



19th Iranian Soil Science Congress
2-4 December, 2025



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۱ تا ۱۳ آذر ۱۴۰۴



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



مدل سازی مکانی بخش فرسایش پذیر بادی خاک (EF) در بستر تالاب بین المللی هامون

مرضیه ریگی خالص^۱، علی شهریاری^{۲*}، ابراهیم شیرمحمدی^۳، وحید راهداری^۴، عباس میری^۵

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده آب و خاک؛ دانشگاه زابل، زابل، ایران

۲- دانشیار، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده آب و خاک؛ دانشگاه زابل، زابل، ایران؛ * Shahriari.ali@uoz.ac.ir

۳- استادیار، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده آب و خاک؛ دانشگاه زابل، زابل، ایران

۴- استادیار، گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی؛ دانشگاه زابل، زابل، ایران

۵- دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده آب و خاک؛ دانشگاه زابل، زابل، ایران

چکیده

فرسایش خاک یک مسئله جدی در اکوسیستم و کشاورزی است که مطالعات در مورد فرسایش پذیری بادی اطلاعات مهم و کلیدی برای پایداری مدیریت اراضی به ما می دهد فرسایش خاک تابعی از خصوصیات عامل فرساینده و فرسایش پذیری است و یکی از عوامل مهم در تخمین درست مقدار فرسایش خاک ارائه راهکار های برای مبارزه با آن است تالاب های بین المللی هامون دارای جایگاه ویژه زیست محیطی در شرق کشور می باشد اما به دلیل خشکسالی های پی در پی و طولانی و وزش بادهای شدید موسوم به ۱۲۰ روزه، بستر خشک این تالاب ها یکی از اصلی ترین منشا های گرد و غبار در شرق کشور و بخصوص منطقه سیستان محسوب می شوند. از این رو این پژوهش با هدف تهیه نقشه فرسایش پذیری بادی خاک بخشی از تالاب های بین المللی هامون انجام شد. برای این منظور حدود ۱۹۹ نقطه با روش نظارت شده تصادفی از سطح خاک (۱۰-۰ سانتی-متری) در بخش های واقع در ایران تالاب هامون انتخاب و مورد نمونه برداری قرار گرفت. بخش فرسایش پذیری بادی (EF) نمونه ها و به همراه برخی خصوصیات خاک با بکارگیری روش های استاندارد اندازه گیری شدند. نتایج نشان داده است که بهترین روش بین مدل های تغییر نمای برای EF مدل کروی بود و تناسب مکانی برای این فاکتور در کلاس تناسب متوسط قرار دارد. ارزیابی مدل های زمین آماری نیز نشان داد که روش کوکریجینگ با متغیر کمکی SAR بهترین روش برای مدلسازی مکانی بخش فرسایش پذیر خاک نسبت به روش کریجینگ و IDW است. از منظر پهنه بندی بخش فرسایش پذیر خاک نیز بخش های شمال شرق تالاب و مناطقی در غرب آن بیشترین حساسیت را به فرسایش بادی نشان دادند که می بایست برای مدیران و تصمیم گیران جهت کاهش پدیده فرسایش و متعاقب آن گردوغبار، این موضوع مورد توجه قرار گیرد.

واژگان کلیدی: فرسایش بادی، طوفان های گردوغبار، کوکریجینگ، بادهای ۱۲۰ روزه، سیستان

مقدمه

خاک به عنوان یکی از عوامل اصلی و ارکان مهم در توسعه پایدار و تولید محسوب می‌شود بیشتر برنامه‌های عمرانی کشور نیازمند شناسایی دقیق منابع خاک می‌باشد بیشتر از هر زمان دیگری به اطلاعات و نقشه‌های خاک با دقت و صحت بالاتری نیازمند می‌باشیم و برای تهیه نبودن مدیریت اراضی بایستی از تحول رقومی شدن بهره گرفت (موسوی و همکاران ۱۳۹۸) فرسایش بادی در سطح زمین گسترده است و پایداری کشاورزی را در مناطق خشک و نیمه خشک کاهش می‌دهد و باعث تخریب جدی خاک می‌شود این نه تنها اثرات منفی بر خصوصیات خاک دارد بلکه باعث بدتر شدن محیط زیست می‌شود و کیفیت هوا و مواد مغذی سطح خاک را هم تحت تاثیر قرار می‌دهد فرسایش بادی ممکن است با اختلال خاک ناشی از فعالیت‌های مختلف مانند کشت، چرا، ترافیک، تحریک و ترویج شود. می‌تواند بهره‌وری خاک را کاهش دهد (لینگ ۲۰۱۸) فرسایش باده همیشه به عنوان یک فرایند طبیعی تشکیل زمین رخ داده است (رولی ۲۰۲۴) اندازه خاکدانه‌ها و پایداری دو عامل کلیدی موثر بر فرسایش پذیری خاک و فرسایش بادی است در مطالعات فرسایش بادی مشاهدات میدانی نشان داده که اندازه ذرات ۰.۸۴ میلی‌متر در شرایط آزمایش غیر قابل فرسایش هستند در نتیجه این یافته‌ها نسبت خاکدانه‌های خاک سطحی با قطر کمتر است ۰.۸۴ فرسایش پذیری خاک نامیده می‌شود به یک معیار پذیرفته شده گسترده و برای سنجش فرسایش پذیری خاک توسط باد تبدیل شده (مینا و همکاران ۲۰۲۳) بامری (۱۳۹۹) پژوهشی با هدف بررسی تغییرات مکانی و مدل‌سازی فرسایش پذیری بادی در اراضی دشت سیستان انجام داد، نتایج این بررسی نشان می‌دهد متوسط میزان فرسایش پذیری خاک در منطقه ۳۷.۸۷ مگا گرم هکتار در سال می‌باشد، و همچنین میزان فرسایش خاک و بخش فرسایش پذیر خاک در منطقه دارای ساختار مکانی قوی هستند. نوری و همکاران (۱۴۰۱) در تحقیقی برآورد فرسایش بادی خاک به کمک روش شبکه عصبی مصنوعی و تلفیق آن با الگوریتم ژنتیک بررسی شد، منطقه مورد مطالعه بخشی از دشت الله آباد قزوین است، که درصد خاک دانه به عنوان شاخص فرسایش پذیری خاک (درصد شن، سیلت، رس، ماده آلی، کربنات کلسیم) اندازه‌گیری شد، برای مدل سازی فرسایش پذیری خاک از دو روش شبکه عصبی مصنوعی و تلفیق این روش با الگوریتم ژنتیک استفاده شد، نتایج نشان می‌دهد که جز فرسایش پذیری خاک یا پنج خصوصیت خاک SAR، pH، رس و مواد آلی و هدایت هیدرولیکی در سطح یک درصد همبستگی معنی داری دارد، مدل های مورد استفاده از صحت خوبی در برآورد دو مرحله آموزش و آزمون برخوردار نبود، هر دو مدل قدرت پیش بینی مشابهی داشتند آنالیزها نشان داد که بیشترین تاثیر فرسایش پذیری خاک در مدل ANN مربوط به ماده آلی و در مدل RNN-GA مربوط به رس بود (همکاران ۱۹۶۰- ۱۹۵۸) در گاردن سیتی کانزاس در زمینه تاثیر اندازه خاکدانه ها بر روی فرسایش پذیری خاک خشک نشان دادند که با افزایش میزان خاکدانه ها با قطر کمتر از ۰/۸۵ میلی متر حساسیت خاک به فرسایش باد افزایش می‌یابد. Zobeck در (۱۹۹۴) آزمایشات تونل باد نشان داد که میزان رطوبت خاک روی سرعت اصطحکاک باد تاثیر به سزایی می‌گذارد. (Hengl 2006) از شبکه عصبی مصنوعی در پیش بینی طوفان های گرد غبار (فرسایش پذیری) در شمال شرق چین استفاده کرد و نشان داد که ضریب همبستگی بین مقدار پیش بینی شد و اندازه‌گیری شد از مدل شبکه عصبی مصنوعی بیشتر از مدل حاصل از رگرسیون است. Colazo و Buschiazzo (2010) برای مطالعه فرسایش پذیری خاک در برابر فرسایش بادی از دو شاخص فرسایش پذیر بادی (EF) و پایداری خاکدانه خشک (DAS) در اراضی زراعی و غیرزراعی مناطق نیمه‌خشک آرژانتین استفاده نمودند. ایشان بر اساس مطالعه این دو فاکتور و خصوصیات حاکی مرتبط با آنها در یافتند که در خاک‌هایی با بافت ریز، انجام عملیات شخم به دلیل ایجاد زبری، مقاومت در برابر فرسایش بادی را افزایش می‌دهد. همچنین در خاک‌هایی با بافت متوسط تا درشت با افزایش ماده آلی خاک، به دلیل ایجاد و حفظ پوشش گیاهی، مقاومت در برابر فرسایش بادی افزایش می‌یابد (Borrelli و همکاران ۲۰۱۴) با استفاده از بخش فرسایش‌پذیر بادی (EF) و فاکتور سله سطحی خاک (SCF) اقدام به تهیه نقشه فرسایش‌پذیری بادی خاک های کل قاره اروپا نمودند و اظهار داشتند که نقشه تهیه شده دارای دقت بسیار بالایی (R2=0.89) می‌باشد نان و همکاران (۲۰۱۸) اعلام کردند که فرسایش بادی در مرتع زیر پا به طور قابل توجهی بیشتر از زمین های کشاورزی است نتایج نشان داد که فرسایش بادی در خاک های بیابانی ۱۳.۵ تا ۱۶.۴ برابر زمین های کشاورزی است.

تالاب‌ها یکی از با ارزش ترین اکوسیستم در دنیا محسوب می‌شوند که در اثر پدیده تغییر اقلیم خشکسالی و دخالت انسان صدمه های زیادی به منابع اکولوژیکی با ارزش آنها وارد شده است (ملکی و همکاران، ۱۴۰۱؛ عزیمی و همکاران، ۱۳۹۹).

برخی از فواید تالاب ها امکان استفاده از خدمات آبرزی پروری، حفظ گونه های مختلف گیاهی و جانوری، کنترل کیفیت آب و هوا، کنترل فرسایش خاک و غیره می باشد (Christie et al., 2012). تالاب ها بوم سازگاران بی نظیری هستند که ویژگی بوم شناسی منحصر به فردی دارند (جلیلی، ۱۳۹۸). بررسی وضعیت تالاب ها ومدلسازی منابع اکولوژیکی آنها می تواند توسط مدیران برای درک روند تغییرات پوشش اراضی آنها تصمیمات موثری باشد (Asadzad et al., 2018; Eskandari et al., 2020). تالاب ها ارزش استفاده های دارند. ارزش مبالغی که افراد به آن تمایل دارند. برای این منظور از تالاب ها حفاظت ونگهداری می کنند. برای بهره مندی تالاب ها برای نسل های آینده به عنوان منطقه تفریحی وجود داشته باشد و از آنجا دیدن کنند(دهمرده ۱۴۰۰). در سال های اخیربه دلیل اقلیم وفعالیت انسانی در بالا دست حوضه های آبریز ، تالاب ها و دریاچه ها خشک شده است. وافزایش چشمگیری در جهان داشته است. وبستر خشک این دریاچه ها وتالاب ها به عنوان منشاء گرد وغبار در جهان معرفی شده است. اثرات مخرب گرد وغبار تالاب ها مشکلاتی زیادی از جمله صدمه به تاسیسات عمومی وفرسایش وآلودگی خاک وسلامت انسان را به دنبال دارد(خاشی وهمکاران ۱۴۰۱).

تالاب هامون واقع در منطقه سیستان دارای منابع غنی و ارزشمندی هست که در زمان پرآبی امرار معاش مردم منطقه به آن وابسته بوده است و باعث پویایی وخود کفایی اقتصادی مردم این منطقه بود (ابراهیم خسفی و همکاران، ۱۴۰۲). متاسفانه در حال حاضر به دلیل خشکسالی های پی در پی نقش و کار کرد خود را از دست داده است مثلا نیزار و مراتع وحتی آب این دریاچه از بین رفته است (دهمرده و همکاران، ۱۴۰۱). از این رو، این تالاب ها یکی از اصلی ترین منسهای گرد و غبار در شرق کشور و بخصوص منطقه سیستان با وزش بادهای شدید موسوم به بادهای ۱۲۰ روزه محسوب می شوند. لذا پژوهش حاضر با هدف تهیه نقشه بخش فرسایش پذیر بادی خاک در تالاب بین المللی هامون با استفاده از روش های زمین آماری انجام شد.

مواد و روش ها

تالاب هامون در دشت سیستان در جنوب شرق ایران واقع شده است، این تالاب دربین مرز ایران افغانستان قرار دارد. تالاب هامون از سه بخش هامون سابوری، پوزک، هیرمند ساخته شده است. مساحت تالاب هامون حدود ۳۰۰۰۰۰ هکتار در ۳۰ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۳۷ دقیقه عرض جغرافیای، ۶۰ درجه و ۵۶ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۴۳ دقیقه طول جغرافیای در غرب شهر زابل در شمال سیستان بلوچستان قرار دارد (ملکی و همکاران، ۱۳۹۸). متوسط بارندگی منطقه کمتر از ۵۰ میلی متر می باشد. واقلم این منطقه دوماترین فوق خشک می باشد. مهم ترین عامل تهدید کننده این تالاب کاهش ورود آب رودخانه هیرمند به این تالاب وخشکسالی هدرولوژیک می باشد که در پی آن فرسایش وطوفان های گرد وغبار را به دنبال دارد.(Maleki et al., 2022).

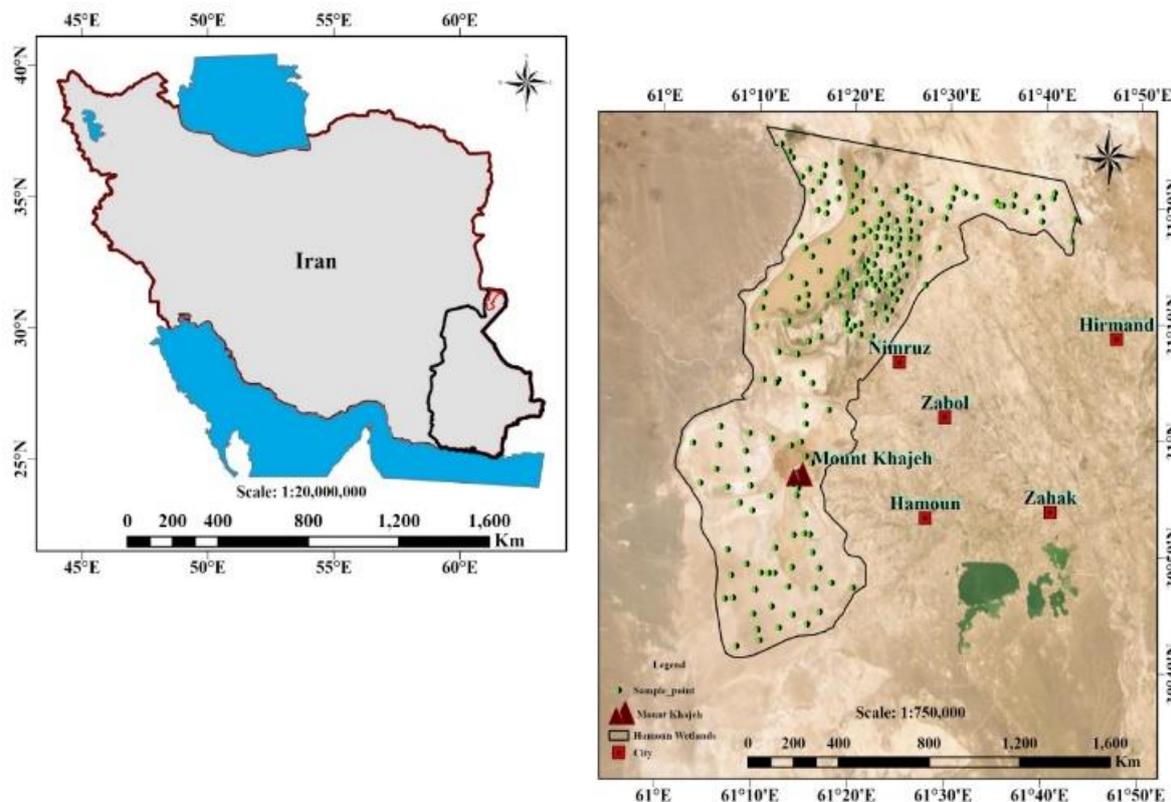
تعداد ۱۹۹ نمونه خاک از لایه سطحی خاک از عمق ۱۰-۰ سانتی متر به صورت نظارت شده تصادفی از منطقه تالاب هامون نمونه برداری شد (شکل ۱). نمونه های خاک ابتدا در هوا خشک شده اند و برای اندازه گیری ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک بخشی از نمونه ها کوبیده شده و از الک ۲ میلی متر عبور داده شدند. تعیین بافت خاک، جرم مخصوص ظاهری، هدایت الکتریکی و واکنش خاک در عصاره گل اشباع، کربنات کلسیم معادل، کربن آلی خاک، ظرفیت تبادل کاتیونی، نسبت جذب و سدیم (SAR) با استفاده از روش های استاندارد، اندازه گیری شدند. بخش فرسایش پذیری بادی خاک (EF) از معادله زیر و در نمونه های دست نخورده محاسبه شد:

$$EF = (W < 0.84 / TW) \times 100 \quad (\text{معادله ۱})$$

که در آن EF بخش فرسایش پذیری بادی آزمایشگاهی خاک، $W < 0.84$ وزن خاکدانه های کوچکتر از ۰/۸۴ میلیمتر پس از ۵ دقیقه شیک کردن با سرعت متوسط و TW وزن کل نمونه خاک (۲۰۰ گرم) (Skidmore et al., 1994; López et al., 2007).

تجزیه تحلیل های آماری پارامتر های فیزیکی وشیمیایی خاک و بخش فرسایش پذیری بادی را با استفاده از نرم افزار SPSS نسخه ۲۶ انجام شده است. آنالیز های زمین آمار با استفاده از نرم افزار ArcGIS نسخه ۱۰،۳ انجام شده که از ۳ روش مرسوم کریجینگ، کوکریجینگ، روش وزن دهی معکوس فاصله (IDW) انجام شده است و هر ۳ روش دو حالت ساده و معمولی در

نظر گرفته شدند و به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته اند. به منظور ارزیابی مدل‌های همبستگی مکانی R^2 و RSS و ارزیابی روش‌های زمین آماری از شاخص‌های ME و RMSE استفاده شد و بهترین مدل برای تهیه نقشه بخش فرسایش پذیر بادی خاک انتخاب گردید (متین فر و همکاران ۱۳۹۹).



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه برداری

نتایج و بحث

تحلیل‌های آماری

بر اساس شاخص چولگی و کشیدگی داده‌ها EF در مثبت و کمی از شرایط نرمال فاصله دارند (جدول ۱) و هم‌نین ضریب تغییرات (C.V) معیار تغییر پذیری نسبی است و اگر داده‌ها نسبت ۰/۲۵ باشند نشان دهنده ضریب تغییرات اندک است و اگر بین ۰/۲۵ تا ۰/۵۰ باشد ضریب تغییرات متوسط است و اگر بیشتر از ۰/۵۰ باشد ضریب تغییرات تغییر پذیری بالای دارد (کریمی نژاد و همکاران ۲۰۱۵) که بر این اساس فرسایش خاک تالاب هامون دارای ضریب تغییر پذیری متوسطی قرار دارد و مقدار میانگین تالاب هامون ۳۶,۵۶۷ درصد است که مقدار متوسطی است (جدول ۱). Shiyaty و همکاران (۱۹۶۵) اظهار داشتند بخش فرسایش‌پذیر بادی خاک کمتر از ۴۰ درصد نشان از فرسایش‌پذیری کم، بین ۴۰ تا ۵۰ درصد کلاس فرسایش‌پذیری متوسط و بیش از ۵۰ درصد فرسایش‌پذیری بالا را نشان می‌دهد و بر این اساس میانگین منطقه در کلاس فرسایش‌پذیری کم قرار می‌گیرند.

جدول ۱- برخی خصوصیات آماری

پارامتر	میانگین	حداقل	حداکثر	واریانس	چولگی	کشیدگی	انحراف معیار	ضریب تغییرات
EF	36.567	10.255	89.050	275.222	1.350	1.382	16.590	0.454

همبستگی بین خصوصیات خاک و EF در جدول ۲ ارائه شده است. جرم مخصوص ظاهری، سیلت و ظرفیت تبادل کاتیونی رابطه‌ای منفی و معنی‌دار و هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم رابطه‌ای مثبت و معنی‌دار را با EF نشان دادند. شایان ذکر است از این خصوصیات به عنوان متغیر کمکی در آنالیز زمین آمار (کوکریدجینگ) استفاده شد.

جدول ۲- همبستگی بین خصوصیات خاک و بخش فرسایش پذیر بادی

	EF	OC	BD	Clay	Silt	Sand	CCE	pH	EC	SAR	SP	CEC
EF %	1											
OC %	0.006	1										
BD (g/cm ³)	-0.264**	-0.129	1									
Clay %	0.099	-0.094	-0.039	1								
Silt %	-0.187**	0.079	-0.024	-0.337**	1							
Sand %	0.091	0.004	0.053	-0.505**	-0.643**	1						
CCE %	0.135	-0.116	-0.044	0.114	-0.277**	0.161*	1					
pH	0.058	0.049	-0.245**	0.074	0.035	-0.092	-0.064	1				
EC (dS/m)	0.263**	-0.054	-0.055	0.146*	-0.059	-0.065	-0.025	0.062	1			
SAR (mmol.l)	0.184**	-0.048	-0.224**	0.205**	-0.049	-0.122	0.068	0.111	0.398**	1		
SP %	0.006	-0.027	-0.008	0.522**	-0.205**	-0.237**	0.139*	0.104	0.362**	0.303**	1	
CEC (meq/100g)	-0.216**	0.208**	-0.019	-0.022	-0.001	0.018	-0.080	0.020	-0.053	-0.154*	-0.018	1

تحلیل همبستگی مکانی

تغییر نمای مناسب از بین مدل‌های کروی، گوسی، خطی برازش مورد بررسی قرار داده اند و بهترین مدل تغییر نما براساس حداقل مجموع مربعات (RSS) و حداکثر مقدار (R^2) انتخاب شد (جدول ۳) که برای بخش فرسایش پذیری بادی بهترین مدل کروی مورد بود. پژوهش‌های متعددی نیز نشان داده‌اند که مدل‌های کروی و نمایی بهترین برازش را بر تغییرات مکانی اغلب ویژگی‌های خاک دارند (یغمائیان مهابادی و همکاران، ۱۳۹۸؛ جمال‌زئی ثمره و همکاران، ۱۴۰۳؛ جیانگ و همکاران، ۲۰۱۲). نسبت واریانس قطعه ای به آستانه شاخص از قدرت ساختار مکانی است. اگر این نسبت ۰/۲۵ باشد متغیر از ساختار مکانی قوی دارد و اگر نسبت بین ۰/۲۵ تا ۰/۷۵ باشد ساختار متوسط مکانی دارد و اگر بیشتر از ۰/۷۵ باشد ساختار مکانی ضعیفی دارد (کامبادلا و همکاران ۱۹۹۴). تناسب مکانی برای فرسایش پذیری بادی تالاب هامون در کلاس متوسط قرار گرفته است.

جدول ۳- پارامترهای تغییر نمایی و معیارهای انتخاب مدل و کنترل اعتبار تغییر نما

پارامتر	مدل	اثر قطعه‌ای	آستانه	شعاع تأثیر	تناسب مکانی	میزان همبستگی	R^2	RSS
EF	Spherical	95.8	336.1	37700	0.715	متوسط	0.904	4510

ارزیابی مدل‌های زمین آماری

نتایج ارزیابی مدل‌های زمین آماری برای مدلسازی مکانی بخش فرسایش پذیر بادی خاک در جدول ۴ ارائه شده است. براساس شاخص‌های آماری روش کوکریدجینگ معمولی با متغیر کمکی SAR به عنوان بهترین و دقیق‌ترین روش برای تهیه نقشه EF در تالاب هامون عمل نمودند. مطالعات متعددی در مناطق مختلف ایران (اسدزاده و همکاران، ۱۳۹۷؛ اولیایی و همکاران، ۱۴۰۳) و دشت سیستان (حسین‌بر و همکاران، ۱۴۰۱؛ جمال‌زئی ثمره و همکاران، ۱۴۰۳؛ شهریاری و همکاران، ۱۴۰۴) سال‌های اخیر نشان دادند که روش کوکریدجینگ جهت برآورد و تخمین مکانی خصوصیات خاک از سایر روش‌های زمین آماری بهتر عمل می‌کنند.

شهریاری و همکاران (۱۴۰۴) در پژوهش خود دریافتند که روش کوکریدجینگ ساده با متغیر کمکی نسبت شن بر رس به- عنوان بهترین و دقیق‌ترین روش پیش‌بینی برای تهیه نقشه بخش فرسایش‌پذیری بادی خاک در دشت سیستان عمل نمود.

ایشان بیان نمودند که با توجه به اینکه متغیرهای کمکی منتخب در مدل‌سازی مکانی EF در منطقه از اجزاء اندازه ذرات بودند، و تطابق بالایی بین نحوه پراکنش EF با نحوه پراکنش اندازه ذرات خاک (شن، سیلت و رس) در منطقه وجود داشت، تغییرات ذرات معدنی خاک در منطقه وابسته به ماهیت ژئومورفیک منطقه و همراستا با تغییرات رژیم رسوبگذاری رودخانه هیرمند و شاخه‌های آن و همچنین فرایندهای فرسایش بادی و رسوبگذاری آن در دشت سیستان بودند. اما نتایج تحقیق حاضر نشان داد که در بستر تالاب هامون نقش مهم با شوری و سدیمی بودن خاک‌ها است و ارتباط بالایی با EF دارد. برخی پژوهش‌ها به ارتباط شوری و سدیمی بودن خاک‌ها با فرسایش بادی و فرسایش‌پذیری بادی اشاره نموده‌اند (Sirjani et al., 2019; Alizadeh Motaghi, 2020; Nouri et al., 2023). شوری به دلیل افزایش یون‌های مختلف در خاک ایجاد شده و سدیمی بودن به دلیل افزایش سدیم در محلول خاک و سایت‌های تبادل‌پذیری خاکدانه‌ها ایجاد می‌شود. در پژوهش حاضر SAR متغیر کمکی منتخب در مدل‌سازی مکانی EF بود که می‌تواند به دلیل این موضوع باشد که سدیمی شدن خاک‌ها موجب تخریب ساختمان آنها از طریق پراکنندگی رس‌ها می‌گردد (Sirjani et al., 2019; Nouri et al., 2023).

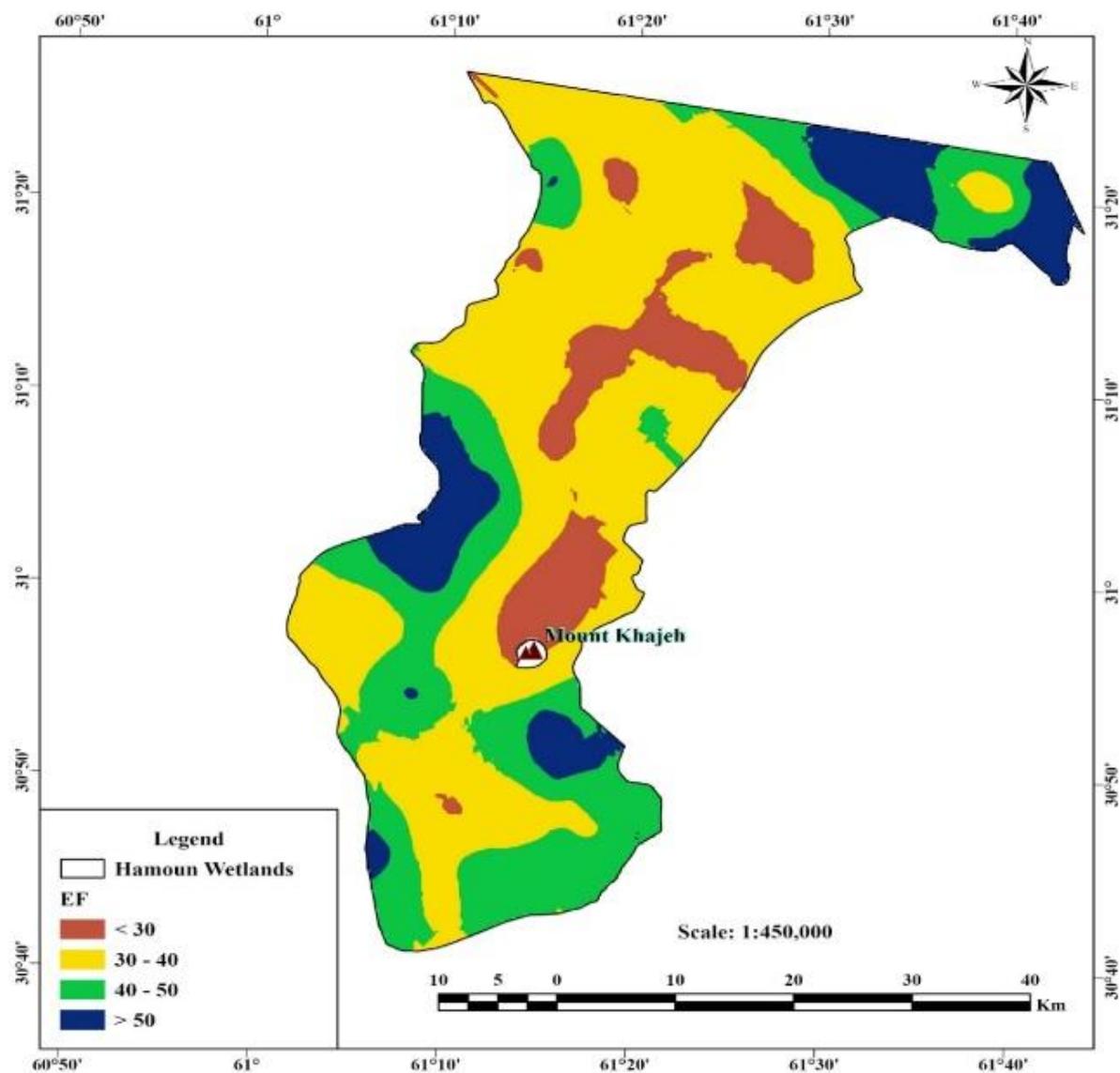
همان‌طور که اشاره شد بخش فرسایش‌پذیر بادی خاک کمتر از ۴۰ درصد نشان از فرسایش‌پذیری کم، بین ۴۰ تا ۵۰ درصد کلاس فرسایش‌پذیری متوسط و بیش از ۵۰ درصد فرسایش‌پذیری بالا را نشان می‌دهد (Shiyaty, et al., 1965). بر این اساس (شکل ۲) مشاهده می‌شود که مقدار فرسایش خاک در مناطق شمالی شرقی تالاب هامون (هامون پوزک)، جنوب شرقی (هامون هیرمند) و غرب و جنوب غربی تالاب هامون (هامون سابوری و هامون هیرمند) حساسیت به فرسایش‌بادی بیشتر از سایر مناطق است. بخش‌های عمده‌ای از هامون سابوری کمترین مقادیر فرسایش‌پذیری خاک را نشان دادند.

جدول ۴- نتایج مقایسه روش‌های زمین‌آماری برای تهیه نقشه بخش فرسایش‌پذیر بادی خاک

روش	متغیر کمکی	مدل	RMSE	ME
Kriging	-	Ordinary	15.829	0.020
	-	Simple	16.222	-1.924
Cokriging	BD	Ordinary	15.831	0.020
		Simple	15.796	-1.847
	Silt	Ordinary	15.920	0.050
		Simple	16.065	-1.014
	EC	Ordinary	15.735	0.009
		Simple	16.010	-1.187
	SAR	Ordinary	15.719	-0.014
		Simple	15.923	-1.846
CEC	Ordinary	15.817	0.020	
	Simple	15.848	-1.627	
IDW	-	Power1	15.945	-0.483
	-	Power2	16.368	-0.149
	-	Power3	17.135	-0.126

نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف پهنه‌بندی فرسایش‌پذیری بادی در تالاب بین‌المللی هامون انجام شد. یافته‌های تحقیق نشان داد که روش کوکریجینگ با متغیر کمکی SAR به‌عنوان دقیق‌ترین روش برای برآورد مکانی بخش فرسایش‌پذیر خاک در منطقه شناخته می‌شود. بر اساس نقشه نهایی، مناطق شمال شرق و غرب تالاب هامون به‌عنوان مناطق بحرانی فرسایش‌بادی و تولید گردوغبار شناسایی شدند. این نتایج به‌وضوح اولویت‌های مکانی را برای اجرای برنامه‌های مدیریتی و مهار فرسایش، جهت کاهش پدیده گردوغبار و حفاظت از اکوسیستم حساس منطقه سیستان برای مدیران و تصمیم‌گیران مشخص می‌کند.



شکل ۲- نقشه پراکنش بخش فرسایش پذیر بادی خاک

فهرست منابع

ابراهیمی خوسفی، م. (۱۴۰۲). تحلیل تغییرات مساحت تالاب‌های هامون و سایر پهنه‌های آبی منطقه سیستان با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای. نشریه جغرافیا و توسعه، ۲۱(۷۱): ۱۳۹-۱۶۵.

اسدزاده، ف.، خسروی اقدام، ک.، یغمائیان مهابادی، ن. و رمضانپور، ح. (۱۳۹۷). تغییرات مکانی ذرات معدنی خاک با استفاده از زمین آمار و سنجش از دور جهت پهنه‌بندی بافت خاک. آب و خاک، ۳۲(۶)، صص ۱۲۰۷ تا ۱۲۲۲.

اولیایی، ح.، صالحی، ع. و زارعیان، غ. (۱۴۰۳). ارزیابی روش‌های زمین‌آمار برای پهنه‌بندی برخی ویژگی‌های خاک منطقه دارنگان با کاربری‌های مختلف، استان فارس. تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۵(۱)، صص ۹۷ تا ۱۱۶.

بامری، الف. (۱۳۹۹). بررسی تغییرات مکانی و مدل سازی فرسایش پذیری بادی در اراضی دشت سیستان، پانزدهمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ساری.

جمال‌زئی ثمره، ی.، شهریاری، ع.، پهلوان راد، م.، ضیائی جاوید، ع. و بامری، ا. (۱۴۰۳). نقشه برداری سه بُعدی درصد رطوبت اشباع خاک با استفاده از تلفیق روش‌های زمین آماری و متغیرهای محیطی در دشت سیستان. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۳۱(۴): ۸۹-۱۱۱.

حسین‌بر، الف، شهریاری، ع، شیرمحمدی، الف، ضیائی جاوید، ع. رضائی، م. و موسوی، ر. ۱۴۰۱. بررسی ارتباط متغیرهای محیطی و فاکتور فرسایش پذیری آبی خاک در دشت سیلابی سیستان. پژوهش‌های مهندسی آب ایران، ۲(۴): ۵۷-۷۸.

خاشی، ک، اژدری مقدم، م. و هاشمی منفرد، الف. (۱۴۰۱). بررسی نیاز آبی تالاب هامون صابوری جهت کاهش اثرات گرد و غبار در زابل با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای. اکوهیدرولوژی، ۹(۴): ۷۶۱-۷۷۰.

دهمرد، م.، محمد قاسمی، م. و قاسمی، الف. (۱۴۰۱). ارزیابی کارکردهای حفاظتی و تفریحی تالاب هامون با استفاده از رهیافت ارزش گذاری مشروط. تحقیقات اقتصاد و توسعه کشاورزی ایران، ۳(۱): ۱۲۹-۱۴۳.

شهریاری، ع.، محمدی، م.، شیرمحمدی، الف، فاطمی قمشه، الف، گلوی، ه. ۱۴۰۴. بررسی پراکنش مکانی فرسایش پذیری بادی خاک در دشت سیستان با استفاده از روش‌های زمین آماری. مجله مخاطرات محیط طبیعی. دوره ۱۴، شماره ۴۳: ۱۱۱-۱۳۲.

متین فر، ح، مقصودی، ز. موسوی، ر. و جلالی، م. (۱۳۹۹). ارزیابی روش‌های یادگیری ماشین در نقشه برداری رقومی کربن آلی خاک‌های زراعی (بخشی از دشت خرم‌آباد). نشریه آب و خاک، ۴(۴): ۳۲۷ تا ۳۴۳.

موسوی، ر.، سرمدیان، ف.، امید، م. و بوگارت، پ. (۱۴۰۰). کاربرد مدل‌های یادگیری ماشین در برآورد مکانی فسفر و پتاسیم خاک در بخشی از اراضی دشت آبیک. پژوهش‌های خاک، ۳۵(۴): ۳۹۷-۴۱۱.

نورافر، ع.، غلامی، ح.، مرادی، ن.، راهداری، و. و رضایی، م. (۱۴۰۲). تعیین نقش تغییر کاربری اراضی بر توفان‌های گردوغبار در منطقه سیستان با پایه پیش‌بینی زنجیره مارکوف. مدیریت بیابان، ۱۱(۳): ۱-۱۶.

نوری، ع.، افتخاری، ک.، اسفندیاری، م.، محمدی ترکاشوند، ع. و احمدی، ع. (۱۴۰۱). برآورد جزء فرسایش‌پذیری بادی خاک به کمک مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و تلفیق شبکه عصبی مصنوعی با الگوریتم ژنتیک در بخشی از اراضی جنوب شرقی قزوین. پژوهش‌های فرسایش محیطی، ۱۲(۱): صص ۱۴۵ تا ۱۵۹.

یغمائیان مهابادی، ن.، سمیعی، ک.، زواره، م. و رمضانپور، ح. (۱۳۹۸). بررسی تغییرات مکانی برخی ویژگی‌های خاک و ارتباط آن با عملکرد چای در منطقه فومن گیلان. تحقیقات کاربردی خاک، ۷(۲): صص ۸۲ تا ۹۶.

- Alizadeh Motaghi, F., Hamzhepour, N., Mola ali abasiyan, S., Rahmati, M. (2020). The wind erodibility in the newly emerged surfaces of Urmia Playa Lake and adjacent agricultural lands and its determining factors. *Catena*, 194, pp 104675.
- Borrelli, P., Ballabio, C., Panagos, P., & Montanarella, L. (2014). Wind erosion susceptibility of European soils. *Geoderma*, 232, 471-478.
- Cambardella, C. A., Moorman, T. B., Novak, J. M., Parkin, T. B., Karlen, D. L., Turco, R. F., & Konopka, A. E. (1994). Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of American Journal*, 58, 1501-1511.
- Chepil, W. S. (1958). Soil conditions that influence wind erosion (No. 1185). US Department of Agriculture.
- Chepil, W. S. (1960). Conversion of relative field erodibility to annual soil loss by wind. *Soil Science Society of America Journal*, 24(2), 143-145.
- Christie, J., & Bostwick, P. (2017). Climate change adaptation plan for coastal and inland wetlands in the state of Michigan. A white paper prepared for the Michigan Department of Environmental Quality Wetlands Program and Coastal Management Program. Association of State Wetlands Managers Windham Maine https://www.aswm.org/pdf_lib/michigan_wetlands_and_climate_change_report_final_403251_7.pdf Accessed, 15.
- Colazo, J. C., & Buschiazzo, D. E. (2010). Soil dry aggregate stability and wind erodible fraction in a semiarid environment of Argentina. *Geoderma*, 159(1-2), 228-236
- Hengl, T., Heuvelink, G. B., Kempen, B., Leenaars, J. G., Walsh, M. G., Shepherd, K. D., ... & Tondoh, J. E. (2015). Mapping soil properties of Africa at 250 m resolution: Random forests significantly improve current predictions. *PloS one*, 10(6), e0125814.
- Hengl, T., Nussbaum, M., Wright, M. N., Heuvelink, G. B., & Gräler, B. (2018). Random forest as a generic framework for predictive modeling of spatial and spatio-temporal variables. *PeerJ*, 6, e5518.
- Huang, M., Peng, G., Zhang, J., & Zhang, S. (2006). Application of artificial neural networks to the prediction of dust storms in Northwest China. *Global and Planetary change*, 52(1-4), 216-224.
- Jiang, H.L., Liu, G.S., Liu, S.D., Li, E.H., Wang, R., Yang, Y.F., Hu, H.C. (2012). Delineation of sitespecific management zones based on soil properties for a hillside field in central China. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 58:10, pp 1075-1090.

- Karimi Nezhad, M. T., Tabatabaie, S. M., Gholami, A. (2015). Geochemical assessment of steel smelter-impacted urban soils, Ahvaz, Iran. *J. Geochem. Explor.* 152, pp 91-109
- Ling, N., Zhibao, D., Weiqiang, X., Chao, L., Nan, X., Shaopeng, S., Fengjun, X., Lingtong, D. (2018). A field investigation of wind erosion in the farming–pastoral ecotone of northern China using a portable wind tunnel: a case study in Yanchi County. *Journal of Arid Land*, 10(1), pp 27-38.
- López, M.V., de Dios Herrero, J.M., Hevia, G.G., Gracia, R., Buschiazzi, D.E. (2007). Determination of the wind-erodible fraction of soil using different methodology. *Geoderma*, 139, pp 407–411.
- Maleki, S., Rahdari, V., & Soffianain, A. (2022). Drought impact detection on wetlands in the arid area using Synthetic Aperture Radar data. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(9), 919.
- Mina, M., Rezaei, M., Sameni, A., Riksen, M. J., & Ritsema, C. (2023). Estimating the indices of soil erodibility to wind erosion using pedo- and spectro-transfer functions in calcareous soils. *Geoderma*, 438, 116612.
- Nan, L., Dong, Z., Xiao, W., Li, C., Xiao, N., Song, S., ... & Du, L. (2018). A field investigation of wind erosion in the farming–pastoral ecotone of northern China using a portable wind tunnel: a case study in Yanchi County. *Journal of Arid Land*, 10, 27-38.
- Shiyatyi, E.I., (1965). Wind structure and velocity over a rugged soil surface. *Vestnik Sel.-khoz. Nauki* 10.
- Sirjani, E., Sameni, A., Moosavi, A.A., Mahmoodabadi, M., Laurent, B. (2019). Portable wind tunnel experiments to study soil erosion by wind and its link to soil properties in the Fars province, Iran. *Geoderma*, 333, pp 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.012>.
- Skidmore, E.L., Hagen, L.J., Armburst, D.V., Durar, A.A., Fryrear, D.W., Potter, K.N., Wagner, L.E., Zobeck, T.M. (1994). Methods for investigating basic processes and conditions affecting wind erosion. In: Lal, R. (Ed.), *Soil Erosion Research Methods*. Soil & W. Cons. Soc. Ankeny, USA, pp. 295–330.
- Zobeck, T.M. (1994). Methods for investigating basic processes and conditions affecting wind erosion. In: Lal, R. (Ed.), *Soil Erosion Research Methods*. Soil & W. Cons. Soc. Ankeny, USA, pp. 295–330.

Spatial Modeling of the Soil Wind Erodible Fraction (EF) in the Bed of the International Hamoun Wetland

Marzieh Rigi Khalesh¹, Ali Shahriari^{2*}, Ebrahim Shirmohammadi³, Vahid Rahdary⁴, Abbas Miri⁵

1. M.Sc. Student, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Water and Soil; University of Zabol, Zabol, Iran
2. Associate Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Water and Soil; University of Zabol, Zabol, Iran; * Shahriari.ali@uoz.ac.ir (*Corresponding author)
3. Assistant Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Water and Soil; University of Zabol, Zabol, Iran
4. Assistant Professor, Department of Environmental Sciences, Faculty of Natural Resources; University of Zabol, Zabol, Iran
5. Associate Professor, Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Water and Soil; University of Zabol, Zabol, Iran

Abstract

Soil erosion is a serious challenge for ecosystems and agriculture, where studies on wind erodibility provide vital information for sustainable land management. Soil erosion is a function of both erosive agent characteristics and soil erodibility, and one key factor in accurately estimating soil erosion rates is to develop strategies to combat it. The international Hamoun wetlands hold significant environmental importance in eastern Iran; however, due to prolonged droughts and intense seasonal 120-day winds, their dried beds have become one of the primary sources of dust in eastern Iran, particularly in the Sistan region. This research was conducted to map the wind erodibility of soil in part of the international Hamoun wetlands. Approximately 199 sampling points were selected using supervised random sampling from the soil surface (0–10 cm depth) in the Iranian part of the Hamoun wetlands. The wind-erodible fraction (EF) of the samples, along with other soil properties, was measured using standard methods. The results indicated that among the variogram models, the spherical model was the best fit for EF, with moderate spatial dependence. Evaluation of geostatistical models showed that co-kriging with SAR as an auxiliary variable was the most accurate method for spatial modeling of soil erodibility compared to ordinary kriging and IDW. From a zoning perspective, the northeastern and western parts of the wetland showed the highest susceptibility to wind erosion. These areas should be prioritized by decision-makers and managers to reduce erosion and subsequent dust storms.

Keywords: Wind Erosion, Dust Storms, Co-Kriging, 120-Day Winds, Sistan.