

برون‌یابی مکانی گروه بزرگ خاک با استفاده از روش جنگل تصادفی در منطقه خشک ایران مرکزی (فاریاب-کهنوج)

- ❖ مهرانز نیستانی؛ دانشجوی دکتری گروه مهندسی علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
- ❖ فریدون سرمدیان*؛ استاد گروه مهندسی علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
- ❖ اعظم جعفری؛ استادیار دانشکده مهندسی کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.
- ❖ علی کشاورزی؛ استادیار گروه مهندسی علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

چکیده

در نقشه‌برداری رقومی، قوانین حاکم در بیان ویژگی‌ها و انواع خاک‌ها را می‌توان با استفاده از تعیین روابط خصوصیت تحت مطالعه-متغیرهای پیش‌بینی‌کننده محیطی و روش‌های مدلسازی کمی و عددی، استخراج نمود. در نتیجه، قوانین ایجاد شده از این روابط، قابل بسط و برازش به موقعیت‌های با شرایط مشابه می‌باشند که از آن تحت عنوان برون‌یابی یاد می‌شود. در مطالعه حاضر، دستیابی به نقشه رقومی خاک در منطقه‌ای که فاقد هرگونه اطلاعات خاک است (منطقه پذیرنده)، برون‌یابی با به‌کارگیری مدل جنگل تصادفی از منطقه دارای اطلاعات خاک (منطقه مرجع یا دهنده) مورد بررسی قرار گرفت. منطقه فاریاب شهرستان کهنوج به عنوان منطقه مرجع و منطقه کهنوج به عنوان منطقه پذیرنده انتخاب گردید. تشابه فاکتورهای خاکسازي دو منطقه مرجع و پذیرنده با استفاده از شاخص‌های تشابه اقلیمی، پستی و بلندی، زمین‌شناسی و شکل زمین بررسی گردید. در گام نخست، مدل جنگل تصادفی به منظور تعیین ارتباط کلاس‌های خاک با متغیرهای محیطی در منطقه مرجع استفاده گردید. نتایج حاصل از برازش این مدل در منطقه مرجع دقت کلی ۰/۸۸ و کاپا ۰/۷۷ را نشان می‌دهد. با توجه به عملکرد مناسب مدل در منطقه مرجع و شباهت دو منطقه، امکان استفاده از رابطه کلاس‌های خاک و متغیرهای محیطی استخراج شده در منطقه پذیرنده وجود دارد. نتایج حاصل از برون‌یابی دقت کلی ۰/۸۱ و کاپا ۰/۶۱ را در تخمین کلاس‌های خاک منطقه پذیرنده نشان می‌دهد. در نتیجه دستیابی به نقشه کلاس خاک منطقه پذیرنده با صرف هزینه و زمان به مراتب کم‌تری بوده‌است، لذا می‌توان برون‌یابی را به عنوان روشی کارآمد در تخمین و پیش‌بینی کلاس خاک در مناطق فاقد اطلاعات معرفی کرد.

کلید واژگان: نقشه‌برداری رقومی، منطقه مرجع، منطقه پذیرنده، برون‌یابی، مدل جنگل تصادفی، کلاس خاک.

۱. مقدمه

براساس تعریف سازمان کشاورزی ایالت متحده آمریکا [۲۸]. شناسایی خاک، ویژگی‌های خاک را در منطقه مطالعاتی تشریح می‌کند و براساس یک طبقه‌بندی استاندارد آن‌ها را طبقه‌بندی می‌نماید، به گونه‌ای که مرزبندی واحدهای خاک را مشخص کرده و در نهایت الگوی رفتاری آن‌ها را پیش‌بینی می‌نماید. در نتیجه کاربری‌های گوناگون از خاک و نحوه مدیریت اراضی در طرح برنامه‌ریزی و اجرای مطالعات مدنظر قرار می‌گیرد. این فعالیت‌ها که با هدف شناسایی و طبقه‌بندی خاک‌های موجود در یک منطقه انجام می‌گیرند، تحت عنوان نقشه‌برداری خاک بیان می‌شوند [۲۴].

در گذشته با استفاده از نقشه برداری مرسوم، اطلاعاتی در مورد تغییرات مکانی خاک فراهم شده است که اغلب در سطح جزئیات و دقت خصوصیات خاک محدودیت دارند [۳۱]؛ از طرفی، روش نقشه‌برداری مرسوم و سنتی پرهزینه و زمان‌بر می‌باشد و قابلیت باز تولید هم ندارند. تکنولوژی نقشه‌برداری خاک در طی دو دهه گذشته از مرحله پروسه تهیه نقشه‌های کاغذ محور به سمت پروسه نقشه‌برداری رقومی خاک سریعاً پیشرفت نموده است که به سرعت داده‌های نقشه پایه را آنالیز می‌کند و اطلاعات پیوسته از خصوصیات و انواع خاک را به صورت کمی تولید می‌نماید [۵].

اگرچه که این روش نقشه‌برداری امروزه به صورت اجرایی است اما با این وجود هنوز نکات ناشناخته در این روش برای نمایش بهتر پروسه‌های الگوی سرزمین و خاک وجود دارد [۲۲].

نقشه‌برداری رقومی می‌تواند دیدگاه تازه و نوینی در علم خاک‌شناسی ایجاد نماید و اطلاعات تفصیلی در مورد تغییرات جانبی و عمودی خاک ارائه دهد، به طوری که خاک‌شناسان را با سؤالات تحقیقاتی که در روش‌های سنتی لحاظ نمی‌شدند، مواجه می‌نماید [۱۷]. اما این

بدان معنا نیست که روش‌های صحرائی خاکشناسی از درجه اعتبار و کارایی ساقط می‌شوند، بلکه بدین موضوع اشاره دارد که می‌توان با استفاده از این روش، مطالب و نتایج در مورد خصوصیات و انواع خاک‌ها، تغییرات زمانی و مکانی و پراکنش آن‌ها در طول سیمای اراضی را به صورت قابل فهم‌تر در بخش‌های مختلف در اختیار کاربران قرار داد [۳۲].

تکنیک نقشه‌برداری رقومی در سال ۲۰۰۳ توسط مک برتنی به صورت فرمول ارائه شده است [۲۰]. این فرمول تحت عنوان اسکورپان شناخته می‌شود و در حقیقت تعمیم یافته مدل clorpt است که توسط ینی در سال ۱۹۴۱ به صورت فرمول ارائه شده است [۲۰] که در آن فاکتورهای تشکیل دهنده خاک را نشان می‌دهد. این فرمول به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$Sc[x,y,\sim t] \text{ or } Sp[x,y,\sim t]=f(s[x,y,\sim t],c[x,y,\sim t], \\ o[x,y,\sim t], r[x,y,\sim t], p[x,y,\sim t], a[x,y,\sim t], n)$$

در این تساوی Sc کلاس خاک، Sp خصوصیت خاک، s به عنوان خاک است که شامل سایر خصوصیات خاک در نقطه مشاهده‌ای می‌باشد که تابعی است از f، تحت عنوان تابع پیش‌بینی کننده خاک، c که نمایانگر خصوصیات اقلیمی محیط در نقطه مشاهده‌ای می‌باشد، o موجودات زنده که شامل پوشش گیاهی و جانوری و هم‌چنین شامل بشر نیز می‌باشد، r پستی و بلندی و خصوصیات مربوط به سیمای اراضی است، p مواد مادری و سنگ‌شناسی، a مربوط به سن و فاکتور زمان می‌باشد، n موقعیت مکانی است و t مربوط به زمان می‌باشد که زمان به صورت تقریبی بیان می‌شود. x, y مختصات مکانی هر کدام از نقاط را بیان می‌کند [۱۹].

از آنجایی که در استفاده از این روش، قوانین حاکم در بیان ویژگی‌ها و انواع خاک‌ها براساس روش‌های مدل‌سازی کمی و عددی استخراج می‌شود، لذا می‌توان با

محدودیت زمانی وجود داشته باشد و به تخمین کلی از خصوصیات نیاز باشد این روش کارآمد خواهد بود. در نتیجه تفاوت در شاخص‌های مطالعات مختلف نشان می‌دهد که دقت مورد انتظار توسط کاربران باید قابل از استفاده از این روش در نظر گرفته شود.

نتایج مطالعات برون‌یابی، با استفاده از دو روش مبتنی بر نقشه‌برداری رقومی براساس رگرسیون و زمین‌آماري چند نقطه‌ای تحت چارچوب ارائه شده به نام هوموسول [۱۸] نشان داد، در صورتی که روابط حاکم در منطقه مرجع و پذیرنده از قوانین یکسانی تبعیت کنند، کارآمد می‌باشد و در مقایسه بین دو روش در مطالعه آن‌ها روش‌های مبتنی بر آمار چند نقطه‌ای کارایی بهتری نشان دادند [۱۹].

در مطالعه‌ای [۱] به بررسی برون‌یابی با استفاده از مدل رگرسیون لاجستیک چندجمله‌ای برای تهیه نقشه خاک در منطقه خشک واقع در ایران پرداختند [۱]. نتایج مطالعه ایشان حاکی از عملکرد مناسب برون‌یابی با دقت ۶۰٪ می‌باشد که بدون صرف هزینه اضافی می‌باشد. لذا این روش در صورت انتخاب مناسب‌ترین و مرتبط‌ترین متغیرهای پیش‌بینی‌کننده، به عنوان راهی مناسب، آسان و سریع در نمایش توزیع خاک برای نقاطی از ایران که فاقد نقشه مطالعاتی و اطلاعات می‌باشد عمل می‌نماید.

بر اساس مطالعات انجام شده، استفاده از نقشه‌برداری رقومی در مطالعه خاک در نواحی مختلف ایران رو به افزایش است، با این وجود در بسیاری از مناطق به علت عدم دسترسی و یا دشوار بودن دستیابی اطلاعات خاک، فاقد هرگونه اطلاعات و نقشه‌های خاک می‌باشند. از این رو، در این مطالعه دستیابی به نقشه رقومی خاک به کمک فناوری برون‌یابی در سطح گروه بزرگ خاک با استفاده از مدل جنگل تصادفی در منطقه کهنوج از توابع استان کرمان را با استفاده از برازش اطلاعات به دست آمده از منطقه‌ای مطالعه شده و با در نظر گرفتن شرط تشابه در

استفاده از قوانین حاصله و برازش آن‌ها به موقعیت‌های مشابه، قوانین حاکم بر مناطق جدید که فاقد اطلاعات می‌باشند را به دست آورد، که تحت عنوان برون‌یابی از آن یاد می‌شود. فناوری برون‌یابی و یا با نام دیگر آن هوموسول [۱۸] در حقیقت نقشه‌برداری رقومی براساس برازش اطلاعات حاصل از مناطق مطالعه شده با لحاظ قرار دادن شرط تشابه در فاکتورهای خاکساز و در مناطق فاقد اطلاعات می‌باشد. به عنوان مثال اگر برای یک منطقه نقشه خاک تفصیلی موجود باشد (به عنوان منطقه مرجع) و فاکتورهای تشکیل خاک در این منطقه مشابه با منطقه دیگر باشد که اطلاعات خاک برای آن کم است و یا اصلاً نقشه خاک ندارد، ممکن‌ترین راه برای این گونه مناطق استفاده از تکنیک برون‌یابی است که اطلاعات و یا مدل از مناطقی که حاوی اطلاعات تفصیلی هستند به این گونه مناطق (منطقه پذیرنده) برازش داده می‌شود.

در راستای بررسی کارایی این روش در مطالعه‌ای از برون‌یابی به منظور تعیین کربن آلی خاک در مناطقی که شرایط دسترسی به آن‌ها دشوار است استفاده شد و نتایج مشخص نمود که استفاده از مطالعات پیشین مربوط به مناطقی که در دسترس قرار دارند به دلیل مشخص نمودن ساختار ارتباطی متغیر هدف-متغیرهای کمکی و ایجاد مدل پیش‌بینی‌کننده در منطقه دهنده اطلاعات و برازش آن به منطقه‌ای مشابه، که دسترسی به آن دشوار است، کارایی مناسبی دارد [۴].

در مطالعه‌ای به بررسی برون‌یابی و تعمیم مدل‌های پیوسته تغییرات مکانی (CMSV) در تخمین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک برای پهنه‌بندی‌های مشابه در نقشه‌های خاک تفصیلی در منطقه فرادنبه در ایران مرکزی پرداختند [۲۵]. نتایج آن‌ها مشخص نمود در صورتی که دقت بالا مورد نیاز محقق باشد تکنیک برون‌یابی قابل استفاده نمی‌باشد، اما در صورتی که

^۱Continuous models for spatial variability

^۱Generalisation

دگرگون شده همراه با کوارتزیت می‌باشند. در ناحیه کوهستانی جنوب علاوه بر سازندهای نام برده شده سنگ‌های اولترابازیک هم حضور دارند. قسمت‌های دشت، آبرفت‌های عهد حاضر شامل آبرفت‌های رودخانه‌ای، مخروط‌افکنه و مارن‌های گچی نمایان هستند.

۲.۲. منطقه مطالعاتی پذیرنده (کهنوج)

شهرستان کهنوج به عنوان منطقه پذیرنده اطلاعات استخراجی از منطقه مرجع انتخاب شده است (شکل ۱). در این منطقه سردترین ماه سال با $۱۴/۳$ درجه سانتی‌گراد متعلق به ماه دی می‌باشد و در اغلب ماه‌های سال هوای منطقه گرم و بسیار گرم می‌باشد و در ماه‌های زمستان هوا معتدل می‌باشد. گرم‌ترین ماه سال را تیر ماه با میانگین دمای $۳۷/۲$ درجه سانتی‌گراد به خود اختصاص داده است. بر اساس آمار ایستگاه هواشناسی این شهرستان در پانزده سال، میانگین بارش سالانه $۱۵/۹۰$ میلی‌متر می‌باشد. بیش‌ترین میزان بارندگی در ماه دی و کم‌ترین میزان مربوط به شهریور ماه می‌باشد. رژیم رطوبتی و حرارتی همانند منطقه مرجع به ترتیب اریدیک ترمیک می‌باشد. قسمت اعظم شهرستان کهنوج در حوزه آبریز غرب جازموریان واقع شده‌است. قدیمی‌ترین سازند منطقه مجموعه‌ای از سنگ‌های دگرگون شده شامل پشته‌های کلریتی مرمر و سنگ آهک با مقداری از سنگ‌های رسوبی آذرین می‌باشد. در شمال حوضه گرانیته و در سمت‌های غرب و جنوب غرب گدازه‌های بازالتی و آهک می‌باشد.

۲.۳. متغیرهای محیطی

از نظر تئوری نقشه‌برداری رقومی براساس رابطه بین خصوصیات خاک و فاکتورهای خاکساز می‌باشد اما در عمل، یک مشاهده خاکی منفرد به صورت یک نقطه مکان‌دار معرفی می‌شود و فاکتورهای خاکساز مربوط به آن نقطه به صورت برداری از ارزش پیکسل در تصاویر رستری چندگانه آن معرفی می‌شود. مراحل معمول برای استخراج تابع پیش‌بینی‌کننده مکانی اسکورپان براساس نقشه‌برداری

فاکتورهای خاکساز در فاریاب از توابع استان کرمان، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

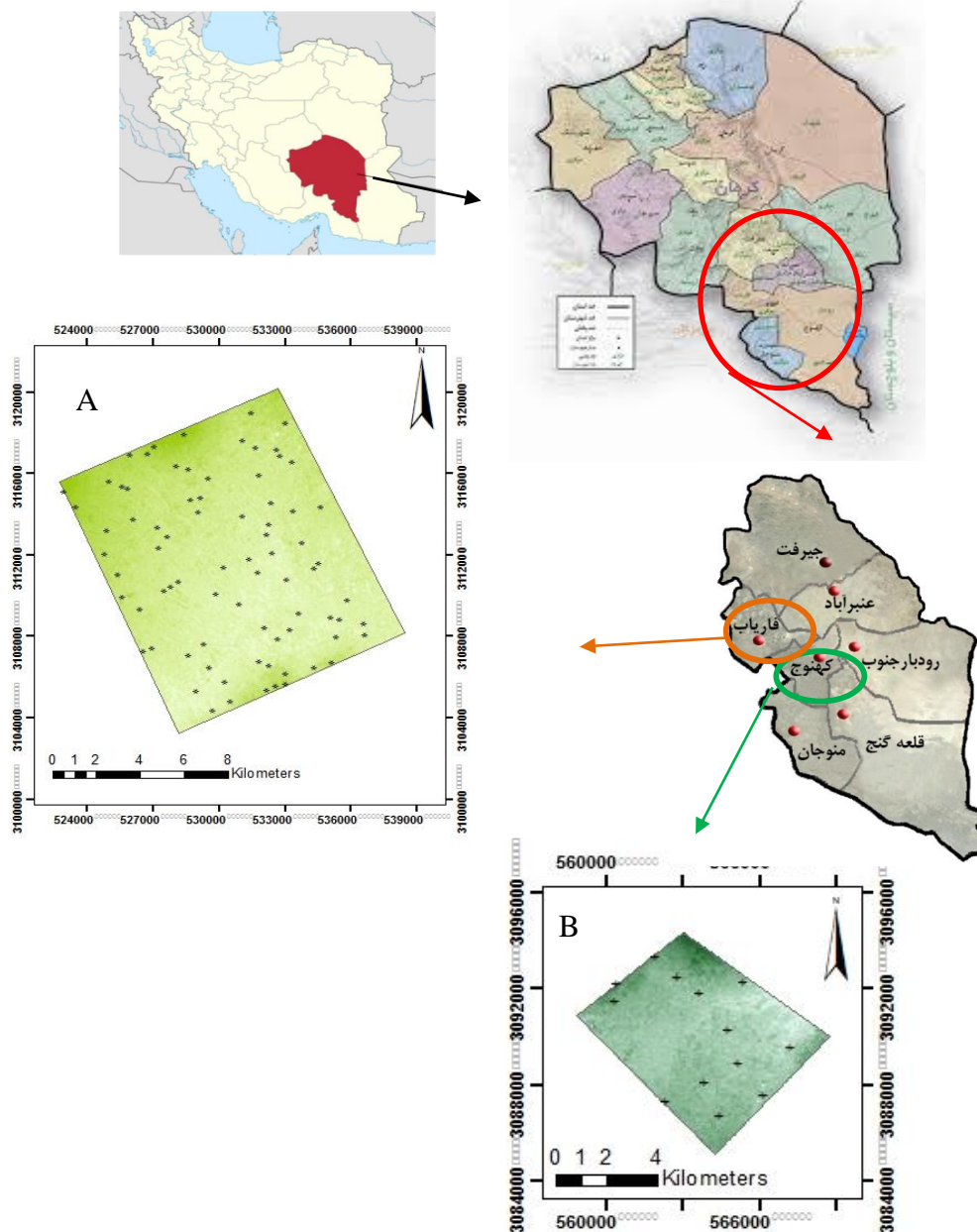
۲. روش‌شناسی

۲.۱. منطقه مطالعاتی مرجع (فاریاب)

به منظور انجام برون‌یابی لازم است در ابتدا یک منطقه حاوی اطلاعات تفصیلی خاک مشابه با منطقه فاقد اطلاعات تعیین شود که از آن تحت عنوان منطقه مرجع یاد می‌شود. منطقه مورد مطالعه با عنوان منطقه مرجع، در بخش فاریاب از توابع شهرستان کهنوج واقع در استان کرمان قرار گرفته‌است (شکل ۱). حداکثر درجه حرارت مربوط به تیر ماه ($۳۷/۵$ درجه سانتی‌گراد) می‌باشد. فصل گرما در این منطقه از فروردین ماه آغاز می‌شود و تا ماه آبان ادامه دارد؛ به عبارتی دوره گرما در این منطقه بیش از هشت ماه به طول می‌انجامد و فقط در ماه‌های زمستان درجه حرارت هوا کمی کاهش می‌یابد. سردترین ماه سال مربوط به دی ماه ($۱۳/۶$ درجه سانتی‌گراد) می‌باشد که البته درجه حرارت متوسط این ماه بالاتر از ده درجه می‌باشد، که این امر ناشی از عرض جغرافیایی پائین، آسمان صاف و بدون ابر و واقع شدن در مسیر توده هوای گرم دارای منشأ حاره‌ای و قرارگیری در منطقه‌ای خشک و بیابانی می‌باشد. بیش‌ترین میزان بارندگی مربوط به ماه‌های سرد سال (آذر، دی، بهمن و اسفند) می‌باشد و بارش در این ماه‌ها نسبت به ماه‌های گرم سال نوسانات شدیدی را نشان می‌دهد. میانگین بارش سالانه $۱۴/۲۶$ میلی‌متر می‌باشد. رژیم رطوبتی حاکم در این منطقه اریدیک و رژیم حرارتی ترمیک می‌باشد. تشکیلات در این منطقه در اکثر نواحی کوهستانی شمال و جنوب، برون‌زدگی دارند و در نواحی دشت به وسیله آبرفت‌های دوران اخیر پوشیده شده‌اند. در قسمت‌های شمال شرقی ناحیه کوهستانی آهک‌های مرمری شده همراه با امفیبولیت شیت سبز رنگ وجود دارد و به سمت شمال غربی بیش‌تر سازندها فیلیت و ماسه سنگ‌های

مشاهداتی و متغیرهای مربوطه براساس تابع پیش‌بینی کننده آموزشی در نقاط مشاهداتی برقرار می‌شود. متغیرهای محیطی استفاده شده در جدول (۱) ارائه شده است.

رقومی، شامل تقسیم کردن مشاهدات خاک (نقاط مشاهده‌ای) با فاکتورهای مدل اسکورپان (تصاویر رستری فاکتورهای مربوطه در مقیاس خاص) و آموزش تابع پیش‌بینی کننده می‌باشد. درحقیقت رابطه بین نقاط



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعاتی (A) مرجع و (B) پذیرنده در محدوده مطالعاتی و نقاط نمونه‌برداری در هر سطح

جدول ۱. متغیرهای محیطی استفاده شده در فرایند مدل‌سازی

نوع	تعریف	نام متغیر محیطی	منبع متغیرهای استخراجی	متغیرهای محیطی
کمی	ارتفاع (m)	dem	مدل رقومی ارتفاع	متغیرهای پستی و بلندی
	شاخص سایه‌اندازی تپه‌ها	anhill		
	شیب (/.)	Sl		
	عمق دره	Valley.dept		
	شاخص همواری دره با درجه تفکیک بالا	MrVBF		
	شاخص بالای پشته با درجه تفکیک بالا	MrRTF		
	انحنای پروفیلی	PrCu		
	انحنای صفحه ای	PICu		
	شاخص نسبت پوشش گیاهی	RVI		
	شاخص رس	CI		
کیفی	نسبت شوری	SR	ماهواره لندست ETM	متغیرهای سنجش از دور
	شاخص کربنات	Ca		
	شاخص آب سطح زمین	LSWI		
	نقشه ژئوform	Geof		
	نقشه زمین شناسی و لندفرم			
	نقشه ژئوform			

شاخص شوری، شاخص کربنات می‌باشند که با استفاده از تصاویر مربوط به باندهای ماهواره در محیط نرم افزار SAGA GIS استخراج گردیدند.

۳. نقشه ژئوform، به منظور تهیه این نقشه از نقشه زمین شناسی برای جدا سازی واحدهای زمین شناسی استفاده گردید. با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی نقشه مربوط به اشکال اراضی در محیط نرم افزار SAGA GIS 5.0.0 با استفاده از ابزار TPI based landform classification استخراج گردید، سپس این نقشه به همراه نقشه زمین شناسی با استفاده از ابزار intersect در Arc GIS 10.4 برهم منطبق شدند و در نتیجه نقشه تولیدی شامل واحدهای مجزایی می‌باشد که هر واحد سطح لندفرم و زمین شناسی خاص خود را خواهد داشت. در نهایت این نقشه را با استفاده از ابزار eliminate ساده گردید و به شکل نهایی خود در شکل (۲) ارائه گردید. توضیحات مربوط به شکل (۲) در جدول (۲) ارائه شده است.

پس از آن که متغیرهای محیطی به منظور ایجاد تابع پیش‌بینی تعیین و آماده گردیدند در مرحله بعد، مدل کالیبره شده با یاد به متغیرهای کمکی محیطی و

متغیرهای به کار برده شده در سه گروه براساس منبع قرار می‌گیرند:

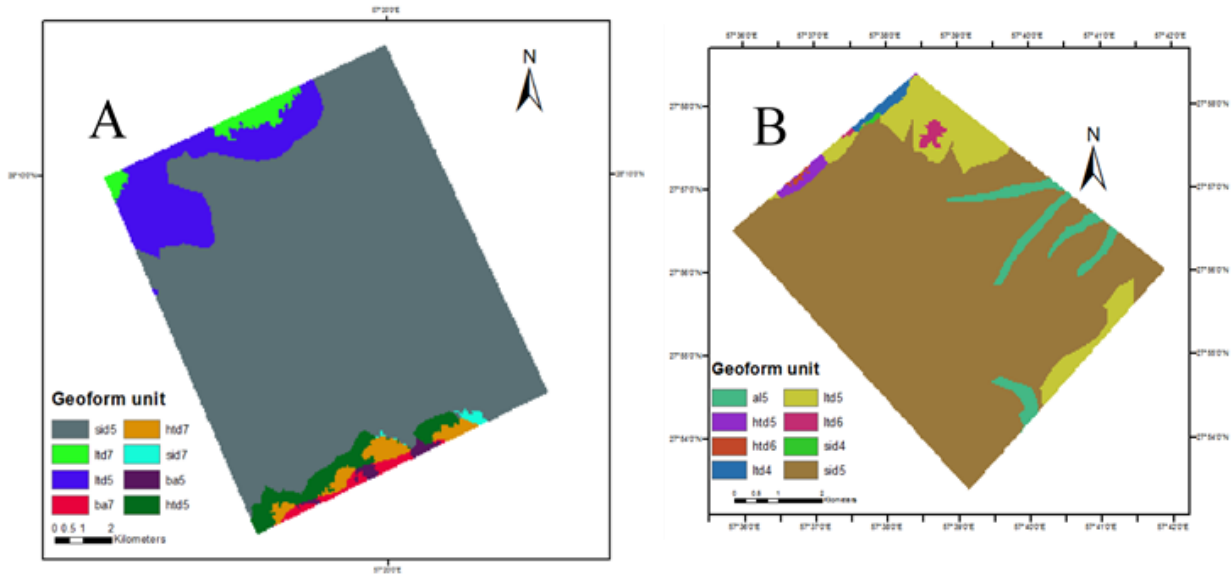
۱. متغیرهای محیطی مربوط به عوارض پستی و بلندی از نقشه رقومی ارتفاعی آلوس با رزلوشن مکانی ۱۲/۵ متر

(وبسایت آلاسکا فسیلیتی) استخراج شده‌اند. با استفاده از مدل رقومی ارتفاع عوارض محیطی نظیر ارتفاع، شیب، انحنای صفحه، انحنای پروفیل، شاخص همواری دره با درجه تفکیک بالا، شاخص بالای پشته با درجه تفکیک بالا، در محیط نرم افزار SAGA GIS 5.0.0 استخراج شده است.

۲. تصاویر ماهواره‌ای لندست به دلیل کیفیت بالا، قابلیت در دسترس بودن و حجم کم و فرمت‌های کمی برای تجزیه و تحلیل از برتری نسبی برخوردار می‌باشند. به منظور استخراج و پردازش تصاویر مربوطه، از تصاویر ماهواره لندست ۸ مربوط به ۳۰ اکتبر ۲۰۱۷ استفاده گردید. این تصاویر از وبسایت ارت اکسپلورر [۳۳] قابل دستیابی می‌باشند. شاخص‌های استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای شامل شاخص گیاهی نسبی، شاخص رس،

خاک باشد. اگر مدل ساخته شده بتواند هرگونه ساختار مکانی محلی را مشخص نماید، کیفیت پیش‌بینی‌های مدل به‌طور طبیعی بیشتر به مناطق در دسترس (مرجع) نزدیک خواهد بود.

خصوصیات خاک نمونه‌برداری شده در منطقه در دسترس برازش داده شود تا نقشه پیش‌بینی خصوصیات خاک در منطقه مورد مطالعه‌ای که در دسترس قرار ندارد را بتوان تهیه نمود. در نتیجه، نمونه‌برداری باید به‌گونه‌ای انجام شود که قادر به نمایش تغییرات خصوصیت تحت بررسی



شکل ۲. نقشه ژئوفرم: (A) مرجع و (B) پذیرنده

استفاده از این روش در منطقه فاریاب ۷۸ نقطه مشاهداتی و در کهنوج به عنوان پذیرنده ۲۶ نقطه مطالعاتی به عنوان نقاط مشاهداتی حفر شده است (شکل ۱). پس از حفر پرفیل‌ها تمامی مقاطع خاک براساس کتاب طبقه‌بندی آمریکایی [۲۷] تشریح گردیدند سپس بعد از انجام آنالیزهای فیزیکی و شیمیایی آزمایشگاهی تمامی خاک‌ها براساس کلید تاکسونومی خاک به روش آمریکایی تا سطح گروه بزرگ طبقه‌بندی شدند. تمامی متغیرهای محیطی براساس سیستم مختصات UTM با دیتوم WGS 1984 و Zone 40 تنظیم شده‌اند و بزرگنمایی تمامی تصاویر مربوطه براساس بزرگنمایی تصویر مدل رقومی ارتفاع، به ۱۲/۵ متر تبدیل شده است. در نهایت تمام متغیرهای محیطی به منظور انجام فرآیند مدل‌سازی در نرم‌افزار R وارد شده‌اند.

در نتیجه، با تشابه بیشتر بین دو منطقه، نتایج برون‌یابی نیز از قطعیت بیشتری برخوردار خواهند بود [۴]. در این مطالعه نمونه‌برداری براساس طرح نمونه‌برداری هایپرکیوب لاتین انجام شده است. بر اساس این روش موقعیت مکانی تعداد نقاط نمونه‌برداری براساس توزیع متغیرهای محیطی و فاکتورهای خاکساز، از پیش تعیین می‌شود. به این صورت که هر متغیر به تعداد نقاط مشخصه با فواصل مساوی تقسیم می‌شود و از هر فاصله یک نقطه به صورت تصادفی انتخاب می‌شود. تعداد مشخص به دست آمده برای هر متغیر (این تعداد برابر با تعداد نقاط از پیش تعیین شده نمونه‌ها می‌باشد) با دیگر متغیرها جفت می‌شود، به صورتی که پوشش کاملی از هر متغیر ایجاد گردد و تفاوت‌های مربوط به متغیرهای استفاده شده در سطح منطقه مطالعاتی لحاظ شود. با

جدول ۲. واحدهای جداشده نقشه ژئوفرم مربوط به (A) منطقه حرج، فاریاب و (B) منطقه پذیرنده (کهنوج)

ژئوفرم	شکل زمین		زمین‌شناسی	
	علامت شکل زمین	واحد شکل زمین	علامت زمین‌شناسی	زمین‌شناسی
al.5	۵	دشت	al	رسوبات رودخانه‌ای
Sid.4	۴	دره	Sid	رسوبات شسته شده
Sid.5	۵	دشت	Sid	رسوبات شسته شده
Sid.7	۷	مناطق با شیب زیاد	Sid	رسوبات شسته شده
ltd.4	۴	دره	ltd	مخروط افکنه های سطوح پائینی پیمونت‌ها و رسوبات تراس
ltd.5	۵	دشت	ltd	مخروط افکنه های سطوح پائینی پیمونت‌ها و رسوبات تراس
ltd.6	۶	مناطق با شیب کم	ltd	مخروط افکنه های سطوح پائینی پیمونت‌ها و رسوبات تراس
ltd.7	۷	مناطق با شیب زیاد	ltd	مخروط افکنه های سطوح پائینی پیمونت‌ها و رسوبات تراس
ba.5	۵	دشت	ba	مواد اوفیپلیتیک
ba.7	۷	مناطق با شیب زیاد	ba	مواد اوفیپلیتیک
htd.5	۵	دشت	htd	مخروط افکنه های سطوح بالایی پیمونت‌ها و رسوبات تراس
htd.6	۶	مناطق با شیب کم	htd	مخروط افکنه های سطوح بالایی پیمونت‌ها و رسوبات تراس
htd.7	۷	مناطق با شیب زیاد	htd	مخروط افکنه های سطوح بالایی پیمونت‌ها و رسوبات تراس

۲.۴. تعیین تشابه

از آنجایی که رابطه خاک-سیمای اراضی در منطقه مطالعه نشده بر اساس رابطه به دست آمده از منطقه مرجع پیش‌بینی می‌شود در نتیجه، مناطق مرجع و یا دهنده اطلاعات باید از این نظر که شرایط موجود در این مناطق تا چه حد در مناطق پذیرنده اطلاعات موجود می‌باشد، مورد ارزیابی واقع شوند تا بتوان از متغیرهای محیطی قابل استفاده در روند پیش‌بینی مربوط به منطقه مرجع استفاده نمود. به منظور کاربردی ساختن این هدف بایستی شرط اساسی برای انجام برون‌یابی، وجود تشابه بین دو منطقه مرجع و پذیرنده، رعایت گردد. به منظور محقق ساختن این امر، شباهت بین دو منطقه را می‌توان با مقایسه آن‌ها از طریق هیستوگرام، کلاستر و یا غالبیت کلاس و یا روش‌هایی که انواع متغیرهای کمکی بین دو منطقه را با

استفاده از قیاس‌های کیفی و یا توسط شاخص‌های اندازه‌گیری رسمی مورد سنجش قرار می‌دهد، مورد ارزیابی قرار داد. در مطالعه حاضر، به منظور تعیین تشابه دو منطقه از روش عددی برای تعیین تشابه فاکتورهای خاکساز در دو منطقه استفاده شد. در صورتی که دو منطقه مطالعاتی از نظر تشابه در فاکتورهای خاکساز با یکدیگر ارتباطی را نتوانند نشان دهند، به منزله عدم کارایی روش مربوطه خواهد بود. متغیرهای مورد استفاده به منظور تعیین تشابه شاخص‌های تشابه اقلیمی شامل متوسط بارندگی سالانه، متوسط درجه حرارت سالانه، متوسط درجه حرارت ماهانه، متوسط بارندگی ماهانه، دوره مرطوب و دوره خشک می‌باشند. به منظور تعیین تشابه در پستی‌وبلندی از شاخص‌های ارتفاع، شیب و شاخص خیزی استفاده شده است که قابل استخراج از مدل رقومی ارتفاع می‌باشند.

فاکتورهای خاکساز باشد به منزلهٔ عدم کارایی برون‌یابی در دو منطقه می‌باشد.

۲.۵. مدل‌سازی مکانی و پیش‌بینی کلاس گروه بزرگ خاک در فاریاب و کهنوج

پس از اثبات تشابه دو منطقه از نظر فاکتورهای خاکساز، در گام بعدی نقشهٔ رقومی کلاس خاک در محدودهٔ مطالعاتی مرجع با استفاده از متغیرهای محیطی مستقل ارائه شده در جدول (۱)، پیش‌بینی گردید. در حقیقت، مدل استفاده شده رابطهٔ خصوصیت تحت بررسی را در طول سیمای اراضی، با توجه به مقادیر مربوط به متغیرهای محیطی و تغییرات آن‌ها مورد بررسی قرار داده است. در این مطالعه، برای پهنه‌بندی کلاس‌های خاک در سطح گروه بزرگ، کلاس خاک به عنوان متغیر وابسته با استفاده از روش جنگل تصادفی مورد پیش‌بینی قرار گرفته است. متغیرهای محیطی تحت عنوان متغیر مستقل که در فرآیند پیش‌بینی مؤثر شناخته می‌شوند به دو صورت کمی و کیفی می‌باشند و در این مطالعه تنها نقشهٔ ژئوفرم به صورت متغیری کیفی است که ترکیبی از دو متغیر کیفی شکل زمین و زمین‌شناسی می‌باشد، به منظور مدل‌سازی استفاده شده است و سایر متغیرها که کمی می‌باشند در جدول (۱)، مشخص شده‌اند.

مدل جنگل تصادفی که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است، یکی از ابزارهای موفق در زمینهٔ داده‌کاوی می‌باشد و قادر به پیش‌بینی انواع کلاس خاک با استفاده از هم‌متغیرهای کمی و هم‌کیفی می‌باشد [۲] در این مدل یک درخت طبقه‌بندی بر روی نمونه‌های آموزشی برآزش داده می‌شود و به‌جای آن که یک درخت بزرگ باشد که در انتها هرس شود، تعدادی درخت مستقل و ضعیف‌تر از نمونه‌های مستقل به کار برده می‌شود. استفاده از این نوع نمونه‌ها در مدل جنگل تصادفی باعث می‌شود که پیش‌بینی‌ها کم‌تر به بیش برآزش حساس باشد [۱۰، ۳۰]. در حدود دو سوم از مشاهدات به عنوان داده‌های آموزشی در ساخت درخت‌ها انتخاب خواهند شد و یک سوم

زمین‌شناسی که بیان‌کنندهٔ مواد تشکیل‌دهنده و سن سطح زمین می‌باشد از دیگر موارد در تعیین نوع خاک‌ها می‌باشد، لذا با استفاده از نقشهٔ ژئوفرم می‌توان این دو مورد و شکل سطوح پستی و بلندی را از نظر تشابه در دو منطقه تحت بررسی قرار گرفت. شاخص‌های گیاهی استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای به منظور تعیین تشابه پوشش گیاهی سطح زمین مورد استفاده قرار گرفتند.

تشابه فاکتورهای خاکساز دو منطقه را با استفاده از شاخص گوور [۱۱] می‌توان محاسبه نمود (معادلهٔ ۱). این شاخص، تشابه بین دو منطقهٔ i و j با تعداد معین p از متغیرهای به کار برده شده که توسط دامنه از متغیرهای مربوطه k استاندارد می‌شود محاسبه می‌نماید:

$$S_{ij} = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p \left(1 - \frac{|X_{ik} - X_{jk}|}{\text{range } k} \right) \quad \text{معادلهٔ ۱}$$

که در این معادله p نمایانگر تعداد متغیرهای به کار رفته است، $|X_{ik} - X_{jk}|$ به منزلهٔ تفاوت مطلق متغیری خاص در دو منطقهٔ i و j می‌باشد و S_{ij} شاخص تشابه است که دامنهٔ بین صفر تا ۱ را خواهد داشت. در صورتی که فاکتورهای خاکساز مقادیر نزدیک به ۱ داشته باشند دو منطقه از نظر فاکتور مدنظر تشابه داشته‌اند. متغیرهای کیفی مانند ژئوفرم ابتدا باید به نقشه‌های رستری تبدیل شوند و به هر واحد ژئومورفیک کد مشخصی را اختصاص داد تا بتوان شاخص تشابه گوور را برای آن تعیین نمود اما از طرفی می‌توان برای این گونه متغیرها از شاخص ژاکارد [۱۲] استفاده کرد (معادلهٔ ۲) تا تشابه را مورد بررسی قرار داد:

$$J = \frac{a}{a+b+c} \quad \text{معادلهٔ ۲}$$

که در این معادله a نمایانگر تعداد واحدهای حاضر در هر دو منطقه است، b تعداد واحدهایی که فقط در منطقهٔ i حاضر هستند و c تعداد واحدهایی که فقط در منطقهٔ j حاضر می‌باشند. این ضریب نیز از ۰ تا ۱ متغیر است که ۰ به منزلهٔ عدم تشابه و ۱ به منزلهٔ تشابه کامل در دو منطقه می‌باشد. در صورتی که دو منطقه فاقد تشابه در

متغیرهای محیطی و متغیر وابسته در منطقه مرجع، سطح مطالعاتی موجود در منطقه پذیرنده از نظر خصوصیت مورد بررسی، تحت پیش‌بینی قرار می‌گیرد.

۲.۶. اعتبارسنجی

در منطقه مرجع از ۸۰٪ داده‌ها به عنوان داده آموزشی جهت ایجاد مدل به صورت تصادفی انتخاب شد و از ۲۰٪ داده‌ها برای اعتبارسنجی مستقل مدل ساخته شده استفاده گردید. اعتبارسنجی با استفاده از بسته *ithir* موجود در نرم‌افزار R توسط شاخص‌های اعتباردهی استخراج شده از ماتریس ابهام دقت کلی و ضریب کاپا انجام شده است. شاخص دقت کلی، میانگینی از دقت طبقه‌بندی می‌باشد و نسبت سلول‌هایی که به‌درستی طبقه‌بندی شده‌اند به کل سلول‌های موجود می‌باشد. بیان‌کننده نسبت نقاطی است که به‌درستی پیش‌بینی شده‌اند به کل داده‌ها است و در حقیقت نسبت عناصر قطر اصلی ماتریس ابهام (ff, tt) به تعداد کل نقاط مورد پیش‌بینی می‌باشد (tt, ff, tf, ft).

$$OA = \frac{tt+ff}{tt+ft+tf+ff} \quad \text{معادله ۳}$$

عناصری که به‌درستی پیش‌بینی شده‌اند را با tt و ff مشخص شده‌اند و عناصری که به اشتباه پیش‌بینی شده‌اند را به صورت tf و ft نشان می‌دهند.

این شاخص احتمال اینکه یک کلاس تا چه اندازه ممکن است به صورت تصادفی پیش‌بینی شده باشد را نشان می‌دهد [۱۱]. به عبارتی مقدار عددی ضریب کاپا طبقه‌بندی را با حالتی که به صورت تصادفی طبقه‌بندی شود را مقایسه می‌کند. این شاخص همیشه مقدار عددی کم‌تر از دقت کلی را به خود اختصاص می‌دهد. کاپا برابر ۱۰۰ به منزله یک طبقه‌بندی کاملاً صحیح می‌باشد و کفایت بالای پیش‌بینی می‌باشد [۸] و مقادیر بین ۰ تا ۱۰۰ هر یک سطح معینی از این طبقه‌بندی را به خود اختصاص می‌دهد و مقادیر ضریب کاپای منفی به منزله یک طبقه‌بندی کاملاً تصادفی با نتایج بد می‌باشد [۶].

باقی‌مانده از داده‌ها که در آموزش مدل استفاده نمی‌شوند، به عنوان خارج از سبد معرفی می‌شوند که در حقیقت میزان خطا و دقت مدل را نشان می‌دهند [۲۳]. برای هر درخت یک زیرمجموعه تصادفی از متغیرهای محیطی برای تقسیم‌بندی گره‌ها در هر درخت به کار برده می‌شود [۹] که منجر به همبستگی کم‌تر میان درخت‌های منفرد می‌شود [۳]. در هر جنگل تعداد متغیرهای محیطی در هر گره و تعداد درختان توسط محقق تعیین می‌شود. با استفاده از این مدل دو شاخص اندازه‌گیری اهمیت متغیرها قابل دستیابی می‌باشد: میانگین کاهش دقت (MDA) و میانگین کاهش جینی. میانگین کاهش دقت براساس ارزیابی متغیرهای شرکت‌کننده در دقت پیش‌بینی می‌باشد [۳۰]. میانگین کاهش در جینی، میانگینی از کاهش کلی در ناخالصی‌های گره با تقسیم شدن مجموعه داده‌ها بر روی تمامی درخت‌ها را اندازه‌گیری می‌کند [۱۶] در حالی که گره‌های انتهایی خلوص بالایی را ایجاد می‌کنند، یک متغیر ممکن است میانگین کاهش جینی، بالایی را نشان دهد [۲].

در مطالعه حاضر، مدل‌سازی براساس مدل جنگل تصادفی در سطح گروه بزرگ انجام گرفته است. مدل‌سازی با این روش توسط بسته *RandomForest* [۱۶] موجود در نرم‌افزار R ۳.۴.۳ انجام گرفت. ۸۰٪ داده‌های منطقه مرجع (۶۲ نقطه مشاهداتی) به عنوان داده آموزشی جهت ایجاد مدل به صورت تصادفی انتخاب شد و از ۲۰٪ داده‌ها (۱۶ نقطه مشاهداتی) برای اعتبارسنجی مستقل مدل ساخته شده استفاده گردید. اعتبارسنجی با استفاده از بسته *ithir* موجود در نرم‌افزار R انجام پذیرفت.

در صورت وجود تشابه بین دو منطقه مرجع به عنوان دهنده اطلاعات خاک و منطقه پذیرنده (که در بخش ۴.۲ ارائه گردید)، مدل‌های استخراج شده از منطقه مرجع که دقت و عملکرد مناسب را داشته باشند، به منظور برون‌یابی نمونه‌های شاهد در منطقه پذیرنده مورد استفاده قرار می‌گیرند. به این صورت که براساس روابط استخراج شده

نمودارها را برای این دو منطقه نشان می‌دهد. در این نمودار خلاصه‌ای از میانگین متغیرهای اقلیمی فراهم می‌شود که حاکی از تشابه در وقوع دوره مرطوب و خشک حاکم در دو منطقه می‌باشد. از آن جا که فاریاب فاقد ایستگاه هواشناسی می‌باشد از نزدیک‌ترین ایستگاه برای تعیین خصوصیات اقلیمی آن استفاده شده است. برای تعیین تشابه متغیرهای کمی از شاخص گوور و متغیرهای کیفی (ژئوفرم) از شاخص ژاکارد استفاده شده است و در نهایت با میانگین‌گیری از مجموع مقادیر، شاخص تشابه مشخص می‌شود. مقادیر بالای این شاخص، نزدیک به ۱، حاکی از تشابه بیش‌تر دو سطح مطالعاتی است. با اثبات تشابه بین دو منطقه، مدل‌سازی به منظور پیش‌بینی گروه بزرگ خاک انجام شده است. نتایج تعیین تشابه دو منطقه در جدول (۳) مشخص شده است. میانگین کلی شاخص تشابه بین دو منطقه برابر با ۰/۸۳ می‌باشد که حاکی از تشابه ساختاری در دو سطح مطالعاتی می‌باشد.

۳.۲. پیش‌بینی کلاس‌های گروه بزرگ خاک

منطقه مرجع (فاریاب)

در گام اول پس از تعیین تشابه دو منطقه، رابطه پیش‌بینی‌کننده کلاس خاک با توجه به نقاط مشاهداتی در منطقه مطالعاتی فاریاب و متغیرهای محیطی طی مدل‌سازی جنگل تصادفی استخراج شده است. در این مطالعه به منظور پیش‌بینی گروه بزرگ خاک‌های منطقه مطالعاتی، مدل جنگل تصادفی توسط ۶۲ نمونه شاهد موجود در منطقه مرجع با استفاده از متغیرهای محیطی ذکر شده، برآزش داده شد. همان‌طور که شکل (۴) مربوط به نقشه ژئومورفولوژی فاریاب نشان می‌دهد، منطقه مرجع در قسمت‌های شمالی توسط مخروطه افکنه‌های مربوط به کوه پارسفید در شمال فاریاب آغاز و در قسمت جنوبی به مخروطه افکنه‌های منشعب شده از کوه شاه منتهی می‌شود. حدفاصل سطوح مخروطه افکنه‌ای، سطوح اراضی مربوط به دشت دامنه‌ای و سطوح پلایایی قرار دارند. در سطوح پلایایی به علت حضور مقادیر بالای

مقادیر ضریب کاپای بالای ۰/۸ نشان‌دهنده توافق بالای پیش‌بینی با مشاهدات می‌باشد و مقادیر ۰/۴ تا ۰/۸ توافق متوسط و همچنین مقادیر کم‌تر از ۰/۴ توافق ضعیف را برای پیش‌بینی حاصل از مدل نشان می‌دهد [۷].

$$K_a = \frac{p_o - p_e}{(1 - p_e)} \quad \text{معادله ۴}$$

Po نسبت نمونه‌هایی که به درستی طبقه‌بندی شده‌اند و pe احتمال توافق تصادفی می‌باشد. نتایج از ۱ تا ۱- می‌تواند خود را نشان دهند. اگرچه معمولاً در دامنه ۰ تا ۱ قرار می‌گیرند و با افزایش مقدار تا نزدیک ۱ بیانگر افزایش دقت می‌باشد [۱۴]. دقت مشاهده شده، به منزله جمع عناصر قطری در ماتریس ابهام می‌باشد و توافق شانسی بیانگر عناصر غیر قطر اصلی می‌باشد [۱].

در منطقه پذیرنده، هریک از نمونه‌های شاهد با عنوان پیش‌بینی شده توسط مدل مورد مقایسه قرار می‌گیرد و پس از تشکیل ماتریس ابهام با استفاده از بسته ithir موجود در نرم‌افزار R، میزان شاخص‌های اعتباردهی دقت کلی و کاپا تعیین می‌شود.

۳. نتایج

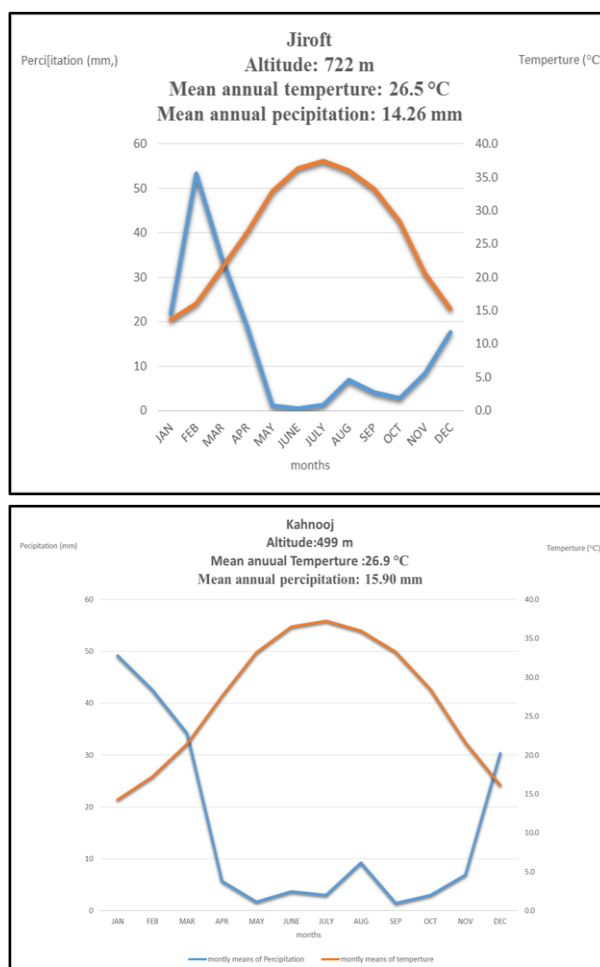
۳.۱. تشابه فاکتورهای خاکساز دو منطقه مرجع و

پذیرنده

پس از آن‌که تشابه فاکتورهای خاکساز شباهت بین دو منطقه مرجع و پذیرنده را به اثبات رساند، در مرحله بعد می‌توان بیان نمود که برون‌یابی قابل انجام می‌باشد. به جهت تعیین تشابه بین دو منطقه، شاخص‌های تشابه اقلیمی پستی و بلندی، زمین‌شناسی و شکل زمین با استفاده از متغیر ژئوفرم و پوشش گیاهی در دو منطقه مورد استفاده قرار گرفتند. از آن جا که اقلیم یکی از فاکتورهای تأثیرگذار در نوع کلاس‌های خاک می‌باشد، برای تعیین تشابه علاوه بر محاسبه شاخص تشابه گوور از نمودار اقلیمی والتر نیز استفاده شده است. شکل (۳)

عنوان هاپلوکمبیدز نسبت به سایرین کم تر بوده است لذا در پیش بینی گروه بزرگ خاک توسط مدل جنگل تصادفی، سطح کمتری را به خود اختصاص داده اند که در محدوده انتهایی مخروط افکنه دیده می شوند. نتایج حاصل از پیش بینی مدل جنگل تصادفی بر نقاط اعتبارسنجی در منطقه مرجع، دقت کلی ۰/۸۸٪ و کاپا ۰/۷۷ را نشان داد. شاخص کاپا مؤید عدم تصادفی بودن طبقه بندی می باشد. مقادیر نزدیک به یک این شاخص مؤید توافق بالای پیش بینی و حاکمی از عدم تصادفی بودن طبقه بندی می باشد. کاهش این شاخص در محدوده ۰/۷ تا ۰/۴ مؤید توافق متوسط پیش بینی و مقادیر کم تر از ۰/۴ حاکمی از تصادفی بودن پیش بینی می باشد [۷].

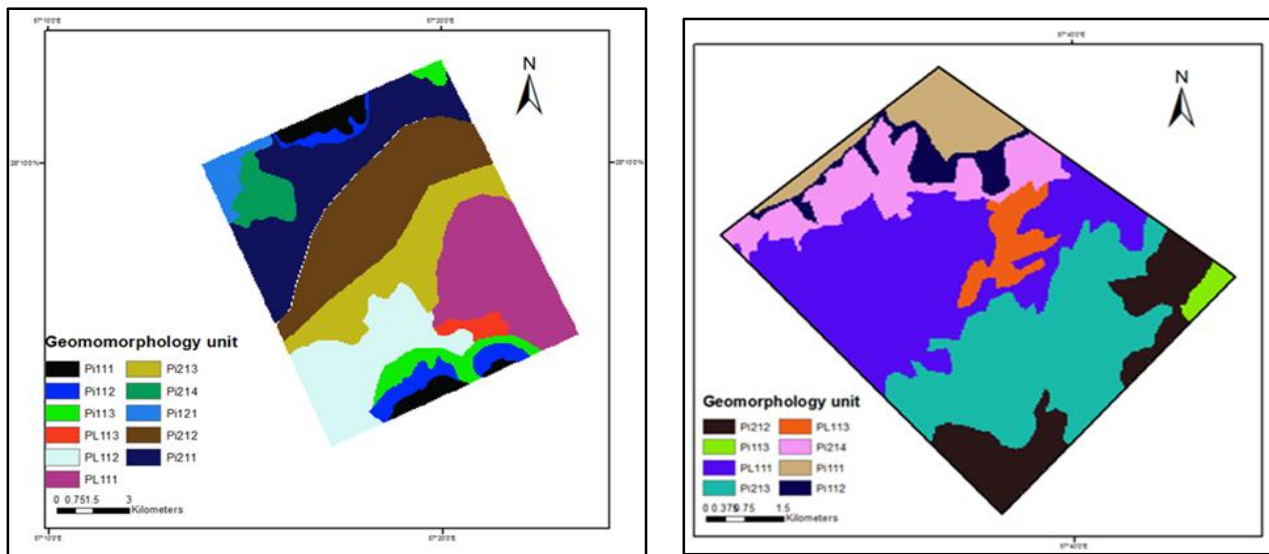
نمک، کشت و کار با محدودیت مواجه است در حالی که در سطوح بالایی آن که مربوط به دشت دامنه ای می باشد کشاورزی رایج می باشد. در نقشه پیش بینی شده توسط مدل جنگل تصادفی (شکل ۵) چهار گروه بزرگ خاک شامل توری اورتنز، هاپلوکلسیدز، هاپلوکمبیدز و هاپلو سالیدز موجود می باشد. سطوح اشغال شده تحت لنفرم مخروط افکنه با گروه بزرگ توری اورتنز مشخص می شوند. سطوح مربوط به دشت دامنه ای را گروه بزرگ هاپلوکلسیدز اشغال نموده است. با کاهش شیب منطقه و متمایل شدن از سطوح دشت دامنه ای به سطوح پلایایی منطقه مطالعاتی، گروه بزرگ هاپلو سالیدز پدیدار می شود و خاک های این سطوح تحت این گروه بزرگ پیش بینی می شوند. از آنجایی که تعداد نمونه های شاهد خاک تحت



شکل ۳. نمودار اقلیمی والتر در دو منطقه مرجع و پذیرنده

جدول ۳. شاخص تشابه متغیرهای کمکی در دو منطقه مرجع و پذیرنده

شاخص تشابه	متوسط شاخص مربوطه در کهنوج	متوسط شاخص مربوطه در فراریاب	متغیرهای کمی
$1 - \frac{ X_{ik} - X_{jk} }{\text{range } k}$ گورور			شاخص های پستی و بلندی
۰/۸۶	۵۳۴/۵۶	۶۶۸/۸۴۱	ارتفاع
۰/۹۸	۰/۰۶۲	۰/۰۸۱	شیب
۰/۹۳	۵/۳۹۸	۵/۰۷۲	شاخص خیسی
			شاخص اقلیمی
۰/۹۸	۲۶/۹	۲۶/۵	درجه حرارت سالانه
۰/۸۷	۱۵/۹	۱۴	بارندگی سالانه
			درجه حرارت ماهانه
۰/۹۵	۱۴/۳	۱۳/۶	JAN
۰/۹۳	۱۷/۲	۱۶/۱	FEB
۰/۹۹	۲۱/۵	۲۱/۴	MAR
۰/۹۶	۲۷/۶	۲۶/۷	APR
۰/۹۹	۳۳/۲	۳۲/۹	MAY
۰/۹۹	۳۶/۵	۳۶/۳	JUNE
۰/۹۹	۳۷/۲	۳۷/۵	JULY
۱	۳۶	۳۶	AUG
۱	۳۳/۲	۳۳/۲	SEP
۰/۹۹	۲۸/۵	۲۸/۴	OCT
۰/۹۴	۲۱/۶	۲۰/۵	NOV
۰/۹۴	۱۶/۱	۱۵/۲	DEC
			بارندگی ماهانه
۰/۲۲	۴۹/۱۴	۲۱/۸۳	JAN
۰/۸۰	۴۲/۵۴	۵۳/۳۵	FEB
۰/۹۹	۳۴/۱۹	۳۴/۵۳	MAR
۰/۳۳	۵/۶۴	۱۹	APR
۰/۹۵	۱/۷۳	۱/۱۴	MAY
۰/۶۱	۳/۷۳	۰/۵	JUNE
۰/۶۹	۲/۹۵	۱/۲۶	JULY
۰/۶۵	۹/۲۱	۶/۸۰	AUG
۰/۳	۱/۴۱	۴/۰۶۵	SEP
۰/۹۲	۳	۲/۶۷	OCT
۰/۸۲	۶/۸۷	۸/۲۹	NOV
۰/۳۶	۳۰/۳۸	۱۷/۶۶	DEC
			شاخص پوشش گیاهی
۰/۹۶	-۳۶۵۵/۰۳۳	-۳۸۰۵/۹۸۶	pvi
۰/۸۶	۰/۱۰۰۶	۰/۰۹۰۷	ndvi
			متغیرهای کیفی
$J = \frac{a}{a+b+c}$ ژاکارد			ژئوفرم
۰/۷۱			
۰/۸۳			میانگین شاخص تشابه



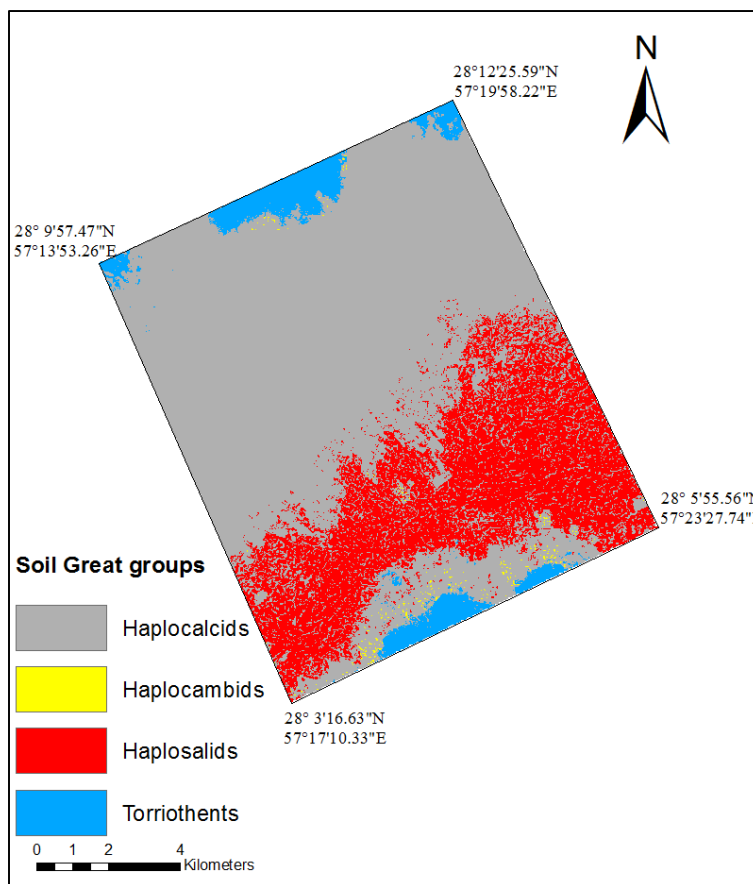
شکل ۴. نقشه ژئومورفولوژی: (الف) مرجع و (ب) پذیرنده

جدول ۴. واحدهای جداشده نقشه ژئومورفولوژی مربوط به (الف) منطقه مرجع، فاریاب و (ب) منطقه پذیرنده (کهنوج)

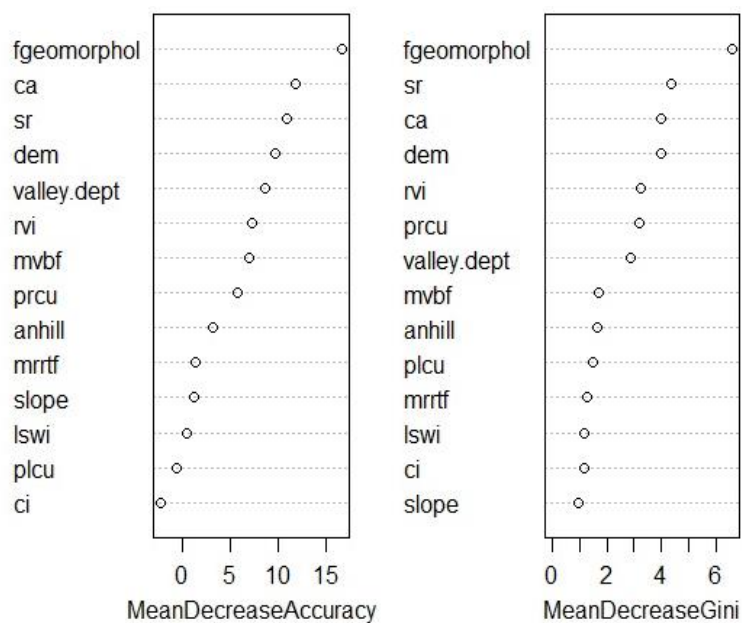
شماره	سیمای راضی	شکل زمین	زمین شناسی	سطح ژئومورفیک	کد
۱	پلایا	سطوح نمکی و رسی	رسوبات شسته شده	سطوح با شوری بالا	PL111
۲	پلایا	سطوح نمکی و رسی	رسوبات شسته شده	سطوح نمکی	PL112
۳	پلایا	سطوح نمکی و رسی	رسوبات شسته شده	سطوح رسی کشت شده	PL113
۴	پیدمونت	مخروط افکنه	تجمعات فوق بازی و سرپنتاین	قسمت بالایی مخروط افکنه فعال	Pi111
۵	پیدمونت	مخروط افکنه	تجمعات فوق بازی و سرپنتاین	سطوح میانی مخروط افکنه	Pi112
۶	پیدمونت	مخروط افکنه	تجمعات فوق بازی و سرپنتاین	قسمت تحتانی مخروط افکنه فعال	Pi113
۷	پیدمونت	مخروط افکنه	تجمعات اهک، میکا، امفیبول، شیست و سندستون	قسمت تحتانی مخروط افکنه فعال	Pi212
۸	پیدمونت	دشت	تجمعات اهک، میکا، امفیبول، شیست و سندستون	دشت‌های کشت شده با شیب زیاد و خاک کم عمق	Pi211
۹	پیدمونت	دشت	تجمعات اهک، میکا، امفیبول، شیست و سندستون	دشت‌های کشت شده با شیب کم و خاک عمیق	Pi212
۱۰	پیدمونت	دشت	تجمعات اهک، میکا، امفیبول، شیست و سندستون	دشت‌های کشت شده با شیب کم و خاک عمیق و شوری بالا	Pi213
۱۱	پیدمونت	دشت	تجمعات اهک، میکا، امفیبول، شیست و سندستون	دشت‌های کشت شده با شیب زیاد و خاک کم عمق	Pi214

استفاده شده بود، نتایج این پیش‌بینی حاکی از توانایی بیش‌تر این متغیر در پیش‌بینی گروه بزرگ خاک بر اساس شاخص کاهش میانگین دقت استخراج شده توسط مدل جنگل تصادفی می‌باشد و شاخص کربنات کلسیم، نسبت شوری و مدل رقومی ارتفاعی به ترتیب مراتب پائین‌تر را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۶).

بر اساس آن چه بیان گردید منطقه مطالعاتی سطوح متنوعی از شکل زمین را نشان می‌دهد و تنوع خاک‌ها ناشی از اشکال متنوع اراضی می‌باشد که این مطلب را می‌توان بر اساس متغیرهای مهم استخراجی از مدل‌سازی نیز دریافت نمود. از آنجایی که نقشه ژئوفرم در مجموعه متغیرهای مستقل برای پیش‌بینی گروه بزرگ خاک



شکل ۵. نقشه پیش‌بینی شده گروه بزرگ منطقه مرجع



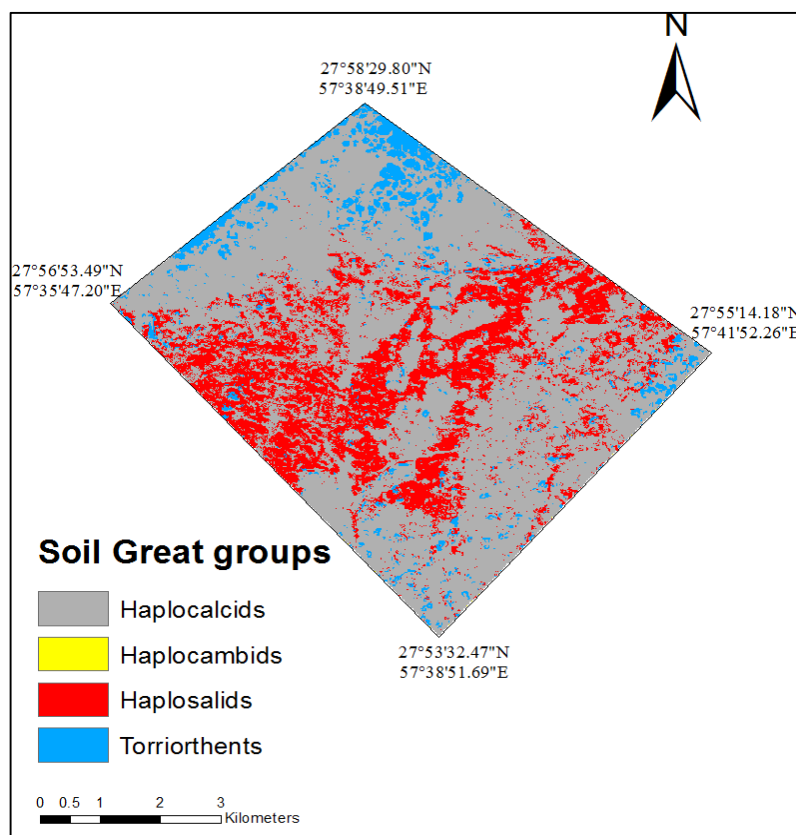
شکل ۶. اهمیت متغیرهای استفاده شده با استفاده از شاخص‌های میانگین کاهش دقت (Mean Decrease Accuracy) و میانگین کاهش جینی (Mean Decrease Gini) استخراج شده از جنگل تصادفی

نقطه مشاهداتی در منطقه پذیرنده مطالعه شده و به عنوان نمونه شاهد مورد پیش‌بینی قرار گرفت. نقشه برون‌یابی این ناحیه در شکل (۷) نشان داده شده است. سه گروه بزرگ خاک شامل توری اورتنز، هاپلوکلسیدز و هاپلوسالیدز توسط این مدل پیش‌بینی شده‌اند. همان‌طور که مشخص است همانند منطقه مرجع سطوح تحت فعالیت مخروط افکنه تحت عنوان توری اورتنز پیش‌بینی شده‌اند. با کاهش شیب منطقه در سطوح دشت دامنه‌ای، گروه بزرگ هاپلوکلسیدز پیش‌بینی شد و سطوح با شیب ملایم و پست همراه با شوری بالاتر پس از آن با عنوان گروه بزرگ هاپلوسالیدز مورد پیش‌بینی قرار گرفت. از آنجایی که گروه بزرگ هاپلوکمپیدز در منطقه پذیرنده همانند منطقه مرجع از تعداد نمونه کافی برخوردار نبوده است، لذا این مدل قادر به پیش‌بینی آن در منطقه پذیرنده نیز نبوده است.

در نتیجه پستی و بلندی را می‌توان از جمله مهم‌ترین فاکتور خاکساز این منطقه دانست و مؤید اهمیت ژئومورفولوژی و پستی و بلندی و فرآیندهای مربوط به آن‌ها در تکامل و تمایز خاک‌های مربوطه در منطقه مطالعاتی می‌باشد. چنانچه [۱۰] نقشه‌های پستی و بلندی را به عنوان بهترین تخمین‌گر برای مدل‌های خود جهت پیش‌بینی کلاس‌های خاک در منطقه زرنند کرمان معرفی کردند.

۳.۳. برون‌یابی

از آن‌جا که مدل جنگل تصادفی استخراج شده در منطقه مرجع در سطح گروه بزرگ عملکرد مناسبی را نشان می‌دهد (دقت کلی ۰.۸۸٪ و کاپا ۰.۷۷) در نتیجه از این مدل به منظور پیش‌بینی گروه بزرگ خاک منطقه پذیرنده در کهنوج استفاده گردید. برای این منظور ۲۶



شکل ۷. نقشه برون‌یابی شده گروه بزرگ خاک‌های منطقه پذیرنده

[۲۶] نیز در مطالعه خود به این موضوع اشاره نمودند که مشاهدات با فراوانی کم‌تر از شانس کم‌تری در

با توجه به نتایج حاصل از تشابه دو منطقه، مدل‌های استخراجی از منطقه مرجع قابلیت پیش‌بینی کلاس‌های خاک در منطقه پذیرنده را به خوبی و بدون صرف هزینه مالی و زمانی اضافه نشان می‌دهند. به طوری که در مطالعه انجام شده در ایران، به منظور برسی برون‌یابی، با برآزش مدل استخراجی از منطقه زرنده به شهرستان بم در استان کرمان، دقت کلی ۰/۵۹ و ضریب کاپا ۰/۴۷ را با به‌کارگیری مدل رگرسیون لاجستیک چندجمله‌ای در سطح گروه بزرگ گزارش نموده‌اند [۱۳]. ولسکی و همکاران (۲۰۱۷)، از مدل‌سازی درخت تصمیم در منطقه مرجع در برزیل با وسعت ۱۰ کیلومتر مربع برای بسط و برآزش آن و پیش‌بینی کلاس‌های خاک در منطقه پذیرنده ۶۷۸ کیلومترمربعی استفاده نمودند. آن‌ها نتایج برون‌یابی با دقت کلی ۰/۶۶ و ضریب کاپا ۰/۳۶ را ارائه دادند. هم‌چنین، علت دقت پایین به دست آمده در گزارش خود را در مقایسه با سایر مطالعات انجام شده در برزیل، وسعت کوچک‌تر منطقه مرجع در برابر منطقه پذیرنده بیان نمودند [۲۹].

در مطالعه دیگری با استفاده از روش برون‌یابی ابتدا برای منطقه کوچکی خصوصیات مربوط به مواد مادری و در مرحله بعد کلاس زهکشی منطقه پیش‌بینی شد. سپس از مدل به دست آمده از برای پیش‌بینی کلاس‌ها در کل منطقه مطالعاتی به کار گرفته شد. نتایج آن‌ها مؤید آن است که دقت کلی روش به کار برده شده مناسب بوده و این پروسه در پیش‌بینی خصوصیات خاک به خوبی اجرا شد [۱۵].

در مطالعه دیگری جهت برون‌یابی، با استفاده از روش درخت تصمیم، دقت ۷۰٪ را با استفاده از متغیرهای محیطی به کار برده شده در سطح گروه بزرگ در محدوده مطالعاتیشان واقع در استرالیا اعلام نموده‌اند [۲۱].

در حقیقت تکنیک برون‌یابی خاک‌های منطقه پذیرنده را با صرف هزینه و زمان کم‌تری در مقایسه با مطالعات تفصیلی مورد پیش‌بینی قرار می‌دهد. لذا این روش در صورت داشتن دقت قابل قبول می‌توان برای پیش‌بینی

پیش‌بینی توسط مدل جنگل تصادفی برخوردار هستند. با این حال نتایج حاصل از برون‌یابی مدل استخراج شده منطقه مرجع در این سطح دقت کلی ۰/۸۱ و کاپا ۰/۶۱ را نشان می‌دهد که با توجه به مطالب ذکر شده در بالا توافقی منطقی با وجود عدم استفاده از نمونه‌های موجود در منطقه پذیرنده جهت پیش‌بینی را نشان می‌دهد.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

با برآزش روابط ایجاد شده در سطح مرجع به سطح پذیرنده، نتایج نشان داد که از دقت پیش‌بینی‌ها نسبت به سطح مرجع اندکی کاسته شده است که البته دلیل آن عدم استفاده از متغیرهای محیطی در سطح پذیرنده می‌باشد اما به علت رعایت شرط تشابه در دو منطقه، مدل‌های استخراجی در این سطح به خوبی قادر به پیش‌بینی کلاس‌های خاک در سطح پذیرنده می‌باشد. از آنجایی که با کاهش سطح طبقه‌بندی تنوع در کلاس‌های خاک بیشتر می‌شود، از طرفی افزایش تنوع و غیریکنواختی در کلاس‌های خاک یکی از فاکتورهای است که باعث پیچیدگی و دشواری نقشه‌برداری خاک می‌شود لذا هرچه تنوع و تغییرات کلاس‌های خاک بیشتر باشد، تشخیص و تمایز انواع کلاس‌های خاک به خصوص در سطوح طبقه‌بندی پائین که تنوع کلاس‌ها منوط به پروسه‌های تشکیل خاک نیز می‌باشد، به سختی صورت می‌گیرد. از این‌رو مدل‌هایی مانند جنگل تصادفی که از روابط پیچیده‌تری به منظور شناسایی و پیش‌بینی استفاده می‌نمایند، نتایج با اعتبار و قطعیت بالاتری را ارائه می‌دهند. از طرفی در صورتی که مدل ایجاد شده در منطقه مرجع قطعیت بالاتری را نشان دهد از توانایی بیشتر در جهت پیش‌بینی خصوصیت تحت بررسی در منطقه پذیرنده نیز برخوردار خواهد بود.

با توجه به مطالعات انجام شده و نتایج به دست آمده مشخص می‌شود در مطالعه حاضر با وجود آن که دو منطقه مرجع و پذیرنده با یکدیگر فاصله مکانی دارند اما

از منطقه مرجع به منطقه پذیرنده در کهنوج، به جهت پیش‌بینی گروه بزرگ خاک می‌باشد. با استفاده از برازش مدل استخراجی به منطقه پذیرنده، مدل حاصل از برون‌یابی در سطح پذیرنده با دقت کلی ۰/۸۱٪ و ضریب کاپا ۰/۶۱ قادر به پیش‌بینی نمونه‌های کنترلی موجود در سطح پذیرنده بوده است. از آن‌جا که برای پیش‌بینی گروه بزرگ خاک در منطقه پذیرنده تنها با استفاده از متغیرهای محیطی پیش‌بینی کننده موجود در منطقه مرجع استفاده شده است، به مراتب آن زمان و هزینه کم‌تری صرف شده است، لذا برون‌یابی را می‌توان به عنوان روشی کارآمد که با سرعت بیشتر و صرف زمان و هزینه کم‌تر کلاس خاک در مناطق فاقد اطلاعات را تحت پیش‌بینی قرار می‌دهد و نقشه رقومی خصوصیات تحت مطالعه را استخراج می‌نماید، به شمار آورد. در صورتی که در برخی موارد استفاده از برون‌یابی دقت متوسطی را ارائه دهد می‌توان حتی از نتایج آن به عنوان اطلاعات پایه برای دستیابی به اطلاعات تفصیلی مناطق فاقد اطلاعات استفاده نمود.

خصوصیات و کلاس‌های خاک به عنوان نقشه پایه در کاربری‌های مختلف استفاده شود. از طرفی در صورتی با استفاده از مدل‌سازی و برون‌یابی، نتایج مناسب نتوان گزارش نمود قبل از ره‌سازی پروژه می‌توان از راه‌های دیگر نیز مدل‌سازی را بررسی نمود: از جمله برازش دادن مدلی دیگر و یا استفاده از متغیر کمکی متفاوت، ایجاد نقاط مشاهده‌ای بیشتر و سپس برازش دادن مدل قبل و در صورتی که خصوصیات خاک توسط این روش‌ها قابل پیش‌بینی نباشند این پروژه عملی نیست و چاره‌ای جز رها شدن ندارد [۴].

در این مطالعه به منظور دسترسی به نقشه‌های خاک جهت اهداف مدیریتی و کاربردی، پیش‌بینی کلاس خاک با استفاده از برون‌یابی نقشه‌برداری رقومی مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا پس از بررسی تشابه، منطقه مرجع و پذیرنده، به پیش‌بینی گروه بزرگ خاک در منطقه فاریاب تحت عنوان منطقه مرجع پرداخته شده است. مدل ایجاد شده قادر به پیش‌بینی گروه بزرگ خاک در این سطح مطالعاتی با دقت کلی و کاپا به ترتیب ۰/۸۸٪ و ۰/۷۷ می‌باشد که حاکی از قابلیت برازش این مدل استخراجی

References

- [1] Abbaszadeh Afshar, F., Ayoubi, S., Jafari, A. (2018). The extrapolation of soil great groups using multinomial logistic regression at regional scale in arid regions of Iran. *Geoderma*, 315: 36-48.
- [2] Breiman L. (2001). Random forests. *Mach Learn*, 45: 5-32.
- [3] Brungard, C.W. (2014). Advanced Digital Soil Mapping and Assessment in Arid Landscapes. All Graduate Theses and Dissertations. Utah State University. MERRIL-CAZIER LIBAY.
- [4] Cambule, A.H., Rossiter, D. G., Stoorvogel, J. J. (2013). A methodology for digital soil mapping in poorly-accessible areas. *Geoderma*, 192: 341-353.
- [5] Carré, F., McBratney, A.B., Mayr, T., Montanarella, L. (2007). Digital soil assessments: beyond DSM. *Geoderma*, 142: 69-79.
- [6] Congalton, R.G. (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sens. Environ*, 37 (1): 35-46.
- [7] Congalton, R.G., Green, K. (1998). *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices*. CRC Press, Taylor & Francis, Boca Raton.
- [8] D'hegyere, T., Goethals, P.L.M., De Pauw, N. (2006). Genetic algorithms for optimization of predictive ecosystems models based on decision trees and neural networks. *Ecol. Model*, 195: 20-29.

- [9] Fonnesbeck, B. (2015). Digital Soil Mapping Using Landscape Stratification for Arid Rangelands in the Eastern Great Basin, Central Utah. All Graduate Theses and Dissertations Graduate Studies. Utah State University. Plants, soils, and Climate Department.
- [10] Girard, M.C., Girard, C.M. (1999). Traitement des données de télédétection. Dunod, Paris, 529. soil-landscape relationship from a reference area. *Scienc. Rural*, 41: 812–816.
- [11] Gower, J.C. (1971). A general coefficient of similarity and some of its properties. *Biometrics*, 27: 857-871.
- [12] Jaccard, P. (1901). Etude comparative de la distribution florale dans une portion des Alpes et du Jura. *Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles*, 37: 547–579.
- [13] Jafari, A., Finke, P.A., VandeWauw, J., Ayoubi, S., Khademi, H. (2012). Spatial prediction of USDA-great soil groups in the arid Zarand region, Iran: comparing logistic regression approaches to predict diagnostic horizons and soil types. *European Journal of Soil Science*, 63: 284-298.
- [14] Landis, J.R., Koch, G.G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33: 159-74.
- [15] Lemercier, B., Lacoste, M., Loum, M., Walter, C. (2012). Extrapolation at regional scale of local soil knowledge using boosted classification trees: A two-step approach. *Geoderma*, 171-172: 75-84.
- [16] Liaw, A., Wiener, M. (2002). Classification and regression by randomForest. *R News*, 2: 18–22.
- [17] Ma, Y.X., Minasny, B., Malone, B.P., McBratney, A.B. (2019). Pedology and digital soil mapping (DSM). *European Journal of Soil Science*, 70: 216-235.
- [18] Mallavan, B. P., Minasny, B., McBratney, A. B. (2010). Homosil: A methodology for quantitative extrapolation of soil information across the globe. In: Boettinger, Boettinger, J. L., Howell, D. W., More, A. C., Hartemink, A. E., Kienast-Browns, S. (Eds.), *Digital Soil Mapping: Bridging Research, Environmental Application, and Operation*. Springer, London, pp 429-436.
- [19] Malone, B. P., Jha, S. K., Minasny, B., McBratney, A. B. (2016). Comparing regression-based digital soil mapping and multiple-point geostatistics for the spatial extrapolation of soil data. *Geoderma*, 262: 243-253.
- [20] McBratney, A.B., Mendoca Santos, M.L., Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma*, 117: 3-52.
- [21] Moran, C.J., Bui, E.N. (2002). Spatial data mining for enhanced soil map modeling. *Int. J. Geogr. Inf. Syst*, 16: 533–549.
- [22] Padarian, J., Budiman, M., McBratney, A.B. (2018). Using deep learning for digital soil mapping. *SOIL Discussions*.
- [23] Peters, J., De Baets, B., Verhoest, N.E., Samson, R., Degroeve, S., De Becker, P., Huybrechts, W. (2007). Random forests as a tool for ecohydrological distribution modelling. *Ecological Modelling*, 207(2): 304-318.
- [24] Resende, M., Curi, N., Rezende, S.B., Corrêa, G.F., Ker, J.C. (2014). *Pedologia: Base para a distinção de ambientes*. Editora UFPA, Lavras.
- [25] Salehi, M.H., Safaei, Z., Esfandiarpour-Borujeni, I., Mohammadi, J. (2013). Generalisation of continuous models to estimate soil characteristics into similar deliniations of a detailed soil map. *Soil, land care and environmental reseach*, 51(4): 350-361.
- [26] Sharififar, A., Samadian, F., Malone, B.P., Minasny, B. (2019). Addressing the issue of digital soil classes with imbalanced class observations. *Geoderma*, 350: 84-92.
- [27] Soil Survey Staff. 2014. *Keys to Soil Taxonomy*, 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
- [28] Soil Survey Division Staff. (1993). *Soil survey manual*. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook 18, Washington, D.C. Available online at: <http://www.soils.usda.gov/technical/manual/>
- [29] Wolski, M.S., Dalmolin, R.S.D., Flores, C.A., Moura-Bueno, J.M., Caten, A.T., Kaiser, D.R. (2017). Digital soil mapping and its implications in the extrapolation of soil-landscape elationships in detailed scale. *Pesq. Agropec. Bras.*, Brasília, 52(8): 633-642.
- [30] Zeraatpisheh, M., Ayoubi, S., Jafari, A., Finke, P. (2017). Comparing the efficiency of digital and conventional soil mapping to predict soil types in a semi-arid region in iran, *Geomorphology*, 285: 186-204.

- [31] Zhu, A.X. (1997). A similarity model for representing soil spatial information. *Geoderma*, 77: 217-242.
- [32] Zhu, A. X. Hudson, B., Burt, J., Lubich, K., & Simonson, D. (2001). Soil mapping using GIS, expert knowledge, and fuzzy logic. *Soil Science Society of America Journal*, 65(5): 1463-1472.
- [33] <https://earthexplorer.usgs.gov>. (2017.07.01).