

Study of relationship between soil diversity indices and soil-landscape evolution in Juneqan plain, Chaharmahal-Va-Bakhtiari province

N. Asgari Hafshejani¹ and Sh. Ayoubi^{2*}

1. Ph.D. Student, Department. of Soil Science, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
2. Professor, Department. of Soil Science, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

Received: 26 September 2019

Accepted: 18 January 2020

Abstract

Introduction Addressing the effect of soil diversity on landscape, as a set of different land units with different spatial distribution, shape, and arrangement that are affected by natural phenomena and human activities, is essential for optimal use, proper management and conservation of this valuable resource. Soil diversity is a criterion for quantifying soil variability that deals with changes in soil properties or classes and understanding the structure of these changes in the area. Soils evolve continuously under the interactive effects of propulsion and backward pathways, factors, processes, and endogenous and exogenous conditions. In other words, the development of soils is a function of divergent pedogenic pathways (increasing soil evolution followed by increasing soil diversity) and converging (increasing soil evolution followed by increasing soil uniformity). In the present study, we investigate the relationships between soil-landscape evolution in a hierarchical sequence of different soil classification and geomorphic levels using diversity indices in some parts of Juneqan plain, Chaharmahal va Bakhtiari province, as an example of semi-arid regions.

Materials and Methods The study area, which is approximately 16000 hectares, is located in the Juneqan plain, Chaharmahal va Bakhtiari province, Iran, between the coordinates of 50° 33' and 50°44'E longitude and 32° 5' and 32°16'N latitude. Based on the US Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2014), the study area has a Mesic soil temperature regime and the soil moisture regime is mainly Xeric and partially Aquic. A total of 102 soil profiles were dug, described and classified up to the great group level according to US Soil Taxonomy system, and soil samples were collected from various genetic horizons. Mountains, hills, piedmonts and low lands were the main detected landscapes in the study area. In order to investigate the soil evolution and the spatial structure of landscape changes, pedodiversity indices were calculated at different taxonomy hierarchical levels (from order to great group in Soil Taxonomy classification) and geomorphic hierarchical levels (landscape, landform, lithology and geomorphic surface) using appropriate indices such as the Shannon diversity index, richness index, Margalef Index, Menhinick Index and O'Neill index.

Results and Discussion The soils in the studied area were classified in three main soil orders including Entisols, Inceptisols and Mollisols. The results demonstrated that soil evolution in the studied area was influenced mainly by topography and parent material and locally by the underground water level. In the higher lands (like mountains and hills), the lowest evolution was observed, whereas more evolved soils were observed in lower lands with more stable conditions. The results also indicated that all pedodiversity indices showed a nearly similar trend and increased as the taxonomy and geomorphic hierarchy levels decreased in a way that the minimum diversity was related to order and landscape levels and the maximum diversity was observed in



soil great group and geomorphic surfaces levels. Besides, there was a positive linear relationship between species richness index and area of landform units. In other words, as the area of landform units increases, the diversity and, consequently, the richness index increases. The results also show a positive and nonlinear relationship between number of observations and Shannon entropy index and species richness index.

Conclusion The results indicated that soil evolution and its properties are affected by some soil formation factors including parent material and topography. In conclusion, it seems that diversity indices are powerful tools in quantitative demonstrating of soil diversity and providing useful information for soil mapping and optimum soil management purposes. In this study, various soil differentiation indices were calculated and reported for the level of classification hierarchy as well as geomorphic hierarchy. The results showed that by decreasing the level of hierarchy the dispersion indices increased. This upward trend indicates that soil evolution is divergent in this region and as the soil evolves, its dispersal increases. Our findings also showed that by increasing the area of earthquake surfaces both species richness index and Shannon entropy index increased. Moreover, a positive and non-linear relationship was observed between both Shannon entropy indices and species richness indices. Increasing soil richness and dispersion index in geomorphic hierarchy and soil classification as well as increasing richness and Shannon indexes with increasing extent of earthquake surfaces indicate that the soils studied are a nonlinear dynamic system..

Keywords: *Diversity index, Landscape, Landform, Geomorphology map, Topography*

مطالعه ارتباط شاخص‌های تفرق و تکامل خاک-زمین‌نما در دشت جونقان استان چهارمحال و بختیاری

نجمه عسگری هفشجانی^۱ و شمس‌الله ایوبی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران

۲- استاد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران

تاریخچه مقاله	چکیده
دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۰۴ پذیرش نهایی: ۱۳۹۸/۱۰/۲۸	پرداختن به مفهوم تنوع خاک در گستره زمین‌نما به عنوان مجموعه‌ای از واحدهای اراضی متفاوت با توزیع مکانی، شکل و آرایش مختلف که متأثر از پدیده‌های طبیعی و فعالیت‌های انسانی هستند، برای استفاده بهینه، مدیریت مناسب و حفاظت از این منبع با ارزش، ضروری به نظر می‌رسد. در مطالعه حاضر، بررسی روابط بین تکامل خاک-زمین‌نما در یک توالی سلسله مراتبی از سطوح مختلف رده‌بندی خاک‌ها و سطوح ژئومورفیک مختلف با استفاده از شاخص‌های تنوع در بخشی از اراضی دشت جونقان، استان چهارمحال و بختیاری، به عنوان نمونه‌ای از مناطق نیمه‌خشک کشور مورد مطالعه قرار گرفت. در این منطقه سه رده انتی‌سولز، اینسپتی‌سولز و مالی‌سولز به عنوان رده‌های غالب خاک شناسایی شدند. طبق نتایج به دست آمده مهم‌ترین عوامل موثر بر تکامل خاک‌ها در منطقه، پستی و بلندی، مواد مادری و به صورت موضعی سطح بالای آب زیر زمینی بوده است. همچنین روند تغییرات شاخص‌های تفرق در سلسله مراتب ژئومورفیک نشان داد که با کاهش سطح سلسله مراتب این شاخص‌ها سیر افزایشی داشته‌اند. نتایج همچنین نشان داد تفرق خاک نیز در منطقه مطالعاتی، با کاهش سطح سلسله مراتب رده‌بندی در سیستم USDA افزایش یافته است. اطلاعات به دست آمده از این پژوهش را می‌توان در شناسایی و تفکیک انواع کلاس‌ها و نقشه‌برداری خاک به کار برد و چنین انتظار می‌رود که با افزایش تنوع در سطوح سلسله مراتب طبقه‌بندی، از خلوص نقشه‌های تهیه شده کاسته شود.
کلمات کلیدی: شاخص تنوع، زمین‌نما، لندفرم، نقشه ژئومورفولوژی، پستی و بلندی	
* عهده دار مکاتبات Email: ayoubi@cc.iut.ac.ir	

مقدمه

تغییرات مکانی خاک‌ها مدت‌هاست که به عنوان یک مسئله حیاتی برای درک الگوهای بوم‌شناختی (اکولوژیکی) شناخته شده است. خاک به عنوان یکی از اصلی‌ترین زیستگاه‌های طبیعی، متشکل از اجزای

ناهمگونی است که منعکس‌کننده‌ی تاثیر بسیاری از فاکتورهای محیطی است. بنابراین، با توجه به اینکه تنوع خاک عمدتاً به عنوان یک ویژگی از یک جامعه‌ی طبیعی سازمان یافته محسوب می‌شود که طی فرایندهای تکامل اکولوژیکی، ایجاد می‌شود [۲۴]، پرداختن به

رویکرد مربوط به استفاده از شاخص‌های کاربردی در بیولوژی برای ارزیابی تنوع گونه‌های مختلف موجودات زنده است. ایباز و همکاران (۱۹۹۵) برای اولین بار از شاخص‌های تنوع اکولوژیکی همچون شاخص‌های غنا^۹، یکسانی^{۱۰} و تنوع^{۱۱} برای ارزیابی تنوع خاک استفاده نمودند [۹].

شاخص غنا، به تعداد پدیده‌ها و یا اجزای موجود مانند تعداد کلاس‌های خاک در یک سطح مشخص از سیستم رده‌بندی خاک در منطقه‌ی مطالعاتی اطلاق می‌شود. شاخص یکسانی (به عنوان یکی از شاخص‌های فراوانی نسبی)، نشانگر فراوانی نسبی هر کدام از اجزای موجود مانند مساحت نسبی اشغال شده توسط هر طبقه‌ی خاک است. شاخص تفرق، شاخصی است که هر دو شاخص غنا و گونه‌ها و یکسانی را در بر گرفته است و بنابراین بزرگتر بودن این دو شاخص منجر به تفرق بیشتر خواهد شد [۸، ۹]. شاخص آنتروپی شانن از رایج‌ترین شاخص‌های فراوانی نسبی است که در اکولوژی به منظور ارزیابی عدم یکنواختی ساختار یک جامعه استفاده می‌شود [۲۲].

مطابق با نتایج سالدانا و ایباز^{۱۲} (۲۰۰۴) با افزایش سطح طبقه‌بندی خاک، تفرق خاک بیش‌تر می‌شود [۲۱]. همچنین تومانیان و همکاران (۲۰۰۶) با هدف مطالعه تنوع و پیدایش خاک در دره زاینده‌رود در استان اصفهان با استفاده از شاخص‌های تنوع نشان دادند که با تفصیلی‌تر شدن سطح مطالعات از سطح زمین‌نما به سمت سطوح ژئومورفیک، شاخص آنتروپی شانن افزایش یافته است [۲۴].

اسفندیارپور و همکاران^{۱۳} (۱۳۸۸)، به تعیین میزان اعتبار تعمیم‌پذیری نتایج حاصل از نقشه‌برداری خاک به روش ژئوپدولوژی برای اشکال اراضی مشابه در منطقه‌ی

مفهوم تنوع خاک در گستره زمین‌نما برای استفاده بهینه، مدیریت مناسب و حفاظت از این منبع با ارزش، ضروری به نظر می‌رسد.

بر اساس ایباز و همکاران^۱ (۱۹۹۵)، هنگام ارزیابی ارزش‌های زیست‌محیطی زمین‌نما و همچنین معرفی و توصیف تنوع لندفرم‌ها، زمین‌شناسی و خاک‌ها به عنوان منابع طبیعی غیر قابل تجدید باید در نظر گرفته شود. که تاکید بر لزوم گسترش فرضیات قابل اجرا برای توضیح، کمی کردن و مدل‌سازی این الگوهای تغییرات زمانی-مکانی زمین‌نما می‌باشد [۹].

تنوع خاک^۲، معیاری برای کمی کردن تغییرپذیری خاک‌ها است که به تغییرات ویژگی‌ها و یا کلاس‌های خاک و درک ساختار این تغییرات در منطقه مورد نظر می‌پردازد [۱۳]. خاک‌ها به طور پیوسته تحت تاثیر اثرات متقابل مسیرهای خاکسازي پیش‌برنده^۳ و پس‌برنده^۴، فاکتورها، فرآیندها و شرایط درون‌زا^۵ و برون‌زا^۶ تکامل می‌یابند. به عبارتی، توسعه خاک‌ها تابعی از مسیرهای خاکساز و اگر^۷ (افزایش تکامل خاک و به دنبال آن افزایش تنوع خاک‌ها) و همگرا^۸ (افزایش تکامل خاک و به دنبال آن افزایش یکنواختی خاک‌ها) می‌باشد [۹].

تخمین کمی تنوع خاک تاریخچه‌ای طولانی داشته و شاخص‌های متعددی در این راستا استفاده شده‌اند. در چند دهه اخیر، استفاده از شاخص‌های تنوع زیستی، با هدف انجام مطالعات تنوع خاک، مورد توجه قرار گرفته است. تاکنون شاخص‌های بسیاری برای اندازه‌گیری تنوع خاک پیشنهاد شده‌اند؛ با این وجود، شاخص‌های فراوانی نسبی استفاده‌های گسترده‌تری داشته‌اند. این شاخص‌ها از دو جزء غنا و فراوانی نسبی گونه تشکیل شده‌اند. با این حال، قطعا پرتعدادترین

1- Ibanez *et al.*

2- Pedodiversity

3- Progressive pedogenic pathways

4- Regressive pedogenic pathways

5- Endogenic

6- Exogenic

7- Divergent

8- Convergent

9- Richness

10- Evenness

11- Diversity

12- Saldana and Ibanez

13- Esfandiarpour *et al.*

جعفری و همکاران^۳ (۲۰۱۳)، در منطقه زرنند استان کرمان و زراعت پیشه و همکاران^۴ (۲۰۱۷)، در منطقه بروجن استان چهارمحال و بختیاری، نیز افزایش شاخص‌های تفرق از سطح رده به سمت تحت گروه را گزارش نمودند [۲۶، ۱۰].

با توجه به لزوم مطالعه پویایی خاک-زمین‌نما برای شناخت هر چه بیشتر پیشینه تکاملی، نحوه پراکنش و تنوع خاک‌ها و همچنین نظر به عدم توجه کافی به این مبحث مهم در مناطق خشک و نیمه‌خشک که عمدتاً تکامل خاک آن‌ها متأثر از عوامل پستی و بلندی و مواد مادری می‌باشد، لذا در این پژوهش، به بررسی تنوع خاک و تکامل خاک-زمین‌نما با استفاده از شاخص‌های تفرق در یک توالی سلسله مراتبی از سطوح رده‌بندی خاک و واحدهای زمین‌ریخت در بخشی از اراضی منطقه نیمه‌خشک دشت جونقان، استان چهارمحال و بختیاری پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

مشخصات عمومی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه بخشی از دشت جونقان در جنوب غربی ایران و در مرکز شهرستان فارس، واقع در استان چهارمحال و بختیاری با مساحتی بالغ بر ۱۶۰ کیلومتر مربع (۱۶۰۰۰ هکتار)، در فاصله ۴۲ کیلومتری از مرکز استان، بین عرض جغرافیایی ۵۱° ۳۲' تا ۱۶° ۳۲' درجه شمالی و طول جغرافیایی ۳۳° ۵۰' تا ۴۴° ۵۰' درجه شرقی با ارتفاع متوسط ۲۰۰۰ متر از سطح دریا قرار گرفته است (شکل ۱).

متوسط بارش سالانه منطقه بر اساس منحنی‌های هم‌بارش، حدود ۳۲۰ میلی‌متر در سال و میانگین دمای سالانه بر اساس منحنی‌های هم‌دما، ۱۱ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. این منطقه دارای رژیم رطوبتی زیریک و در برخی مناطق اکوئیک و رژیم حرارتی مزیک است.

بروجن استان چهارمحال و بختیاری با استفاده از شاخص‌های تفرق و شباهت در یک توالی سلسله مراتبی از سطوح رده‌بندی خاک پرداختند. ایشان گزارش نمودند که شاخص آنتوپی شانن از سطح رده به سمت فامیل خاک افزایش یافته و تنها در سطح فامیل خاک بین میانگین تفرق خاک‌های منطقه نمونه و تعمیم تفاوت آماری معنی‌داری مشاهده شد [۶].

عباس‌زاده افشار و همکاران^۱ (۱۳۹۴)، به 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، پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که تشکیل خاک و ویژگی‌های آن‌ها تحت تأثیر موقعیت ژئومرفیکی آن‌ها هستند. نتایج همچنین نشان داد که شاخص‌های تفرق در هر دو سطح سلسله مراتب طبقه‌بندی و ژئومرفیک با کاهش سطح سلسله مراتب افزایش پیدا کرده است. افزایش شاخص‌های تفرق در خاک و زمین‌نما در طول زمان، نشان دهنده واگرا بودن تکامل خاک است، به این معنی که با افزایش تکامل خاک، تفرق آن افزایش یافته است [۱].

کشتکار و همکاران^۲ (۱۳۹۷)، روند تفرق خاک بر اساس سلسله مراتب طبقه‌بندی از رده تا فامیل خاک را با استفاده از شانن، یکنواختی، شاخص‌های غنا و سیمپسون محاسبه نمودند. بر اساس نتایج بدست آمده، شاخص‌های تنوع خاک از سطح رده به فامیل خاک روند افزایشی نشان داده و بیش‌ترین مقدار تفرق شانن مربوط به سطح فامیل خاک بوده است. طبق نظر نویسندگان، افزایش شاخص تفرق شانن به دلیل افزایش توام شاخص تفرق غنا و یکنواختی از رده به فامیل خاک بوده است [۱۱].

3- Jafari et al.

4- Zeraatpisheh et al.

1- Abbaszadeh Afshar et al.

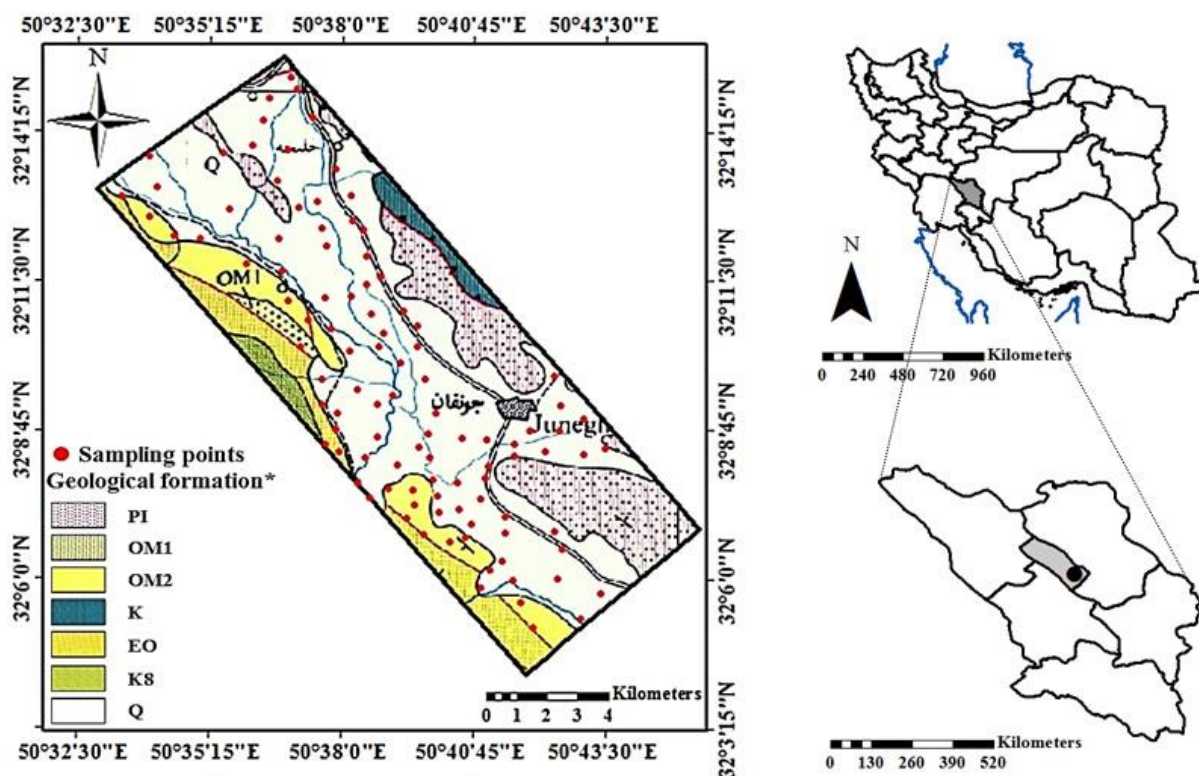
2- Keshtkar et al.

عسگری هفشجانی و همکاری: مطالعه ارتباط شاخص‌های تفرق و تکامل خاک...

شامل طبقات کنگلومرای بختیاری و در نواحی دیگر طبقات رسی دوران چهارم زمین‌شناسی می‌باشد. بر اساس اطلاعات زمین‌شناسی و مطابق نقشه هم‌ضخامت آبرفت، میزان ضخامت آبرفت در این دشت بین ۵ تا حدود ۷۰ متر متغیر است. جهت جریان در آبخوان دشت از شمال‌غرب به طرف جنوب‌شرق دشت است [۲]. در بررسی‌های اولیه صورت گرفته در منطقه سه رده خاک انتی‌سولز، اینسپتی‌سولز و مالی‌سولز شناسایی شد. همچنین کوه، تپه، پیدمنت (دامنه) و اراضی پست زمین‌نماهای اصلی این منطقه را شامل شد.

بیشترین سطح زیر کشت این منطقه را محصولات زراعی گندم، جو، ذرت، شبدر و یونجه و محصول باغی انگور به خود اختصاص می‌دهند.

از نظر ساختاری منطقه مورد مطالعه در حد فاصل زون‌های سندج-سیرجان در غرب و زون زاگرس مرتفع در شرق گسل اصلی زاگرس واقع شده است. از نظر زمین‌شناسی در محدوده مورد مطالعه قدیمی‌ترین واحدهای چینه‌شناسی مربوط به کرتاسه می‌باشد. آبخوان دشت از اطراف توسط تشکیلات آهکی و کنگلومرای احاطه شده است. سنگ کف در نواحی اطراف دشت



شکل (۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان چهارمحال و بختیاری و نقشه زمین‌شناسی منطقه به همراه نقاط نمونه‌برداری
 Figure (1) Location of the studied area in Chaharmahal va Bakhtiari province and geological map of the region along with sampling points

جدول (۱) شرح سازندهای زمین‌شناسی در منطقه مورد مطالعه
 Table (1) Description of lithological formations in the studied area

سازندهای زمین‌شناسی Lithological formations	راهنا Legend
آبرفت‌های جدید Recent alluvium	Q
کنگلومرای سخت و ماسه‌سنگ (سازند بختیاری) Hard Conglomerate, sandstone and greystone (Eq. Bakhtiari Formation)	PI
کنگلومر، مارن و شیل با میان لایه‌های سنگ آهک Conglomerates, marl and shale with intercalations of limestone	OM1
سنگ آهک مارنی فسیلی با میان لایه‌های سنگ آهک مارنی-شنی (بخش فوقانی سازند آسماری) Fossil marly limestone with intercalations marl-sandy limestone (upper part of Asmari Formation)	OM2
سنگ آهک حاوی اوربیتولین تبخیری در بخش‌های تحتانی Mainly Orbitolina limestone, locally evaporitic in the lower part	K
شیل و مارن با میان لایه‌های سنگ آهک مارنی حاوی آمونیت و Inoceramuses Shale and marls, interbedded with marly limestones containing Ammonites and Inoceramuses	K8
سنگ آهک سفید، سنگ آهک مارنی و سنگ آهک دولومیتی (سازند شهبازی، جهرم و آسماری) White nummulitic limestone, marly limestone and dolomitic limestone (Eq: Shahbazan, Jahrum and Asmari Formation)	EO

تهیه و تفسیر نقشه ژئومورفولوژی منطقه

در مرحله بعد، عکس‌های هوایی و روکش مربوطه اسکن و به محیط نرم‌افزار ArcGIS وارد شد. در گام بعدی، عکس‌ها و روکش‌های وارد شده به سامانه جغرافیایی، زمین‌مرجع^۴ شده و به این ترتیب با رقومی کردن مرزهای ترسیم شده بر روکش عکس‌ها نقشه ژئومورفولوژی تهیه شد.

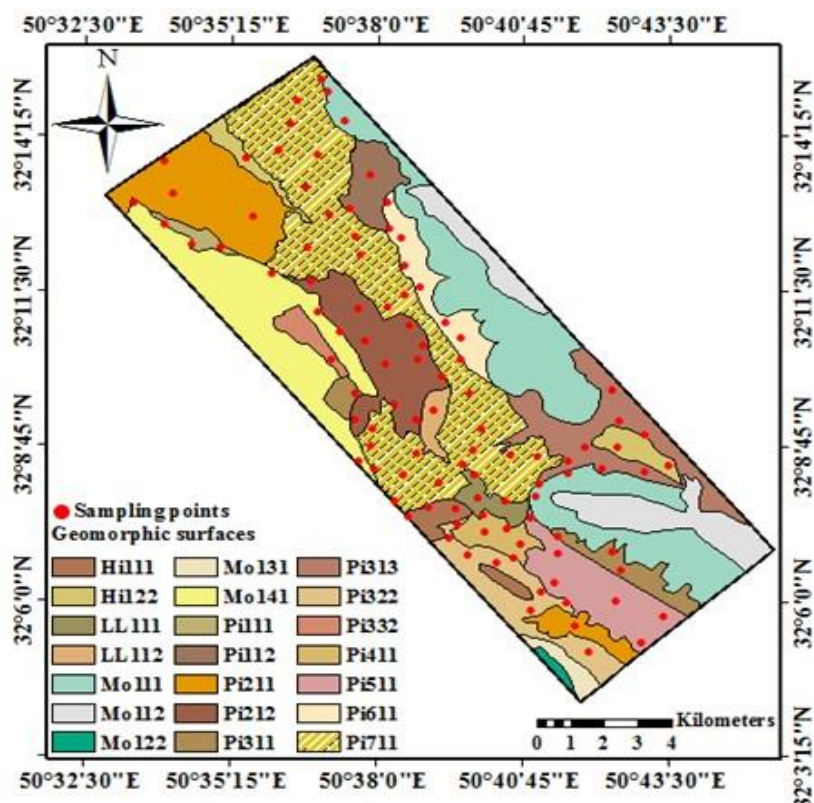
پس از مرحله تفکیک و ترسیم مرز واحدهای ژئومورفیک، طی بازدیدهای صحرائی در منطقه مورد مطالعه، در صورت لزوم مرز واحدها اصلاح شد. در نهایت بر اساس تفسیر عکس‌های هوایی و بازدیدهای صحرائی، در بالاترین سطح واحدهای زمین‌نما از جمله کوه، تپه، پیدمنت و اراضی پست و در پایین‌ترین سطح سلسله مراتبی ۲۱ واحد ژئومورفیک تشخیص داده و تفکیک شد. شکل ۲ نقشه ژئومورفولوژی منطقه را نشان داده و جدول ۲ راهنمای این نقشه و شرح کاملی از واحدهای تفکیک شده است.

بر روی عکس‌های هوایی ۱:۵۵۰۰۰ منطقه، روکش طلق‌مانندی کشیده شد تا مرز سطوح ژئومورفیک روی آن‌ها ترسیم شود. برای تفکیک واحدهای اراضی از سیستم استریوسکوپ و همچنین از نقشه‌های زمین‌شناسی و توپوگرافی و تصویر Google Earth موجود [۷] و در تفکیک و ترسیم مرز واحدها از اطلاعات ژئومورفولوژی و سلسله مراتبی که توسط مؤمنی و زینک معرفی شده است، استفاده شد [۱۵]. بر این اساس، واحدهای ژئومورفولوژی موجود در منطقه در چهار سطح سلسله مراتبی زمین‌نما، زمین‌ریخت^۱، سنگ‌شناسی^۲ و سطوح ژئومورفیک^۳ طبقه‌بندی شد. به منظور جداسازی و تفکیک سطح سوم (سنگ‌شناسی) و همچنین سطح چهارم (سطوح ژئومورفیک) نقشه زمین‌شناسی منطقه استفاده شد. شکل ۱ و جدول ۱ نقشه زمین‌شناسی منطقه و توصیف سازندهای موجود در منطقه را نشان می‌دهند.

4- Georeference

1- Landform
 2- Lithology
 3- Geomorphic surface

عسگری هفشجانی و همکاری: مطالعه ارتباط شاخص‌های تفرق و تکامل خاک...



شکل (۲) نقشه ژئومورفولوژی، سطوح ژئومرفیک و موقعیت نقاط نمونه برداری در منطقه مورد مطالعه.

Figure (2) Geomorphology map, geomorphic surfaces and location of sampling points in the studied area

صورت تصادفی صورت گرفت. از لایه‌های ژنتیکی تمامی پروفیل‌های مشخص شده، نمونه برداری صورت گرفته (عموماً تا عمق ۱۰۰ تا ۱۵۰ سانتی متری) و برای تجزیه به آزمایشگاه منتقل شد. برای هر یک از این نقاط، اطلاعاتی نظیر محل نمونه برداری در زمین‌نما، نوع کاربری، وضعیت زهکشی و اطلاعاتی از قبیل میزان سنگریزه سطحی یادداشت برداری شد. پس از هواخشک کردن، کوبیدن و عبور دادن هر یک از نمونه‌ها از الک ۲ میلی متری، مقدار برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌ها از جمله: pH، درصد سنگریزه، هدایت الکتریکی ظاهری، ماده آلی، بافت خاک، کربنات کلسیم معادل و پذیرفتاری مغناطیسی با استفاده از روش‌های معمول اندازه‌گیری آزمایشگاهی تعیین شد. در نهایت بر اساس سیستم طبقه‌بندی آمریکا [۲۳]، طبقه‌بندی خاک‌ها تا سطح گروه بزرگ انجام شد.

نمونه برداری میدانی

به منظور پوشش دادن کلیه عوامل تغییر دهنده ویژگی‌های خاک در منطقه مورد مطالعه و فرآیندهای داخلی خاک‌ها، نقاط نمونه برداری به گونه‌ای تعیین شد که با تغییرات ویژگی‌های خاک و همچنین با اهداف، مقیاس و فرضیات اولیه این مطالعه متناسب بوده و نشان دهنده کل دامنه و تغییرات جامعه مورد مطالعه باشد. مکان هندسی ۱۰۲ نقطه حفر پروفیل بر اساس روش تصادفی نظارت شده^۱ مشخص و با استفاده از GPS، مکان دقیق این نقاط در منطقه تعیین شد. به این منظور، اطلاعات زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، پستی و بلندی و پوشش گیاهی منطقه در نظر گرفته شد. به طوری که لایه نمونه برداری^۲ بر اساس تفاوت در واحدهای ژئومورفیک، تشکیلات زمین‌شناسی، توپوگرافی و پوشش گیاهی تعیین شده و متناسب با مساحت هر لایه، نمونه برداری به

1- Stratified random sampling

2- Sampling strata

جدول (۲) شرح سطوح ژئومورفیک در منطقه مورد مطالعه.

Table (1) Description of geomorphic surfaces in the studied area

زمین نما Landscape	لندفرم Landform	زمین شناسی Lithology	سطح ژئومورفیک Geomorphic surface	راه‌نما Legend	
تپه Hill	تپه‌های فرسایش یافته	OM2	تپه منفرد با ارتفاع زیاد High elevation, single hill	Hi111	
	Eroded hills	PI	تپه منفرد و کم ارتفاع Low elevation, single hill	Hi122	
اراضی پست Low lands	لاگون Lagoon	Q	لاگون فصلی کشت شده cultivated seasonal lagoon	LL111	
		Q	زهکشی ضعیف، باغ Poor drainage, garden	LL112	
کوه Mountain	رخمون سنگی Rock outcrop	PI	سطوح سنگی فرسایش یافته Eroded rock outcrops	Mo111	
		PI	سطوح سنگی Rock outcrops	Mo112	
		EO	سطوح سنگی Rock outcrops	Mo122	
		OM2	سطوح سنگی Rock outcrops	Mo132	
		OM1	سطوح سنگی فرسایش یافته Eroded rock outcrops	Mo141	
پدیمت Piedmont	مخروط افکنه Alluvial fan	Q	قسمت بالایی، شیب زیاد Upper section, high slope	Pi111	
		Q	قسمت پایینی، شیب زیاد، کشت شده Upper section, high slope, cultivated	Pi112	
	دشت رودخانه‌ای River plain	Q	زهکشی ضعیف، باغ Garden, low drainage	Pi211	
		Q	زهکشی ضعیف، کشت شده Low drainage, cultivated	Pi212	
	پدیمت Piedmont	پدیمت Pediment	Q	شیب زیاد، کشت شده High slope, cultivated	Pi311
			Q	شیب کم، کشت شده Low slope, cultivated	Pi313
			OM2	شیب زیاد High slope	Pi322
			OM1	شیب زیاد High slope	Pi332
			Q	شیب کم، کشت شده Low slope, cultivated	Pi411
			Q	کشت شده Cultivated	Pi511
دشت دامنه‌ای Piedmont plain	دشت آبرفتی Alluvial plain	Q	فن فعال Active fan	Pi611	
		Q	کشت شده Cultivated	Pi711	

محاسبه شاخص‌های تنوع خاک

به منظور مطالعه تکامل خاک‌ها و بررسی ساختار مکانی تغییرات زمین‌نما از شاخص‌های تفرق مشتمل بر شاخص آنتروپی شانن، غنای گونه‌ها، یکسانی، شاخص اونیل^۱، شاخص مارگالف^۲ و شاخص منهینیک^۳ استفاده شد.

یکی از رایج‌ترین شاخص‌های فراوانی نسبی، شاخص آنتروپی شانن (H') است. شاخص آنتروپی شانن برای آنالیز تکامل خاک‌ها و تحلیل ساختار مکانی تغییرات زمین‌نما به کار می‌رود. در محاسبه‌ی شاخص تنوع لندفرم، اجزای جامعه از مقیاس زمین‌نما تا سطح ژئومورفیک قابل تغییر و محاسبه است. معادله شاخص شانن به شکل زیر تعریف می‌شود [۱۸]:

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

که در این معادله، H' نشان‌دهنده‌ی آنتروپی یا تنوع جامعه و p_i نسبت افراد جامعه در واحد i -ام می‌باشد. مقدار این شاخص به طور معمول منحصر به توزیع نسبی خاک‌ها بستگی دارد. اگر احتمال (فراوانی نسبی) همه اجزا یکسان باشد (برابر با $\ln S$) این شاخص حداکثر و در صورتی که تنها یک احتمال موجود باشد (برای مثال یک نوع خاک در کل منطقه، تنوع ۰) این شاخص صفر خواهد بود.

فراوانی نسبی اجزا از رایج‌ترین روش‌های تخمین تنوع محسوب می‌شود. از این نقطه نظر تنوع را می‌توان به دو عنصر تقسیم نمود: اولین عنصر مربوط به غنای جز یا گونه است که به تعداد گونه‌های موجود (برای مثال تعداد انواع مختلف خاک تحت یک کلاس‌بندی مشخص) اشاره دارد. دومین عنصر یکسانی است که به فراوانی نسبی هر گونه اشاره دارد (مانند مساحت نسبی اشغال شده توسط هر نوع خاک). هنگامی که تمام اجزای جامعه دارای احتمالی برابر باشد یا H_{max}

$$H' = H_{max} = \ln S \quad (2)$$

شاخص غنا (S) برای محاسبه شاخص یکسانی (E) که نشانگر فراوانی نسبی هر کدام از پدیده‌های موجود است، استفاده می‌شود:

$$E = H'/H_{max} = H'/\ln S \quad (3)$$

که در این معادله S غنای گونه‌ها و یا تعداد اجزا در هر طبقه و یا واحد نقشه را نشان می‌دهد. برای مثال، فامیل و یا توالی افق‌های خاک در یک اکوسیستم یا محدوده‌ی تعریف شده، به عنوان غنای گونه‌های آن در نظر گرفته می‌شود. از دیگر شاخص‌های فراوانی نسبی می‌توان به شاخص اونیل اشاره کرد که با در نظر گرفتن حداکثر آنتروپی، برای بررسی انحراف از شاخص شانن به شرح زیر محاسبه می‌شود [۱۷]:

$$D = \ln(S) + \sum_{i=1}^f p_i * \ln(p_i) \quad (4)$$

که در این رابطه، S غنای گونه در هر واحد و p_i پارامتر مورد استفاده در محاسبه شاخص شانن است. دو شاخص مارگالف [۱۲] (D_{mg}) و منهینیک [۲۵] (D_{mn}) نیز با در نظر گرفتن تعداد گونه و مجموع تمام گونه‌ها برای محاسبه تنوع خاک استفاده می‌شوند:

$$D_{mg} = \frac{(S-1)}{\ln N} \quad (5)$$

$$D_{mn} = \frac{S}{\sqrt{N}} \quad (6)$$

که در روابط فوق، S تعداد گونه و N تعداد کل گونه است. مقادیر این دو شاخص از صفر تا بینهایت متغیر است.

نتایج و بحث

تکامل خاک-زمین‌نما

در منطقه مورد بررسی بر اساس موقعیت جغرافیایی، زمین‌شناسی، توپوگرافی و شکل سطح زمین چهار واحد زمین‌نما شامل کوه، تپه، پیدمنت و اراضی پست تشخیص داده شد. همچنین زمین‌ریخت‌های شناسایی شده شامل رخنمون سنگی^۴، تپه‌های فرسایش یافته^۵، لاگون^۱، مخروط

4- Rock outcrop
5- Eroded hills

1- O'Neill Index
2- Margalef Index
3- Menhinick Index

پروفیل‌های مورد مشاهده در گروه بزرگ Xerorthents و Haploxerepts و در قسمت‌های پایدارتر آن‌ها گروه بزرگ Calcixerepts مشاهده شد.

به طور کلی در دو واحد زمین‌نمای کوه و تپه فرآیندهای فرسایشی به صورت فعال، غالب بوده و سطوح جدید هوادیده شده با گذشت زمان به نقاط پایین دست با سطوح پایدارتر منتقل می‌شود. این در حالی است که در واحدهای زمین‌نمای پیدمنت و اراضی خیس که در مناطق با شیب‌های به مراتب کمتر قرار گرفته و به طور نسبی پایدارترند فرآیند رسوبگذاری غالب بوده و مواد هوادیده شده و فرسایش یافته از مناطق بالادست به مرور زمان با توجه به توزیع اندازه‌ای ذرات رسوب نموده و حوضچه‌های رسوبی را تشکیل می‌دهند. همچنین از واحد کوه به سمت اراضی پست عمق خاک افزایش یافته که این افزایش می‌تواند مربوط به انتقال مواد فرسایش یافته از نواحی بالادست و همچنین افزایش هوادیدگی خاک به دلیل بهبود تامین آب، فعال تر شدن فرآیندهای انتقال ذرات و املاح و در نتیجه تشکیل خاک‌های متکامل تر باشد.

واحد زمین‌نمای پیدمنت در مجموع بیش از ۵۰ درصد منطقه را به خود اختصاص داده و شامل واحدهای متنوع زمین‌ریخت بوده و بنابراین دامنه وسیعی از گروه بزرگ‌های خاک از جمله Xerorthents، Calcixerepts، Haploxerepts، Endoaquepts و Haploxerolls و Endoaquolls را شامل شده است.

زمین‌ریخت مخروط افکنه (Pi1) با شیب نسبتاً زیاد در قسمت‌های فوقانی حاوی درصد سنگریزه زیادی بوده و خاک آن از تکامل تقریباً کمی برخوردار بوده و در کلاس Xerorthents و Haploxerepts و در مناطق پایدارتر در گروه بزرگ Calcixerepts قرار گرفتند. این خاک‌ها شرایط زهکشی مطلوبی داشته و شرایط آب‌گرفتگی در این خاک‌ها وجود ندارد و مناطق با شیب کمتر در این زمین‌ریخت به زیر کشت رفته‌اند. به طور کلی به نظر می‌رسد مهم‌ترین فرآیندهای خاکسازي در این زمین‌ریخت فرآیندهای هوادیدگی فیزیکی و انتقال واریزه‌ای بوده است.

افکنه^۲، دشت رودخانه‌ای^۳ و دامنه‌ای^۴، پدیمنت^۵، تپه‌های گروه ماهی^۶ و باهادا^۷ بوده است.

توصیف آماری میانگین وزنی برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری شده در پروفیل‌های مورد مطالعه (در عمق ۱۰۰-۰ سانتی‌متری) در جدول ۳ ارائه شده است. به طور کلی چنین به نظر می‌رسد که از واحد زمین‌نمای کوه به سمت اراضی پست، میانگین درصد ماده‌ی آلی افزایش یافته است. با توجه به آهکی بودن مواد مادری در غالب منطقه، کربنات کلسیم در واحدهای زمین‌نمای مختلف تغییرات چندانی نشان نداده است.

مقایسه ضریب تغییرات (به عنوان شاخص توزیع پراکنندگی متغیرها) در بین واحدهای زمین‌نما حاکی از آن است که حداکثر ضریب تغییرات در بیشتر ویژگی‌های مورد مطالعه مربوط به واحد اراضی پیدمنت بوده است. احتمالاً دلیل این موضوع تنوع زیاد واحدهای ژئومورفیک و به دنبال آن تنوع بالای کلاس‌های خاک در این زمین‌نما می‌باشد.

با توجه به کوهستانی بودن منطقه مورد مطالعه، بخش زیادی از حواشی دشت را واحدهای زمین‌نمای کوه و تپه به خود اختصاص می‌دهند (بیش از ۳۰٪ منطقه). بر اساس نتایج ناصری (۱۹۸۹)، در مناطق با شیب کم، گسترش و تکامل خاک بیشتر بوده و شرایط مناسب‌تری برای تاثیر طبیعی بارش بر تحول خاک‌ها فراهم است. بر این اساس، به دلیل شیب زیاد در واحد کوه و به تبع آن پایداری کم شرایط خاکسازي، خاک‌ها از تکامل پروفیلی ناچیزی برخوردار هستند [۱۶]. در واحد زمین‌نمای تپه نیز همانند کوه، همچنان به دلیل شیب زیاد، وجود میزان زیاد کربنات کلسیم در مواد مادری و نفوذپذیری و آبشویی کم، خاک‌ها هنوز به مراحل تکامل خود نرسیده‌اند. در این دو واحد زمین‌نما بیشتر

- 1- Lagoon
- 2- Alluvial fan
- 3- River plain
- 4- Piedmont plain
- 5- Pediment
- 6- Dissected plains
- 7- Bajada

زمین‌ریخت پدیمنت و قرار گرفتن در شیب بیشتر در گروه بزرگ Haploxerepts طبقه‌بندی شد.

در زمین‌ریخت‌های تپه‌های گرده ماهی (Pi5) و دشت آبرفتی (Pi7) با کاهش شیب، افزایش دریافت آب‌های سطحی از بالادست، نفوذپذیری بیشتر و در نتیجه پایداری بیشتر عوامل خاکساز منجر به شستشو و انتقال آهک به اعماق بیشتر و بروز علائم تجمع آهک ثانویه در افق‌های زیر سطحی و تشکیل افق کلسیک شده است. بنابراین خاک بیشتر این زمین‌ریخت‌ها در گروه بزرگ Calcixerepts جای گرفتند. به دیگر سخن، مشاهده افق کلسیک تکامل یافته در این زمین‌ریخت‌ها احتمالاً نشان دهنده پایداری و قدیمی بودن آنهاست که بدلیل شیب کم فرصت کافی برای شستشو و انتقال کربنات کلسیم از افق‌های فوقانی و تجمع آن در افق‌های زیرین و تشکیل افق کلسیک را فراهم نموده است. این واحدها عمدتاً زیر کشت محصولات کشاورزی بوده؛ بنابراین شاید انجام این فعالیت‌ها نیز در تسریع تکامل این خاک‌ها نسبت به خاک سایر زمین‌ریخت‌ها موثر بوده است.

میانگین وزنی میزان مواد آلی خاک در واحد اراضی پست به دلیل بیشتر بودن درصد رس خاک و بالا بودن سطح آب زیرزمینی و به دنبال آن ایجاد شرایط احیایی و کاهش تجزیه مواد آلی بیشتر از سایر واحدهای زمین‌نما بوده و پس از آن واحد پدیمنت در جایگاه بعدی قرار می‌گیرد. در واحدهای کوه و تپه احتمالاً به دلیل شیب زیاد و عدم وجود پوشش گیاهی مناسب، تجمع مواد آلی کمتر از سایر واحدها بوده است (جدول ۳). مناطق هموار پایین‌دست نسبت به مناطق مجاور شیب‌دار معمولاً ماده آلی بیشتری دارند زیرا در این مناطق خاک‌ها بافت ریزتری داشته و به دلیل نفوذپذیری بیشتر آب به خاک، رطوبت قابل استفاده نیز بیشتر است و به بنابراین اکسیداسیون مواد آلی به علت خیس بودن خاک و تهویه کمتر در این مناطق کاهش می‌یابد. بنابراین با تجمع مواد آلی در سطح خاک و فراهم بودن شرایط لازم برای تشکیل افق سطحی مالیک، این خاک‌ها به طور عمده در رده مالی‌سولز (گروه بزرگ

فرآیندهای خاکساز یاد شده در زمین‌ریخت مخروط افکنه برای زمین‌ریخت باهادا (Pi6) نیز صادق است با این تفاوت که میزان سنگریزه در این واحد بیشتر بوده و به عنوان یک محدودیت مانع از انجام کشت در این زمین‌ریخت شده است.

زمین‌ریخت دشت رودخانه‌ای (Pi2) که اراضی مسطح اطراف رودخانه را شامل شده است با شیب اندکی که دارد از رسوبات آبرفتی به جای گذاشته از رودخانه تشکیل شده است و یک زمین‌ریخت رسوبی-فرسایشی محسوب می‌شود. خاک این زمین‌ریخت به دلیل قرار گرفتن در مجاورت رودخانه به شدت متاثر از نوسانات سطح آب زیرزمینی بوده و شرایط اکسیداسیون و احیا مهم‌ترین فرآیندهای خاکساز در این واحد است. آبگرفتگی و تناوب دوره‌های اکسیداسیون و احیا در این خاک‌ها با تشکیل افق Bg و همچنین فراهم نمودن شرایط تشکیل افق سطحی مالیک، اکثر قریب به اتفاق خاک‌های این زمین‌ریخت را در گروه بزرگ‌های Endoaquolls و Endoaquepts قرار داده است. این خاک‌ها بدلیل فراهم نمودن میزان آب کافی عرصه‌ی مناسبی برای نهالستان‌ها فراهم نموده‌اند.

زمین‌ریخت پدیمنت (Pi3) با شیب کم و بیش زیاد، سطوح نسبتاً ناپایداری را تشکیل داده و بنابراین بیشتر خاک‌ها در این زمین‌ریخت از تکامل اندکی برخوردار بوده و بنابراین در کلاس Xerorthents قرار می‌گیرند. با این حال در مناطق پایدارتر این زمین‌ریخت با تشکیل افق‌های زیرسطحی کمیک و کلسیک گروه بزرگ‌های Haploxerepts و Calcixerepts نیز مشاهده شد.

در زمین‌ریخت دشت دامنه‌ای (Pi4) با شیب نسبتاً کم‌تر از زمین‌ریخت پدیمنت شرایط برای تشکیل افق کلسیک فراهم بوده و بنابراین از چهار پروفیل حفر شده در این واحد، دو پروفیل در کلاس Calcixerepts قرار گرفتند. همچنین یک پروفیل در مجاورت زمین‌ریخت لاگون به دلیل تاثیر پذیرفتن از نوسانات آب زیرزمینی در کلاس Endoaquepts و یک پروفیل به دلیل نزدیکی به

همچنین نتایج نشان داد که خاک‌های فاقد تکامل و یا با تکامل اندک نظیر انتی سولز و مالی سولز در مناطق ناپایدار با سطوح محدب یا با شیب زیاد ایجاد شده‌اند؛ در حالی که خاک‌های تکامل یافته نظیر مالی سولز عموماً در نقاط پایدار مسطح و یا با شیب کم تشکیل شده‌اند. این نتایج با یافته‌های رحمان و همکاران^۱ (۱۹۹۶) پیرامون ارتباط پستی و بلندی و تکامل خاک همخوانی دارد [۲۰]. همچنین بونیفاسیو و همکاران^۲ (۱۹۹۷) در ارتباط با همبستگی تکامل خاک و موقعیت زمین‌نما، چگونگی تشکیل یک کاتناهی خاک را مطالعه نموده و چهار رده خاک را در آن شناسایی کردند. خاک‌ها در قسمت بالای شیب (قله) و شیب پستی به ترتیب انتی سولز و اینسپتی سولز و در قسمت‌های پای شیب و پنجه شیب نیز به ترتیب آلفی سولز و مالی سولز بودند [۳].

بررسی شاخص‌های تفرق خاک

در جدول ۴ نتایج شاخص‌های تفرق خاک در منطقه مورد مطالعه در سطوح سلسله مراتب ژئومورفیک ارائه شده است. بر اساس این نتایج، با افزایش مقیاس مکانی از زمین‌نما به طرف سطوح ژئومورفیک، شاخص غنا افزایش یافته است. همچنین، شاخص آنتروپی شانن در این توالی روندی افزایشی نشان داد که این افزایش را می‌توان به افزایش همزمان دو شاخص غنا و یکسانی در سلسله مراتب ژئومورفیکی مرتبط دانست. این نتایج با یافته‌های تومانیان و همکاران^۳ (۲۰۰۶)، جعفری و همکاران (۲۰۱۳) و عباس‌زاده افشار و همکاران (۱۳۹۴) همخوانی دارد [۲۴]، ۱۳، ۱]. زراعت‌پیشه و همکاران (۱۳۹۸) نیز در نتایجی مشابه، افزایش شاخص‌های تنوع را با کاهش سطوح طبقات از زمین‌نما به سمت سطوح ژئومورفیک در منطقه بروجن استان چهارمحال و بختیاری گزارش نمودند [۲۷].

Haplixerolls) قرار گرفتند. همچنین در این واحد تجمع و تخلیه اکسیدهای آهن و منگنز همراه با نوسانات سطح آب زیرزمینی در خاک رخ باعث ایجاد ماتلینگ و یا رنگ‌های خاکستری تا تیره در خاک و تشکیل افق Bg شده و بنابراین بخشی از خاک‌های این واحد نیز در گروه بزرگ Endoaquepts طبقه‌بندی شدند. این واحد زمین‌نما بدلیل فراهم نمودن میزان آب کافی عمدتاً زیر کشت برنج است. اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن از ترکیبات بسیار فعال در خاک هستند. این ترکیبات نسبت به تغییر شرایط محیطی خاک حساس بوده و اغلب در طول خاک‌رخ حرکت می‌نمایند. از این رو مقدار اشکال شیمیایی مختلف این ترکیبات و نسبت آن‌ها به عنوان شاخصی در مطالعات تکامل خاک به کار می‌رود. بر اساس تحقیقات صورت گرفته افزایش میزان آهن کل و آهن آزاد نتیجه غیرقابل انکار افزایش سن و تکامل خاک‌هاست. همچنین این تحقیقات نشان داده‌اند که با افزایش سن خاک میزان آهن پدوژنیک (Fed) در سطوح پایدارتر ژئومورفیک افزایش می‌یابد [۵]. طبق نتایج ارائه شده در جدول ۳ چنین به نظر می‌رسد که با حرکت از واحدهای زمین‌نمای کوه و تپه به سمت واحد پدمنت با افزایش پایداری واحدها، میزان آهن پدوژنیک Fed افزایش نشان داده است که بر افزایش تکامل خاک‌های واقع بر این واحد نسبت به واحدهای کوه و تپه تاکید دارد.

از سوی دیگر، از آنجا که مقادیر بالای مواد آلی در خاک امکان احیای آهن بلورین کانی‌ها و تشکیل آهن غیرمتبلور را افزایش می‌دهد، وجود کمترین میزان متوسط آهن پدوژنیک یا آزاد (۰/۵۶) و بیشترین میزان متوسط آهن بی‌شکل (۰/۱۴) در واحد اراضی پست احتمالاً به دلیل فرایندهای اکسیداسیون و احیا و وجود ماده آلی بالا در این خاک‌ها بوده که مانع تبلور آهن غیرمتبلور شده است [۱۹]. به طور کلی می‌توان چنین نتیجه گرفت که پستی و بلندی با تأثیر بر خصوصیات خاک و همچنین شرایط زهکشی به عنوان یک عامل طبیعی، از مهم‌ترین عوامل موثر بر تغییر و تکامل خاک‌ها در این منطقه بوده است.

1- Rahman et al.

2- Bonifacio et al.

3- Toomanian et al.

عسگری هفشجانی و همکاران: مطالعه ارتباط شاخص‌های تفرق و تکامل خاک...

جدول (۳) توصیف آماری برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری شده در واحدهای زمین‌نمای منطقه مورد مطالعه

Table (3) Statistical description of some of the measured physical and chemical properties in landscape units in the studied area

متغیرها Variables	تعداد مشاهدات Number of observations	میانگین mean	حداقل minimum	حداکثر maximum	چولگی skewness	کشیدگی kurtosis	انحراف معیار standard deviation	ضریب تغییرات Coefficient of variation
کو، Mountain								
ماده آلی، Organic matter	9	0.90	0.44	1.38	-0.07	-1.07	0.34	36.55
کربنات کلسیم، $CaCO_3$	9	24.96	8.28	47.28	0.29	-1.02	1.35	5.40
آهن دیتیونایت، Fe_d	9	0.88	0.45	1.25	-0.16	-0.69	0.27	30.68
آهن اگزالات، Fe_o	9	0.07	0.02	0.13	0.00	-1.42	0.03	42.85
شن، sand	9	10.70	5.88	20.80	1.23	0.87	4.90	45.79
سیلت، silt	9	52.64	47.87	57.64	0.01	0.01	2.92	5.54
رس، clay	9	36.91	28.36	41.99	-1.33	1.84	4.04	10.94
تپه، Hill								
ماده آلی، Organic matter	6	0.93	0.54	1.65	1.21	0.33	0.44	47.31
کربنات کلسیم، $CaCO_3$	6	28.36	9.19	60.54	1.01	1.47	1.84	6.48
آهن دیتیونایت، Fe_d	6	0.85	0.62	1.11	0.031	0.03	0.18	21.17
آهن اگزالات، Fe_o	6	0.06	0.03	0.09	-1.8	3.61	0.02	29.41
شن، sand	6	10.72	2.03	26.0	1.27	1.35	8.68	80.97
سیلت، silt	6	48.74	37.14	59.97	-0.07	-0.30	8.00	16.41
رس، clay	6	40.53	36.86	48.00	1.66	3.13	3.97	9.79
پیدمنت، Piedmont								
ماده آلی، Organic matter	84	1.43	0.37	4.19	1.27	0.61	0.99	69.23
کربنات کلسیم، $CaCO_3$	84	28.88	5.15	55.36	0.03	1.02	1.02	3.53
آهن دیتیونایت، Fe_d	84	0.92	0.21	19.23	8.94	2.03	2.03	220.65
آهن اگزالات، Fe_o	84	0.09	0.02	0.29	1.31	0.05	0.05	55.55
شن، sand	84	11.66	0.40	35.40	1.71	8.04	8.04	68.95
سیلت، silt	84	47.95	11.30	63.05	-1.34	7.70	7.70	16.06
رس، clay	84	40.45	23.65	35.40	0.59	8.17	8.17	20.19
اراضی پست، Low lands								
ماده آلی، Organic matter	3	2.49	0.48	4.19	-0.14	-1.52	1.30	52.20
کربنات کلسیم، $CaCO_3$	3	27.54	5.96	39.59	-0.86	0.58	9.48	34.42
آهن دیتیونایت، Fe_d	3	0.56	0.24	1.11	1.15	1.15	0.22	39.28
آهن اگزالات، Fe_o	3	0.14	0.07	0.29	0.98	0.54	0.06	42.85
شن، sand	3	10.63	0.40	28.55	0.82	0.10	7.60	71.49
سیلت، silt	3	49.13	41.96	58.04	0.27	-1.60	5.75	11.70
رس، clay	3	41.29	29.49	55.67	0.39	-0.62	7.41	17.94

Fe_d : Dithionite Iron; Fe_o : Oxalate Iron

جدول (۴) شاخص‌های تنوع خاک‌ها بر اساس سلسله مراتب ژئومورفیک در منطقه مورد مطالعه

Table (4) The diversity indices of soils in the studied area based on geomorphic hierarchy.

شاخص او نیل	شاخص منهینیک	شاخص مارگالف	یکسانی	غنا	شاخص شانن	N	سلسله مراتب ژئومورفیک
O'Neill Index	Menhinick Index	Margalef Index	Evenness	Richness	Shanon Index		Geomorphic Hierarchy
2.03	0.40	0.65	0.46	4	0.64	102	زمین‌نما Landscape
4.36	0.99	1.95	0.89	10	2.06	102	لندفرم Landform
4.97	1.39	2.81	0.88	14	2.33	102	سنگ‌شناسی Lithology
5.43	1.78	3.68	0.88	18	2.53	102	سطوح ژئومورفیک Geomorphic surfaces

غالب است که با عنوان شاخص او نیل شناخته می‌شود. روند تغییرات این شاخص نیز مشابه با شاخص تفرق شانن بوده و با کاهش سطوح طبقه‌بندی از سطح رده تا گروه بزرگ خاک (جدول ۵) و همچنین از سطح زمین‌نما به سطوح ژئومورفیک (جدول ۴) افزایشی بوده است. علاوه بر این روند افزایشی شاخص‌های مارگالف و منهینیک در سلسله مراتب رده‌بندی از سطح رده به گروه بزرگ و همچنین از سطح زمین‌نما به سطوح ژئومورفیک (جدول ۴) می‌تواند ناشی از افزایش غنا با کاهش سطوح طبقه‌بندی باشد. عباس‌زاده افشار و همکاران (۱۳۹۴) و زراعت‌پیشه و همکاران (۱۳۹۸) نیز نتایج مشابهی در ارتباط با افزایش شاخص‌های او نیل، مارگالف و منهینیک با کاهش سطوح طبقه‌بندی (از رده به گروه بزرگ و از سطح زمین‌نما به سطوح ژئومورفیک) را گزارش نمودند [۱، ۲۷].

در جدول ۶ شاخص‌های تنوع در سطح زمین‌ریخت در سلسله مراتب تاکسونومی رده، زیر رده و گروه بزرگ ارائه شده است. به طور کلی انتظار می‌رود که از سطح رده به گروه بزرگ، شاخص‌های تنوع خاک افزایش یابند که این روند افزایشی در واحدهای زمین‌ریخت Pi4 و Pi7 به خوبی قابل مشاهده است. با این وجود در بعضی موارد شاخص‌های تنوع در گذر از سطح رده به سمت گروه بزرگ ثابت هستند که به عدم تفکیک کلاس‌های جدید در سطوح پایین‌تر رده‌بندی

روند تفرق خاک بر اساس سلسله مراتب طبقه‌بندی از سطح رده تا گروه بزرگ با استفاده از شاخص‌های تنوع مختلف بررسی شد (جدول ۵). تقریباً تمامی این شاخص‌ها از سطح رده به گروه بزرگ روندی افزایشی نشان دادند؛ به طوری که برای مثال، بیشترین مقدار شاخص تفرق شانن ۱/۷۳ و متعلق به سطح گروه بزرگ خاک بوده است. این افزایش شاخص‌های تنوع از سطح رده به سطح گروه بزرگ خاک نشان دهنده وجود مسیرهای تکاملی واگرا در این منطقه است. نتایج مطالعه گو و همکاران^۱ (۲۰۰۳) در بررسی شاخص آنتروپی شانن در سطوح مختلف طبقه‌بندی حاکی از آن بوده است که شاخص غنا و شانن از سطح رده به سری خاک روندی افزایشی داشته‌اند [۸]. مینانسی و مک‌براتی (۲۰۱۶)، بر این باورند که با افزایش تعداد کلاس‌های خاک و به تبع آن افزایش شاخص غنا، شاخص آنتروپی شانن نیز بیشتر شده و بنابراین در سطوح با غنای بیشتر تفرق خاک نیز بیشتر خواهد بود [۱۴]. بر این اساس افزایش تفرق خاک در سطح گروه بزرگ (جدول ۵) و همچنین در سطوح سنگ‌شناسی و سطوح ژئومورفیک (جدول ۴) با غنای بیشتر، به خوبی نشان داده شده است. تفاوت بین شاخص تفرق و حداکثر آنتروپی راهی دیگر برای نشان دادن یکسانی گونه‌ها و یا تشخیص گونه

همچنین از ارتباط بین سطح منطقه و شاخص آنتروپی شانن به منظور درک بهتر پیچیدگی‌های اکولوژیکی و محیطی استفاده می‌شود. شکل ۴ ارتباط خطی بین مساحت سطوح زمین‌ریخت و شاخص آنتروپی شانن در سطح زیرگروه خاک را نشان می‌دهد. در این مورد نیز شاخص آنتروپی شانن با افزایش مساحت سطوح زمین‌ریخت، روندی افزایشی داشته است. عباس‌زاده افشار و همکاران (۱۳۹۴) نیز ارتباط خطی مثبت بین شاخص آنتروپی شانن و مساحت سطوح ژئومورفیک را گزارش نمودند [۱].

شکل ۵ ارتباط بین تعداد نمونه و شاخص غنا را در سطوح زمین‌ریخت برای سطح گروه بزرگ نشان می‌دهد. طبق این نمودار بین تعداد نمونه و شاخص غنا یک ارتباط غیرخطی و مثبت وجود دارد.

در شکل ۶ رابطه بین تعداد نمونه و شاخص آنتروپی شانن در سطوح زمین‌ریخت برای سلسله مراتب گروه بزرگ خاک ارائه شده است. نتایج نشان دهنده وجود ارتباطی مثبت و غیرخطی بین تعداد نمونه و شاخص آنتروپی شانن است. تومانیان و همکاران (۲۰۰۶) و عباس‌زاده افشار و همکاران (۱۳۹۴) نیز نتایج مشابهی مبنی بر ارتباط غیرخطی و مثبت بین تعداد نمونه و شاخص آنتروپی شانن را گزارش نمودند [۲۴، ۱].

(شاخص غنای یکسان) مربوط است. برای مثال در دو واحد زمین‌ریخت MO1 و Hi1 از سطح رده به زیر رده، خاک‌ها به کلاس‌های بیشتری تفکیک نشده و بنابراین طبیعی است که شاخص‌های تنوع تغییری نشان نداده و ثابت باشند. همچنین، از آنجا که تمام مشاهدات در یک کلاس رده‌بندی قرار گرفته‌اند در واحد زمین‌ریخت Pi5 و Pi4 (در سطح رده) شاخص‌های تنوع برابر صفر بوده و شاخص یکسانی قابل محاسبه نیست. همچنین بر اساس نتایج ارائه شده چنین به نظر می‌رسد که واحدهای زمین‌ریخت با تعداد بیشتر مشاهدات برای مثال واحدهای Pi3 و Pi7، شاخص‌های تنوع بزرگتری دارند.

شکل ۳ ارتباط خطی شاخص غنای گونه در سطح گروه بزرگ و لگاریتم مساحت برای سطوح زمین‌ریخت را نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار با افزایش مساحت زمین‌ریخت‌ها غنای منطقه مورد بررسی به طور نسبی افزایش یافته است. به دیگر سخن با افزایش مساحت واحدهای زمین‌ریخت تعداد گوناگونی خاک‌ها یا تنوع و به تبع آن شاخص غنا افزایش می‌یابد. در نتایج مشابه عباس‌زاده و همکاران (۱۳۹۴) و همچنین زراعت‌پیشه و همکاران (۱۳۹۸) یک ارتباط خطی مثبت بین شاخص غنای گونه و مساحت سطوح ژئومورفیک و سطوح زمین‌ریخت گزارش نمودند [۲۷، ۱].

جدول (۵) شاخص‌های تنوع خاک‌ها بر اساس سلسله مراتب رده‌بندی خاک در منطقه مورد مطالعه

Table (5) The diversity indices of soils in the studied area based on geomorphic hierarchy.

سلسله مراتب رده‌بندی classification hierarchy	N	شاخص شانن Shanon Index	غنا Richness	یکسانی Evenness	شاخص مارگالف Margalef Index	شاخص منهینیک Menhinick Index	شاخص اونیل O'Neill Index
رده Order	102	0.99	3	0.90	0.65	0.40	2.09
زیر رده Suborder	102	1.43	5	0.89	3.41	0.50	3.04
گروه بزرگ Great Groups	102	1.73	6	0.97	1.08	0.59	3.53

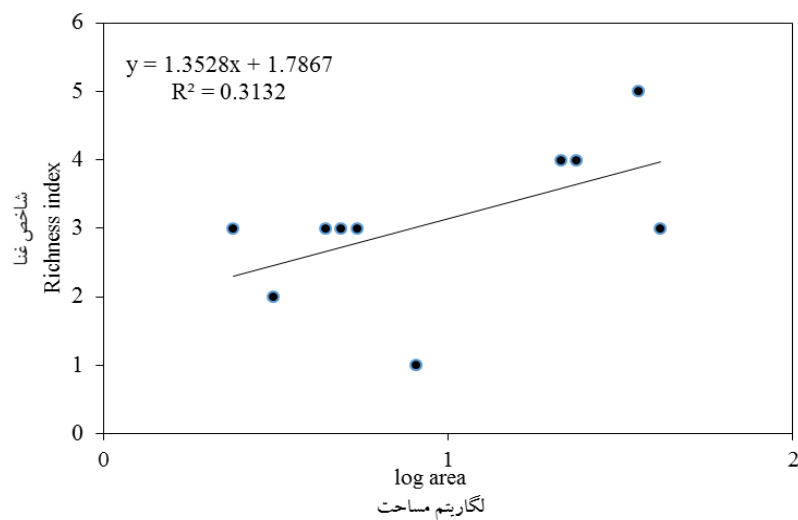
جدول (۶) شاخص‌های غنا و تنوع خاک‌ها بر اساس واحدهای زمین‌ریخت در منطقه مورد مطالعه

Table (6) Richness and diversity indices based on landform units in the studied area

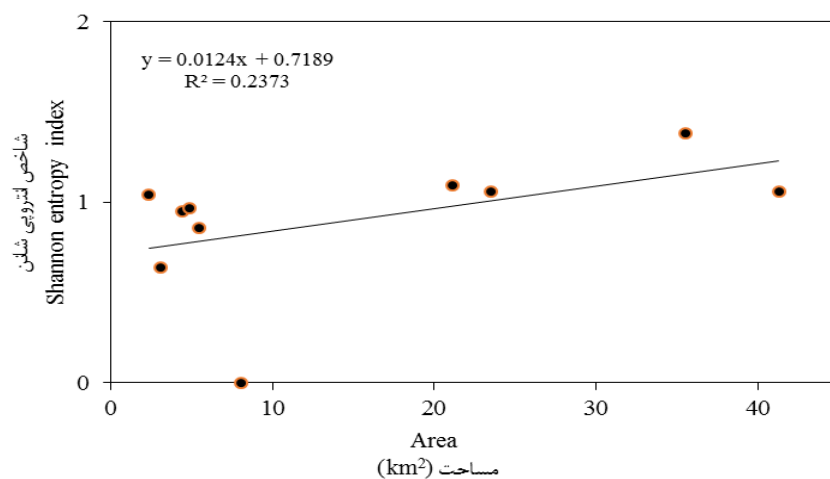
واحد زمین ریخت Landform unit	N	مساحت (km ²) area	رده، Order						زیر رده، Suborder						گروه بزرگ، Great group					
			S	H'	E	D	Dmn	Dmg	S	H'	E	D	Dmn	Dmg	S	H'	E	D	Dmn	Dmg
Mo1	9	41.31	2	0.69	1.00	1.38	0.46	0.67	2	0.69	1.00	1.38	0.56	0.67	3	1.06	0.97	2.16	0.91	1.00
Hi1	6	5.45	2	0.64	0.92	1.33	0.56	0.82	2	0.64	0.92	1.33	0.56	0.82	3	0.86	0.78	1.96	1.12	1.22
LL1	3	3.11	2	0.64	0.92	1.33	0.91	1.15	2	0.64	0.92	1.33	0.91	1.15	2	0.64	0.92	1.33	0.91	1.15
Pi1	5	4.40	2	0.50	0.72	1.19	0.62	0.89	2	0.50	0.72	1.19	0.62	0.89	3	0.95	0.86	2.05	1.24	1.34
Pi2	15	23.49	2	0.67	0.97	1.37	0.37	0.52	4	1.05	0.75	2.43	1.11	1.03	4	1.05	0.75	2.43	1.11	1.03
Pi3	20	21.16	3	0.86	0.78	1.95	0.67	0.67	3	0.86	0.78	1.95	0.67	0.67	4	1.09	0.79	2.48	1.00	0.89
Pi4	4	2.38	1	0	-	0	0	0.50	2	0.56	0.81	1.26	0.72	1.00	3	1.04	0.95	1.50	1.44	1.50
Pi5	5	8.04	1	0	-	0	0	0.45	1	0	-	0	0	0.45	1	0	-	0	0	0.45
Pi6	8	4.89	2	0.66	0.95	1.35	0.48	0.71	2	0.66	0.95	1.35	0.48	0.71	3	0.97	0.88	2.07	0.96	1.06
Pi7	27	35.55	3	0.80	0.73	1.90	0.61	0.58	4	1.23	0.89	2.62	0.91	0.77	5	1.38	0.86	2.99	1.21	0.96

S: شاخص غنا، H': شاخص آنترپی شانن، E: یکسانی، D: شاخص اونیل، Dmg: شاخص مارگالف، Dmn: شاخص منهینیک، N: تعداد مشاهدات.

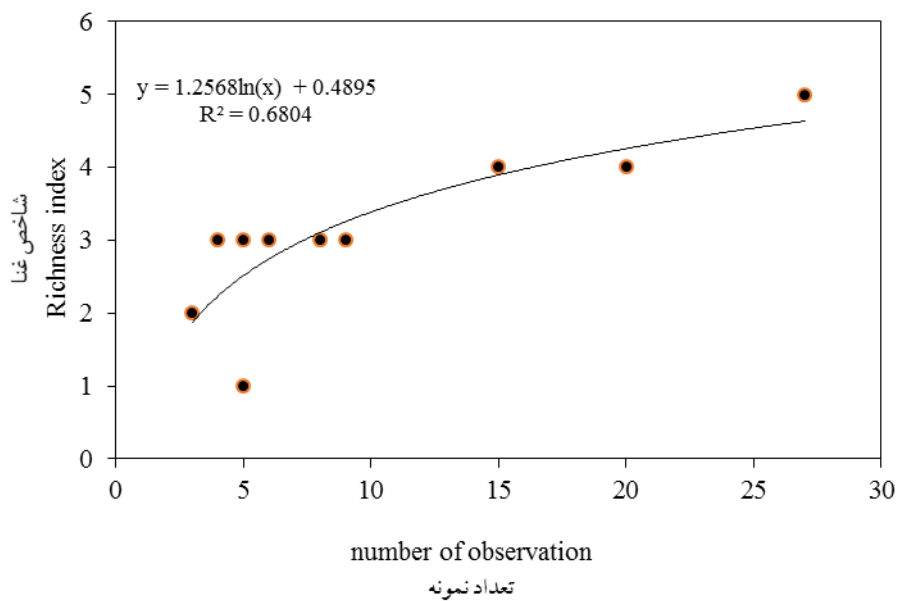
عسگری هفشجانی و همکاری: مطالعه ارتباط شاخص های تفرق و تکامل خاک...



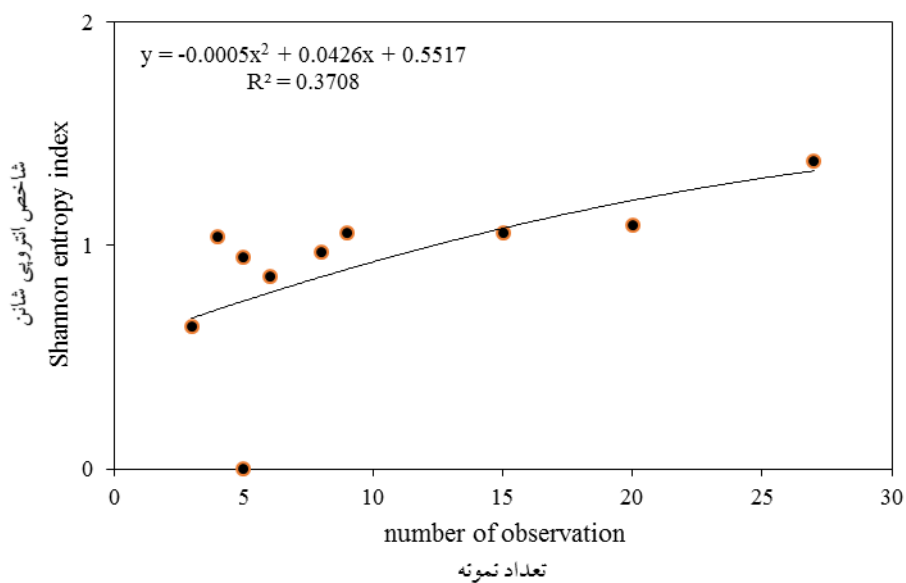
شکل (۳) رابطه بین لگاریتم مساحت سطوح زمین ریخت و شاخص غنای گونه در سطح گروه بزرگ در منطقه مورد مطالعه
Figure (3) The relationship between the logarithm of the area of landform surfaces and richness index at soil great group level in the studied area.



شکل (۴) رابطه بین مساحت سطوح زمین ریخت (km^2) و شاخص آنتروپی شانون در سطح گروه بزرگ در منطقه مورد مطالعه
Figure (4) The relationship between the logarithm of the area of landform surfaces and richness index at soil great group level in the studied area



شکل (۵) رابطه بین تعداد نمونه و شاخص غنای گونه در سطح زمین ریخت برای سلسله مراتب گروه بزرگ در منطقه مورد مطالعه
Figure (5) The relationship between the number of observation and richness index of landform surfaces at soil great group level in the studied area.



شکل (۶) رابطه بین تعداد نمونه و شاخص آنتروپی شانن در سطح زمین ریخت برای سلسله مراتب گروه بزرگ در منطقه مورد مطالعه

Figure (6) The relationship between the number of observation and shanon index of landform surfaces at soil great group level in the studied area

داشته‌اند. این روند افزایشی نشان دهنده‌ی آن است که در این منطقه تکامل خاک از نوع واگراست و با افزایش تکامل خاک، تفرق آن افزایش یافته است. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش مساحت سطوح زمین‌ریخت هر دو شاخص غنای گونه و شاخص آنتروپی شانن افزایش پیدا کرده‌اند. همچنین بین هر دو شاخص آنتروپی شانن و شاخص غنای گونه و تعداد نمونه ارتباطی مثبت و غیرخطی مشاهده شد. افزایش شاخص غنا و تفرق خاک در سلسله مراتب ژئومورفیک و طبقه‌بندی خاک و همچنین افزایش شاخص‌های غنا و شانن با افزایش وسعت سطوح زمین‌ریخت نشان می‌دهد که خاک‌های مورد مطالعه یک سیستم پویای غیرخطی هستند.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه بررسی ارتباط تکامل خاک-زمین نما نشان داد که به طور کلی پستی و بلندی با تأثیر بر خصوصیات خاک و همچنین شرایط زهکشی به عنوان یک عامل طبیعی، به همراه مواد مادری از مهم‌ترین عوامل موثر بر تغییر و تکامل خاک‌ها در این منطقه بوده‌اند. همچنین نتایج نشان داد که خاک‌های فاقد تکامل و یا با تکامل اندک نظیر رده‌های انتی‌سولز و اینسیتی‌سولز در مناطق ناپایدار با سطوح محدب یا با شیب زیاد ایجاد شده‌اند؛ در حالی که خاک‌های تکامل یافته نظیر مالی‌سولز عموماً در نقاط پایدار مسطح و یا با شیب کم تشکیل شده‌اند. نتایج بررسی شاخص‌های تفرق خاک برای سطح سلسله مراتب رده‌بندی و همچنین سلسله مراتب ژئومورفیک نشان داد که با کاهش سطح سلسله مراتب، شاخص‌های تفرق روندی افزایشی

References

1. Abbaszadeh Afshar, F., Ayoubi, Sh., Jafari, A., and Khademi, H. 2015. Considering soil diversity index and soil-landscape evolution relationship in the arid region of Bam, southeast Iran. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 5(2): 71-91.
2. Afroozi, M. and Mohammadzadeh, H. 2011. Assessment and Zoning of Farsan-Juneqan Aquifer Vulnerability to Pollution Using DRASTIC Indicators in GIS Environment. 15th symposium of geological society of Iran. 14-15 December. Tarbiat Moalem university.
3. Bonifacio, E., Zanini, E., Boero, V., and Franchini Angela, M. 1997. Pedogenesis in soil catena on serpentinite in north western Italy. *Geoderma*, 75: 33-51.
4. Costantini E.A.C., Lessovaia, S., and Vodyanitskii, Yu. 2006. Using the analysis of iron and iron oxides in paleosols (TEM, geochemistry and iron forms) for the assessment of present and past pedogenesis. *Quaternary International*, 156-157: 200-211.
5. Dethier D.P., Birkeland P.W., and McCarth J.A. 2012. Using the accumulation of CBD-extractable iron and clay content to estimate soil age on stable surfaces and nearby slopes, Front Range, Colorado. *Geomorphology*, 173-174: 17-29.
6. 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). *Journal of Water and Soil Science*, 23: 100-114.
7. Falahati Marvast, S. 2014. Google Earth images to determine the potential variability of surface soil properties and soil classes in the Marvast area, Yazd Province. M.Sc. thesis. Isfahan University of Technology, Isfahan.

8. Guo, Y., Gong, P., and Amundson, R. 2003. Pedodiversity in the United States of America. *Geoderma*, 117: 99–115.
9. Ibanez, J.J., De Alba, S., Bermudes, F.F., and Garcia-Alvarez, A. 1995. Pedodiversity: concepts and measurements. *Catena*, 24: 215–232.
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. Keshtkar, S., Jafari, A., and Farpoor, M.H. 2018. The effect of environmental and pedogenic factors on soil diversity in Kerman and Lalehzar regions. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*. 8(1): 89-106.
12. Magurran, A.E. 1988. Why diversity? PP. 1-5. In: *Ecological diversity and its measurement*. Croom Helm, London, 178 p.
13. McBratney A.B. and Minasny, B. 2007. On measuring pedodiversity. *Geoderma*, 141: 149–154.
14. Minasny, B. and McBratney, A.B. 2016. Digital soil mapping: a brief history and some lessons. *Geoderma*, 264: 301–311.
15. 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.
16. Naseri, M. 1989. Effect of climate and topography on the formation of soils in Gorgan area. M.Sc. thesis. Tehran University.
17. 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.
18. Phillips, J.D. 1998. On the relationship between complex systems and the factorial model of soil formation (with discussion). *Geoderma*, 86: 1-21.
19. Raheb, A. and Haidari, A. 2012. An investigation of oxidoreduction condition and some electrochemical, chemical and mineralogical characteristics of paddy and nonpaddy soils. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 43(1): 47-54.
20. Rahman, S., Munn, L.C., Zhang, R., and Vance, G.F. 1996. Rocky mountain forest soils. Evaluating spatial variability using conventional statistics and geostatics. *Canadian Journal of Soil Science*, 79: 501-507.
21. 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.
22. Shannon, C.E. and Weaver, W. 1948. *The mathematical theory of communication*. University of Illinois press, Urbana, 237 p.
23. Soil Survey Staff. 2014. *Keys to Soil Taxonomy*, 12th edition. USDA Natural Resources Conservation Service, USA.
24. Toomanian, N., Jalalian, A., Khademi, H., Karimian Eghbal, M., and Papritz, A. 2006. Pedodiversity and pedogenesis in Zayandeh-rud Valley, Central Iran. *Geomorphology*, 81(3), 376-393.
25. Whittaker, R.H. 1977. Evolution of species diversity in land communities. In: Hecht, M.K. and Steere, B.W.N.C. (Eds). *Evolutionary Biology*, Plenum Press, New York. pp: 1-67.

26. Zeraatpisheh, M., Ayoubi, S., Jafari, A., and 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.
27. Zeraatpisheh, M., Ayoubi, Sh., Khademi, H., and Jafari, A. 2019. Investigation of Pedodiversity Indices, Soil Differentiation and Soil-Landscape Evolution in the Semi-Arid Region of Chaharmahal-Va-Bakhtiyari Province. *Journal of Water and Soil Science*, 23(1): 67-86.