



بررسی شاخص‌های تفرق خاک و ارتباط تکامل خاک - زمین‌نما در اقلیم خشک جنوب شرق ایران

فریده عباس‌زاده افشار^۱، *شمس‌اله ایوبی^۲، اعظم جعفری^۳ و حسین خادمی^۲

^۱دانشجوی دکتری گروه علوم خاک، دانشگاه صنعتی اصفهان، استاد گروه علوم خاک، دانشگاه صنعتی اصفهان،

^۲استادیار گروه علوم خاک، دانشگاه باهنر کرمان

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۱/۲۶؛ تاریخ پذیرش: ۹۳/۹/۹

چکیده

سابقه و هدف: اطلاع در مورد تغییرات مکانی خاک از نظر اندازه‌گیری تفرق خاک، امکان برآورد کیفیت و واریانس و تغییرات در نقشه‌های خاک را ارائه می‌دهد. شاخص‌های تفرق و مدل‌های توزیع فراوانی، ابزار آماری است که اکولوژیست‌ها در دهه‌های اخیر برای تجزیه و تحلیل قواعد ذاتی نهادهای مختلف محیطی به‌کار گرفته‌اند. در این پژوهش، بررسی روابط بین تکامل خاک - زمین‌نما و سطوح ژئومرفیک مختلف و همچنین شاخص‌های تفرق خاک و روابط بین سطح و شاخص‌های تفرق در بخشی از اراضی شهرستان بم، استان کرمان، به‌عنوان نمونه‌ای از مناطق خشک کشور مورد مطالعه قرار گرفت.

مواد و روش‌ها: منطقه مورد مطالعه در جنوب شرقی ایران و در شرق استان کرمان بین عرض‌های جغرافیایی ۲۸ درجه و ۵۲ دقیقه تا ۲۹ درجه و ۹ دقیقه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۵۸ درجه و ۴ دقیقه تا ۵۸ درجه و ۲۸ دقیقه شرقی قرار گرفته است. زمین‌نماهای اصلی این منطقه شامل مخروط افکنه، پلایا، باهادا، تپه و کوه می‌باشند. این منطقه براساس سیستم طبقه‌بندی آمریکا دارای رژیم رطوبتی اریدیک و رژیم حرارتی هایپرترمیک است. در این پژوهش تفرق خاک برای سلسله‌مراتب ژئومرفیک (زمین‌نما، زمین ریخت، سنگ‌شناسی و سطوح ژئومرفیک) و رده‌بندی خاک امریکایی (رده تا فامیل خاک) با استفاده از شاخص‌های مناسب از جمله شاخص شانون و فراوانی محاسبه شدند.

یافته‌ها: در منطقه مورد مطالعه با تشریح خاک‌رخ‌های حفرشده در منطقه، خاک‌ها براساس سیستم رده‌بندی آمریکایی (۲۰۱۰) در تعداد هشت گروه بزرگ خاک طبقه‌بندی شدند. گروه بزرگ‌های طبقه‌بندی‌شده شامل Calcigypsid، Petrocalcids و Calciargids، Haplocalcids، Haplogypsid، Haplocambids، Torriorthents، Haplosalids هستند. نتایج حاصل از بررسی شاخص‌های تفرق در منطقه مورد مطالعه نشان داد که شاخص‌های تفرق از جمله شاخص شانون و شاخص اونیل در سلسله‌مراتب طبقه‌بندی از سطح رده به فامیل خاک افزایش می‌یابد. همچنین شاخص‌های تفرق و غنا باگذشت زمان از باهادای جدید به باهادای قدیمی افزایش یافته است؛ بنابراین سن سطوح ژئومرفیک بر تکامل خاک اثر داشته و باعث افزایش تفرق خاک در منطقه مورد مطالعه شده است. همچنین یک رابطه خطی مثبت بین شاخص‌های تفرق و مساحت سطح ژئومرفیک به‌دست آمد. بررسی روابط بین شاخص غنا و سطح ژئومرفیک نشان داد که با افزایش مساحت سطوح ژئومرفیک، میزان شاخص غنا افزایش پیدا کرد و مدل برازش‌شده برای روابط غنا- مساحت در منطقه مورد مطالعه، از نوع لگاریتمی بود.

* مسئول مکاتبه: ayoubi@cc.iut.ac.ir

نتیجه گیری: نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که تمام فرآیندهایی که در تکامل زمین ریخت‌ها نقش دارند، به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم در تکامل خاک‌های تشکیل شده بر روی این زمین ریخت‌ها نیز دخالت دارند. مطالعه خاک‌ها در زمین ریخت‌های مختلف در منطقه مورد مطالعه نشان داد که تشکیل خاک و خصوصیات آن‌ها تحت تأثیر موقعیت ژئومرفیکی آن‌ها هستند. نتایج نشان داد که شاخص‌های تفرق در هر دو سطح سلسله‌مراتب طبقه‌بندی و ژئومرفیک با کاهش سطح سلسله‌مراتب افزایش پیدا کرد. افزایش شاخص‌های تفرق در خاک و زمین‌نما در طول زمان، نشان‌دهنده این است که تکامل خاک از نوع واگرا است، یعنی با افزایش تکامل خاک، تفرق آن زیاد شده و در نتیجه خلوص نقشه خاک کاهش می‌یابد. افزایش غنا و تفرق خاک بر اساس سلسله‌مراتب ژئومرفیکی و سطوح طبقه‌بندی خاک‌ها و افزایش آنتروپی و غنا در مقابل وسعت سطوح ژئومرفیکی، تأییدکننده این نظر است که خاک‌های مطالعه شده، در واقع یک سیستم دینامیک غیرخطی هستند.

واژه‌های کلیدی: تفرق خاک، زمین‌نما، تکامل خاک، سطوح ژئومرفیک

مقدمه

شناخت خصوصیات، رفتار و توزیع انواع خاک در گستره زمین‌نما^۱ برای استفاده مؤثر، مدیریت و حفاظت از این منبع حیاتی، ضروری است. منظور از درک تکامل سرزمین این است که از ساختار زیربنایی اجزای تشکیل‌دهنده محدوده مورد مطالعه آگاهی یافته و از سن و فرآیندهای زمین‌شناسی، ژئومرفولوژی و پدولوژی پدیدآورنده واحدهای ژئومرفیک، شناخت کافی به‌دست آید. بدین ترتیب می‌توان تقدم و تأخر تشکیل واحدهای اراضی را به‌دست آورد و نوع خاک‌های قابل انتظار و نوع تغییرات آن‌ها را در گستره مورد نیاز پیش‌بینی نمود. براساس این شناخت، یکنواخت‌ترین واحدهای ژئومرفیک و زمین‌ریخت‌ها را می‌توان تفکیک کرد. همچنین می‌توان خاک‌های همگن‌تری را در هر واحد تفکیک شده انتظار داشت. از آنجا که فرآیندهای ایجادکننده زمین‌ریخت‌ها در هر واحد نقشه ژئومرفولوژی ثابت است، بنابراین می‌توان منشأ و علل تفرق خاک‌ها را به‌صورت مکانی مورد بررسی قرار داد و مرز واحدهای خاک را با دقت و براساس فرآیندهای واقعی طبیعی ترسیم کرد (۵).

مطالعات خاک- زمین‌نما روابط بین فرآیندهای زمین، توپوگرافی و توسعه خاک را بررسی می‌کنند. دانشمندان خاک اغلب از روابط خاک- توپوگرافی- هیدرولوژی- پوشش گیاهی برای پی بردن به نوع خاک از زمین‌ریخت‌های مشخص شده روی عکس‌های هوایی استفاده می‌کنند. مدل‌های خاک- زمین‌نما روابط بین خاک و زمین‌ریخت و روابط بین الگوهای خاک- زمین‌ریخت و فرآیندهای پدوژئومرفیک را نشان می‌دهند (۲۳). به‌نظر می‌رسد که خاک‌ها و زمین‌نماها هم‌زمان تکامل می‌یابند. در موقعیت‌های زمین‌نما، خاک‌ها تحت تأثیر غیرمستقیم فاکتورهای خاکساز و اثرات متقابل با فرآیندهای هیدرولوژی و ژئومرفولوژی تشکیل و توسعه می‌یابند. خاک‌ها همواره تحت تأثیر اثرات متقابل مسیرهای خاکساز و پیش‌برنده^۲ (فرآیندهای افق‌سازی متنوع) و مسیرهای خاکساز کاهنده^۳ (فرآیندهای عدم تشکیل افق) و فاکتورها، فرآیندها و شرایط درون‌زا^۴ و برون‌زا^۵ تکامل می‌یابند. به‌عبارتی، توسعه خاک‌ها تابعی از مسیرهای

2- Progressive pedogenic pathways

3- Regressive pedogenic pathways

4- Endogenic

5- Exogenic

1- Landscape

ایبازنر و همکاران (۱۹۹۸) یک گام مهم، برای تعیین تفرق خاک قاره‌ها براساس نقشه‌های خاک موجود برداشتند (۹). جعفری و همکاران (۲۰۱۳) گزارش کردند که براساس شاخص‌های تفرق، میزان تفرق و غیریکنواختی خاک‌های منطقه زرنند براساس سلسله‌مراتب ژئومرفیکی و رده‌بندی خاک افزایش می‌یابد (۱۰). مک‌براتی و میناسنی (۲۰۰۷) برخی از گزینه‌های جایگزین برای اندازه‌گیری تفرق خاک در کلاس‌های خاک را مورد بحث قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که چگونه فاصله طبقه‌بندی می‌تواند نقش مهمی در تعیین تفرق خاک در یک منطقه بازی کند (۱۲). نتایج تومانیان و همکاران (۲۰۰۶) در مطالعه دره زاینده‌رود اصفهان نشان داد که شاخص‌های تفرق خاک‌ها از طبقه زمین‌نما به طرف سطوح زمین‌ریخت افزایش می‌یابد (۲۴). سالدانا و ایبازنر (۲۰۰۴) از شاخص‌های غنا و تفرق برای توزیع توالی زمانی تکامل خاک در تراس‌های رودخانه‌ای در شمال شرقی مادرید استفاده کردند. آن‌ها گزارش کردند که شاخص‌های آن‌تروپی شانن در خلال سلسله‌مراتب رده‌بندی در مطالعات با مقیاس‌های کوچک و بزرگ افزایش یافته‌اند (۲۰). اسفندیارپور و همکاران (۲۰۰۹) نشان دادند که شاخص تفرق شانن از سطح رده به سمت فامیل خاک افزایش می‌یابد و تنها در سطح فامیل خاک تفاوت معنی‌داری بین میانگین تفرق خاک‌های مناطق نمونه و تعمیم (در روش ژئوپدولوژی) وجود دارد (۳).

تفرق یکی از مشخصه‌های جامعه سازمان‌یافته طبیعی بوده و خصوصیتی است که به‌صورت ذاتی در فرآیندهای تکامل اکولوژیکی نهادینه شده است. اگرچه تغییر در خاک‌ها و زمین‌ریخت دارای اثرات عمیق کیفی و کمی بر زمین‌نما و مدیریت استفاده از اراضی است، ولی توجه کم‌تری به تجزیه و تحلیل تنوع پدیده‌ها در محیط‌های اکولوژیکی خشک‌شده است. استفاده از شاخص‌های تفرق این امکان را

خاکساز واگرا^۱ (افزایش تفرق با تکامل) و همگرا^۲ (افزایش یکنواختی با تکامل) است (۷).

ضرورت درک اهمیت دینامیک، عدم همگنی و تغییرات محیطی زمین‌نما به‌طور فزاینده در مطالعات اکولوژیکی، ژئومرفولوژیکی و پدولوژیکی بیان شده است (۲۰). تکنیک‌هایی برای کمی کردن و تفسیر عوامل مؤثر بر عملکرد زمین‌نما و تنوع، با تأکید خاص بر ساختار زمین‌نما و الگوهای مکانی مورد نیاز است. یکی از پارامترهای معمول که از آن در تجزیه و تحلیل محیط استفاده می‌شود، تفرق^۳ است (۱۶ و ۲۰).

شاخص‌های تفرق و مدل‌های توزیع فراوانی، ابزارهای آماری است که اکولوژیست‌ها در دهه‌های اخیر برای تجزیه و تحلیل قواعد ذاتی نهادهای مختلف محیطی به‌کار گرفته‌اند. اندازه‌گیری تنوع زیستی در طول سال‌های گذشته تبدیل به یک صنعت در حال رشد شده است (۶، ۲۰ و ۲۷)؛ با این‌حال، اندازه‌گیری تنوع زمین‌شناسی^۴ (به‌عنوان مثال شکل و ساختار زمین‌شناسی، زمین‌ریخت، رسوبات، مواد معدنی، سنگ‌ها، فسیل، خاک و غیره) هنوز به درجه‌ای از توسعه و تکامل نرسیده است (۸ و ۲۸).

استفاده از مفهوم تفرق در طبقه‌بندی واحدهای خاک یک روش متفاوت برای کمی کردن تغییرات خصوصیات خاک یا کلاس‌های خاک است (۱۲). مدل‌های متنوعی برای اندازه‌گیری تفرق پیشنهاد شده‌اند. با این‌حال، شاخص‌های فراوانی نسبی، بیش‌تر استفاده می‌شوند. این شاخص‌ها از دو جزء تشکیل شده‌اند: غنا و فراوانی نسبی گونه^۵. رایج‌ترین شاخصی که در اکولوژی برای اندازه‌گیری عدم همگنی ساختار یک جامعه استفاده می‌شود، شاخص تفرق شانن^۶ است (۲۱).

- 1- Divergent
- 2- Convergent
- 3- Diversity
- 4- Geodiversity
- 5- Evenness
- 6- Shannon

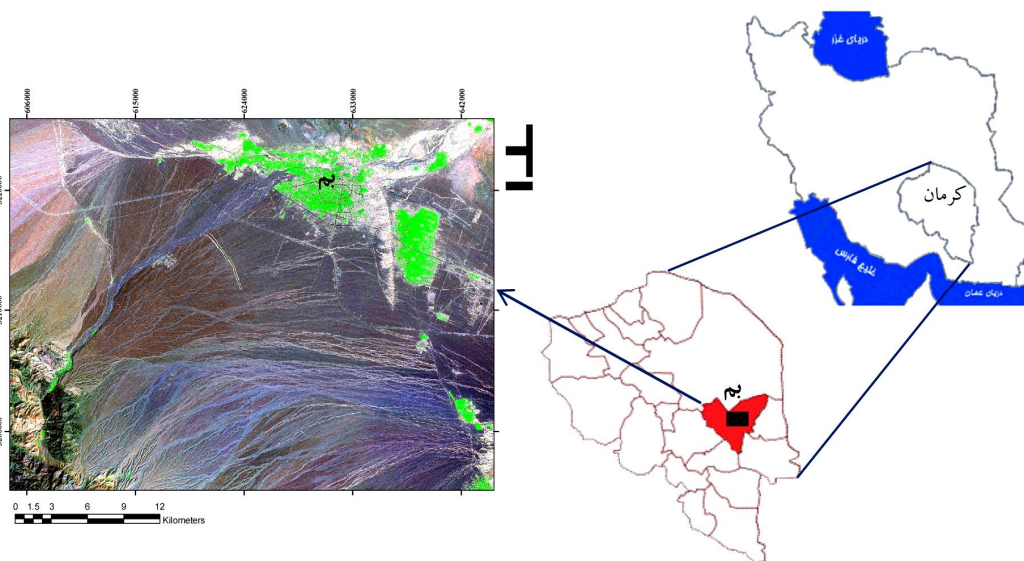
آتش‌فشانی از شمال‌غرب تا جنوب‌شرق احاطه شده است. سطح زیر کشت محصولات کشاورزی این شهرستان ۶۵ تا ۷۰ هزار هکتار می‌باشد که مهم‌ترین محصولات باغی این شهرستان به ترتیب سطح زیر کشت، شامل خرما، مرکبات، گردو و زیتون می‌باشند. میانگین بارندگی سالیانه این منطقه ۶۴ میلی‌متر، متوسط درجه حرارت آن ۲۲ درجه سلسیوس و میانگین سالیانه تبخیر با تشتک تبخیر کلاس A در آن، ۳۰۰۰ میلی‌متر است. این منطقه براساس سیستم طبقه‌بندی آمریکا (۲۲) دارای رژیم رطوبتی اریدیک و رژیم حرارتی هایپرترمیک است.

گوناگونی آب‌وهوای شهرستان بم یکی از استعدادهای خدادادی در امر تولید محصولات کشاورزی محسوب می‌گردد، به طوری که از هوای گرم و خشک در جلگه نرماشیر از ارتفاع ۵۰۰ متری از سطح دریا شروع و به آب‌وهوای سرد و کوهستانی با زمستان‌های برفی در ارتفاع ۳۷۵۰ متری در قله کوه‌های سلسله جبال زاگرس مناطقی همچون دهبکری منتهی می‌گردد.

فراهم می‌کند که افزایش یا کاهش آن‌تروپی در خلال تکامل و تکوین خاک‌ها مشخص و تغییرات خصوصیات و کلاس‌های خاک در امتداد تغییر سطوح مختلف سلسله‌مراتب زمین‌ریخت‌شناسی، مورد بررسی قرار گیرد. بنابراین با توجه به اهمیت موضوع، این پژوهش به بررسی روابط خصوصیات و تکامل خاک با زمین‌نما و سطوح ژئومرفیک مختلف در بخشی از منطقه شهرستان بم استان کرمان به‌عنوان نمونه‌ای شاخص از مناطق خشک کشور پرداخته است.

مواد و روش‌ها

توصیف جغرافیائی منطقه مورد مطالعه: منطقه مورد مطالعه در جنوب‌شرقی ایران و در شرق استان کرمان بین عرض‌های جغرافیایی ۲۸ درجه و ۵۲ دقیقه تا ۲۹ درجه و ۹ دقیقه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۵۸ درجه و ۴ دقیقه تا ۵۸ درجه و ۲۸ دقیقه شرقی قرار گرفته است (شکل ۱). این منطقه، مساحتی حدود ۱۰۰۰۰۰ هکتار را می‌پوشاند. زمین‌نماهای اصلی این منطقه شامل مخروط افکنه، پلایا، باهادا، تپه و کوه می‌باشند. این منطقه توسط کوه‌های آهکی و



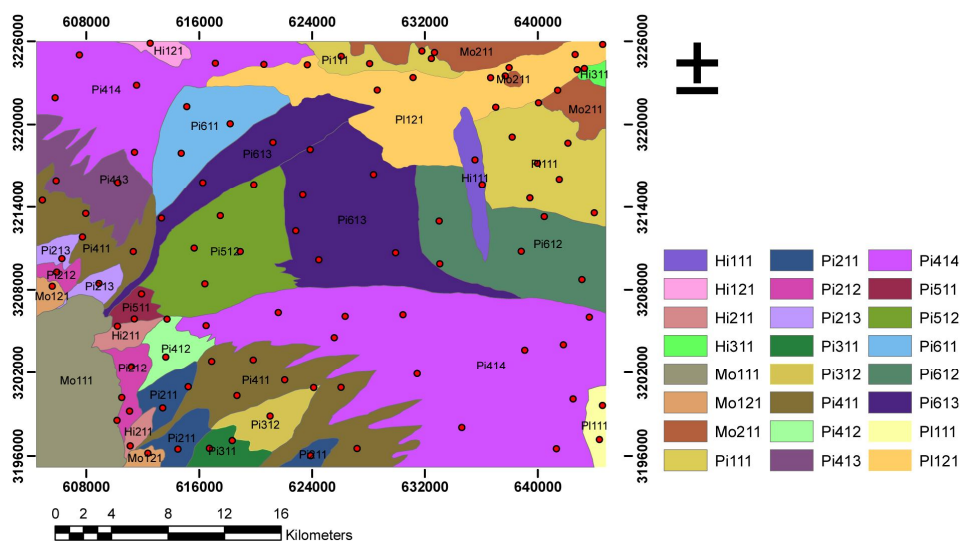
شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در شهرستان بم، استان کرمان.

Figure 1. The location of the studied area in Bam, Kerman Province.

به محیط سامانه اطلاعات مکانی انتقال و سپس با روش ارتوفتوژئورفرنسینگ^۲ (۱۹) زمین مرجع شدند. در شکل ۲ و جدول ۱ واحدهای ژئومرفیک و راهنمای سطوح ژئومرفیک در منطقه مورد مطالعه ارائه شده است.

مطالعات میدانی و نمونه‌برداری: قبل از نمونه‌برداری، مرز سطوح ژئومرفیک در بازدیدهای صحرائی مکرر مورد بررسی قرار گرفت. یک طرح نمونه‌برداری طبقه‌بندی‌شده^۳ با استفاده از نقشه‌های رقومی زمین‌شناسی، ژئومرفولوژی و توپوگرافی پیاده گردید. در این پژوهش، لایه نمونه‌برداری^۴ منطبق بر تفاوت در زمین‌ریخت‌ها (نقشه ژئومرفولوژی)، توپوگرافی (نقشه ارتفاع رقومی) و زمین‌شناسی طراحی شد. به طوری که در هر طبقه، موقعیت‌های نمونه‌برداری انتخاب گردید که اندازه نمونه‌ها متناسب با مساحت طبقه بود. در نهایت ۱۰۴ خاکرخ حفر، تشریح، نمونه‌برداری، آنالیز و براساس معیارهای رده‌بندی آمریکایی (۲۰۱۰) طبقه‌بندی شد (۲۲).

تهیه نقشه ژئومرفولوژی: تهیه نقشه ژئومرفولوژی منطقه، از تفسیر عکس‌های هوایی ۱:۴۰۰۰۰ براساس مورفولوژی، ساختار کلی و فرآیندهای شکل‌گیری زمین‌ریخت‌ها انجام گرفت. واحدهای ژئومرفیک از طریق سلسله‌مراتبی که توسط مؤمنی و زینک (۱۹۹۷) معرفی شد، ارائه شدند (۱۴). این سلسله‌مراتب ژئومرفیک از چهار سطح شامل زمین‌نما، زمین‌ریخت، سنگ‌شناسی و سطوح ژئومرفیک تشکیل شده است. برای تفکیک واحدهای اراضی، از سیستم استریوسکوپی برای تشخیص تفاوت‌ها استفاده شد. همچنین از دانش روابط بین خاک‌نما^۱ با زمین‌شناسی (در ارتباط با تغییرات در مواد مادری)، توپوگرافی (مرتبط با فرآیندهای فرسایش و رسوب‌گذاری و تغییرات در بارش و تبخیر) و ژئومورفولوژی (نشان‌دهنده اثرات فرآیندهای فرسایش و رسوب‌گذاری) استفاده شد. بعد از تفسیر و تفکیک واحدهای اراضی، عکس‌های هوایی منطقه مورد مطالعه



شکل ۲- سطوح ژئومرفیک تفکیک‌شده و موقعیت نقاط نمونه‌برداری شده در منطقه مورد مطالعه.

Figure 2. Geomorphology map and sampling points in the studied area.

- 2- Ortho-Photo-Geo-Referencing
- 3- Stratified sampling scheme
- 4- Sampling strata

- 1- Soilscape

جدول ۱- راهنمای سطوح ژئومرفیک تفکیک شده در منطقه مورد مطالعه.

Table 1. Hierarchic description of geomorphic units in the studied area.

| راهنما Legend | سطوح ژئومرفیک Geomorphic surface | زمین شناسی Litology | زمین ریخت Landform | زمین نما Landscape |
|------------------|---|--|---|-----------------------|
| Pi111 | سطح رسی Clay flat | پوسته نمکی Salt crust | سطح رسی Clay flat | پلایا Playa |
| Pi121 | سطح رسی Clay flat | رسوبات آبرفتی زیر و درشت Alluviums sediment | | |
| Pi111 | سطوح فرسایشی eroded surface | رسوبات آبرفتی جدید Recently alluviums | پدیمنت Pediment | دامنه Peidmont |
| Pi211 | دارای توپوگرافی شدید، شیب زیاد، ارتفاع زیاد، آبراهه‌های عمیق Dendrite drainage system with high topography | | باهادای بریده بریده قدیمی | |
| Pi212 | دارای توپوگرافی متوسط، ارتفاع متوسط، آبراهه شاخه درختی Moderate topography and elevation | رسوبات آبرفتی قدیمی Old Alluviums | Old dissected bajada | |
| Pi213 | دارای توپوگرافی متوسط، ارتفاع کم تر، آبراهه نسبتاً متراکم Moderate topography and low elevation | | | |
| Pi311 | دارای توپوگرافی هموارتر، ارتفاع کم تر Low topography and low elevation | رسوبات آبرفتی جدید Recently alluviums | باهادای بریده بریده Dissected bajada | |
| Pi312 | شیب و ارتفاع کم، فاصله بین آبراهه‌ها زیاد Low slope and elevation | | | |
| Pi411 | قسمت بالایی بعد از باهادای بریده بریده، دارای سنگ فرش بیابانی Bajada, upper section. desert pavement | | | |
| Pi412 | قسمت بالایی بعد از بریدگی‌ها، تکامل نسبت به قبلی بیش تر Bajada, upper section | رسوبات آبرفتی جدید Recently alluviums | باهادا Bajada | |
| Pi413 | قسمت بالایی باهادا Bajada, upper section | | | |
| Pi414 | قسمت پایینی، ارتفاع و شیب کم، دارای آبراهه فعال Lower bajada section | رسوبات رودخانه‌ای و آبرفتی اخیر Recently alluviums | | |
| Pi511 | توپوگرافی زیاد، دارای سنگ فرش بیابانی شدید، قسمت بالای فن Active fan, upper section, with high topography | رسوبات آبرفتی قدیمی Old alluviums | مخروط افکنه بریده بریده Dissected alluvial fan | |
| Pi512 | توپوگرافی زیاد، دارای سنگ فرش بیابانی و آثار آبراهه High topography, desert pavement | | | |

| | | | | |
|-------|---|---|-----------------------------------|-----------------|
| Pi611 | دارای شیب و ارتفاع کم، سنگ‌فرش بیابانی متوسط Low slope and elevation | رسوبات آبرفتی جدید Recently alluviums | | |
| Pi612 | قسمت‌های پایین فن که به ثبات رسیدند، دارای سنگ‌فرش بیابانی Lower fan section, low slope | | مخروط‌افکنه Alluvial fan | |
| Pi613 | قسمت‌های پایین فن دارای آثار آبراهه و آبراهه فعال Lower bajada section, new parallel | رسوبات رودخانه‌ای و آبرفتی اخیر Recently alluviums | | |
| Hi111 | تپه‌ماهوری، دارای ارتفاع کم و آثار آبراهه Low elevation and, new parallel | ماسه‌سنگ و سیلت‌استون Sandstone and siltstone | تپه بریده‌بریده Dissected hill | |
| Hi121 | تپه‌ماهوری، دارای ارتفاع کم و آثار آبراهه Low elevation and, new parallel | ماسه‌سنگ رسی، سیلت Sandstone, Silt | | تپه Hill |
| Hi211 | سطوح فرسایشی و بریده‌بریده شدید Dissected and eroded surface | کنگلومرا Conglomerate | تپه فرسایش یافته Eroded hill | |
| Hi311 | تپه‌های خاک‌دار و نمکی Salty hill | توف‌های آتشفشانی Volcanic ash | تپه خاک‌دار Hill | |
| Mo111 | ارتفاع زیاد و سطوح سنگی rock surface | توف قرمز، توف سبز Green, red ash | رخمون سنگی Bedrock | |
| Mo121 | ارتفاع زیاد و سطوح سنگی rock surface | توف، داسیت، کنگلومرا، ریولیت Conglomerate, riolite, disite | | کوه Mountain |
| Mo211 | کوه‌هایی با ارتفاع کم، در سطح دارای سنگ‌ریزه و قلوه‌سنگ Low elevation | توف‌های آتشفشانی، بازالت، آندزیت Volcanic ash, Bazalt | | |

شاخص‌های تفرق: در این پژوهش شاخص‌های تفرق شامل شاخص تفرق شانن، غنای گونه‌ها و یکسانی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. برای تعیین شاخص تفرق در هر زمین‌نما، تعداد خاک‌رخ موجود در هر سطح (N_i) و کل خاک‌رخ‌های برداشت‌شده در منطقه (N) در نظر گرفته شد.

شاخص‌های نسبی: شاخص‌های تفرق براساس فراوانی نسبی طبقه خاک نسبت به کل نقاط نمونه‌برداری شده در هر سطح ژئومرفیک محاسبه شدند. استفاده از فراوانی نسبی اجزاء، یکی از رایج‌ترین روش محاسبه تفرق است. یکسانی اجزا که نشان‌گر نسبت فراوانی اجزاء است یکی دیگر از شاخص‌های تفرق است (۲۰).

از لایه‌های ژنتیکی تمامی خاک‌رخ‌ها و بعد از هوا خشک شدن و عبور از الک ۲ میلی‌متری، برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی در ۴۶۰ نمونه خاک به شرح زیر اندازه‌گیری شد: بافت خاک به روش پی‌پت (۴)، اسیدیته و هدایت الکتریکی نمونه‌های خاک در عصاره ۲/۵ : ۱ خاک به آب به وسیله pH متر و هدایت‌سنج، کربنات کلسیم معادل خاک به روش تیتراسیون برگشتی (۱)، درصد کربن آلی خاک به روش اکسایش تر (۲۵)، درصد گچ به روش خشک کردن در آون (۱۵)، نسبت جذب سدیم پس از اندازه‌گیری غلظت کاتیون‌های سدیم، کلسیم و منیزیم در عصاره اشباع محاسبه شد و ظرفیت تبادل کاتیونی به روش استات سدیم در اسیدیته ۷ (۱۸) تعیین شد.

$$E = H' / H_{\max} = H' / \ln S \quad (۴)$$

که در آن، S غنای گونه‌ها یعنی تعداد اجزای داخل در هر طبقه یا واحد نقشه است.

دو نمونه دیگر از شاخص‌های غنا، شاخص مارگالف و شاخص منهینیک هستند که برای محاسبه آن‌ها از تعداد گونه و مجموع تمام گونه‌ها استفاده می‌شود. شاخص مارگالف و شاخص منهینیک به ترتیب با استفاده از روابط ۵ و ۶ محاسبه می‌شوند:

$$D_{Mg} = (S-1) / \ln N \quad (۵)$$

$$D_{Mn} = S / \sqrt{N} \quad (۶)$$

که در آن‌ها، S تعداد گونه (به‌عنوان مثال، نوع خاک) و N تعداد کل گونه است. هر دو شاخص بین صفر تا بی‌نهایت متغیر هستند (۱۱ و ۲۶).

از شاخص تفرق شانن و شاخص اونیل برای آنالیز تکامل و تکوین خاک‌ها و تجزیه و تحلیل ساختار مکانی تغییرات زمین‌نما استفاده شد. در محاسبه شاخص‌های تفرق، اجزاء جامعه از مقیاس زمین‌نما تا سطح ژئومرفیک قابل تغییر و محاسبه است.

نتایج و بحث

روابط خاک-زمین‌نما: در منطقه مورد مطالعه براساس توپوگرافی، شکل سطح زمین، موقعیت جغرافیایی و محیط رسوبی، چهار واحد زمین‌نما شامل کوه، تپه، دامنه^۲ و پلایا و زمین‌ریخت‌های مهم از جمله مخروط‌افکنه، باهادا، مخروط‌افکنه بریده‌بریده^۳، باهادهای بریده‌بریده، پدیمت و سطح رسی تشخیص داده شد (شکل ۲ و جدول ۱).

به‌منظور درک روابط بین زمین‌ریخت و خاک نیاز است که علاوه بر بررسی زمین‌ریخت‌ها، تکامل

تفرق، شاخصی است که در برگیرنده هر دو شاخص غنای گونه‌ها و یکسانی است و وجود شاخص‌های غنای گونه‌ها و یکسانی بزرگ‌تر، دلیلی بر تفرق بیش‌تر می‌باشد (۶ و ۷). شاخص شانن یکی از متداول‌ترین شاخص‌های فراوانی نسبی است که با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد:

$$H' = -\sum_{i=1}^n P_i \times \ln(P_i) \quad (۱)$$

که در آن، Pi براساس فرمول ni/N برآورد می‌شود. مقدار H' معمولاً بین ۱/۵ و ۳/۵ است و به‌ندرت به بالای ۴/۵ می‌رسد.

یکی دیگر از شاخص‌های فراوانی نسبی، شاخص اونیل^۱ است. شاخص اونیل به‌منظور بررسی انحراف از شاخص شانن محاسبه‌شده از حداکثر آنتروپی مورد استفاده قرار گرفت (۱۶) که با استفاده از رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$D = \ln(S) + \sum_{i=1}^S P_i + \ln(P_i) \quad (۲)$$

که در آن، S غنای گونه‌ها در هر واحد و Pi پارامتری است که در شاخص شانن استفاده شده است.

شاخص غنای گونه‌ها: تعداد اجزاء در یک واحد (مثلاً تعداد فامیل خاک در یک سطح ژئومرفیک) به‌عنوان غنای گونه‌های آن در نظر گرفته می‌شود. شاخص غنا وقتی تمام اجزاء در واحد دارای احتمال برابر باشند برای محاسبه شاخص یکسانی (E) استفاده می‌شود. اگر شرط زیر برقرار باشد،

$$H' = H_{\max} = \ln S \quad (۳)$$

یکسانی، بیانگر فراوانی نسبی هر کدام از پدیده‌های موجود (مانند مساحت نسبی اشغال شده توسط هر طبقه خاک) است که با استفاده از رابطه ۴ محاسبه می‌شود:

2- Piedmont

3- Dissected

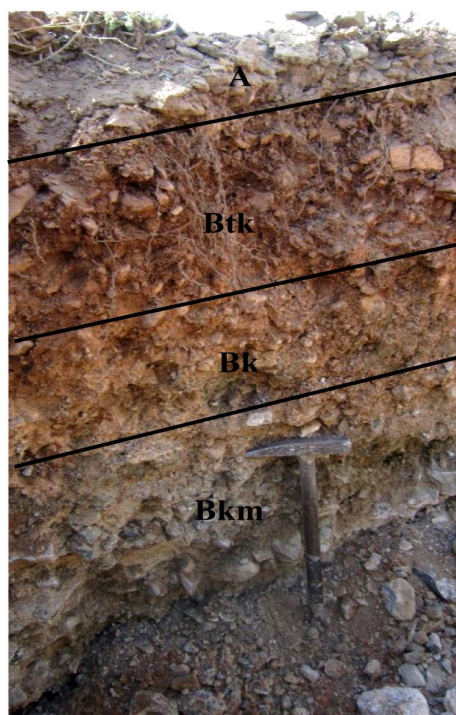
1- O'Neill index

و توپوگرافی شدید (Pi211). بیانگر قدیمی بودن این سطح دارد. با توجه به مقادیر بالای سنگریزه، احتمالاً گچ از خاکرخ خاک خارج شده و انتقال و شستشوی آهک و رس راحت تر صورت گرفته است. به طوری که رنگ قرمز رس و رس ایلوویال و پوسته‌های رسی در خاکرخ خاک قابل مشاهده است. با ادامه شستشو و انتقال آهک به قسمت‌های پایینی خاکرخ و قرار گرفتن بین سنگ و سنگریزه‌ها و سیمانی شدن تشکیل افق پتروکلسیک اتفاق افتاده است. خاک‌های موجود در این سطح ژئومرفیک براساس سیستم رده‌بندی آمریکایی در زیرگروه Argic Petrocalcids طبقه‌بندی شدند (شکل ۳). زمین‌ریخت‌ها که حرکت عمودی و توزیع آب خاک را کنترل می‌کند، تعیین‌کننده تکامل خاک در طول زمان هستند (۲۳). افق آرچیلیک که برای تشکیل آن ده‌ها تا صدها هزار سال زمان نیاز است، عمدتاً تحت تأثیر نفوذ، توزیع عمودی و در دسترس بودن آب خاک می‌باشد (۲).

خاک‌ها هم مورد مطالعه قرار گیرد. با تشریح خاکرخ‌های حفرشده در منطقه، خاک‌ها براساس سیستم رده‌بندی آمریکایی (۲۰۱۰) در تعداد هشت گروه بزرگ خاک طبقه‌بندی شدند. گروه بزرگ‌های طبقه‌بندی شده شامل Calcigypsid، Haplosalids، Haplogypsid، Haplocambid، Torriorthent، Calciargid و Petrocalcids هستند (جدول ۲) (۲۲).

با توجه به اطلاعات تصویر ماهواره، تفسیر عکس‌های هوایی و بازدیدهای صحرایی، سه نوع باهادا شامل باهادای بریده‌بریده قدیمی، باهادای بریده‌بریده و باهادا (شکل ۲) شناسایی شد. باهادای بریده‌بریده قدیمی در مجاورت کوه قرار داشت که به سه سطح ژئومرفیک شامل Pi211، Pi212 و Pi213 تقسیم شدند (جدول ۱).

مشاهده افق‌های آرچیلیک، کلسیک و پتروکلسیک (جدول ۲) در سطح ژئومرفیک باهادای با ارتفاع زیاد



شکل ۳- افق‌های آرچیلیک، کلسیک و پتروکلسیک در خاکرخ ۵۹.

Figure 3. Argillic, calcic and petrocalcics horizons at profil 59.

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌خ‌های شاهد سطوح ژئومرفیک.

Table 2. Physical and chemical properties of represented profiles in geomorphic surface.

| افق Horizon | عمق Depth (cm) | ماده آلی OM (%) | هدایت الکتریکی ECe (dS m ⁻¹) | کربنات کلیسم CaCO ₃ (%) | سولفات کلیسم CaSO ₄ (%) | رس Clay (%) | سیلت Silt (%) | شن Sand (%) | بافت Texture |
|----------------|----------------------|-----------------------|---|---|---|-------------------|---------------------|-------------------|--------------------------------|
| Haplosalids | | | | | | | | | |
| A | 0-5 | 0.18 | 3.57 | 14.0 | 4.2 | 6.25 | 16.8 | 57.6 | لوم رسی شنی sandy clay loam |
| By1 | 5-20 | 0.15 | 8.98 | 12.5 | 15.0 | 21.3 | 10.8 | 68.0 | لوم رسی شنی sandy clay loam |
| By2 | 20-36 | 0.15 | 13.9 | 16.0 | 40.0 | 24.0 | 10.8 | 65.3 | لوم رسی شنی sandy clay loam |
| Byzm | +36 | 1.00 | 85.9 | 11.0 | 20.0 | 11.2 | 14.4 | 74.4 | لوم شنی sandy loam |
| Haplocambids | | | | | | | | | |
| A | 0-10 | 0.47 | 2.10 | 19.1 | 4.6 | 24.0 | 33.9 | 42.1 | لومی loam |
| Bw1 | 10-30 | 0.44 | 4.58 | 19.3 | 5.5 | 30.4 | 33.3 | 36.3 | لوم رسی clay loam |
| Bw2 | 30-46 | 0.25 | 7.04 | 18.8 | 5.5 | 24.8 | 28.6 | 46.6 | لوم رسی شنی sandy clay loam |
| Bw3 | 46-60 | 0.15 | 2.68 | 15.9 | 2.7 | 15.2 | 10.8 | 74.0 | لوم شنی sandy loam |
| Haplocalcids | | | | | | | | | |
| A | 0-5 | 0.15 | 0.55 | 16.0 | 5.3 | 17.6 | 20.0 | 62.4 | لوم شنی sandy loam |
| Bk1 | 5-20 | 0.10 | 4.40 | 18.5 | 6.1 | 20.0 | 23.2 | 56.8 | لوم رسی شنی sandy clay loam |
| Bk2 | 20-36 | 0.15 | 14.10 | 19.3 | 8.1 | 11.2 | 44.0 | 44.8 | لومی loam |
| Bk3 | 36-50 | 0.12 | 11.27 | 23.6 | 4.2 | 20.0 | 25.6 | 54.4 | لوم رسی شنی sandy clay loam |
| Bk4 | 50-88 | 0.13 | 5.24 | 23.0 | 4.8 | 13.6 | 32.0 | 54.4 | لوم شنی sandy loam |
| Haplogypsisds | | | | | | | | | |
| A | 0-4 | 0.19 | 3.25 | 11.3 | 1.2 | 12.0 | 14.8 | 73.2 | لوم شنی sandy loam |
| By1 | 4-20 | 0.15 | 4.02 | 9.5 | 17.1 | 21.3 | 5.3 | 73.3 | لوم رسی شنی sandy clay loam |
| By2 | 20-43 | 0.10 | 3.86 | 11.8 | 20.2 | 18.7 | 5.3 | 76.0 | لوم شنی sandy loam |
| By3 | 43-60 | 0.24 | 4.52 | 6.3 | 10.1 | 16.0 | 13.3 | 70.7 | لوم شنی sandy loam |
| 2C | +60 | 0.21 | 3.96 | 5.0 | 2.9 | 8.0 | 0.8 | 91.2 | شنی Sand |

ادامه جدول ۲-

Continue Table 2.

| افق Horizon | عمق Depth (cm) | ماده آلی OM (%) | هدایت الکتریکی ECe (dS m ⁻¹) | کربنات کلیسم CaCO ₃ (%) | سولفات کلیسم CaSO ₄ (%) | رس Clay (%) | سیلت Silt (%) | شن Sand (%) | بافت Texture |
|----------------|----------------------|-----------------------|---|---|---|-------------------|---------------------|-------------------|--------------------------------|
| Calcigypsis | | | | | | | | | |
| A | 0-5 | 0.23 | 1.4 | 16.8 | 4.9 | 25.6 | 35.2 | 39.2 | لومی loam |
| Bky1 | 5-20 | 0.26 | 11.8 | 18.3 | 14.6 | 21.6 | 32.0 | 46.4 | لومی loam |
| Bky2 | 20-50 | 0.32 | 13.7 | 18.0 | 12.1 | 26/7 | 18.7 | 54.7 | لوم رسی شنی sandy clay loam |
| C | 50-70 | 0.15 | 4.4 | 4.5 | 4.1 | 8.0 | 1.0 | 91.2 | شنی Sand |
| Calciargids | | | | | | | | | |
| A | 0-5 | 0.31 | 0.11 | 6.8 | 6.0 | 29.6 | 34.4 | 36.0 | loam clay |
| Bt1 | 5-20 | 0.38 | 0.12 | 8.7 | 11.2 | 41.6 | 27.2 | 31.2 | رسی Clay |
| Bt2 | 20-35 | 0.41 | 0.14 | 12.0 | 12.3 | 37.6 | 33.6 | 28.8 | clay loam |
| Bk | 35-64 | 0.32 | 0.14 | 15.5 | 20.9 | 29.6 | 17.6 | 52.8 | لوم رسی شنی sandy clay loam |
| C | 100 | 0.15 | 0.79 | 2.8 | 3.2 | 16.8 | 15.2 | 68.0 | sandy loam |
| Petrocalcids | | | | | | | | | |
| A | 0-5 | 0.44 | 0.11 | 7.3 | 5.7 | 28.8 | 35.2 | 36.0 | لوم رسی clay loam |
| Bt | 5-19 | 0.44 | 0.12 | 6.8 | 12.6 | 43.2 | 38.4 | 18.4 | رسی Clay |
| Btk | 19-38 | 0.15 | 0.11 | 18.3 | 10.9 | 37.6 | 37.6 | 24.8 | لوم رسی clay loam |
| Bkm | +70 | 0.26 | 0.23 | 21.3 | 4.5 | 24.0 | 24.0 | 52.0 | لوم رسی شنی sandy clay loam |
| Torriorthents | | | | | | | | | |
| A | 0-5 | 0.19 | 0.12 | 12.8 | 3.1 | 12.8 | 24.0 | 63.2 | لوم شنی sandy loam |
| 2C | 5-25 | 0.05 | 0.93 | 6.5 | 2.4 | 8.0 | 0.8 | 91.2 | شنی Sand |
| 3C | 25-52 | 0.10 | 0.91 | 5.0 | 2.7 | 8.0 | 0.8 | 91.2 | شنی Sand |
| 4C | 52-110 | 0.05 | 0.23 | 12.8 | 2.3 | 13.6 | 8.8 | 77.6 | لوم شنی sandy loam |

و پایین آن به صورت پندانت مشاهده شد. در شکل ۴ انواع گچ‌های قابل مشاهده در خاک‌رخ‌ها نشان داده شده است. در قسمت‌های دیگر این زمین ریخت که هنوز فعال هستند و هر سال رسوبات جدیدی به آن اضافه می‌شود، افق‌هایی مشاهده شد که لایه‌بندی آن حفظ شده و هیچ شواهدی از تکامل در آن‌ها دیده نشد (Pi414). براساس سیستم رده‌بندی آمریکایی، در باهادای پایین دست پایدار خاک‌ها در زیرگروه‌های Leptic Haplogypsids و در باهادای پایین دست فعال در زیرگروه Typic Torriorthents طبقه‌بندی شدند. همچنین خاک‌ها در سطح Pi413 در زیرگروه‌های Sodic Haplocambids و Typic Haplocambids طبقه‌بندی شدند.

براساس بازدیدهای صحرائی و نقشه ژئومرفولوژی دو نوع مخروط‌افکنه در منطقه مورد مطالعه تشخیص داده شد. یکی مخروط‌افکنه بریده‌بریده که سطوح بالایی فن بودند و دارای توپوگرافی زیاد و سنگ‌فرش بیابانی شدید بودند (Pi512 و Pi511). دیگری سطح ژئومرفیک مخروط‌افکنه که دارای دو قسمت متفاوت بود (Pi612، Pi611)، سطوح پایین فن که دارای تعداد زیادی آبراهه فعال بود و سطحی که باگذشت زمان پایدار شده و همچنین دارای سنگ‌فرش بیابانی بودند. در خاک‌رخ‌های مورد مطالعه در زمین ریخت مخروط‌افکنه بریده‌بریده، افق جیپسیک دارای پندانت گچی مشاهده شد. براساس مشاهدات این سطح ژئومرفولوژی، خاک‌ها در زیرگروه‌های Leptic Haplogypsids و Typic Haplogypsids طبقه‌بندی شدند. افق کمیک در مخروط‌افکنه پایدار که دارای سنگ‌فرش بیابانی بود، تشخیص داده شد. رده‌بندی خاک‌ها در این سطح ژئومرفیک Typic

در باهادای بریده‌بریده قدیمی با توپوگرافی و ارتفاع متوسط (Pi212)، افق‌های آرچلیک و کلسیک مشاهده شد. در این سطح، خاک‌ها براساس سیستم رده‌بندی آمریکایی در زیرگروه Typic Calciargids طبقه‌بندی شدند. همچنین در سطح Pi213 افق‌های کلسیک و جیپسیک مشاهده شد. در بعضی افق‌ها همراه با گچ، آهک ثانویه و در قسمت‌های پایینی خاک‌رخ خاک، بلورها و پندانت‌های گچ بیش‌تری مشاهده شد؛ بنابراین، خاک‌ها در این سطح ژئومرفیک در زیرگروه Typic Calcigypsids طبقه‌بندی شدند (جدول ۲). نتایج مزبور نشان می‌دهد که خاک‌ها می‌توانند شاخصی از پایداری زمین‌نما و سطوح ژئومرفیکی باشند.

در باهادای بریده‌بریده که شامل دو سطح است، افق‌های کلسیک و پتروکلسیک، در سطح Pi311 و افق جیپسیک در سطح Pi312 مشاهده شد. خاک‌ها در این دو سطح به ترتیب در زیرگروه‌های Calcic Petrocalcids و Leptic Haplogypsids طبقه‌بندی شدند.

در منطقه مورد مطالعه چهار سطح ژئومرفیک در زمین ریخت باهادا قابل مشاهده بود. خاک‌ها در سطح Pi412 که در فاصله دورتری از کوه و بعد از باهادای بریده‌بریده قرار داشتند، در گروه بزرگ Typic Calcigypsids طبقه‌بندی شدند. تفسیر عکس‌های هوایی و بازدیدهای صحرائی نشان داد که بعضی قسمت‌های این سطح پایدار شده و دارای سنگ‌فرش^۱ و جلای بیابانی^۲ (Pi411) بودند. در این سطح ژئومرفیک، افق جیپسیک شناسایی گردید. گچ در افق‌های سطحی خاک‌رخ خاک به صورت پودری و بلوری و در قسمت‌های میانی

1- Desert pavement

2- Desert varnish

به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم در تکامل خاک‌های تشکیل شده بر روی این زمین‌ریخت‌ها نیز دخالت دارند. همچنین مطالعه تکامل و تشکیل خاک‌ها به مطالعات مربوط به چگونگی تکامل زمین‌نما کمک می‌کند. نتایج حاصل از بررسی تکامل خاک‌ها در سطوح ژئومرفیک مختلف نشان داد که تکامل خاک در سطوح ژئومرفیک قدیمی نسبت به سطوح ژئومرفیک جوان بیش‌تر بود. با توجه به این‌که افق‌های مختلف از جمله افق‌های کلسیک، پتروکلسیک، آرچلیک، سالیک، پتروسالیک، چپسیک و کمییک در منطقه مورد مطالعه مشاهده شدند؛ بنابراین فرآیندهای اصلی پدوژنیک در منطقه که منجر به تشکیل خاک شدند شامل هوادیدگی، تجمع کربنات کلسیم^۲، انتقال رس^۳، تجمع نمک‌های محلول^۴ و گچ و سخت‌شدگی^۵ بودند.

شاخص‌های تفرق خاک: در جدول ۳ نتایج شاخص‌های تفرق خاک در منطقه مورد مطالعه در طبقات مراتب ژئومرفیکی مختلف ارائه شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد با افزایش مقیاس مکانی از زمین‌نما به‌طرف سطوح ژئومرفیک، شاخص‌های تفرق و غنا افزایش می‌یابند. همچنین شاخص تفرق شانن براساس کاهش سلسله‌مراتب سطوح ژئومرفیک افزایش نشان داد. علت افزایش این شاخص تفرق را می‌توان افزایش توأم شاخص‌های غنا و یکسانی در سلسله‌مراتب ژئومرفیکی بیان کرد. نتایج نشان می‌دهد که از طرف سطح زمین‌نما به سطح زمین ریخت افزایش زیاد در شاخص تفرقشان دیده می‌شود. نتایج حاصله با نتایج تومانیان و همکاران (۲۰۰۶) و جعفری و همکاران (۲۰۱۳) تطابق دارد

- 2- Calcification
- 3- Clay illuviation
- 4- Salinization
- 5- Hardening

Sodic Haplocambids و Haplocambids تعیین شدند. همچنین گروه بزرگ Typic Torriorthents در قسمت‌های فعال فن قرار داشت که نشان‌دهنده این است که رسوبات جدید مانع تکامل خاک شده‌اند (جدول ۲).

براساس سیستم رده‌بندی آمریکایی زیرگروه‌های Gypsic Haplosalids و Petrogypsic Haplosalids در زمین ریخت پدیمت شناسایی شد. شستشوی نمک‌ها از سازندهای بالادست پدیمت، باعث تشکیل افق سالیک و پتروسالیک شده است.

با توجه به اطلاعات تصویر ماهواره‌ای منطقه و تفسیر عکس‌های هوایی، جهت حرکت آبراهه‌ها و شیب منطقه به‌طرف زمین ریخت پلایا است و باعث تجمع رسوبات ریزدانه در این سطح شده است. در منطقه مورد مطالعه، بیش‌تر باغ‌های خرما در سطح ژئومرفیک پلایا قرار دارند. آبیاری غرقابی باغ‌های خرما، باعث شستشو و خارج شدن نمک و گچ از این خاک‌ها شده و افق‌های کمییک و کلسیک تشکیل شده‌اند. در بعضی قسمت‌های این زمین‌ریخت، عروسک‌های آهکی^۱ در طول نیم‌رخ خاک دیده شد. براساس این مشاهدات، خاک‌های این سطح در زیرگروه‌های Sodic Haplocalcids, Sodic Haplocambids و Typic Haplocalcids, Sodic Haplocambids و Typic Haplocambids طبقه‌بندی شدند (جدول ۲).

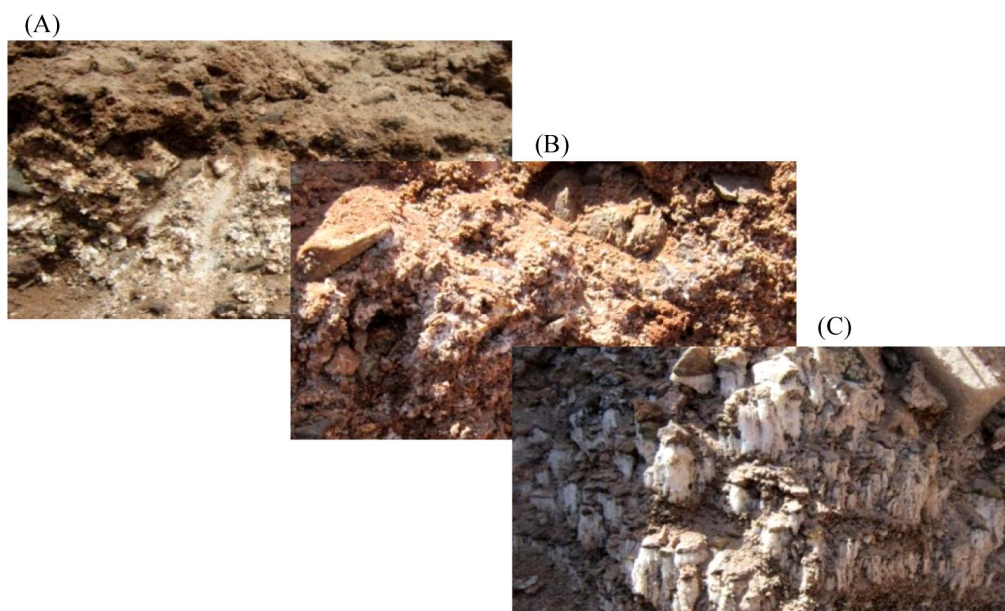
براساس نتایج حاصل از این پژوهش، می‌توان گفت که هم‌زمان با تشکیل زمین ریخت‌ها فرآیندهای دیگری از جمله زمین‌شناسی و هیدرولوژی باعث تفرق و تکامل خاک در منطقه شده است و تمام فرآیندهایی که در تکامل زمین‌ریخت‌ها نقش دارند،

- 1- Calcareous dolls

همکاران (۲۰۰۳) از شاخص آنتروپی شانن برای سطوح مختلف طبقه‌بندی، از جمله رده، زیررده، گروه بزرگ، زیرگروه، فامیل و سری خاک استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که غنای طبقه‌بندی و آنتروپی شانن از سطح رده تا سری خاک افزایش داشت (۶). تومانیان و همکاران (۲۰۰۶) تفرق خاک را در ایران مرکزی بررسی کردند و نتایج مشابه در تفرق خاک براساس طبقه‌بندی خاک در مقیاس سطح ژئومرفیک مشاهده کردند (۲۴). میناسنی و همکاران (۲۰۱۰) گزارش کردند که تعداد کلاس‌های خاک بر شاخص تفرق شانن تأثیر دارد. وقتی تعداد کلاس‌های خاک افزایش می‌یابد، تعداد بیش‌تری در شاخص شانن جمع می‌شوند؛ بنابراین سطوح ژئومرفیک با غنای بیش‌تر، تفرق بیش‌تری دارند (۱۳). همچنین نتایج سالدانا و ایباز (۲۰۰۴) نشان داد که شاخص‌های تفرق و غنا از سطح گروه بزرگ تا فامیل خاک در سه تراس رودخانه‌ای در مادرید اسپانیا افزایش داشت (۲۰).

(۱۰ و ۲۴). تومانیان علت افزایش شاخص‌های تفرق را افزایش هم‌زمان شاخص‌های غنا و یکسانی در خلال استفاده از اطلاعات کوچک مقیاس در تجزیه و تحلیل مقیاس‌های بزرگ‌تر در سلسله‌مراتب ذکر کرد. سالدانا و ایباز (۲۰۰۴) اذعان کردند که افزایش غیریکنواختی خاک در خلال سلسله‌مراتب ژئومرفیکی، تأییدکننده وجود چرخه واگرا در خاک‌های مطالعه شده است (۲۰). همچنین در جدول ۳ شاخص‌های مارگالف و منهینیک، ارائه شده‌اند؛ که هر دو شاخص رفتار مشابه نسبت به سلسله‌مراتب ژئومرفیک داشتند. این نتایج در توافق با فراوانی نشان داده‌شده در جدول ۳ است.

شاخص تفرق خاک برای هر سطح طبقه‌بندی در سطوح ژئومرفیک منطقه مورد مطالعه در جدول ۴ ارائه شده است. با توجه به این‌که سطح طبقه‌بندی از سطح رده خاک به فامیل خاک کاهش می‌یابد، شاخص تفرق شانن به دلیل این‌که شاخص غنا به‌طور چشم‌گیری افزایش پیدا می‌کند، افزایش می‌یابد. گو و



شکل ۴- انواع گچ مشاهده‌شده پودری در خاکرخ ۶۷ (A)، بلوری در خاکرخ ۳۹ (B) و پندانت در خاکرخ ۳۸ (C).

Figure 4. Types of observed gypsum, powder at Profiles 67 (A), crystalline at profiles 39 (B) and Pendant at profiles 38 (C).

جدول ۳- تنوع خاکها براساس سلسله مراتب ژئومرفیک در منطقه مورد مطالعه.

Table 3. The diversity of soils in the studied area based on geomorphic hierarchy.

| D_{Mn} | D_{Mg} | H_{max} | E | H' | S | N | سلسله مراتب ژئومرفیک Geomorphic hierarchy |
|----------|----------|-----------|------|------|----|-----|--|
| 0.39 | 0.65 | 1.39 | 0.57 | 0.79 | 4 | 104 | زمین نما Landscape |
| 1.18 | 2.37 | 2.48 | 0.85 | 2.10 | 12 | 104 | زمین ریخت Landform |
| 1.47 | 3.01 | 2.71 | 0.81 | 2.20 | 15 | 104 | سنگ شناسی Lithology |
| 2.35 | 4.95 | 3.18 | 0.90 | 2.84 | 24 | 104 | سطح ژئومرفیک Geomorphic surface |

S: فراوانی، H': شاخص تفرق شانن، E: یکسانی، H_{max} : حداکثر آنتروپی، D_{Mg} : شاخص غنای مارگالف، D_{Mn} : شاخص غنای منهنیک.

جدول ۴- شاخص های تفرق خاک در براساس سلسله مراتب طبقه بندی خاک در مقیاس سطح ژئومرفیک در منطقه مورد مطالعه.

Table 4. The soil diversity index based on soil classification hierarchy in the studied area.

| D | D_{Mn} | D_{Mg} | H_{max} | E | H' | S | N | سلسله مراتب طبقه بندی classification hierarchy |
|------|----------|----------|-----------|------|------|----|-----|---|
| 0.10 | 0.20 | 0.22 | 0.69 | 0.89 | 0.62 | 2 | 104 | رده Order |
| 0.18 | 0.59 | 1.10 | 1.79 | 0.90 | 1.61 | 6 | 104 | زیر رده Suborder |
| 0.24 | 0.78 | 1.51 | 2.10 | 0.88 | 1.83 | 8 | 104 | گروه بزرگ Great group |
| 0.37 | 1.57 | 1.23 | 2.77 | 0.87 | 2.41 | 16 | 104 | زیرگروه Subgroup |
| 0.51 | 5.01 | 10.8 | 3.93 | 0.87 | 3.42 | 51 | 104 | فامیل خاک Soil Family |

S: فراوانی، H': شاخص تفرق شانن، E: یکسانی، H_{max} : حداکثر آنتروپی، D_{Mg} : شاخص غنای مارگالف، D_{Mn} : شاخص غنای منهنیک، D: شاخص تفرق اونیل.

به فامیل خاک به ترتیب از ۱۶ به ۵۱ باشد. افزایش شاخص های مارگالف و منهنیک با نتایج سالدانا و ایبازن (۲۰۰۴) مشابه بود (۲۰).

در جدول ۵ نتایج مربوط به غنا و شاخص های تفرق خاک برای باهادای قدیمی تا جوان ارائه شده است. نکته برجسته این جدول این است که شاخص های تفرق در همه سطوح طبقه بندی از باهادای جوان ($Pi4$) به سمت باهادای قدیمی ($Pi1$)

تفاوت بین شاخص تفرق و حداکثر آنتروپی راهی دیگر برای نشان دادن یکسانی گونه ها و یا تشخیص گونه غالب است. این شاخص نیز روندی مشابه با شاخص تفرق شانن داشت و با کاهش سطوح طبقه بندی از سطح رده تا فامیل خاک افزایش نشان داد. همچنین افزایش زیاد شاخص های مارگالف و منهنیک در سلسله مراتب طبقه بندی از سطح زیرگروه به فامیل می تواند ناشی از افزایش زیاد غنا از زیرگروه

سطوح، با استفاده از شاخص‌های تفرق را تأیید کرد (۱۷). افزایش شاخص شادن می‌تواند نه تنها به دلیل افزایش غنا بلکه یکسانی عناصر موجود باشد. در این مورد خاص، اگرچه شاخص غنا برای باهادای قدیمی زیاد بود، شاخص یکسانی برای باهادای نسبتاً جوان (Pi3) بالاتر گزارش شد.

افزایش می‌یابند. این موضوع نشان‌دهنده این است که تکامل خاک در منطقه به صورت واگرایی (تکامل خاک باعث افزایش تفرق در منطقه شده است) بوده است. این نتایج مشابه نتایج مطالعه فیلیپس (۲۰۰۱) و تومانیان و همکاران (۲۰۰۶) است (۱۷ و ۲۴). نتایج فیلیپس (۲۰۰۱)، تکامل واگرایی خاک با افزایش سن

جدول ۵- شاخص‌های تفرق و غنا در سطح باهادای قدیمی تا جوان در منطقه مورد مطالعه.

Table 5. The diversity and richness index in the old and young bajada in the studied area.

| M_{Mn} | M_{Mg} | E | H_{max} | H' | S | |
|--------------------------|----------|------|-----------|------|---|-----|
| گروه بزرگ Great group | | | | | | |
| 1.00 | 0.91 | 0.97 | 1.10 | 1.06 | 3 | Pi1 |
| 1.00 | 0.72 | 1.00 | 0.69 | 0.69 | 2 | Pi2 |
| 0.80 | 0.75 | 1.10 | 0.60 | 0.36 | 3 | Pi3 |
| 0.50 | 0.36 | 0.69 | 0.54 | 0.22 | 2 | Pi4 |
| زیرگروه بزرگ Subgroup | | | | | | |
| 1.00 | 0.91 | 0.97 | 1.10 | 1.06 | 3 | Pi1 |
| 1.50 | 1.44 | 0.95 | 1.10 | 1.10 | 3 | Pi2 |
| 1.60 | 1.90 | 1.80 | 0.68 | 0.56 | 6 | Pi3 |
| 0.75 | 0.72 | 1.10 | 0.42 | 0.23 | 3 | Pi4 |
| فامیل خاک Soil family | | | | | | |
| 2.67 | 3.19 | 0.98 | 2.10 | 204 | 8 | Pi1 |
| 2.00 | 2.16 | 1.00 | 1.39 | 1.39 | 4 | Pi2 |
| 1.60 | 1.89 | 1.80 | 1.15 | 0.86 | 6 | Pi3 |
| 0.75 | 0.72 | 1.10 | 0.42 | 0.23 | 3 | Pi4 |

S: فراوانی، H': شاخص تفرق شادن، E: یکسانی، H_{max} : حداکثر آنتروپی، D_{Mg} : شاخص غنای مارگالف، D_{Mn} : شاخص غنای منهنیک، Pi1: باهادای قدیمی و بریده‌بریده و توپوگرافی شدید، Pi2: باهادای بریده‌بریده، Pi3: باهادای نسبتاً جوان، Pi4: باهادای جوان و دارای آبراهه فعال.

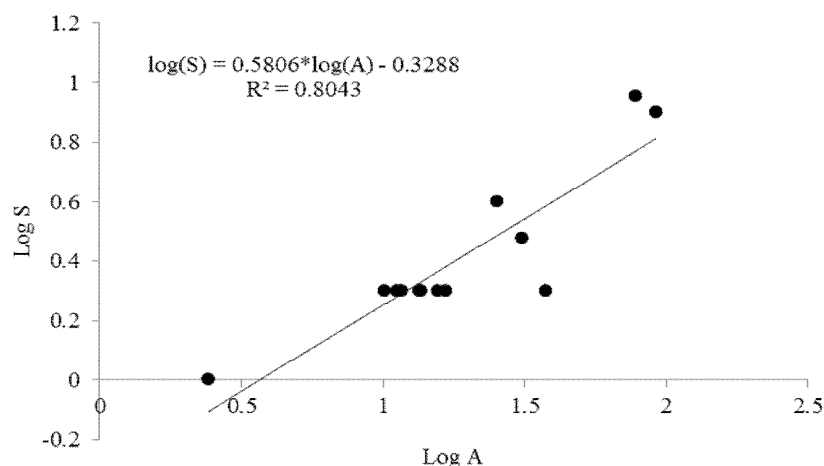
سطح Pi2 و Pi3 یک‌روند افزایشی ملایم از سطح گروه بزرگ به سطح فامیل خاک دیده می‌شود. همچنین در سطح Pi4 تفاوتی در آنتروپی شادن آن در سه سطح مورد بررسی مشاهده نشد. این سطح به علت این که هنوز جوان است و خاک این سطح تکامل پیدا نکرده در نتیجه تفرق زیادی در آن دیده نشد.

نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد که بیش‌ترین میزان آنتروپی در سلسله‌مراتب طبقه‌بندی در سطح فامیل خاک است و در سطح ژئومرفیک Pi1 افزایش آنتروپی شادن از سطح زیرگروه به فامیل خاک افزایش چشم‌گیری را نشان داد و علت آن را می‌توان به افزایش زیاد غنای خاک از ۳ به ۸ نسبت داد. در دو

وجود دارد. در شکل ۵ رابطه خطی بین لگاریتم غنا و لگاریتم مساحت به وسیله رسم غنای فامیل خاک در برابر مساحت سطوح ژئومرفیک ارائه شده است. تجزیه و تحلیل رابطه غنا- مساحت نشان داد که غنای منطقه مورد مطالعه با افزایش مساحت واحدها افزایش می‌یابد. با افزایش مساحت سطح ژئومرفیک، تعداد خاک متفاوت بیش‌تری شامل می‌شود و در نتیجه شاخص غنا افزایش می‌یابد. از آن‌جا که تفرق و غیریکنواختی خاک، یکی از عواملی است که باعث پیچیدگی و دشواری نقشه‌برداری خاک می‌شود و از طرفی، هرچه تفرق و تغییرات کلاس‌های خاک بیش‌تر باشد، تشخیص و تمایز آن‌ها به سختی انجام می‌گیرد؛ بنابراین انتظار می‌رود از طبقه رده به سمت طبقات پایین‌تر، تفرق افزایش و خلوص نقشه کاهش یابد. رابطه مثبت ($R^2=0/8$) بین غنا و افزایش مساحت در توافق با نتایج حاصل از مطالعات انجام شده توسط ایباز و همکاران (۲۰۰۵) در جزایر اژین و سالدانا و ایباز (۲۰۰۴) در مقیاس بزرگ از تراس‌های رودخانه بود (۸ و ۲۰).

شاخص‌های مارگالف و منهینیک نیز در سطوح ژئومرفیک جوان تا قدیمی بررسی شد. در مورد این شاخص‌ها روندی مشابه با سایر شاخص‌های تفرق مورد بررسی مشاهده شد. به عبارتی، این شاخص‌ها با افزایش سن سطوح و همچنین کاهش سطوح سلسله‌مراتب طبقه‌بندی از زیرگروه به فامیل خاک روندی افزایشی نشان دادند. نکته قابل توجه در مورد این شاخص‌ها این است که در سطح ژئومرفیک Pi3 در زیرگروه نسبت به سطوح دیگر افزایش بیش‌تری را نشان دادند. علت این را می‌توان به افزایش غنای خاک از ۳ در گروه بزرگ به ۸ در زیرگروه در این سطح ژئومرفیک نسبت داد. به طوری که در بقیه سطوح ژئومرفیک تغییر زیادی در مقدار غنا دیده نشد.

در اکولوژی، ارتباط بین تعداد گونه و مساحت با دو نوع مدل رابطه خطی بین لگاریتم غنا ($\log S$) و لگاریتم سطح ($\log A$) و رابطه خطی غنا با لگاریتم سطح توضیح داده شده است (۸). با استفاده از شاخص تفرق، امکان نمایش نرخ افزایش یا کاهش آنتروپی در خاک در بین سطوح مختلف سلسله‌مراتب ژئومرفیک و تغییر میزان تفرق با مقیاس مکانی

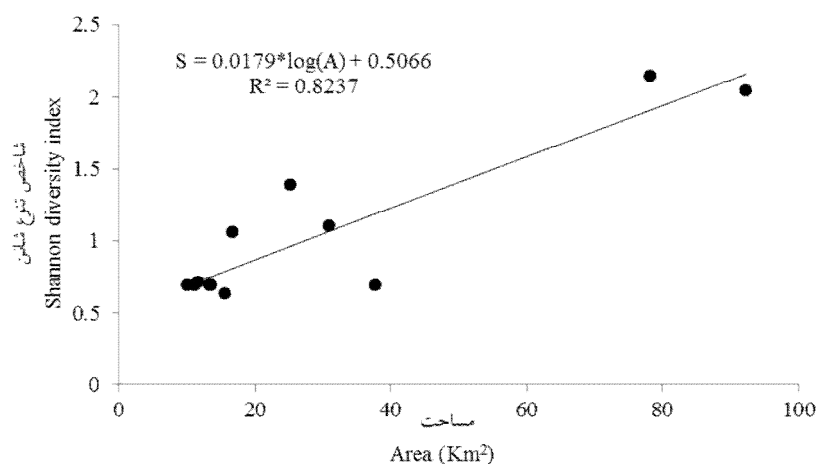


شکل ۵- رابطه بین لگاریتم مساحت (A) سطح ژئومرفیک و لگاریتم شاخص غنا (S) در سطح فامیل خاک در منطقه مورد مطالعه.

Figure 5. The relationship between the logarithm of the area (A) of geomorphic surface and log richness (S) at soil family in the studied area.

به دست آمد. سالدانا و ایبازن (۲۰۰۴) تفرق خاک را در مقیاس بزرگ بررسی کردند و نشان دادند که چگونه شاخص آنروپی سلسله مراتب طبقه بندی با افزایش مساحت سطوح مختلف افزایش می یابد (۲۰).

ارتباط آنروپی و سطح منطقه یک روش مناسب برای بررسی پیچیدگی محیط است. رابطه بین شاخص تفرق شانن و مساحت سطوح ژئومرفیک در سطح فامیل خاک در شکل ۶ ارائه شده است. رابطه خطی مثبتی بین آنروپی و مساحت سطوح ژئومرفیک



شکل ۶- رابطه بین مساحت سطح ژئومرفیک و شاخص تفرق شانن در سطح فامیل خاک در منطقه مورد مطالعه.

Figure 6. The relationship between geomorphic surface area and Shannon index at soil family level in the studied area.

نتایج نشان داد که شاخص های تفرق در هر دو سطح با کاهش سطح سلسله مراتب افزایش پیدا کرد. افزایش شاخص های تفرق در خاک و زمین نما در طول زمان، نشان دهنده این است که تکامل خاک از نوع واگرا است، یعنی با افزایش تکامل خاک، تفرق آن زیاد شده و در نتیجه خلوص نقشه خاک کاهش می یابد. بررسی روابط بین شاخص غنا و سطح ژئومرفیک نشان داد که با افزایش مساحت سطوح ژئومرفیک، میزان شاخص غنا افزایش پیدا کرد و مدل برازش شده برای روابط غنا- مساحت در منطقه مورد مطالعه، از نوع لگاریتمی بود. افزایش غنا و تفرق خاک براساس سلسله مراتب ژئومرفیکی و سطوح طبقه بندی خاک ها و افزایش آنروپی و غنا در مقابل وسعت سطوح ژئومرفیکی، تأییدکننده این نظر است که خاک های مطالعه شده، در واقع یک سیستم دینامیک غیرخطی هستند.

نتیجه گیری

نتایج نشان داد که تمام فرآیندهایی که در تکامل زمین ریخت ها نقش دارند، به طور مستقیم یا غیرمستقیم در تکامل خاک های تشکیل شده بر روی این زمین ریخت ها نیز دخالت دارند. مطالعه تکامل و تشکیل خاک ها به مطالعات مربوط به چگونگی تکامل زمین نما کمک می کند. مطالعه خاک ها در زمین ریخت های مختلف در منطقه مورد مطالعه نشان داد که تشکیل خاک و خصوصیات آن ها تحت تأثیر موقعیت ژئومرفیکی آن ها هستند. حضور افق آرچیلیک در سطح باهادای بریده بریده در رژیم رطوبتی اریدیک نشان دهنده اقلیم گذشته مرطوب در منطقه مورد مطالعه است. در این پژوهش، شاخص های مختلف تفرق خاک را در هر دو سطح سلسله مراتب طبقه بندی و ژئومرفیک بررسی شدند.

منابع

1. Allison, L.E., and Moodie, C.D. 1965. Carbonates, P 1379-1396. In: C.A. Black (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part 2, Am. Soc. Agron, Madison, WI.
2. Elliott, P.E., and Dorhan, P.J. 2009. Clay accumulation and argillic - horizon development as influenced by Aeolian vs. local parent material on quartzite and limestone-derived alluvial fans. *Geoderma*. 151: 98-108.
3. Esfandiarpour Borujeni, E., Toomanian, N., Salehi, M.H., and Mohammadi, J. 2009. Assessing geopedological soil mapping using diversity and similarity indices (A case study: Borujen area, Chaharmahal-Va-Bakhtiari province). *J. Water Soil*. 23: 100-114.
4. Gee, G.W., and Bauder, J.W. 1986. Particle size analysis, P 383-411. In: A. Klute (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part 1, Am. Soc. Agron, Madison, WI.
5. Gray, J.M., Humphreys, G.S., and Deckers, J.A. 2009. Relationships in soil distribution as revealed by a global soil database. *Geoderma*. 150: 309-323.
6. Guo, Y., Gong, P., and Amundson, R. 2003. Pedodiversity in the United States of America. *Geoderma*. 117: 99-115.
7. Ibanez, J.J., De-Alba, S., Bermudez, F.F., and Garcia-Alvarez, A. 1995. Pedodiversity: concepts and measures. *Catena*. 24: 215-232.
8. Ibanez, J.J., Caniego, J., San Jose, F., and Carrera, C. 2005. Pedodiversity-area relationships for islands. *Ecological Modelling*. 182: 257-269.
9. Ibanez, J.J., Saldana, A., De Alba, S., and Camargo, J. 1998. Pedodiversity and Global Soil Patterns at Coarse Scales. *Geoderma*. 83: 206-214.
10. Jafari, A., Ayoubi, S., Khademi, H., Finke, P.A., and Toomanian, N. 2013. Selection of a taxonomic level for soil mapping using diversity and map purity indices: A case study from an Iranian arid region. *Geomorphology*. 201: 86-97.
11. Magurran, A.E. 1988. Ecological diversity and its measurement. Croom Helm, London, 179p.
12. McBratney, A.B., and Minasny, B. 2007. On measuring pedodiversity. *Geoderma*. 141: 149-154.
13. Minasny, B., McBratney, A.B., and Hartemink, A.E. 2010. Global pedodiversity, taxonomic distance, and the World Reference Base. *Geoderma*. 155: 132-139.
14. Moameni, A., and Zink, J.A. 1997. Application of statistical quality control charts and geostatistics to soil quality assessment in a semi-arid environment of south-central Iran. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), Enschede, the Netherlands.
15. Nelson, R.E. 1982. Carbonate and gypsum, P 181-196. In: A.L. Page, R.H. Miller and R. Keeny (Eds.), Methods of soil analysis, Part II-chemical and microbiological properties, Madison, WI.
16. O'Neill, R.V., Krummel, J.R., Gardner, R.H., Sugihara, G., Jackson, B., Deangelis, D.L., Milne, B.T., Turner, M.G., Zygmunt, B., Christensen, S.W., Dale, V.H., and Graham, R.L. 1988. Indices of landscape pattern. *Landscape Ecology*. 1: 153-162.
17. Phillips, J.D. 2001. Divergent evolution and the spatial structure of soil landscape variability. *Catena*. 43: 101-113.
18. Rhoads, J.W. 1986. Cation exchange capacity, P 149-158. In: A.C. Page (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part 2, Am. Soc. Agron, Madison, WI.
19. Rossiter, D.G., and Hengl, T. 2001. Technical note: C reating geometrically-correct photo-interpretation, photo-mosaic, and base maps for a project GIS. <http://www.itc.nl/rossiter>.
20. Saldana, A., and Ibanez, J.J. 2004. Pedodiversity analysis at large scales: an example of three fluvial terrain of the Henares River (central Spain). *Geoderma*. 62: 123-138.
21. Shannon, C.E., and Weaver, W. 1948. The mathematical theory of communication. Univ. Illinois Press, Urbana, 237p.
22. Soil Survey Staff. 2010. Keys to Soil Taxonomy, eleventh edition, NRCS, USDA.

23. Sulaeman, Y., Hikmatullah, D.S., and Subagyo, H. 2005. Modeling soil-landscape relationships. *J. Ilmu Tanah dan Lingkungan*. 5: 1-14.
24. Toomanian, T., Jalalian, A., Khademi, H., Karimian Eghbal, M., and Papritz, A. 2006. Pedodiversity and pedogenesis in Zayandeh-rud Valley, Central Iran. *Geomorphology*. 81: 376-393.
25. Walkey, A., and Black, I.A. 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid in soil analysis. *Experimental. Soil Sci.* 79: 459-465.
26. Whittaker, R.H. 1977. Evolution of species diversity in land communities, P 1-67. In: M.K. Hecht, W.C. Steere and B. Wallace (Eds.), *Evolutionary biology*, vol. 10. Plenum, New York.
27. Williams, P.H., and Humphries, C.J. 1996. Comparing character diversity among biotas: spatial patterns in taxonomic diversity, P 54-76. In: K.J. Gaston (Ed.), *Biodiversity: A Biology of Numbers and Difference*. Blackwell.
28. Zhang, X., Chen, J., Zhang, G., Tan, M., and Ibdaz, J.J. 2003. Pedodiversity analysis in Hainan Island. *J. Geograph. Sci.* 13: 2. 181-186.



Considering soil diversity index and soil-landscape evolution relationship in the arid region of Bam, southeast Iran

F. Abbaszadeh Afshar¹, *Sh. Ayoubi², A. Jafari³ and H. Khademi²

¹Ph.D. Student, Dept. of Soil Science, Isfahan University of Technology, ²Professor, Dept. of Soil Science, Isfahan University of Technology, ³Assistant Prof., Dept. of Soil Science, Bahonar University, Kerman

Received: 02/15/2014; Accepted: 11/30/2014

Abstract

Background and Objectives: Knowledge about soil spatial variation in terms of measured pedodiversity offers the possibility to estimate the quality and variance within a soil map. Diversity indices and abundance distribution models are statistical tools, which ecologists have applied for decades for analyzing the intrinsic regularities of various ecological entities. In this study, relationships among soils evolution, landscape and geomorphic surface and pedodiversity index and pedodiversity index–area relationships were investigated in a part of Bam district in Kerman province.

Materials and Methods: The studied area is located in the south-east of Iran, between 58°4'17" to 58°28'8" E longitudes and 28°52'51" to 29°9'29" N latitudes. The major landscapes included alluvial fans, coalescing alluvial fans (bajada), playa, mountain and hills. The soil moisture and temperature regimes of this area, according to Soil Survey Staff (2010), were Aridic and Hyperthermic, respectively. Pedodiversity index was computed at different taxonomy hierarchical levels (from order to family in Soil Taxonomy classification) and geomorphic hierarchical levels (landscape, landform, lithology and geomorphic surface) using appropriate indices including abundance, the Shannon diversity and O' Neill indexes.

Results: The soils in the study area were classified according to Soil Survey Staff (2010), in two soil orders of Entisols and Aridisols and eight great groups including: Calcigypsid, Haplosalids, Torriorthents, Haplocambids, Haplogypsid, Haplocalcids, Calciargids and Petrocalcids. The results of study indicated that diversity indices such as Shannon and O'Neill indices of the level of classification hierarchy increased because species richness has increased dramatically. Also diversity and richness indices with time from the old bajada to the younger bajada increased. That indicated the age of geomorphic surfaces affected soil development and soil diversity in the study area increased. Results also showed that pedorichness increases with the area of geomorphic surfaces. A logarithmic function gave a good fit for sample areas

Conclusion: The results of this study showed that all the processes involved in the evolution of landforms, affected soils development directly or indirectly. Study of soils in different landforms indicated that soil formation and their properties are affected by geomorphic position. The results of diversity indices showed the level of classification and geomorphic hierarchy increased. Our results showed that increasing entropy versus time indicates the realm of divergent pathway of pedogenesis in studied region. Increase soil diversity and richness based on geomorphic and classification hierarchy confirmed that the studied soils had a nonlinear dynamic system.

Keywords: Pedodiversity, Landscape, Soil development, Geomorphic surfaces

* Corresponding Authors; Email: ayoubi@cc.iut.ac.ir