

بررسی ارتباط متقابل فرآیندهای خاک‌ساز با فرآیندهای زمین‌ریخت‌شناختی

محسن باقری بداغ‌آبادی^۱ و نورایر تومانیان^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۱/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۴/۰۴)

چکیده

خاک‌ها با ریخت‌های سرزمینی که بر روی آن‌ها تشکیل می‌شوند و تکامل می‌یابند، ارتباط بسیار نزدیک و متقابل دارند. بنابراین، هر تغییری در فرآیندهای زمین‌ریختی، فرآیندهای خاک‌سازی را متأثر می‌سازد. "زمین‌ریخت‌شناسی خاک" یا "ژئومورفولوژی خاک" ارتباط خاک و زمین‌ریخت را بررسی می‌کند. هرچند ارتباط زمین‌ریخت با خاک مورد توجه پژوهش‌گران بوده، اما بررسی کمی رابطه خاک با زمین‌ریخت، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این در حالی است که رابطه خاک با زمین‌ریخت، یک رابطه دو طرفه است و می‌توان به موضوع این‌گونه نگریست که وجود یک خاک می‌تواند نشان‌گر چه زمین‌ریخت یا زمین‌ریخت‌هایی باشد؟ بر همین اساس، پژوهش کنونی می‌کوشد تا با بکارگیری آمار و احتمال شرطی، به بررسی کمی این موضوع بپردازد. برای این منظور، یگان‌های زمین‌ریختی منطقه مرکزی اصفهان بر اساس روش ژئوپدولوژی (روش پیشنهادی زینک) جداسازی شدند و تعداد ۳۴۴ نقطه مطالعاتی بررسی و تجزیه و تحلیل گردید و احتمال شرطی وجود هر زمین‌ریخت، به شرط مشاهده خاک‌های مختلف به‌دست آمد. یافته‌ها به‌طور کمی نشان دادند که بین تکوین و تکامل خاک با محیط زمین‌ریخت حاکم بر آن، ارتباطی قوی و تنگاتنگ وجود دارد. به‌طوری که برخی از خاک‌ها را می‌توان تنها در زمین‌ریخت مشخصی یافت و به‌عبارت دیگر، آن خاک را یک خاک شاخص برای آن زمین‌ریخت مشخص دانست. به‌دلیل همین رابطه نزدیک بین سطوح روش زمین‌خاک‌شناسی با سلسله مراتب سامانه رده‌بندی خاک آمریکایی، در هر سطح زمین‌ریختی از سطح رده به سمت فامیل، واگرایی یا تفرق خاک‌ها افزایش می‌یابد. همچنین یافته‌ها به‌طور کمی نشان دادند که در منطقه مطالعاتی، تأثیر ناهمواری‌ها و زمین‌ریخت‌ها بر تکوین و تکامل خاک‌های منطقه، بیش از مواد مادری است.

واژه‌های کلیدی: احتمالات شرطی، زمین‌خاک‌شناسی، نقشه‌برداری خاک

باقری بداغ‌آبادی، م. تومانیان ن.، ۱۳۹۹. بررسی ارتباط متقابل فرآیندهای خاک‌ساز با فرآیندهای زمین‌ریخت‌شناختی. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۸، شماره ۲. صفحه: ۱۷۴-۱۸۹.

۱- موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران (مکاتبه کننده)

۲- مرکز تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران

* پست الکترونیک: m.baghery@areeo.ac.ir

مقدمه

علم زمین‌ریخت‌شناسی است. ارتباط زمین‌ریخت‌شناسی با خاک‌شناسی برای تفکیک یگان‌های (واحدهای) اراضی^۷ در روش زمین‌شناسی یا ژئوپدولوژی^۸ مد نظر قرار گرفته است (Rossiter, 2000). در روش زمین‌شناسی، با تأکید بر اجزای زمین بر اساس یک سامانه سلسله مراتبی، اراضی مورد مطالعه در شش سطح از هم تفکیک می‌شوند. لیکن سطوح پنجم و ششم ساختار ژئوپدولوژی، یعنی به ترتیب محیط ریخت‌زایش^۹ و زمین‌ساختار^{۱۰}، محیط‌های بسیار بزرگ را شامل می‌شوند. بنابراین، در مطالعات معمول خاک‌شناسی با استفاده از این رویکرد، سطوح اول تا چهارم این ساختار مد نظر قرار می‌گیرند (Esfandiarpour, 2008). این چهار سطح بر اساس روش زینک به ترتیب شامل: ۱- ریخت سرزمین^{۱۱} یا سطح زمین‌ریختی^{۱۲}، ۲- سنگ‌شناسی^{۱۳}، ۳- ناهمواری/ قالب^{۱۴} و ۴- نمای سرزمین^{۱۵} می‌باشند. سطح زمین‌ریخت (و یا ریخت سرزمین) در پایین‌ترین سطح تقسیم‌بندی (سطح ۱) قرار می‌گیرد و دارای بالاترین درجه همگنی است. شایان ذکر است، واژه سطح زمین‌ریخت (روش آمریکایی) برابر با واژه ریخت سرزمین (روش اروپایی یا روش زینک) است. چون فرآیندهای زمین‌ریختی و خاک‌شناختی، دارای ارتباط بسیار تنگاتنگ می‌باشند و تغییرات مهم ریخت‌سرزمین می‌توانند پوشش خاک را به‌طور معنی‌داری تغییر دهند (Phillips, 2001)، به همین دلیل انتظار می‌رود در سطوح زمین‌ریخت یکسان که دارای شرایط مشابه از نظر سنگ‌شناسی، پوشش گیاهی، اقلیم و غیره هستند، خاک‌ها دارای نوع و رفتاری مشابه باشند. شایان ذکر است که از پنج عامل خاک‌ساز شامل اقلیم، موجودات زنده، ناهمواری‌ها، مواد مادری و زمان، سه عامل ناهمواری‌ها، مواد مادری و موجودات زنده (پوشش گیاهی) به‌طور مستقیم و به‌ترتیب در ساختار سطوح ریخت سرزمین، سنگ‌شناسی و زمین‌ریخت نیز وجود

خاک‌ها قسمت خارجی پوسته زمین را تشکیل می‌دهند و هر تغییری در فرآیندهای زمین‌ریختی یا ژئومورفیک^۱، فرآیندهای خاک‌سازی را متأثر می‌سازد (Farpoor, 2001). از طرفی، خاک‌ها با ریخت‌های سرزمین^۲ که بر روی آن‌ها تشکیل می‌شوند و تکامل می‌یابند، ارتباط بسیار نزدیک و متقابل دارند که این ارتباط، موجب بروز شاخه‌ای از علم، تحت عنوان "زمین‌ریخت‌شناسی خاک یا ژئومورفولوژی خاک"^۳ شده است (Schaeztl & Anderson, 2005). زمین‌ریخت‌شناسی خاک عبارت از مطالعه علمی منشأ، توزیع و تکامل خاک‌ها، نمای سرزمین‌ها^۴ و رسوبات سطحی و فرآیندهای مسؤل در تشکیل و تحول آن‌ها می‌باشد (Wysocki *et al.*, 2000). بنابراین، در رابطه بین خاک‌ها و زمین‌ریخت‌شناسی^۵، درک و فهم زبان مشترک در بسیاری از موارد، مهم و مؤثر می‌باشد. به‌عنوان مثال، زمین‌ریخت‌شناسان برای فهم فرآیند هوادیدگی در سنگ‌ها و بررسی فرسایش، از خاک‌شناسی بهره می‌جویند. در مقابل، آن قسمت از ویژگی‌های زمین‌ریخت-شناختی^۶ که خاک‌ها تحت تأثیر شرایط آن‌ها به‌وجود می‌آیند، اطلاعات مفیدی در اختیار خاک‌شناسان قرار می‌دهد (Esfandiarpour, 2008).

خاک‌شناسان به‌طور مرسوم با انجام شناسایی خاک به بررسی و مطالعه خاک‌ها می‌پردازند. شناسایی خاک، روشی برای تعیین الگوی پراکنش خاک، توصیف و نمایش آن به شکل قابل فهم و تفسیر برای کاربران مختلف است (Dobermann *et al.*, 1997). روش‌های گوناگونی برای شناسایی و نقشه‌برداری خاک مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این روش‌ها تلاش می‌شود در مرزبندی‌ها، بیش‌ترین تفکیک‌های مفید و ممکن را انجام دهند؛ یعنی به بیش‌ترین شباهت یا همانندی تغییرات درون‌گروهی و تضادهای بین‌گروهی دست یابند. با توجه به آنچه بیان شد، یعنی ارتباط بسیار نزدیک و متقابل خاک‌ها با زمین‌ریخت‌ها، یکی از انواع روش‌های ترسیم مرزها در جداسازی اراضی، استفاده از

7. Land units
8. Geopedology
9. Morphogenetic environment
10. Geostructure
11. Landform
12. Geomorphic surface
13. Lithology
14. Relief/ Molding
15. Lanscape

1. Geomorphic processes
2. Landforms
3. Soil geomorphology
4. Landscapes
5. Geomorphology
6. Geomorphologic

سگزی تا حدود ۲۱۲۰ متر در ارتفاعات کوهستانی متغیر است. این منطقه در حد فاصل طول‌های جغرافیایی $30^{\circ} 1/4'$ تا $51^{\circ} 25/1'$ شرقی و عرض‌های جغرافیایی $32^{\circ} 18'$ تا $37/2'$ شمالی قرار گرفته است (شکل ۱) و دارای میانگین بارش سالانه ۱۰۸ میلی‌متر و متوسط دمای سالانه ۱۴ درجه سلسیوس می‌باشد. بر اساس کلید رده‌بندی خاک آمریکایی (Soil Survey Staff, 2014)، رژیم‌های رطوبتی و حرارتی خاک منطقه مطالعاتی، به ترتیب اریدیک (در بخش‌هایی اریدیک در مرز زیرک ضعیف) و ترمیک می‌باشند. از نظر نمای سرزمین، منطقه مطالعاتی شامل هفت نمای سرزمین شامل ۱- کوه‌ها، ۲- تپه-ماهورهای قدیمی، ۳- دامنه‌ها، ۴- دشت آبرفتی، ۵- دشت سیلابی، ۶- رودخانه و ۷- پلایاها می‌باشد.

تهیه نقشه یگان‌های زمین‌ریخت

در این پژوهش نخست با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای گوگل ارث، عکس‌های هوایی ۱/۵۵۰۰۰ منطقه و تفسیر آن‌ها بر اساس روش زمین‌خاک‌شناسی پیشنهادی زینک (Zinck, 1989) و استفاده از نقشه‌های مواد مادری، توپوگرافی و کاربری اراضی، یگان‌های زمین‌ریخت در چهار سطح جداسازی گردیدند. سپس در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی آرک-جی‌آی‌اس^۱ با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای بینگ^۲، عملیات زمین‌مرجع کردن^۳ انجام شد و نقشه مربوطه رقومی گردید.

نمونه‌برداری و مطالعات آزمایشگاهی

در پژوهش کنونی با توجه به سطوح زمین‌ریخت تفکیک شده، تعداد ۳۴۴ نقطه مطالعاتی به صورت خاک-رخ در کل منطقه حفر و تشریح گردید. موقعیت جغرافیایی خاک‌رخ‌ها با استفاده از یک سامانه مکان‌یاب جهانی^۴ مدل گارمین اِترِکس ویستا^۵ تعیین شده‌اند. تمامی خاک‌رخ‌های حفر شده، بر اساس راهنمای تشریح و نمونه‌برداری خاک‌ها در صحرا (Schoeneberger et al., 2012) تشریح شدند و از تمامی افق‌های ژنتیکی آن‌ها نمونه‌برداری انجام گرفت. سپس، آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی معمول (شوری، pH، SAR، مواد

دارند. عامل زمان گاه به‌طور غیرمستقیم (مانند مخروط فکنه‌های قدیمی و یا سطوح فرسایشی فعال) در سطوح زمین‌ریختی وارد می‌شود اما عامل اقلیم کمتر در جداسازی یگان‌های زمین‌ریخت‌شناسی بکار رفته است. به هر حال می‌توان گفت رابطه منسجمی بین زمین‌شناسی و زمین‌ریخت‌شناسی با خاک‌ها و نیز ویژگی‌های کانی‌شناسی، میکرومورفولوژیکی، فیزیکی و شیمیایی آن‌ها با نمای سرزمین وجود دارد (Owliaie et al., 2018). در پژوهش‌های زیادی در ایران ارتباط خاک با زمین‌ریخت‌ها بررسی شده است (Keshtkar et al., 2015, 2018, Esfandiarpour, Abbaszadeh et al., 2015, 2018, Jafari et al., 2013, Boroujeni & Safari, 2014). در این پژوهش‌ها بیشتر تأثیر زمین‌ریخت‌ها بر خاک مد نظر قرار گرفته است. به بیان دیگر، در این پژوهش‌ها بیشتر به این موضوع پرداخته شده است که یک زمین‌ریخت می‌تواند نشان‌گر چه خاک یا خاک‌هایی باشد و چگونه زمین‌ریخت‌ها می‌توانند خاک‌ها را از هم جدا کنند. این در حالی است که رابطه خاک با زمین‌ریخت، یک رابطه دو طرفه است و می‌توان به موضوع این‌گونه نگرست که وجود یک خاک می‌تواند نشان‌گر چه زمین‌ریخت یا زمین‌ریخت‌هایی باشد؟ در همین راستا فیلیپس (Phillips, 2009) نشان داد که فرآیندهای تکامل‌دهنده خاک و ریخت‌های سرزمین بر پوشش گیاهی و همچنین تکامل پوشش گیاهی بر تکامل هر دوی آن‌ها تأثیر دارد. استالینز (Stallins, 2006) نیز بیان می‌دارد که برهم‌کنش فرآیندهای زمین‌ریختی و اکولوژیک، درهم‌تنیدگی ذاتی داشته و همواره طی فرآیند تکامل محیط هم‌دیگر را متأثر می‌نمایند. بر این اساس، هدف اصلی پژوهش کنونی، تحلیل کمی نقش و تأثیر خاک در شناسایی و بررسی زمین‌ریخت‌ها با استفاده از احتمالات شرطی در منطقه مرکزی اصفهان می‌باشد.

مواد و روش‌ها

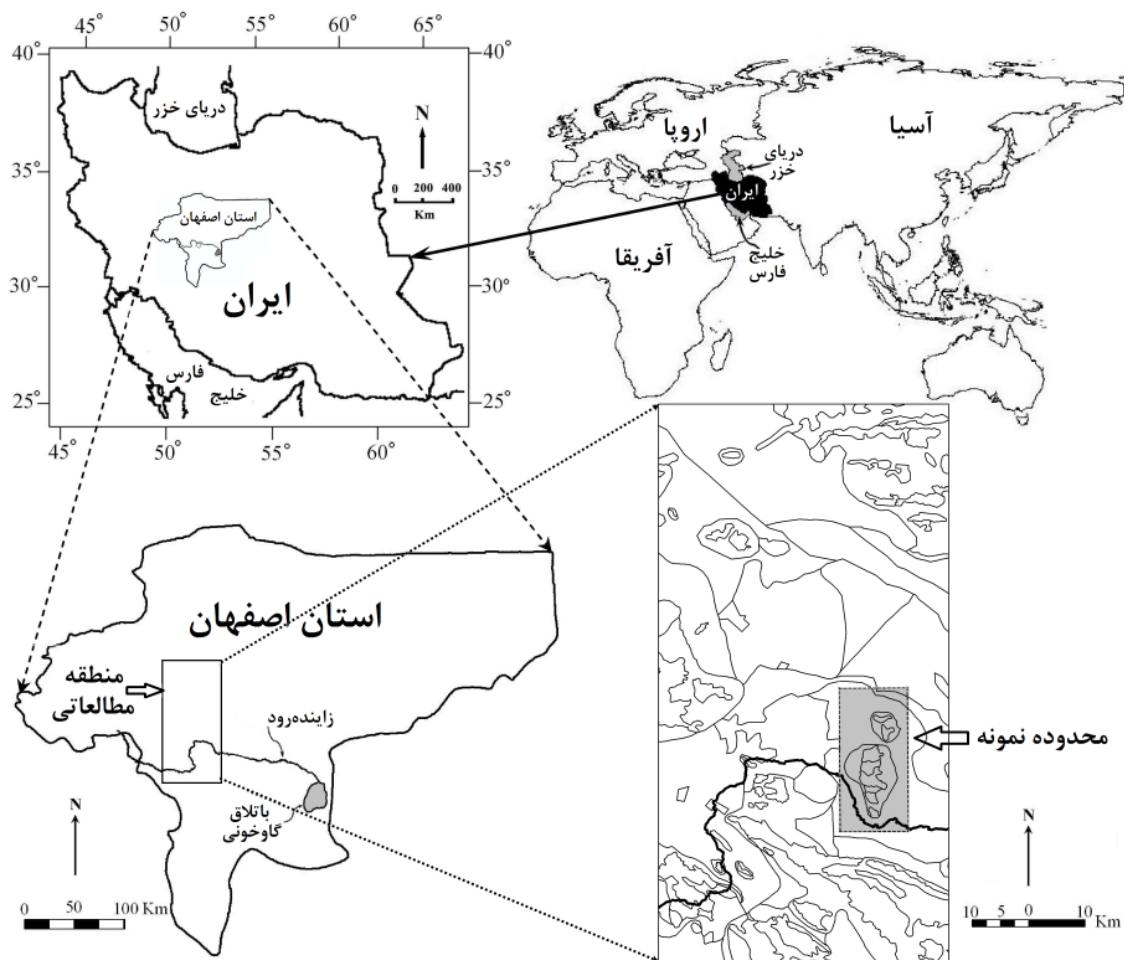
منطقه مطالعاتی

منطقه مورد مطالعه در استان اصفهان به مساحت تقریبی ۵۰۰۰۰ هکتار و ارتفاع متوسط ۱۷۳۰ متر از سطح دریا واقع شده است که ارتفاع آن از ۱۵۳۰ متر در

1. Arc-GIS
2. Bing
3. Georeferencing
4. Global Positioning System; GPS
5. Etrex Vista Garmin

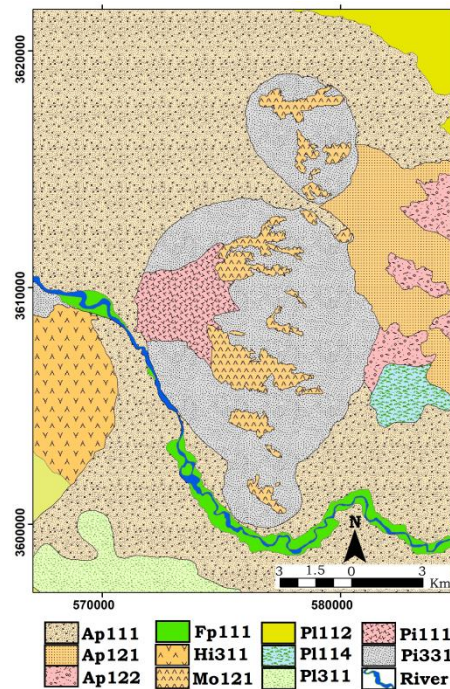
گردید. شایان ذکر است چون کلاس کانی‌شناسی برخلاف انتظار و مشاهدات صحرایی برای بسیاری از خاک‌رخ‌ها، Mixed بدست آمد اما CEC برای آن خاک-رخ‌ها اندازه‌گیری نشده بود، کلاس فعالیت تبادل کاتیونی برای این فامیل‌ها در نظر گرفته نشده است.

آلی، درصد اشباع، بافت، سنگریزه، آهک، گچ و در برخی نمونه‌ها (CEC) بر اساس روش‌های استاندارد (Soil Survey Staff, 1996) بر روی نمونه‌ها انجام گرفت و در پایان، رده‌بندی تمامی خاک‌رخ‌ها تا سطح فامیل خاک، بر اساس یافته‌های آزمایشگاهی و مطابق با کلید رده-بندی آمریکایی خاک (Soil Survey Staff, 2014) نهایی



شکل ۱- منطقه مطالعاتی (مقیاس تقریبی ۱/۷۵۰۰۰۰). محدوده نمونه برای نشان دادن یگان‌های زمین‌ریخت در مقیاس بزرگتر انتخاب شده است (به شکل ۲ رجوع شود).

Figure 1. The study area (Scale approximately: 1:750000). The sample area has been selected to show the geomorphic units on a larger scale (see Figure 2).



شکل ۲- یگان‌های سطوح زمین‌ریخت در محدوده نمونه

Figure 2. Geomorphic surface units of the sample area

زمین‌ریخت مشخص باشد» و به زبان ریاضی می‌توان نوشت:

$$P(\text{Geo } A' | \text{Soil } A) = \alpha \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (1)$$

یعنی احتمال مشاهده یگان زمین‌ریخت A' به شرط وجود خاک A برابر مقدار α است. بنابراین، وقتی انتظار می‌رود در سطح زمین‌ریخت، بیشترین همگنی وجود داشته باشد، به این معنی است که اگر در این یگان عمدتاً یک نوع خاک مشاهده شود، مقدار احتمال شرطی برای آن خاک به یک نزدیک می‌شود. نتیجه منطقی این خواهد بود که اگر احتمال شرطی یگان زمین‌ریخت A' به شرط وجود خاک A برابر یک باشد آن خاک ($\text{Soil } A$) را تنها در همان زمین‌ریخت ($\text{Geo } A'$) می‌توان یافت. البته این بدان معنی نیست که در آن زمین‌ریخت، تنها همان خاک وجود دارد و ممکن است خاک‌های دیگری هم در آن زمین‌ریخت وجود داشته باشند. لیکن خاک مزبور را می‌توان یکی از خاک‌های شاخص آن زمین‌ریخت دانست.

فرض کنید دو پیشامد A و B در یک فضای نمونه‌ای یکسان، داده شده‌اند و احتمال رخداد B بزرگ‌تر از صفر باشد، یعنی $P(B) > 0$ ، حال احتمال شرطی A زمانی که B رخ داده باشد (یعنی $P(A|B)$)

محاسبات آماری

به‌منظور کمی‌سازی و مدل‌سازی تغییرات خاک، تأکید زیادی بر استفاده از ابزارهای آماری و ریاضیاتی شده است و روز به روز این تأکیدها در حال افزایش می‌باشند (Baveye, 2002). در این راستا، رویکرد احتمال شرطی^۱ می‌تواند کمک شایانی به این مدل‌سازی‌ها بکند؛ چرا که احتمال شرطی برای مجموعه‌ای از مقادیر محاسبه می‌شود که می‌تواند طیف وسیعی از متغیرهای خاک (کمی و کیفی) را در بر گیرد. مزیت اصلی این رویکرد، توانایی آن برای در نظر گرفتن داده‌های کیفی، مانند نقشه‌های خاک و زمین‌شناسی، افزون بر اندازه‌گیری کمی خود متغیرها است (Goovarets & Journel, 1995). با توجه به اینکه انتظار می‌رود در سطوح زمین‌ریخت‌های مشابه، عوامل تشکیل دهنده خاک و نیز فرآیندهای خاکزایی یکسان عمل نمایند و بیشترین همگنی در این یگان‌ها مشاهده شوند، می‌توان با استفاده از نظریه آمار و احتمالات چنین بیان کرد که «احتمال شرطی وجود یک خاک می‌تواند نشان‌گر یک یگان

1. Conditional statistics

(Gj) را در حالی که خاک (Si) وجود دارد به صورت زیر نشان داد:

$$P(Gj|Si) = \frac{P(Gj \cap Si)}{P(Si)} \quad (3)$$

نتایج و بحث

جدول ۱ تعداد و درصد خاک‌های منطقه را به تفکیک از رده تا زیرگروه نشان می‌دهد. به دلیل تعداد زیاد فامیل‌های خاک، تنها تعداد فامیل در هر زیرگروه ارائه شده است. براساس یافته‌ها، خاک‌های منطقه در دو رده اربیدی سول و انتی سول رده بندی می‌شوند که به ترتیب حدود ۷۶/۷۴ و ۲۳/۲۶ درصد مشاهدات را در بر می‌گیرند.

برابر است با خارج قسمت تقسیم احتمال غیرشرطی توزیع احتمال همزمان A و B (یعنی $P(A \cap B)$)، بر احتمال غیرشرطی B (یعنی $P(B)$)؛ و به بیان ریاضی:

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} \quad (2)$$

حال اگر فرض کنیم هر خاک (Si) و یگان زمین‌ریخت (Gj) دو پیشامد در یک نمای سرزمین باشند، بر اساس احتمال شرطی می‌توان احتمال مشاهده یگان زمین‌ریخت

جدول ۱ - تعداد و درصد خاک‌های منطقه مطالعاتی

Table 1. Number and percentage of soils in the study area

| Order | Suborder | Geart group | Subgroup | Family | Observation points | Percentage | |
|-----------|----------|---------------|---------------------|----------------------|---------------------|------------|-------|
| Aridisols | Argids | Calciargids | Typic Calciargids | 4 | 25 | 7.27 | |
| | | Gypsiargids | Typic Gypsiargids | 1 | 2 | 0.58 | |
| | | Haplargids | Typic Haplargids | 2 | 36 | 10.47 | |
| | Calcids | Haplocalcids | Typic Haplocalcids | 2 | 22 | 6.40 | |
| | Cambids | Haplocambids | | Typic Haplocambids | 3 | 21 | 6.10 |
| | | | | Argigypsiids | Calcic Argigypsiids | 1 | 4 |
| | Gypsiids | | | Typic Calcigypsiids | 3 | 15 | 4.36 |
| | | | | Leptic Haplogypsiids | 4 | 6 | 1.74 |
| | | | | Lithic Haplogypsiids | 2 | 5 | 1.45 |
| | | | | Typic Haplogypsiids | 6 | 43 | 12.50 |
| | Salids | Haplosalids | | Calcic Haplosalids | 1 | 4 | 1.16 |
| | | | | Gypsic Haplosalids | 7 | 58 | 16.86 |
| | | | | Typic Haplosalids | 6 | 23 | 6.69 |
| Entisols | Orthents | Torriorthents | Typic Torriorthents | 10 | 70 | 20.35 | |
| | | | Xeric Torriorthents | 1 | 4 | 1.16 | |
| | Fluvents | Torrifluvents | Typic Torrifluvents | 1 | 6 | 1.74 | |
| Total | 7 | 11 | 16 | 54 | 344 | 100 | |

زمین‌ریخت، تعداد ۱۸۴ مشاهده را به خود اختصاص دادند که برابر ۵۴ درصد کل مشاهدات در سطح زمین‌ریخت می‌باشند. البته این تعداد برای سطح‌های بالاتر یعنی سطح زمین‌شناسی، سطح ناهمواری-قالب و سطح نمای سرزمین افزایش یافت و به ترتیب به ۷۳، ۸۳ و ۱۰۰ درصد رسید. شرح کامل برخی از یگان‌های زمین‌ریخت‌شناختی با فراوانی برابر یا بیش از ۱۶ مشاهده در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

همان‌گونه که پیش از این بیان شد، منطقه مطالعاتی شامل هفت نمای سرزمین مختلف می‌باشد. به منظور ساده‌سازی و کوتاه‌تر شدن محاسبات، تنها یگان‌های زمین‌ریختی غالب منطقه مد نظر قرار گرفتند. برای این منظور در سطح زمین‌ریخت‌ها، یگان‌هایی که دارای کمینه هشت مشاهده بودند شامل زمین‌ریخت‌های Pi442, P1113, P1211, P1112, Pi331, Ap111 و Pi512 وارد محاسبات شدند (جدول ۲). این هفت

جدول ۲- راهنمای یگان‌های زمین‌ریخت‌شناختی غالب در منطقه مورد مطالعه
Table 2. The legend of the dominant geomorphological units in the study area

| Landscape | Relief/Molding | Lithology | Geomorphic surface | Unit code | Observations |
|---------------------|------------------|--|--|-----------|--------------|
| Piedmont (Pi) | Fans | Lime-marl alluvium | Complex slope | Pi331 | 41 |
| | Bajadas | Black shale – marl alluvium | Parallel drains | Pi442 | 18 |
| | Disected bajadas | Framinfraled lime alluvium | Old-dense drained terraces | Pi512 | 18 |
| Alluvial plain (Ap) | Level terraces | Reccent alluvium | Cultivated terraces | Ap111 | 49 |
| | | Old alluvium | River meandrds | Ap121 | 17 |
| Playa (Pl) | Segzi playa | Fine earth, saline, gypsiferous lagoon sediments | Wet zone, very saline | PI112 | 23 |
| | | | Soft clay zone, alkaline | PI113 | 20 |
| | | | Soft clay zone, very saline and gypsiferous soil | PI114 | 17 |
| | | | Clay zone, cultivated | PI211 | 22 |
| | Borkhar playa | Fine earth, slightly saline sediments | | | |

خاک را یک خاک شاخص برای زمین‌ریخت Pi331 بیان کرد. اما چون این نمونه تنها دارای دو مشاهده بود، منطقی نیست که چنین نتیجه‌ای را پذیرفت. بنابراین با در نظر گرفتن سطح ۹۵ درصد، مواردی که دارای تعداد مشاهدات کمتر از پنج درصد کل مشاهدات (یعنی کمتر از ۱۸ مشاهده) بودند در تفسیرهای مربوط به هر یگان وارد نشدند. لیکن در تفسیر کلی یافته‌ها و انجام محاسبات پایانی، این موارد وارد محاسبات شدند؛ چراکه به هر حال این موارد، جزئی از واقعیت منطقه هستند. جدول‌های ۳ و ۴ به ترتیب برای سطوح زمین‌ریخت و سنگ‌شناسی، مقادیر احتمال شرطی هر یگان زمین‌ریختی به شرط وجود هر خاک را نشان می‌دهند. برای سطوح ناهمواری-قالب و نمای سرزمین به دلیل طولانی شدن جدول‌ها و محدودیت حجم مقاله، این جدول‌ها ارایه نشدند.

شایان ذکر است که برای انجام محاسبات مربوط به احتمالات شرطی هر یگان زمین‌ریختی و خاک‌های موجود در آن‌ها، فراوانی نسبی مشاهدات هر یگان زمین‌ریختی و هر خاکرخ در نظر گرفته شده است. از آنجا که تعداد مشاهدات برای خاکرخ یا یگان زمین‌ریختی گاه بسیار کم (دو یا سه مشاهده) بود، بررسی این موارد به تنهایی اعتبار تعمیم یافته‌ها برای آن نمونه‌ها را با ابهام روبه‌رو می‌کند. برای نمونه، فامیل خاک Fine-silty, Mixed, Thermic Typic (Family A) Calcigypsid در منطقه مطالعاتی تنها دارای دو مشاهده در سطح زمین‌ریخت Pi331 (Pi331) است، یعنی از نظر ریاضی:

$$P(\text{FamilyA} | \text{Pi331}) = 1 = 100\%$$

بر این اساس (یعنی تنها با در نظر گرفتن مقدار احتمال شرطی که برابر ۱۰۰ درصد شده است)، می‌توان این

جدول ۳- مقادیر احتمال شرطی، P(x)، برای سطح زمین‌ریخت در سطوح متفاوت رده‌بندی خاک

Table 3. Conditional probability values, P (x), for the geomorphical level at different soil taxonomical levels.

| Surface | Tot_No | Family* | P(x) | Subgroup | P(x) | Great group | P(x) | Suborder | P(x) | | |
|--|--------|--|------|---|------|--------------------|------|-------------|------|--------|------|
| Ap111 | 49 | Fine Mixed Thermic Typic Haploargids | 0.94 | Typic Haploargids | 0.9 | Haploargids | 0.9 | Argids | 0.51 | | |
| | | Loamy-skeletal Mixed Thermic Typic Haplocalcids | 0.11 | Typic Haplocalcids | 0.08 | Haplocalcids | 0.08 | Calcids | 0.08 | | |
| | | Fine Mixed Thermic Typic Haplocambids | 0.33 | Typic Haplocambids | 0.5 | Haplocambids | 0.5 | Cambids | 0.5 | | |
| | | Fine-silty Mixed Thermic Typic Haplocambids | 0.8 | | | | | | | | |
| | | Fine Mixed Thermic Typic Torriorthents | 0.14 | Typic Torriorthents | 0.05 | Torriorthents | 0.05 | Orthents | 0.05 | | |
| | | Fine-loamy Mixed Thermic Typic Torriorthents | 0.25 | | | | | | | | |
| | | Loamy-skeletal Mixed Thermic Typic Haplogypsids | 0.25 | Typic Haplogypsids | 0.08 | Haplogypsids | 0.07 | Gypsids | 0.26 | | |
| | | Loamy-skeletal Mixed Thermic Calcic Argigypsids | 1 | Calcic Argigypsids | 1 | Argigypsids | 1 | | | | |
| | | Fine-silty Mixed Thermic Typic Calcigypsids | 1 | Typic Calcigypsids | 0.56 | Calcigypsids | 0.56 | | | | |
| | | Pi331 | 41 | Fine-loamy Mixed Thermic Typic Calciargids | 0.67 | Typic Calciargids | 0.36 | Calciargids | 0.36 | Argids | 0.14 |
| Loamy-skeletal Mixed Thermic Typic Calciargids | 0.75 | | | | | | | | | | |
| Loamy-skeletal Mixed Thermic Typic Haplocalcids | 0.44 | | | Typic Haplocalcids | 0.33 | Haplocalcids | 0.33 | Calcids | 0.33 | | |
| Fine-silty Mixed Thermic Typic Torriorthents | 0.33 | | | Typic Torriorthents | 0.08 | Torriorthents | 0.08 | Orthents | 0.08 | | |
| Fine-loamy Mixed Thermic Typic Torriorthents | 0.25 | | | | | | | | | | |
| Loamy-skeletal Mixed Thermic Typic Torriorthents | 0.07 | | | | | | | | | | |
| Pi112 | 23 | | | Fine Mixed Thermic Gypsic Haplosalids | 0.25 | Gypsic Haplosalids | 0.28 | Haplosalids | 0.27 | Salids | 0.27 |
| | | | | Fine-silty Mixed Thermic Gypsic Haplosalids | 0.5 | | | | | | |
| | | Loamy-skeletal Mixed Thermic Gypsic Haplosalids | 1 | Calcic Haplosalids | 0.5 | Typic Haplosalids | 0.15 | Haplosalids | 0.04 | Salids | 0.04 |
| | | Fine Mixed Thermic Calcic Haplosalids | 0.5 | | | | | | | | |
| | | Fine Mixed Thermic Typic Haplosalids | 0.25 | Gypsic Haplosalids | 0.03 | Typic Haplosalids | 0.08 | Haplosalids | 0.1 | Argids | 0.2 |
| | | Fine-silty Mixed Thermic Gypsic Haplosalids | 0.17 | | | | | | | | |
| Pi211 | 22 | Fine Mixed Thermic Typic Haploargids | 0.05 | Typic Haploargids | 0.1 | Haploargids | 0.1 | Argids | 0.2 | | |
| | | Fine-silty Mixed Thermic Typic Haploargids | 1 | | | | | | | | |
| | | Fine Mixed Thermic Typic Calciargids | 0.67 | Typic Calciargids | 0.36 | Calciargids | 0.36 | Cambids | 0.08 | | |
| | | Fine-silty Mixed Thermic Typic Calciargids | 1 | | | | | | | | |
| | | Fine-silty Mixed Thermic Typic Haplocambids | 0.2 | Typic Haplocambids | 0.08 | Haplocambids | 0.08 | Orthents | 0.05 | | |
| | | Fine Mixed Thermic Typic Torriorthents | 0.29 | Typic Torriorthents | 0.05 | Torriorthents | 0.05 | Orthents | 0.05 | | |
| Pi113 | 20 | Fine-silty over sandy Mixed Thermic Gypsic Haplosalids | 1 | Gypsic Haplosalids | 0.31 | Haplosalids | 0.22 | Salids | 0.22 | | |

| | | | | | | | | | |
|-------|----|--|------|---------------------|------|---------------|------|----------|------|
| | | Fine Mixed Thermic Gypsic Haplosalids | 0.4 | | | | | | |
| | | Coarse-silty Gypsic Thermic Gypsic Haplosalids | 0.5 | | | | | | |
| | | Fine-silty Mixed Thermic Typic Haplosalids | 0.17 | Typic Haplosalids | 0.08 | | | | |
| | | Loamy-skeletal Mixed Thermic Typic Haplogypsids | 0.13 | Typic Haplogypsids | 0.08 | Haplogypsids | 0.07 | | |
| | | Coarse-loamy Gypsic Thermic Typic Haplogypsids | 0.33 | | | | | | |
| Pi442 | 18 | Loamy-skeletal Mixed Thermic Typic Calcigypsids | 0.33 | | | | | Gypsids | 0.14 |
| | | Fine-loamy Mixed Thermic Typic Calciargids | 0.33 | Typic Calcigypsids | 0.44 | Calcigypsids | 0.44 | | |
| | | Loamy-skeletal Mixed Thermic Typic Calciargids | 0.25 | | | | | | |
| | | Loamy-skeletal Mixed Thermic Typic Torriorthents | 0.14 | Typic Torriorthents | 0.05 | Torriorthents | 0.05 | Orthents | 0.05 |
| | | Coarse-loamy Mixed Thermic Typic Haplosalids | 1 | Typic Haplosalids | 0.08 | Haplosalids | 0.02 | Salids | 0.02 |
| | | Fine-silty Mixed Thermic Leptic Haplogypsids | 1 | Leptic Haplogypsids | 0.5 | | | | |
| Pi512 | 18 | Fine-loamy Gypsic Thermic Leptic Haplogypsids | 1 | | | | | | |
| | | Fine-loamy Mixed Thermic Typic Haplogypsids | 0.5 | | | Haplogypsids | 0.23 | Gypsids | 0.16 |
| | | Coarse-loamy Gypsic Thermic Typic Haplogypsids | 0.67 | Typic Haplogypsids | 0.21 | | | | |
| | | Loamy-skeletal Gypsic Thermic Typic Haplogypsids | 0.22 | | | | | | |

*: کلاس فعالیت کاتیونی در نظر گرفته نشده است (Cation-Exchange Activity Classes are not considered).

جدول ۴- مقادیر احتمال شرطی، P(x)، برای سطح سنگ‌شناسی در سطوح متفاوت رده‌بندی خاک

Table 4. Conditional probability values, P (x), for the lithology level at different soil taxonomical levels.

| Lithology No. | Family* | P(x) | Subgroup | P(x) | Great group | P(x) | Suborder | P(x) |
|---------------|--|---|---------------------|--------------------|---------------|--------------|----------|--------------|
| | Fine-loamy Mixed Thermic Typic Calciargids | 0.67 | | | | | | |
| | Loamy-skeletal Mixed Thermic Typic Calciargids | 0.75 | Typic Calciargids | 0.36 | Calciargids | 0.36 | Argids | 0.14 |
| | Loamy-skeletal Mixed Thermic Typic Haplocalcids | 0.44 | Typic Haplocalcids | 0.33 | Haplocalcids | 0.33 | Calcids | 0.33 |
| | Loamy-skeletal Mixed Thermic Calcic Argigypsids | 1.00 | Calcic Argigypsids | 1.00 | Argigypsids | 1.00 | | |
| | Fine-loamy Mixed Thermic Typic Calcigypsids | 1.00 | | | | | | |
| Pi33 | 45 | Fine-silty Mixed Thermic Typic Calcigypsids | 1.00 | Typic Calcigypsids | 0.56 | Calcigypsids | 0.56 | Gypsids 0.26 |
| | Loamy-skeletal Mixed Thermic Typic Calcigypsids | 0.33 | | | | | | |
| | Loamy-skeletal Mixed Thermic Typic Haplogypsids | 0.25 | Typic Haplogypsids | 0.08 | Haplogypsids | 0.07 | | |
| | Fine-loamy Mixed Thermic Typic Torriorthents | 0.25 | | | | | | |
| | Fine-silty Mixed Thermic Typic Torriorthents | 0.33 | Typic Torriorthents | 0.13 | Torriorthents | 0.13 | Orthents | 0.13 |
| | Loamy-skeletal Mixed Thermic Typic Torriorthents | 0.21 | | | | | | |
| | Fine-loamy Mixed Thermic Typic Calciargids | 0.33 | | | | | | |
| | Loamy-skeletal Mixed Thermic Typic Calciargids | 0.25 | Typic Calciargids | 0.14 | Calciargids | 0.14 | Argids | 0.06 |
| Pi44 | 23 | Loamy-skeletal Mixed Thermic Typic Calcigypsids | 0.33 | Typic Calcigypsids | 0.22 | Calcigypsids | 0.22 | |
| | Coarse-loamy Gypsic Thermic Typic Haplogypsids | 0.33 | | | | | | |
| | Loamy-skeletal Mixed Thermic Typic Haplogypsids | 0.38 | Typic Haplogypsids | 0.17 | Haplogypsids | 0.13 | Gypsids | 0.14 |

| | | | | | | | | | |
|------|----|---|------|---------------------|------|---------------|------|----------|------|
| | | Loamy-skeletal Mixed Thermic Typic Torriorthents | 0.36 | Typic Torriorthents | 0.13 | Torriorthents | 0.13 | Orthents | 0.13 |
| | | Coarse-loamy Mixed Thermic Typic Haplosalids | 1.00 | Typic Haplosalids | 0.08 | Haplosalids | 0.02 | Salids | 0.02 |
| | | Fine-loamy Mixed Thermic Typic Gypsargids | 1.00 | Typic Gypsargids | 1.00 | Gypsargids | 1.00 | Argids | 0.03 |
| | | Coarse-loamy Gypsic Thermic Typic Haplogypsid | 0.67 | | | | | | |
| Pi51 | 20 | Fine-loamy Mixed Thermic Typic Haplogypsid | 0.50 | Typic Haplogypsid | 0.29 | | | | |
| | | Loamy-skeletal Gypsic Thermic Typic Haplogypsid | 0.44 | | | Haplogypsid | 0.30 | Gypsid | 0.21 |
| | | Fine-loamy Gypsic Thermic Leptic Haplogypsid | 1.00 | | | | | | |
| | | Fine-silty Mixed Thermic Leptic Haplogypsid | 1.00 | Leptic Haplogypsid | 0.50 | | | | |
| | | Fine Mixed Thermic Typic Haplosalids | 0.13 | Typic Haplosalids | 0.08 | Haplosalids | 0.02 | Salids | 0.02 |
| | | Fine Mixed Thermic Typic Haploargid | 0.95 | Typic Haploargid | 0.90 | Haploargid | 0.90 | Argid | 0.51 |
| | | Loamy-skeletal Mixed Thermic Typic Haplocalcid | 0.11 | Typic Haplocalcid | 0.08 | Haplocalcid | 0.08 | Calcid | 0.08 |
| Ap11 | 54 | Fine Mixed Thermic Typic Haplocambid | 0.50 | | | | | | |
| | | Fine-silty Mixed Thermic Typic Haplocambid | 0.80 | Typic Haplocambid | 0.58 | Haplocambid | 0.58 | Cambid | 0.58 |
| | | Fine-loamy Mixed Thermic Typic Torriorthent | 0.50 | Typic Torriorthent | 0.08 | Torriorthent | 0.08 | Orthent | 0.08 |
| | | Fine Mixed Thermic Typic Torriorthent | 0.14 | | | | | | |
| | | Coarse-silty Gypsic Thermic Gypsic Haplosalid | 0.50 | | | | | | |
| | | Fine-silty over sandy Mixed Thermic Gypsic Haplosalid | 1.00 | | | | | | |
| | | Fine-silty Mixed Thermic Gypsic Haplosalid | 0.67 | Gypsic Haplosalid | 0.78 | | | | |
| | | Loamy-skeletal Mixed Thermic Gypsic Haplosalid | 1.00 | | | Haplosalid | 0.63 | Salid | 0.63 |
| | | Fine Mixed Thermic Gypsic Haplosalid | 0.90 | | | | | | |
| P111 | 65 | Fine Mixed Thermic Calcic Haplosalid | 0.75 | Calcic Haplosalid | 0.75 | | | | |
| | | Fine-silty Mixed Thermic Typic Haplosalid | 1.00 | Typic Haplosalid | 0.23 | | | | |
| | | Fine Mixed Thermic Typic Haplosalid | 0.25 | | | | | | |
| | | Fine Mixed Thermic Typic Calciargid | 0.17 | Typic Calciargid | 0.07 | Calciargid | 0.07 | Argid | 0.03 |
| | | Fine-loamy Mixed Thermic Typic Haplocalcid | 0.33 | Typic Haplocalcid | 0.08 | Haplocalcid | 0.08 | Calcid | 0.08 |
| | | Fine Mixed Thermic Typic Haplocambid | 0.33 | Typic Haplocambid | 0.17 | Haplocambid | 0.17 | Cambid | 0.17 |
| | | Fine-silty Mixed Thermic Typic Torriorthent | 0.33 | Typic Torriorthent | 0.03 | Torriorthent | 0.03 | Orthent | 0.03 |
| | | Fine-silty Mixed Thermic Gypsic Haplosalid | 0.17 | Gypsic Haplosalid | 0.03 | Haplosalid | 0.04 | Salid | 0.04 |
| | | Fine Mixed Thermic Typic Haplosalid | 0.13 | Typic Haplosalid | 0.08 | | | | |
| | | Fine-silty Mixed Thermic Typic Calciargid | 1.00 | | | Calciargid | 0.36 | | |
| P121 | 22 | Fine Mixed Thermic Typic Calciargid | 0.67 | Typic Calciargid | 0.36 | | | Argid | 0.20 |
| | | Fine Mixed Thermic Typic Haploargid | 0.05 | | | Haploargid | 0.10 | | |
| | | Fine-silty Mixed Thermic Typic Haploargid | 1.00 | Typic Haploargid | 0.10 | | | | |
| | | Fine-silty Mixed Thermic Typic Haplocambid | 0.20 | Typic Haplocambid | 0.08 | Haplocambid | 0.08 | Cambid | 0.08 |
| | | Fine Mixed Thermic Typic Torriorthent | 0.29 | Typic Torriorthent | 0.05 | Torriorthent | 0.05 | Orthent | 0.05 |
| | | | 0.65 | | 0.49 | | 0.47 | | 0.35 |

* : کلاس فعالیت کاتیونی در نظر گرفته نشده است (Cation-Exchange Activity Classes are not considered).

با توجه به مقادیر بالای احتمال شرطی و نیز تعداد زیاد مشاهدات (یعنی ۳۴ مشاهده)، می توان این خاک را یک خاک شاخص برای زمین ریخت Ap111 دانست. به بیان دیگر، می توان گفت که فرآیندهای خاک سازی که منجر به تشکیل این فامیل خاک شده اند، تا حد بسیار زیادی دارای ارتباطی تنگاتنگ با فرآیندهای زمین ریخت- شناختی یا ژئومورفولوژیکی این یگان زمین ریختی (Ap111) بوده اند. این ارتباط، آن قدر قوی بوده است که حتی در سطح زیررده با احتمال حدود ۵۱ درصد، می توان پی به وجود زمین ریخت Ap111 برد. این مقدار احتمال در بحث شناسایی خاک، مقدار بزرگی است. برای مقایسه، کافی است یادآوری گردد که یک یگان خاک، زمانی یگان همگن می باشد که یک خاک دارای مقدار کمینه ۵۰ درصد و خاک مشابه آن نیز ۲۵ درصد یا بیشتر باشد (Soil Science Division Staff, 2017). حال برای خاک مذکور در سطح زیررده، مقدار احتمال حدود ۵۱ درصد شده که خود نشانگر ارتباط قوی خاک-نمای سرزمین است.

چنین یافته هایی تقریباً برای همه سطوح زمین ریختی و در همه سطوح رده بندی خاکها مشاهده می شوند. برای نمونه، احتمال شرطی مشاهده یگان زمین ریختی PI21 (PI21) در سطح سنگ شناسی برای خاک Fine, Mixed, Thermic Typic Calciargids (FamilyD) در سطوح فامیل، زیرگروه (SubG-D)، گروه بزرگ (GG-) (D) و زیررده (SubO-D) به شرح زیر است:

$$P(PI21|FamilyD) = 0.67$$

$$P(PI21|SubG-D) = 0.36$$

$$P(PI21|GG-D) = 0.36$$

$$P(PI21|SubO-D) = 0.20$$

وجود چنین روندی برای سطوح رده بندی خاکها و سطوح زمین ریختی به خوبی بیانگر همخوانی ساختار سلسله مراتبی روش ژئوپدولوژی با ساختار رده بندی خاک می باشد. از طرف دیگر، این یافته ها همان طور که انتظار می رود، به خوبی تفرق خاکها را در خلال سلسله مراتب زمین ریختی نشان می دهند. باقری بداغ آبادی و تومانیان (۲۰۱۹) نیز برای منطقه شرق اصفهان به یافته های مشابهی دست یافتند (Bagheri, Bodaghabadi & Toomanian, 2019). همچنین، یافته های به دست آمده توسط شاخص های تفرق خاک

به طور کلی همان طور که انتظار می رود، برای هر سطح زمین ریختی، احتمال شرطی در هر سطح رده بندی خاک برای سطوح بالاتر رده بندی خاک، کاهش می یابد. برای مثال احتمال مشاهده زمین ریخت Ap111 (Ap111) به شرط وجود خاک Fine, Mixed, Thermic Typic Haplargids (FamilyB)، برابر ۰/۹۵ است و یا به زبان ریاضی:

$$P(Ap111|FamilyB) = 0.95$$

شایان ذکر است که این عدد به صورت زیر محاسبه شده است (محاسبات برای دیگر سطوح نیز به طور مشابه می باشند):

احتمال مشاهده خاک Fine, Mixed, Thermic Typic Haplargids (FamilyB) در کل منطقه برابر است با تعداد مشاهدات این خاک (۳۴ عدد) نسبت به کل مشاهدات (۳۴۴ عدد)، پس داریم:

$$P(Ap111) = 34 \div 344 = 9.88\%$$

و احتمال همزمان خاک فامیل B (FamilyB) در زمین ریخت Ap111 برابر است با تعداد مشاهدات این خاک در زمین ریخت Ap111 (۳۲ عدد) نسبت به کل مشاهدات (۳۴۴ عدد)، پس داریم:

$$P(FamilyB) = 32 \div 344 = 9.30\%$$

بنابراین، احتمال مشاهده زمین ریخت Ap111 به شرط وجود خاک فامیل B برابر است با خارج قسمت تقسیم احتمال غیرشرطی توزیع احتمال همزمان فامیل B و زمین ریخت Ap111 (یعنی ۹/۳ درصد)، بر احتمال غیرشرطی زمین ریخت Ap111 (یعنی ۹/۸۸ درصد) و به بیان ریاضی:

$$P(Ap111|FamilyB) = 9.30 \div 9.88 = 0.94\%$$

برای سطح زیرگروه مربوط به خاک B یا SubG-B (یعنی زیرگروه Typic Haplargids)، احتمال مشاهده زمین ریخت Ap111 به شرط وجود خاک SubG-A برابر ۰/۹ است و یا به زبان ریاضی:

$$P(Ap111|SubG-B) = 0.90$$

این مقدار برای سطح گروه بزرگ (GG-B) Haplargids و برای سطح زیررده (SubO-B) Argids به ترتیب برابر با مقدار ۰/۹۰ و ۰/۵۱ شده است. به بیان ریاضی:

$$P(Ap111|GG-B) = 0.90$$

$$P(Ap111|SubO-B) = 0.51$$

می‌توان نتیجه گرفت که در گذشته، اقلیم منطقه مرطوب بوده و این خاک در آن دوران تکامل یافته و پس از آن دیگر چندان تغییراتی نکرده است. پژوهش‌هایی که در این محدوده انجام شده‌اند نقش اقلیم گذشته را در تشکیل خاک‌ها به‌خوبی نشان داده‌اند (Bayat et al., 2011; Ayoubi et al., 2006). از طرفی، این موضوع به طور ضمنی نشان دهنده قدیمی بودن این سطوح ژئومورفیک می‌باشد و به عبارتی، سن سطوح ژئومورفیک نیز تأثیرگذار بوده‌اند. بنابراین چون تأثیر اقلیم بسیار بیشتر از دیگر عامل‌های خاک‌ساز مانند سنگ‌شناسی، ناهمواری‌ها و پوشش گیاهی بوده است (که این عوامل در جداسازی یگان‌های زمین‌ریختی به‌طور مستقیم وارد می‌شوند)، اقلیم گذشته اثر این یگان‌های زمین‌ریختی را در تکامل خاک پوشانده است و به همین دلیل، مقدار احتمال همه این سطوح زمین‌ریختی با هم برابر شده‌اند.

چنین مواردی در منطقه مطالعاتی برای سطح ریخت‌سرزمین با سطح سنگ‌شناسی در بسیاری از موارد دیده می‌شود. بنابراین، می‌توان گفت هرچند مواد مادری یا سنگ‌شناسی سبب تفکیک یگان‌های زمین‌ریختی شده است، اما این عامل روی تغییرات خاک‌های منطقه مطالعاتی کمتر تأثیرگذار بوده است و یا اینکه عوامل دیگر (مانند ناهمواری‌ها و اقلیم گذشته) تأثیرگذاری بیشتری داشته و نقش مواد مادری را کم‌رنگ نموده‌اند. یافته‌های همانندی توسط اسفندیارپور و همکاران (Esfandiarpour et al., 2009) و باقری بداغ‌آبادی و تومانیان (2019) برای منطقه شرق اصفهان (Bagheri Bodaghabadi & Toomanian, 2019) گزارش شده است.

شایان ذکر است که ارتباط بین خاک و اجزای نمای سرزمین بیشتر به‌طور کیفی و گاه با برخی شاخص‌های تفرق خاک (با عدد و رقم) مورد بررسی قرار گرفته‌اند (Esfandiarpour Boroujeni & Safari, 2014) و یافته‌های همانندی به‌دست آمده است. اما اعداد و ارقام مربوط به شاخص‌های تفرق خاک وقتی نسبت به همدیگر سنجیده می‌شوند، قابل تفسیر می‌باشند و یک عدد به تنهایی مفهوم خاصی ندارد. ولی عدد احتمال شرطی به تنهایی دارای مفهوم بوده و مقدار احتمال

برای منطقه شرق اصفهان نیز هم‌راستا با یافته‌های مزبور است (Toomanian et al., 2006). در بررسی تنوع یگان‌های نقشه خاک در پژوهش‌های دیگر نیز یافته‌های مشابهی ارائه شده است (Jafari et al., 2013; Esfandiarpour et al., 2009).

چنانچه مقدار احتمال شرطی برای دو یا چند سطح زمین‌ریختی به شرط وجود یک خاک تغییر نکند، این بدان معنی است که فرآیند تکاملی خاک در این دو سطح زمین‌ریختی تغییرات معنی‌داری نداشته است. برای نمونه اگر مقدار احتمال برای سطح سنگ‌شناسی با سطح ریخت‌سرزمین برابر باشد، یعنی سطح سنگ‌شناسی که پایین‌تر از سطح ریخت‌سرزمین است و باید یگان‌های همگن‌تری ایجاد کند، آن‌گونه که انتظار می‌رود، در واقعیت تغییر قابل توجهی در فرآیند تکاملی آن خاک به‌وجود نیآورده است. بنابراین، وجود یا عدم وجود آن سطح زمین‌ریختی (در اینجا سطح سنگ‌شناسی) تأثیری در جداسازی بیشتر و بهتر خاک‌ها نداشته است. با مقایسه دو جدول ۳ و ۴ و جدول‌های مربوط به سطح ریخت‌سرزمین و نمای-سرزمین (در این مقاله آورده نشده‌اند)، مشاهده می‌شود در برخی موارد، احتمال شرطی سطوح مختلف یگان‌های زمین‌ریختی به شرط وجود یک خاک، تفاوتی با هم ندارند. برای نمونه برای فامیل B یا Fine, Mixed Thermic Typic Haplargids برای سطوح مختلف زمین‌ریختی داریم:

$$P(\text{Ap111} | \text{FamilyB}) = P(\text{Ap11} | \text{FamilyB}) =$$

$$P(\text{Ap1} | \text{FamilyB}) = 0.95$$

$$P(\text{Ap} | \text{FamilyB}) = 1$$

این بدان معنی است که این فامیل خاک، چندان تحت تأثیر سطح زمین‌ریخت و سطح سنگ‌شناسی قرار نگرفته است و سطح ریخت‌سرزمین هم تأثیر کمی در تکامل آن داشته است. البته می‌توان چنین برداشتی هم داشت که تأثیر همه این سطوح روی تکامل این خاک یکسان بوده است و همه تحت تأثیر یک عامل مهم‌تر قرار گرفته‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، این خاک یک خاک Haplargids است و به عبارتی دارای افق تجمع رس یا افق آرجیلیک می‌باشد. شرایط تشکیل این افق، نیازمند آب و هوایی مرطوب و پر باران است. لیکن با توجه به اینکه این منطقه هم اکنون اقلیم خشک دارد،

زمین‌ریختی دارند (به همین دلیل احتمال مربوط به آن بیشتر می‌باشد) که به‌طور ضمنی بیان می‌کند در سطوح پایین‌تر رده‌بندی خاک، تفرق خاک‌ها بیشتر است. چنین یافته‌هایی در پژوهش‌های بسیاری به‌دست آمده است (Abbaszadeh *et al.*, Keshtkar *et al.*, 2018), (Esfandiarpour Boroujeni & Safari, 2014, 2015), (Jafari *et al.*, 2013).

مشاهده یک زمین‌ریخت را در بر اساس وجود یک یا چند خاک در منطقه مورد نظر بیان می‌کند. براساس جدول ۵، همچنین می‌توان دید برای هر سطح زمین‌ریختی از سطح فامیل به سمت سطوح بالاتر رده‌بندی خاک، مقدار احتمال شرطی کاهش یافته است. این موضوع نیز به‌طور کمی ثابت می‌کند که سطوح پایین‌تر رده‌بندی خاک، پراکنش بیشتری را در هر سطح

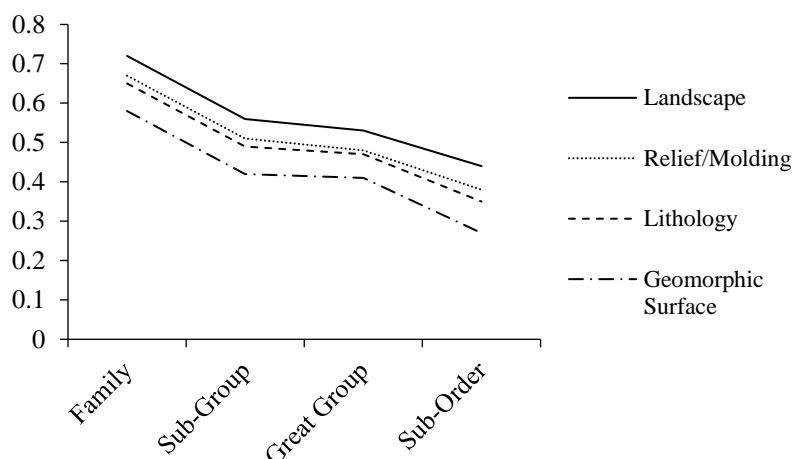
جدول ۵ - مقادیر میانگین احتمال شرطی برای سطح زمین‌ریخت‌شناختی و هر سطح رده‌بندی خاک

Table 5. The average of the conditional probability values for the geomorphological level and each level of soil taxonomical levels.

| | Sub-Order | Great Group | Sub-Group | Family |
|---------------------|-----------|-------------|-----------|--------|
| Landscape | 0.44 | 0.53 | 0.56 | 0.72 |
| Relief/Molding | 0.38 | 0.48 | 0.51 | 0.67 |
| Lithology | 0.35 | 0.47 | 0.49 | 0.65 |
| Geomorphhic Surface | 0.27 | 0.41 | 0.42 | 0.58 |

زمین‌ریخت منتصب به آن فامیل خاک را شناسایی یا تفکیک کرد. این مقدار برای سطح نمای سرزمین مربوط به آن فامیل خاک به ۷۲ درصد افزایش می‌یابد. به‌منظور درک بهتر ارتباط سطح رده‌بندی خاک با سطح یگان‌های زمین‌ریختی، یافته‌های جدول ۵ به‌صورت نمودار در شکل ۳ ارائه شده‌اند. همان‌طور که دیده می‌شود، برای دو سطح سنگ‌شناسی و ناهمواری-قالب خطوط مربوطه بسیار به هم‌دیگر نزدیک هستند. این موضوع نیز یافته‌هایی که به‌طور موردی در جدول‌های ۳ و ۴ آمده‌اند را در حالت کلی و برای همه منطقه تأیید می‌کند. به بیان دیگر در این منطقه مطالعاتی، فرآیندهایی که سبب تفکیک یگان‌های زمین‌ریختی در سطح سنگ‌شناسی شده‌اند، نتوانسته‌اند سبب تغییرات در تکامل یا پراکنش خاک‌ها بشوند.

جدول ۵ مقادیر میانگین احتمال شرطی را براساس همه مشاهدات و برای هر سطح زمین‌ریخت‌شناختی و هر سطح رده‌بندی خاک نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، روند کلی داده‌ها با آنچه مورد انتظار است، هم‌خوانی دارند. یعنی فرآیندهایی که سبب تفکیک یگان‌های زمین‌ریختی می‌شوند، روی تفکیک یا تفرق خاک‌ها هم اثرگذار بوده‌اند. این یافته‌ها با دستاوردهای پژوهش‌های دیگر که به‌طور کیفی و یا با شاخص‌های تفرق خاک به بررسی ارتباط بین خاک و نمای سرزمین پرداخته‌اند (Esfandiarpour *et al.*, Jafari *et al.*, 2013), (Toomanian *et al.*, 2006, 2009)، هماهنگ است. از طرفی، این نتایج نشان می‌دهند که در هر سطح از سطوح خاک‌شناسی، چند درصد از طبقات سلسله مراتب زمین‌خاک‌شناسی منتصب به آن خاک تفکیک می‌گردند. برای نمونه با مشاهده یک فامیل خاک می‌توان به طور میانگین با ۵۸ درصد احتمال سطح



شکل ۳- رابطه کمی بین سطح زمین‌ریخت‌شناختی و هر سطح رده‌بندی خاک (محور Y مقادیر میانگین احتمال شرطی است)
Figure 3. Quantitative relationship between geomorphological and taxonomical levels (Y axis is the average of the conditional probability values)

دلیل، برخی خاک‌ها را می‌توان فقط در زمین‌ریخت‌های ویژه‌ای یافت. این رابطه نزدیک بین خاک‌ها با شرایط محیطی حاکم بر آنها و یا به عبارت دیگر با سطوح مختلف زمین‌ریخت یک رابطه با نسبت یکسان یا ثابت نیست و تأثیر سطوح مختلف زمین‌ریخت در تکوین و تکامل خاک‌ها در منطقه مطالعاتی متفاوت می‌باشد. به طوری که تأثیر ناهمواری‌ها و سطوح زمین‌ریختی بر تکوین و تکامل خاک‌های منطقه، بیش از مواد مادری بوده است.

نتیجه‌گیری کلی

رابطه خاک با زمین‌ریخت، یک رابطه دو طرفه است و همانطور که انتظار می‌رود، هر زمین‌ریختی نشانگر یک (یا چند) خاک مشخص باشد. بنابراین، می‌توان انتظار داشت یک (یا چند) خاک مشخص نیز نشانگر زمین‌ریخت یا زمین‌ریخت‌های مشخصی باشند. در این پژوهش با احتمالات شرطی به طور کمی ثابت شد ارتباط قوی و تنگاتنگی بین تکوین و تکامل خاک با محیط زمین‌ریخت حاکم بر آن وجود دارد. به همین

References

- Abbaszadeh 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*, 5(2): 71-91.
- Ayoubi Sh., Karimian Eghbal M., and Jalalian A. 2006. Study of micromorphological evidences of climate change during quaternary recorded in paleosols from Isfahan. *Journal of Water and Soil Science*, 10 (1):137-151.
- Bagheri Bodaghabadi M., and Toomanian N. 2019. Investigation of the relationship between geopedology and soil taxonomy in the soil-landscape models using conditional probabilities. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 10.22059/IJSWR.2019.267060.668023 (In Press).
- Baveye P. 2002. Comment on "Modeling soil variation: past, present and future" by G.B.M. Heuvelink and R. Webster. *Geoderma*, 109: 289-293.
- Bayat O., Karimzadeh H., and Khademi H. 2011. Clay minerals in two paleosols on geomorphic surfaces in Eastern Isfahan. *Ranian. Journal of Crystallography and Mineralogy*, 19 (1): 45-58.
- Dobermann A., Goovaerts P., and Neue H.U. 1997. Scale-dependent correlations among soil properties in two tropical lowland rice fields. *Soil Science Society of America Journal*, 61: 1483-1496.

- Esfandiarpour Boroujeni I., and Safari Y. 2014. Comparison of Functional Pedodiversity in Two Detailed Soil Map Units (A Case Study: Faradonbeh Plain, Chaharmahal-Va-Bakhtiari Province). *Journal of Water and Soil Science*, 18 (67): 267-277.
- Esfandiarpour Boroujeni I. (2009) *Generalization of Geopedological approach in Soil Mapping*. Shahrekord University. 105p. (In Persian)
- Farpoor M.H. 2001. The Relationship between Geomorphology and Evolution of Gypsum Soils in Rafsanjan Area, PhD dissertation of Soil Science, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology. 215p.
- Goovaerts P., and Journel A.G. 1995. Integrating soil map information in modelling the spatial variation of continuous soil properties. *European Journal of Soil Science*, 46: 397-414.
- 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.
- 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*, 8(1): 89-106.
- Owliaie H., Najafi Ghiri M., and Shakeri S. 2018. Soil-landscape relationship as indicated by pedogenesis data on selected soils from Southwestern, Iran. *Eurasian Journal of Soil Science*, 7 (2): 167 – 180.
- Phillips J.D. 2009. "Soils as extended composite phenotypes". *Geoderma*, 149: 43–151.
- Phillips J.D. 2001. Divergent evolution and the spatial structure of soil landscape variability. *Catena*, 43: 101–113.
- Rossiter D.G. 2000. Methodology for soil resource inventories. Lecture notes, 2nd Revised Version, Soil Science Division, International Institute for Aerospace Survey and Earth Science (ITC), Enschede, The Netherlands. 82p.
- Schaetzl R.J., and Anderson, S. 2005. Soils: genesis and geomorphology. Cambridge University Press, New York, USA. 840p.
- Schoeneberger P.J., Wysocki D.A., Benham E.C. and soil survey staff. 2012. Field book for describing and sampling soils, Version 3.0. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE. 300p
- Soil Science Division Staff. 2017. Soil survey manual. C. Ditzler, K. Scheffe, and H.C. Monger (Eds.). USDA Handbook 18. Government Printing Office, Washington, D.C. 841p.
- Soil Survey Staff. 1996. Soil survey laboratory methods manual. Report No. 42, USDA, NRCS, NCSS, USA. 389p.
- Soil Survey Staff. 2014. Keys to soil taxonomy (12th Ed.). NRCS, USDA, USA. 214p.
- Stallins J. A. 2006. "Geomorphology and ecology: Unifying themes for complex systems in biogeomorphology". *Geomorphology*, 77: 207–216.
- Toomanian N., Jalalian A., Khademi H., Karimian Eghbal M., and Papritz A. 2006. Pedodiversity and pedogenesis in Zayandeh-rud Valley, Central Iran. *Geomorphology*, 81: 376–393.
- Wysocki D.A., Schoeneberger P.J., and LaGarry H.E., 2000. Geomorphology of soil landscapes. In: M.E. Sumner (Ed.), Handbook of soil science. Boca Raton, FL, CRC Press, pp. 5-39.
- Zinck J.A. 1989. Physiography and soils. Lecture notes for soil students. Soil Science Division, Soil survey courses subject matter: K6 ITC, Enschede, The Netherlands. 118p.

Investigating the Interconnection of Soil-Forming Processes with Geomorphological Processes

Mohsen Bagheri Bodaghabadi^{1*}, Norair Toomanian

(Received: April 2019 Accepted: July 2019)

Abstract

Soils are the outermost layer of the earth's crust, and they are closely interrelated with the formation of the land on which they are formed and developed. Therefore, any change in the geomorphic processes affects the soil-forming processes. "Soil geomorphology" is an assessment of the genetic relationships between soils and landforms. Although the relationships between landforms and soils have been investigated by researchers, a quantitative evaluation of the relationship between soil and geomorphic surface has been less considered. However, the soil-geomorphology relationship is a two-way relationship, and a question arises here is that how an observed soil can indicate geomorphic surfaces or landforms? Accordingly, the current research tries to examine this issue with the use of statistics and conditional probability. For this purpose, the geomorphic units of the central region of Isfahan were delineated using geopedology approach (Zinck method) and 344 soil profiles were analyzed, and the conditional probability of the existence of each geomorphic unit was obtained on condition of observation of different soils. The findings quantitatively showed that there is a strong and close relationship between soil development and formation and the geomorphic condition, so that some soils can be found only in certain geomorphic unit. In other words, the soil is an indicator/unique soil for the geomorphic unit. Due to the similar relationship between the geomorphical levels and the soil taxonomical levels, the diversity increased as the taxonomical levels increased from orders to the families. Also, the findings showed slightly in the study area that the effect of "landforms and topography" on the development and formation of soils is more than parent material.

Keywords: Conditional probability, Geopedology, Soil mapping

Bagheri Bodaghabadi M., Toomanian N. 2020. Investigating the interconnection of soil-forming processes with geomorphological processes. *Applied Soil Research*. 8(2):174-189.

1. Soil and Water Research Institute (SWRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

2. Soil and Water Research Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Isfahan, Iran

* Corresponding Author Email: m.baghery@areeo.ac.ir