

Investigating rheological properties of five soil orders in Chaharmahal-va-Bakhtiari Province

Fatemeh Javaheri¹, Isa Esfandiarpour-Boroujeni^{*2}, Ryan D. Stewart³,
Mohammad Hady Farpoor⁴, Hajir Kourki⁵

1. Ph.D. Graduate, Dept. of Soil Science and Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran. E-mail: f.j.active@gmail.com
2. Corresponding Author, Dept. of Soil Science and Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran. E-mail: esfandiarpour@vru.ac.ir
3. Dept. of Water and Soil, Virginia Tech. University, USA. E-mail: ryan.stewart@vt.edu
4. Dept. of Soil Science and Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran. E-mail: farpoor@uk.ac.ir
5. Dept. of Chemical Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran. E-mail: hajir.kourki@kgut.ac.ir

Article Info

Article type:
Full Length Research Paper

Article history:
Received: 06.21.2021
Revised: 10.11.2021
Accepted: 10.17.2021

Keywords:
Amplitude sweep test,
Cryosol,
Rheometry,
Soil development,
Soil viscoelastic behaviour

ABSTRACT

Background and Objectives: Rheological characteristics of soils (including their deformation and flow behaviors when subjected to external stress) can provide important information on microstructural and microaggregate stability. One of the newest methods of assessing the stability of aggregates is the use of rheometric discussions in this regard. In other words, rheometry can be used to evaluate the elastic behavior of soil versus its plastic behavior in a range of aggregate deformation and thus a more quantitative interpretation of aggregate formation or stability against stress. In the last decade, Amplitude sweep test (AST) has been used to evaluate the stability of soil microstructure and its elastic behaviors. The present study was designed to determine the aggregate stability and viscoelastic behavior of the soil using the rheometric method. In the present study, physical, chemical, clay mineralogical properties and classification of dominant soil orders in Chaharmahal-va-Bakhtiari Province were studied and compared in order to determine the stability of aggregates and viscoelastic behavior of soils using the rheometric method.

Materials and Methods: Five different soil orders were described and sampled in Shahrekord, Farsan, and Koohrang cities. After air-drying and sieving of soil samples taken from the genetic horizons, the physical and chemical properties were measured using standard methods. Besides, the type of clay minerals was determined by the X-ray diffraction method. AST was used to quantify the initial rheological parameter values, including the storage (G') and loss moduli (G''), deformation limit (γ_L : when the material begins to irreversibly deform), deformation at flow point (γ_F : when the material becomes viscous), loss factor ($\tan \delta = G''/G'$) and *integral z* (which summarizes the overall elasticity of the material) in order to study microstructural stability and microaggregates of the five soil orders. Finally, the correlation diagram was plotted among soil properties and rheological parameters using R software. Besides, the soil was classified based on the American Soil Taxonomy (2014) and WRB (2015).

Results: The studied pedons classified based on the American Soil Taxonomy (2014) and WRB (2015) in five different soil orders and four reference soil groups, including Entisol (Cryosol in WRB), Vertisol,

Mollisol (Kastanozem in WRB), Alfisol, and Inceptisol (Calcisol in WRB). Semi-quantitative analysis of clay minerals showed that the soils have different clay minerals assemblage including kaolinite, vermiculite, smectite, illite, chlorite, and quartz. The results of the AST indicated that the deformation limit was significantly higher in subsoil horizons than topsoil horizons and was also higher in the clayey soils compared to sandy soils. The soils with “vertic soil properties” showed the high range of linear viscoelastic region (LVE) that attributed to the samples with high elasticity behavior. Soils with higher clay contents and further evolution showed higher rheological parameters, implying that these soils had more rigid microstructures incomparable with other soil orders which in turn, indicated the higher microstructural and microaggregate stability. In contrast, the horizon, which had high sand content and little soil development, had the lowest values for all properties, thus indicating a lack of micro-aggregate stability. Pearson correlation coefficient analyses revealed that integral z was influenced by soil physicochemical properties, and was higher in soils with the clay fraction dominated by expansive clay minerals and higher cation exchange capacity.

Conclusion: Altogether, the rheological parameters indicated that more developed soils had greater microstructural stability than their less-developed counterparts. As a result, rheological measurements may be useful for identifying the major factors that affect soil aggregation. In addition, these parameters can be used as indicators to evaluate the relative amount of soil evolution in future studies.

Cite this article: Javaheri, Fatemeh, Esfandiarpour-Boroujeni, Isa, D. Stewart, Ryan, Farpoor, Mohammad Hady, Kourki, Hajir. 2022. Investigating rheological properties of five soil orders in Chaharmahal-va-Bakhtiari Province. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 12 (1), 1-30.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/EJSMS.2022.19252.2025

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources



بررسی خواص رئولوژیک پنج رده خاک در استان چهارمحال و بختیاری

فاطمه جواهری^۱، عیسی اسفندیارپور بروجنی^{۲*}، ریان استوارت^۳، محمدهادی فرپور^۴، هژیر کورکی^۵

۱. دانش آموخته دکتری گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه ولی عصر رفسنجان، رفسنجان، ایران. رایانامه: f.j.active@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه ولی عصر رفسنجان، رفسنجان، ایران. رایانامه: esfandiarpour@vru.ac.ir
۳. گروه آب و خاک، دانشگاه ویرجینیاتک آمریکا. رایانامه: ryan.stewart@vt.edu
۴. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. رایانامه: farpoor@uk.ac.ir
۵. گروه مهندسی شیمی، دانشگاه های تک کرمان، کرمان، ایران. رایانامه: hajir.kourki@kgut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: ویژگی های رئولوژیکی خاکها (از جمله تغییر شکل و رفتارهای ویسکوالاستیک آن ها در برابر تنش برشی) می توانند اطلاعات مهمی در مورد پایداری ساختمان خاک و ریزخاکدانهها فراهم آورند. یکی از جدیدترین روش های ارزیابی پایداری خاکدانهها، استفاده از مباحث رئومتری است. به عبارت بهتر، از رئومتری می توان برای ارزیابی رفتار الاستیک خاک در مقابل رفتار پلاستیک آن در طیفی از تغییر شکل خاکدانهها استفاده کرد و بدین ترتیب تفسیر کمی بیش تری از تشکیل یا پایداری خاکدانهها در برابر تنش وارده بر آن ها را محاسبه نمود. در دهه اخیر، آزمون روبشی دامنه کرنش به منظور ارزیابی پایداری ریزساختار خاک و رفتارهای الاستیکی آن استفاده شده است. پژوهش حاضر در راستای تعیین پایداری خاکدانه و رفتار ویسکوالاستیک خاک با استفاده از رئومتر طراحی شده است. در پژوهش حاضر، ویژگی های فیزیکی، شیمیایی، کانی شناسی رس و طبقه بندی رده های خاک غالب استان چهارمحال و بختیاری در راستای تعیین پایداری خاکدانهها و رفتار ویسکوالاستیک خاکها با استفاده از روش رئومتری، مورد مطالعه و مقایسه قرار گرفته است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۳۱ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۲۵	مواد و روش ها: پنج خاک رخ مختلف در شهرستان های شهرکرد، فارسان و کوهرنگ تشریح و نمونه برداری شد. پس از هواخشک و الک کردن نمونه های خاک برداشت شده از افق های ژنتیکی این خاک رخها، ویژگی های فیزیکی و شیمیایی مورد نیاز با استفاده از روش های استاندارد اندازه گیری شدند. هم چنین، نوع کانی های رسی آن ها به روش پراش پرتو ایکس تعیین گردید. به علاوه، از آزمون روبشی دامنه کرنش برای کمی سازی مقادیر اولیه پارامترهای رئولوژیکی شامل مدول های ذخیره (G') و اتلاف (G'')، حد تغییر شکل (γ_L)، تغییر شکل در نقطه جریان (γ_f)، ضریب اتلاف ($\tan \delta = G''/G'$) و انتگرال Z (سطح بدون بُعدی که رفتار
واژه های کلیدی: آزمون روبشی دامنه کرنش، تکامل خاک، رفتار ویسکوالاستیک خاک، رئومتری، کرایوسولز	

الاستیک ماده تحت تنش برشی را نشان می‌دهد) در راستای مطالعه پایداری ریزساختار و ریزخاک‌دانه‌های نمونه‌های برداشت‌شده از رده‌های پنج‌گانه مزبور استفاده شد. در نهایت، ترسیم نمودار هم‌بستگی بین ویژگی‌های خاک و پارامترهای رئولوژیکی اندازه‌گیری‌شده با استفاده از نرم‌افزار R انجام گرفت. هم‌چنین، رده‌بندی خاک‌رخ‌ها بر مبنای سامانه‌های رده‌بندی آمریکایی (۲۰۱۴) و طبقه‌بندی جهانی (۲۰۱۵) انجام شد.

یافته‌ها: خاک‌رخ‌های مورد مطالعه بر مبنای سامانه‌های رده‌بندی آمریکایی و طبقه‌بندی جهانی، به ترتیب در پنج رده و چهار گروه مرجع مختلف شامل انتی‌سولز (کرایوسولز در طبقه‌بندی جهانی)، ورتی‌سولز، مالی‌سولز (کاستانوزمز در طبقه‌بندی جهانی)، آلفی‌سولز و اینسپتی‌سولز (کلسی‌سولز در طبقه‌بندی جهانی) قرار گرفتند. تجزیه و تحلیل نیمه‌کمی کانی‌های رسی نیز نشان داد که این خاک‌رخ‌ها دارای کانی‌های مختلفی می‌باشند. نتایج حاصل از آزمون روبشی دامنه کرنش، بیانگر آن بود که حد تغییرشکل در افق‌های زیرسطحی به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از افق‌های سطحی خاک و در خاک‌های رسی بیش‌تر از خاک‌های شنی بود. خاک‌های دارای خواص ورتیک، دارای محدوده بالاتری از ناحیه خطی ویسکوالاستیک (LVE) بوده که به خاصیت الاستیک بالای آن‌ها نسبت داده شد. خاک‌های دارای رس بیش‌تر و متکامل‌تر، پارامترهای رئولوژیکی بالاتری را نشان دادند که می‌تواند بیانگر پایداری بیش‌تر ریزساختار و خاک‌دانه‌های ریز این خاک‌ها نسبت به دیگر رده‌های خاک باشد. در مقابل، افق‌هایی که دارای درصد بالاتر شن و تکامل کم‌تری بودند، پارامترهای رئولوژیکی پایین‌تری داشتند که نشان‌دهنده عدم پایداری ریزخاک‌دانه‌ها در این افق‌ها بود. ضریب همبستگی پیرسون نشان داد که انتگرال Z تحت تأثیر ویژگی‌های مختلف فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها قرار می‌گیرد و به‌طور معمول در خاک‌هایی با درصد رس بالاتر، نوع کانی‌های رسی ۲:۱ غالب به‌همراه میزان بالاتر ظرفیت تبادل کاتیونی، انتگرال Z هم بالاتر است.

نتیجه‌گیری: اندازه‌گیری پارامترهای رئولوژیکی نشان داد که خاک‌های متکامل‌تر نسبت به خاک‌های با ساختمان توسعه‌نیافته یا کم‌تر توسعه‌یافته، دارای پایداری ریزساختاری بیش‌تری هستند. در نتیجه، پارامترهای رئولوژیکی می‌توانند برای شناسایی مهم‌ترین عواملی که روی خاک‌دانه‌سازی تأثیر می‌گذارند مفید باشند. به‌علاوه، این پارامترها می‌توانند به‌عنوان شاخصی برای ارزیابی مقدار نسبی تکامل خاک در مطالعات آتی مدنظر قرار گیرند.

استناد: جواهری، فاطمه، اسفندیارپور بروجنی، عبیسی، استوارت، ریان، فریور، محمدهادی، کورکی، هژیر (۱۴۰۱). بررسی خواص رئولوژیک

پنج رده خاک در استان چهارمحال و بختیاری. نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار، ۱۲ (۱)، ۳۰-۱.

DOI: 10.22069/EJSMS.2022.19252.2025



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

خاک به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع طبیعی زمین، به اندازه آب و هوا برای زندگی انسان ضروری بوده؛ به طوری که زندگی بشر به سلامت خاک^۱ گره خورده است و اگر خاک سالم نباشد کل زنجیره غذایی موجودات، به ویژه انسان، به خطر می‌افتد. سلامت خاک بیانگر شرایط خاک در ارتباط با توان بالقوه آن برای حفظ باروری بیولوژیکی، حفظ کیفیت محیط و افزایش سلامت گیاه، حیوان و انسان است (۱). گاهی اوقات، اصطلاحات کیفیت خاک^۲ و سلامت خاک، به طور مترادف و به جای یکدیگر استفاده می‌شوند. اما باید توجه داشت که اصطلاح کیفیت خاک به طور کلی با تناسب خاک برای استفاده خاص همراه است؛ در حالی که اصطلاح سلامت خاک به معنای وسیع‌تر برای نشان دادن ظرفیت عملکرد خاک به عنوان یک سامانه حیاتی زنده برای حفظ بهره‌وری بیولوژیکی، بهبود کیفیت محیط زیست گیاهان و حیوانات استفاده می‌شود (۱). به طور کلی، کیفیت و سلامت خاک، تعیین‌کننده پایداری کشاورزی و کیفیت محیط می‌باشند و به طور مشترک، سلامت گیاه، حیوان و انسان را تعیین می‌کنند. بنابراین تعیین شاخص‌های کیفیت و سلامت خاک برای مدیریت پایدار کشت و بقای اکوسیستم، الزامی است. برای ارزیابی شاخص‌های کیفیت و سلامت خاک، مجموعه‌ای از شاخص‌های کیفی و یا کمی استفاده می‌شوند. این شاخص‌ها دربرگیرنده خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی گوناگون خاک بوده که متناسب با عملیات مختلف مدیریتی و سازگار با مناطق گوناگون اقلیمی می‌باشند.

یکی از شاخص‌های کلیدی کیفیت خاک، پایداری خاک‌دانه^۳ است که به صورت مقاومت ذرات خاک در برابر تنش‌های اعمال شده بیرونی (مانند فرسایش بادی و آبی، فرآیندهای انبساط و انقباض و یا خاک‌ورزی) تعریف می‌شود (۲ و ۳). پایداری خاک‌دانه به شدت به مدیریت و خصوصیات خاک وابسته بوده و منعکس‌کننده تأثیرات کاربری اراضی است (۴ و ۵). در مقیاس‌های ریز^۴، پایداری خاک‌دانه تابعی از نیروهای پیونددهنده بین ذرات خاک (مانند پیوندهای هیدروژنی بین مولکول‌های آب، پیوندهای کووالانسی بین ذرات رس و ماده آلی و نیروهای یونی) است (۶، ۷ و ۸). خاک‌دانه‌هایی که فاقد پایداری کافی باشند، هنگام خیس شدن، تخریب شده، ساختمان خاک از بین رفته، فرسایش‌پذیری خاک افزایش یافته و نفوذپذیری خاک کاهش می‌یابد (۹). از آنجا که پایداری خاک‌دانه بر خصوصیات خاک و شارهای محیطی (مانند نفوذ آب و تبادل گازی) اثر می‌گذارد، نقش مهمی در سرعت و میزان تشکیل خاک دارد. به علاوه، خاک‌دانه‌ها به صورت سلسله‌مراتبی تشکیل می‌شوند، به این ترتیب که خاک‌دانه‌های ریز (ریزخاک‌دانه‌ها^۵)، خاک‌دانه‌های درشت‌تر را تشکیل می‌دهند (۱۰ و ۱۱). هم‌چنین، ریزخاک‌دانه‌ها نقش بسیار مهمی در ذخیره کربن خاک بازی می‌کنند (۱۲ و ۱۳). بنابراین درک راه‌کارهای تشکیل و تداوم خاک‌دانه، از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است.

از جمله اثرات مهم پایداری خاک‌دانه می‌توان به ارزیابی رفتار ساختمان خاک در شرایط مختلف (مانند انبساط و انقباض، نفوذپذیری، نشست، روان‌گرایی^۶،

3- Aggregate stability
4- Micro scales
5- Microaggregates
6- Liquefaction

1- Soil health
2- Soil quality

به‌عنوان عاملی از کیفیت خاک برای مدیریت درازمدت خاک استفاده شود (۱۶). از سوی دیگر، خواص رئولوژیکی خاک، تابع ریزساختار^۸ آن هستند؛ لیکن میزان این تابعیت به دلیل مدت زمان کوتاه فرآیند در مقیاس آزمایشگاهی، کاملاً مشخص نیست. هم‌چنین، ریزساختار خاک پس از ترمیم خاک در اثر رفتار الاستیک به حالت اولیه آن برمی‌گردد. هر چند این برگشت‌پذیری با میزان منافذ خاک نسبت مستقیم دارد، اما سازوکار ماهیت الاستیک و ویسکوز خاک‌های بازسازی شده هنوز کاملاً روشن نیست (۱۷، ۱۸ و ۱۹).

اخیراً از رئومتر برای مطالعه رفتارهای میکرومکانیکی خاک در ارتباط با کلئیدها و پایداری خاک‌دانه‌ها استفاده شده است (۲۰، ۷، ۲۱ و ۲۲). در واقع، داده‌های رئولوژیکی خاک می‌توانند در توصیف تکامل ساختار خاک مورد استفاده قرار گیرند و چگونگی تأثیر ساختمان خاک بر فرآیندهای جریان و انتقال را ارزیابی کنند. به‌علاوه، از مفاهیم اساسی رئولوژی خاک می‌توان در توصیف تغییر شکل خاک^۹ در نتیجه رابطه تنش-کرنش در مقیاس‌های ریز و میانه^{۱۰} استفاده نمود.

با وجود استفاده روزافزون از خصوصیات رئولوژیکی در علوم خاک، مطالعات اندکی برهم‌کنش‌های بین پایداری خاک‌دانه‌ها، پدولوژی و رئولوژی را ارزیابی کرده‌اند. علاوه بر این، تاکنون هیچ مطالعه‌ای پایداری خاک‌دانه‌ها را از طریق مطالعات رئولوژیکی در انواع مختلف خاک بررسی نکرده است. پژوهش حاضر برای درک بهتر خصوصیات رئولوژیک خاک که با پایداری ریزخاک‌دانه و رفتار ویسکوالاستیک ارتباط بیش‌تری

تنش-کرنش^۱ (واکنش ماده به تنش وارد شده بر آن)، ویسکوالاستیک^۲ و غیره) اشاره کرد (۱۴). با این‌که مطالعات تجربی برای بیان رفتار خاک‌ها از چند دهه گذشته مورد توجه بوده؛ اما در مباحث علوم خاک، رفتار سل-ژل^۳، زیاد مورد بحث و بررسی قرار نگرفته است. یکی از مهم‌ترین رفتارهای خاک، رفتار ویسکوالاستیک یا رفتار سل-ژل است. سل، عبارت است از مخلوطی کلئیدی (که مواد توزیع شده در آن بسیار کوچک (یک تا ۱۰۰ نانومتر) می‌باشند) که ذرات جامد آن به‌صورت معلق در مایع قرار دارند. مواد ویسکوالاستیک می‌توانند دارای رفتار تیکسوتروپیک^۴ یا رئوپکتیک^۵ باشند. در سیالات تیکسوتروپیک، گرانروی (ویسکوزیته) ظاهری سیال تحت تنش برشی^۶ ثابت با گذشت زمان کاهش می‌یابد. به دیگر سخن، تیکسوتروپی برای توصیف یک رفتار انتقالی هم‌دم، برگشت‌پذیر یا الاستیک و سل-ژل (مایع-جامد) استفاده می‌شود که به دلیل آشفتگی مکانیکی ایجاد شده است. اثر متقابل تیکسوتروپی، تحت عنوان آنتی‌تیکسوتروپی شناخته می‌شود که برای این منظور از واژه رئوپکتی یا رئوپکسی^۷ استفاده می‌گردد. به‌عبارت دیگر، سیال رئوپکتیک برای سیستم‌هایی که گرانروی ظاهری آن‌ها در نرخ برش ثابت با گذشت زمان (برخلاف تیکسوتروپی) افزایش پیدا می‌کند، توصیه شده است (۱۵).

به‌طور کلی، رفتار ویسکوالاستیک خاک تأثیر زیادی بر ویژگی‌های فیزیکی آن دارد و می‌تواند

- 1- Stress-strain
- 2- Viscoelastic
- 3- Sol-gel
- 4- Thixotropic
- 5- Rheoplectic
- 6- Shear stress
- 7- Rheopexy

- 8- Microstructure
- 9- Deformation
- 10- Meso scales

مواد و روش‌ها

مشخصات مناطق مورد مطالعه: سه منطقه مختلف در شهرستان‌های کوهرنگ، فارسان و شهرکرد، واقع در استان چهارمحال و بختیاری، برای انجام این پژوهش مدنظر قرار گرفتند. جدول ۱ بیانگر برخی از مهم‌ترین اطلاعات جغرافیایی و اقلیمی مربوط به هر کدام از این مناطق می‌باشد. لازم به ذکر است که در منطقه کوهرنگ، تعداد دو خاک‌رخ (P1: دامنه زردکوه بختیاری و P2: نزدیک تونل کوهرنگ)؛ در فارسان نیز دو خاک‌رخ (P3 و P4) و در شهرکرد، یک خاک‌رخ (P5) مورد مطالعه قرار گرفت (شکل ۱).

دارند، از یک روش ترکیبی فیزیکی-پدولوژیکی-رئولوژیکی استفاده کرده است. به نظر می‌رسد که نتایج حاصل می‌تواند برای علاقه‌مندان به ارزیابی و پیش‌بینی رفتار خاک در توسعه راه‌کارهای کنترل فرسایش خاک نیز مفید باشد. به علاوه، تنوع خاک‌های استان چهارمحال و بختیاری از یک‌سو و عدم وجود مطالعات دقیق پیرامون رفتار ویسکوالاستیک در برهم‌کنش با پایداری خاک‌دانه از سوی دیگر، باعث شد که پژوهش حاضر با هدف بررسی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی، کانی‌شناسی رس و طبقه‌بندی رده‌های خاک غالب این استان در رابطه با رفتارها و ویژگی‌های رئولوژیک آن‌ها انجام شود.

جدول ۱- برخی از مهم‌ترین اطلاعات جغرافیایی و اقلیمی مناطق مورد مطالعه.

Table 1. Some of the most important geographical and climatic information of the studied areas.

نام منطقه Location	میانگین بارش سالیانه (mm) MAP ^a	میانگین دمای سالیانه (°C) MAT ^b	ارتفاع از سطح دریا (m) Elevation a.s.l. ^c	رژیم رطوبتی خاک SMR ^e	رژیم حرارتی خاک STR ^f	واحد ژئومورفیک Geomorphic unit	ماده مادری Parent material	
Koohrang	Zardkooh	1776	6.2	3182	Udic	Frigid	Valley	Rhyolite
	Koohrang	1280	9.5	2285	Udic	Mesic	Hillside	Rhyolite
Farsan	288	13.4	2242	Xeric	Mesic	Plain	Argillaceous limestone	
Shahrekord	322	11.7	2048	Xeric	Mesic	Plain	Argillaceous limestone	

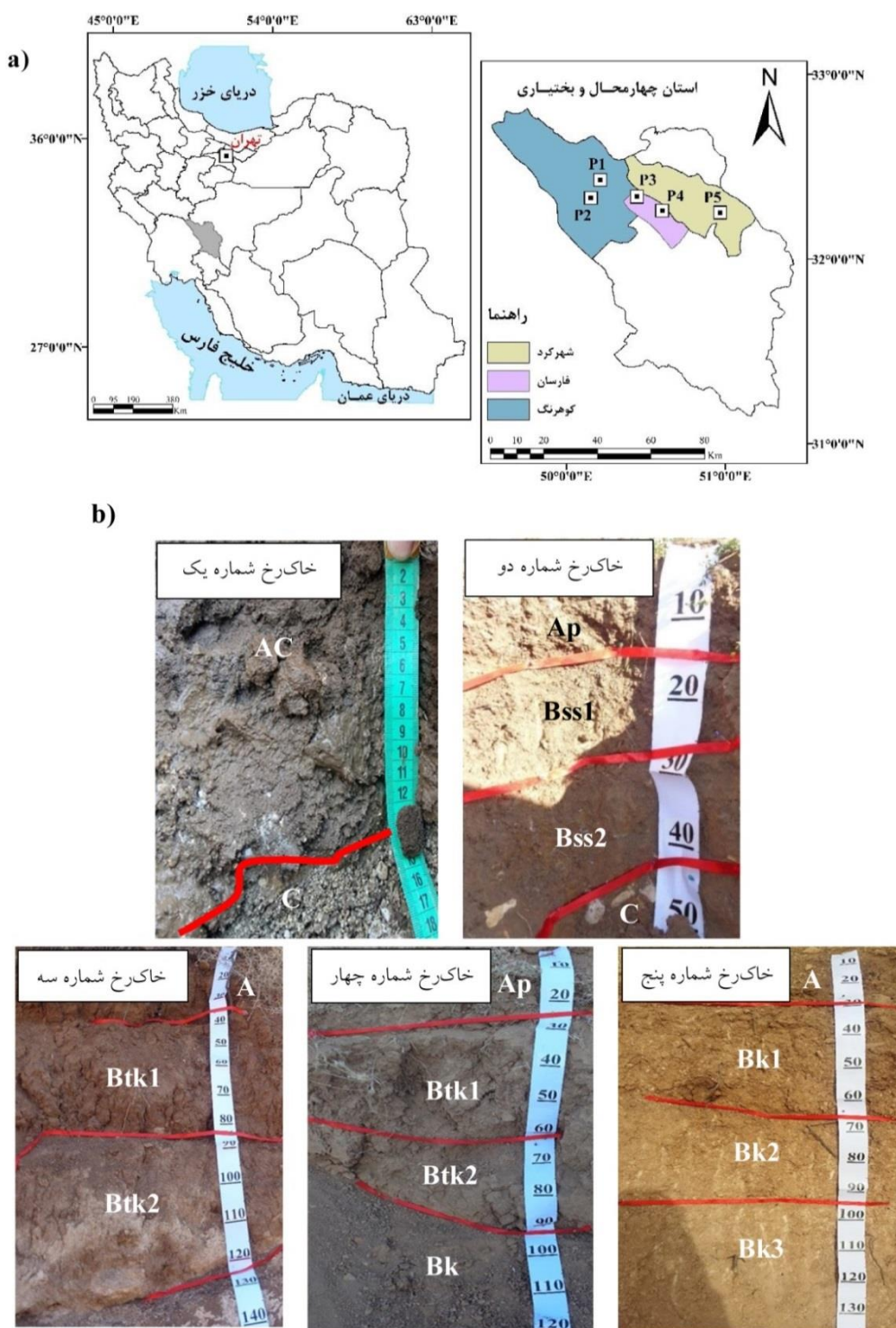
^a Mean annual precipitation

^b Mean annual temperature

^c Above sea level

^e Soil moisture regime determined using Java Newhall Simulation Model (jNSM software)

^f Soil temperature regime determined using Java Newhall Simulation Model (jNSM software)



شکل ۱- a) موقعیت خاک‌رخ‌های مورد مطالعه در استان چهارمحال و بختیاری؛ b) نمای از خاک‌رخ‌های حفز شده.
 (P1: خاک‌رخ شماره یک، P2: خاک‌رخ شماره دو، P3: خاک‌رخ شماره سه، P4: خاک‌رخ شماره چهار، P5: خاک‌رخ شماره پنج)

Figure 1. a) Location of the studied soil profiles in Chaharmahal-va-Bakhtiari Province;
 b) View of the excavated soil profiles.

(P1: Pedon 1, P2: Pedon 2, P3: Pedon 3, P4: Pedon 4, P5: Pedon 5)

برای انجام مطالعات کانی‌شناسی رس، پس از حذف املاح محلول، کربنات‌ها، ماده آلی و اکسیدهای آهن آزاد به روش جکسون (۱۹۷۵)، بخش رس نمونه‌ها مطابق با روش کیتریک و هوپ (۱۹۶۳) جدا و چهار تیمار مختلف شامل اشباع با منیزیم، اشباع با منیزیم و اتیلن‌گلیکول، اشباع با پتاسیم و اشباع با پتاسیم و حرارت ۵۵۰ درجه سلسیوس تهیه شد (۳۰ و ۳۱). سپس، اسلایدهای تهیه‌شده در هر مرحله در دستگاه پراش پرتو ایکس مدل بروکر^۳ در آزمایشگاه کانی‌شناسی دانشگاه شهرکرد با منبع $CuK\alpha$ تحت زاویه 2θ ، ۴ تا ۴۰ درجه قرار گرفتند تا در ولتاژ ۴۰ کیلوولت و شدت جریان ۳۰ میلی‌آمپر پرتونگاری گردند. در نهایت، پراش‌نگارهای^۴ حاصل از هر کدام از تیمارها در یک دستگاه مختصات ترسیم شدند و تشخیص نوع کانی‌ها بر اساس منبع دیکسون و وید (۱۹۸۹) انجام گرفت (۳۲). همچنین، آنالیز نیمه‌کمی کانی‌های رسی موجود در نمونه‌ها توسط نرم‌افزار BGMN-Profex (- PROFEX Open Source, RMS Foundation, Bern, Switzerland) انجام گرفت.

تئوری آزمون روبشی دامنه کرنش^۵: ماهیت خاک را می‌توان به دو جزء الاستیک و ویسکوز تقسیم کرد که سهم هر کدام، وابسته به دما، کرنش، تنش، زمان بارگذاری^۶ و بسامد بارگذاری (مدت زمان وارد شدن تنش) است (۲۱ و ۱۴). ترکیب این اجزا، خاک را به‌عنوان یک ماده ویسکوالاستیک مد نظر قرار می‌دهد که با مدول G به‌صورت زیر توصیف می‌شود (۳۳):

$$G = \frac{\tau_c}{\gamma_c} \quad (1)$$

نمونه‌برداری و تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی: پس از مکان‌یابی پنج نقطه مشاهداتی با استفاده از سامانه موقعیت‌یاب جهانی (GPS)^۱، در هر کدام از موقعیت‌های مورد نظر اقدام به حفر و تشریح خاک‌رخ بر اساس راهنمای تشریح و نمونه‌برداری صحرائی خاک‌ها (۲۳) شد. در ادامه، به‌منظور اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی لازم، از هر کدام از افق‌های ژنتیکی خاک‌رخ‌های تشریح‌شده، یک نمونه دو کیلوگرمی خاک برداشت شد. همچنین، با استفاده از سیلندرهای فلزی، نمونه‌های دست‌نخورده برای تعیین جرم مخصوص ظاهری (۲۴) هر کدام از این افق‌ها برداشت شد.

پس از هواخشک کردن نمونه‌های دست‌خورده خاک و عبور آن‌ها از الک دو میلی‌متری، درصد حجمی ذرات درشت (≥ 2 میلی‌متر) با استفاده از الک تعیین شد. همچنین، پی‌اچ گل اشباع توسط دستگاه پی‌اچ‌متر مدل ایستک^۲، قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک توسط دستگاه هدایت‌سنج مدل ایستک، ماده آلی به روش واکلی - بلک (۲۵)، بافت خاک به روش پیپت (۲۶)، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون برگشتی (۲۷)، ظرفیت تبادل کاتیونی خاک به روش باور (۲۰) و کلسیم محلول به روش تیتره کردن با EDTA (۲۸) اندازه‌گیری شدند. علاوه بر این، آهن و آلومینیوم قابل استخراج با اگزالات آمونیوم (Fe_0 و Al_0) و آهن قابل استخراج با سیترات - دی‌تیونات بی‌کربنات (Fe_d) به روش مهرا و جکسون (۱۹۶۰) تعیین شدند (۲۹). از دستگاه جذب اتمی (SavantAA, GBC Scientific Equipment, Braeside, VIC, Australia) برای اندازه‌گیری آهن و آلومینیوم عصاره‌ها استفاده شد.

3- Bruker D8 ADVANCE X-ray diffractometer
4- Diffractograms
5- Amplitude Sweep Test (AST)
6- Loading time

1- Global Positioning System
2- ISTEK

می‌باشند. در این مرحله، با جهت‌گیری مجدد ذرات خاک، انتقال ماده بین رفتارهای الاستیک و ویسکوز تغییر می‌کند و پایداری خاک‌دانه یا پایداری ریزساختار کاهش می‌یابد. حد بالایی این فاز، $\tan \delta = 1$ بوده که به آن نقطه جریان^۷ (γ_f) گفته می‌شود. در این نقطه، مدول‌های الاستیک و ویسکوز با هم برابر است ($G' = G''$). همچنین در این مرحله، افزایش تغییر شکل می‌تواند سبب تغییر بی‌بازگشت ریزساختار یا ریزخاک‌دانه شود.

فاز ۳: مرحله از بین رفتن ساختار خاک که در آن، $\tan \delta > 1$ است. در این مرحله، ریزساختار خاک و خاک‌دانه از بین رفته و خاک جریان‌یافته دارای رفتار ویسکوز خواهد بود. این تغییر شکل خاک، غیرقابل‌برگشت است (۲۲ و ۳۴).

لازم به ذکر است که به‌منظور مقایسه بهتر پارامترهای رئولوژیکی از مدول ذخیره، مدول اتلاف و ضریب اتلاف در ناحیه خطی برای بررسی رفتار ویسکوالاستیک نمونه‌ها در فرایند تغییر شکل در نقطه $\gamma = 0.001\%$ به‌منظور پاسخ به حداقل مقدار تنش وارد شده نیز استفاده می‌شود. به‌علاوه، برای ارزیابی بهتر دامنه شبه‌پلاستیک یا دامنه پایداری خاک‌دانه (که در آن، $\tan \delta < 1$ است)، پارامتر بدون بُعدی به‌نام انتگرال^۸ Z توسط استوپ و هورن (۲۰۱۸) تعریف شده است (۳۵). مقادیر بالاتر این پارامتر، بیان‌کننده پایداری بیش‌تر و خاصیت الاستیک بیش‌تر ریزساختار یا ریزخاک‌دانه خواهد بود. بنابراین، انتگرال Z بیان‌کننده مقاومت ساختاری خاک یا خاک‌دانه با توجه به از دست دادن خاصیت الاستیک با افزایش تغییر شکل است (شکل ۲). انتگرال Z توسط معادله زیر محاسبه می‌شود (۳۵):

$$\int_0^{\gamma_f} (1 - \tan \delta) d\gamma \quad (2)$$

7- Flow point

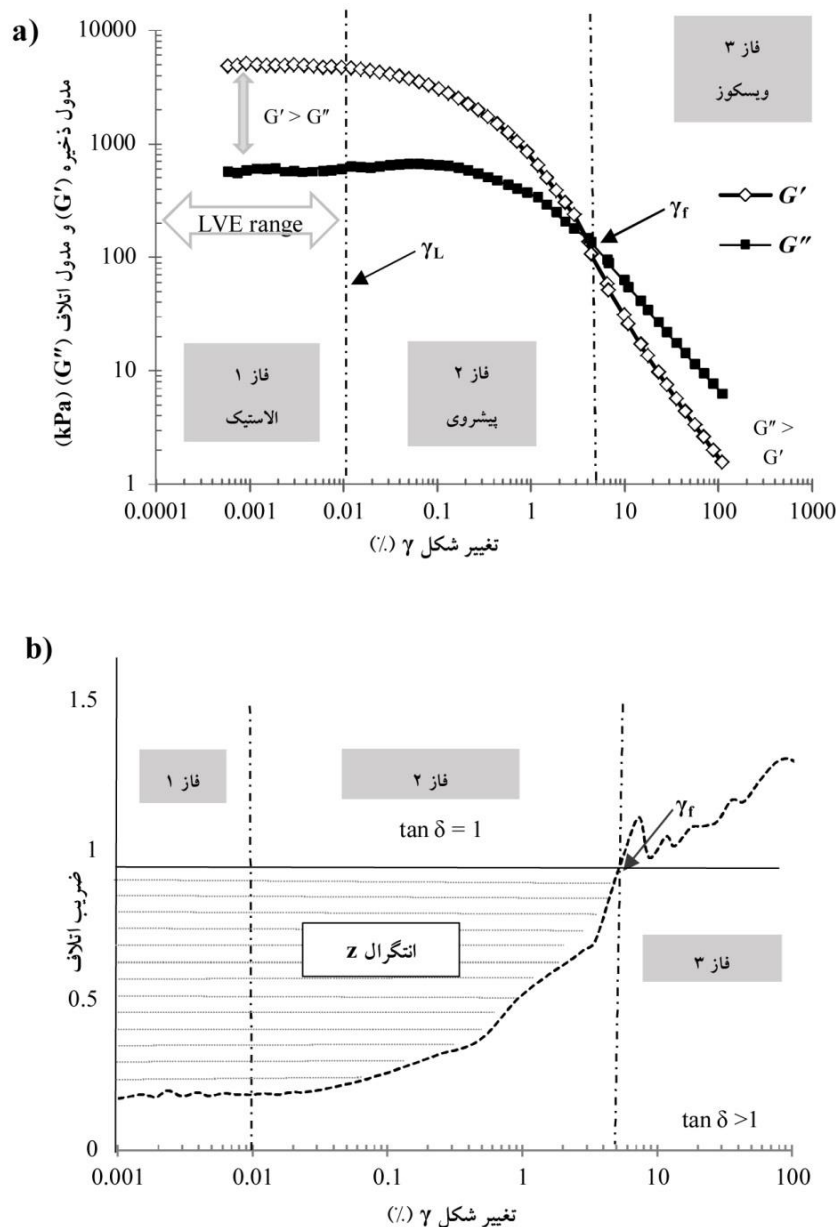
8- Integral z

که τ_c ، تنش برشی اعمال‌شده و γ_c ، کرنش اعمال‌شده می‌باشند. برای مواد ویسکوالاستیک، مدول G دارای دو جزء ذخیره^۱ (G') و اتلاف^۲ (G'') است. مدول ذخیره به انرژی ذخیره‌شده توسط نمونه در طی فرآیند تغییر شکل^۳ گفته می‌شود که رفتار الاستیک خاک را سبب می‌شود؛ در حالی که مدول اتلاف به انرژی از دست رفته در طی فرآیند تغییر شکل گفته می‌شود که رفتار ویسکوز خاک را موجب می‌گردد. برای تعیین این دو مدول می‌توان از آزمون رویشی دامنه کرنش (AST) در ناحیه خطی و غیرخطی استفاده نمود (شکل ۲). در این آزمون با اعمال یک تنش یا کرنش نوسانی کنترل‌شده به ماده و مقایسه آن با پاسخ ثبت‌شده می‌توان میزان سهم الاستیک و ویسکوز بودن آن ماده در شرایط کنترل‌شده محیطی را تعیین نمود. ضریب اتلاف^۴ ($\tan \delta$)، از طریق نسبت مدول اتلاف به مدول ذخیره محاسبه می‌شود (۲۰ و ۳۳). ضریب اتلاف همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است می‌تواند تغییر سه فاز مختلف (از الاستیک به ویسکوز) را محاسبه کند که فازهای مزبور به شرح زیر می‌باشند:

فاز ۱: مرحله شبه جامد (که به آن فاز "ژل" نیز گفته می‌شود) که در آن، $\tan \delta < 1$ بوده و با افزایش تغییر شکل، حالت ماده تغییر نمی‌کند. در این مرحله تغییر شکل اعمال‌شده، قابل‌بازیابی کامل یا جزئی می‌باشد (۳۴). هم‌چنین، مرحله شبه جامد به‌عنوان ناحیه خطی ویسکوالاستیک (LVE)^۵ نامیده شده و به حد بالایی آن، حد تغییر شکل (γ_L) گفته می‌شود (شکل ۲). در این مرحله، خواص ماده (مانند خاک)، تابع میزان تغییر شکل نیستند.

فاز ۲: مرحله پیشروی^۶ یا قبل از جریان که در آن، $\tan \delta < 1$ بوده و خواص ماده، تابع میزان تغییر شکل

- 1- Storage modulus
- 2- Loss modulus
- 3- Deformation
- 4- Loss factor
- 5- Linear viscoelastic region
- 6- Transgression



شکل ۲- نتیجه حاصل از یک آزمون رویشی دامنه کرنش.

(a) تغییرات G' (مدول ذخیره) و G'' (مدول اتلاف) در مقابل تغییر شکل γ ؛ ب: تغییرات ضریب اتلاف (G''/G') در مقابل تغییر شکل γ ؛ (۱) فاز الاستیک: که توسط ناحیه خطی ویسکوالاستیک تعریف شده است؛ (۲) فاز پیشروی: که محدود به حد تغییر شکل (γ_L) و نقطه جریان (γ_f) است؛ (۳) فاز ویسکوز. (b) وقتی که $\tan \delta > 1$ می‌شود، پایداری ساختمان نمونه مربوط به انتگرال z است که با خط تیره نشان داده شده و توسط رابطه ۲ محاسبه می‌شود)

Figure 2. a) Representative results from an amplitude sweep test (AST) with controlled shear deformation. a) G' (storage modulus) and G'' (loss modulus) versus deformation γ , divided into 1) quasi-elastic stage, which is defined by the linear viscoelastic (LVE) range, 2) transgression phase, bounded by the deformation limit (γ_L) and flow point (γ_f), and 3) viscous phase. b) loss factor $\tan \delta$ (G''/G') versus deformation γ ; when $\tan \delta > 1$ the medium becomes vicious. Material stiffness is related to *integral* z (indicated by dashed line and calculated by Equation [2])

می‌کند. اسپیندل به یک موتور الکتریکی متصل است که می‌تواند حرکت چرخشی (تناوبی) و یا فرکانسی اسپیندل را باعث شود.

به منظور انجام آزمون‌های رئولوژیک، یک آزمون روبشی دامنه کرنش (رفت و برگشت دامنه) در دمای ۲۵ درجه سلسیوس با تغییر شکل برشی کنترل شده^۳ (در دامنه لگاریتمی، $\gamma = 0.0001 - 100\%$) همراه با آزمون فرکانسی و مدت زمان ۳۰ ثانیه انجام شد. فرکانس مورد استفاده، یک مقدار ثابت ($f = 0.5 \text{ Hz}$) با زاویه فرکانس ω (برحسب رادیان بر ثانیه) بود (۲۰). این آزمون تا زمان جمع‌آوری ۶۲ نقطه اعمال تنش (به دست آوردن ۶۲ مدول ذخیره و ۶۲ مدول اتلاف) ادامه داشت و مدت زمان آزمون ۸ تا ۱۰ دقیقه به طول انجامید. نیروی وارد شده در ابتدای آزمون، ۱۴ نیوتن بود (۳۷) که در انتهای آزمون به صفر نیوتن رسید.

آماده‌سازی نمونه‌ها برای مطالعات رئولوژی: به منظور انجام مطالعات رئولوژی، نمونه‌های خاک از اعماق ۱۰ و ۴۰ سانتی‌متری (متناسب با حضور افق‌های ژنتیکی مختلف) انتخاب شدند. برای این منظور، نمونه خاکی که از الک دو میلی‌متر عبور داده شده بود، در سیلندرهای با قطر ۲/۵ سانتی‌متر و ارتفاع یک سانتی‌متر قرار داده و فشرده شد. نمونه‌های مورد نظر ابتدا از طریق فرایند مویینگی و با استفاده از آب مقطر اشباع شدند. به عبارت بهتر، سیلندرهای مورد نظر را بر روی یک صفحه شیشه‌ای متخلخل^۱ قرار داده و درون آن‌ها یک کاغذ صافی قرار داده شد. سپس این سیلندرها را پر از خاک کرده و بر روی یک صفحه سرامیکی ۰/۵ بار در ظرفی حاوی آب مقطر به مدت ۷۲ ساعت قرار داده تا نمونه‌ها توسط فرآیند مویینگی اشباع شوند (۳۶).

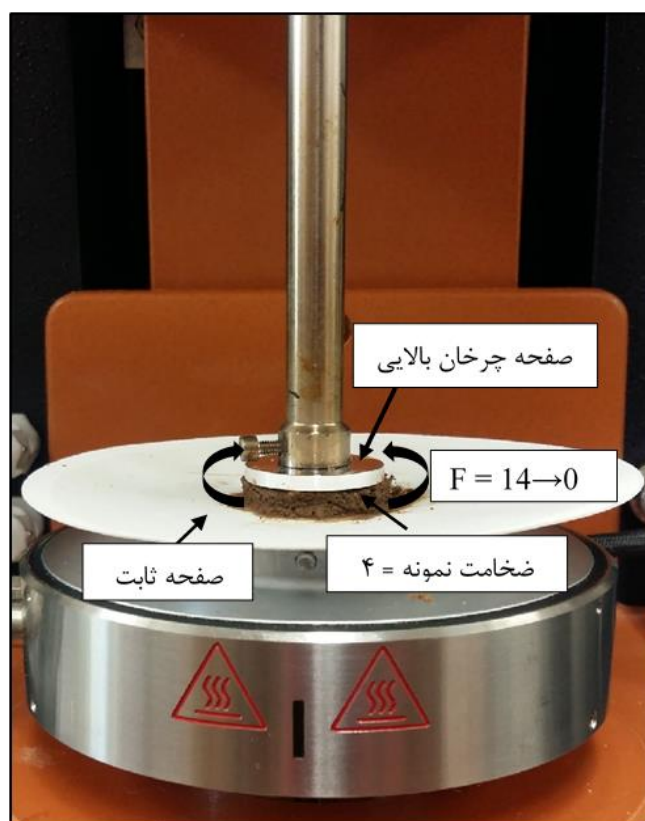
شاخص‌های رئولوژیکی خاک: به منظور تعیین رفتار رئولوژیک نمونه‌های خاک، از دستگاه رئومتر Discovery Hybrid Rheometer-3 (DHR-3; TA Instruments, New Castle, DE, USA) که مجهز به سامانه اندازه‌گیری صفحات موازی^۲ با قطر ۲۵ میلی‌متر و با فاصله چهار میلی‌متر است، استفاده شد (شکل ۳).

دستگاه رئومتر مورد استفاده، دارای یک محفظه دو جداره برای کنترل دما و متصل به ژنراتور نیتروژن برای ایجاد محیط خنثی می‌باشد. این دستگاه، دارای یک صفحه ثابت بوده که نمونه روی آن گذاشته می‌شود و یک صفحه چرخان یا اسپیندل به قطر ۱۲ میلی‌متر دارد که با پایین آمدن آن و قرار گرفتن روی نمونه، فرکانس مورد نظر را بر روی نمونه اعمال

3- Controlled shear rate

1- Sintered glass plate

2- Plate-plate



شکل ۳- رئومتر مورد استفاده در پژوهش حاضر و سامانه اندازه‌گیری صفحات موازی برای آزمون روبشی دامنه کرنش با تغییر شکل برشی کنترل شده (نیروی وارد شده (F) بر نمونه‌های خاک از ۱۴ نیوتن (شروع) تا صفر نیوتن (پایان) متغیر بود و فاصله بین صفحات (ضخامت نمونه)، چهار میلی‌متر بود).

Figure 3. Rheometer and measuring system of parallel plates for an amplitude sweep test (AST) with controlled shear deformation. The soil samples were prepared with the normal force (F) from 14 N (starting) to 0 N (ending) and a gap between plates (i.e., sample thickness) of 4 mm.

مطالعات آماری: سامان‌دهی داده‌ها و ارائه خلاصه آماری آن‌ها (مانند میانگین و انحراف معیار) برای تمام پارامترهای رئومتری و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی محاسبه شده برای هر افق، در محیط نرم‌افزار EXCEL/v.365 انجام شد. همچنین، ترسیم نمودار هم‌بستگی بین ویژگی‌های مختلف اندازه‌گیری شده با استفاده از نرم‌افزار R/v.2020 (Windows Version 4.0.3) انجام گرفت.

هم‌چنین، به‌منظور بررسی رفتار ویسکوالاستیک نمونه‌ها، نمودارهای مدولی-تغییر شکل ترسیم شدند. به‌دیگر سخن، با استفاده از داده‌های مربوط به نرخ نوسان اعمال شده و مدول‌های اندازه‌گیری شده (ذخیره و اتلاف)، نموداری رسم شد تا بتوان رفتار و تغییر فاز نمونه‌ها را بررسی نمود. لازم به ذکر است که از نرم‌افزار TRIOS/v5.1.0 (TA Instruments, New Castle, DE, USA) برای ترسیم نمودارهای گفته شده و نیز محاسبه حد تغییر شکل (γ_L)، حد جریان (γ_f)، ناحیه خطی ویسکوالاستیک و انتگرال Z استفاده گردید.

نتایج و بحث

خصوصیات مورفولوژیکی، فیزیکی، شیمیایی و طبقه‌بندی خاک‌ها: جدول ۲ نشان‌دهنده خصوصیات مورفولوژیکی، فیزیکی و شیمیایی خاک‌رخ‌های حفرشده در مناطق مختلف استان چهارمحال و بختیاری می‌باشد. علاوه بر این، جدول مزبور نشان‌گر نتایج طبقه‌بندی خاک‌رخ‌های مطالعه‌شده بر اساس سامانه‌های رده‌بندی آمریکایی (۳۸) و طبقه‌بندی جهانی (۳۹) می‌باشد. مشاهده می‌شود که هیوی رنگ این خاک‌رخ‌ها در 2.5 YR تا 10 YR در شرایط مرطوب متغیر است. کربنات‌های ثانویه در برخی از خاک‌رخ‌های حفرشده در استان چهارمحال و بختیاری به صورت پودری و سخت‌دانه در افق‌های Bk مشاهده شدند. ساختمان خاک در افق‌های سطحی این خاک‌رخ‌ها عمدتاً به صورت دانه‌ای و در افق‌های زیرسطحی آن‌ها به صورت مکعبی زاویه‌دار و بدون زاویه بود. میزان pH خاک‌ها عمدتاً از خنثی تا کمی قلیایی متغیر بود. همچنین، قابلیت هدایت الکتریکی آن‌ها به علت بارش نسبتاً خوب در مناطق مورد مطالعه ناچیز بود. با توجه به موقعیت خاک‌رخ‌ها و کاربری متفاوت زمین، میزان کربن آلی خاک‌ها از ۰/۲ تا ۶/۸ درصد متغیر بود. ظرفیت تبادل کاتیونی خاک‌ها نیز در دامنه‌ای از ۱۶/۲ تا ۳۲/۲ سانتی‌مول بار بر کیلوگرم تغییرپذیر بود.

اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن در دامنه‌ای از ترکیبات بی‌شکل تا ترکیبات کاملاً متبلور وجود دارند (۴۰). در خاک‌ها میزان اکسید آهن و آلومینیوم بی‌شکل به وسیله آگزالات آمونیوم اسیدی (Fe_o) و Al_o اندازه‌گیری می‌شوند؛ در حالی که مقدار کل ترکیبات آهن پدوژنیک (Fe_d) توسط سترات-بی‌کربنات-دی‌تیونات عصاره‌گیری می‌شود. وجود آلومینیوم بی‌شکل یا آلفان بیش‌تر در خاک‌رخ‌های شماره یک و دو را می‌توان نتیجه وجود مواد مادری آذرین (جدول ۱) در این منطقه کوهستانی دانست (۴۱). همچنین، میزان Fe_o در خاک‌رخ شماره یک بیش‌تر از مقدار Fe_d بود؛ در صورتی که در دیگر خاک‌رخ‌ها میزان Fe_d بیش‌تر بود (جدول ۲). دلیل احتمالی این موضوع را می‌توان به تکامل کم‌تر خاک انتی‌سولز نسبت به دیگر خاک‌ها نسبت داد. ایوبی و همکاران (۲۰۰۲) مشاهده کردند که رابطه‌ای قوی بین خاک‌هایی که بیش‌تر تحت‌تأثیر فرآیندهای خاک‌سازی بوده‌اند و میزان Fe_d وجود دارد (۴۲). هو و همکاران (۲۰۰۹) نیز بیان کردند که فرآیندهای پدوژنز باعث افزایش میزان Fe_d و درصد رس در خاک‌ها می‌شوند (۴۳). با توجه به اطلاعات جدول ۲، مشاهده می‌گردد که خاک‌رخ شماره یک، از میزان رس کمتری نسبت به دیگر خاک‌رخ‌ها برخوردار است.

جدول ۲- برخی از ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی و مورفولوژیکی خاک‌های مطالعه شده.
Table 2. Summary of physicochemical and morphological properties of the studied pedons^a.

افق Horizon	Depth (cm)	Clay	Sand	CF	SOC	CCE	CEC (cmol _c kg ⁻¹)	pH	EC (dS m ⁻¹)	Ca ²⁺ (mmol l ⁻¹)	Fe _d	Fe _o	Al _o	Bd (g cm ⁻³)	Color ^b moist	SR	ST
P1																	
Soil Taxonomy: Loamy-skeletal, Mixed, Superactive, Calcareous, Frigid Lithic Udorthents																	
WRB: Skeletic Protic Epileptic Oxyaque Turbic Cryosols (Eutric, Akrofluvic, Ochric, Thixotropic)																	
AC	0-13	21	43	15.6	2.5	0.5	25.8	7.2	0.6	1.1	9.2	10.5	5.7	1.4	2.5 Y 4/1	gr	L
C	13-23	8	68	92.0	0.4	3	16.2	7.6	0.8	0.1	10.8	12.4	6.7	1.8	7.5 YR 4/4	m	SL
R	23+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P2																	
Soil Taxonomy: Loamy-skeletal, Smeectitic, Mesic Udic Haploxererts																	
WRB: Haplic Vertisols (Hypereutric, Grumic, Profundihumic, Skeletic)																	
Ap	0-14	53	5	30.2	6.8	2.5	27.9	7.4	0.8	9.1	18.3	11.2	6.4	1.3	7.5 YR 3/2	gr	SiC
Bss1	14-29	33	19	50.2	1.4	2.5	32.2	7.6	0.6	6.4	15.7	11.3	6.2	1.4	7.5 YR 4/3	abk	SiCL
Bss2	29-48	33	31	57.1	1.2	6	32.1	7.6	0.6	6.3	16.6	9.9	6.5	1.4	7.5 YR 4/3	abk	CL
C	48-125	26	56	88.3	0.9	8	21.2	8	0.5	9.2	15.5	12.8	8.1	1.6	7.5 YR 4/4	sl	SCL
P3																	
Soil Taxonomy: Fine-loamy, Mixed, Superactive, Mesic Typic Calcixerolls																	
WRB: Katoluvic Katocalcic Kastanozems (Profundihumic, Anoloamic)																	
A	0-31	35	24	25.1	6.4	5.5	28.3	7.1	0.9	7.2	9.8	6.3	3.7	1.1	10 YR 3/2	gr	CL
Btk1	31-81	33	28	21.9	0.8	19.5	24.6	7.5	0.7	8.5	10.4	6.0	2.1	1.2	5 YR 3/2	abk	CL
Btk2	81-120	41	25	28.4	0.8	24.5	25.4	7.6	0.8	4.1	6.8	2.4	0.5	1.6	7.5 YR 4/4	abk	C

ادامه جدول ۲ -

Continue Table 2.

افق Horizon	Depth (cm)	Clay	Sand	CF %	SOC	CCE	CEC ($\text{cmol}_+ \text{kg}^{-1}$)	pH	EC (dS m^{-1})	Ca^{2+} (mmol l^{-1})	Fe_d	Fe_o (g kg^{-1})	Al_o	Bd (g cm^{-3})	Color ^b moist	SR	ST
P4																	
Soil Taxonomy: Loamy-skeletal, Mixed, Superactive, Mesic Calcic Haploxeralfs WRB: Amphilitic Calcisols (Aric, Amphilitic, Ochric)																	
Ap	0-25	38	13	23.1	0.9	19.5	24.2	7.4	1.0	7.1	5.9	2.2	0.4	1.1	10 YR 4/4	gr	SiCL
Btk1	25-57	41	27	43.6	0.3	23.5	20.4	7.5	2.4	8.3	6.0	1.9	0.4	1.5	10 YR 5/4	sbk	C
Btk2	57-94	43	13	33.8	0.4	26.0	23.3	7.6	0.6	4.4	7.0	2.5	0.6	2.0	10 YR 4/4	abk	SiC
Bk	94-150	37	19	36.5	0.4	26.5	23.3	7.8	0.7	5.6	6.2	1.9	0.4	2.0	10 YR 4/6	abk	SiCL

P5

Soil Taxonomy: Clayey-skeletal, Mixed, Active, Mesic Sodic Calcixerpts
WRB: Skeletic Calcisols (Amphiclayic, Ochric, Sodic)

A	0-25	26	36	37.0	0.8	22.5	17.5	7.4	0.8	7.1	8.7	2.8	0.6	1.2	7.5 YR 4/4	gr	L
Bk1	25-65	48	14	44.0	0.4	28.5	23.2	7.8	1.4	8.0	6.9	1.6	0.3	1.5	10 YR 5/6	abk	C
Bk2	65-94	45	15	52.1	0.3	30.5	24.3	7.8	1.2	5.4	4.7	0.8	0.1	1.5	10 YR 5/6	abk	SiC
Bk3	94-150	43	17	57.1	0.2	30.7	24.7	7.9	0.9	9.2	6.0	0.4	0.1	1.5	10 YR 6/4	abk	SiC

^a Soils classification is based on the Soil Taxonomy system (Soil Survey Staff, 2014).

^b Color: Used standard Munsell® notation from the "Soil Color" section

Note: coarse fragments (CF); soil organic carbon (SOC); calcium carbonate equivalent (CCE); cation exchange capacity (CEC); sodium adsorption ratio (SAR); electrical conductivity (EC); soluble calcium (Ca^{2+}); dithionite-citrate-extractable Fe (Fe_d); oxalate-extractable Fe (Fe_o); bulk density (Bd); saturation percentage (SP); reducing condition (rH) - = Not detected

Soil structure (SR): crumb (cr), granular (gr), massive (m), subangular blocky (sbk)

Soil texture (ST): Clay (C), Loam (L), Clay Loam (CL), Sandy Loam (SL), Silty Loam (SiL), Sandy Clay Loam (SCL), Silty Clay Loam (SiCL)

سطح است (شکل ۴). کیمبل (۲۰۰۴) چنین شواهدی را در خاک‌های کرایوسولز شمال کانادا و مناطق کوهستانی نروژ مشاهده کرد. در واقع خاک مزبور، نشان‌گر یک خاک کم‌عمق با حضور لایه سنگی در عمق ۲۳ سانتی‌متری است (۴۴).



شکل ۴- شواهد یخ‌زدگی موجود در سطح خاک‌رخ شماره یک.

Figure 4. Evidence of perennial ice segregation on the surface of Pedon 1.

مشاهده شد. وجود پوسته‌های رسی، یک از شرایط لازم برای نامگذاری افق آرگیلیک می‌باشد که حضور آن‌ها بر روی سطوح خاکدانه‌ها و یا داخل حفرات را می‌توان به معنای تغییر مکان یا جابه‌جایی رس‌ها در خاک محسوب نمود (۴۵). خادمی و مرموت (۲۰۰۳) بیان نمودند که حضور افق آرگیلیک به همراه سایر افق‌ها (مانند کلسیک و جیپسیک) در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به منزله فرایند چندمرحله‌ای تشکیل و تکامل این خاک‌ها طی اقلیم مرطوب گذشته در این مناطق می‌باشد (۴۶). به‌علاوه، کربنات‌های ثانویه به‌صورت پودری، توده‌ای و آویزه‌ای^۴ در افق‌های کلسیک موجود در خاک‌رخ شماره پنج مشاهده شدند (شکل ۷).

4- Pendant

خاک‌رخ شماره یک در یک دره دارای یخ و یخبندان با ارتفاع بیش از پنج متر در منطقه زردکوه بختیاری با رژیم حرارتی فریجید واقع شده است. لایه سطحی این خاک، دارای یخ‌زدگی بوده و نشان‌گر آثار و شواهد یخ‌زدگی به‌صورت رد پای پرندگان و چندضلعی‌های حاصل از فشار و یا ذوب یخ‌ها در

خاک‌رخ شماره دو نشان‌دهنده شواهد سطوح فشاری^۱ در عمق ۱۴ تا ۴۸ سانتی‌متر (شکل ۵) و درز و شکاف‌های سطحی است که به‌صورت دوره‌ای باز و بسته می‌شوند (شکل ۶). این شواهد به‌دلیل وجود مقادیر بالای کانی‌های اسمکتیت در این خاک‌رخ می‌باشد (جدول ۳). از سوی دیگر، غالب بودن فرایند اختلاط خاک^۲ ناشی از انبساط و انقباض این کانی‌ها، اجازه تشکیل افق آرگیلیک در این خاک‌رخ را نداده است. اولیایی (۲۰۱۲) نیز به این موضوع اشاره نموده است (۴۵). در مقابل، در برخی از افق‌های موجود در خاک‌رخ‌های شماره سه و چهار، پوسته‌های رسی^۳

1- Slickensides
2- Argilli-pedoturbation
3- Clay films



شکل ۵- شواهد حضور سطوح فشاری در افق Bss1 خاک‌رخ شماره دو.

Figure 5. Evidence for the slickenside in the Bss1 horizon of Pedon 2.



شکل ۶- درز و شکاف‌های موجود در سطح خاک‌رخ شماره دو.

Figure 6. Shrink-swell cracks in the surface of Pedon 2.



شکل ۷- کربنات‌های ثانویه به صورت آویزه‌ای موجود در افق Bk2 خاک‌رخ شماره پنج.

Figure 7. Pendant secondary carbonates in the Bk2 horizon of Pedon 5.

رده‌بندی آمریکایی به نوعی با مد نظر قرار دادن رژیم حرارتی فریجید لحاظ شده است. با این حال، به نظر می‌رسد که استفاده از گروه مرجع کرایوسولز برای این خاک‌رخ، واقعیت صحرا را بهتر نشان می‌دهد و شرایط واقعی و مورفولوژیکی آن را گویاتر بیان می‌کند. نکته قابل توجه دیگر در طبقه‌بندی این خاک‌رخ بر مبنای سامانه جهانی، استفاده از توصیف‌کننده مکمل "تیکسوتروپیک"^۴ است. در واقع این توصیف‌کننده نمایانگر وجود موادی در فاصله ۵۰ سانتی‌متری سطح این خاک است که تحت فشار یا سایش، از یک حالت جامد پلاستیکی به یک مرحله روانی (سیال) تبدیل شده و دوباره به حالت جامد در می‌آیند. این واقعیت براساس مطالعات رئولوژی انجام شده برای خاک‌رخ مزبور (شکل ۸) به دست آمده است که بر اساس ضریب اتلاف محاسبه شده می‌توان دریافت این خاک از خاصیت الاستیک بالایی برخوردار است. در نتیجه،

خاک‌رخ‌های مورد مطالعه در سه منطقه مطالعاتی در استان چهارمحال و بختیاری بر اساس سامانه رده‌بندی آمریکایی در پنج رده انتی‌سولز، ورتی‌سولز، مالی‌سولز، آلفی‌سولز و اینسپتی‌سولز و بر مبنای سامانه جهانی در چهار گروه مرجع کرایوسولز، ورتی‌سولز، کاستانوزمز و کلسی‌سولز قرار گرفتند (جدول ۲). در این بین، وجود افق کراییک با شواهدی از قطعات یخی چندساله^۱ و فرایندهای کرایوژنیک^۲ (به عنوان مثال، درزه‌های راه‌راه^۳ ریز شبیه رد پای پرندگان و چندضلعی‌های حاصل از فشار و یا ذوب یخ‌ها در سطح خاک (شکل ۴) در ارتفاعات بالای زردکوه بختیاری از جمله یافته‌های جدیدی است که در پژوهش‌های پیشین به آن اشاره نشده است. وجود این افق باعث قرارگیری خاک‌رخ شماره یک در گروه مرجع کرایوسولز گردیده است. این موضوع در سامانه

4- Thixotropic

1- Perennial ice segregation
2- Cryogenic processes
3- Stripes

ورمی کولیت، اسمکتیت، ایلیت، کلریت و کوارتز هستند (جدول ۳). خاکرخ شماره یک درصد بالایی از کائولینیت ($\leq 25\%$) و مقدار متوسطی از دیگر کانی‌ها (۱۰-۲۵٪) را نشان داد. در خاکرخ شماره دو حضور مقادیر بالای کانی اسمکتیت مشخص شد. کائولینیت، اسمکتیت، ورمی کولیت و کلریت کانی‌های غالب افق‌های سطحی خاکرخ‌های شماره سه و چهار می‌باشند که در افق‌های زیرسطحی کانی کوارتز دارای میزان غالب است. سرانجام، خاکرخ شماره پنج دارای میزان متوسطی از کائولینیت، اسمکتیت و ورمی کولیت در افق سطحی و کائولینیت به صورت غالب و اسمکتیت به مقدار متوسط در افق‌های زیرسطحی است.

موضوع مزبور به نوعی نشان‌گر کاربرد مطالعات رئولوژی در طبقه‌بندی خاک می‌تواند تلقی شود. تارنوکای و بوکھیم (۲۰۱۱) با مطالعه بر روی خاک‌های کرایوسولز کانادا مشاهده کردند که خاصیت تیکسوتروپی خاک‌ها اثر مستقیم بر روی ضریب انعطاف‌پذیری و خاصیت الاستیک آن‌ها در فازهای I و II دارد؛ چرا که طی اعمال نیروی برشی، نمونه‌ها نمی‌توانند کاملاً از شکل اولیه خارج شوند (مانع تغییر شکل^۱ می‌شوند) و به سرعت شکل اولیه خود را باز می‌یابند (۴۷). این در حالی است که پس از اعمال نیروی برشی بیشتر، سریعاً از فاز الاستیک خارج شده و به حالت ویسکوز در می‌آیند.

نتایج کانی‌شناسی رس: تجزیه و تحلیل نیمه کمی کانی‌های رسی نشان داد که خاکرخ‌های مورد مطالعه دارای کانی‌های مختلفی از جمله کائولینیت،

جدول ۳- کانی‌شناسی رس افق‌های منتخب خاکرخ‌های مورد مطالعه.

Table 3. Clay mineralogy of selected soil horizons of studied pedons.

شماره خاکرخ Pedon No.	افق Horizon	کانی‌های رسی Clay minerals
1	AC	Kaolinite (D), Smectite (M), Vermiculite (M), Illite (M), Chlorite (M), Quartz (T)
	C	Kaolinite (D), Quartz (M), Illite (M), Chlorite (M), Smectite (T), Vermiculite (T)
2	Ap	Smectite (D), Kaolinite (T), Vermiculite (T), Illite (T)
	Bss1	Smectite (D), Kaolinite (T), Quartz (T)
	Bss2	Smectite (D), Kaolinite (T), Quartz (T)
3	C	Smectite (D), Quartz (M), Kaolinite (T)
	A	Kaolinite (M), Smectite (M), Vermiculite (M), Quartz (M), Chlorite (T)
4	Btk2	Quartz (D), Kaolinite (M), Smectite (M), Vermiculite (T), Illite (T)
	Ap	Kaolinite (M), Smectite (M), Vermiculite (M), Chlorite (M), Illite (T), Quartz (T)
	Btk2	Quartz (D), Kaolinite (M), Smectite (M), Vermiculite (M), Chlorite (M), Illite (T)
5	Bk	Quartz (D), Kaolinite (M), Smectite (M), Vermiculite (T), Chlorite (T), Illite (T)
	A	Kaolinite (M), Smectite (M), Vermiculite (M), Chlorite (T), Quartz (T)
	Bk1	Kaolinite (D), Smectite (M), Vermiculite (M), Chlorite (T), Quartz (T)
	Bk3	Kaolinite (D), Smectite (M), Quartz (T), Vermiculite (T), Chlorite (T)

D = Dominant ($\geq 25\%$); M = Moderate (10-25%); T = Trace ($< 10\%$)

پایین (۰/۱۶ درصد) و خاک‌های مالی سولز، آلفی سولز و اینسپتی سولز نیز دارای γ_L تقریباً مشابه (در افق‌های سطحی و زیرسطحی) در دامنه‌ای از ۰/۱۹ تا ۰/۳۱ درصد می‌باشند.

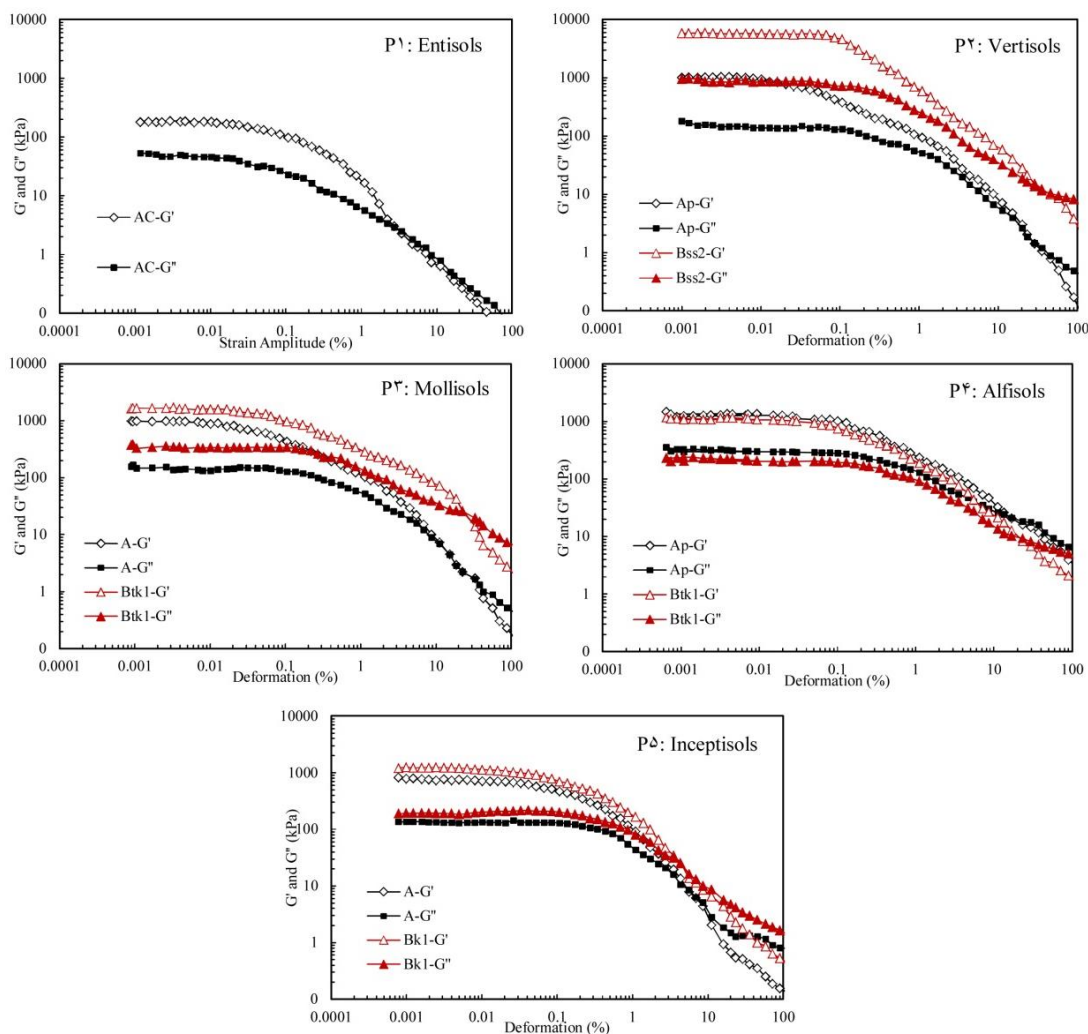
نکته قابل توجه دیگر، این که لزوماً رابطه مستقیمی بین مدول‌های ناحیه خطی و طول ناحیه خطی وجود ندارد. فرض بر این است که هرچه ناحیه خطی بیش‌تر باشد (γ_L بالا)، خاصیت الاستیک و توان بازگشت‌پذیری خاک بیش‌تر است (۴۸). ناحیه خطی برای انتی سولز کم‌تر از خاک‌های اینسپتی سولز، مالی سولز و آلفی سولز و ناحیه خطی ویسکوالاستیک ورتی سولز بیش‌تر از دیگر خاک‌ها بود (شکل ۸). حد بالاتر γ_L در ورتی سول احتمالاً از درصد بالاتر کربن آلی خاک و هم‌چنین درصد زیاد رس و وجود اسمکتیت بالا ناشی می‌شود. کربن آلی به‌عنوان یک ماده سیمانی قوی باعث افزایش پایداری خاک می‌شود (۴۹، ۵۰، ۵۱ و ۱۱). این اثر با کاهش طول ناحیه خطی در خاک‌های تحت اکسیداسیون ماده آلی برای مطالعه اثر تثبیت‌کنندگی آن تأیید شده است (۲۲). مارک‌گراف و هورن (۲۰۰۷) طول ناحیه خطی بالاتری (γ_L بالا) را در ورتی سولزها نسبت به اکسی سولزها مشاهده کردند (۲۲). از یک‌طرف، مقدار زیاد رس و کربن آلی در ورتی سولها باعث افزایش قابلیت الاستیک ناشی از جذب آب می‌شود. از سوی دیگر، کاتیون‌های بازی موجود در محلول خاک و بر روی سطوح کانی‌های قابل انبساط (اسمکتیت)، نقش مهمی در این راستا بازی می‌کنند و ناحیه خطی گسترده‌تر همراه با مقاومت برشی بالاتر را در خاک‌های ورتی سولز رقم می‌زنند (۴۸). با توجه به نتایج کانی‌شناسی رس خاک‌های اینسپتی سولز و انتی سولز مطالعه شده که کانی کائولینیت در آن‌ها از فراوانی نسبی بیش‌تری برخوردار بود (جدول ۲)، شاید بتوان ناحیه خطی کم‌تر این خاک‌ها را بر این اساس توجیه

پارامترهای رئولوژیکی خاک‌ها: شکل ۸ نشانگر نتایج آزمون روبشی دامنه کرنش انجام‌شده برای خاک‌رخ‌های پنج‌گانه مطالعاتی است. منحنی‌های ترسیم‌شده برای این منظور نشان می‌دهند که مدول ناحیه خطی نمونه‌های خاک در مرحله اولیه الاستیک ذخیره‌شده (فاز I) با یک‌دیگر متفاوت می‌باشند. افق Bss2 ورتی سولز (خاک‌رخ شماره دو)، بالاترین مقادیر اولیه مدول ذخیره و اتلاف را داشت که G'_0 از ۵۰۰۰ تا ۶۰۰۰ کیلوپاسکال و G''_0 از ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ کیلوپاسکال متغیر بود. مقادیر بالای مدولی، بیانگر مقاومت بالاتر در برابر تغییر شکل به دلیل خاصیت الاستیک بالای خاک می‌تواند باشد. هم‌چنین، افق AC انتی سولز (خاک‌رخ شماره یک)، دارای کم‌ترین مقادیر مدولی با G'_0 از ۱۵۰ تا ۲۰۰ کیلوپاسکال و G''_0 از ۳۰ تا ۵۰ کیلوپاسکال بود. افق‌های سطحی (Ap) و زیرسطحی (Btk1) خاک‌های مالی سولز (خاک‌رخ شماره سه) و آلفی سولز (خاک‌رخ شماره چهار) در مقایسه با افق‌های دیگر، مقادیر بالاتری از G'_0 و G''_0 داشتند. به‌علاوه، خاک‌های آلفی سولز و اینسپتی سولز (خاک‌رخ شماره پنج)، دارای مقادیر مدولی G' و G'' مشابه در افق‌های سطحی و زیرسطحی بودند (شکل ۸).

تبدیل منحنی‌های آزمون روبشی دامنه کرنش به پارامترهای رئولوژیکی نشان می‌دهد که مقاومت ریزخاک‌دانه در طی درجات مختلف تکامل خاک‌ها متفاوت بوده و خاک‌رخ‌های مورد مطالعه دارای γ_L ، γ_f و انتگرال Z متفاوتی هستند (جدول ۴). افق‌های سطحی خاک، دارای کم‌تری نسبت به افق‌های زیرسطحی می‌باشند. حد تغییر شکل γ_L یا ناحیه خطی در ورتی سول، به‌ویژه در افق Bss2، بسیار بالا می‌باشد (۰/۳۵-۰/۶۳ درصد) که نشان‌دهنده خاصیت برگشت‌پذیری یا الاستیک بالای این خاک، تحت تنش برشی است (۴۸). انتی سول دارای γ_L

است. به علاوه، باید توجه داشت که یکی از عوامل تشکیل پستی و بلندی‌های ریز (گیلگای^۱) در سطح برخی از خاک‌های ورتی‌سولز، همین رفتار الاستیک و برگشت‌پذیر رس‌های موجود در آن‌ها می‌باشد (۵۲).

نمود. پرتیل و همکاران (۲۰۱۸) نیز بیان نمودند که خاک‌های دارای کانی غالب کائولینیت، خاصیت الاستیک کم‌تری دارند (۵۲). از سوی دیگر، می‌توان گفت در ورتی‌سولز، رفتار برشی لغزشی^۱ غالب است که به واسطه حضور رس اسمکتیت در آن ایجاد شده



شکل ۸- منحنی‌های آزمون روبشی دامنه کرنش ترسیم‌شده برای خاک‌رخ‌های مطالعه‌شده.

(γ : تغییر شکل برشی کنترل‌شده، G' : مدول ذخیره، G'' : مدول اتلاف)

Figure 8. Results of amplitude sweep test (AST) of the studied pedons. (γ : deformation, G' : storage modulus, G'' : loss modulus)

1- Sliding shear

2- Gilgai

(۲۲). هم‌چنین، γ_f می‌تواند تحت تأثیر اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن و آلومینیوم باشد (۳۷). مارک‌گراف و هورن (۲۰۰۷) نیز با مطالعه خاک‌های اکسی‌سولز برزیل دریافتند که اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن و آلومینیوم نشان‌دهنده ویژگی سختی و مقاومت برشی این خاک‌ها نمی‌باشند؛ بلکه مقاومت برشی آن‌ها به دلیل نوع آرایش بسیار پایدار ذرات خاک و نوع سیمان موجود بین آن‌ها است که توسط کانی‌های رسی و ترکیبات آلی تأمین می‌شود (۲۲).

نقاط جریان γ_f به‌طور قابل‌توجهی در افق‌های سطحی و زیرسطحی خاک‌های انتی‌سولز و اینسپتی‌سولز پایین بود (۳/۴ تا ۵/۶ درصد) که به دلیل انتقال سریع بین فازهای الاستیک و پیشروی می‌باشد (جدول ۴). خاک‌های مالی‌سولز و آلفی‌سولز، دارای نقاط جریان تقریباً مشابه در دامنه ۱۷/۱ تا ۲۳/۶ درصد بودند و خاک ورتی‌سولز مطالعه‌شده دارای بالاترین نقطه جریان (۲۸/۸ درصد) در افق سطحی و $\gamma_f = ۴۵/۱$ درصد در افق زیرسطحی بود. نقطه جریان γ_f می‌تواند متأثر از کربن آلی خاک و بافت خاک باشد.

جدول ۴- نتایج آزمون رویشی دامنه کرنش همراه با تغییر شکل برشی کنترل‌شده خاک‌های مطالعه‌شده.

Table 4. Results of amplitude sweep test (AST) with controlled shear deformation of the studied pedons.

افق Horizon	انتگرال z Integral z	نقطه جریان γ_f (%)	حد تغییر شکل γ_L (%)	مدول اتلاف G''_0 (kPa)	مدول ذخیره G'_0 (kPa)
خاک‌رخ شماره یک (انتی‌سولز) P1: Entisol					
AC	12.7	3.4	0.016	53	180
خاک‌رخ شماره دو (ورتی‌سولز) P2: Verstisol					
Ap	22.3	28.8	0.035	183	1004
Bss2	55.7	45.1	0.063	957	5808
خاک‌رخ شماره سه (مالی‌سولز) P3: Mollisol					
A	24.7	22.5	0.020	156	975
Btk1	19.8	21.3	0.030	373	1630
خاک‌رخ شماره چهار (آلفی‌سولز) P4: Alfisol					
Ap	17.8	17.1	0.019	357	1457
Btk1	18.9	23.6	0.031	234	1170
خاک‌رخ شماره پنج (اینسپتی‌سولز) P5: Inceptisol					
A	9.5	5.5	0.021	137	819
Bk1	10.5	5.6	0.030	190	1211

بعد از مدتی می‌توانند با بستن منافذ به خاک‌های با قوام تبدیل شده و ساختار خود را بازیابند (۵۳). کیمبل (۲۰۰۴) در کتاب خود تحت عنوان "کرایوسولزها" عنوان می‌کند که کرایوسولزهای تیکسوتروپ عموماً دارای بافت لومی بوده و در دره‌های آبرفتی رودخانه‌های یخی وجود دارند (۴۴). او همچنین بیان می‌دارد که این خاک‌ها به‌طور معمول دارای یک افق AC می‌باشند که در یک بستر واریزه‌ای^۱ سنگی تشکیل یافته است. شرایط مزبور دقیقاً با مشاهدات صحرایی خاک‌رخ شماره یک مطالعه‌شده در استان چهارمحال و بختیاری مطابقت دارند و بر کرایوسولز بودن و البته تیکسوتروپ بودن آن صحنه می‌گذارند (شکل ۹).

همبستگی انتگرال Z با ویژگی‌های فیزیکی و

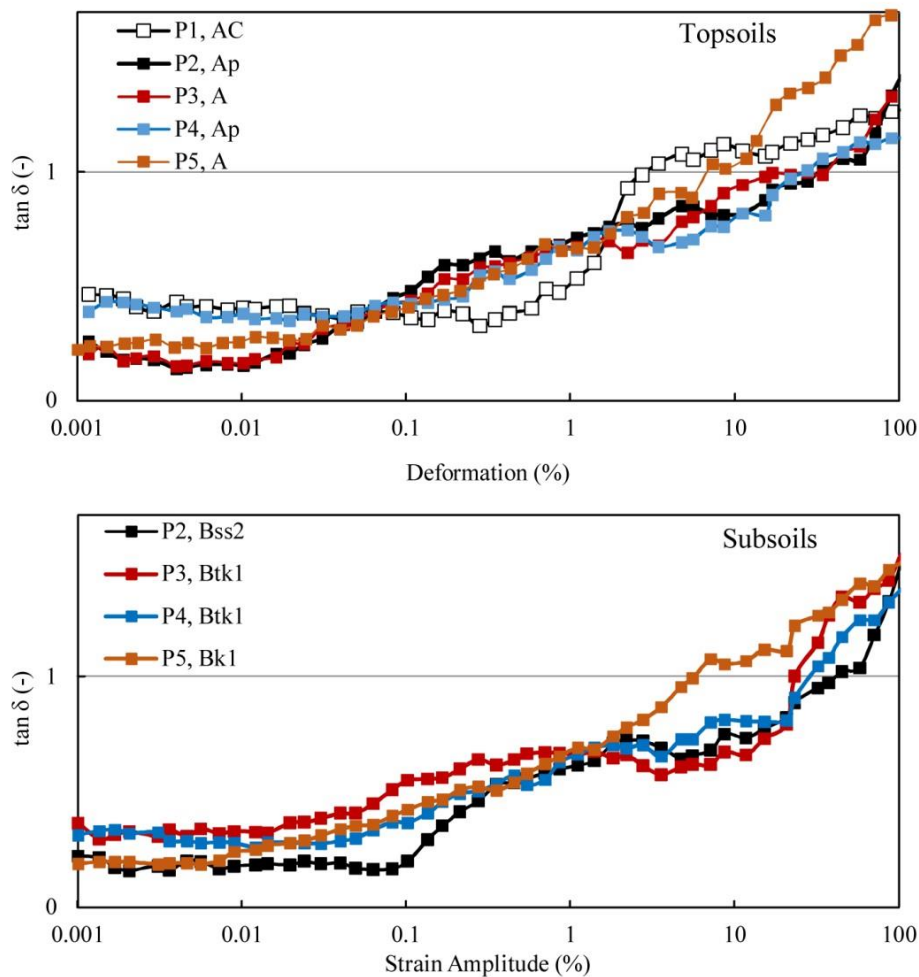
شیمیایی خاک‌ها: ضرایب همبستگی پیرسون بین انتگرال Z و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که انتگرال Z، همبستگی مثبت و معنی‌داری با ظرفیت تبادل کاتیونی ($r = 0/8$) دارد ($P \leq 0/05$). همبستگی بالای پایداری ریزخاک‌دانه در خاک‌رخ‌های مورد مطالعه با ظرفیت تبادل کاتیونی، به‌طور غیرمستقیم می‌تواند به نوع و مقدار رس و نیز وجود نیروهای چسبندگی و پیوستگی بین ذرات مرتبط باشد (۵۴). در واقع، وجود نیروهای چسبندگی بین ذرات خاک و آب، توسط پیوندهای هیدروژنی و یا نیروهای اسمزی مرتبط با کاتیون‌ها در لایه دوگانه ایجاد می‌شود و ذرات خاک را در تماس مستقیم با یک‌دیگر حفظ می‌کند و در نتیجه نیروهای پیوستگی را افزایش می‌دهد. این افزایش پیوستگی در خاک‌های رسی، بیش‌تر از خاک‌های شنی و سیلتی است و در نتیجه مقاومت برشی را بیش‌تر افزایش می‌دهد (۵۴). همچنین، تنش مؤثر، مؤلفه نیروهایی است که

همان‌گونه که گفته شد برای تفسیر پارامترهای رئومتر، باید هر دو مدول ذخیره و اتلاف را با هم در نظر گرفت که برای این منظور، پارامتر انتگرال Z محاسبه شد (جدول ۴). این پارامتر به‌طور مؤثری میزان تغییر شکل الاستیک به پلاستیک را در طیف وسیعی از کرنش خاک کمی‌سازی می‌کند. مقادیر انتگرال Z در خاک‌های استان چهارمحال و بختیاری به‌طور میانگین از روند زیر پیروی می‌کنند: ورتی‌سولز < مالی‌سولز < آلفی‌سولز < انتی‌سولز < اینسپتی‌سولز. افق‌های Bss2 ورتی‌سول (۵۵/۷) و A مالی‌سول (۲۴/۷) دارای انتگرال Z بالاتری نسبت به افق‌های دیگر بودند. این نتیجه بیانگر پایداری ریزساختار این افق‌ها نسبت به سایر افق‌ها است. افق‌های اینسپتی‌سولز (A و Bk1)، دارای کم‌ترین انتگرال Z (۹/۵-۱۰/۵) بودند که نشان‌دهنده پایداری ضعیف ریزساختار اینسپتی‌سولز است. در مقابل، ویژگی‌های تنش برشی و طول ناحیه خطی، حاکی از وجود ریزساختار بسیار الاستیک و پایدار در خاک‌های ورتی‌سولز، مالی‌سولز و آلفی‌سولز می‌باشند. بومگارتن و همکاران (۲۰۱۳) نیز مقادیر انتگرال Z مشابهی بین ۳۰ تا ۵۰ را برای خاک‌های سیلتی تا رسی به‌دست آورده‌اند (۶).

انتی‌سولز (کرایوسولز) مطالعه‌شده، دارای شکل ضریب اتلاف ($\tan \delta$) متفاوتی با دیگر خاک‌ها است (شکل ۹). با افزایش تنش، دامنه مقاومت برشی و تغییر شکل آن متفاوت است که پس از تخریب پیوندهای ذرات و ساختار آن در اثر تنش وارد شده، احتمالاً ذرات این خاک دوباره ساختار خود را باز می‌یابند (تیکسوتروپی). سان و همکاران (۲۰۱۷) با بررسی فرایندهای به‌هم‌خوردگی و تیکسوتروپی خاک‌های کرایوسولز، ضمن تأیید تیکسوتروپ بودن آن‌ها، بیان کردند که این خاک‌ها تحت تنش، ابتدا قدرت بازآرایی ذرات خود را از دست می‌دهند، اما

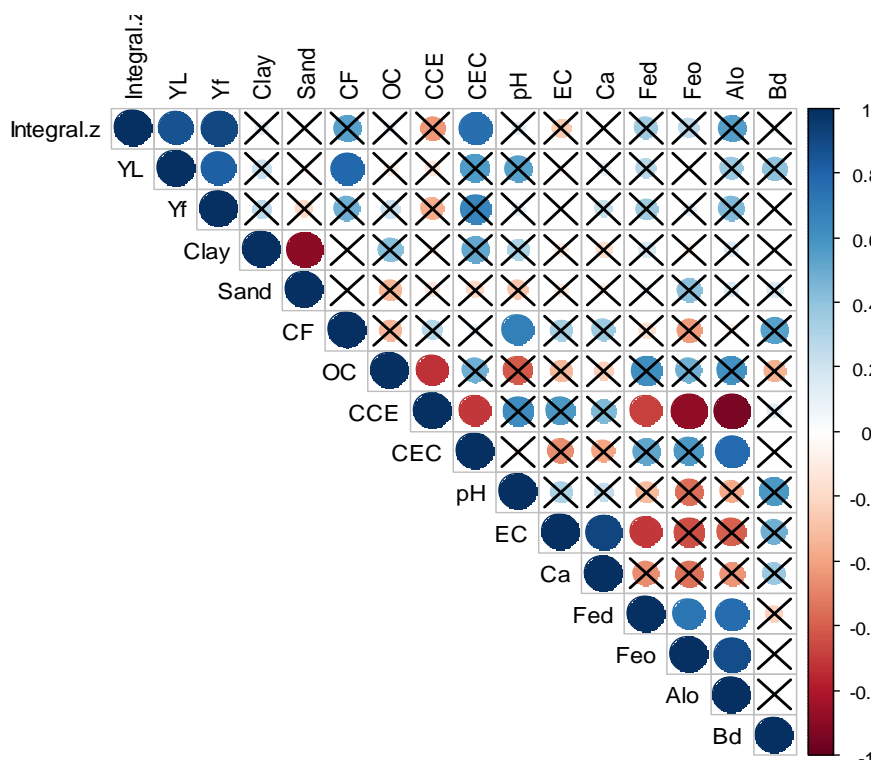
پوسته آبی به شکل مقعر (فشار منفی آب) وجود ندارد که مسئول اتصال ذرات باشد (۵۷)؛ بنابراین تنش مؤثر هم کم تر خواهد بود. در مقابل، در بافت‌های رسی همراه با کاتیون‌های غالب دوظرفیتی، این نیرو افزایش می‌یابد (۵۴).

می‌توانند ذرات خاک را در برابر تغییر شکل پایدار کنند که مقدار آن در خاک‌های رسی دارای کانی‌های غالب ۲:۱ بیش تر است (۵۵). در ذرات کروی، مانند دانه‌های شن و شبه‌شن، نیروی مویبندی نسبت به ذرات کلوئیدی کوچک تر است (۵۶)؛ زیرا هیچ‌گونه



شکل ۹- منحنی‌های ضریب اتلاف ($\tan \delta$) با دامنه تغییر شکل (γ) ۰/۰۰۱-۱۰۰ درصد حاصل از آزمون روبشی دامنه کرنش انجام شده برای افق‌های سطحی (a) و زیرسطحی (b).

Figure 9. Mean values of $\tan \delta$ at different deformation γ 0.001-100% were derived from amplitude sweep tests (ASTs) for each (a) topsoil and (b) subsoil genetic horizon.



شکل ۱۰- ضرایب همبستگی پیرسون بین انتگرال z با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌رخ‌های مطالعه‌شده. حد تغییر شکل (Y_L)، نقطه جریان (Y_f)، رس ($Clay$)، شن ($Sand$)، ذرات درشت (CF)، کربن آلی خاک (OC)، کربنات کلسیم معادل (CCE)، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)، واکنش خاک (pH)، قابلیت هدایت الکتریکی (EC)، کلسیم محلول (Ca)، آهن استخراج‌شده به روش سیرتات بی‌کربنات دی‌تیونات (Fe_d)، آهن و آلومینیوم استخراج‌شده به روش اگزالات آمونیوم (Al_o و Fe_o) و چگالی ظاهری (Bd)

Figure 10. Pearson correlations among *integral z* and different studied soil properties. Deformation limit (Y_L), flow point (Y_f), clay, sand, coarse fragments (CF), organic carbon (OC), calcium carbonate equivalent (CCE), cation exchangeable capacity (CEC), soil reaction (pH), electrical conductivity (EC); soluble calcium (Ca), citrate-bicarbonate-dithionite extractable iron (Fe_d), ammonium oxalate extractable iron and aluminum (Fe_o and Al_o), and bulk density (Bd)

پایداری ریزساختار خاک‌ها را فراهم نمودند و اختلاف‌های آشکاری را در بین خاک‌رخ‌ها نشان دادند. در خاک‌های مطالعه‌شده، نوع و میزان رس، نقشی اساسی در گذر از فاز I (فاز الاستیک) ویسکوالاستیک بازی نمودند. افق‌هایی با حضور متوسط تا غالب کانی‌های رسی ۲:۱ (از جمله، اسمکتیت و ورمی‌کولیت)، دارای طول ناحیه خطی و خاصیت الاستیک نسبتاً بالاتر به‌همراه طیف وسیع‌تری از تغییر شکل γ بودند. مهم‌ترین پارامتر رئولوژیکی برآوردشده، انتگرال z بود که می‌تواند ادغامی از سایر

نتیجه‌گیری

آزمون روبشی دامنه کرنش در تعیین کمیت ریزساختار و ثبات ریزخاک‌دانه‌ها (روش رئومتري) نشان داد که خاک‌های موجود در رده‌های گوناگون و مناطق مختلف استان چهارمحال و بختیاری، هر کدام از رفتار ویسکوالاستیک متفاوتی پیروی می‌کنند. به‌علاوه، پارامترهای رئولوژیکی مختلف منحنی‌های آزمون روبشی دامنه کرنش (شامل مقادیر اولیه مدولی (G'_0 و G''_0)، حد تغییر شکل (γ_L)، نقطه جریان (γ_f)، ضریب اتلاف ($\tan \delta$) و انتگرال z)، امکان کمی‌سازی

در برابر تنش برشی داشتند. به طور کلی، خاک‌هایی که تکامل کم‌تری داشتند؛ پارامترهای رئولوژیکی پایین‌تری نیز به نمایش گذاشتند. به نظر می‌رسد که پارامترهای رئولوژیکی به مراحل تکامل خاک حساس هستند و این پارامترها می‌توانند به عنوان شاخصی برای ارزیابی مقدار نسبی تکامل خاک در مطالعات آتی مدنظر قرار گیرند.

پارامترهای رئولوژیکی باشد و نشان‌دهنده توانایی خاک در ذخیره انرژی به صورت الاستیک در هنگام تغییر شکل است تا پس از گذر از نقطه جریان (۷۴)، رفتار ویسکوز نمایان شود. خاک ورتی‌سولز، انتگرال Z نسبتاً بالایی داشت و در نتیجه از پایداری ریزساختار و ریزخاک‌دانه بیش‌تری برخوردار بود. در مقابل، خاک‌های انتی‌سولز و اینسپتی‌سولز، پارامترهای رئولوژیکی نسبتاً کم و پایداری ریزخاک‌دانه کم‌تری

منابع

1. Doran, J.W., and Zeiss, M.R. 2000. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology*, 15: 1. 3-11.
2. Guo, Z., Zhang, L., Yang, W., Hua, L., and Cai, C. 2019. Aggregate Stability under Long-Term Fertilization Practices: The Case of Eroded Ultisols of South-Central China. *Sustainability*, 11: 4. 1160-1169.
3. Igwe, C.A., and Obalum, S.E. 2013. Microaggregate stability of tropical soils and its roles on soil erosion hazard prediction. *Adv. Advances in Agrophysical Research.*, pp. 175-192.
4. Abid, M., and Lal, R. 2009. Tillage and drainage impact on soil quality: II. Tensile strength of aggregates, moisture retention and water infiltration. *Soil and Tillage Research*, 103: 2. 364-372.
5. Castro Filho, C.D., Lourenço, A., Guimarães, M.D.F., and Fonseca, I.C.B. 2002. Aggregate stability under different soil management systems in a red latosol in the state of Parana, Brazil. *Soil and Tillage Research*, 65: 1. 45-51.
6. Baumgarten, W., Dörner, J., and Horn, R. 2013. Microstructural development in volcanic ash soils from South Chile. *Soil and Tillage Research*, 129: 48-60.
7. Buchmann, C., and Schaumann, G.E. 2017. Effect of water entrapment by a hydrogel on the microstructural stability of artificial soils with various clay content. *Plant and Soil*, 414: 1-2. 181-198.
8. Ghezzehei, T.A., and Or, D. 2001. Rheological properties of wet soils and clays under steady and oscillatory stresses. *Soil Science Society of America Journal*, 65: 3. 624-637.
9. Jastrow, J.D., and Miller, R.M. 1991. Methods for assessing the effects of biota on soil structure. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 34: 1-4. 279-303.
10. Gyawali, A.J., and Stewart, R.D. 2019. An improved method for quantifying soil aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal*, 83: 1. 27-36.
11. Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S., and Deneff, K. 2004. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research*, 79: 1. 7-31.
12. Six, J., Elliott, E.T., and Paustian, K. 2000. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Soil Biology and Biochemistry*, 32: 14. 2099-2103.
13. Skjemstad, J.O., LeFeuvre, R.P., and Prebble, R.E. 1990. Turnover of soil organic matter under pasture as determined by ^{13}C natural abundance. *Soil Research*, 28: 2. 267-276.
14. Keller, T., Lamandé, M., Peth, S., Berli, M., Delenne, J.Y., Baumgarten, W., Rabbal, W., Radjai, F., Rajchenbach, J., Selvadurai, A.P.S., and Or, D. 2013. An interdisciplinary approach towards improved understanding of soil deformation during compaction. *Soil and Tillage Research*, 128: 61-80.

15. White, F.M. 2016. Fluid Mechanics, 8th edition. Published by Mc Graw Hill Education. 864p.
16. Nweke, I.A. 2014. Changes in rheological properties of for contrasting soils as Induced by Cultivation. International Journal of Agriculture Innovations and Research, 3: 373-378.
17. Jeong, S.W., Locat, J., Torrance, J.K., and Leroueil, S. 2015. Thixotropic and anti-thixotropic behaviors of fine-grained soils in various flocculated systems. Engineering Geology, 196: 119-125.
18. Mewis, J., and Wagner, N.J. 2009. Thixotropy. J. Adv. Advances in Colloid and Interface Science, 147: 214-227.
19. Zhang, X.W., Kong, L.W., Yang, A.W., and Sayem, H.M. 2017. Thixotropic mechanism of clay: a microstructural investigation. Soils and Foundations, 57: 1. 23-35.
20. Baumgarten, W., Neugebauer, T., Fuchs, E., and Horn, R. 2012. Structural stability of Marshland soils of the riparian zone of the Tidal Elbe River. Soil and Tillage Research, 125: 80-88.
21. Bower, C.A., Reitemeier, R.F., and Fireman, M. 1952. Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils. Soil Science, 73: 4. 251-262.
22. Markgraf, W., and Horn, R., 2007. Scanning electron microscopy–energy dispersive scan analyses and rheological investigations of South-Brazilian soils. Soil Science Society of America Journal, 71: 3. 851-859.
23. 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. 515p.
24. Martin, T.D., Brockhoff, C.A., Creed, J.T., and Long, S.E. 1992. Determination of metals and trace elements in water and wastes by inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry. Methods for Determination of Metals in Environmental Samples, pp. 33-91.
25. Walkley, A., and Black, I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science, 37: 1. 29-38.
26. Gee, G.W., and Bauder, J.W. 1986. Particle-size analysis 1. P 383-411, In: A.L. Page (eds.), Methods of Soil Analysis (Part 1), Physical and Mineralogical Methods, Madison, Wisconsin, USA.
27. Nelson, R.E. 1982. Carbonate and gypsum. P181-197, In: A.L. Page (eds). Methods of soil analysis (Part 2). Chemical and microbiological properties, Madison, Wisconsin, USA.
28. Miller, R.H., and Keeny, D.R. 1992. Physical, Chemical and Mineralogical properties. P 65-98, In: A. L. Page (eds). Methods of Soil Analysis, (Part 1 and 2). Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA.
29. Mehra, O.P., and Jackson, M.L. 1960. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. In Clays and clay minerals: proceedings of the Seventh National Conference, pp. 317-327.
30. Jackson, M.L. 1975. Soil Chemical Analysis-advanced Course. Madison, WI: University of Wisconsin College of Agriculture, Department of Soil Science. 198p.
31. Kittrick, J.A., and Hope, E.W. 1963. A procedure for the particle-size separation of soils for X-ray diffraction analysis. Soil Science, 96: 5. 319-325.
32. Dixon, J.B., and Weed, S.B. 1989. Minerals in Soil Environments. 2nd ed, Published by Soil Science Society of America, Madison. USA. 89p.
33. Markgraf, W. 2011. Rheology in soils. P 1-11, In: J. Glinski, J. Horabik, and J. Lipiec, (eds). Encyclopedia of Agrophysics. Springer Press, Dordrecht-Heidelberg-London-New York.
34. Mezger, T.G. 2006. The rheology handbook: for users of rotational and oscillatory rheometers, 2nd edition. Vincentz Network GmbH and Co. KG, Hannover, Germany. 298p.

35. Stoppe, N., and Horn, R. 2018. Microstructural strength of tidal soils-a rheometric approach to develop pedotransfer functions. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 66: 1. 87-96.
36. Goebel, M.O., Bachmann, J., Woche, S.K., Fischer, W.R., and Horton, R. 2004. Water potential and aggregate size effects on contact angle and surface energy. *Soil Science Society of America Journal*, 68: 2. 383-393.
37. Markgraf, W., Moreno, F., and Horn, R. 2012. Quantification of microstructural changes in Salorthidic Fluvaquents using rheological and particle charge techniques. *Vadose zone journal*, 11: 1. 100-110.
38. United States. Department of Agriculture. Soil Conservation Service. 2014. *Keys to Soil Taxonomy*, Twelfth edition. US Department of Agriculture. 372p.
39. IUSS Working Group WRB, 2015. *World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps*. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome. 203p.
40. Thomasson, A.J., and Bullock, P. 1975. Pedology and hydrology of some surface-water gley soils. *Soil Science*, 119: 5. 339-348.
41. Matus, F., Amigo, X., and Kristiansen, S.M. 2006. Aluminium stabilization controls organic carbon levels in Chilean volcanic soils. *Geoderma*, 132: 1-2. 158-168.
42. Ayoubi, S., Jalalian, A., and Eghball, M.K. 2002. Role of pedogenesis in distribution of magnetic susceptibility in two Aridisols from Isfahan, central Iran. In *Proceedings of the First International Symposium on Sustainable Land Use and Management of Soils in Arid and Semiarid Regions*, Cartagena, Murcia, Spain, 22nd to 26th September, pp. 49-50.
43. Hu, X.F., Wei, J., Xu, L.F., Zhang, G.L., and Zhang, W.G. 2009. Magnetic susceptibility of the Quaternary Red Clay in subtropical China and its paleoenvironmental implications. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecology*, 279: 3-4. 216-232.
44. Kimble, J. (Ed.). 2004. *Cryosols: Permafrost-Affected Soils*. Springer Science & Business Media.
45. Owliaie, H.R. 2012. Micromorphology of calcitic features in calcareous soils of Kohgilouye Province, Southwestern Iran. *Journal of Agriculture Science and Technology*, 14: 225-239.
46. Khademi, H., and Mermut, A.R. 2003. Micromorphology and classification of Argids and associated gypsiferous Aridisols from central Iran. *Catena*, 54: 3. 439-455.
47. Tarnocai, C., and Bockheim, J. 2011. Cryosolic soils of Canada: genesis, distribution, and classification. *Canadian Journal of Soil Science*, 91: 5. 749-762.
48. Markgraf, W., Horn, R., and Peth, S. 2006. An approach to rheometry in soil mechanics-Structural changes in bentonite, clayey and silty soils. *Soil and Tillage Research*, 91: 1-2. 1-14.
49. Bronick, C.J., and Lal, R. 2005. Manuring and rotation effects on soil organic carbon concentration for different aggregate size fractions on two soils in northeastern Ohio, USA. *Soil and Tillage Research*, 81: 2. 239-252.
50. Holthusen, D., Reeb, D., and Horn, R. 2012. Influence of potassium fertilization, water and salt stress, and their interference on rheological soil parameters in planted containers. *Soil and Tillage Research*, 125: 72-79.
51. Kögel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Flessa, H., Guggenberger, G., Matzner, E., Marschner, B., and von Lützow, M. 2008. An integrative approach of organic matter stabilization in temperate soils: Linking chemistry, physics, and biology. *Plant Nutrition and Soil Science*, 171: 3. 5-13.
52. Pertile, P., Holthusen, D., Gubiani, P.I., and Reichert, J.M. 2018. Microstructural strength of four subtropical soils evaluated by rheometry: properties, difficulties and opportunities. *Scientia Agricola*, 75: 2. 154-162.

53. Sun, B., Dennis, P.G., Newsham, K.K., Hopkins, D.W., and Hallett, P.D. 2017. Gelifluction and thixotropy of maritime antarctic soils: small Scale measurements with a rotational Permafrost and Periglacial Processes, 28: 1. 314-321.
54. Kemper, W.D., Rosenau, R.C., and Dexter, A.R. 1987. Cohesion development in disrupted soils as affected by clay and organic matter content and temperature. Soil Science Society of America Journal, 51: 4. 860-867.
55. Horn, R., and Peth, S. 2011. Mechanics of unsaturated soils for agricultural applications. P 1-30, In: P.M. Haung, Y. Li, and M.E. Sumner, (eds). Handbook of soil sciences, 2nd edition. CRC Press: Boca Raton, FL, USA.
56. Chatterjee, S., White, D.J., and Randolph, M.F. 2012. Numerical simulations of pipe-soil interaction during large lateral movements on clay. Géotechnique, 62: 8. 693-705.
57. Lourenço, A.M., Rocha, F., and Gomes, C.R. 2012. Relationships between magnetic parameters, chemical composition and clay minerals of topsoils near Coimbra, central Portugal. Nat. Hazards Natural Hazards and Earth System Sciences, 12: 8. 2545-2555.