. (2017). Predicting Sensitivity to Erosion of Wind Deposits Using Particle Size Distribution Models in a Part of the West Coast of Lake Urmia, *Iranian Journal of Rangeland and Desert Research*, No. 1, pp. 126-141.
- 28) Ayazi, Z.; Mesbahzadeh, I.; Ahmadi, H. and Mashhadi, N. (2016). Investigation of sedimentometric power in geomorphological facies using wind tunnel and Orifar model (Case study: Aran Kashan), *Journal of Desert Management*, No. 8, pp. 70-83.
- 29) Ebrahimi Drche, Kh.; Jannat Rostami, M.; Jalali, M. and Jafarian, A. (2010). Estimation of wind erosion using IRIFR.E.A method, *National Conference on Watershed Management Science and Engineering, Department of Watershed Engineering, Faculty of Natural Resources*, pp. 1-8.
- 30) Ekhtesasi, M. R.; (2005). Morphometric and morphodynamic study of wind erosion facies in Yazd plain, PhD thesis, University of Tehran.
- 31) Ekhtesasi, M. R. MA. and Saremi Naeni, A. (2005). Designing of Sandrose graph software, the processor of sand drift potential and sediment transport by wind. *In The first wind erosion conference*.
- 32) Ekhtesasi, M.; Ahmadi, H.; Kalili, A.; Saremi Naeni, M. and Rajabi, M. (2006). An Application Of wind rose, storm rose, and sand rose in the analysis of wind erosion and determining the direction of moving sands (Yazd-Ardakan basin) *Iranian journal of natural resources*, 59(3): 533-541. <https://www.sid.ir/en/journal/ViewPaper.aspx?id=128243>.
- 33) Fister, W. and Ries, J. B. (2009). Wind erosion in the central Ebro Basin under changing land use management. Field experiments with a portable wind tunnel, *Journal of Arid Environments*, V73. pp 996-1004.
- 34) Fryberger, S. G. and Dean, G. (1979). Dune forms and wind regimes. In: A Study of Global Sand Seas. E. D. Mckee (Ed). *Geological Survey Professional*, Paper 1052, pp. 137-169.
- 35) Ghaemina, AM. (2015). Introduction and evaluation of the capabilities and limitations of EDST wind erosion sediment trap, *Iranian Rangeland and Desert Research Quarterly*, Vol. 22, No. 2, pp. 356-372.
- 36) Hangen, L. J. (1976). A wind erosion Prediction System to meet user needs. *Soil Water conserve Journal*, 46(2): 111-206.
- 37) Hanifehpour, M. and Mashhadi, N. (2013). Study of resistance of agricultural lands to wind erosion in the southeast of Damghan, *Quarterly Journal of Geography and Environmental Studies*, Second Year, No. 6, pp. 100-110.
- 38) Heidari Nasab, M.; Karam, A.; Negarash, H. and Pahlavanrooi, A. (2019). Morphometric analysis of sand dunes and their displacement speed in Sistan plain, *Geographical excavations of desert areas*, seventh year, number one, pp. 149-164.
- 39) Ildermi, A. and Moradi, M. (2017). Evaluation of wind erosion intensity using IRIF.E.A model (Case study: Ghahavand plain of Hamadan), *Journal of Geography and Planning*,

- Vol. 21, No. 60, pp. 35-52.
- 40) Jafari Shalkoohi, A.S.; Vafaeian, M.; Roshan Zamir, M. and Mir Mohammad Sadeghi, M. (2015). Evaluation of effective factors on stabilization of fine-grained soils against wind in order to prevent the formation of fine dust, *Journal of Soil and Water Sciences*, Year 19, No. 73, pp. 273-285.
  - 41) Kusumandari, A. (2014). Soil erodibility of several types of green open space areas in Yogyakarta city, Indonesia, *The 4th International Conference on Sustainable Future for Human Security*, Procedia Environmental Sciences.
  - 42) Mohammad Khan, Sh. and Kashfi, F.S. (2015). Directions of wind sand transfer in Ardestan region through temporal comparison of morphometry of sand dunes and wind characteristics, *Quantitative Geomorphological Research*, Fourth Year, No. 1, pp. 59-74.
  - 43) Mohammadian Behbahani, A. and Boali, A. (2020). Comparative evaluation of wind erosion intensity modeling using two models WEHI and IRIFR in order to present the management program of Segzi plain of Isfahan, *Journal of Soil and Water Conservation Research*, No. 4, pp. 129-147.
  - 44) Movahedan, M.; Abbasi, N. and Keramati Torghi, M. (2013). Laboratory study of the effect of polyvinyl acetate on wind erosion of different soils against sand, *Journal of Soil and Water Conservation Research*, Vol. 20, No. 1, pp. 55-76.
  - 45) Noorzadeh Haddad, M. and Landi, A. (2018). Mineralogy study and sensitivity of fine dust production sources to gravel cover in the soil surface, a case study of western lands of Khuzestan province, *Ahar Geographical Space Quarterly*, Vol. 18, No. 64, pp. 61-74.
  - 46) Refahi, A.H. (2004). *Wind Erosion and its Control*, University of Tehran Press.
  - 47) Saad al-Din, A.; Akhzari, D. and Nora, N. (2010). Predicting the Effects of Vegetation Management Scenarios on Wind Erosion Risk (Case Study South of Varamin Plain), *Journal of Soil and Water Conservation Research*, Vol. 17, No. 1, pp. 63-80.
  - 48) Saeddin, A.; Akhzari, D. and Noora, N. (2010). Prediction of the Effects of Vegetation Management on Wind Epidemic Risk (A Case Study of South of Varamin plain), *Journal of Soil and Soil Conservation Studies*, Vol. 17, No. 1, pp. 63-80.
  - 49) Saremi Naeni, M. A. (2017). Estimate the frequency of speed and direction of erosive winds and generating dust storms in Yazd province by using Windrose, Stormrose and Sandrose. *Desert Management*, 4(8): 96-106.
  - 50) Saremi Naeni, M. A. and Saremi Naeni, A. (2021). *RosePlot: windrose generator software (Version 3.0) [software]*. Snmssofts.
  - 51) Saremi Naeni, M.A. (2021). Evaluation of the effects of land use change in Meybod and Ardakan cities on the intensity of wind erosion. *Journal of Range and Watershed Management*, 74: 121-35. <https://doi.org/10.22059/jrwm.2021.310687.1534>.
  - 52) Shahabi Nejad, N.; Mahmoudabadi, M.; Jalalian, A. and Chavoshi, A. (2020). The effect of soil properties on the intensity of wind erosion in different regions of Kerman province, *Journal of Soil and Water Sciences*, No. 3, pp. 222-209.
  - 53) Sharratt, B.; Feng, G. and Wendling, L. (2007). Loss of soil and PM10 from agricultural fields associated with high winds on the Columbia plateau. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(4): 621-630.
  - 54) Soltani Gerd Faramarzi, S. and Morvati, M. (1400). The Most Important Physical, Chemical, and Mineralogical Properties of Atmospheric Dust in Yazd, Central Iran, *Quarterly Journal of Natural Geography Research*, Vol. 53, No. 1, pp. 21-36.
  - 55) Tang, J. (2011). Influence of biological aggregating agents associated with microbial population on soil aggregate stability. *Applied Soil Ecology*, 47(3): 153-159.
  - 56) Webb, N. P.; Galloza, M. S.; Zobeck, T. M. and Herrick, J. E. (2016). Threshold wind velocity dynamics as a driver of aeolian sediment mass flux, *Aeolian Research*. V20. pp. 45-58.
  - 57) Zahrabi, P.; Khosravi, H.; Mesbahzadeh, I.; Jafari, M. and Dastrani, M. (2019). Investigation of wind erosion threshold and its impact on soil properties in the dust production center of Alborz province, *Quarterly Journal of Geographical Studies Arid regions*, Vol. 10, No. 38, pp. 1-13.
  - 58) Zanganeh Tabar, S.; Maghsoudi, M.; Manbari, F. and Hosseini, M. (1400). Analysis of



- wind erosion and the carrying potential of quicksand located in the Lut Desert, *Environmental Erosion Research*, Vol. 41, pp. 1-19.
- 59) Zobeck, T. M. and Van Pelt, R. S. (2006). Wind-induced dust generation and transport mechanics on a bare agricultural field. *Journal of hazardous materials*, 132(1): 26-38.