

کاربرد الگوریتم هوش جمعی کلونی زنبورهای مصنوعی در بهینه‌سازی تخمین و پهنه‌بندی شدت فرسایش باد با استفاده از داده‌های ژئومورفولوژی (مطالعه موردی: حوضه آبریز دشت بیرجند، استان خراسان جنوبی)

مهدی ثقفی* - استادیار ژئومورفولوژی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
محمدعلی مدرس - دانشجوی دکتری تبدیل انرژی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

پذیرش: ۱۳۹۵/۰۲/۲۶

وصول: ۱۳۹۴/۱۱/۰۲

چکیده

برای تخمین شدت فرسایش باد که وسیع‌ترین قلمرو فعالیت را دارد، استفاده از مدل‌های منطقه‌ای اجتناب‌ناپذیر است. این مدل‌ها، تجربی بوده و مبتنی بر مؤلفه‌هایی هستند که از طریق امتیازدهی در آستانه‌های تعیین‌شده به تخمین فرسایش منجر می‌شوند. تفاوت تجربیات و متغیر بودن مؤلفه‌های ورودی این مدل‌ها، باعث بروز ناسازگاری و کاهش قابلیت اعتماد تخمین‌ها می‌شود. هدف از این مطالعه، بهینه‌سازی تخمین فرسایش باد در حوضه آبریز دشت بیرجند از طریق کمیته‌نمودن ناسازگاری امتیازات مؤلفه‌های ورودی مدل مورد استفاده است. برای این منظور، مدل تجربی پهنه‌بندی شدت فرسایش باد سازمان جنگل‌ها و مراتع ایران با استفاده از الگوریتم هوش جمعی کلونی زنبورهای مصنوعی، بهینه‌سازی شده است. پس از تعیین امتیازات مؤلفه‌های مدل اولیه، منطقه مورد مطالعه به پیکسل‌های 200×200 مترمربعی تبدیل و با استفاده از دستگاه مختصات قطبی به ۸۲ ناحیه تقسیم شد. سپس الگوریتم بهینه‌سازی کلونی زنبورها در سه مرحله شامل: ۱- تخصیص، ۲- پایش و ۳- نتیجه‌گیری توسط زنبورها، اجرا و پیکسل‌های با بیشترین پتانسیل فرسایش شناسایی شده‌اند. نتایج، نشانگر انتقال حدود ۴۹٪ از مساحت طبقات فرسایش باد در مدل سازمان جنگل‌ها و مراتع ایران به طبقات فرسایشی بالاتر در روش الگوریتم کلونی زنبورها است. بر این اساس، الگوریتم کلونی زنبورها حساسیت بسیار زیادی در ارائه طبقه‌بندی کلاس‌های فرسایش باد دارد. آزمون واریانس مساحت کلاس‌های فرسایشی حاصل از دو روش، حاکی از قابلیت اطمینان بیشتر به نتایج روش الگوریتم کلونی زنبورها است. بیشترین نرخ فرسایش در لندفرم مخروط‌افکنه‌ها رخ داده و بیش از ۹۰٪ کانون‌های فرسایش در واحد ژئومورفولوژیک دشت سر واقع شده است.

واژگان کلیدی: فرسایش باد، پهنه‌بندی، مدل سازمان جنگل‌ها و مراتع ایران، الگوریتم بهینه‌سازی، کلونی زنبورهای مصنوعی، دشت بیرجند.

مقدمه

حدود ۴۷٪ از خشکی‌های کره زمین در قلمرو مناطق خشک قرار دارد (توماس^۱، ۲۰۰۰: ۲۱۵). سازمان ملل متحد اصطلاح بیابان‌زایی را کاهش حاصلخیزی خاک در مناطق خشک، نیمه‌خشک و خشک مجاور مناطق مرطوب در نتیجه عوامل مختلف از قبیل نوسانات آب‌وهوایی و فعالیت‌های انسانی تعریف کرده است (بولگوبرا^۲ و همکاران، ۲۰۱۴). بیابان‌زایی به طور دائم و البته نه انحصاری در مناطق خشک اتفاق می‌افتد (اسوارن^۳ و همکاران، ۲۰۰۱). فرسایش و کاهش حاصلخیزی خاک از جمله پیامدهای جهانی می‌باشد و حدود ۲۸٪ از اراضی قابل سکونت زمین تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی است که کاهش حاصلخیزی خاک را به دنبال دارند (اولدمن و همکاران، ۱۹۹۱: ۱۹؛ اولدمن^۴، ۱۹۹۴: ۱۰۷؛ کالوت^۵ و همکاران، ۲۰۰۰؛ پراسپرو^۶ و همکاران، ۲۰۰۲). بر اساس پژوهش‌های انجام‌شده گردوغبارهای ریز اتمسفری حاصل از فرسایش باد اثرات سوء مختلفی را بر سلامتی جوامع انسانی دارند (اسمیت و لی^۷، ۲۰۰۳، گرiffin^۸ و همکاران، ۲۰۰۱).

برای بررسی تغییرات زمانی و مکانی فرسایش باد، ایجاد و توسعه شیوه‌های تخمین فرسایش در مقیاس مطالعات میدانی (۱۰۰۰ مترمربع) تا مقیاس مطالعات منطقه‌ای (۱۰۰۰ کیلومترمربع) ضروری است. نقشه‌های موجود کنونی در خصوص الگوی مکانی و توزیع پهنه‌های مستعد فرسایش باد مبتنی بر: ۱- شناسایی مناطق متأثر از فرسایش باد (کارتز^۹، ۱۹۸۵: ۸۴؛ مزوسی و سزتماری^{۱۰}، ۱۹۹۸) ۲- داده‌های مشاهداتی حاصل از بررسی فراوانی و توزیع توفان‌های گردوغبار (جودی و میدلتون^{۱۱}، ۲۰۰۶) ۳- تجزیه و تحلیل تصاویر ماهواره‌ای (پراسپرو و همکاران، ۲۰۰۲؛ واشینگتن^{۱۲} و همکاران، ۲۰۰۳) و ۴- برخی مطالعات موردی با استفاده از مدل‌های مکانی فرسایش (کوئن^{۱۳} و همکاران، ۲۰۰۴؛ بوهرنر^{۱۴} و همکاران، ۲۰۰۳) است. با وجود اینکه برای شناسایی خطر فرسایش باد مدل‌های مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد که نتایج انتشاریافته حاکی از کارایی آنها در قلمروهای کوچک (کمتر از ۱۰۰ کیلومترمربع) است اما هیچ‌کدام از آنها برای تشخیص الگوهای مکانی درازمدت فرسایش خاک و تغییرات فرسایش‌پذیری در مقیاس منطقه‌ای کاربرد ندارند (بوهرنر و همکاران، ۲۰۰۳؛ کوئن و همکاران، ۲۰۰۴). از این رو به دلیل گستردگی استفاده از مدل‌های تخمین فرسایش باد، افزایش روایی و اعتبار آنها در گستره‌های جغرافیایی وسیع‌تر ضروری است (لورنس^{۱۵}، ۲۰۰۴). هدف از این مطالعه، تخمین فرسایش باد در حوضه آبریز دشت بیرجند بر اساس روش تجربی سازمان تحقیقات جنگل‌ها و مراتع ایران^{۱۶} و بهینه‌سازی آن با استفاده از الگوریتم کلونی زنبورهای مصنوعی^{۱۷} است. مدل سازمان تحقیقات جنگل‌ها و مراتع ایران از جمله

- 1- Thomas
- 2- Boulghobra
- 3- Eswaran
- 4- Oldeman
- 5- Callot
- 6- Prospero
- 7- Smith & Lee
- 8- Griffin
- 9- Carter
- 10- Mezosi & Sztatmari
- 11- Goudie & Middleton
- 12- Washington
- 13- Coen
- 14- Böhner
- 15- Lawrence
- 16- Iranian Research Institute of Forest and Rangeland (IRIFR)
- 17- Artificial bee colony algorithm

مدل‌هایی است که به دلیل پیچیدگی روابط متقابل مؤلفه‌های آن و نیز تعمیم نتایج، محدودیت‌هایی در آن وجود دارد. تخصیص امتیازات مؤلفه‌های مدل با کمک اطلاعات میدانی و نظرات کارشناسی باید انجام گیرد که به دلیل تفاوت تجربیات و متغیر بودن مؤلفه‌های ورودی مدل اتفاق نظر در این خصوص وجود ندارد. این موضوع، با توجه به وجود روابط متقابل بین مؤلفه‌های ورودی و مستقل نبودن آنها از یکدیگر، باعث بروز ناسازگاری در مدل و تقلیل قابلیت اعتماد به نتایج می‌شود. در این پژوهش، برای رفع ناسازگاری مؤلفه‌ها و تعدیل اثر تجارب متفاوت در تخصیص امتیازات، استفاده از روش هوش جمعی کلونی زنبورهای مصنوعی مورد توجه قرار گرفته است. الگوریتم‌های اکتشافی مانند کلونی زنبورها برای حل مسائل بهینه‌سازی عددی و توابع ترکیبی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این الگوریتم، با مجموعه‌ای از راه‌حل‌های مبتنی بر جمعیت عمل کرده و در جهت بهبود آنها تلاش می‌کند.

معرفی منطقه مورد بررسی

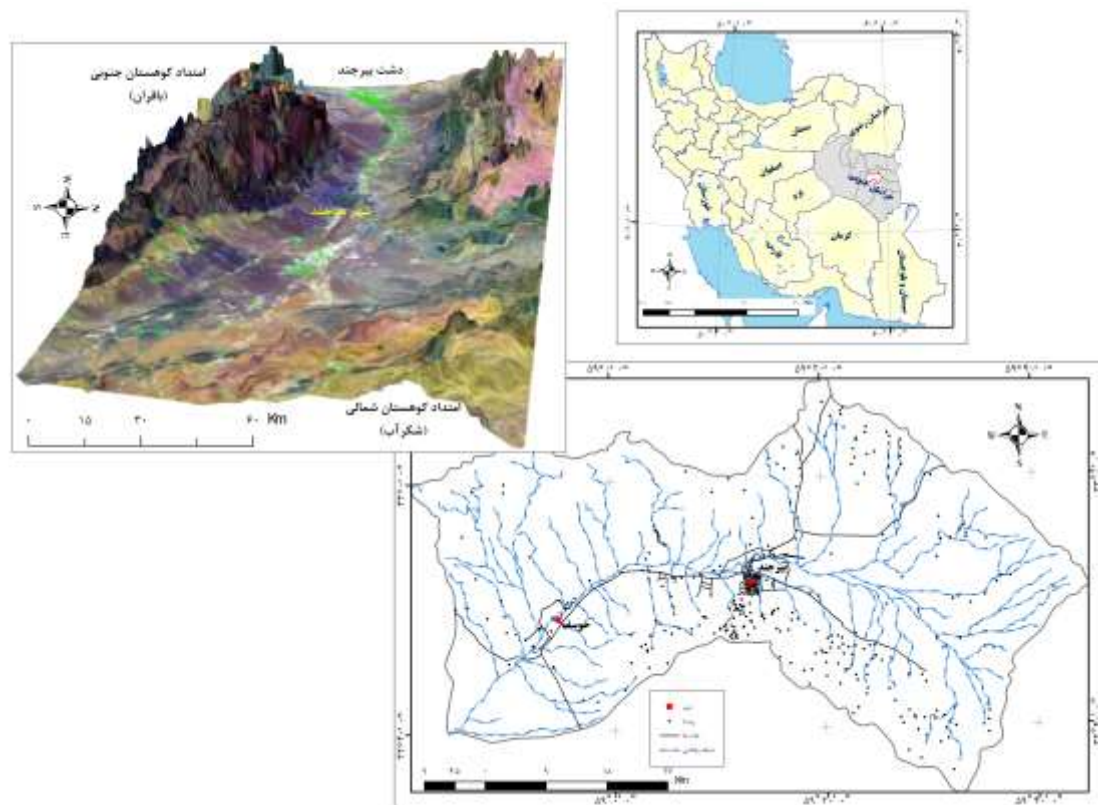
حوضه آبریز دشت بیرجند در ۳۲ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۸ دقیقه عرض جغرافیایی شمالی و ۵۸ درجه و ۴۱ دقیقه تا ۵۹ درجه و ۴۴ دقیقه طول جغرافیایی شرقی در استان خراسان جنوبی قرار دارد (شکل ۱). وسعت آن ۳۴۲۵ کیلومتر مربع بوده که از این میزان، ۹۸۰ کیلومتر مربع دشت و مابقی آن کوهستانی است. دشت، مستطیل شکل بوده و پیرامون آن را ارتفاعات دربر گرفته‌اند. مهم‌ترین ناهمواری ساختمانی منطقه را رشته‌کوه باقران با امتداد مداری تشکیل داده که تفکیک دو دشت در مجاورت هم با روندی مشابه را سبب شده است (شکل ۱). مرز بین رشته‌کوه باقران و دشت بیرجند تماماً گسلی است (خطیب و زرین‌کوب، ۱۳۸۰؛ خطیب، ۱۳۶۸: ۹۴). حداکثر ارتفاع حوضه آبریز دشت بیرجند ۲۷۵۰ متر در ارتفاعات باقران است و حداقل ارتفاع آن ۱۱۸۰ متر در محل خروجی و در غرب دشت قرار دارد. دشت بیرجند که شهر بیرجند در مرکز آن واقع شده، دشتی آبرفتی است که شیب زمین در قسمت‌های شرقی آن زیاد و هرچه به سمت غرب و انتهای دشت حرکت می‌کنیم شیب کم و سطح زمین تقریباً مسطح می‌شود.

رود شور بیرجند پس از زهکشی این دشت، در نهایت وارد حوضه آبریز چاله لوت می‌شود، عبور آن از خط القعر دشت باعث تقسیم آن به دو نیمه نامتقارن شمالی و جنوبی شده به طوری که نیمه شمالی آن از نیمه جنوبی وسیع‌تر است. متوسط ۵۰ ساله درجه حرارت منطقه مورد مطالعه (۲۰۱۴-۱۹۶۴) در محل ایستگاه سینوپتیک شهر بیرجند، ۱۶/۴ درجه سانتی‌گراد و ریزش‌های جوئی آن ۱۷۷ میلی‌متر است. اقلیم دشت از نوع نیمه‌خشک سرد با کمبود بارش در همه فصل‌ها تعیین شده است (ربیعی، ۱۳۹۰: ۴۳). حوضه مورد مطالعه تا حد زیادی متأثر از فعالیت‌های ماگمایی و عملکرد تکتونیکی فشاری حاکم بر آن قبل و بعد از فرایندهای رسوب‌گذاری است (ثقفی و ربیعی گسک، ۱۳۹۴: ۱۲۶). عمده‌ترین رخنمون‌های سنگی رشته‌کوه‌های باقران را آمیزه‌های افیولیتی تشکیل می‌دهد که از نظر سن به قبل از کرتاسه تا کرتاسه فوقانی نسبت داده می‌شوند (اشتوکلین^۱، ۱۳۶۸: ۵۹). تعریف ارائه‌شده برای افیولیت‌ها در کنگره بین‌المللی پنروز^۲ در سال ۱۹۷۲ بدین شرح است که در یک افیولیت کاملاً توسعه‌یافته، انواع مجموعه‌های سنگی به صورت متوالی و از قاعده به طرف بالا دیده می‌شوند (نیکولز^۳ و همکاران، ۲۰۰۲: ۱۱۳).

1- Ashtokelin

2- Penruz

3- Nichols



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز دشت بیرجند در استان خراسان جنوبی

در ارتباط با قلمرو فعالیت فرسایش باد از منظر ژئومورفولوژی، واحدهای ژئومورفولوژی دشتهای هموار و تپه‌ماهورها که لندفرم‌های ویژه‌ای را در خود جای داده‌اند، مستعد فرسایش بادی هستند. بر این اساس، واحد تپه‌ماهور منطقه مورد مطالعه متشکل از رسوبات رخساره فیلیش است که از نظر زمانی متعلق به کرتاسه فوقانی و پالئوسن هستند و عمدتاً از شیل‌های سبزرنگ، ماسه‌سنگ، سیلت سنگ و نیز شیل‌های فیلیتی تشکیل شده است. تراس‌های آبرفتی مهم‌ترین لندفرم‌های موجود در این واحد هستند که با اختلاف ارتفاع حدود ۷۰-۵۰ متر به اراضی پست مجاور مشرف می‌باشند (ثقفی و ربیعی گسک، ۱۳۹۴: ۱۲۶). یک روند مهم و قابل ملاحظه از این عوارض با امتداد شرقی - غربی در بخش شرقی شهر بیرجند واقع است که در برخی موارد توسعه شهر در این بخش را محدود نموده است. این تراس‌ها از رسوبات فیلیشی تشکیل شده‌اند و به دلیل قابلیت نفوذپذیری اندک و نازک بودن قشر خاک روی آنها فاقد پوشش گیاهی و برهنه بوده و برای فرسایش باد بسیار مستعد هستند.

سازندهای جوان تر منطقه مورد مطالعه به طور عمده متشکل از آندزیت، داسیت، توف‌های داسیتی، توف و مارن توفی، مارن، ماسه‌سنگ، شیل و کنگلومرا است که لیتولوژی دشتهای هموار در دو قلمرو پدیمنت‌ها و دشتهای سیلابی را تشکیل داده‌اند. دشتهای سیلابی در امتداد مسیر رودخانه اصلی، تحت نام رود شور بیرجند قرار گرفته‌اند. این واحد ژئومورفولوژی از رسوبات آبرفتی عهد حاضر تشکیل شده است. مهم‌ترین لندفرم واقع در واحد پدیمنت، مخروط‌افکنه‌هایی است که متکی بر دامنه شمالی کوهستان باقران بوده و تعداد آنها به ۱۷ عدد می‌رسد (امیراحمدی و همکاران، ۱۳۹۰). در نیمه شمالی نیز مخروط‌افکنه‌های محدود، منفرد و به نسبت کوچکتری گسترده شده‌اند. زمین‌های کشاورزی واقع بر سطح این مخروط‌افکنه‌ها از اهمیت بسیاری برای ساکنین برخوردار هستند. بخش انتهایی تمامی مخروط‌افکنه‌های منطقه مورد مطالعه به محیط آبرفتی ناشی از فعالیت رودخانه

اتفاقی بیرجند منتهی می‌شود (ثقفی، ۱۳۸۹).

مواد و روش‌ها

شیوه مورد استفاده در این پژوهش، شامل تلفیق نتایج یک مدل تجربی برای تخمین فرسایش باد و الگوریتم بهینه‌سازی هوش جمعی کلونی زنبورهای مصنوعی است. مدل تجربی سازمان تحقیقات جنگل‌ها و مراتع ایران (اختصاصی و احمدی، ۱۳۷۵ و ۱۳۷۶) از جمله متداول‌ترین روش‌ها جهت پهنه‌بندی فرسایش باد در ایران است. این مدل مبتنی بر شرایط محیطی و اقلیمی کشور ایران بوده (صادقی‌روش و همکاران، ۲۰۱۳) و مطالعات متعددی با استفاده از آن با اهداف و طراحی‌های کاربردی مختلف، صورت گرفته است (جباری و ثقفی، ۱۳۸۳؛ پهلوان‌روی، ۱۳۹۱؛ مصباح‌زاده و همکاران، ۱۳۸۹؛ حبیبی و همکاران، ۱۳۹۳؛ بخشنده‌مهر و همکاران، ۱۳۹۲). در این مدل، ۹ مؤلفه مؤثر در فرسایش باد ارزیابی و امتیازدهی می‌شود (جدول ۱). از این رو، بسته به شدت و ضعف هر مؤلفه و تأثیر آن بر تولید رسوب و با در نظر گرفتن واحدهای ژئومورفولوژی تعیین شده، امتیازات، تخصیص داده می‌شود. پس از جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز این مدل، ۹ نقشه مختلف از حساسیت مؤلفه‌ها به فرسایش باد تهیه شده است. با جمع امتیازات این مؤلفه‌ها، شدت فرسایش باد در طول سال برآورد می‌گردد. خطر فرسایش باد در این مدل، دارای ۵ طبقه است که برای هر یک از این طبقات، شدت فرسایش باد تعریف شده است (جدول ۲).

الگوریتم بهینه‌سازی کلونی زنبورهای مصنوعی بر اساس رفتار هوشمندانه جمعیت زنبورها طراحی شده است (کارابوگا و باسترک، ۲۰۰۷). در این پژوهش، الگوریتم بهینه‌سازی کلونی زنبورهای مصنوعی برای بهینه‌سازی توابع چندمتغیره ورودی به مدل سازمان تحقیقات جنگل‌ها و مراتع ایران (جدول ۱) مورد استفاده قرار گرفته و در نهایت، نتایج تولیدشده توسط الگوریتم بهینه‌سازی کلونی زنبورها با نتایج مدل سازمان تحقیقات جنگل‌ها و مراتع ایران مقایسه شده است.

به منظور انجام محاسبات الگوریتم بهینه‌سازی کلونی زنبورهای مصنوعی، منطقه مورد مطالعه به پیکسل‌های ۲۰۰×۲۰۰ متر تبدیل شد. برای افزایش سرعت در انجام محاسبات ریاضی بسیار طولانی و زمان‌بر ماتریس‌های

جدول ۱. مؤلفه‌ها و دامنه تأثیر آنها در مدل فرسایش بادی سازمان تحقیقات جنگل‌ها و مراتع ایران (اختصاصی و احمدی، ۱۳۷۵)

ردیف	عوامل مؤثر	دامنه امتیاز	ردیف	عوامل مؤثر	دامنه امتیاز
۱	مؤلفه سنگ‌شناسی	۰ - ۱۰	۶	مؤلفه آثار فرسایش در سطح	۰ - ۲۰
۲	مؤلفه شکل اراضی و پستی و بلندی	۰ - ۱۰	۷	مؤلفه رطوبت خاک	۰ - ۱۰
۳	مؤلفه سرعت و وضعیت باد	۰ - ۲۰	۸	مؤلفه نوع و پراکنش نهشته‌های بادی	۰ - ۱۰
۴	مؤلفه خاک و پوشش سطح آن	۵ - ۱۵	۹	مؤلفه کاربری اراضی و پوشش زمین	۵ - ۱۵
۵	مؤلفه انبوهی پوشش گیاهی	۵ - ۱۵			

جدول ۲. طبقه‌بندی و پتانسیل رسوب‌دهی در مدل سازمان تحقیقات جنگل‌ها و مراتع ایران (اختصاصی و احمدی، ۱۳۷۵)

طبقه فرسایشی	کیفیت فرسایش	مجموع امتیاز	پتانسیل رسوب‌دهی تن در کیلومتر مربع در سال
I	خیلی کم	کمتر از ۲۵	کمتر از ۲۵۰
II	کم	۲۵-۵۰	۲۵۰-۵۰۰
III	متوسط	۵۰-۷۵	۵۰۰-۱۵۰۰
IV	زیاد	۷۵-۱۰۰	۱۵۰۰-۶۰۰۰
V	خیلی زیاد	بزرگتر از ۱۰۰	بیشتر از ۶۰۰۰

متعدد الگوریتم و شکل پیچیده منطقه، با استفاده از دستگاه مختصات قطبی محاسبات الگوریتم در ۸۲ ناحیه انجام شده است. به این ترتیب، مرکز منطقه به عنوان مبدأ مختصات در نظر گرفته شد و با استفاده از رابطه ۱، مختصات زاویه (θ) هر نقطه با استفاده از مختصات x و y آن محاسبه شد. در نهایت با استفاده از مقادیر زاویه‌ای محاسبه شده، ۸۲ ناحیه حاصل گردید.

$$\theta = \begin{cases} \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) & \text{if } x > 0 \\ \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) + \pi & \text{if } x < 0 \text{ \& } y \geq 0 \\ \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) - \pi & \text{if } x < 0 \text{ \& } y < 0 \\ \frac{\pi}{2} & \text{if } x = 0 \text{ \& } y > 0 \\ -\frac{\pi}{2} & \text{if } x = 0 \text{ \& } y < 0 \end{cases} \quad \text{رابطه ۱}$$

الگوریتم بهینه‌سازی کلونی زنبورها در سه مرحله پیاده‌سازی شده است. در مرحله اول، تعدادی زنبور کارگر متناسب با تعداد پیکسل موجود در هر ناحیه (مجموعاً ۸۲۰۰۰ پیکسل منهای پیکسل‌های مرزی) و به صورت تصادفی با استفاده از رابطه ۲ اختصاص داده شد:

$$be_i = \text{random}(a)|_1^N \quad \text{رابطه ۲}$$

در رابطه فوق، be_i ، a و N به ترتیب زنبور کارگر i ام، پیکسل تصادفی انتخاب شده و تعداد پیکسل‌های موجود در ناحیه هستند. بعد از اینکه تمام زنبورهای کارگر در سرتاسر ناحیه مستقر شدند، هر زنبور پتانسیل فرسایشی پیکسلی را که در آن قرار گرفته، بررسی می‌کند. برای تعیین پتانسیل فرسایش بادی در هر پیکسل، ۹ مؤلفه مؤثر در فرسایش بادی (جدول ۱) به وسیله زنبورهای کارگر مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور از رابطه ۳ استفاده شد:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad \text{رابطه ۳}$$

در این رابطه، $f(x)$ تابع کروی، x_i متغیر i ام و n تعداد مؤلفه‌های مربوط به هر پیکسل است. کمینه‌شدن مقدار تابع $f(x)$ برای هر پیکسل به منزله بحرانی‌بودن آن به لحاظ فرسایش است. در این مرحله، برای دستیابی به بهترین ارزیابی از وضعیت مؤلفه‌ها تا زمان همگرا شدن تابع تکرار^۱، ارزیابی در چندین مرحله تجدید می‌شود. بعد از مشخص شدن میزان پتانسیل فرسایش در هر پیکسل به وسیله زنبورهای کارگر، این زنبورها هر کدام به طور تصادفی یکی از زنبورهای موجود در همسایگی خود را انتخاب کرده و به صورت تصادفی به سمت آن حرکت می‌کنند (رابطه ۴).

$$v_i = \alpha_i + (\alpha_i - \alpha_j) \quad \text{رابطه ۴}$$

در رابطه فوق، V_i موقعیت جدید زنبور i ام، α_i موقعیت قبلی زنبور i ام و α_j موقعیت زنبور j ام که به تصادف به وسیله زنبور i ام انتخاب شده، است. به این ترتیب، پیکسل‌های دارای پتانسیل فرسایشی بیشتر مشخص می‌شوند. در مرحله دوم، با استفاده از اطلاعاتی که به وسیله زنبورهای کارگر به دست آمده، پیکسل‌های دارای پتانسیل فرسایش بیشتر با استفاده از چرخه رولت^۱ توسط زنبورهای نگهبان شناسایی و حرکت به سمت آنها به طور تصادفی صورت می‌گیرد (میشل^۲، ۱۹۹۸). در مرحله سوم، زنبورهای کارگری که در مکان اولیه خود باقی مانده و نتوانسته‌اند مکانی با پتانسیل فرسایشی بیشتر را در همسایگی خود پیدا کنند، به صورت تصادفی به ناحیه دیگری می‌روند که پتانسیل فرسایشی آن بیشتر است. با توجه به اینکه در هر پیکسل از منطقه فرسایش باد می‌تواند رخ دهد و فقط آستانه آن با توجه به مقدار تابع کروی متفاوت است، نتیجه استفاده از الگوریتم کلونی زنبورهای مصنوعی منجر به پیدایش پیکسل‌های با بیشترین پتانسیل فرسایش می‌شود. به این ترتیب، با استفاده از این روش کانون‌های فرسایش منطقه که بحرانی‌ترین نقاط منطقه به لحاظ فرسایشی هستند، مشخص گردید.

منابع اطلاعاتی و مواد مورد استفاده در روش این پژوهش عبارتند از: نقشه‌ها و داده‌های توپوگرافی با مقیاس ۱/۲۵۰۰۰ و ۱/۴۰۰۰۰، تصاویر ماهواره‌ای لندست TM (سال ۱۹۹۸ و ۲۰۰۲)، نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، نقشه‌های کاربری اراضی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، نقشه‌های واحدهای خاک و اراضی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، نقشه‌های پوشش گیاهی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، عکس‌های هوایی با مقیاس ۱:۲۰۰۰۰، دستگاه تعیین مختصات جغرافیایی و بسته نرم‌افزاری متلب^۴.

نتایج

در این مقاله، نتایج محاسبات در دو بخش شامل محاسبه مدل سازمان تحقیقات جنگل‌ها و مراتع ایران و محاسبات الگوریتم بهینه‌سازی هوش جمعی کلونی زنبورهای مصنوعی ارائه شده است. در نهایت تفاوت نتایج حاصل از این دو روش نیز مورد بحث قرار گرفته است.

مدل تجربی سازمان تحقیقات جنگل‌ها و مراتع ایران مبنای اصلی بررسی و تعیین شدت پهنه‌های مختلف فرسایش باد در منطقه مورد مطالعه است. از این رو، پس از تعیین واحدهای ژئومورفولوژی منطقه مورد مطالعه، متناسب با شدت و ضعف و تأثیر هر یک از مؤلفه‌ها (جدول ۱) میزان حساسیت در مقابل فرسایش باد، مشخص شد. واحدهای ژئومورفولوژی منطقه نیز از طریق مطالعات میدانی و پردازش اطلاعات سنجش از راه دور و تفکیک حدود لندفرم‌های عمده، ترسیم شد (ثقفی، ۱۳۸۹). لندفرم‌های ترسیم‌شده منطقه که به عنوان واحدهای ژئومورفولوژی کاری مورد استفاده قرار گرفته‌اند، در ۸ گروه طبقه‌بندی شده‌اند (شکل ۲ و جدول ۳). در حوضه آبریز تقریباً بسته منطقه مورد مطالعه، جریان و تمرکز آب و رسوب به سمت چاله انتهایی است. این فرایند، منجر به انباشت حجم عمده‌ای از رسوبات ریز در چاله انتهایی و حواشی آن در غالب لندفرم‌های مختلفی از قبیل مخروط‌افکنه‌ها شده است. در واقع واحد دشت در منطقه مورد مطالعه، دشتی تراکمی است که تحت شرایط حوضه‌های آبریز بسته به وجود آمده است. این موضوع، در منطقه مورد مطالعه امکان برداشت رسوبات ریز را توسط جریان‌های بادی کم‌انرژی‌تر فراهم آورده است. تراس‌های آبرفتی واقع در پهنه دشت، از نظر خصوصیات

1- Roulette Wheel

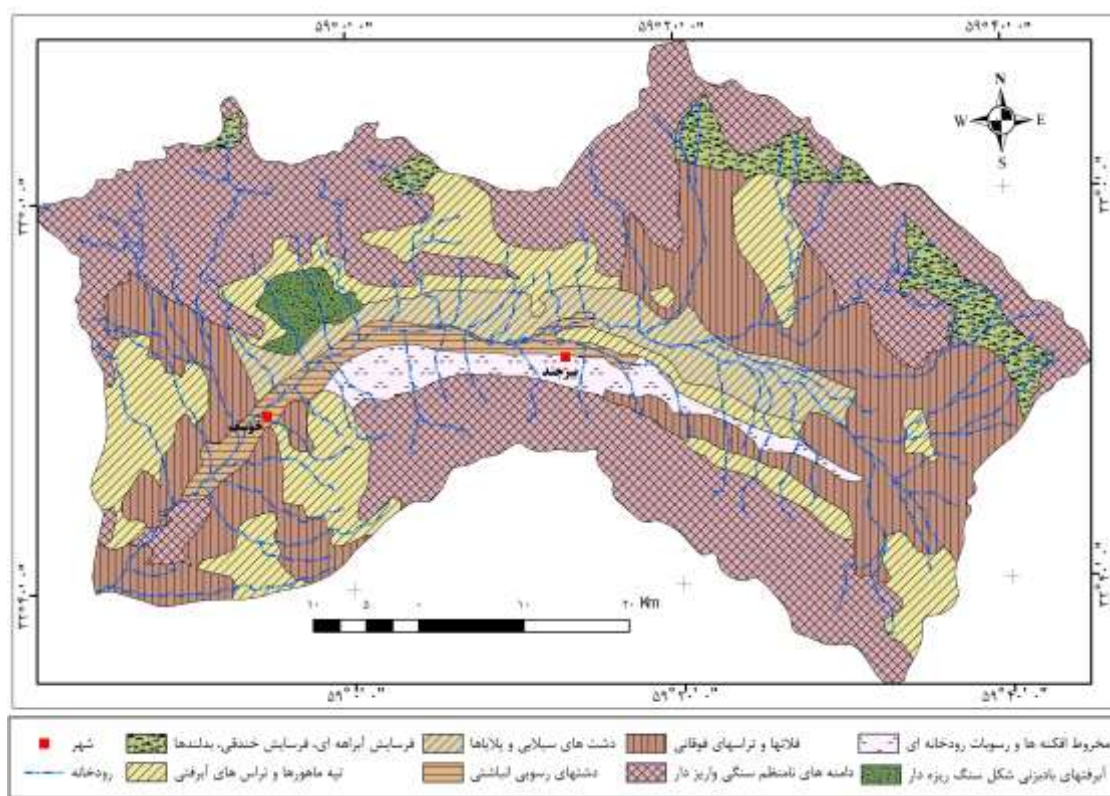
2- Mitchell

3- National Topographic Data Base

4- Matlab

ژئومورفولوژیکی به نسبت استعداد کمتری برای فرسایش بادی از خود نشان می‌دهند. همچنین با حرکت به سمت دامنه‌های ارتفاعات در حاشیه دشت، از شدت فرسایش بادی به جهت ویژگی‌های ژئومورفولوژیک کاسته می‌شود. به این ترتیب، شدت فرسایش نسبتاً بیشتری را در مخروط‌افکنه‌های متکی به دامنه‌ها و دشت‌سرها می‌توان مشاهده نمود که به سمت دره‌های کوهستانی از شدت آن کاسته و در نهایت در برونزدهای سنگی کوهستان‌ها حداقل میزان فرسایش بادی مشاهده می‌شود.

شرایط محیطی منطقه باعث شده لایه‌های اطلاعاتی ورودی به مدل از جهت شرایط آب‌وهوایی، خاک‌شناسی، توپوگرافی، زمین‌شناسی، پوشش گیاهی و کاربری اراضی غالباً امتیازات بالایی را اخذ نمایند. بخش‌های عمده‌ای از اراضی مناسب جهت کاربری‌های مختلف در منطقه مورد مطالعه نیز در قلمرو فرسایش باد نسبتاً شدید قرار گرفته است (جدول ۴).



شکل ۲. نقشه لندفرم‌های ژئومورفولوژی عمده حوضه آبریز دشت بیرجند. مؤلفه‌های مدل سازمان تحقیقات جنگل‌ها و مراتع ایران بر اساس لندفرم‌های ژئومورفیک شناسایی شده در منطقه امتیازدهی شده‌اند

جدول ۳. امتیازات ۹ مؤلفه مدل سازمان تحقیقات جنگل‌ها و مراتع ایران به تفکیک لندفرم‌های عمده واحدهای ژئومورفولوژی

واحد‌های ژئومورفولوژی	مؤلفه ۱	مؤلفه ۲	مؤلفه ۳	مؤلفه ۴	مؤلفه ۵	مؤلفه ۶	مؤلفه ۷	مؤلفه ۸	مؤلفه ۹	جمع
مخروط‌افکنه‌ها و رسوبات رودخانه‌ای	۱۰	۱۰	۱۵	۱۵	۸	۱۰	۴	۱۰	۱۲	۹۴
تراس‌های آبرفتی	۷	۷	۱۵	۱۲	۴	۱۶	۷	۷	۱۰	۸۵
دشت‌های رسوبی انباشتی	۸	۹	۱۵	۱۰	۴	۱۱	۶	۷	۱۱	۸۱
پلایا و کفه رسی	۸	۹	۴	۱۳	۵	۸	۴	۹	۱۱	۷۱
دشت سیلابی و دشت‌های رگی	۵	۷	۱۵	۴	۴	۵	۴	۴	۸	۵۶
دامنه‌های منظم و دشت‌سرهای برهنه	۵	۷	۱۵	۵	۳	۵	۴	۲	۵	۵۱
فرسایش خندقی، بدلندها و آبراه‌های	۷	۴	۱۵	۴	۳	۳	۳	۲	۳	۴۴
دامنه‌های نامنظم سنگی و واریزه‌ها	۳	۴	۱۵	۰	۵	۵	۴	۲	۰	۳۸

جدول ۴. امتیازات ۹ مؤلفه مدل سازمان تحقیقات جنگل‌ها و مراتع ایران به تفکیک کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه

نوع کاربری	مؤلفه ۱	مؤلفه ۲	مؤلفه ۳	مؤلفه ۴	مؤلفه ۵	مؤلفه ۶	مؤلفه ۷	مؤلفه ۸	مؤلفه ۹	جمع
دیمزارها	۵/۷۴	۴/۵۲	۱۵	۵/۵۲	۴/۴۴	۷/۳	۳/۲۲	۶/۶۷	۱۱/۵۶	۶۳/۹۷
اراضی زراعی آبی	۵	۶/۵۸	۱۵	۳/۳۳	۳/۳۳	۳/۳۳	۳/۳۳	۴/۶۱	۶/۶۷	۵۱/۱۸
باغات	۵	۶/۵۶	۱۵	-۴/۵۳	-۱/۸۶	۰/۲۳	۲/۷۴	-۴/۴۴	-۴/۳	۱۴/۴

پهنه‌بندی فرسایش باد

نتایج نهایی مدل تجربی مورد استفاده از طریق روی هم قرار دادن ساده لایه‌های اطلاعاتی ورودی و جمع جبری ۹ مؤلفه در نظر گرفته شده حاصل می‌شود. بر اساس طبقه‌بندی نتایج مدل، در مجموع ۷۱۰ پهنه حاصل شده که بین ۴ طبقه فرسایش از میان ۵ طبقه موجود در مدل سازمان تحقیقات جنگل‌ها و مراتع ایران توزیع شده‌اند. تنها طبقه ۵ فرسایش که مربوط به طبقه فرسایش بسیار زیاد است در منطقه مشاهده نمی‌شود (شکل ۳). محاسبه درصد مساحت تحت اشغال هریک از طبقات نشان می‌دهد که بیشتر مساحت منطقه در طبقه ۳ و کمترین مساحت در طبقه ۱ واقع شده است (جدول ۵). توزیع جغرافیایی طبقات مختلف در منطقه به گونه‌ای است که بخش عمده دشت بیرجند در طبقه ۳ جای گرفته و مناطق ناهموار در شمال و جنوب آن در طبقه ۲ واقع شده‌اند. همچنین مناطق شرقی و غربی نیز ترکیبی از همه طبقات را در خود دارند. بررسی فراوانی پهنه‌های مربوط به هر یک از طبقات، بیشترین فراوانی را در طبقه ۳ و کمترین فراوانی را در طبقه ۱ نشان می‌دهد (جدول ۵). برای تعیین پتانسیل رسوب‌دهی در هریک از پهنه‌ها، لندفرم‌ها و کل منطقه می‌توان از رابطه بین درجه رسوب‌دهی و میزان تولید رسوب در روش سازمان تحقیقات جنگل‌ها و مراتع ایران استفاده نمود (رابطه ۵):

$$Q_s = 41 \times [EXP (0.05 R)] \quad \text{رابطه ۵}$$

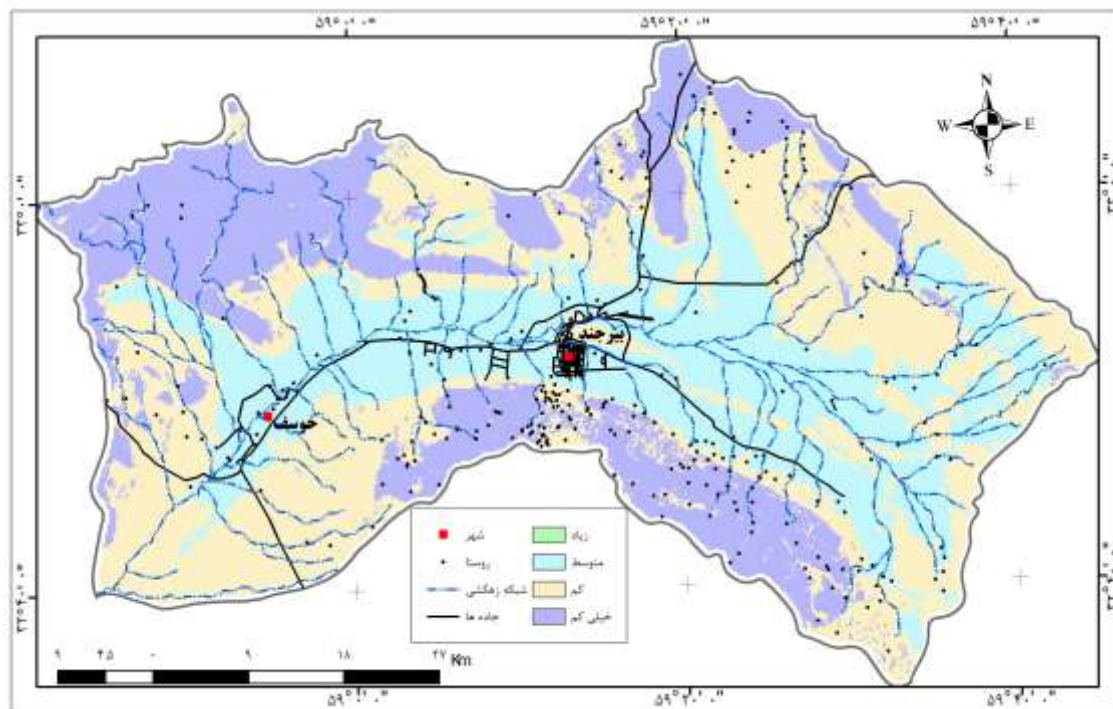
در رابطه فوق، Q_s : میزان رسوب‌دهی سالانه برحسب تن در کیلومتر مربع در سال و R : مجموع امتیازات مؤلفه‌های مؤثر در فرسایش خاک در روش سازمان تحقیقات جنگل‌ها و مراتع ایران است. بر مبنای واحدهای ژئومورفولوژی منطقه کمترین امتیاز در مجموع مؤلفه‌ها مربوط به دامنه‌های نامنظم سنگی به میزان ۳۸ و بیشترین امتیاز در مجموع مؤلفه‌ها مربوط به پهنه‌های رسوبات رودخانه‌ای به میزان ۹۴ است. به این ترتیب دامنه تغییرات R در رابطه فوق بر مبنای نقشه ژئومورفولوژی بین ۳۸ تا ۹۴ است که میزان فرسایش بین ۲۷۴ تا ۴۵۰۷ تن در کیلومتر مربع در سال را نشان می‌دهد.

در روش دیگر برای بررسی و طبقه‌بندی پهنه‌های فرسایش بادی در منطقه مورد مطالعه از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی زنبورهای مصنوعی به جای جمع جبری لایه‌های ورودی به مدل استفاده شده است. در این الگوریتم تا هنگام بهینه‌شدن ارزیابی‌های ۹ مؤلفه برای یک پیکسل و کاهش میزان خطا (RMS^1) به کمترین حد ممکن، فرایند ارزیابی تکرار می‌شود. به این ترتیب منحنی‌های قرمز و آبی نمودار تکرار ارزیابی‌ها (شکل ۴) در روش کلونی زنبورهای مصنوعی، به ترتیب متوسط مربعات بهترین ارزیابی و متوسط مربعات میانگین ارزیابی‌ها را نشان می‌دهد. منحنی قرمز بهینه‌ترین ارزیابی را از حدود ۲۰۰ تکرار زنبور مصنوعی نشان می‌دهد که از آن به بعد فرایند ارزیابی همگرا و بهینه‌سازی شده است. منحنی آبی نیز دامنه تغییرات متوسط ارزیابی‌ها را نشان می‌دهد. برای اطمینان از همگراشدن کل الگوریتم باید دامنه تغییرات متوسط ارزیابی‌ها نیز همگرا شود. در این بررسی، از حدود ۲۰۰۰ تکرار زنبور مصنوعی الگوریتم مورد استفاده، همگرا شده است. همچنین منحنی آبی نشان‌دهنده نرمال بودن وضعیت

ارزیابی و قابلیت اطمینان بالای آن است، چراکه هرچه مقدار متوسط مربعات کمیت‌ها پایین‌تر باشد، قابلیت اطمینان به آنها بیشتر خواهد بود (ویلما و ماتسورا، ۲۰۰۵).

برای مقایسه دقیق‌تر، نتایج این مدل نیز بر اساس آستانه‌های تعیین شده در جدول مرجع مدل سازمان تحقیقات جنگل‌ها و مراتع ایران طبقه‌بندی شده‌اند (شکل ۵). نتیجه نهایی استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی زنبورهای مصنوعی، ۵ طبقه فرسایش بادی را در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. در این روش، در مجموع ۵۶۴ پهنه حاصل شده که در بین ۵ کلاس فرسایش توزیع شده‌اند. همانند روش قبل کمترین مساحت مربوط به طبقه ۱ است ولی برخلاف آن بیشترین مساحت را در قلمرو طبقه ۴ نشان می‌دهد (جدول ۵).

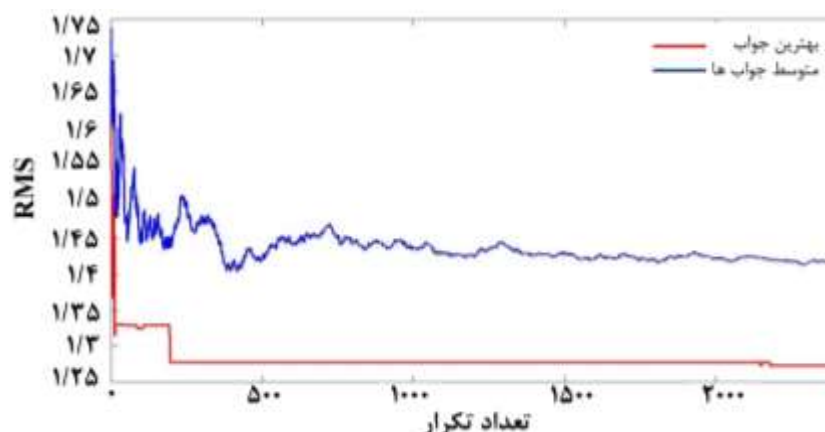
کانون‌های اصلی فرسایش باد در منطقه مورد مطالعه مبتنی بر میزان فراوانی مراجعات زنبورها، با توجه به امتیاز مؤلفه‌ها، به صورت نقاطی تعیین شده است. با توجه به اینکه برای انجام محاسبات الگوریتم کلونی زنبورهای مصنوعی، منطقه مورد مطالعه به ۸۲ ناحیه تقسیم شده و برای هر منطقه تعدادی زنبور (متناسب با تعداد پیکسل‌های آن ناحیه) برای شناسایی مناطق با بیشترین پتانسیل در نظر گرفته شده است.



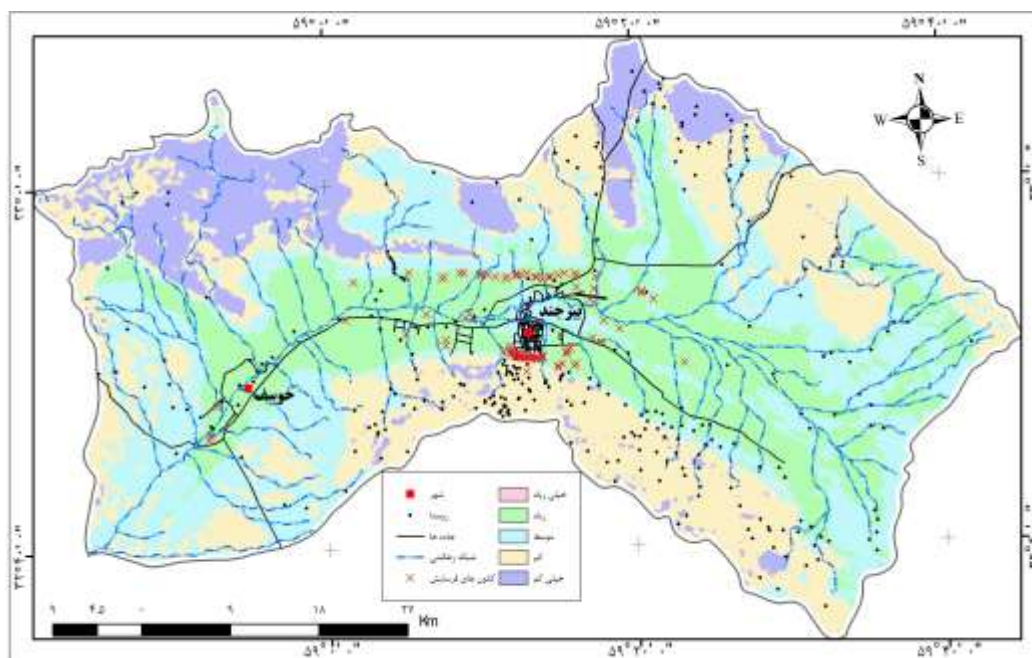
شکل ۳. نقشه پهنه‌های فرسایش بادی حاصل از مدل سازمان تحقیقات جنگل‌ها و مراتع ایران

جدول ۵. مساحت کلاس‌های فرسایش و فراوانی تعداد پهنه‌های حاصل از مدل سازمان تحقیقات جنگل‌ها و مراتع ایران و روش ABC

درصد اختلاف	روش ABC		مدل سازمان تحقیقات جنگل‌ها و مراتع ایران			ردیف
	درصد مساحت	تعداد پهنه‌ها	درصد مساحت	تعداد پهنه‌ها	طبقات	
۰	۲	۱	۲	۳	خیلی کم	۱
-۳	۲۷	۷۳	۳۰	۶۰	کم	۲
-۱۴	۲۸	۱۷۶	۴۲	۳۵۵	متوسط	۳
۵	۳۱	۱۷۶	۲۶	۲۹۲	زیاد	۴
۱۲	۱۲	۱۳۸	-	-	خیلی زیاد	۵
۰	۱۰۰	۵۶۴	۱۰۰	۷۱۰	جمع	



شکل ۴. منحنی تکرار فرایند الگوریتم ABC و همگراشدن ارزیابی‌های تکرار شده توسط زنبورهای مصنوعی در ارتباط با میزان خطای ارزیابی



شکل ۵. نقشه پهنه‌های فرسایش بادی حاصل از روش ABC

نهایتاً با توجه به مقدار فراوانی مراجعات زنبورها به نقاط مختلف منطقه مورد مطالعه، ۸۲ نقطه کانونی که بیشترین دفعات مراجعه را داشته‌اند تعیین گردید. این نقاط، در واقع از بیشترین پتانسیل فرسایش باد برخوردار هستند. بررسی الگوی مکانی قرارگیری این کانون‌ها بیانگر وجود دو محل تراکم عمده در بخش شمال و جنوب شهر بیرجند است. به طور کلی، تمام کانون‌های فرسایش باد در واحد دشت واقع شده و بیش از ۹۰٪ آنها بر روی لندفرم‌های مخروط‌افکنه و دشت‌سر قرار گرفته‌اند. تعدادی از کانون‌ها نیز با پراکنش بیشتر در بخش غربی دشت و تعدادی نیز در بخش میانی واقع شده‌اند. با توجه به شناسایی نقاط کانونی فرسایش باد و چگونگی توزیع مکانی آنها بدیهی است که عملیات کنترل فرسایش باد باید با در اولویت قرار دادن این نقاط انجام شود.

بحث

با توجه به اینکه شرایط ژئومورفولوژی، داده‌های ورودی، دامنه امتیازات و آستانه‌های در نظر گرفته‌شده برای طبقه‌بندی در هر دو روش یکسان است، مقایسه نتایج مدل سازمان تحقیقات جنگل‌ها و مراتع ایران و روش

الگوریتم کلونی زنبورهای مصنوعی حاوی تجزیه و تحلیل‌های کاربردی است. محاسبه ضریب همبستگی مکانی دو نقشه با وجود تشابه حدود ۸۸ درصدی مساحت پهنه‌ها، تفاوت‌هایی را نشان می‌دهد. بر مبنای آستانه‌های در نظر گرفته شده برای طبقه‌بندی (جدول ۲) در نتایج مدل سازمان تحقیقات جنگل‌ها و مراتع ایران ۴ طبقه فرسایش حاصل شده در حالی که در نتایج روش بهینه‌سازی الگوریتم کلونی زنبورهای مصنوعی ۵ طبقه فرسایش به دست آمده است. در واقع، ۱۲٪ از مساحت سایر طبقات فرسایشی در مدل سازمان تحقیقات جنگل‌ها و مراتع ایران جابه‌جا و در روش الگوریتم کلونی زنبورها در طبقه ۵ واقع شده است. بررسی کلی تغییرات در الگوی مکانی و مساحت پهنه‌های فرسایش باد نشان می‌دهد حدود ۴۹٪ از مساحت پهنه‌ها در روش سازمان تحقیقات جنگل‌ها و مراتع ایران به طبقات فرسایشی بالاتر در روش الگوریتم کلونی زنبورهای مصنوعی منتقل شده است (جدول ۶). از این رو با مقایسه نتایج این دو روش می‌توان استدلال نمود که در روش الگوریتم کلونی زنبورهای مصنوعی پهنه‌ها با حساسیت بیشتری نسبت به موضوع فرسایش باد طبقه‌بندی می‌شوند.

به همین ترتیب، توزیع فراوانی پهنه‌های مختلف منطقه در بین طبقات فرسایش حاصل از روش الگوریتم کلونی زنبورهای مصنوعی در مقایسه با روش سازمان تحقیقات جنگل‌ها و مراتع ایران وضعیت نرمال‌تری را نشان می‌دهد. همچنین مقایسه توزیع فراوانی پهنه‌های حاصل از این دو روش، نشان می‌دهد که غالباً پهنه‌های طبقات ۳ و ۴ در مدل سازمان تحقیقات جنگل‌ها و مراتع ایران به سایر طبقات در مدل الگوریتم کلونی زنبورها جابه‌جا شده و در واقع بیشترین سهم را در حاصل شدن طبقه ۵ در روش الگوریتم کلونی زنبورهای مصنوعی، داشته‌اند.

برای مقایسه بهتر نتایج پهنه‌بندی حاصل از دو روش مورد استفاده، از آزمون آنالیز واریانس استفاده شده است. بر اساس بررسی مقادیر عددی واریانس مساحت پهنه‌های هر دو روش، ملاحظه می‌شود که مقدار واریانس مدل سازمان تحقیقات جنگل‌ها و مراتع ایران در مساحت پهنه‌ها، ۳۳۶ است در حالی که مقدار واریانس مساحت پهنه‌های حاصل از روش الگوریتم کلونی زنبورهای مصنوعی به مقدار ۱۵۵ کاهش یافته است. مقایسه مقادیر واریانس‌های حاصل از دو روش که تفاوت بسیاری دارند و نیز نتایج حاصل از آزمون واریانس‌های به دست آمده،

جدول ۶. مقایسه تغییر و تبدیل مساحت کلاس‌های فرسایش حاصل از روش سازمان تحقیقات جنگل‌ها و مراتع ایران (IRIFR) با روش ABC

ردیف	تغییر طبقات فرسایش	تعداد پهنه‌ها	مساحت %
۱	جابه‌جایی طبقات مدل IRIFR به طبقات پایین‌تر روش ABC	۸۵	۰/۲۹۸۸
۲	جابه‌جایی طبقات مدل IRIFR به طبقات بالاتر روش ABC	۴۷	۴۹/۰۲۶۲
۳	طبقه خیلی کم مدل IRIFR به طبقه زیاد روش ABC	۴	۰/۰۱۱۵
۴	طبقه خیلی کم مدل IRIFR به طبقه خیلی زیاد روش ABC	۱	۰/۰۱۵۶
۵	طبقه کم مدل IRIFR به طبقه متوسط روش ABC	۶	۰/۰۶۴۱
۶	طبقه کم مدل IRIFR به طبقه زیاد روش ABC	۶۲	۰/۲۰۵۲
۷	طبقه کم مدل IRIFR به طبقه خیلی زیاد روش ABC	۲	۰/۰۰۰۲
۸	طبقه متوسط مدل IRIFR به طبقه کم روش ABC	۶۹	۱/۶۸۱۲
۹	طبقه متوسط مدل IRIFR به طبقه متوسط روش ABC	۱۴۲	۲/۳۴۸۰
۱۰	طبقه متوسط مدل IRIFR به طبقه زیاد روش ABC	۳۴۵	۴/۹۵۰۹
۱۱	طبقه متوسط مدل IRIFR به طبقه خیلی زیاد روش ABC	۵۶	۸/۹۶۳۳
۱۲	طبقه زیاد مدل IRIFR به طبقه خیلی کم روش ABC	۱	۰/۰۰۰۷
۱۳	طبقه زیاد مدل IRIFR به طبقه کم روش ABC	۱۱۵	۳/۵۹۹۰
۱۴	طبقه زیاد مدل IRIFR به طبقه متوسط روش ABC	۲۴۱	۱۳/۱۸۸۱
۱۵	طبقه زیاد مدل IRIFR به طبقه زیاد روش ABC	۳۸۱	۱۴/۹۲۰۳
۱۶	طبقه زیاد مدل IRIFR به طبقه خیلی زیاد روش ABC	۱۰۱	۰/۷۲۶۸

معنی دار بودن این اختلاف را نشان می‌دهد. به عبارتی این تفاوت بیانگر معنی دار بودن تأثیر روش الگوریتم کلونی زنبورهای مصنوعی در پهنه‌بندی طبقات مختلف فرسایش باد است (جدول ۷). با توجه به واریانس کمتر نتایج روش الگوریتم کلونی زنبورهای مصنوعی می‌توان استدلال نمود که نتایج این روش در تعیین پهنه‌های طبقات فرسایش باد از قابلیت اطمینان بیشتری برخوردار است.

اعتبارسنجی تمامی انواع مدل‌های فرسایش باد به دلیل نبود داده‌های واقعی کافی، تنوع مؤلفه‌های تأثیرگذار در فرسایش و مهم‌تر از همه عدم امکان اخذ داده‌های واقعی از تمامی گستره فرسایش، دارای محدودیت‌هایی است. از طرفی، مدل‌های تجربی فرسایش باد با در نظر گرفتن مؤلفه‌های متعدد و روابط متقابل بین آنها در مقیاس آزمایشگاهی شبیه‌سازی شده و مؤلفه‌های این مدل‌ها طی فرایند طراحی به طور جداگانه اعتبارسنجی و اعتبار کلی آنها نیز تعیین می‌شود (مارتیکورنا و برگامتی^۱، ۱۹۹۵). اعتبار مدل سازمان تحقیقات جنگل‌ها و مراتع ایران مورد استفاده در این مقاله نیز هنگام شبیه‌سازی و توسعه آن تأیید شده و علاوه بر آن مطالعات متعدد انجام‌شده در مناطق مختلف کشور مؤید کارایی آن است (جباری و ثقفی، ۱۳۸۳؛ اختصاصی و احمدی، ۱۳۷۵ و ۱۳۷۶؛ پهلوانروی، ۱۳۹۱؛ مصباح‌زاده و همکاران، ۱۳۸۹).

برای بررسی اعتبار نتایج روش الگوریتم بهینه‌سازی کلونی زنبورهای مصنوعی، ۸۲ نقطه کانونی حداکثر پتانسیل فرسایش بادی حاصل از این روش با داده‌های مشاهداتی منطقه مورد مطالعه تطبیق داده شده است. بررسی نقشه ژئومورفولوژی منطقه مورد مطالعه (شکل ۲) و موقعیت کانون‌های فرسایش (شکل ۵) حاکی از قرارگیری کانون‌های بحرانی فرسایش باد به‌ویژه بر روی ۱۷ عدد مخروط‌افکنه شناسایی‌شده دامنه شمالی کوهستان باقران است. همچنین بر اساس مشاهدات میدانی توزیع مکانی خاستگاه نمونه‌هایی از توفان‌های گردوخاک در منطقه مورد مطالعه، ملاحظه می‌شود که بخش اعظم این توفان‌ها، از مناطق بالادستی مخروط‌افکنه‌های دامنه شمالی امتداد کوهستان باقران منابع گردوخاک خود را تأمین می‌نمایند (برای مثال توفان‌های ۱۳۹۵/۳/۱۸، شکل ۶). از این رو مخروط‌افکنه‌ها در واقع همان نقاط کانونی با بیشترین پتانسیل فرسایشی هستند که با استفاده از الگوریتم به دست آمده‌اند. این موضوع، تا حدی حاکی از صحت و کارایی نتایج طبقه‌بندی فرسایش باد با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی زنبورهای مصنوعی است. گرانولومتری رسوبات مخروط‌افکنه‌ها نیز شاهد بالارزشی برای بررسی تحولات ژئومورفولوژی و فعالیت‌های فرسایشی است. مقایسه و بررسی آزمون فرض میانگین اندازه ذرات نمونه‌برداری‌شده از سه قسمت مختلف (شامل قاعده، وسط و رأس) تعدادی از ۱۷ مخروط‌افکنه دامنه جنوبی کوهستان باقران در سطح احتمال ۰/۰۵٪ (آلفای ۰/۰۵)، فرض تغییر و جدول ۷. آزمون واریانس تغییرات مساحت کلاس‌های فرسایش حاصل از روش سازمان تحقیقات جنگل‌ها و مراتع ایران (IRIFR) با روش ABC

	روش ABC	مدل IRIFR
میانگین	۲۰	۲۰
واریانس	۱۵۵/۵	۳۳۶
تعداد مشاهدات	۵	۵
درجه آزادی	۴	۴
(نسبت واریانس‌ها) F	۰/۴۶۲۷۹۸	
P(F<=f)	۰/۲۳۶۹۵	
نسبت بحرانی واریانس‌ها	۰/۱۵۶۵۳۸	



شکل ۶. تصویری از یک توفان گردوخاک (۱۳۹۵/۳/۱۸). خاستگاه گردوخاک غالب توفان‌های منطقه مورد مطالعه در واقع مناطق بالادست مخروط‌افکنه‌های منطقه به‌ویژه مخروط‌افکنه‌های به هم چسبیده دامنه شمالی امتداد کوهستان باقران است. چنانکه در تصویر مشخص است حجم گردوخاک ایجادشده (منطقه سفیدرنگ در عکس) به قدری زیاد است که توده حجیم کوهستان باقران در قسمت عقب عکس نامشخص گردیده است.

تبدیل تدریجی مخروط‌افکنه‌های منطقه مورد مطالعه از یک لندفرم آبی به لندفرم بادی در قالب باهادا و دشت‌های رگی را تأیید می‌کند (ثقفی و همکاران، ۱۳۹۵: ۱۱۱). از این رو، یکی از مهم‌ترین عواملی که باعث از بین رفتن همگنی اندازه ذرات رسوب در سطح مخروط‌افکنه‌ها شده، با توجه به کاهش فعالیت جریان‌های رودخانه‌ای، افزایش فعالیت فرسایش باد در این بخش از منطقه است.

نتیجه‌گیری

محدودیت‌های مدل‌های منطقه‌ای تخمین فرسایش باد منجر به تلاش‌های متعدد محققین برای توسعه این مدل‌ها با به کارگیری شیوه‌های جدید آنالیز شده است (زوبک^۱ و همکاران، ۲۰۰۰). از این رو، در مطالعه حاضر حساسیت در مقابل فرسایش باد در قلمرو منطقه‌ای با کمک شیوه آنالیز جدیدی تخمین زده شده است.

مدل سازمان تحقیقات جنگل‌ها و مراتع ایران مبتنی بر مؤلفه‌هایی است که در سایر مدل‌های مشابه به عنوان داده‌های الزامی و ورودی مورد توجه هستند و از این جهت در خصوص این مدل، اتفاق نظر وجود دارد. از طرفی چنانچه این مؤلفه‌ها را در ارتباط با یکدیگر مقایسه نماییم روابط منطقی و معنی‌داری بین آنها قابل مشاهده است (برای مثال مؤلفه‌های رطوبت خاک و انبوهی پوشش گیاهی). این روابط غالباً از نوع خطی و مستقیم یا معکوس هستند که در نهایت بیشترین میزان همبستگی را با هدف مدل یعنی تخمین فرسایش باد از خود نشان می‌دهند. عدم توجه به این موضوع هنگام تخصیص و تلفیق امتیازات مؤلفه‌ها باعث بروز ناسازگاری و کاهش قابلیت اعتماد به نتایج مدل سازمان تحقیقات جنگل‌ها و مراتع ایران می‌شود. در این بررسی، بهره‌گیری از الگوریتم هوش جمعی کلونی زنبورهای مصنوعی بر مبنای ویژگی‌های ژنتیکی، بهینه‌شدن و افزایش کارایی نتایج مدل تجربی سازمان تحقیقات جنگل‌ها و مراتع ایران را باعث گردید. پارامتر آماری واریانس در قضاوت این موضوع نقش مهمی دارد، به طوری که کمینه‌شدن واریانس تغییرات مساحت طبقات فرسایشی حاصل از روش کلونی زنبورهای مصنوعی در مقایسه با نتایج مدل سازمان تحقیقات جنگل‌ها و مراتع ایران حاکی از قابلیت اعتماد بیشتر به نتایج روش آنالیز

کلونی زنبورهای مصنوعی است. نتایج حاصل از روش مذکور حساسیت بسیار زیاد آن را در ارائه طبقات فرسایش و الگوهای مکانی شدت فرسایش باد نیز نشان می‌دهد. به عبارتی این مدل از میان انواع اکوسیستم‌های بیابانی موجود برای اکوسیستم‌های شکننده و فراخشک می‌تواند مناسب‌تر باشد. این در حالی است که مدل سازمان تحقیقات جنگل‌ها و مراتع ایران برای تمامی اکوسیستم‌های خشک بدون در نظر گرفتن وجه تمایز استفاده می‌شود.

از مزایای کاربرد الگوریتم کلونی زنبورهای مصنوعی و هوش جمعی، آن است که تا زمان بهینه‌شدن ارزیابی‌های ۹ مؤلفه برای یک پیکسل و کاهش میزان خطا به کمترین حد ممکن، فرایند ارزیابی تکرار می‌شود. به این ترتیب، نتایج از طریق هوشمندسازی فرایند ارزیابی با کمترین خطای ناسازگاری حاصل می‌شود (شکل ۴). از مزایای دیگر الگوریتم‌های هوش جمعی اتکای آنها بر توابع کروی^۱ است. در این توابع، متغیرها از مرتبه دوم دقت هستند (ریمان^۲، ۱۹۹۱) به همین دلیل، در این بررسی نیز حساسیت الگوریتم کلونی زنبورهای مصنوعی به داده‌های فرسایش بیشتر بوده و ۵ طبقه فرسایش حاصل شده است.

مهم‌ترین هدف در مدل‌سازی کنترل فرسایش، شناسایی نقاط کانونی است. از این رو، یکی دیگر از مزایای استفاده از روش الگوریتم کلونی زنبورها، یافتن این نقاط است که تعیین آنها معمولاً در سایر مدل‌ها انجام نمی‌شود. تعیین ۸۲ کانون عمده و بحرانی فرسایش باد در منطقه مورد مطالعه و تطبیق آن با شواهد میدانی گویای اهمیت و کاربرد استفاده از این روش در بررسی مؤلفه‌های مؤثر در فرسایش باد است. از طرفی با توجه به اینکه پیش‌بینی‌ها از وضعیت آب‌وهوای آینده نشان می‌دهد که رطوبت خاک در واکنش به تداوم خشک‌سالی‌های اخیر در میان‌مدت کاهش خواهد یافت و این موضوع منجر به افزایش گستره مناطق متأثر از فرسایش باد است (مزوسی و همکاران، ۲۰۱۳؛ بلنکا^۳ و همکاران، ۲۰۱۳). بررسی توزیع جغرافیایی منابع اصلی تولید رسوبات بادی حاکی از آن است که برخی محیط‌های ژئومورفولوژیکی ارتباط بسیار زیادی با این موضوع دارند. این محیط‌های ژئومورفولوژیکی شامل: چاله‌ها (بسترهای باقی‌مانده از دریاچه‌های قدیمی، دریاچه‌های خشک‌شده و نمکزارها، حوضه‌های بین کوهستانی و اراضی پست)، رودخانه‌های موقتی و دامنه کوهستان‌ها (مخروط‌افکنه‌ها) است. در واقع همه این مناطق محیط‌های آبرفتی و یا دریاچه‌ای پلیستوسن هستند که انباشت‌های قابل توجهی از منابع رسوبات ریزدانه را در خود دارند. این لندفرم‌ها که همواره رسوبات مورد نیاز فرسایش باد را جایگزین می‌نمایند در طبقات بحرانی فرسایش قرار دارند.

منابع

اختصاصی، محمدرضا؛ احمدی، حسن (۱۳۷۵) معرفی دو روش جدید برآورد رسوب در فرسایش بادی، **مجموعه مقالات دومین همایش ملی بیابان‌زایی و روش‌های مختلف بیابان‌زدایی**، انتشارات مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع.

اختصاصی، محمدرضا؛ احمدی، حسن (۱۳۷۶) روش تجربی برآورد رسوب فرسایش بادی، **منابع طبیعی ایران**، ص. ۵۱. اشتوکلین، یووان (۱۳۶۸) **زمین‌شناسی و زمین‌ساخت فلات ایران**، ترجمه صادق حداد کاوه و حسن حسنعلی‌زاده، انتشارات وزارت علوم و تحقیقات و فناوری، تهران.

امیراحمدی، ابولقاسم؛ ثقفی، مهدی؛ ربیعی، مریم (۱۳۹۰) تحلیل و طبقه‌بندی چندمتغیره برای مدل‌سازی متغیرهای مؤثر بر شکل هندسی مخروط‌افکنه‌های دامنه شمالی کوهستان باقران (جنوب شهر بیرجند)، **جغرافیا و برنامه‌ریزی**

محیطی، ۴۴، صص. ۷۳-۹۰.

بخشنده مهر، لایلا؛ سلطانی، سعید؛ سپهر، عادل (۱۳۹۲) ارزیابی وضعیت فعلی بیابان‌زایی و اصلاح مدل مدالوس در دشت سگری اصفهان، نشریه مرتع و آبخیزداری، *مجله منابع طبیعی ایران*، ۶۶ (۱)، صص. ۲۷-۴۰.

پهلوانروی، احمد (۱۳۹۱) ارزیابی فرسایش و رسوبات بادی با استفاده از مدل IRIFR در منطقه زهک دشت سیستان. *جغرافیا و توسعه*، ۱۰ (۲۷)، صص. ۱۲۷-۱۴۰.

ثقفی، مهدی (۱۳۸۹)، *مطالعات ژئومورفولوژی حوضه‌های دامنه شمالی کوهستان باقران*، طرح پژوهشی دانشگاه پیام نور.

ثقفی، مهدی؛ امیراحمدی، ابوالقاسم؛ ربیعی، مریم (۱۳۹۵)، تشخیص واکنش‌های ژئومورفیک مخروط‌افکنه‌های جنوب دشت بیرجند به فعالیت‌های تکتونیکی و تغییرات آب‌وهوایی با استفاده از داده‌های میدانی، *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۰ (۵۷)، صص. ۹۷-۱۱۴.

ثقفی، مهدی؛ ربیعی، گسک، مریم (۱۳۹۴)، *تحلیل فضایی ریسک‌پذیری توسعه شهر بیرجند از جنبه محدودیت‌های طبیعی و طبقه‌بندی آن به کمک تکنولوژی اطلاعات ماهواره‌ای و سیستم اطلاعات جغرافیایی*، طرح پژوهشی، جمعیت هلال احمر استان خراسان جنوبی.

جباری، ایرج؛ ثقفی، مهدی (۱۳۸۳) پهنه‌های حساس به فرسایش بادی حوضه آبریز دستگرد بیرجند، *فضای جغرافیایی*، ۱۱، صص. ۷۳-۹۰.

حبیبی، علیرضا؛ شاد فر، صمد؛ صادقی، معصومه (۱۳۹۳) بررسی شدت بیابان‌زایی در رخساره‌های ژئومورفولوژی با استفاده از GIS در استان خوزستان، *نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۱۴ (۳۲)، صص. ۱۵۹-۱۴۱.

خطیب، محمد مهدی؛ زرین کوب، محمدحسین (۱۳۸۰) *کرونولوژی ساختاری و مراحل کانی‌زایی لیستونیت در پهنه برشی آرگین، مجموعه مقالات پنجمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران*، دانشگاه تهران.

خطیب، محمد مهدی (۱۳۶۸)، *تحلیل ساختاری کوه‌های جنوب بیرجند*، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، رشته زمین‌شناسی، گرایش تکتونیک، استاد راهنما: میرعلی اکبر نوگل سادات، دانشگاه تربیت مدرس.

ربیعی، مریم (۱۳۹۰)، *بررسی نقش مخروط‌افکنه‌های دامنه شمالی ارتفاعات باقران در منابع آب زیرزمینی دشت بیرجند*، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، رشته جغرافیا، گرایش ژئومورفولوژی در برنامه‌ریزی محیطی، استاد راهنما: ابوالقاسم امیراحمدی، دانشگاه حکیم سبزواری.

مصباح‌زاده، طیبه؛ احمدی، حسن؛ زهتابیان، غلامرضا؛ سرمیدان، فریدون (۱۳۸۹) ارزیابی شدت فرسایش بادی با بهره‌گیری از مدل IRIFR. E.A1 (بررسی موردی: ابوزیدآباد کاشان)، *نشریه مرتع و آبخیزداری، مجله منابع طبیعی ایران*، ۶۳ (۳)، صص. ۳۹۹-۴۱۵.

Blanka, V., Mezosi, G., Meyer, B. (2013) Projected Changes in the Drought Hazard in Hungary Due to Climate Change, *Idojaras: Q. J. Hungarian Meteorol. Serv*, 117, pp. 219-237.

Bohner, J., Schafer, W., Conrad, O., Gross, J., Ringeler, A. (2003) The WEELS Model: Methods, Results and Limitations, *CATENA*, 52 (3-4), pp. 289-308.

Boulghobra, N., Hadri, T., Bouhana, M. (2014) Using Landat Imagery for Monitoring the Spatiotemporal Evolution of Sanding in Dryland, the Case of IN-SALAH the Tidikelt (Southern Algerian SAHARA), *Geographia Technica*, 9 (1), pp. 1- 9.

Callot, Y., Marticorena, B., Bergametti, G. (2000) Geomorphologic Approach for Modelling the Surface Features of Arid Environments in a Model of Dust Emissions: Application to the Sahara Desert, *Geodinamica Acta*, 13 (5), pp. 245-270.

Carter, D. (1985). *Wind erosion research techniques workshop*, Esperance, WA.

Coen, G. M., Tatarko, J., Martin, T. C., Cannon, K. R., Goddard, T. W., Sweetland, N. J. (2004) A Method for Using WEPS to Map Wind Erosion Risk of Alberta Soils, *Environmental*

- Modelling & Software**, 19 (2), pp. 185-189.
- Eswaran, H., Lal, R., Reich, P. F. (2001). Land Degradation. An Overview Conference on Land Degradation and Desertification. Khon Kaen, **Thailand: Oxford Press, New Dehli, India**, 23(2), pp. 20-35.
- Goudie, A. S., Middleton, N. J. (2006) **Desert Dust in the Global System**, Springer, Berlin, Germany.
- Griffin, D. W., Garrison, V. H., Ferman, J. R., Shinn, E. A. (2001) African Desert Dust in the Caribbean Atmosphere: Microbiology and Public Health, **Aerobiologia**, 17, pp. 203 - 213
- Karaboga, D., Basturk, B. (2007) A Powerful and Efficient Algorithm for Numerical Function Optimization: Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm, **Global optimization**, 39 (3), pp. 459-471.
- Lawrence, H. (2004) Evaluation of the Wind Erosion Prediction System (WEPS) Erosion Sub Model on Cropland Fields, **Environmental Modeling & Software**, 19, pp. 171–176.
- Marticorena, B., Bergametti, G. (1995) Modeling the Atmospheric Dust Cycle: 1. Design of a Soil-Derived Dust Emission Scheme, **Geophysical Research**, 100 (D8), pp. 415-430.
- Mezosi, G., Meyer, B. C., Loibl, W., Aubrecht, C., Csorba P., Bata, T. (2013) Assessment of Regional Climate Change Impacts on Hungarian Landscapes, **Reg. Environ. Change**, 13, pp. 797–811.
- Mezosi, G., Szatmari, J. (1998) Assessment of Wind Erosion Risk on the Agricultural Area of the Southern Part of Hungary, **Hazardous Materials**, 61(1-3), pp. 139-153.
- Mitchell, M. (1998) **An introduction to genetic algorithms**, MIT press, USA.
- Nichols, K. K., Bierman, P. R., Hooke, R. L., Clapp, E. M., Caffee, M. (2002) Quantifying Sediment Transport on Desert Piedmonts, **Geomorphology**, 45, pp. 105-125.
- Oldeman, L. R. (1994) The Global Extent of Soil Degradation. In: D. J. Greenland, Szabolcs, I. (Editor), **Soil Resilience and Sustainable Land Use: Proceedings of a Symposium Held in Budapest, 28 September to 2 October 1992, Including the Second Workshop on the Ecological Foundations of Sustainable Agriculture (WEFSA II)**, CAB International, pp. 99-118.
- Oldeman, L. R., Hakkeling, R. T. A., Sombroek, W. G. (1991) **World Map of the Status of Human-Induced Soil Degradation, an Explanatory Note**. Second Revised Edition. ISRIC and UNEP, 34 p.
- Prospero, J. M., Ginoux, P., Torres, O., Nicholson, S. E., Gill, T. E. (2002) Environmental Characterization of Global Sources of Atmospheric Soil Dust Identified with the Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Absorbing Aerosol Product, **Reviews in Geophysics**, 40(1), pp. 2-31.
- Raiman, O. (1991). **Order of magnitude reasoning**. Artificial intelligence, 51(1), pp. 11-38.
- Sadeghi Ravesh. M. H, Ahmadi, H., Zehtabian, Gh. R, Tahmoures, M. (2013) Application of Numerical Taxonomy Analysis in Sustainable Development Planning of Combating Desertification, **Desert** 17, pp. 147-159.
- Smith, J. L., Lee, K. (2003) Soil as a Source of Dust and Implications for Human Health, **Advances in Agronomy**, 80, pp. 1-32.
- Thomas, D. S. G. (2000) **Arid Zone Geomorphology: Process, Form and Change in Drylands**, John Wiley & Sons, London.
- Washington, R., Todd, M., Middleton, N.J., Goudie, A.S. (2003) Dust-Storm Source Areas Determined by the Total Ozone Monitoring Spectrometer and Surface Observations, **Annals of the Association of American Geographers**, 93 (2), pp. 297-313.
- Willmott, C. J., Matsuura, K. (2005) Advantages of the Mean Absolute Error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance, **Climate Research**, 30 (1), pp. 79-82.
- Zobeck, T. M., Parker, N. C., Haskell, S., Guoding, K. (2000) Scaling up from Field to Region for Wind Erosion Prediction Using a Fieldscale Wind Erosion Model and GIS, **Agr. Ecosyst. Environ**, 82, pp. 247–259.

