

بررسی ویژگی‌های باد و ارتباط آن با رخداد گرد و غبار در شهرستان زابل با استفاده از سامانه گوگل ارث انجین

محمد فتح‌اله زاده - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران.
زهرا رنجبر باروق* - دانش آموخته دکتری ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی.
محمد معتمدی‌راد- گروه آموزش جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران.
زهرا حاجی کریمی دولابی- دانش آموخته دکتری ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۲۱ تأیید نهایی: ۱۴۰۲/۰۸/۱۲

چکیده

از عوامل موثر بر ایجاد گردوغبار مناطق خشک، فراوانی وزش باد به دلیل توپوگرافی نسبتاً هموار، فقر پوشش گیاهی و کمبود رطوبت است. در این پژوهش به بررسی خصوصیات باد، ویژگی گردوغبار، رطوبت خاک و تأثیرات آن بر رخداد گرد و غبار در منطقه زابل پرداخته می‌شود. برای بررسی سرعت و جهت باد، داده‌های ایستگاه بادنمایی زابل در نرم‌افزار Wrpplot ارزیابی شد. سپس نمودار گلماسه به منظور بررسی شاخص‌های جابجایی ماسه در نرم‌افزار SandRose- Graph ترسیم شد. تغییرات گردوغبار و شاخص AOD منطقه در سامانه گوگل ارث انجین و تصاویر ماهواره‌ای MODIS در بازه زمانی ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۳ استخراج شد. تغییرات شاخص رطوبت خاک منطقه نیز با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Smap در گوگل ارث انجین مورد پایش قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد جهت باد غالب ایستگاه زابل شمال‌غربی-جنوب‌شرقی است که شرایط برای گسترش فرسایش بادی و گردو غبار منطقه را فراهم می‌کند. همچنین تحلیل نمودار شاخص AOD نشان می‌دهد که جولای ۲۰۱۸ بیشترین حد گردوغبار در منطقه رخ داده و وابستگی متقابلی با میزان گرد و غبار و وزش بادهای ۱۲۰ روزه در زابل دارد. نتایج شاخص رطوبت خاک نیز نشان می‌دهد بیشترین درصد رطوبت خاک (رطوبت ۱۰۰ درصد) در ماه فوریه تا آپریل است که موجب کاهش سرعت باد و رخداد گردو غبار در منطقه می‌شود، همچنین کمترین درصد رطوبت خاک (رطوبت ۵ درصد) مربوط به ماه جولای تا سپتامبر است که منطبق با رخداد بادهای ۱۲۰ روزه منطقه زابل است. همچنین بررسی جهت باد غالب و حمل ماسه در نقشه‌های گلباد و گلماسه نشان می‌دهد منبع اصلی گردوغبار در غرب شهر زابل (دریاچه خشک شده هامون) است که با کاهش ورودی آب از رودخانه هیرمند به این دریاچه، رسوبات ریزدانه کف دریاچه به صورت گردوغبار باعث کاهش کیفیت هوای منطقه زابل می‌شود.

واژگان کلیدی: گوگل ارث انجین، گرد و غبار، شاخص رطوبت خاک، زابل، دریاچه هامون.

مقدمه

بادهای سطحی تأثیر زیادی در شدت فرسایش از طریق جابه‌جایی و حمل ذرات خاک در سطح زمین دارند (Tage Din et al., 1986:118). بررسی‌ها نشان می‌دهد سرعت متوسط باد در سطح جهانی در ارتفاع میانگین ۱۰ متری از سطح زمین، از دهه ۱۹۶۰ تاکنون روند کاهشی ۰.۱۴ تا ۱ متر بر ثانیه را داشته است (McVicar et al., 2008). مطالعات فراوانی روند کاهشی سرعت باد سطحی در نقاط مختلف جهان را در سال‌های اخیر نشان می‌دهد که این کاهش بیشتر در عرض‌های جغرافیایی میانی گزارش شده است (McVicar et al., 2008). برخلاف روند کاهش جهانی سرعت بادهای سطحی، در برخی مناطق نیز روند صعودی سرعت باد برقرار است. در مناطق خشک و نیمه خشک جهان، تغییرات سریع دما، موجب ایجاد شدید گرادیان فشار در نقاط مختلف و تشکیل بادهای قوی و دائمی می‌شود (میری و همکاران، ۱۳۹۶).

یکی از عوامل مؤثر بر تغییرات مورفولوژی مناطق بیابانی، فراوانی وزش باد به دلیل توپوگرافی نسبتاً هموار و فقر پوشش سطحی و کمبود رطوبت در این مناطق است. فرسایش بادی شامل برداشت، خشک و انباشت ذرات خاک تحت تأثیر باد است که یک رخداد فیزیکی پویا است و موجب حمل خاک‌های سست، خشک و لخت بوسیله بادهای قوی می‌شود (Liu et al., 2005: 285). حمل شن و ماسه‌ی بادی، فرآیند پیچیده‌ای است که در یک منطقه به عواملی از جمله سرعت باد، میزان خاک بدون پوشش، شرایط خشکی هوایی (Mei & et al., 2008)، اندازه‌ی دانه (Wiggs et al., 2004: 99) رطوبت خاک، پوشش گیاهی (Kuriyama et al., 2005; 1127)، سیستم هوای محلی و بیرونی، بارش کوتاه مدت، وسعت جنگل‌زدایی، خشکسالی بلند مدت، تغییرات کاربری زمین و فعالیت انسانی و توپوگرافی (Hesp et al., 2005: 74) بستگی دارد. براین اساس فعالیت بادها در انجام فرسایش به طور چشمگیری در ارتباط با شرایط اقلیمی هر منطقه است. فرسایش بادی در مناطق بیابانی به صورت شکل‌گیری تپه‌های ماسه‌ای دیده می‌شود (karoaglu & et al., 2018). تپه‌های ماسه‌ای در سیستم‌های بیابانی و در شرایط خشک در نتیجه تراکم ماسه ایجاد می‌شوند. از نمونه‌های تپه‌ای می‌توان در صحرای کالاهاری در جنوب آفریقا و بیشتر بخش‌های بیابان‌های استرالیا و سایر مکان‌های خشک جهان مشاهده کرد. تپه‌های ماسه‌ای براساس میزان فعالیت به دو دسته فعال و تثبیت شده یا ثابت تقسیم می‌شوند (Tsoar, 2005: 54). فرایبرگر^۱ در سال ۱۹۷۹ انواع تپه‌های ماسه‌ای را براساس حالت‌های باد غالب تقسیم‌بندی کرد که شامل یونی مدال، بای مدال و پیچیده هستند. بادهای یونی مدال معمولاً موجب شکل‌گیری تپه‌های عرضی می‌شوند، بادهای بای مدال یا دوطرفه موجب تشکیل تپه‌های خطی و طولی و بادهای پیچیده یا کمپلکس موجب تشکیل تپه‌های ستاره‌ای شکل می‌شوند. به طور کلی رسوبات ناشی از فرسایش بادی در مکانی جابه‌جا و نهشته می‌شوند که ریگ نام دارد. ریگ‌ها، یک محیط فعال برای شکل‌گیری اشکال مختلف ماسه‌ای محسوب می‌شوند و شرایط لازم برای شکل‌گیری آنها شامل وجود ذرات ماسه‌ای فراوان، وزش باد مؤثر، توپوگرافی مناسب برای گسترش باد و شرایط آب و هوایی با رطوبت کم است (Pye and Tsoar, 2009: 112). ماسه‌های موجود در ریگ‌ها ناشی از رسوبات قابل حمل با منشأ محیط‌های رودخانه‌ای و دریاچه‌ای و ساحلی‌اند (Lancaste & et al., 2010: 3). کشور ایران به علت قرار گرفتن در کمربند خشک و نیمه خشک جهان و به دلیل شرایط آب و هوایی گرم و خشک و بیابانی به طور مداوم در معرض سیستم‌های گرد و غبار محلی و منطقه‌ای متعدد می‌باشد (Rashki & et al., 2013). بیشتر ریگ‌ها نیز در این نواحی شکل می‌گیرند؛ زیرا دما

¹ Fryberger

و تبخیر زیاد موجب کاهش شدید رطوبت در سطح شده و همین امر موجب افزایش فعالیت ماسه‌ها می‌شود (Dong et al., 2004: 196; Wang et al., 2007:257).

از سویی دیگر، تغییرات در فراوانی و میزان آبیگری دریاچه‌های دائمی و موقتی نیز ممکن است منجر به نوسانات قابل توجهی در میزان گرد و غبار منطقه در مقیاس سالانه و فصلی و در نهایت به افزایش فعالیت‌های طوفان گرد و غبار منجر شود (Mahowald et al., 2003). همچنانکه سطوح آبی خشک می‌شود سطوح اراضی که قبلاً خیس و یا توسط پوشش گیاهی تثبیت بود به طور فزاینده‌ای حساس به بادبردگی و افزایش وقوع گرد و غبار می‌گردد. بنابراین خشک شدن بستر دریاچه‌ها به دلیل خشکسالی و یا دلیل دیگر از جمله انسانی می‌تواند منجر به افزایش فعالیت‌های گرد و غبار گردد. بسیاری از دریاچه‌های سراسر دنیا پس از خشک شدن به عنوان کانون تولید گرد و غبار تبدیل شدند که از آن جمله می‌توان به دریاچه چاد در شمال آفریقا اشاره کرد که در حال حاضر بزرگترین منبع انتشار گرد و غبار دنیا به شمار می‌رود (Koren et al., 2006).

فرآیندهای بادی، مسئله‌ای جدی در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان هستند که می‌توانند مخاطرات بهداشتی، اجتماعی و اقتصادی ایجاد کنند. توفان‌های شن و ماسه یکی از پدیده‌های مهم جوی هستند که در بسیاری از بیابان‌ها و مناطق خشک دنیا گسترش دارند. فعال و پویا بودن تپه‌های ماسه‌ای باعث می‌شود تا جابه‌جایی ماسه‌ها به سمت سکونتگاهها بیش از پیش باشد و مخاطرات متعددی از قبیل تهدید سلامت اهالی، مدفون شدن روستاها، تخریب خاک و تأسیسات عمومی را ایجاد کند و سبب خسارات مالی، مهاجرت اهالی و در نهایت، فاجعه‌ی انسانی شود. حرکت ماسه‌ها باعث از دست دادن زمین‌های کشاورزی، مدفون شدن ساختمان‌های مسکونی، راه‌آهن، بزرگراه‌ها و زیرساخت‌های دیگر در بسیاری از مناطق بیابانی می‌شود (Dong, 2004: 197)، لذا به منظور برنامه‌ریزی اصولی، پایش سرعت و جهت حرکت و یا گسترش تپه‌های ماسه‌ای، به دلیل خسارت‌های ناشی از آن و به ویژه حفظ منابع طبیعی و پروژه‌ها و تأسیسات انسانی، اهمیت ویژه‌ای در مدیریت مناطق بیابانی دارد (Herms & et al., 2012). به طور کلی از دو روش برای بررسی تغییرات مورفولوژی مناطق خشک استفاده می‌شود که عبارتند از: روش‌های زمینی یا صحرایی و روش‌های مبتنی بر تکنیک‌های سنجش از دور. اگرچه روش‌های مطالعه‌ی صحرایی دقت بالایی دارد اما به دلیل محدودیت‌های استفاده‌ی مکانی و زمانی و همچنین هزینه و زمان زیاد آن، روش سنجش از دور کاربرد گسترده‌تری دارد (Herms et al., 2012). مطالعات متعددی در این زمینه در داخل و خارج کشور صورت گرفته است که از جمله‌ی آنها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

(Bagnold, 1941) برای اولین بار مطالعات سیستماتیک حرکت تپه‌های ماسه‌ای را با اندازه‌گیری‌هایی در بیابان صحارا و آزمایش‌های تونل بادی انجام داد. (Wang et al., 2012) ژئومورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای شمال و شمال شرق بیابان تکله‌مکان را مورد بررسی قرار داده و براساس نقش شرایط بادی در تغییرات مورفولوژی عوارض ماسه‌ای، تپه‌های ماسه‌ای را به سه دسته تپه‌های برخانی مرکب، تپه‌های ماسه‌ای زنجیره‌ای و تپه‌های ستاره‌ای تقسیم کردند. (Bourke et al., 2012) در بررسی حرکت تپه‌های ماسه‌ای در دره‌ی ویکتوریا در قطب جنوب میزان حرکت ماسه‌ها را ۱/۵ متر در سال تخمین زدند که کمتر از میزان حرکت تپه‌ها در بیابان‌های گرم است و دلایل آن را یخ‌زدگی، رطوبت خاک و رژیم برگشتی باد عنوان نمودند. (Herms et al, 2012) با استفاده تصاویر ماهواره‌ای Spot4، به بررسی حرکت تپه‌های ماسه‌ای در شمال غرب شبه‌جزیره سینا در مصر پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که متوسط سرعت

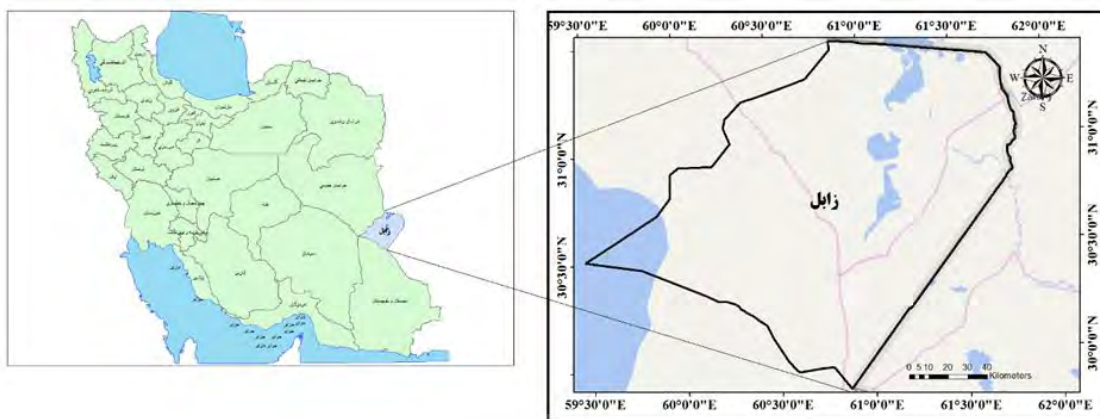
حرکت تمام تپه‌های ماسه‌ای برخانی منطقه برابر با ۱۱/۹ متر در سال و جهت حرکت آن نیز در شرق و شمال شرق است. (Hamdan et al., 2016) در پژوهشی ویژگی‌های مورفولوژیکی و میزان جابه‌جایی برخان‌ها را در جنوب شرقی بیابان غربی مصر بررسی کردند. در این پژوهش با استفاده از تصاویر گوگل ارث در بازه‌های زمانی مختلف جابه‌جایی تپه‌ها را بررسی کردند. نتیجه‌ی مطالعه جابه‌جایی ۳ تا ۱۰/۸۲ متری برخان‌ها را در سال نشان می‌دهد. مقصودی و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های بادسنجی و تصاویر ماهواره‌ای، الگوی گسترش توسعه‌ی تپه‌های ماسه‌ای و وضعیت بادهای فعال را در سطح ریگ مصر بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد این منطقه متأثر از بادهای غالب از جهت شمال غربی- جنوب شرقی طی روزهای سرد سال است و عمده‌ی جابه‌جایی‌ها در سطح ریگ از این روند پیروی کرده و متوسط جابه‌جایی در سطح تپه‌ها، ۸ متر در سال ارزیابی شده است. دانش شهرکی و همکاران (۲۰۱۷) تغییرات نسبت گرد و غبار حمل شده در دشت سیستان و ارتباط میزان گردوغبار با برخی پارامترهای اقلیمی به صورت فصلی را مشخص کردند. بیگوم و همکاران (۲۰۱۸) تحلیل همدیدی و شبیه‌سازی طوفان گرد و غبار در شبه جزیره عربستان را با دو مدل WRF و عمق نوری هواویزه (AOD) بررسی نمودند. ضمن تأیید برونداد مدل با داده‌های مشاهداتی، آنها نتیجه گرفتند که ۵ نمونه از توفانهای انتخابی با شرایط سینوپتیکی گردش جوی منطقه همراه است. (Zhang et al., 2019) در پژوهشی تغییرپذیری فرسایش بادی و مقادیر تخریب دینامیکی ناشی از آن را در مناطق کشاورزی شمال چین در بازه‌ی زمانی ۱۹۸۲ تا ۲۰۱۶ شبیه‌سازی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد سرعت باد نزدیک سطح زمین به طور سالیانه ۰,۰۰۷ متر بر ثانیه کاهش یافته است. این کاهش در فصل بهار ۰,۰۱ متر بر ثانیه و در فصل پاییز ۰,۰۰۹ متر بر ثانیه در سال بوده است. (Deep et al, 2019) در مطالعه‌ای دو شاخص AOD و EI را در منطقه‌ای از هند به صورت ماهانه، فصلی و سالانه بررسی کردند نتایج نشان داد که حداکثر میزان فصلی AOD، در قبل از فصل مانسون و حداقل آن در بعد از فص مانسون بوده است. یمانی (۱۳۹۳) در پژوهشی سیکلون‌های حرارتی لوت و تأثیر آن در لندفرم‌های بادی ریگ لوت را مورد بررسی قرار داد و با استفاده از عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای، نقشه توپوگرافی و تحلیل مورفومتری و مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای به این نتیجه رسید که شکل‌گیری چنین سیستم مورفولوژی نتیجه عملکرد یک سلول کم فشار حرارتی در مقیاس محلی در چاله لوت می‌باشد. مقصودی و همکاران، (۱۳۹۶) در پژوهشی به پایش جابجایی برخان‌های غرب ریگ لوت (پشوئیه) پرداختند و با استفاده از سله‌های موجود در سطح و مقایسه آن با عکس‌های هوایی سال‌های مختلف، میزان حرکت و جابجایی ریگ و برخان‌ها را مشخص کردند. براین اساس مشخص شد ریگ مورد نظر به سمت جنوب و جنوب شرق در حال جابجایی است که این امر در مطالعات میدانی انجام شده نیز تأیید شد. شریفی پیچون و همکاران (۱۳۹۹) به بررسی تغییرات ریگ زرین با استفاده از سری‌های زمانی تصاویر ماهواره‌ای طی دوره ۱۹۷۷-۲۰۱۷ پرداختند و برای انجام این پژوهش از سری‌های زمانی تصاویر لندست TM و ETM، نقشه رقومی ارتفاعی و تصاویر گوگل ارث استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که ریگ زرین تحت تأثیر بادهای غالب منطقه‌ای (شمال غرب- جنوب شرق) در حال حرکت به سمت شرق و جنوب شرق است. احدی و همکاران (۱۴۰۰) در پژوهشی به پایش آماری پدیده گردوغبار در استان خوزستان بارویکرد ساعتی پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد بیشترین روزهای گردوغبار در همه فصول مربوط به نیمه غربی استان است که نشان دهنده غلبه کانون‌های خارجی به عنوان منشا اصلی ریزگرد و اهمیت عامل توپوگرافی در این منطقه است، همچنین بررسی‌ها نشان داد افزایش شدید ریزگرد در بیست سال اخیر در نواحی جنوب شرقی، جنوب و مرکزی استان و در ساعات پایانی روز می‌باشد که بیانگر توسعه فعالیت کانونهای داخلی در افزایش روند ریزگرد در دهه‌های اخیر است.

استان سیستان و بلوچستان با توجه به شرایط خاص هیدرواقليمی حاکم بر آن بیش از ۵ میلیون هکتار بیابان (معادل ۲۶/۷ درصد از کل مساحت استان) دارد که ۱۶ درصد از این بیابان‌ها (حدود ۸۰۰ هزار هکتار) جزو شن‌زارهای فعال و نیمه فعال محسوب می‌شود (لطیفی، ۱۳۸۵: ۷۴). این استان با توجه به موقعیت جغرافیایی خاص خود و متأثر از عوامل هیدرواقليمی، دستخوش بیشترین سوانح طبیعی ناشی از تغییرات اقلیمی در دهه‌های اخیر از جمله خشکسالی، سیل و طوفان شن بوده است که در کنار جابه‌جایی مداوم تپه‌های ماسه‌ای و طوفان‌های ماسه‌ای ناشی از وزش بادهای ۱۲۰ روزه، خشک بودن تالاب هامون در وقوع گرد و خاک سیستان و بلوچستان به شدت تأثیرگذار است. ضمن اینکه چسبندگی این خاک پایین و مستعد خیزش گرد و غبار است و زندگی شهری و روستایی این استان را به ویژه در دشت سیستان و زابل تهدید می‌کند؛ به طوری که ماسه‌زار فعال و نیمه فعال منطقه با وزش باد جابه‌جا می‌شود و با هجوم خود به اراضی کشاورزی، رودخانه‌ها، راه‌های ارتباطی، شهرها و روستاها، تأسیسات اقتصادی و حیاتی منطقه، مشکلات عدیده‌ای را برای زیست مردم ایجاد و به فعالیت‌های زیربنایی منطقه خسارات جبران‌ناپذیری وارد می‌کند چنانکه در چند دهه اخیر، خسارات جبران‌ناپذیری به محیط زیست انسانی وارد شده است (احمدیان، ۱۳۸۷: ۱۴۵). یکی از دلایل ناکامی در مهار حرکت ماسه‌ها، عدم آگاهی دقیق از ویژگی‌های جهت و سرعت باد غالب منطقه و جابه‌جایی ماسه‌های در حال حرکت است بنابراین در این پژوهش ویژگی جهت و سرعت باد غالب منطقه، الگوی حرکت ماسه‌ها، تغییرات زمانی گرد و غبار معلق در جو و اثرگذاری رطوبت خاک بر پایه داده‌های ماهواره‌ای در جهت شناسایی علل رخداد و تشدید گردوغبار در سالهای اخیر در منطقه زابل که باعث کاهش کیفیت هوا و مشکلات ناشی از آن می‌شود، مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

موقعیت منطقه مورد مطالعه

شهرستان زابل بخشی از استان پهناور سیستان و بلوچستان است که قسمت وسیعی از شمال این استان را در بر می‌گیرد. این شهر از نظر موقعیت جغرافیایی حد واسط طول‌های جغرافیایی ۶۱ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۴۸ دقیقه طول شرقی و عرض‌های ۳۰ درجه و ۴۸ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۵ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). منطقه سیستان قسمتی از دشت بزرگی به همین نام است که بخش عمده آن در خاک افغانستان واقع شده و محدوده آن در خاک ایران دقیقاً بر محدوده شهر زابل انطباق دارد. این منطقه به صورت یک پیشروی از خاک ایران داخل افغانستان نمایان می‌گردد. زابل از شمال، شرق و جنوب شرقی با افغانستان، از جنوب غربی با منطقه بلوچستان و از غرب و شمال غرب با استان خراسان جنوبی هم‌جوار است. سیستان بر روی کمربند بیابانی جهان قرار دارد و آب و هوایی خشک و نیمه خشک دارد. خشکی آب و هوا با بارش بسیار کم، رطوبت کم هوا، تبخیر بالا، درجه حرارت بالای سالانه و خشکسالی‌های مکرر آشکار می‌شود. به دلیل گرادیان بالای دما و فشار منطقه در اکثر اوقات سال در معرض باد شدید است که گاهی اوقات به ۱۲۰ کیلومتر در ساعت هم می‌رسد. در سال‌های اخیر با توجه به کاهش نزولات آسمانی و احداث سدهای انحرافی در مسیر رودخانه هیرمند در کشور افغانستان به عنوان مثال بند کمال خان، ورودی رودخانه هیرمند به کشور و تالاب هامون بشدت کاهش یافته است که این امر موجب تغییر کاربری زمین از کشاورزی به زمین بلا استفاده شده و حساسیت خاک به فرسایش را افزایش داده و این منطقه را تبدیل به کانون گرد و غبار کرده است (میری و همکاران، ۲۰۰۹). وقوع خشکسالی در منطقه سیستان و پیرو آن کاهش پوشش گیاهی و خشک شدن دریاچه هامون و همچنین وجود بادهای ۱۲۰ روزه، بستر مناسبی را برای فرسایش بادی و وقوع طوفان‌های گرد و خاک ایجاد کرده است. این عوامل سبب جابجایی رسوب ریزدانه

بستر هامون به صورت گردوغبار و ذرات معلق به طرف شهر زابل شده که کیفیت هوا و شرایط زندگی در این منطقه را بسیار نامطلوب کرده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی زابل در استان سیستان و بلوچستان

داده‌های پژوهش

به منظور بررسی ویژگی‌های باد در جابجایی تپه‌های ماسه‌ای و شاخص‌های گرد و غبار و رطوبت خاک، این پژوهش در سطح سه مرحله انجام شده است.

در مرحله اول با استفاده از داده‌های ایستگاه بادسنجی زابل (نزدیک‌ترین ایستگاه به منطقه) ویژگی‌های رژیم باد و وضعیت توان فرساینده باد منطقه مورد بررسی قرار گرفت. برای این امر پس از جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌های مربوط به سرعت و جهات باد در محیط اکسل با استفاده از نرم‌افزارهای Sand Rose Graph و WR Plot به ترتیب نمودار گلماسه و گلباد ایستگاه زابل ترسیم و بدین وسیله جهت و سرعت باد غالب و پتانسیل رانندگی ماسه در اطراف منطقه مورد نظر تعیین و بردار نیروی برآیند در جابه‌جایی ماسه‌ها و رخداد فرسایش تعیین و مشخص شد.

اصطلاح پتانسیل حمل ماسه (DP^1) را نخستین بار فرایبرگر (۱۹۷۹) برای اندازه‌گیری توان باد سطحی در جابه‌جایی ماسه‌ها در طول یک بیابان خشک استفاده کرد. این اصطلاح به طور گسترده برای توصیف فعالیت و جابه‌جایی ماسه در مناطق بیابانی و ریگ‌ها در ارتباط با قدرت باد غالب استفاده می‌شود (Fryberger et al., 1984: 415; Tsoar, 2005:52; Yao et al., 2007: 84; Hereher, 2018: 115; Zhang et al., 2015: 3). براساس یافته‌های فرایبرگر پتانسیل رانندگی ماسه توسط باد با رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$DPt = V^2 (V - Vt) \times t \quad \text{رابطه ۲:}$$

که در آن DPt پتانسیل جابجایی ماسه کل، V میانگین سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین بر حسب کیلونات، Vt آستانه سرعت فرسایش بادی که معمولاً ۱۲ کیلونات در نظر گرفته می‌شود و t درصد رخداد باد در جهات مختلف

است. چنانچه مقدار DPt در یک منطقه کمتر از ۲۰۰ باشد، ۱. Drift Potential. باد در آن منطقه دارای ویژگی انرژی کم است و تغییرپذیری جهات باد بیشتر می‌شود، در صورتیکه مقدار DPt بین ۲۰۰ تا ۴۰۰ باشد باد دارای انرژی تغییرپذیری متوسط است و چنانچه بیشتر از ۴۰۰ باشد، باد در منطقه دارای انرژی زیاد دارد و تغییرپذیری جهات باد کمتر است (Fryberger and Dean, 1979:141).

از جمله دیگر شاخص‌های ویژگی باد و حمل ماسه، پتانسیل راندگی یا RDP^۱ شاخصی است که برآیند میزان پتانسیل جابجایی ماسه در جهت بردار باد غالب را اندازه‌گیری می‌کند. RDD^۲ یا بردار برآیند مسیر راندگی یکی دیگر از شاخص‌های حمل ماسه است که جهت برآیند حرکت ماسه‌ها را تعیین می‌کند. به صورت کمی پتانسیل راندگی برابر ۱ بر حسب مقیاس برداری برابر با ۰,۰۷ مترمکعب بر متر در سال است. همچنین شاخص RDP/DPt نیز عددی است که برای تفسیر شکل تپه‌های ماسه‌ای در مناطق بیابانی بکار می‌رود (Zhang et al., 2015:9). هنگامی که باد غالب به طور ثابت از یک جهت می‌وزد این نسبت به ۱ نزدیک است و تپه‌های ماسه‌ای حاصل مانند برخان‌های موجود در صحراهای آفریقا از نوع عرضی می‌باشند (Fryberger and Dean, 1979:142؛ جدول ۱). در کنار تعیین گلباد در ایستگاه زابل، روند تغییرات سرعت باد نیز در طول سال‌های ۱۹۶۲ تا ۲۰۱۸ در این ایستگاه بررسی شد (شکل ۴).

جدول ۱. تقسیم بندی قدرت فرسایشی باد و شاخص‌های تغییرپذیری جهت آن در محیط‌های بیابانی

DP	قدرت فرسایش باد	RDP/DP	تغییرپذیری جهات باد	طبقه بندی جهات باد
<۲۰۰	کم	<۰/۳	زیاد	بادهای چندجهته مرکب با زاویه تند
۴۰۰-۲۰۰	متوسط	۰/۰-۳/۸	متوسط	بادهای دوجته با زاویه منفرجه
>۴۰۰	زیاد	>۰/۸	کم	بادهای یک جهته

در مرحله دوم، به منظور پایش گردوغبار معلق در جو منطقه زابل، سری زمانی شاخص عمق اپتیکی آئروسول (AOD) که یکی از شاخص‌های پرکاربرد برای تحلیل و پایش ذرات معلق موجود در جو است، مورد استفاده قرار گرفت. AOD عبارت است از توزیع ذرات معلق موجود در ستون عمودی جو به طوری که میزان بالای AOD حاکی از تراکم زیاد ذرات معلق همچون گرد و غبار در جو است (Ramanathan and Crutzen, 2003)؛ به عبارت دیگر، AOD بیانگر میزان جذب و پراکنش ناشی از ذرات معلق جو در مسیر نور عبوری است. عمق اپتیکی ذرات معلق، از اختلاف بین بازتابندگی سطح و بازتابندگی رسیده به سنجنده به دست می‌آید (Mobasheri et al., 2014:191). عمق نوری یا ضخامت نوری هواویزها، پارامتری بی‌بعد است که میزان عبوردهی پرتو نور در جو را نشان می‌دهد و بیانگر میزان جذب و پراکنش ناشی از هواویزها در مسیر عبور نور است. مقادیر بالای ضخامت نوری، بیانگر انباشت بالای هواویزها در ستون جو و در نتیجه دید افقی کمتر است. برای پایش و نحوه تغییرات ضخامت نوری هواویزها از داده‌های سنجنده MODIS استفاده می‌شود.

در تعیین شاخص گردوغبار AOD از رابطه (۱) جهت نرمال کردن شاخص استفاده می‌شود که در این حالت مقادیر شاخص بین صفر و یک قرار گیرند و مقدار عددی AOD، ۰/۵ به بالا به عنوان میزان بالای گرد و غبار در نظر گرفته شد:

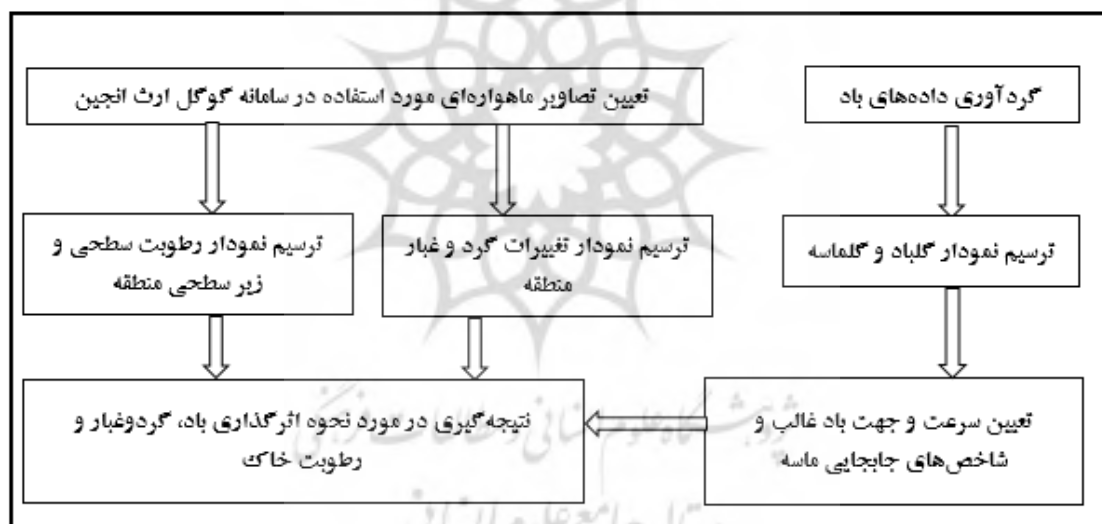
Min: کمترین مقدار عددی به دست آمده از شاخص AOD

Max: بیشترین مقدار عددی به دست آمده از شاخص AOD

$$\text{رابطه ۱: } AOD_{\text{normal}} = (AOD - \text{Min}) / (\text{Max} - \text{Min})$$

شاخص گرد و غبار برای عمده مناطق دنیا مقادیری بین ۰/۳ تا ۰/۵ است و برای شرایط قاره‌ای صاف (هوای صاف)، مقادیر ۰/۱ تا ۰/۲ AOD و مقادیر ۰/۸ تا ۰/۹ به عنوان میزان بالای گرد و غبار در نظر گرفته می‌شود (تائو و همکاران، ۲۰۲۰). به منظور بررسی روند تغییرات گرد و غبار منطقه زابل، ابتدا با استفاده از سری تصاویر سنجنده مودیس در بازه زمانی ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳ در محیط گوگل ارث انجین، وضعیت تغییرات آئروسول منطقه بررسی و نمودار سری زمانی گرد و غبار استخراج شد.

در مرحله سوم هم شاخص رطوبت خاک منطقه که امکان برآورد و پایش تغییرات رطوبت سطح بیرونی و زیرین خاک را فراهم می‌کنند توسط تصاویر ماهواره Smap مورد پایش قرار گرفت (شکل ۲).

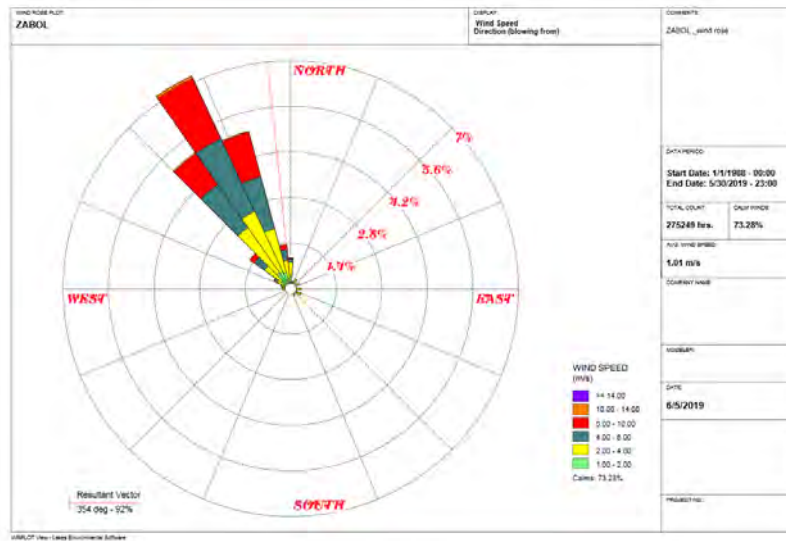


شکل ۲- فلوجارت مراحل انجام پژوهش

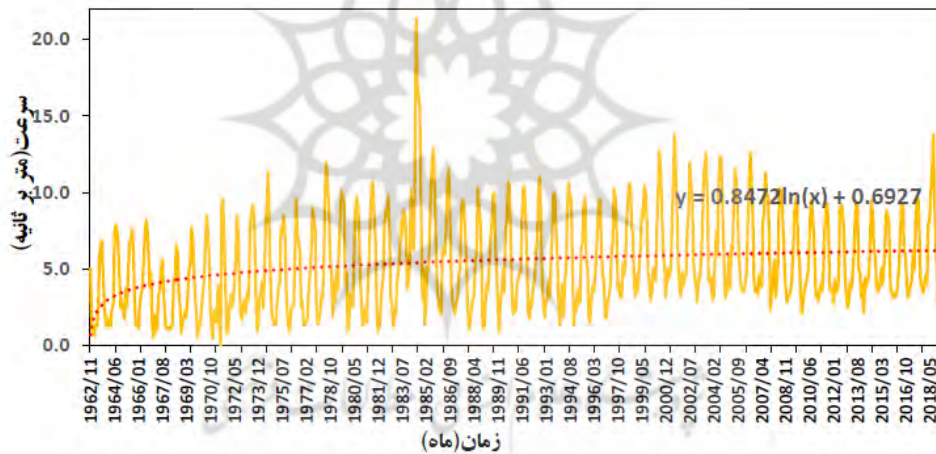
یافته‌های پژوهش

بررسی رژیم باد و حمل ماسه

به منظور امکان‌سنجی انرژی باد، پس از آماده‌سازی داده‌های ساعتی، سرعت و جهت باد مربوط به ایستگاه زابل در محیط اکسل با استفاده از نرم‌افزار WR PLOT، گلباد ایستگاه ترسیم شد (شکل ۳). بر مبنای شکل مربوط به گلباد در این ایستگاه جهت وزش باد غالب از سمت شمال غرب به جنوب شرق است؛ با توجه به گلباد ایستگاه زابل، بیش از ۷ درصد بادهای غالب این ایستگاه سرعتی مساوی با ۶ متر بر ثانیه یا بیشتر از آن دارند که بیان‌کننده عبور از سرعت آستانه فرسایش بادی است. در کنار اطلاعات مربوط به داده‌های باد غالب در این ایستگاه، بررسی روند تغییرات سرعت باد در این ایستگاه در بازه‌های زمانی موجود نشان می‌دهد در طول ۵۶ سال گذشته متوسط سرعت باد در ایستگاه زابل رو به افزایش بوده است؛ به طوری که میانگین سرعت باد از ۲/۵ متر بر ثانیه در ماه در سال ۱۹۶۲ به حدود ۴/۸ متر بر ثانیه در ماه در سال ۲۰۱۸ رسیده است که افزایش ۲/۳ متر بر ثانیه را در این مدت نشان می‌دهد (شکل ۴).



شکل ۳- نمودار گلباد در ایستگاه زابل (نویسندگان، ۱۴۰۱)



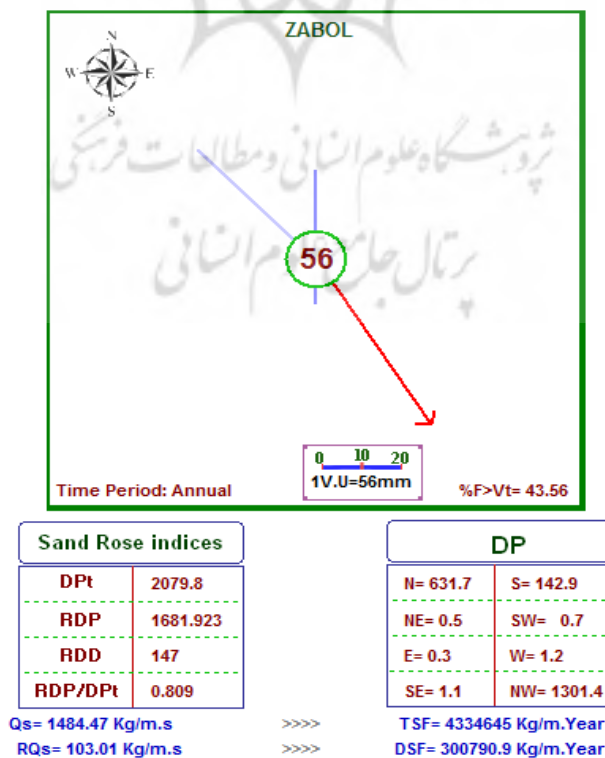
شکل ۴- نمودار تغییرات سرعت باد در ایستگاه زابل (نویسندگان، ۱۴۰۱)

این روند افزایش سرعت باد در منطقه ناشی از افزایش اختلاف گرادیان فشار و دما در منطقه است که خشک شدن دریاچه هامون در مقیاس محلی می‌تواند عمده‌ترین عامل این افزایش باشد. با توجه به روند افزایش سرعت باد در منطقه در دهه‌های اخیر و جهت باد غالب (شمال غربی- جنوب شرقی) می‌توان نتیجه گرفت نواحی شمال غربی شهر زابل منبع اصلی تامین کننده گرد و غبار منطقه است که محل قرارگیری دریاچه هامون است (شکل ۵).



شکل ۵- جهت باد غالب و گردوغبار ورودی بر روی شهر زابل

در ادامه برای بررسی مقدار و چگونگی جابجایی گردو غبار و ذرات ماسه در ایستگاه زابل، از داده‌های بادسنجی ۱۰ سال اخیر این ایستگاه در محیط نرم‌افزار Sand Rose Graph استفاده شد که نتایج پارامترهای آماری برای ایستگاه زابل در شکل (۶) آمده است.

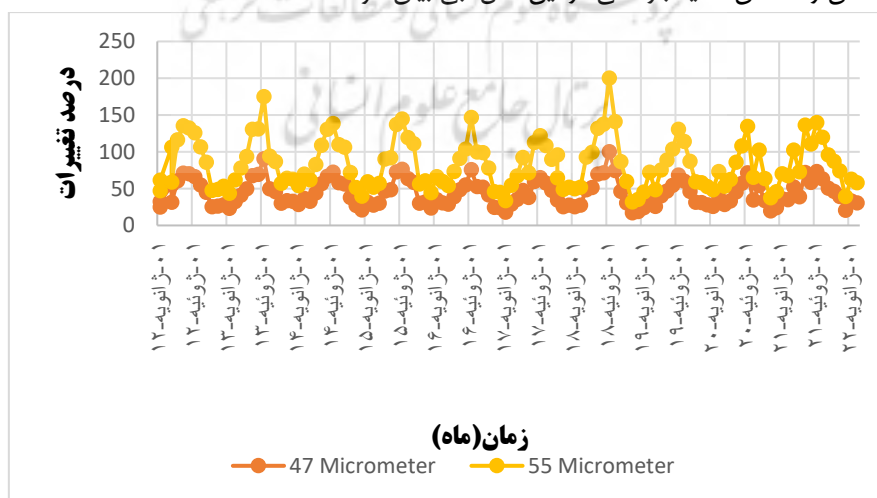


شکل ۶- نمودار گلماسه در ایستگاه زابل (نویسندگان، ۱۴۰۱)

با توجه به نتایج به دست آمده، مقدار پتانسیل حمل ماسه (DPT) در این ایستگاه ۲۰۷۹/۸ است که براساس تقسیم‌بندی فرایبرگر و دین (۱۹۷۹)، ارائه شده در جدول (۱) انرژی باد در این ایستگاه زیاد ارزیابی شده است، ستون بردار توان حمل ماسه با علامت RDP نشان داده شده است. داده‌های این ستون بیان‌کننده این است که بیشترین مقدار توان حمل ماسه برای این ایستگاه برابر با ۱۶۸۱/۱۹ است. شاخص تغییرپذیری جهت‌های باد (UDI) یا همگنی جهت حمل ماسه برابر نسبت مقدار نهایی حمل ماسه به توان حمل ماسه است. براساس این شاخص، تغییرپذیری جهت باد برای ایستگاه زابل در گروه تغییرپذیری کم با طبقه‌بندی بادهای یک جهته و بیان‌کننده شکل‌گیری تپه‌های ماسه‌ای عرضی شکل است. داده‌های ستون جهت خالص حرکت ماسه که با علامت اختصاری RDD نمایش داده می‌شود و به نظر می‌رسد برای ایستگاه زابل تأثیر مستقیم بر روند جابه‌جایی تپه‌های ماسه‌ای در زابل داشته است. مجموع ماسه جابه جاشده (DSF) براساس رابطه لتو- لتو که پیش‌فرض نرم‌افزار این رابطه هم است، بیشترین مقدار ماسه جابه جاشده در ایستگاه زابل را ۳۰۰/۸ تن بر متر در سال و دبی خالص جریان ماسه (RQS) را ۱۰۳ کیلوگرم بر متر در سال نشان می‌دهد که بیان‌کننده مقدار حمل زیاد ماسه در منطقه است.

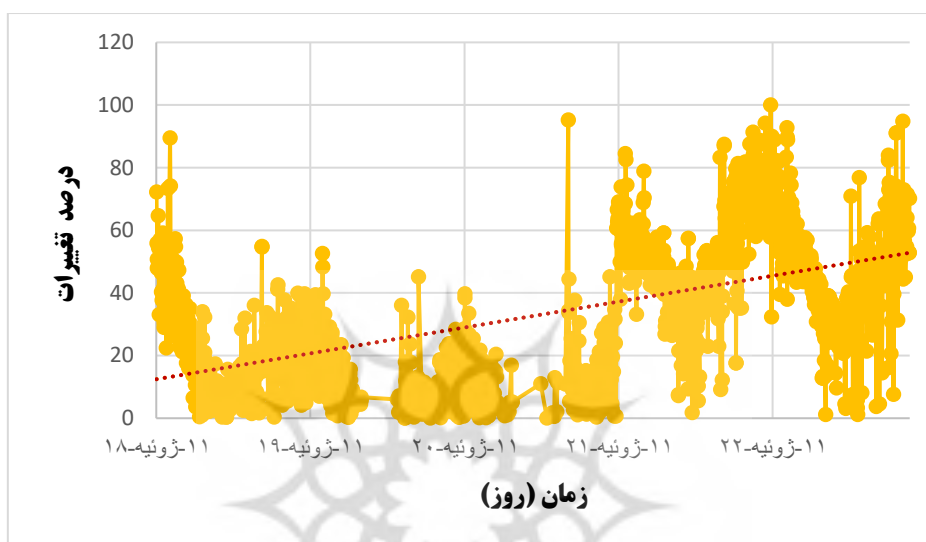
بررسی گرد و غبار معلق در جو با استفاده از شاخص AOD

شاخص AOD معیاری برای تحلیل پدیده گرد و غبار در یک منطقه است که افزایش این شاخص نشان دهنده افزایش غلظت گرد و غبار در اتمسفر می‌باشد. این شاخص شامل دو بخش ذرات گرد و غبار با اندازه کمتر از ۴۷ میکرون و بیشتر از ۵۵ میکرون تقسیم می‌شود. برای پایش تغییرات گرد و غبار در منطقه زابل از سری تصاویر ۱۰ ساله سنجنده مودیس در محیط گوگل ارث انجین استفاده و نمودار تغییرات زمانی میزان گرد و غبار از سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۳ منطقه ترسیم و استخراج شد (شکل ۷). همانگونه که در شکل (۷) مشاهده می‌شود بیشترین درصد میزان گرد و غبار با اندازه بیشتر از ۵۵ میکرون و کمتر از ۴۷ میکرون در تابستان هر سال و با کاهش رطوبت سطح و افزایش دما و رخداد بادهای ۱۲۰ روزه سیستان رخ داده است، از طرفی بالاترین درصد تغییرات مقدار گرد و غبار (تا دوبرابر) در جولای (مرداد) ۲۰۱۸ رخ داده است که می‌توان علت آن را کاهش شدید بارندگی در این سال آبی بیان کرد.



شکل ۷- نمودار درصد تغییرات ذرات گرد و غبار منطقه زابل

برای پایش تغییرات ذرات معلق در هوا (آئروسول) به عنوان یکی از شاخص‌های رخداد گردوغبار و فرسایش بادی در منطقه زابل از مجموعه سری تصاویر مربوط به آئروسول سنجندهٔ مودیس استفاده شد که وابستگی متقابلی با میزان گرد و غبار و وزش بادهای ۱۲۰ روزه (اردیبهشت تا شهریور) در زابل را نشان می‌دهد. همانطور که در نمودار (۸) مشخص است درصد تغییرات گرد و غبار موجود در هوا در دورهٔ ۵ سالهٔ ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳ روند افزایشی قابل توجهی داشته است که نشان دهنده افزایش درصد ذرات معلق در هوا (آئروسول) به واسطه گسترش فرسایش بادی در منطقه دارد (شکل ۸).



شکل ۸- نمودار درصد تغییرات میزان ذرات گردوغبار در منطقهٔ زابل از سال ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳

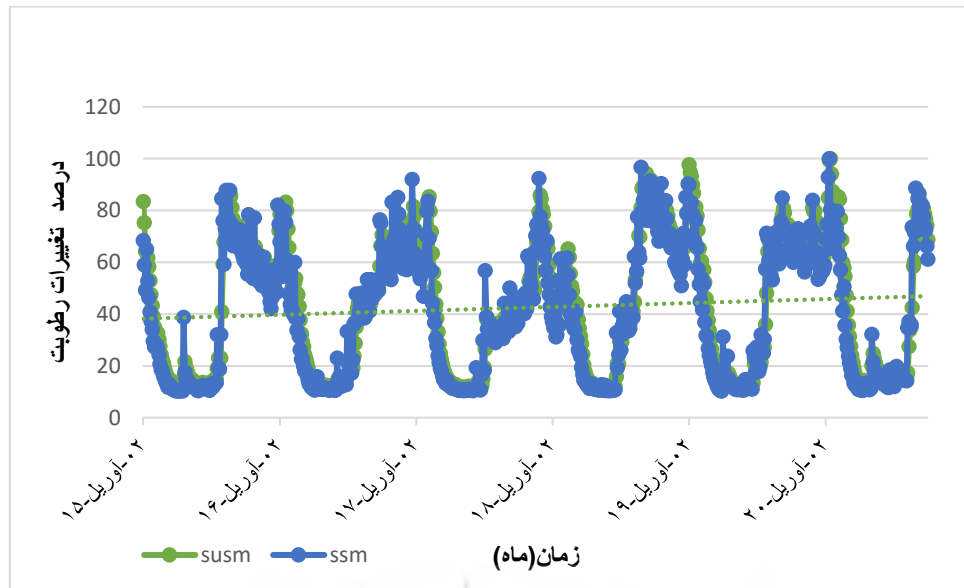
بررسی رطوبت خاک

یکی از عوامل ایجاد و گسترش فرسایش بادی و جابجایی ذرات خاک، کاهش رطوبت خاک در نتیجه کاهش بارندگی و یا افزایش دمای میانگین در درازمدت و افزایش مقدار تبخیر و تعرق در یک منطقه است. برای پایش رطوبت خاک از سری تصاویر ماهوارهٔ $Smap^1$ شامل SSM^2 و $SUSM^3$ که به ترتیب بیانگر درصد رطوبت سطح خاک و درصد رطوبت زیرسطح خاک هستند، در بازهٔ زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۳ استفاده شد. سنجندهٔ $Smap$ با استفاده از امواج مایکروویو باند L فعال تصویربرداری می‌کند و به دلیل بلند بودن طول موج L و قابلیت نفوذ در سطح، امکان اندازه‌گیری رطوبت سطحی و زیرسطحی خاک را دارد. با توجه به اینکه این مجموعه تصاویر برای مناطق مختلف از سال ۲۰۱۵ به بعد موجود می‌باشد، روند تغییرات درصد رطوبت خاک سطحی و زیرسطحی منطقه زابل در بازهٔ زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۳ مورد پایش قرار گرفت. همانگونه که در شکل (۹) مشخص است درصد رطوبت سطحی و زیر سطحی نسبتاً بر هم منطبق بوده و بیشترین درصد رطوبت خاک مربوط به ماه فوریه (بهمن) تا آپریل (فروردین) و کمترین درصد رطوبت خاک مربوط به جولای (تیر) تا سپتامبر (شهریور) است که منطبق با رخداد بادهای ۱۲۰ روزه منطقه زابل دارد.

1. Soil Moisture Active Passive

2. Surface soil moisture

3. Subsurface soil moisture



شکل ۹- روند تغییرات درصد رطوبت سطحی و زیرسطحی خاک منطقه زابل (۲۰۲۳-۲۰۱۵)

تجزیه و تحلیل نتایج بدست آمده از ویژگی باد شامل جهت غالب و توان حمل ماسه در کنار تغییرات ذرات و گرد و غبار و آئروسول و رطوبت خاک شهرستان زابل نشان می‌دهد عامل اصلی تشدید گردو غبار در این محدوده، اقلیم است که در سطح جهانی تغییرات اقلیمی و بی‌نظمی‌های به وجود آمده در بارش و در سطح محلی خشک شدن دریاچه هامون را می‌توان بیان کرد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش با بررسی گلباد ایستگاه زابل، جهت باد غالب منطقه، شمال غربی-جنوب شرقی تعیین شد. از طرفی، بررسی روند تغییرات سرعت باد در ایستگاه زابل نشان می‌دهد در طول ۵۶ سال گذشته متوسط سرعت باد در ایستگاه زابل رو به افزایش بوده است؛ به طوری که میانگین سرعت باد از $\frac{2}{5}$ متر بر ثانیه در سال ۱۹۶۲ به حدود $\frac{4}{8}$ متر بر ثانیه در ماه در سال ۲۰۱۸ رسیده است که افزایش $\frac{2}{3}$ متر بر ثانیه را در این مدت نشان می‌دهد. مقدار پتانسیل حمل ماسه (Dpt) در این ایستگاه $\frac{2079}{8}$ است که براساس تقسیم‌بندی فرایبرگر و دین انرژی باد در این ایستگاه زیاد ارزیابی شده است. شاخص تغییرپذیری (UDI) جهت باد برای ایستگاه زابل در گروه تغییرپذیری کم با طبقه‌بندی بادهای یک جهته و کانالیزه شده است که خود شدت فرسایش و تولید گردوغبار را به شدت افزایش می‌دهد. بیشترین مقدار ماسه جابه جاشده (DSF) در ایستگاه زابل را $\frac{300}{8}$ تن بر متر در سال و دبی خالص جریان ماسه (RQS) را 103 کیلوگرم بر متر در سال نشان می‌دهد که بیان‌کننده مقدار حمل زیاد ذرات ماسه در منطقه است.

در کنار بررسی ویژگی‌های باد منطقه، تغییرات شاخص گرد و غبار (AOD) و آئروسول نیز با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس در محیط اِرت انجین در سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۳ انجام شد که نتایج نشان داد بیشترین درصد میزان گرد و غبار با اندازه بیشتر از 55 میکرون و کمتر از 47 میکرون در تابستان هر سال و با کاهش رطوبت سطح و افزایش دما و رخداد بادهای 120 روزه سیستان رخ داده است از طرفی بالاترین درصد تغییرات مقدار گرد و غبار (تا دو برابر) در جولای (مرداد) ۲۰۱۸ رخ داده است که می‌توان علت آن را کاهش شدید بارندگی در این سال آبی بیان کرد. همچنین بررسی درصد تغییرات گرد و غبار موجود در هوا در دوره ۵ ساله ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳ روند افزایشی قابل توجهی داشته است که نشان دهنده افزایش درصد ذرات معلق در هوا به واسطه گسترش فرسایش بادی در منطقه است.

در ادامه رطوبت خاک منطقه با استفاده از سری تصاویر ماهواره Smap شامل تغییرات درصد رطوبت خاک سطحی و زیرسطحی منطقه زابل در محیط گوگل ارث انجین و بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۳ مورد پایش قرار گرفت که نتایج نشان داد بیشترین درصد رطوبت خاک مربوط به ماه فوریه (۱۲ بهمن تا ۹ اسفندماه) تا آوریل (۱۲ فروردین تا ۱۰ اردیبهشت ماه) و کمترین درصد رطوبت خاک مربوط به جولای (۱۱ خرداد تا ۹ تیر ماه) تا سپتامبر (۱۰ شهریور تا ۸ مهرماه) است که منطقه با رخداد بادهای ۱۲۰ روزه منطقه زابل دارد. نتایج بدست آمده از این پژوهش نشان می‌دهد علت اصلی رخداد گرد و غبار در منطقه زابل افزایش روند سرعت باد منطقه در بلند مدت و افزایش کانون های تامین کننده گردوغبار در اطراف منطقه است که در کنار تغییرات اقلیمی و کاهش بارندگی و رخداد خشکسالی، در مقیاس محلی هم خشک شدن دریاچه هامون در نتیجه عدم پایداری دولت افغانستان به قرارداد ۱۳۵۱ کابل مبنی بر ورود ۸۵۰ میلیون مترمکعب آب در سال به دریاچه هامون، بر این موضوع تاثیر قابل توجهی داشته است. با توجه به قرارگیری دریاچه خشک شده هامون در شمال غرب و غرب شهر زابل، و جهت باد غالب می‌توان گفت عمده ذرات گرد و غبار حمل شده به طرف زابل از این منطقه منشا می‌شود. بنابراین تنها راهکار مقابله با وضعیت کنونی زابل می‌تواند احیای دریاچه هامون و تثبیت رسوبات کف دریاچه هامون باشد. از طرفی وجود باد کانالیزه و غالب شمال غربی_جنوب شرقی در منطقه شرایط برای احداث نیروگاه بادی در این منطقه را با توجه به بحران انرژی کشور فراهم کرده است که با برنامه‌ریزی و سرمایه‌گذاری مناسب می‌توان از این موضوع استفاده بهینه کرد.

منابع

- احدی، پ. خالدی، ش. احمدی، م. (۱۴۰۰). پایش آماری پدیده گردوغبار در استان خوزستان با رویکرد ساعتی، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال بیست و یکم، شماره ۶۰، ۲۷۷-۲۵۹.
- احمدیان، م. (۱۳۸۷). بیابان (نگرشی سیستمی به فرایند بیابان‌زایی و بیابان‌زدایی، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، دوره ۱۴، شماره ۲-۱ (پیاپی ۵۲ و ۵۳). ۱۴۴-۱۵۹.
- شریفی پیچون، م.، غفاریان، ح.، میری، ز. (۱۳۹۹). بررسی تغییرات ارتفاعی ریگ زرین با استفاده از سریهای زمانی تصاویر ماهواره‌های (طی دوره ۱۹۷۷-۲۰۱۷)، مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال هشتم، شماره ۴.
- لطیفی، ل. (۱۳۸۵). بررسی روند پیشروی تپه‌های ماسه‌ای با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در خشکسالی‌های اخیر در شمال و شرق دشت سیستان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد، گروه جغرافیا.
- مقصودی، م. محمدی، الف. خانباثی، ز. محبوبی، ص. بهاروند، م. حاجی‌زاده، ع. (۱۳۹۶). پایش جابجایی ریگ و برخان‌های غرب لوت (پیشوئیه)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال پنجم، شماره ۱، صص ۱۸۹-۱۷۶.
- میری، پ. راشکی، ع. عادل، س. (۱۳۹۶). بررسی تغییرات زمانی و مکانی شاخص‌های گرد و غبار در شرق خراسان بر پایه داده‌های ماهواره‌ای. جغرافیا و مخاطرات محیطی. ۲۰-۱.
- یمانی، م. (۱۳۹۳). سیکلون حرارتی لوت و تاثیر آن در لندفرم‌های بادی (ایده‌ای در حوزه دانش ژئومورفولوژی ایران)، نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، سال بیست و پنجم، پیاپی ۵۳، شماره ۱.

- Bourke, M.C., R.C. Ewing, Finnegan, H. A. McGowan, (2009). Sand dune movement in the Victoria Valley, Antarctica. *Geomorphology*, 109; 148-160.
- Bagnold, R. A., (1941), *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*, Methuen, London.
- Beegum, N., Gherboudi, I., Chaouch, N., Temimi, M., Ghedira, H., (2018). Simulation and analysis of synoptic scale dust storms over the Arabian Peninsula. *Atmospheric Research*. 199: 62 -81.

- Dong, Z.B., Wang, T., Wang, X.M., (2004). *Geomorphology of the megadunes in the Badain Jaran desert*, *Geomorphology* 60, 191- 203.
- Danesh-Shahraki, M.; Shahriari, A.; Ganjali, M.; & A. Bameri,(2017). *Seasonal and spatial variability of airborne dust loading rate over the Sistan plain cities and its relationship with some climatic parameters*, *Journal of Water and Soil Conservation*, 23(6), 199-215.
- Deep, A.; Pandey, C.; Nandan, H.; Singh, N.; Yadav, G.; Joshi, P. C.; Purohit, K. D.; & S. C. Bhatt,(2021). *Aerosols optical depth and Ångström exponent over different regions in Garhwal Himalaya, India*, *Journal of Environ Monitoring Assessment*, 193: 324.
- Fryberger, S.G., Dean, G., (1979). *Dune forms and wind regime*, U.S. Geological Survey Professional Paper 1052-F, pp 137- 169.
- Fryberger, S.G., Al-Sari, A.M., Clisham, T.J., Rizvi, S.R., Al-Hinai, K.G., (1984). *Wind sedimentation in the Jafurah Sand Sea, Saudi Arabia*, *Sedimentology* 31, pp 413- 431.
- Hereher, M., (2018). *Geomorphology and drift potential of major aeolian sand deposits in Egypt*, *Geomorphology*, Vol 304, pp 113- 120.
- Hamdan, M.A., Refaat, A.A., Abdel Wahed, M., (2016). *Morphologic characteristics and migration rate assessment of barchans dunes in the SoutheasternWestern Desert of Egypt*, *Geomorphology* 257, 57- 74.
- Hermas, E., Leprince, S., El-Magd., I.A., (2012). *Retrieving sand dune movements using sub-pixel correlation of multi-temporal optical remote sensing imagery, northwest Sinai Peninsula, Egypt*. *Remote Sensing of Environment* 121, 51- 60.
- Hesp, P., Davidson-Arnott, R., Walker, I., Ollerhead, J., (2005). *Flow dynamics over a foredune at Prince Edward Island Canada*, *Geomorphology* 65, 71- 84.
- Kuriyama, Y., Mochizuki, N., Nalashima, T., (2005). *Influence of vegetation on Aeolian sand transport rate from a backshore to a foreshore at Hasaki, Japan*, *Sedimentology* 52, 1123- 1132.
- Koren, I., Y. J. Kaufman, R. Washington, M. C. Todd, Y. Rudich, J. V. Martins, and D.Rosenfeld.(2006). *The Bodele depression: a single spot in the Sahara that provides most of the mineral dust to the Amazon forest*, *Environmental Research Letters*, 1(1).
- Karaoglu, M. , Simsek,U., Erdel,E., Tohumcu,F.,(2018). *A CASE STUDY: WIND CHARACTERISTICS OF IGDİR PROVINCE IN TERMS OF WIND EROSION AND INTRODUCTION OF SECOND WIND EROSION AREA*, *Fresenius Environmental Bulletin*, Volume 27 – No. 11/2018 pages 7460-7469.
- Lancaster, N., Nickling, W.G., Gillies, J.A., (2010). *Sand transport by wind on complex surfaces: field studies in the McMurdo Dry Valleys, Antarctica*, *J. Geophys. Res.* 115, F03027.
- Liu, L.Y., Skidmore, E., Hasi, E., Wagner, L., Tatarko, J., (2005). *Dune sand transport as influenced by wind directions, speed and frequencies in the Ordos Plateau, China*, *Geomorphology* 67, 283- 297.
- Maghsoudi, M., Navidfar, A., Mohammadi, A., (2017). *The sand dunes migration patterns in Mesr Erg region using satellite imagery analysis and wind data*, *Natural Environment Change Vol 3, No 1, Winter & Spring 2017*, pp 33- 43.
- Mahowald, N.M., Bryant, R.G., Corral, J., and Steinberger, L.(2003). *Ephemeral lakes and desert dust sources*, *Geophysical Research Letters*,. 30, NO. 2, 1074.
- McVicar, T.r., Van Niel, T.G.,Li, L.T. Roderick, M.L., Rayner, D.P., Ricciardulli,L., Donohue, R.J.(2008).*Wind speed climatology and trends for Australia, 1975-2006: capturing the stilling phenomenon and comparision with near-surface reanalysis output*. *Geophys. Res. Lett.*35.
- Mei, D.; Xiushan, L.; Lin, S.; & W. Ping, 2008. *A duststorm process dynamic monitoring with multitemporal MODIS data*. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.*, 37, 965-970

- Miri, A., Ahmadi, H., Ekhtesasi, m.r., Panjehkeh, N., Ghanbari, A. (2009). *Environmental and socio-economic impacts of dust storms in Sistan Region, Iran. International Journal of Environmental Studies*; 66(3): 343–355.
- Mobasheri, A.; Kalamegam, G.; Musumeci, G.; & M. E. Batt, 2014. *Chondrocyte and mesenchymal stem cell-based therapies for cartilage repair in osteoarthritis and related orthopaedic conditions, Maturitas* 78, 188–198. doi: 10.1016/j.maturitas.2014.04.017
- Pye, K., Tsoar, H., (2009). *Aeolian Sand and Sand Dunes*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Germany.
- Rashki, A., Kaskaoutis, D. G., Goudie, A. S., & Kahn, R. A. (2013). *Dryness of ephemeral lakes and consequences for dust activity: the case of the Hamoun drainage basin, southeaster in Iran. Science of the Total Environment*, 463, 552-564.
- Ramanathan, V., & P. J. Crutzen., (2003). *New directions: Atmospheric brown clouds. Atmosphere Environment*. 37, 4033-4035.
- Taze Din, S.S.(1986). *Some aspect of sand stabilization in Egypt. In; El-Baz, F., Hassan, M.F.A.(), Physics of Desertification. Martinus-Nijhoff, Dordrecht, pp: 118-126.*
- Tsoar, H., (2005). *Sand dunes mobility and stability in relation to climate, Phys. A* 357, 50- 56.
- Wang, X., Eerdun, H., Zhou, Z., Liu, X., (2007). *Significance of variations in the wind energy environment over the past 50 years with respect to dune activity and desertification in arid and semiarid northern China, Geomorphology* 86, pp 252- 266.
- Wang, Z.Y., Han, Z.W., Zhang, W.M., Zhao, A.G., (2007). *Migration of sand dunes on the northern Alxa Plateau, Inner Mongolia, China, J. Arid Environ.* 70, pp 80- 93.
- Wiggs, G.F.S., Atherton, R.J., Baird, A.J., (2004). *Thresholds of aeolian sand transport: establishing suitable values, Sedimentology* 51, 95- 108.
- Zhang, G.F., Molina, C.A., Shi, P., Lin, D., Jose A., Feng Kong, G., Chen, D., (2019). *Impact of nearsurface wind speed variability on wind erosion in the eastern agro-pastoral transitional zone of Northern China (1982–2016), Agricultural and Forest Meteorology* 271, pp 102- 115.