



## Evaluation of selected soil development indices in soils derived from sedimentary and igneous rocks, northern Kerman

Elham Soleimani Sardoo<sup>1</sup> | Mohammad Hady Farpoor<sup>2✉</sup> | Majid Mahmoodabadi<sup>3</sup> | Azam Jafari<sup>4</sup>

1. Department of Soil Science, Faculty of Agricultural, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran. Email: [elhamsoleimani@agr.uk.ac.ir](mailto:elhamsoleimani@agr.uk.ac.ir)

2. Corresponding Author, Department of Soil Science, Faculty of Agricultural, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran. E-mail: [farpoor@uk.ac.ir](mailto:farpoor@uk.ac.ir)

3. Department of Soil Science, Faculty of Agricultural, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran. Email: [mahmoodabadi@uk.ac.ir](mailto:mahmoodabadi@uk.ac.ir)

4. Department of Soil Science, Faculty of Agricultural, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran. Email: [a.jafari@uk.ac.ir](mailto:a.jafari@uk.ac.ir)

---

---

### Article Info

**Article type:** Research Article

**Article history:**

**Received:** Dec. 6, 2022

**Revised:** Feb. 26, 2023

**Accepted:** Feb. 27, 2023

**Published online:** March. 21, 2023

**Keywords:**

Central Iran,  
Clay Coating,  
Geochemistry  
Soil color.

### ABSTRACT

The present research performed to investigate soil evolution in soils developed on sedimentary and igneous parent materials, northern Kerman. Four representative pedons were selected. Physicochemical properties and Micromorphological features investigated in soil samples. The principal oxides content measured using ICP-OES. Color, clay accumulation, Fe content, and geochemical indices were used to assess soil development in the studied pedons. Studied profiles classified in Aridisols order and Calcite, Gypsic and Argillic horizons were dominant. Mean of pedogenic, free, crystalline, and active Fe contents were determined as 9.4, 0.5, 8.8 g/kg and 0.06, respectively. The values of clay and Fe accumulation indices were obtained 17 (in pedon 3) to 76.5 (in pedon 2) and 24344 (in pedon 2) to 2788 (in pedon 3), respectively. The results showed the correlation between Fe contents and color indices at the 99% level. The mean weight of principal oxides noticeably increased in pedons 1 and 3 compared to other studied pedons. All of geochemical indices, except WIP, showed higher weathering in pedons 1 and 3. The results of color, Fe oxides and clay accumulation and CIW, CIA, PWI, V, PIA, STI and R geochemistry indices demonstrated higher evolution of pedon 3 compared to other studied soils. No significant difference in development rate related to parent materials change was found. Likely, various evolution of studied pedons was due to interactions among geochemical indices and soil-forming factors and processes.

---

Cite this article: Soleimani Sardoo, E. Farpoor, M. H., Mahmoodabadi, M. & Jafari, A. (2023). Evaluation of Selected Soil Development Indices in Soils Derived from Sedimentary and Igneous Rocks, Northern Kerman. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54 (1), 85-103. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.352148.669407>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.352148.669407>



## ارزیابی برخی شاخص‌های تکامل خاک در خاک‌های متأثر از سنگ‌های رسوبی و آذرین شمال کرمان

الهام سلیمانی ساردو<sup>۱</sup> | محمد هادی فرپور<sup>۲</sup> | مجید محمودآبادی<sup>۳</sup> | اعظم جعفری<sup>۴</sup>۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. رایانامه: [elhamsoleimani@agr.uk.ac.ir](mailto:elhamsoleimani@agr.uk.ac.ir)۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. رایانامه: [farpoor@uk.ac.ir](mailto:farpoor@uk.ac.ir)۳. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. رایانامه: [mahmoodabadi@uk.ac.ir](mailto:mahmoodabadi@uk.ac.ir)۴. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. رایانامه: [a.jafari@uk.ac.ir](mailto:a.jafari@uk.ac.ir)

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	مطالعه حاضر با هدف بررسی تکامل خاک در خاک‌های توسعه‌یافته از مواد مادری آذرین و رسوبی شمال کرمان انجام شده است. جهت نیل به هدف مذکور تعداد ۴ خاک‌خ در منطقه مورد مطالعه حفر و تشریح گردید و نمونه‌های خاک جهت انجام آزمایشات فیزیکوشیمیایی و بررسی عوارض میکرومورفولوژیک برداشت شدند. مقادیر اکسیدهای اصلی توسط دستگاه ICP-OES اندازه‌گیری شد. میزان تکامل خاک‌های مورد مطالعه با استفاده از شاخص‌های رنگ، تجمع رس، مقادیر آهن و شاخص‌های ژئوشیمیایی ارزیابی شد. خاک‌های مطالعاتی در راسته اریدی-سول بوده که غالباً دارای افق‌های کلسیک، ژپسیک و آرجیلیک می‌باشند. میانگین مقادیر آهن پدوژنیک، آزاد، بلوری و فعال در نمونه‌های مورد مطالعه به ترتیب برابر با ۹/۴، ۰/۵، ۸/۸ گرم بر کیلوگرم و ۰/۰۶ می‌باشد. مقادیر شاخص‌های تجمع رس و آهن به ترتیب از مقدار ۱۷ در خاک‌خ ۳ تا ۷۶/۵ در خاک‌خ ۲ و مقدار ۲۴۳۴۴ در خاک‌خ ۲ تا ۲۷۸۸ در خاک‌خ ۳ به دست آمد. نتایج بیانگر همبستگی در سطح ۹۹ درصد بین مقادیر آهن و شاخص‌های رنگ بود. میانگین وزنی اکسیدهای اصلی افزایش محسوسی در خاک‌های ۱ و ۳ نسبت به سایر خاک‌ها داشت. تمامی شاخص‌های ژئوشیمیایی، به جز WIP، شدت هوادیدگی بالاتری را در خاک‌های ۱ و ۳ نشان دادند. نتایج بررسی شاخص‌های رنگ، تجمع اکسید آهن و رس و شاخص‌های ژئوشیمیایی CIA، CIW، PIA، VW، STI و R در منطقه مطالعاتی تکامل بالاتر خاک‌خ ۳ در مقایسه با سایر خاک‌ها را اثبات کرد. تفاوت محسوسی در شدت هوادیدگی با تغییر مواد مادری مشاهده نشد. بنابراین تغییرات در میزان تکامل خاک‌های مطالعاتی نتیجه تأثیر متقابل نوع موادمادری و عوامل و فرایندهای خاکساز می‌باشند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۹/۱۵	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۷	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۸	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱/۱	
واژه‌های کلیدی:	
ایران مرکزی،	
پوشش رسی،	
رنگ خاک،	
ژئوشیمی.	

استناد: سلیمانی ساردو، الهام؛ فرپور، محمد هادی؛ محمودآبادی، مجید؛ و جعفری، اعظم. (۱۴۰۲). ارزیابی برخی شاخص‌های تکامل خاک در خاک‌های متأثر از سنگ‌های رسوبی و آذرین شمال کرمان. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۴ (۱)، ۸۵-۱۰۳. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.352148.669407>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.352148.669407>

## مقدمه

ارزیابی ژنتیکی تکامل خاک با توجه به وابستگی بسیاری از تصمیم‌گیری‌های مدیریتی به رده‌بندی خاک و میزان تکامل آن از اهمیت وافری برخوردار است (منتخبی کلجاهی و همکاران، ۱۳۹۵). ویژگی‌هایی که برای بیان درجه تکامل خاک استفاده می‌شوند، اغلب بوسیله هوادیدگی تغییر کرده یا تحت تأثیر آن قرار می‌گیرند. برخی از این خصوصیات شامل: شاخص تجمع رس (Singh et al., 1998) و اکسید آهن (Simon et al., 2000) و تغییر شکل آهن پدوژنیک (Birkeland et al., 1989) می‌باشند. ماهیت این شاخص‌های کمی بر پایه نسبت اکسیدهای متحرک به غیرمتحرک می‌باشد. به طوری که افزایش سن خاک و هوادیدگی سبب کاهش اکسیدهای غیرمتحرک مانند CaO, MgO, K<sub>2</sub>O و Na<sub>2</sub>O و ابقاء اکسیدهای متحرک مانند Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و TiO<sub>2</sub> می‌گردد (Duzgoren-Aydin et al., 2002). درجه تکامل خاک در واقع نشان‌گر میزان و نوع فرایندهای خاک‌سازی مختلف دخیل در تحولات آن خاک نیز می‌باشد، بنابراین در بررسی درجه تکامل معمولاً از صفاتی استفاده می‌شود که در اثر هوادیدگی و عملکرد فاکتورهای خاک‌سازی ایجاد شده یا تغییر می‌یابند (Schaetzl and Thompson, 2015). تشکیل و توسعه یافتگی افق آرچلیک نیز می‌تواند به عنوان یکی از شاخص‌های بررسی تکامل خاک استفاده گردد (منتخبی کلجاهی و همکاران، ۱۳۹۵؛ آزادی و همکاران، ۱۴۰۰). میزان تکامل راسته‌های مختلف خاک‌های آلفی سول، مالی سول و اریدی سول بخش شمال و شمال غرب ایران که بصورت مشترک دارای افق آرچلیک بودند، از شاخص‌های تجمع رس و میکرومورفولوژی استفاده کردند، که در نهایت مقایسه‌ی خاک‌های مطالعه شده با شاخص‌های مربوطه نشان داد تکامل در خاک‌هایی با تمرکز بر روی شستشو و تجمع رس، بیشتر می‌باشد بطوری که در آنها نقل و انتقال رس همراه با سایر املاح و مواد صورت نگرفته باشد، به عبارت دیگر وجود چندین فرایند همزمان در خاک نشان‌دهنده تمایز یافتگی افق‌ها می‌باشد که مفهوم آن با تکامل یافتگی خاک متفاوت است (منتخبی کلجاهی و همکاران، ۱۳۹۵). تکامل افق‌های آرچلیک در خاک‌های آهکی جنوب ایران، با استفاده از شاخص‌های مرتبط با میکرومورفولوژی، آهن، رنگ و کانی‌شناسی خاک شامل: MISECA<sup>۱</sup>، آهن آزاد، تجمع رس، رنگ خاک و نسبت کانی‌های اسمکتیت به مجموع کلریت و ایلیت مطالعه شد، که نتایج بیانگر همبستگی قوی شاخص MISECA با آهن آزاد، شاخص رنگ، تجمع رس و نسبت اسمکتیت به مجموع کلریت و ایلیت، در ارزیابی افق آرچلیک در خاک‌های آهکی بود (Khormali et al., 2003). مطالعه ترکیب و فراوانی اکسیدهای آهن به وسیله خصوصیات مانند رنگ خاک و یا شاخص‌هایی مانند Feo (آهن آزاد) و Fed (آهن پدوژنیک) امکان مطالعه تحولات در حین تشکیل خاک را فراهم می‌آورد (Evans and Heller, 2003). تعیین نسبت Feo/Fed بعنوان نسبت آهن فعال، می‌تواند تا حدودی نشان‌دهنده مراحل هوادیدگی باشد، نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که در مراحل اولیه هوادیدگی و تکامل خاک ممکن است آزادسازی آهن بی‌شکل یا غیر کریستالی از کانی‌های خاک، از میزان تشکیل آهن بلوری بیشتر گردد و سبب افزایش Feo/Fed شود (Azadi, et al., 2021a).

هوادیدگی شیمیایی بعنوان یک خصوصیت مهم از چرخه خاک‌سازی و ژئوشیمیایی عناصر محسوب می‌شود، به طوری که، چندین ویژگی منطقه‌ای مانند: شرایط اقلیمی، شرایط فیزیکوشیمیایی، انواع سنگ‌ها و مورفولوژی بر رفتار عناصر در طول هوادیدگی پروفیل خاک تأثیر می‌گذارند (Tematio et al., 2017). مقدار عناصر اصلی و کمیاب در خاک‌های بکر به زمین‌شناسی مواد مادری خاک و فرایندهای ژئوشیمیایی و خاک‌سازی مرتبط به تشکیل خاک وابسته می‌باشد. با توجه به اینکه، علم ژئوشیمی به بررسی غلظت، روند توزیع و مهاجرت عناصر مختلف طی تشکیل خاک از مواد مادری می‌پردازد، استفاده از شاخص‌های ژئوشیمیایی می‌تواند یک توصیف کمی از وضعیت هوادیدگی خاک ارائه نماید (شاکری و همکاران، ۱۳۹۹؛ Schaetzl and Thompson, 2015). (Tazikeh et al., 2018). روی خاک‌های متأثر از مواد مادری رسوبی در شمال شرق ایران، اهمیت اثر نوع مواد مادری بر ژئوشیمی خاک در مناطق خشک را اثبات کردند. نتایج بررسی تأثیر هوادیدگی و کانی‌شناسی در توزیع عناصر اصلی و کمیاب در هرمزگان نشان داد که شاخص‌های CIA<sup>۲</sup>، CIW<sup>۳</sup>، PWI<sup>۴</sup> و WIP<sup>۵</sup> تغییرات مواد هوازده و غیرهوازده را به خوبی بیان می‌کنند و نهایتاً به عنوان شاخص توسعه خاک معرفی شدند (Abbaslou et al., 2013). (Yousefifard et al (2012) جهت ارزیابی شدت هوادیدگی خاک‌های توسعه یافته از سنگ‌های آذرین در بخشی از اقلیم

1 . Micromorphological Index of Soil Evolution in highly Calcareous arid to semiarid Conditions

2 . Chemical Index of Alteration

3 . Chemical Index of Weathering

4 . Product of Weathering Index

5 . Weathering Index of Parker

نیمه‌خشک شمال غربی ایران از تغییر مقادیر رس و آهن پدوژنیک و شاخص‌های ICV<sup>۱</sup> و CIA استفاده کردند. نتایج بیانگر توسعه‌یافتگی بیشتر خاک‌های حاصل از سنگ‌های آذرین ولکانیک در مقایسه با پلوتونیک<sup>۲</sup> بود. (Koop et al., 2020) با رویکرد جدید به ارزیابی شاخص‌های تکامل خاک پرداختند، بنابراین برای بررسی شاخص‌های توسعه پروفیلی (PDI<sup>۳</sup>) و افقی (HDI<sup>۴</sup>) به جای خصوصیات مواد مادری، مطالعه خصوصیات نسبی و اولیه افق‌ها را مبنا قرار دادند. برای این منظور به بررسی فاکتورهای اندازه ذرات، کربنات کلسیم معادل، رنگ و پوشش‌های رسی پرداختند. در نهایت یافته‌های آنها نشان داد هر دو شاخص‌های PDI و HDI در مقیاس‌های جغرافیایی بزرگ معتبر می‌باشند. (Mei et al., 2021) طی مطالعه‌ای تفاوت رفتاری فرایندهای هوازدگی و خاکسازگی در یک منطقه گرانیتهی مرطوب نیمه گرمسیری را بررسی کردند. یافته‌های آنان تغییرات پیچیده فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی در خاک‌ها و تفاوت فرایندهای خاکساز و هوازدگی بویژه در منطقه مورد مطالعه را نشان داد. (Daher et al., 2022) بیان کردند بر اساس ژئوشیمی عناصر اصلی و کمیاب، انواع خاک‌ها توسط ترکیب ژئوشیمیایی و تا حد زیادی نوع ماده مادری خود متمایز می‌شوند. (Oyebanjo et al., 2021) مطالعه‌ای جهت بررسی کانی‌شناسی و ژئوشیمی بخش رسی خاک‌های توسعه یافته در مواد مادری متفاوت بخشی از آفریقای جنوبی انجام دادند. نتایج نقش مهم تأثیر متقابل مواد مادری، اقلیم و شدت هوازدگی را در تغییرات کانی‌شناسی و ژئوشیمی بخش رسی خاک‌های مطالعاتی نشان دادند. (Habibi et al., 2019) طی مطالعه‌ای به بررسی روابط بین شاخص‌های شیمیایی خاک توسعه یافته و هوازدگی در مواد مادری مختلف در شهرستان میانداوب پرداختند. نتایج نشان داد خاک‌ها در راسته‌های انتی‌سول و اینسپتی‌سول و بخش مهمی از شکل آهن آنها در فرم آهن بلوری قرار می‌گیرند. بررسی‌های ژئوشیمیایی بیانگر تأثیر بالای زمین‌شناسی و ترکیب مواد مادری بر شدت و میزان هوازدگی شیمیایی خاک‌های مطالعاتی بود. از لحاظ شاخص‌های هوازدگی، شاخص‌هایی که از نسبت اکسیدهای غیرمتحرک به متحرک حاصل می‌شوند، بیشترین تناسب را با تخمین شدت هوازدگی داشتند (Habibi et al., 2019).

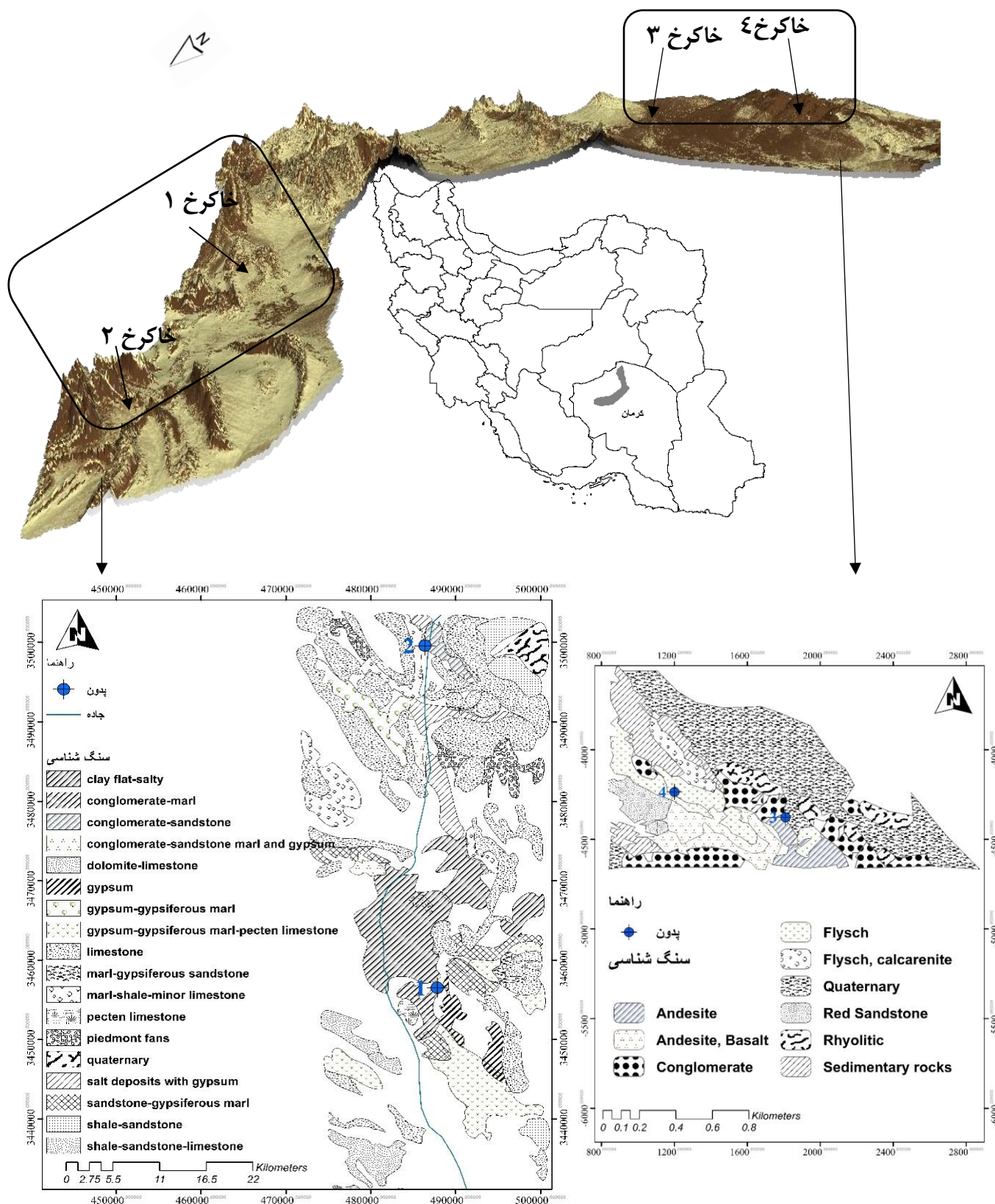
شدت و ماهیت هوازدگی شیمیایی توسط متغیرهای مختلف مانند توپوگرافی، اقلیم، فعالیت‌های بیولوژیکی و به صورت قوی به وسیله سنگ‌شناسی و ترکیبات مواد مادری کنترل می‌گردد (Islam et al., 2002; Bluth & Kump, 1994). با عنایت به فقدان تحقیقات در زمینه بررسی شاخص‌های تکامل در منطقه مطالعاتی و مقایسه آن در مواد مادری متفاوت، مطالعه حاضر جهت نیل به اهداف ذیل انجام گرفت: ۱. بررسی شاخص‌های رنگ، مقادیر آهن و رس و ژئوشیمیایی در قسمت‌های رسوبی و آذرین در بخش شمالی استان کرمان ۲. ارزیابی شدت شاخص‌های هوازدگی مختلف در خاک‌های حاصل از مواد مادری رسوبی و آذرین ۳. تعیین شاخص متناسب با وضعیت هوازدگی خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک متأثر از عوامل خاکسازگی مشابه.

## مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه در شمال استان کرمان با مختصات جغرافیایی ۵۲° ۵۶' تا ۴۵° ۵۵' درجه طول شرقی و ۰۲' ۳۰° تا ۴۵' ۳۱° درجه عرض شمالی قرار گرفته است. این منطقه دارای تعداد روزهای بارانی و یخبندان به ترتیب ۱۲۹/۶ و ۶۶/۷ روز در سال، متوسط رطوبت نسبی ۳۹/۶ و درجه حرارت متوسط سالانه ۱۹ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. میانگین بارندگی سالانه آن ۱۲۸/۲ میلی‌متر است (www.climate-data.org). خاک‌های منطقه مطالعاتی دارای رژیم رطوبتی اریدیک و رژیم حرارتی ترمیک می‌باشند (بنایی، ۱۳۷۸). از مهمترین ساختارهای تکتونیکی موجود در منطقه می‌توان به ساختارهای گسلی، چین‌خوردگی‌ها و راندهای زمین‌شناسی منطقه به دوران کرتاسه برمی‌گردند. وجود آهک و گچ در افق‌های مورد مطالعه نیز می‌تواند متأثر از سازندهای با سنگ‌شناسی آهکی و تبخیری متعلق به این دوران باشد. بخش تبخیری واحدهای کرتاسه از ترکیبات گچ و نمک تشکیل شده است. واحد کربناتی بر روی بخش تبخیری قرار دارد و شامل آهک‌های کرتاسه می‌باشد. در بالادست شهر میمند واقع در شهرستان شهرابک استان کرمان آتشفشانی بر فراز کوه مزاحم<sup>۵</sup> قرار دارد که منشأ بسیاری از سنگ‌های آذرین موجود در پایین دست منطقه می‌باشد، بطوری که خاک‌های بخش آذرین مورد مطالعه متأثر از سنگ‌های آذرین بازالت و حدواسط آندزیت و توف‌های حاصل از خاکسترهای آتشفشانی، در حدفاصل شهرستان‌های رفسنجان و شهرابک، می‌باشند. خاک‌های قسمت رسوبی مورد مطالعه در مجاورت چین‌خوردگی‌های رسوبی

1 . Index of Compositional Variability  
2 . Plutonic  
3 . Profile Development Indices  
4 . Horizon Development Indices  
5 . Masahim Volcano

شهرستان راور واقع در شمال استان کرمان تا مسیر جاده کرمان-یزد واقع شده‌اند، که شامل سنگ‌شناسی ماسه‌سنگ، سطوح رسی و نمکی دوران کواترنری، مارن قرمز گچی، شیل گچ‌دار و سنگ آهک می‌باشند (سازمان زمین‌شناسی ایران، ۱۳۷۴) (شکل ۱).



شکل ۱. موقعیت خاکرخ‌ها در منطقه مورد مطالعه

پس از بررسی منطقه مورد مطالعه روی گوگل ارث و نقشه‌های زمین‌شناسی تعداد چهار خاکرخ در منطقه انتخاب گردید. خاکرخ ۱ و ۲ در بخش رسوبی و خاکرخ ۳ و ۴ در بخش آذرین حفر گردید. هر کدام از خاکرخ‌ها بر مبنای راهنمای تشریح و نمونه‌برداری خاکرخ مرکز ملی حفاظت خاک تشریح شد (Schoeneberger et al., 2012). تعداد ۲۴ نمونه خاک از این خاکرخ‌ها جمع‌آوری و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شامل pH در خمیر اشباع (به‌وسیله pH متر Jenway)، قابلیت هدایت الکتریکی خاک در عصاره اشباع (توسط EC متر مدل Jenway)، بافت خاک به روش پیپت (Gee and Bauder, 1986)، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون برگشتی (Page et al., 1982) انجام گرفت. ظرفیت تبادل کاتیونی توسط اشباع خاک از کاتیون سدیم با استات سدیم و شستشوی آن با الکل اتیلیک و رساندن هدایت الکتریکی به زیر ۴۰ میکروزیمنس و سپس جایگزینی آمونیوم به جای سدیم بر روی کلئیدها و اندازه‌گیری سدیم موجود در محلول با دستگاه فلیم‌فتمتر صورت گرفت (Chapman, 1996). کربن آلی به روش سوزاندن تر با بی‌کرومات پتاسیم باقی‌مانده توسط فروآمونیم سولفات (Nelson and Sommers, 1996)، درصد گچ به روش استون (Nelson, 1982)، آهن پدوژنیک (Fe<sub>d</sub>) (آلی)، بلورین و بی‌شکل) توسط سیترات-بیکربنات-دی‌تیونات (CBD) (Mehra and Jackson, 1958) و آهن آزاد (آلی و بی‌شکل) (Fe<sub>o</sub>) به‌وسیله استخراج اگزالات آمونیوم در تاریکی در pH=3 (Schwertmann, 1973) اندازه‌گیری شد.

مقاطع نازک مربوط به ۲ کلوخه دست‌نخورده خاک از افق Bk از خاکرخ ۳ و افق 2Btk از خاکرخ ۱، به نمایندگی از خاکرخ‌های مطالعاتی برای بررسی میکرومورفولوژی انتخاب شدند. به این منظور از رزین سه جزئی جهت اشباع کردن نمونه‌های خاک استفاده گردید (Stoops, 2003). نمونه‌ها پس از گذشت تقریباً ۱۰ روز، در شرایط هوای آزاد سخت و خشک شدند. نمونه‌های اشباع و خشک شده برای تهیه مقطع نازک آماده گردید. به دلیل وجود گچ و مواد انحلال‌پذیر در نمونه‌ها از نفت برای سایش مقاطع نازک استفاده شد. در نهایت با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان مدل BK-POL-TB در دو حالت نور پلاریزان صفحه‌ای (PPL) و متقاطع (XPL) بر اساس راهنمای استوپس (۲۰۰۳) تشریح و عکس‌برداری از مقاطع انجام شد.

شاخص‌های مورد مطالعه تکامل خاک

شاخص‌های رنگ خاک اولین و ساده‌ترین ویژگی‌های سنجش کمی توسعه خاک هستند. Torrent et al., (1980 and 1983) فاکتوری تحت عنوان میزان قرمزی (RR<sup>۱</sup>) تعریف کردند (رابطه ۱). Santana, (1984) نیز طی مطالعه‌ای جهت بررسی همبستگی رنگ خاک و اکسیدهای آهن با توجه به معادله پیشنهادی Torrent et al., (1983 and 1980) تحت عنوان فاکتور قرمزی (RF<sup>۲</sup>) بصورت رابطه (۲) تعریف کرد. به طوری که در رابطه ۱ و ۲، C و V به ترتیب کروما و ولیوی مانسل و H بر اساس اعداد قبل از هیو تعریف می‌شوند: 7.5R= 12.5, 10R= 10, 2.5YR= 7.5, 5YR= 5, 7.5YR= 2.5, 10YR= 0

$$RR = H \times C/V \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$RF = (10-H) + C/V \quad \text{رابطه (۲)}$$

شاخص تجمع رس (CAI<sup>۳</sup>) و تجمع اکسیدهای آهن (IOAI<sup>۴</sup>) در ارتباط با افق‌های B و C ارائه شده توسط Levine and Ciolkosz, (1983) برای تعیین درجه توسعه و سن خاک بصورت رابطه (۳) محاسبه می‌شود؛ به طوری که برای شاخص تجمع رس B<sub>c</sub> درصد رس در افق B، C<sub>c</sub> درصد رس در افق C و T ضخامت افق B به سانتی‌متر می‌باشد.

$$CAI = (B_c - C_c) \times T \quad \text{رابطه (۳)}$$

شاخص تجمع اکسیدهای آهن مانند شاخص تجمع رس است با این تفاوت که در آن به جای درصد رس از درصد آهن آزاد در افق‌های B و C استفاده می‌شود (Levine and Ciolkosz, 1983).

$$IOAI = (B_c - C_c) \times T \quad \text{رابطه (۴)}$$

با اندازه‌گیری فرم‌های مختلف آهن می‌توان تا حدود زیادی به سن نسبی خاک پی برد، به این منظور اختلاف مقادیر آهن بی‌شکل یا آزاد (Fe<sub>o</sub>) و آهن پدوژنیک (Fed)، نشان دهنده اکسیدهای آهن بلوری (Fed=Fe<sub>o</sub>) خواهد بود. با افزایش سن و درجه تکامل خاک، میزان Fed افزایش می‌یابد. شاخص Fed/Fed<sub>o</sub> نیز نماینده درجه تبلور اکسیدهای آهن می‌باشد که به آن نسبت آهن فعال گفته می‌شود و نشان دهنده شدت فرایندهای خاکساز و تکامل خاکرخ بوده بطوریکه با تداوم بیشتر فرایندهای خاکساز، این نسبت کاهش خواهد

یافت (Azadi, et al., 2021a; Yousefifard et al., 2012; Owliaie and Najafi Ghiri, 2018).

جهت آنالیز ژئوشیمی نمونه‌ها ترکیب عناصر اصلی  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  و  $\text{TiO}_2$  از منابع و روش‌های ارائه شده توسط محققین مختلف، اندازه‌گیری شد (جدول ۱). همه شاخص‌های شیمیایی توانایی نمایش پیچیدگی‌های خاک‌های هوازده را ندارند و لازم است شاخص یا شاخص‌های هوازدگی مناسب برای هر منطقه بررسی شوند (Duzgoren-Aydin et al., 2002). انتظار می‌رود با افزایش شدت هوازدگی، اکسیدهای اصلی غیرمتحرک مانند  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  و  $\text{TiO}_2$  ثابت باقی بمانند و اکسیدهای متحرک  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  و  $\text{K}_2\text{O}$  کاهش یابند (Duzgoren-Aydin et al., 2002).

جدول ۱. رابطه شاخص‌های ژئوشیمیایی مورد مطالعه

شاخص	معادله	منبع
WIP	$(2\text{K}_2\text{O}/0.25+2\text{Na}_2\text{O}/0.35+\text{CaO}/0.7+\text{MgO}/0.9)$	Parker (1970)
CIW	$\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}) \times 100$	Harnois (1988)
V	$(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{K}_2\text{O})/(\text{MgO}+\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O})$	Roaldset (1972)
CIA	$\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CaO}+\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}) \times 100$	Nesbitt and Young (1984)
PIA	$(\text{Al}_2\text{O}_3-\text{K}_2\text{O})/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}) \times 100$	Fedo et al. (1995)
R	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	Ruxton (1968)
STI	$(\text{SiO}_2/\text{TiO}_2)/[(\text{SiO}_2/\text{TiO}_2)+(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)+(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2)] \times 100$	Jayawardena and Izawa (1994)
PWI	$[\text{SiO}_2/(\text{TiO}_2+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)] \times 100$	Souri et al. (2006)

Notes: WIP: Weathering Index of Parker, CIW: Chemical Index of Weathering, V: Vogt Ratio, CIA: Chemical Index of Alteration, PIA: Plagioclase Index of Alteration, WI: Weathering Index, R: Silica/Alumina, STI: Silica-Titanium Index, PWI: Product of Weathering Index.

مطابق با درجه پیشرفت هوازدگی در هر منطقه ممکن است شاخص‌های متفاوتی برای شرایط مختلف اقلیمی، انواع مختلف مواد مادری و شرایط تشکیل خاک قابل استفاده باشند. شاخص هوازدگی پارکر (PWI) بر اساس غلظت عناصر قلیایی و قلیایی خاکی در فاز سیلیکاتی مواد هوازده می‌باشد و مقادیر پایین آن نشان دهنده شدت هوازدگی بیشتر سیلیکات‌ها خواهد بود (Souri et al. 2006). شاخص PWI مبین هوازدگی سیلیکات‌ها و شاخص‌های CIA، CIW، PIA، نیز نشان دهنده هوازدگی کانی‌های فلدسپار می‌باشند. شاخص CIA بر پایه رابطه Al غیرمتحرک با کاتیون‌های متحرک مثل: کلسیم، سدیم و پتاسیم می‌باشد (Nesbitt and Young, 1982). شاخص WIP برای سنگ‌های سیلیکاته مانند سنگ‌های آذرین اسیدی، حدواسط و بازی به کار می‌رود و قادر است تغییرات کوچک در سدیم، پتاسیم، کلسیم و منیزیم را ارزیابی کند. شاخص V جهت تعیین میزان هوازدگی وضعیت رس‌ها در رسوبات کواترنری قسمتی از نروژ توسعه یافت (Roaldset, 1972). Ruxton, (1968) شاخص R را در خاک‌های هوازده توسعه یافته در سنگ‌های آذرین و دگرگونی مناطق مرطوب در سراسر جهان مورد آزمون قرار داد، نتایج بیانگر همبستگی R با از دست رفتن کل عناصر بود.

## نتایج و بحث

خاک‌های ۱ و ۲ در مجاورت چین‌خوردگی‌های (تاق‌دیس‌ها و ناودیس‌ها) رسوبی واقع در شمال کرمان حفر شدند. بنابراین، احتمال می‌رود خصوصیات فیزیکی و شیمیایی این خاک‌ها تا حدودی تحت تأثیر سازندها و سنگ‌شناسی چین‌خوردگی‌های رسوبی باشند. خاک‌های ۳ و ۴ نیز در بخش آذرین حفر گردید. بررسی نتایج تجزیه‌های آزمایشگاهی خاک‌های ۲ و ۴ افق‌های پایینی خاک‌های ۴ بیانگر تجمع رس در توالی با افق‌های کربناتی می‌باشد (جدول ۲ و شکل ۲). حضور توأم کربنات کلسیم و رس در یک افق نشان دهنده این است که بعد از سستشو و تجمع رس، اقلیم تغییر کرده و خشک شدن اقلیم انباشت مجدد کربنات کلسیم را در پی داشته است. تشکیل افق‌های مرکب کلسیک -آرجیلیک نشانه‌ای از پلی‌ژنر بودن خاک است که در نتیجه تغییر اقلیم از مرطوب به خشک حاصل می‌شود (منتخبی کلجاهی و همکاران، ۱۳۹۵).

مشاهده انتقال و پوشش‌های رسی در افق‌های میانی و انتهایی خاک‌های ۱، ۲ و ۴ بیانگر وجود فرایند آرجیلی شدن می‌باشد (شکل ۲). از آنجایی که تشکیل افق آرجیلیک و بروز فرایند مربوطه مستلزم حضور رطوبت بالا می‌باشد، لذا تشکیل این افق را می‌توان مربوط به اقلیم مرطوب گذشته دانست (Bockheim & Hartemink., 2013). تجمع رس به همراه تشکیل افق‌های آرجیلیک از مهمترین فرآیندهای موثر در خاک‌های ۱، ۲ و ۴ می‌باشند. لازمه انتقال ذرات رس و تشکیل افق آرجیلیک بروز فرایند آهک‌زدایی از افق‌های سطحی و آزاد شدن ذرات رس می‌باشد، اما در خاک‌های مورد مطالعه تشکیل افق‌های آرجیلیک و کلسیک گاهی بصورت همراه و همزمان رخ داده

است که می‌تواند بدلیل اقلیم خشک و نیمه‌خشک حاکم بر منطقه باشد (Khormali et al., 2003). وجود افق‌های ناتریک در خاک‌های مطالعاتی فرایند انتقال مکانیکی مواد را نشان می‌دهد. مطالعه میکرومورفولوژی افق آرچیلیک و ناتریک انواع متفاوتی از پوسته‌های رسی را در خاک‌های شور و سدیمی نشان می‌دهد، این نوع پوسته‌ها از نوع رس درشت و ویژه‌ی افق ناتریک می‌باشند که در اثر حضور یون سدیم حرکت و تجمع می‌یابند (Khormali et al., 2003).

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه

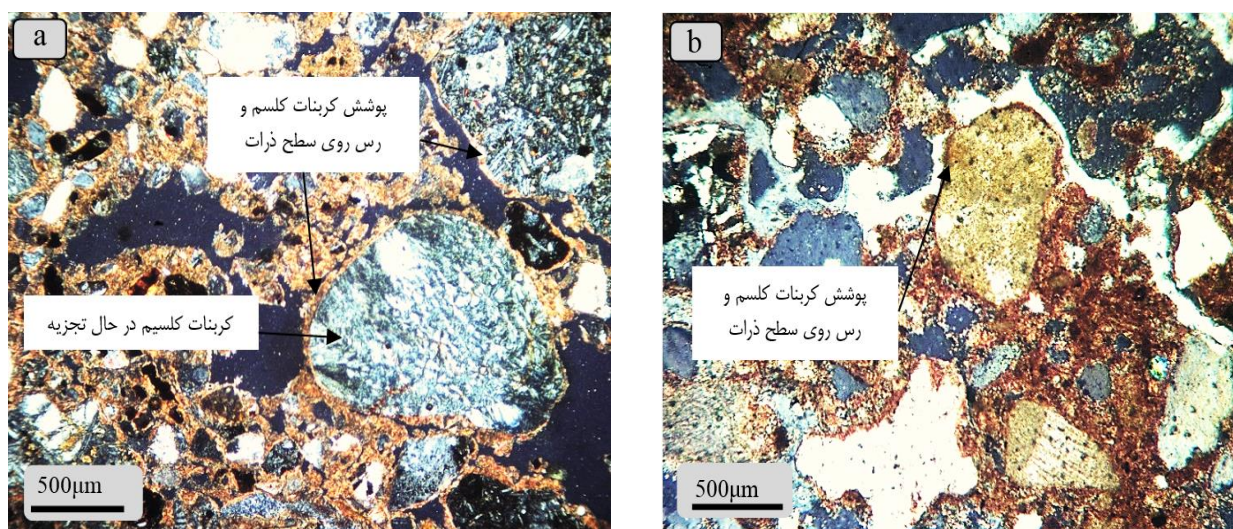
pH	بافت خاک*	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	Na (meq/lit)	SAR	گچ (%)	آهک (%)	EC (ds/m)	افق	عمق (cm)
۷/۵	SL	۱۳/۶	۱۷/۴	۶۹	۹۶۳	۲۷۵	۵/۲	۲۴/۲	۶۸	A	۲۵-۰
۷/۶	SCL	۲۱/۶	۲۴/۶	۵۳/۸	۱۹۹۷	۴۲۴	۹/۵	۲۹/۵	۹۶	Btkyz	۵۵-۲۵
۸/۲	SL	۱۲/۶	۱۷/۸	۶۹/۶	۷۰۸	۱۶۸	۸/۷	۲۹/۷	۴۳/۳	2Ck	۷۰-۵۵
۸	SCL	۲۱/۶	۲۲/۸	۵۵/۶	۵۸۱	۱۱۴	۸/۲	۱۳/۷	۴۴/۴	2Btky	۹۰-۷۰
۷/۹	L	۱۶/۶	۳۱/۸	۵۱/۶	۲۶۶	۵۶/۲	۴	۲۵	۲۲	2Btkn	۱۳۵-۹۰
۸/۱	SL	۱۴/۶	۲۰/۴	۶۵	۱۱/۴	۳/۹	۲/۵	۲۳/۷	۲/۷	3C	۱۴۵-۱۳۵
۷/۶	SL	۱۶/۶	۲۸/۸	۵۴/۶	۳۲/۶	۷/۷	۱/۵	۳۰	۶	3Bk	۱۶۵-۱۴۵
<b>Calcic Haplosalids</b>											
<b>Epicalcic Katosalic Solonetz (Katocleyic, Cutanic, Differentic)</b>											
۷/۲	L	۲۵/۶	۲۸/۸	۴۵/۶	۲۴۳۶	۲۸۳	۳/۸	-/۵	۱۰۹	A	۱۰-۰
۷/۳	SL	۱۳/۶	۲۹/۴	۵۷	۲۸۶۱	۳۰۷	۱/۳	۱۸	۱۱۵	Bkzn	۴۰-۱۰
۷/۲	C	۴۳/۶	۳۰/۸	۲۵/۶	۷۹۳	۱۱۲	۱/۲	-/۲	۶۵	Btkz1	۷۰-۴۰
۷/۱	C	۴۲	۳۸/۴	۱۹/۶	۱۵۱۵	۱۸۲	-/۸	۱۰/۵	۷۴/۲	Btkz2	۱۱۵-۷۰
۷/۱	CL	۳۵/۶	۳۹/۴	۲۵	۹۶۳/۵	۱۵۷	۱	-/۷	۶۲/۵	Btkz3	۱۴۵-۱۱۵
۷/۳	C	۴۶	۳۶	۱۸	۹۲۱	۱۶۴	-/۷	۹	۶۶/۳	Btkz4	۱۸۰-۱۴۵
۷/۴	CL	۳۷/۶	۳۶/۸	۲۵/۶	۳۶۹	۴۷/۹	۱/۱	-/۷	۷۲/۵	C	۲۱۵-۱۸۰
<b>Gypsic Haplosalids</b>											
<b>Pantocalcic Amphigypsic Pantosalic Geoabruptic Solonetz (Pantoloamic, Cutanic, Raptic)</b>											
۷/۸	SL	۱۲/۴	۲۲/۶	۶۵	۱۳	۲/۷	-/۵	۱۸	۱/۸	A	۱۰-۰
۷/۵	SL	۱۴/۴	۳۲/۶	۵۳	۹۲/۱	۱۳/۱	-/۴	۲۰/۵	۱۶/۲	Bkn	۳۵-۱۰
۷/۷	SL	۱۲/۴	۲۰/۶	۶۷	۶۵/۱	۱۳/۲	۱/۲	۱۲/۵	۱۰/۹	Bw	۶۵-۳۵
۸/۳	SL	۱۲/۴	۲۲/۶	۶۵	۱۵/۸	۷/۵	-/۵	۱۶/۲	۲/۳	Bk	۹۵-۶۵
۷/۹	SL	۶/۴	۲۰/۶	۷۳	۸۸/۵	۲۰/۵	-/۶	۱۴/۲	۱۳/۳	C	۱۳۵-۹۵
<b>Sodic Haplocalcids</b>											
<b>Cambic Calcisols (PantoCalcic , Pantoloamic)</b>											
۷/۶	SL	۱۸/۴	۲۹	۵۲/۶	۴۱۱	۵۴	۳/۸	۲۹/۵	۳۶/۸	A	۱۰-۰
۸	L	۱۱/۴	۴۸/۵	۴۰/۱	۲۷۶	۴۴/۵	۵/۳	۲۸/۳	۳۱	Bkyzn	۴۵-۱۰
۸/۲	SiL	۶/۴	۷۱/۶	۲۲	۱۹۸	۴۰	۲/۹	۲۴/۲	۲۰/۲	Bkn	۸۵-۴۵
۸/۲	SiL	۲۰/۴	۵۹	۲۰/۶	۱۵۵	۱۴/۲	۱/۲	۱۹/۵	۱۸	Btkn1	۱۲۰-۸۵
۸/۲	SiCL	۳۰/۴	۵۷	۱۲/۶	۱۸۷/۸	۳۷	۱/۴	۳۱/۲	۲۲/۲	Btkn2	۱۵۰-۱۲۰
<b>Gypsic Haplosalids</b>											
<b>Katocalcic Epicalcic Solonetz (Differentic, Amphicalcic)</b>											

\*SL: Sandy loam, SCL: Sandy Clay Loam, L: loam, C: Clay, CL: Clay Loam, SiL: Silt loam, SiCL: Silty Clay Loam.

تجمع کربنات کلسیم در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک با مواد مادری آهکی معمول می‌باشد (Khademi and Mermut., 1998). خاک‌های ۱ و ۲ با اینکه هر دو در مواد مادری رسوبی واقع شده‌اند اما از لحاظ میزان گچ و آهک تفاوت قابل توجهی دارند. حداکثر میزان گچ و آهک در خاک‌های ۱ و ۴ مشاهده شد. منبع اصلی برای تشکیل گچ در خاک، کلسیم و سولفات می‌باشد. تشکیل گچ در خاک‌ها به فاکتورهای زیادی مانند اختلاف بارش و تبخیر سالانه، وجود منابع گچ در مواد مادری، تخلخل خاک و نوسانات تراز آب زیرزمینی وابسته است (Buck and Van Hoesen, 2002). با توجه به موقعیت قرارگیری خاک‌های ۱ در حاشیه کویر لوت، تأثیر سازندهای گچی و آهکی بالادست در اندازه‌گیری مقادیر گچ و آهک مشاهده شد، خاک‌های ۴ نیز به ترتیب متأثر از سنگ‌شناسی آهکی و گچی و سازندهای نئوژن بالادست می‌باشند. (Tazikeh et al., 2018) نشان دادند که فرایندهای بازتوزیع گچ و آهک در منطقه خشک و



نیمه‌خشک گلستان می‌توانند از عوامل مؤثر بر ایجاد تفاوت ژئوشیمیایی بین افق‌های خاک در خاک‌رها باشند. همچنین فرایندهای آبشویی و انتقال نمک‌های محلول، آهک و گچ در افق‌های سالیک، کلسیک و ژپسیک در خاک‌رها مطالعاتی مشاهده گردید (جدول ۲). تمایز یافتگی افق‌های مشاهده شده در خاک‌رها مورد مطالعه بیانگر بروز فرایندهای مختلف در آنها می‌باشد. در خاک‌هایی که چندین فرآیند به‌صورت همراه صورت گرفته، تمایز و تنوع افق‌ها در مقایسه با تکامل خاک بیشتر بوده و مبین این نکته است که تمایز یافتگی افق‌ها مفهومی متفاوت از تکامل یافتگی خاک است. این موضوع یکی از ایرادات شاخص‌هایی از تکامل خاک است که تنها یک بعد و یک فاکتور از خاک را ملاک تکامل قرار می‌دهند که این امر بخصوص در شاخص تجمع رس بارزتر می‌باشد (منتخبی کلجایی و همکاران، ۱۳۹۵). رده‌بندی خاک‌های مورد مطالعه بیان‌گر غالبیت افق‌های کلسیک، ژپسیک، سالیک، آرچلیک و ناتریک و به میزان کمتر افق کمبیک می‌باشد. بنابراین خاک‌ها بر اساس سیستم تاکسونومی و WRB به ترتیب در راسته اریدی‌سول و گروه‌های مرجع سولونتر و کلسی‌سول قرار می‌گیرند (جدول ۲). همچنین فرایندهای انتقال مکانیکی مواد<sup>۱</sup>، آبشویی<sup>۲</sup>، آهکی شدن<sup>۳</sup> و شور شدن<sup>۴</sup> در خاک‌رها مورد بررسی مشاهده گردید.



شکل ۲. تصاویر میکرومورفولوژی در حالت XPL، a: افق Btk1k1 خاک‌رخ ۴، b: افق 2Btkk خاک‌رخ ۱.

درجه هوادیدگی به‌وسیله آهن پدوژنیک (Fed) نیز تعیین می‌شود، اکسیداسیون سبب افزایش رسوب آهن فریک در مقایسه با آهن فروس در افق‌های خاک شده و به صورت آهن پدوژنیک در خاک رسوب می‌کند و در طول هوادیدگی حفظ می‌گردد (Caspari et al., 2006). میانگین مقادیر آهن پدوژنیک، آزاد، بلوری و فعال در نمونه‌های مورد مطالعه به ترتیب برابر با ۰/۵، ۰/۸، ۰/۴ و ۰/۶ محاسبه گردید. برخی تحقیقات نسبت آهن فعال بزرگتر از ۰/۳۵ و کوچکتر از ۰/۳۵ را به ترتیب به خاک‌های با زهکشی ضعیف و دارای زهکشی مناسب نسبت دادند (Moore, 1973; Markus and Merkli, 2007). مقادیر آهن آزاد (Fed) در خاک‌های مطالعه شده از ۰/۲ در خاک‌های ۱ و ۲ تا ۲/۴۱ گرم بر کیلوگرم در خاک‌رخ ۴ متغیر است. دامنه تغییرات (Fed-Fed) بعنوان اکسیدهای آهن بلوری به صورت ((Fed-Fed)/Fed) استاندارد می‌شود (Hu et al., 2009). اکسیدهای آهن بلوری از ۰/۰۱ تا ۰/۲۱ و نسبت استاندارد شده آن ((Fed-Fed)/Fed) از ۰/۷۸ تا ۰/۹۹ متغیر است. در خاک‌رخ ۱ وجود انقطاع و تغییر ناگهانی بافت خاک سبب تغییرات نامنظم مقادیر خصوصیات فیزیکوشیمیایی و عناصر اکسیدی با تغییر عمق می‌شود (جدول ۲). البته عواملی نظیر انتقال رس، انقطاع، پوشیده شدن خاک با رسوبات جدید و یا اختلاط خاک به صورت طبیعی یا تحت تاثیر دخالت انسان، می‌تواند عاملی برای این عدم یکنواختی با عمق باشد (Nafeh and Brussel, 1985).

مطابق با نتایج ارائه شده در جدول ۳، شاخص‌های تجمع رس و تجمع اکسیدهای آهن و رنگ بر حسب میزان آبشویی، نقل و انتقال

- 1 . Lessivage
- 2 . Leaching
- 3 . Calcification
- 4 . Salinization

مواد مختلف و شدت هواپدیدی خاک نوسانات قابل توجهی نشان دادند. جهت تعیین ارتباط اکسیدهای آهن آزاد با حرکت رس از نسبت Fed/Clay استفاده می‌شود. این نسبت در خاکرخ ۱ روند نامنظم نشان داد که احتمالاً به دلیل انقطاع موجود در این خاکرخ می‌باشد. در خاکرخ ۳ با افزایش عمق، روند افزایشی و در خاکرخ‌های ۲ و ۴ روند کاهشی مشاهده شد. این امر بیانگر این موضوع است که انتقال این اکسیدها همراه با بخش رس از افق‌های سطحی و تجمع آنها در افق B یک فرایند مؤثر در خاکرخ ۳ می‌باشد. نوسانات مقدار Fed, Feo و درجه بلوری در خاکرخ‌های مورد مطالعه احتمالاً در ارتباط با عواملی مانند میزان هواپدیدی، فرایندهای خاکسازی و تغییرات ماده آلی می‌باشد. در طول زمان با افزایش درجه توسعه و تکامل خاک میزان Fed و درجه بلوری آنها افزایش یافته و نسبت آهن فعال (Fed/Feo) کاهش می‌یابد (Owliaie et al., 2006; Vacca et al., 2006; Yousefifard et al., 2012; Owliaie and Najafi Ghiri, 2018). که نتایج ارائه شده برای خاکرخ‌های ۱ و ۲ این روند را نشان می‌دهد (جدول ۳).

جدول ۳. شاخص‌های مرتبط با رنگ و مقادیر تجمع رس و اکسیدهای آهن

Fed/Clay	شاخص تجمع رس		شاخص‌های تجمع آهن				شاخص رنگ		رنگ خاک	افق	شماره
	رس (%)	CAI	IOAI	Feo/Fed	Fed-Feo (g/kg)	Fed (g/kg)	Feo (g/kg)	RF			
۰/۷۴	۱۳/۶			-۰/۲	۹/۹	۱۰/۱	-۰/۲	۶/۳	۶/۳	5YR 5/4	Ak
۰/۴۶	۲۱/۶			-۰/۵	۹/۴	۹/۹	-۰/۵	-۳/۱	۱۵/۶	7.5YR 5/4	Btkyz
۰/۶۳	۱۲/۶			-۰/۵	۷/۶	۷/۹	-۰/۴	-۳/۸	۱۸/۸	7.5YR 6/4	2Ck
۰/۲۵	۲۱/۶	۵۶۵۸	۲۰/۷	-۰/۱	۴/۸	۵/۴	-۰/۶	۴/۲	۴/۲	5YR 5/6	2Btky
۰/۶	۱۶/۶			-۰/۴	۹/۴	۹/۹	-۰/۵	۶/۳	۶/۳	5YR 5/4	2Btk
۰/۶۶	۱۴/۶			-۰/۴	۹/۳	۹/۷	-۰/۵	-۵	۲۵	7.5YR 6/3	3C
۰/۶۱	۱۶/۶			-۰/۱	۹/۹	۱۰/۱	-۰/۲	۶/۳	۶/۳	5YR 5/4	3Bk
۰/۴۴	۲۵/۶			-۰/۱	۱۱/۱	۱۱/۳	-۰/۲	۶/۳	۶/۳	5YR 5/4	A
۰/۸۲	۱۳/۶			-۰/۴	۱۰/۷	۱۱/۲	-۰/۵	۳/۳	۳/۳	5YR 4/6	Bkzn
۰/۲۶	۴۳/۶			-۰/۳	۱۰/۸	۱۱/۲	-۰/۴	۶/۳	۶/۳	5YR 5/4	Btnz1
۰/۲۹	۴۲	۲۴۳۴۴	۷۶/۵	-۰/۴	۱۱/۷	۱۲/۲	-۰/۵	۴/۲	۴/۲	5YR 5/6	Btnz2
۰/۳	۳۵/۶			-۰/۴	۱۰/۳	۱۰/۸	-۰/۵	۶/۳	۶/۳	5YR 5/4	Btnz3
۰/۲۵	۴۶			-۰/۲	۱۱/۱	۱۱/۳	-۰/۳	۶/۳	۶/۳	5YR 5/4	Btnz4
۰/۲۹	۳۷/۶			-۰/۲	۱۰/۶	۱۱	-۰/۴	۴/۲	۴/۲	5YR 5/6	C
۰/۶۹	۱۲/۴			-۰/۳	۸/۳	۸/۵۶	-۰/۳	-۳/۱	۱۵/۶	7.5YR 5/4	A
۰/۶۶	۱۴/۴			-۰/۵	۹	۹/۵۵	-۰/۶	-۵	۲۵	7.5YR 6/3	Bkn
۰/۸۹	۱۲/۴	۲۷۸۸	۱۷	-۰/۲	۸/۶	۱۱/۰۷	۲/۴	-۳/۱	۱۵/۶	7.5YR 5/4	Bw
۰/۸۱	۱۲/۴			-۰/۵	۹/۵	۱۰/۰۳	-۰/۶	-۳/۱	۱۵/۶	7.5YR 5/4	Bk
۱/۷۱	۶/۴			-۰/۴	۱۰/۵	۱۰/۹۷	-۰/۵	-۳/۱	۱۵/۶	7.5YR 5/4	C
۰/۶۱	۱۸/۴			-۰/۵	۱۰/۶	۱۱/۲	-۰/۶	-۵	۲۵	7.5YR 6/3	A
۰/۷	۱۱/۴			-۰/۶	۷/۵	۸/۰۳	-۰/۵	-۸/۸	۴۳/۸	7.5YR 7/2	Bkyzn
۰/۶۳	۶/۴	۹۶۰۴	۲۹/۴	-۰/۱	۳/۴	۴	-۰/۶	-۸/۸	۴۳/۸	7.5YR 7/2	Bkn
۰/۲۶	۲۰/۴			-۰/۱	۴/۷	۵/۴	-۰/۷	-۸/۸	۴۳/۸	7.5YR 7/2	Btkn1
۰/۱۲	۳۰/۴			-۰/۱	۳/۲	۳/۷	-۰/۵	-۸/۸	۴۳/۸	7.5YR 7/2	Btkn2

\*. RR: Redness Rating, RF: Redness Factor, IOAI: Iron Oxides Accumulation Index, CAI: Clay Accumulation Index  
 \*. RR: نسبت قرمزی، RF: فاکتور قرمزی، IOAI: شاخص تجمع اکسیدهای آهن، CAI: شاخص تجمع رس

شاخص تجمع اکسیدهای آهن از ۱۷ در خاکرخ ۳ تا ۷۶/۵ در خاکرخ ۲ متغیر می‌باشد. دامنه تغییر شاخص تجمع رس نیز از مقدار

۲۴۳۴۴ در خاکرخ ۲ تا ۲۷۸۸ در خاکرخ ۳ مشاهده شد (جدول ۳). شاخص رنگ خاک با اکسیدهای آهن همبستگی داشته و هر چقدر همبستگی بیشتر باشد خاک از تکامل بیشتری برخوردار می‌باشد (Khormali et al., 2003). نتایج همبستگی پیرسون بین مقادیر آهن Fed و شاخص‌های رنگ مورد مطالعه در جدول ۴ ارائه شده است که همبستگی در سطح ۹۹ درصد قابل مشاهده است.

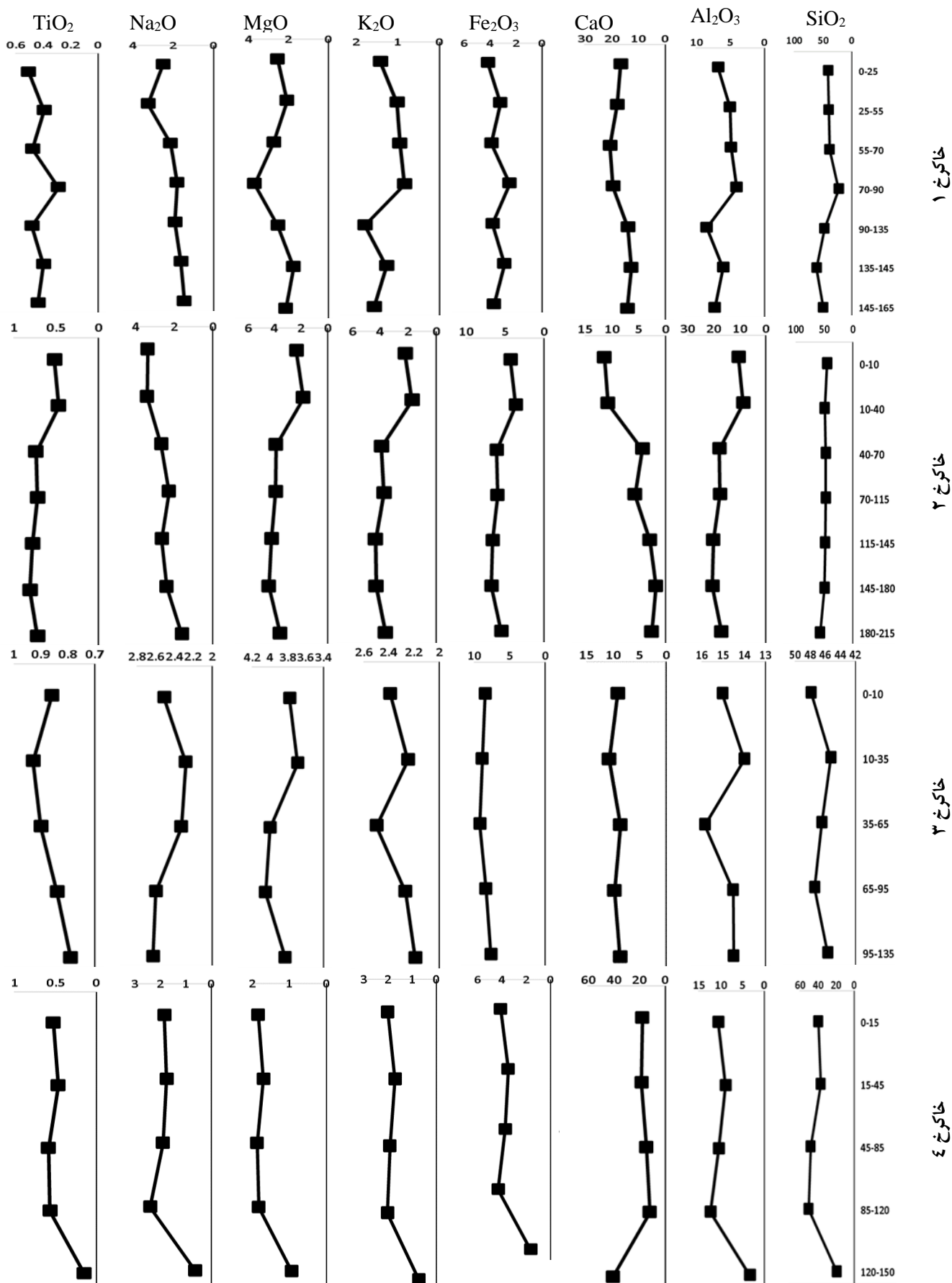
جدول ۴. همبستگی بین مقادیر آهن Fed و شاخص‌های رنگ خاک

RF	RR	Fed	
۰/۶**	-۰/۷**	۱	Fed
-۰/۹**	۱	-۰/۷**	RR
۱	-۰/۹**	۰/۶**	RF

\*\*\*: معناداری در سطح ۹۹ درصد.

توزیع عمودی اکسیدهای عناصر اصلی در خاکرخ‌های ۱ و ۳ توالی منظمی دنبال نمی‌کند. در خاکرخ ۲ و ۴ این روند با تغییر عمق منظم‌تر بوده و در افق‌های سطحی و زیرسطحی تغییرات محسوس نشان می‌دهد، بطوریکه عناصر اصلی غیرمتحرک مانند  $Fe_2O_3$ ،  $Al_2O_3$  و  $TiO_2$  در افق‌های سطحی خاکرخ ۲ و افق عمقی در خاکرخ ۴، دارای کمترین مقدار می‌باشند (شکل ۳). غلظت آلومینیوم و سیلیس در خاک‌های با منشأ مواد آهکی مقدار پایین‌تری می‌باشد (نائل و همکاران، ۱۳۸۹). خاکرخ ۲ نسبت به سایر خاکرخ‌ها به میزان کمتری تحت تأثیر مواد مادری آهکی بوده و مقدار اکسید Al در افق‌های پایینی غالب است. در ترکیب ژئوشیمیایی مواد مادری با سنگ‌شناسی مارن آهکی، مقدار سیلیس نسبت به سایر سنگ‌شناسی‌ها بالاتر می‌باشد (نائل و همکاران، ۱۳۸۹)، در خاکرخ‌های ۱ و ۴ درصد سیلیس و آلومینیوم پایین‌تر مشاهده شد. در خاکرخ‌های مطالعاتی مقادیر میانگین وزنی  $Al_2O_3$  به ترتیب ۶/۵، ۱۶/۸، ۱۴/۸ و ۹/۱۴ درصد و برای  $SiO_2$  برابر با ۴۲/۶، ۴۹/۹، ۴۶/۳ و ۳۹/۹ درصد می‌باشد. مقدار اکسیدکلسیم (CaO) در خاک‌های با منشأ آهکی پایین‌تر است که می‌تواند به دلیل حلالیت بالای کلسیم باشد (Tazikeh et al., 2018)، اما در منطقه مطالعاتی، خاکرخ ۱ که تحت تأثیر مواد مادری آهکی می‌باشد از این روند تبعیت نمی‌کند، که احتمالاً به دلیل مهیا نبودن شرایط حلالیت و تأثیر شدید سازندهای آهکی و گچی بالادست بر خاکرخ مذکور باشد. در خاکرخ‌های مورد مطالعه مقادیر میانگین وزنی CaO به ترتیب برابر با ۱۶/۳، ۵، ۹/۳ و ۲۰/۴ درصد است. در همه خاکرخ‌ها به غیر از خاکرخ ۴ روند عمقی تغییرات CaO کاهشی و تا حدودی متناسب با تغییرات مقادیر آهک می‌باشد. در خاکرخ ۴ روند تغییر مقادیر اکسیدهای اصلی در افق‌های سطحی با افق زیرسطحی تفاوت محسوسی نشان داد. رفتار عنصرهای شیمیایی به تنهایی به‌وسیله درجه هوادیدگی کنترل می‌شود. انتظار می‌رود ترکیب خاک‌ها در طول هوادیدگی شیمیایی سنگ بستر تغییر کرده و با افزایش شدت هوادیدگی، سزکوئی اکسیدهای  $Fe_2O_3$ ،  $TiO_2$  و  $Al_2O_3$  که به‌عنوان اکسیدهای غیرمتحرک هستند در خاک مانده و اکسیدهای قلیایی  $MgO$ ،  $CaO$ ،  $Na_2O$  و  $K_2O$  که متحرک هستند کاهش یافته و مقدار آب ساختاری افزایش یابد (Duzgoren-Aydin et al., 2002). در مطالعه حاضر، خاکرخ‌های ۲ و ۳ با مقادیر بالا در اکسیدهای اصلی غیرمتحرک و مقادیر پایین اکسیدهای اصلی متحرک از هوادیدگی بیشتری برخوردار می‌باشند. به طوری که مقادیر میانگین وزنی اکسیدهای اصلی  $Al_2O_3$ ،  $TiO_2$ ،  $Fe_2O_3$  در خاکرخ‌های ۲ و ۳ به ترتیب برابر با ۵/۷ و ۸/۴، ۰/۷ و ۰/۹، ۱۶/۸ و ۱۴/۸ درصد می‌باشند.

محاسبه شدت هوادیدگی در شاخص‌های ژئوشیمیایی بر اساس خروج عناصر متحرک در اثر آبشویی و باقی ماندن عناصر غیرمتحرک در ساختار کانی‌ها می‌باشد. شاخص‌های ژئوشیمیایی R، WIP، PWI و STI بر خلاف سایر شاخص‌ها در مقادیر پایین، بیانگر میزان هوادیدگی بالاتر می‌باشند. شاخص‌های ژئوشیمیایی CIA، CIW و PIA برای مواد مادری آهکی نسبت به سایر مواد مادری تغییرات را بخوبی نشان نمی‌دهند (Tazikeh et al., 2018). اما در منطقه مورد مطالعه، شاخص‌های ژئوشیمیایی مذکور برای خاکرخ ۱، با وجود قرارگیری در مواد مادری آهکی، پاسخ مناسبی ارائه دادند، که می‌تواند به دلیل تفاوت غلظت اکسیدهای اصلی در دو منطقه مطالعاتی باشد. شاخص CIW به‌ویژه در مواردی که غلظت Na پایین است مفید می‌باشد. مبنای شاخص CIA بر پایه تخلیه عناصر متحرک Ca، Na و K می‌باشد. در خاکرخ‌های مطالعاتی تخلیه K و Na در خاکرخ‌های ۱ و ۴ مشاهده شد اما بر خلاف انتظار، مقدار عددی بالا برای شاخص CIA در خاکرخ ۴ گزارش نشد. این خاکرخ دارای پایین‌ترین میزان شاخص CIA (۷/۲۲) می‌باشد. که می‌تواند به دلیل شرایط هوادیدگی ضعیف در محیط باشد. شاخص CIA برای تعیین درجه هوادیدگی شیمیایی در سنگ‌ها به کار می‌رود، به طوری که مقادیر پایین این شاخص



شکل ۳. توزیع اکسیدهای اصلی فلزی (%) در طول خاکرخ‌های مطالعاتی

نشانگر فقدان تغییرات شیمیایی و مبین وجود شرایط اقلیمی سرد و/یا خشک می‌باشد و مقادیر بالاتر آن هوادیدگی شیمیایی با شدت زیاد

را نشان می‌دهد (Fedo et al., 1995). مقادیر پایین‌تر شاخص WIP، بر خلاف شاخص‌های PIA و CIA، بیانگر هوادیدگی شیمیایی قوی‌تر می‌باشد، بنابراین حداکثر مقدار عددی این شاخص نشان‌دهنده مواد مادری با حداقل میزان هوادیدگی است (Parker, 1970). شاخص WIP در خاک‌های بازالتی بیشترین تناسب را در تعیین شدت هوادیدگی دارد (Heidari and Raheb, 2020)، که با نتایج مطالعه حاضر در بررسی خاک‌های واقع در مواد مادری بازالتی (خاک‌رخ ۴) همخوانی ندارد. به طوری که شاخص WIP تغییرات قابل ملاحظه‌ای در خاک‌های متأثر از مواد مادری رسوبی و آذرین در خاک‌های مورد مطالعه نشان نداد. شاخص WIP برای خاک‌های در حال هوادیدگی در مواد مادری همگن و ناهمگن مناسب می‌باشد (Shao et al., 2012)، اما در مقادیر میانگین وزنی شاخص WIP در خاک‌های مطالعاتی تفاوت محسوسی مشاهده نشد، و مقادیر آن در محدوده ۴۹/۴۵ تا ۵۴/۱۹ درصد متغیر می‌باشند. بنابراین پاسخ مناسبی برای منطقه مورد مطالعه ارائه نمی‌دهد.

جدول ۵. شاخص‌های ژئوشیمیایی (درصد) در خاک‌رخ‌های مختلف

R	STI	PIA	V	PWI	WIP	CIA	CIW	
۴/۳۵	۷۸/۱۴	۳۵/۵	۰/۷۳	۷۴/۸	۵۶/۰۵	۳۷/۹	۴۱/۳	A
۵/۷	۸۱/۳	۳۲/۸	۰/۶۴	۷۹/۴	۵۰/۷۹	۳۵/۲	۳۷/۹	Bkzn
۲/۶۷	۷۰/۶	۶۶/۵	۱/۹۹	۶۵/۸	۵۷/۱۵	۶۲	۷۱/۸	Btnz1
۲/۷۱	۷۰/۹	۶۳/۲	۱/۷۸	۶۶/۲	۵۵/۶۲	۵۹/۸	۶۸/۶	Btnz2
۲/۴	۶۸/۷	۷۴/۰۲	۲/۵	۶۳/۷	۵۸/۸۶	۶۷	۷۸/۴	Btnz3
۲/۴۳	۶۸/۸	۷۹/۲	۲/۸۶	۶۳/۹	۵۵/۶۸	۷۰/۶	۸۲/۸	Btnz4
۳/۳۸	۷۴/۷	۷۶/۰۳	۲/۶۴	۷۱/۲	۴۵/۹۹	۶۸/۴	۸۰/۱	C
۳/۲۲	۷۲/۶۴	۶۴/۳۶	۲/۰۲	۶۸/۵۲	۵۴/۰۸	۵۹/۸۶	۶۹/۰۷	میانگین وزنی
۶/۰۵	۸۰/۶	۲۱/۹	۰/۳۷	۷۸/۲	۵۲/۳۹	۲۴/۸	۲۶/۲	Ak
۷/۹۳	۸۳/۰۵	۱۵/۹	۰/۲۶	۸۲/۲	۵۴/۸۳	۱۸/۵	۱۹/۲	Btkyz
۷/۹	۸۱/۶	۱۴/۷	۰/۲۲	۸۰/۶	۵۲/۴	۱۷/۱	۱۷/۷	2Ck
۵/۵۵	۷۹/۹	۱۳/۱	۰/۱۹	۷۶/۷	۴۹/۲۲	۱۵/۵	۱۶/۰۵	2Btky
۵/۶۳	۸۰/۹	۲۶/۶	۰/۵۵	۷۸/۸	۴۸/۱۴	۳۲/۴	۳۴/۸	2Btk
۱۰/۱	۸۵/۸	۲۵	۰/۴۵	۸۶/۷	۳۹/۶۳	۲۷/۹	۲۹/۶	3C
۶/۸۱	۸۲/۸	۲۶/۸	۰/۴۹	۸۱/۲	۴۳/۵۵	۲۹/۸	۳۱/۸	3Bk
۶/۷۲	۸۱/۷۶	۲۲/۰۳	۰/۳۹	۸۰/۰۶	۴۹/۴۵	۲۴/۷۳	۲۶/۱۸	میانگین وزنی
۳/۱۸	۷۲/۹	۵۲/۰۸	۱/۱۳	۶۶/۲	۵۰/۶۹	۵۱/۷	۵۶/۳	A
۳/۲۳	۷۲/۷	۴۷/۳	۰/۹۷	۶۵/۵	۵۰/۵۱	۴۷/۷	۵۱/۷	Bkn
۲/۹۳	۷۱/۵	۵۴/۹	۱/۲۲	۶۴/۱	۵۰/۰۶	۵۴/۱	۵۹/۱	Bw
۳/۲۷	۷۳/۳	۴۹/۷	۱/۰۲	۶۶/۶	۵۱/۴۵	۴۹/۸	۵۴/۰۳	Bk
۳/۱۵	۷۲/۹	۵۲/۰۹	۱/۱	۶۶/۵	۴۹/۲۲	۵۱/۷	۵۶/۱	C
۳/۱۴	۷۲/۶۵	۵۱/۳۵	۱/۰۹	۶۵/۸۴	۵۰/۲۵	۵۱/۱۲	۵۵/۵۶	میانگین وزنی
۳/۷۷	۷۶/۰۴	۳۰/۱	۰/۵۸	۷۲/۴	۵۴/۳۲	۳۲/۶	۳۴/۷	A
۴/۱۸	۷۷/۳	۲۶/۰۴	۰/۴۸	۷۴/۳	۵۲/۱۳	۲۸/۷	۳۰/۳	Bkyzn
۴/۶۳	۷۸/۵	۳۴	۰/۶۷	۷۶/۶	۴۹/۲۲	۳۶/۱	۳۸/۷	Bkn
۴/۱	۷۷/۵	۴۱/۵	۰/۸۸	۷۴/۶	۴۹/۲۱	۴۲/۷	۴۵/۹	Btk1
۵/۸۸	۸۲/۲	۵/۸۴	۰/۰۹	۷۹/۲	۶۸/۶۲	۷/۲۲	۷/۳۳	Btk2
۴/۵۸	۷۸/۵۷	۲۸/۱۴	۰/۵۶	۷۵/۷۷	۵۴/۱۹	۳۰/۰۴	۳۲/۰۵	میانگین وزنی

Note: The optimum values for the indices in the fresh and weathered rocks are: R [ $>10, 0$ ], CIW [ $\leq 50, 100$ ], CIA [ $\leq 50, 100$ ], WIP [ $>100, 0$ ], PWI [ $>50, 0$ ], V [ $<1, \text{Infinite}$ ], PIA [ $\leq 50, 100$ ] and STI [ $>90, 0$ ].

هم‌چنین مطالعه ژئوشیمی خاک‌های موجود در قسمت نیمه‌خشک آرژانتین مرکزی بیانگر حفظ خصوصیات ژئوشیمیایی مواد مادری در شرایط هوادیدگی با شدت ضعیف بود (Pasquini et al., 2017). حداکثر مقدار عددی شاخص PIA (۱۰۰) تغییر کامل نسبت به مواد مادری و مقدار عددی ۵۰، برای سنگ مادر با تغییرات اندک می‌باشد. برای مناطق با اقلیم گرم و مرطوب و شرایط مناسب هوادیدگی، شاخص PIA بالاتر از ۸۰ می‌باشد (Krzyszowska, 2019). مقادیر این شاخص برای خاک‌های مطالعاتی ۱ و ۳ بطور میانگین بالاتر از ۵۰ می‌باشد. میانگین وزنی مقادیر شاخص PWI در خاک‌های ۱ و ۳ پایین‌تر می‌باشد، که بیانگر هوادیدگی بالاتر در این خاک‌ها است.

در منطقه با شرایط اقلیمی نیمه خشک تا نیمه مرطوب شاخص های  $V$  و  $PWI$  مناسب می‌باشند (حیدری و اوسط، ۱۳۹۸). نتایج ارائه شده در جدول ۵ نشان می‌دهد تمامی شاخص‌های ژئوشیمیایی، به جز شاخص  $WIP$ ، شدت هوازدگی بالاتر در خاک‌های ۱ و ۳ نسبت به سایر خاک‌ها نشان می‌دهند. با افزایش عمق در خاک‌های ۱ و ۲، افزایش شدت هوازدگی با شاخص‌های  $WIP$ ،  $CIW$ ،  $CIA$  و  $PIA$  مشاهده شد. (Tazikeh et al., 2018) طی مطالعه‌ای در بخشی از منطقه کپه‌داغ نشان دادند که در شرایط هوازدگی ضعیف حاکم بر مناطق خشک و نیمه‌خشک، غلظت و الگوی توزیع عناصر بیشتر تحت تأثیر مواد مادری است تا فرایندهای خاکساز. البته در مطالعه حاضر با توجه به موارد ذکر شده و نتایج به‌دست آمده در جدول ۵ میزان هوازدگی با تغییر در نوع مواد مادری رسوبی و آذرین تفاوت محسوسی نشان نداد. بنابراین تغییرات در میزان هوازدگی و شاخص‌های ژئوشیمیایی خاک‌های مورد مطالعه تابع تأثیر متقابل نوع مواد مادری و فاکتورها و فرایندهای خاکساز می‌باشد، که با نتایج مطالعه Oyebanjo et al., (2021) و Daher et al., (2022) همخوانی و با نتایج (Tazikeh et al., 2018) و Habibi et al., (2019) عدم همخوانی را نشان می‌دهد.

## نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر با هدف بررسی و مقایسه شاخص‌های رنگ، تجمع رس، اکسیدهای آهن و شاخص‌های ژئوشیمیایی در دو بخش مواد مادری رسوبی شامل: ماسه‌سنگ، سطوح رسی و نمکی دوران کواترنری، مارن قرمز گچی، شیل گچ‌دار و سنگ آهک (خاک‌های ۱ و ۲) و آذرین شامل: آندزیت، بازالت و توف‌های حاصل از خاکسترهای آتشفشانی (خاک‌های ۳ و ۴) در شمال استان کرمان انجام شده است. حداکثر مقادیر گچ و آهک در خاک‌های ۱ و ۴ مشاهده شد که به ترتیب به موقعیت قرارگیری خاک‌ها در حاشیه کویر لوت و تأثیر سازندهای گچی و آهکی بالادست و حضور سنگ‌شناسی آهکی و گچی و سازندهای نئوژن مرتبط می‌باشد. آنالیزهای فیزیکوشیمیایی نشان‌دهنده وجود افق‌های کلسیک، ژپسیک، سالیک، ناتریک، آرجیلیک و کمبیک در خاک‌های مطالعاتی بود. خاک‌ها از نظر دو سیستم رده‌بندی تاکسونومی و  $WRB$  به ترتیب در راسته اریدی‌سول و گروه‌های مرجع سولونتر و کلسی‌سول قرار می‌گیرند. در بررسی مقاطع میکرومورفولوژی توالی پوشش‌های رسی و کربنات کلسیم در سطح ذرات مشاهده شد، که با توجه به اقلیم خشک کنونی در منطقه، می‌تواند سندی از حاکمیت اقلیم مرطوب در گذشته باشد.

با توجه به آبشویی، نقل و انتقال مواد مختلف و شدت هوازدگی خاک در طول خاک‌های مطالعاتی، شاخص‌های رنگ، تجمع رس و اکسیدهای آهن نوسانات قابل توجهی نشان دادند. وجود انقطاع در خاک‌های ۱ سبب بروز روند نامنظم در نسبت  $Fed/Clay$  شد. در حالی که این روند در خاک‌های ۳ با افزایش عمق، افزایشی و در خاک‌های ۲ و ۴ به‌صورت کاهشی نمایان شد. بنابراین انتقال اکسیدهای آهن همراه با بخش رس از افق‌های سطحی و تجمع آنها در افق  $B$  فرایند مؤثر در خاک‌های ۳ می‌باشد. شاخص‌های  $IOAI$  و  $CAI$  به ترتیب در محدوده عددی ۱۷ در خاک‌های ۳ تا ۷۶/۵ در خاک‌های ۲ و ۲۴۳۴۴ در خاک‌های ۲ تا ۲۷۸۸ در خاک‌های ۳ متغیر می‌باشد. بین شاخص‌های  $RF$ ،  $RR$  و  $Fed$  همبستگی در سطح ۹۹ درصد مشاهده شد.

توزیع عمودی اکسیدهای اصلی در خاک‌های ۱ و ۳ از توالی نامنظم و در خاک‌های ۲ و ۴ از توالی منظم تبعیت می‌کند. در خاک‌های ۲ و ۳ مقادیر اکسیدهای اصلی متحرک ( $MgO$ ،  $K_2O$  و  $Na_2O$ ) و غیر متحرک ( $TiO_2$ ،  $Fe_2O_3$  و  $Al_2O_3$ ) به ترتیب در پایین‌ترین و بالاترین حد قرار دارند. که نشان از تکامل بالاتر این خاک‌ها می‌باشد. به‌طوری‌که مقادیر میانگین وزنی اکسیدهای اصلی  $TiO_2$ ،  $Fe_2O_3$  و  $Al_2O_3$  در خاک‌های ۲ و ۳ به ترتیب برابر با ۵/۷، ۸/۴، ۰/۷ و ۰/۹، ۱۶/۸ و ۱۴/۸ درصد می‌باشند.

نتایج نشان داد تمامی شاخص‌های ژئوشیمیایی، به جز شاخص  $WIP$ ، شدت هوازدگی بالاتری را در خاک‌های ۱ و ۳ نسبت به سایر خاک‌ها ارائه می‌دهند، که این مهم تا حدودی در بررسی نتایج شاخص‌های  $CAI$ ،  $IOAI$ ، نسبت  $Fed/Clay$  و مقادیر  $Fed$  بخصوص در خاک‌های ۳ اثبات شد. به‌طور کلی نتایج بیانگر تأثیر متقابل فاکتورهای نوع مواد مادری و عوامل و فاکتورهای خاکساز بر تکامل خاک‌های مطالعاتی می‌باشد. بررسی شاخص‌های مذکور در قسمت‌های دیگر ایران مرکزی، می‌تواند به رد یا تایید نتایج مطالعه حاضر کمک نماید.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

## منابع

- آزادی، ابوالفضل؛ شاکری، سیروس و زارعیان، غلامرضا (۱۴۰۰). تاثیر واحدهای لندفرم بر منشاء و توزیع شکل‌های قابل استخراج اکسید آهن، مطالعه موردی، شهرستان رستم، استان فارس، هفدهمین کنگره علوم خاک ایران و چهارمین همایش ملی مدیریت آب در مزرعه تجدید حیات حکیمانه خاک و حکمروائی حکیمانه آب، کرج، <https://civilica.com/doc/1312371>
- بنائی، محمدحسن (۱۳۷۸). *نقشه‌ی رژیم‌های حرارتی و رطوبتی خاک‌های ایران*. موسسه تحقیقات آب و خاک وزارت کشاورزی.
- حیدری، احمد و اوسط، مریم (۱۳۹۸). کمی کردن شاخص‌های ژئوشیمیایی و استفاده از آنها به عنوان معیار در تشکیل و طبقه‌بندی خاک، شانزدهمین کنگره علوم خاک ایران، دانشگاه زنجان، ۵ تا ۷ شهریور.
- سازمان زمین‌شناسی ایران (۱۳۷۴). *نقشه‌های ۱:۲۵۰۰۰۰ کرمان، راور و رفسنجان و نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ شهریارک*. انتشارات نقشه تهران. تهران.
- شاکری، سیروس؛ آزادی، ابوالفضل و صفاری، محبوب (۱۳۹۹). تاثیر اقلیم و تکامل خاک بر مقدار و توزیع شکل‌های شیمیایی عناصر غذایی کم‌مصرف آهن، مس، روی و منگنز در سری‌های غالب خاک‌های استان کهگیلویه و بویراحمد. *نشریه علوم آب و خاک*، سال ۲۴، شماره ۴.
- منتخبی کلجاهی، ویدا؛ جعفرزاده، علی اصغر و رضایی، حسین (۱۳۹۵). مقایسه تکامل خاک‌های مختلف بر اساس میزان توسعه افق آرچلیک. *نشریه دانش آب و خاک*. جلد ۲۷، شماره ۱، صفحات ۲۵۳ تا ۲۶۵.
- نائل، محسن؛ جلالیان، احمد؛ خادمی، حسین؛ کلباسی، محمود؛ ستوهیان، فرزاد و شولین، رابنر (۱۳۸۹). تاثیر مواد مادری و تحول خاک بر ویژگی‌های ژئوشیمیایی خاک‌های جنگلی منطقه فومن-ماسوله. *مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک*. سال ۱۴، شماره ۵۴. صفحات ۱۳۵-۱۵۱.

## REFERENCES

- Abbaslou, H., Abtahi, A., & Baghernejad, M. (2013). Effect of weathering and mineralogy on the distribution of major and trace elements (Hormozgan province, Southern Iran). *International Journal of Forest, Soil and Erosion (IJFSE)*. Vol (3). No 1. 15-25.
- Azadi, A., Baghernejad, M., Gholami, A., & Shakeri, S. (2021a). Forms and distribution pattern of soil Fe (Iron) and Mn (Manganese) oxides due to long-term rice cultivation in fars Province Southern Iran. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 52(16), 1894-1911.
- Azadi, A., Shakeri, S., & Zareian, Gh. (2021b). *the effect of landform units on the origin and distribution of extractable forms of iron oxide, a case study, Rostam city, Fars province*, the 17<sup>th</sup> soil Sciences Congress and the 4<sup>th</sup> National Conference on Farm Water Management, 18-20 October, Karaj, Iran. (in Persian)
- Banaie, M. H. (1998). *Soil moisture and temperature regimes map of Iran*. Soil and Water Research Institute, Ministry of Agriculture, Tehran, 1 sheet. (in Persian)
- Birkeland, P. W., Burke, R. M., & Benedict, J. B. (1989). Pedogenic gradients for iron and aluminum accumulation and phosphorus depletion in arctic and alpine soils as function of time and climate. *Quaternary Research*, Vol. 32, 2, 193-204.
- Birkland, P. W. (1991). *Soils and geomorphology*. Oxford Universit Press, New York.
- Bluth, G. J. S., & Kump, L. R. (1994). Lithologic and climatologic controls of river chemistry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 58(10): 2341-2359.
- Bockheim, J. G., & Hartemink, A. E. (2013). Distribution and classification of soils with clay-enriched horizons in the USA. *Geoderma*. 209-210: 153-160.
- Buck, B. J., & Van Hoesen, J. G. (2002). Snowball morphology and SEM analysis of pedogenic gypsum, southern New Mexico, USA. *Journal of Arid Environments*, 51 (4), 469-487.
- Caspari, T., Bäuml, R., Norbu, C., Tshering, K., & Baillie, I. (2006). Geochemical investigation of soils developed in different lithologies in Bhutan, Eastern Himalayas. *Geoderma* 136: 436-458.
- Chapman, H. D. (1996). *Cation exchange capacity*. In: Black, C. A. (eds), *Methods of Soil Analysis, part 2*. Am. Soc. Agron. Madison, Wisconsin, USA.
- Daher, M., Fernandes-Filho, E. I., Francellino, M. R., Marciano da casta, L., & Schaefer, C. E. G. R. (2022). Geochemistry of semi-arid Cryosols on volcanic and sedimentary materials from James Ross Island, Antarctica. *Geoderma Regional*, (28).
- Duzgoren-Aydin, N. S., Aydin, A., & Malpas, J. (2002). Re-assessment of chemical weathering indices: case study on pyroclastic rocks of Hong Kong. *Engineering Geology*, 63(1-2): pp. 99-119.
- Evans, M. E., & Heller, F. (2003). *Environmental Magnetism: Principles and Applications of Enviromagnetics*. Academic Press, Amsterdam.
- Fedo, C. M., Nesbitt, H. W., & Young, G. M. (1995). Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleo weathering conditions and provenance.



- Geology*, 23, 921–924. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1995\)023<0921: UTEOPM>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)023<0921: UTEOPM>2.3.CO;2).
- Gee, G. W., & Bauder, J. W. (1986). Particle-size analysis Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods, 5, 383-411.
- Habibi, E., Lak, R., Torabi, H., Mahmoudi, Sh., & Momtaz, H. (2019). Investigating the relationships between chemical indices of soil development and weathering in various parent Materials in Urmia Lake catchment. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, Vol. 14, No. 1, p. 209 - 221; DOI:10.26471/cjees/2019/014/073
- Harnois, L. (1988). The CIW index: a new chemical index of weathering Sediment. *Geol.* (55), 319–322.
- Heidari, A., & Osat, M. (2019). *Quantifying geochemical indices and their use as criteria in soil development and classification*. 16<sup>th</sup> Iranian Soil Science Congress. University of Zanjan, Iran, August 27-29. (In Persian)
- Heidari, A., & Raheb, A. (2020). Geochemical indices of soil development on basalt rocks in arid to sub-humid climosequence of Central Iran. *Journal of Mountain Science*, (17). <https://doi.org/10.1007/s11629-019-5862-4>
- Hu, X., Xu, L., & Shen, M. (2009). Influence of the aging of Fe oxides on the decline of magnetic susceptibility of the Tertiary red clay in the Chinese Loess Plateau. *Quaternary International*, (209), 1-9.
- Iran Geology Organization*. (1995). Kerman, Ravar and Rafsanjan Map 1:250000 and Shahr-e-Babak 17 Map 1:100000. Tehran Map Publication, Tehran, Iran. (In Persian)
- Islam, M. R., Stuart, R., Risto, A., & Vesa, P. (2002). Mineralogical changes during intense chemical weathering of sedimentary rocks in Bangladesh. *Journal of Asian Earth Sciences* 20(8): 889-901.
- Jayawardena, U. S., & Izawa, E. (1994). A new chemical index of weathering for metamorphic silicate rocks in tropical regions: A study from Sri Lanka. *Engineering Geology*, 36: 303-310.
- Khademi, H., & Mermut, A. R. (1998). Source of palygorskite in gypsiferous aridisols and associated sediments from central Iran. *Clay Miner.* 33: 561-578.
- Khormali, F., Abtahi, A., Mahmoodi, S., & Stoops, G. (2003). Argillic horizon development in calcareous soils of arid and semiarid regions of southern Iran. *Catena*. (53). p: 273-301.
- Koop, A. N., Hirmas, D. R., Sullivan, P. L., & Mohammed, A. K. (2020). A generalizable index of soil development. *Geoderma*. (360). 113898.
- Krzeszowska, E. (2019). Geochemistry of the Lublin Formation from the Lublin Coal Basin: Implications for weathering intensity, palaeoclimate and provenance. *International Journal of Coal Geology*. 216, 103306.
- Kuznetsova, A., & Khokhlova, O. (2015). Dynamics and genesis of calcic accumulations in soils and sediments of the Argentinean Pampa. *International Journal of Sediment Research*. (30). P: 179–189.
- Levine, E. R., & Ciolkosz, E. J. (1983). Soil development in till of various ages in northeast Pennsylvania. *Quaternary International*. (19). p: 85-99.
- Lui, J., Lichao, W., Chen, D., Yu, Z., & Wei, C. (2018). Development of a soil quality index for *Camellia oleifera* forestland yield under three different parent materials in Southern China. *Soil and Tillage research*. (176). P 45-50.
- Markus, E., & Merkli, C. (2007). Weathering, mineralogical evolution and soil organic matter along a Holocene soil toposequence developed on carbonate-rich materials. *Geomorphology*. (97). p: 675-696.
- Mehra, O., & Jackson, P. (1958). Iron oxide removal from soils and clays in a dithionite-citrate-bicarbonate system buffered with sodium. *Clay. Clay Miner.* 7:317–327
- Mei, H., Jian, X., Zhang, W., Fu, H., & Zhang, S. (2021). Behavioral differences between weathering and pedogenesis in a subtropical humid granitic terrain: Implications for chemical weathering intensity evaluation. *Catena*. (203).
- Montakhabi Kalajahi, V., Jafarzadeh, A. A., & Rezaei, H. (2016). Comparison of different soils evolution based on Argillic horizon development. *Journal of Water and Soil Science*. Vol (27) 1. Pp: 253-265. (In Persian)
- Moore, T. R. (1973). The distribution of Fe, Mn, and Al in some soils from northeast Scotland. *Journal of Soil Science*. (24). p: 165-171.
- Nael, M., Jalalian, A., Khademi, H., Kalbasi, M., Sotohian, F., & Schulin, R. (2010). Parent Material and soil evolution effect in forest soils geochemical properties, Fooman-Masooleh region. *Journal of Water and Soil Science (Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)*. Vol (14). No 54. (In Persain)
- Nafeh, M. H., & Brussel, M. K. (1985). *Electricity and magnetism*. John Wiley, New York, NY.
- Nelson, D. W., & Sommers, L. E. (1982). *Total carbon, organic carbon and organic matter*. In: Page, A. L.,



- Miller, R. H., & Keeney, D. R. (eds.), *Methods of Soil Analysis: Part 2 – Chemical and Microbiological Properties* (2nd edition). A Series of Monograph: Vol. 9, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, p: 539–577. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c29>.
- Nelson, R. E. (1982). *Carbonate and gypsum*. In: Page, A. L., Miller, R. H., & Keeney, D. R. (eds.), *Methods of Soil Analysis: Part 2 – Chemical and Microbiological Properties* (2nd edition). A Series of Monograph: Vol. 9, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison. p: 181–196. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c11>.
- Nesbitt, H. W., & Young, G. M. (1984). Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochimica et Cosmochimica Acta Journal*. 48(7): 1523-1534. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(84\)90408-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(84)90408-3)
- Owliaie, H. R., & Najafi Ghiri, M. (2018). The Magnetic Susceptibility and Iron Oxides of Aquic Soils in Southern Iran. *Eurasian Soil Science*. 51(10), 1252–1265. <http://link.springer.com/10.1134/S1064229318100095>.
- Owliaie, H. R., Abtahi, A., & Heck, R. (2006). Pedogenesis and clay mineralogical investigation of soils formed on gipsiferous and calcareous materials, on a transect, southwestern Iran. *Geoderma*. (134). p: 62-81.
- Oyebanjo, O. O., Ekosse, G. E., & Odiyo, J. O. (2021). Mineralogy and geochemistry of clay fractions in soils developed from different parent rocks in Limpopo Province, South Africa. *Heliyon*, 7.
- Page, A., Miller, R., & Keeney, D. (1982). *Methods of soil analysis, Part 2: Chemical and microbiological properties* 2nd ed Madison, Wisconsin, USA.
- Parker, A. (1970). An index of weathering for silicate rocks. *Geological Magazine*. 107, 501–504. <https://doi.org/10.1017/S0016756800058581>.
- Pasquini, A. I., Campodonico, V. A., Rouzaut, S., & Giampaoli, V. (2017). Geochemistry of a soil catena developed from loess deposits in a semiarid environment, Sierra Chica de Córdoba, central Argentina. *Geoderma*. (295). p: 53–68.
- Roaldset, E. (1972). Mineralogy and Geochemistry of Quaternary Clays in the Numedal Area, Southern Norway. *Norsk. Geolisk. Tidsskrift*. 52, 335–369.
- Ruxton, B. P. (1968). Measures of the degree of chemical weathering of rocks. *Journal of Geology*, 76: 518-527.
- Santana, D. P. (1984). Soil formation in a toposequence of oxisols from patos de minas regions, Minas Gerais State, Brazil. Ph.D. Thesis. Purdue University., west Lafayette, IN.
- Schaetzl, R.J., & Thompson, M. L. (2015). *Soils genesis and geomorphology*. Pub: Cambridge University, Cambridge.
- Schoeneberger, P. J., Wysocki, D. A., Benham, E. C., & Soil Survey Staff. (2012). *Field Book for Describing and Sampling Soils*, version 3. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, 300 p.
- Schwertmann, U. (1973). Use of oxalate for Fe extraction from soils. *Canadian Journal of Soil Science*. (53). p: 244–246.
- Shakeri, S., Azadi, A., & Saffari, M. (2021). Effect of Climate and Soil Development on the Quantity and Chemical Forms Distribution of Iron, Copper, Zinc and Manganese Micronutrients in the Dominant Soil Orders of Kohgiluyeh and Boyerahmad Province. *JWSS - Journal of Water and Soil Science- Isfahan University of Technology* 24 (4) :273-293. (in Persian)
- Shao, J., Yang, S., & Li, C. (2012). Chemical indices (CIA and WIP) as proxies for integrated chemical weathering in China: inferences from analysis of fluvial sediments. *Sedimentary Geology Journal*. 265–266, 110–120. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2012.03.020>.
- Simon, M., Sanchez, S., & Garcia. I. (2000). Soil-landscape evolution on a Mediterranean high mountain. *Catena*, 39,211–231.
- Singh, L. P., Parkash, B., & Singhvi, A. K. (1998). Evolution of the Lower Gangetic Plain landforms and soils in West Bengal, India. *Catena*, 33, 75-104.
- Souri, B., Watanabe, M., & Sakagami, K. (2006). Contribution of Parker and Product indexes to evaluate weathering condition of Yellow Brown Forest soils in Japan. *Geoderma* 130(3-4): 346-355. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.0>
- Stoops, G. (2003). Guideline for the analysis and description of soil and regolith thin sections. SSSA, Madison, WI.182p.
- Tazikeh, H., Khormali, F., Amini, A., & Barani Motlagh, M. (2018). Geochemistry of soils derived from selected sedimentary parent rocks in Kopet Dagh, North East Iran. *Journal of Geochemical Exploration*.



(194). P: 52-70.

- Tematio, P., Tchantchet, T. W., Nguetnkam, J. P., Mbog, M. B., & Yongue-Fouateu, R. (2017). Mineralogical and geochemical characterization of weathering profiles developed on mylonites in the Fodjomekwet-Fotouni section of the Cameroon shear zone (CSZ), West Cameroon. *Journal of African Earth Sciences*. 131, 32-42.
- Torrent, J., Schwertmann, U., & Schulz, D. G. (1980). Iron oxides mineralogy of some soil of two river terrace in Spain. *Geoderma*. (23). p: 191-208.
- Torrent, J., Schwertmann, U., Fechterand, H., & Alferez, F. (1983). Quantitative relationship between soil color and hematite content. *Journal of Soil Science*. (136). p: 354-358.
- Vacca, S., Capra, G. F., Coppola, E., Rubino, M., Madrau, S., & Colella, A. (2009). From andic Non-allophanic to non-andic allophanic Inceptisols on alkaline basalt in Mediterranean climate, a toposequence study in the Marghina district (Sardinia, Italy). *Geoderma*. (151). p: 157-167.
- Yousefifard, M., Ayoubi, Sh., Jalalian, A., Khademi, H., & Makkizadeh, M. A. (2012). Mass Balance of Major Elements in Relation to Weathering in Soils Developed on Igneous Rocks in a Semiarid Region, Northwestern Iran. *Journal of Mountain Science*, 9: 41-58. DOI: 10.1007/s11629-012-2208-x

## Evaluation of Selected Soil Development Indices in Soils Derived from Sedimentary and Igneous Rocks, Northern Kerman

### EXTENDED ABSTRACT

#### Introduction

The present research performed to investigate soil evolution in soils developed on sedimentary (pedons 1 and 2) and igneous (pedons 3 and 4) parent materials, northern Kerman during 2020-2021 as a PhD thesis at Shahid Bahonar University of Kerman.

#### Materials and Methods

Four representative pedons were selected. Sandstone, clay and salt flats, gypsiferous red marl, gypsiferous shale, and limestone were dominant in the sedimentary section, whereas igneous section mainly contained andesite, limestone, and tuff. Physicochemical soil properties were investigated to assess soil development. The principal oxides content measured using ICP-OES. Color, clay accumulation, Fe content, and geochemistry indices were used to investigate soil development in the studied pedons.

#### Results and Discussion

Clay accumulations together with calcic horizons were found in the area. The strong structure and high percentage of clay size fraction could be a proof of the high rate of soil-forming processes in past. Calcic, gypsic, salic, argillic, and natric were found as the dominant horizons formed, but cambic horizon was less. Thus, the soils were classified as Aridisols (Soil Taxonomy system) and Solonetz and Calcisol RSGs (WRB system). Argilluviation, lessivage, leaching, calcification, and salinization processes observed in studied pedons. Mean pedogenic, free, crystalline, and active Fe contents were determined as 9.4, 0.5, 8.8 g/kg and 0.06, respectively. The Pearson's correlation between Fe contents and color indices at the 99% level was significant which a proof of moderate soil development is. Color, clay, and Fe oxides accumulation indices showed prominent variations based on leaching, transformation and soil weathering intensity. The values of clay and Fe accumulation indices were 17 (pedon 3) to 76.5 (pedon 2), and 24344 (pedon 2) to 2788 (pedon 3), respectively. Fe oxides and clay content indices were correlated, whereas soils with higher development showed higher index values. Pedons 1 and 3 were more weathered due to high contents of immobile principal oxides and low contents of mobile principal oxides. The weighted mean values in principal oxides  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  were 5.73, 0.7 and 16.8 percent for pedon 2 and 8.4, 0.9 and 14.8 percent in pedon 3. The mean weight of principal oxides noticeably increased in pedons 2 and 3. Besides, the mean weight values of CIW, CIA, WIP, V, PIA, STI and R geochemistry indices (with the exception of PWI index) calculated for pedons 1 and 3 show much higher weathering compared to other pedons. Pedon 4 has the lowest CIA index content (7.22 %) which could be due to weak weathering of the formation environment.

#### Conclusion

The results of color, Fe oxides and clay accumulation and geochemistry indices in pedon 3 demonstrated the advantage of CIW, CIA, WIP, V, PIA, STI and R geochemistry indices compared to other studied indices. Variations of principal oxides and Fe oxides together with clay translocation along soil depth shows different soil evolution in the area. Besides, CAI, IOAI, Fed/clay rate, Fed content and CIW, CIA, WIP, V, PIA, STI and R geochemistry indices were proofs of more soil evolution in pedon 3 compared to other studied soils. No significant difference in development rate related to parent materials change was found. Likely, variations of weathering and geochemistry indices could be affected by interactions induced by parent materials and soil-forming factors and processes.

**Keywords:** *Central Iran, Clay Coating, Geochemistry, Soil color.*