

ویژگی‌های ژئوشیمیایی خاک‌های لسی جنگلی در یک ردیف بارندگی در شمال ایران

معصومه پورمعصومی پرشکوه؛ دانشجوی دکترا علوم خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

فرهاد خرمالی*؛ استاد گروه علوم خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مارتین کهل؛ استاد انستیتوی جغرافیا، دانشگاه کلن

فرشاد کیانی؛ دانشیار گروه علوم خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

شمس‌الله ایوبی؛ استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

ایوا لهندورف؛ استاد گروه علوم خاک، دانشگاه بن

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۲۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۱/۲۰

چکیده

خصوصیات ژئوشیمیایی رسوبات لسی منعکس‌کننده شرایط هوازدگی گذشته است و از آن می‌توان برای تعیین ماهیت و منشأ رسوبات لسی استفاده کرد. به این منظور شش خاک رخ جنگلی تشکیل‌شده بر مواد مادری لس در طول یک گرادیان بارش در شمال ایران به روش استاندارد تشریح و نمونه‌های خاک و مواد مادری برای آزمایش‌های فیزیکوشیمیایی برداشت شد. غلظت کل عناصر اصلی و کمیاب با دستگاه XRF اندازه‌گیری شد تا عوامل تأثیرگذار بر ترکیب شیمیایی خاک‌ها و رفتار عناصر در طول فرایندهای خاک‌سازی ارزیابی شود. آزمایش‌های فیزیکوشیمیایی و نیز مطالعات صحرایی نشان داد آب‌شویی کربنات‌ها و متعاقب آن تجمع رس فرایندهای مسئول در تفکیک افق‌های ژنتیکی در خاک‌های مورد مطالعه‌اند. مواد مادری همه خاک‌های مورد مطالعه ترکیب شیمیایی یکسانی داشتند که نشان‌دهنده تاریخچه هوازدگی مشابه این رسوبات است. در کل، لس‌ها تخلیه شدید عنصر محلول Na و تخلیه ضعیف عناصر محلول Sr و Mg و نیز غنی‌شدگی قابل ملاحظه Ca را در مقایسه با ترکیب شیمیایی پوسته فوقانی قاره‌ای (UCC) نشان دادند. اما روند تغییرات در هر دو گروه از عناصر با روند تغییرات ترکیب شیمیایی شیل متعلق به بعد از آرکن استرالیا (PAAS) کمی متفاوت ولی مشابه مقدار متوسط جهانی لس (AWL) بود. الگوی عناصر اصلی و کمیاب در افق Bt خاک‌رخ‌ها در مقایسه با مواد مادری هر خاک‌رخ روندی مشابه یا نزدیک به محور اصلی نشان داد به استثنای Ca و Sr که به‌شدت نسبت به مواد مادری تهی شده‌اند؛ طوری که میزان تهی‌شدگی با افزایش بارندگی در گرادیان مورد نظر افزایش نشان داد. روند تهی‌شدگی Na و P نیز با شدت کمتر با گرادیان بارش موجود در منطقه هم‌خوانی دارد. در مجموع به نظر می‌رسد غلظت مطلق عناصر اصلی، به‌ویژه Si، در خاک‌های مورد مطالعه تحت تأثیر اثر رقت کربنات‌ها قرار گرفته و مقدار عنصر مذکور به طور معنادار در مقایسه با ترکیب شیمیایی PAAS و AWL کاهش یافته است. همبستگی‌های آماری و برخی شاخص‌های ژئوشیمیایی، مانند Ba/Sr و Rb/Sr، این فرض را تقویت می‌کند که ژئوشیمی خاک‌های مورد مطالعه تحت تأثیر ترکیب کانی‌شناسی مواد مادری و فرایندهای پدوژنیک، مثل کلسیتی شدن، قرار گرفته است. به‌علاوه شاخص CIA و منحنی مثلثی A-CN-K نشان‌دهنده درجه هوازدگی متوسط این خاک‌هاست که با رژیم هوازدگی غالب این منطقه سازگار است.

کلیدواژگان: ژئوشیمی خاک، فرایندهای خاک‌سازی، گرادیان بارش، لس.

مقدمه

علم ژئوشیمی خاک به بررسی غلظت و روند توزیع و مهاجرت عناصر مختلف طی تشکیل خاک از مواد مادری می‌پردازد و همراه علم کانی‌شناسی خاک چگونگی بازتوزیع عناصر را در کانی‌های جدید بررسی می‌کند. با بررسی نحوه توزیع عناصر در خاک و مواد مادری می‌توان شدت فرایندهای تشکیل خاک را ارزیابی کرد. شاخص‌های مورد استفاده برای نمایش این توزیع، شاخص‌های هوازدهی ژئوشیمیایی هستند. با استفاده از شاخص‌های ژئوشیمیایی می‌توان یک توصیف کمی از وضعیت هوازدهی خاک ارائه کرد. نمایش کمی وضعیت هوازدهی مرحله‌ای مهم در تعیین مراحل تکامل خاک‌هاست (دوزگورن و همکاران ۲۰۰۲). شدت هوازدهی شیمیایی در شرایط محیطی خاص در وهله اول تحت تأثیر اقلیم قرار می‌گیرد. به طور کلی، با افزایش درجه حرارت و رطوبت شدت هوازدهی شیمیایی بیشتر می‌شود (وست و همکاران ۲۰۰۵). بنابراین، نوسانات هوازدهی شیمیایی که در شاخص‌های ژئوشیمیایی محیط‌های رسوبی تجلی می‌یابد اطلاعاتی موثق در زمینه تغییرات اقلیمی در مناطق مورد مطالعه فراهم می‌آورد. بخشی از تفاوت مشاهده شده در تغییرات غلظت عناصر را می‌توان به ماهیت شیمیایی و قابلیت تحرک بالای برخی عناصر و بخش دیگر را به سرعت هوازدهی ماده مادری تحت تأثیر تغییرات زیست‌اقلیمی نسبت داد (راهب و همکاران ۱۳۹۵). نایل و همکاران (۲۰۱۰) اثر عوامل زمین‌شناختی و خاک‌شناختی را بر توزیع عناصر در خاک‌های جنگلی فومن - ماسوله بررسی کردند. نتایج نشان داد روند تغییرات Si و Al تا حد زیادی تحت تأثیر نوع ماده مادری است و عناصر Fe، Cr، Ni، V، و Co در خاک‌های هاپل یودالفرز و آرجی یودالوز به موازات تشکیل افق ایلوویال روند غنی شدن را نشان دادند. یوسفی‌فرد و همکاران (۲۰۱۳) در بررسی شاخص‌های هوازدهی شیمیایی متفاوت در شمال غرب ایران نشان دادند شاخص‌هایی که نسبتی از گروهی از اکسیدهای متحرک به یک یا چند اکسید نامتحرک اند برای برآورد شدت هوازدهی در مناطق نیمه‌خشک شمال غرب ایران مناسب‌ترند. نسبت‌های عنصری در مقایسه با غلظت عناصر منفرد، به دلیل حذف اثر رقت سایر اجزاء کاربرد بیشتری دارند (نت و همکاران ۲۰۰۰؛ وی و همکاران ۲۰۰۴).

همه شاخص‌های شیمیایی توانایی نشان دادن پیچیدگی‌های خاک‌رخ‌های هوازده را ندارند و لازم است شاخص یا شاخص‌های هوازدهی مناسب برای هر منطقه بررسی شوند. انتظار می‌رود، با افزایش شدت هوازدهی، اکسیدهای اصلی Fe_2O_3 و Al_2O_3 و TiO_2 ، که اکسیدهای غیرمتحرک‌اند، ثابت باقی بمانند و اکسیدهای SiO_2 و CaO و MgO و K_2O و Na_2O ، که اکسیدهای متحرک‌اند، کاهش یابند و مقدار آب ساختاری بیشتر شود (دوزگورن و همکاران ۲۰۰۲).

پژوهشگران زیادی از آثار ژئوشیمیایی به‌جامانده از هوازدهی شیمیایی خاک‌های دیرینه و لس‌ها برای بازسازی شرایط محیطی دیرینه استفاده کرده‌اند (روی و همکاران ۲۰۰۰ و ۲۰۱۰). هوانگ و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از شاخص‌های هوازدهی شیمیایی متفاوت سه دوره اقلیمی را بر اساس شدت هوازدهی در مرکز چین جدا کردند و ارتباط سیر تکامل تاریخی رطوبت منطقه‌ای را با تغییرات شدت مونسون تابستانه غرب آسیا مورد بررسی قرار دادند. اسدی و همکاران (۲۰۱۳) اعلام کردند الگوی توزیع عناصر اصلی در لس‌های استان گلستان مشابه لس‌های آسیای مرکزی، به‌خصوص ازبکستان و تاجیکستان، است و تشکیل لس‌های شمال شرق ایران تحت تأثیر نوسانات اقلیم گذشته با آنچه در آسیای

مرکزی و اروپا و چین رخ داده مشابه است. همچنین، بررسی شاخص‌های هوازدگی توسط ایشان نشان داد ذرات در اندازه سیلت در این منطقه از هوازدگی ضعیف تا متوسط سنگ‌های آذرین اسیدی حاصل شده‌اند.

لی و همکاران (۲۰۱۶) از نسبت‌های Ti/Sr و $SiO_2/Al_2O_3+Fe_2O_3$ به منزله شاخص‌هایی برای مطالعات اقلیم گذشته استفاده کردند. مطالعات زیادی در زمینه خصوصیات ژئوشیمیایی لس‌ها در نقاط مختلف دنیا انجام شده است. اما درباره رسوبات لسی شمال ایران اطلاعات اندکی وجود دارد (فیضی و همکاران ۲۰۱۵ و ۲۰۱۷؛ مهدی‌پور و همکاران ۲۰۱۳؛ اسدی و همکاران ۲۰۱۳) که به توالی‌های لس - پالتوس محدود می‌شود. بنابراین، این تحقیق به منظور بررسی خصوصیات ژئوشیمیایی خاک‌های لسی تشکیل شده در مناطق جنگلی شمال ایران با هدف تعیین میزان هوازدگی و منشأ آن‌ها و استفاده از این داده‌ها برای تکمیل اطلاعات مربوط به ژئوشیمی ترکیبات لسی دنیا صورت گرفت.

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه بخشی از اراضی جنگلی شمال ایران، در استان‌های گلستان و مازندران، و یک گرادیان بارندگی شرقی - غربی در آن را شامل می‌شود (شکل ۱). تعداد شش خاک‌رخ مدرن با مواد مادری لس بر اساس مطالعات صورت گرفته در گذشته انتخاب شد (خرمالی و شمسی ۲۰۰۹؛ خرمالی و همکاران ۲۰۱۲؛ زراعت‌پیشه ۲۰۱۰) و پس از تشریح نمونه برداری صورت گرفت و با استفاده از کلید تاکسونومی خاک (۲۰۱۴) خاک‌رخ‌ها طبقه‌بندی شدند (جدول ۲). خصوصیات اقلیمی و موقعیت مکانی مناطق مورد مطالعه در جدول ۱ آمده است. نمونه‌های خاک از افق‌های ژنتیکی و همچنین مواد مادری جهت مطالعات آزمایشگاهی به آزمایشگاه منتقل شدند. تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی معمول شامل توزیع اندازه ذرات (گی و بادر ۱۹۸۶)، درصد کربن آلی (نلسون و سامرز ۱۹۸۲)، ظرفیت تبادل کاتیونی (چاپمن ۱۹۶۵)، واکنش خاک (کارکنان آزمایشگاه شوری ایالات متحده ۱۹۵۴)، و درصد کربنات کلسیم معادل (کارکنان آزمایشگاه شوری ایالات متحده ۱۹۵۴) برای افق‌های خاک به عمل آمد. برای آزمایش کانی‌شناسی، ابتدا نمونه‌های خاک، جهت حذف کربنات و ماده آلی و اکسیدهای آهن، تحت پیش تیمارهای مختلف قرار گرفتند. سپس مطابق روش کیتریک و هوپ (۱۹۶۳) جداسازی رس انجام شد. ذرات تفکیک شده در چهار تیمار - شامل اشباع با منیزیم، منیزیم و اتیلن گلیکول، اشباع با پتاسیم در دمای معمولی و دمای ۵۵۰ درجه - آماده شدند. سپس با دستگاه پراش پرتو ایکس در زوایای θ ۲ تا ۳۰ درجه اسکن شدند. برای مطالعات مقاطع نازک، کلوخه‌های دست نخورده خاک، بعد از اشباع با رزین و خشک شدن، برش داده و تا حد ۳۰ میکرون ساییده شدند. مطالعه و عکسبرداری از مقاطع نازک آماده شده با میکروسکوپ پلاریزان المپیوس BX50 انجام شد.

مقدار کل برخی عناصر اصلی مانند Si, Al, Fe, Ti, Ca, Mg, Na, K, Mn, و P و برخی عناصر کمیاب شامل Sr, Zr, Br, V, Rb, Zn, Pb, و Nb در افق‌های خاک و ماده مادری با دستگاه XRF (stationary energy) (dispersive XRF) در دانشگاه کلن کشور آلمان اندازه‌گیری شد. برای اینکه دیدی جهانی درباره لس‌های منطقه داشته باشیم، نمودارهای مقادیر ژئوشیمیایی خاک‌های لسی مناطق مورد مطالعه با میانگین مقادیر دو مرجع پوسته فوقانی

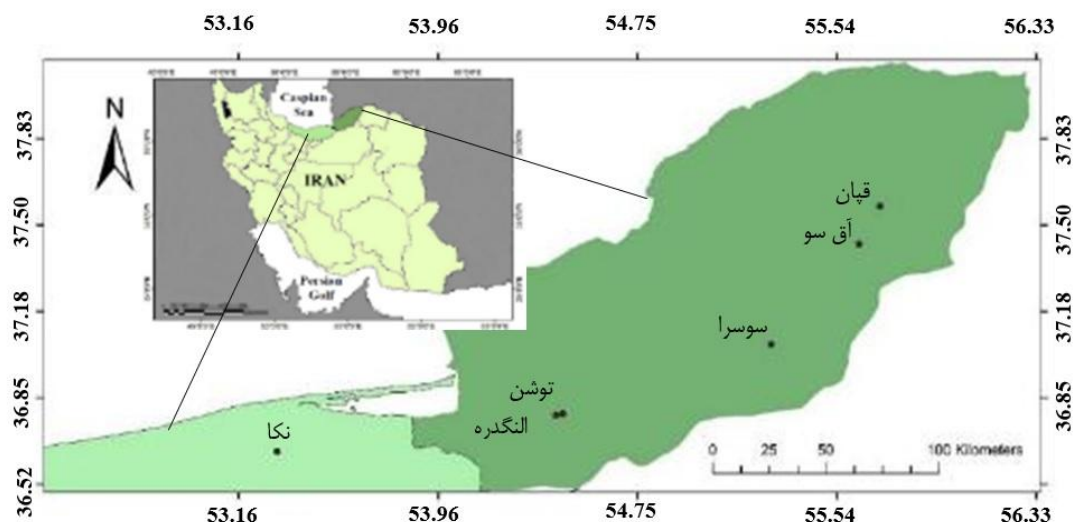
قاره‌های^۱ (ودپول ۱۹۹۵) و شیل متعلق به بعد از آرکئن استرالیا^۲ (ناگاراگان و همکاران ۲۰۰۷) و همچنین با میانگین ترکیبات رسوبات لسی دنیا^۳ (اوجواری و همکاران ۲۰۰۸) مقایسه شد. برای بررسی نقش توأم مواد مادری و فرایندهای خاک‌سازی در توزیع عناصر در خاک از شاخص غنی شدن^۴ (EF) استفاده شد. این شاخص غلظت عناصر را در افق‌های ژنتیکی نسبت به یک عنصر پایدار در خاک، مثل زیرکونیم یا تیتانیوم، بیان می‌کند. در این مطالعه از عنصر تیتانیوم به عنوان عنصر مرجع استفاده شده است. شاخص غنی شدن بر اساس رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$EF = (M/Ti)_{\text{given horizon}} / (M/Ti)_{\text{parent material}} \quad \text{رابطه ۱}$$

در رابطه ۱، M غلظت عنصر مورد نظر است. در صورتی که مقدار این شاخص کوچک‌تر از ۱ باشد، عنصر از افق ژنتیکی خارج و در صورتی که این شاخص بیش از ۱ باشد، عنصر مورد نظر در افق ژنتیکی غنی شده است. برای اندازه‌گیری شدت هوازگی خاک‌رخ‌ها، از شاخص CIA (نسبیت و یانگ ۱۹۸۲) استفاده شد که با توجه به نتایج تحقیقات انجام‌شده در گذشته پذیرفته‌شده‌ترین شاخص محسوب می‌شود و به طور موفقیت‌آمیز در مطالعات زیادی از آن استفاده شده و به کمک رابطه ۲ قابل محاسبه است:

$$CIA = Al_2O_3 \times 100 / (Al_2O_3 + Na_2O + CaO^* + K_2O) \quad \text{رابطه ۲}$$

در رابطه ۲، CaO* فقط نماینده Ca موجود در کانی‌های سیلیکاته است. بنابراین، با توجه به اینکه روش‌های تحلیلی استفاده‌شده در این مطالعه امکان تشخیص CaO کربناته را از CaO سیلیکاته غیرممکن می‌سازد، برای تشخیص آن‌ها روش مک‌لنن و همکاران (۱۹۹۳)، که بر نسبت‌های منطقی Ca/Na در کانی‌های سیلیکاته بنا نهاده شده، به کار رفت.



شکل ۱. موقعیت خاک‌رخ‌های مدرن لسی در اراضی جنگلی شمال ایران

1. Upper Continental Crust (UCC)
2. Post-Archean Australian average shale (PAAS)
3. Average of World Loess (AWL)
4. Enrichment Factor

جدول ۱. خصوصیات اقلیمی و موقعیت مکانی مناطق مورد مطالعه

خاک‌رخ	قپان	آق‌سو	سوسرا	توشن	النگدره	نکا
محل خاک‌رخ	40s 386770-4159860	40s 379176-4144146	40s 347531-4102573	40s 270696-4074597	40s 273106-4075179	39s 707533-4058886
رژیم رطوبتی و حرارتی	زریک - ترمیک	زریک - ترمیک	زریک - مرطوب - مزیک	تیبیک زریک - ترمیک	زریک مرطوب - ترمیک	تیبیک زریک - ترمیک
متوسط بارندگی سالیانه (mmy^{-1})	۵۰۰	۶۳۰	۷۵۰	۶۵۰	۷۵۰	۸۰۰
میانگین دمای سالیانه ($^{\circ}\text{C}$)	۱۵/۹	۱۶	۱۵	۱۷	۱۷	۱۷

نتایج و بحث

خصوصیات مورفولوژی و فیزیکوشیمیایی و کانی‌شناسی خاک‌ها

برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی و کانی‌شناسی خاک‌رخ‌های مطالعه‌شده در جدول ۲ به طور خلاصه آمده است. همه نقاط مورد مطالعه در منطقه جنگلی واقع شده‌اند. خاک‌ها در این مناطق دارای افق آرجیلیک‌اند و در رده آلفی‌سول و مالی‌سول طبقه‌بندی می‌شوند. در این مناطق پوشش گیاهی متراکم موجب نفوذ قسمت عمده آب باران به داخل خاک و شسته شدن و حذف کربنات از افق‌های سطحی و تجمع در عمق خاک‌رخ می‌شود. پس از حذف کربنات، که عامل فلاکوله‌کننده ذرات رس است، آب‌شویی موجب حرکت ذرات رس و تجمع آن بالای افق کلسیک و تشکیل افق آرجیلیک می‌شود. نتایج آزمایش‌های فیزیکوشیمیایی نشان می‌دهد سیلت جزء غالب در خاک‌های مورد مطالعه است که منشأ بادرفتی رسوبات لسی را نشان می‌دهد. به طور کلی، مقدار رس از قپان به سمت نکا افزایش و مقدار سیلت کاهش می‌یابد. این موضوع می‌تواند به دلیل هوازگی و انتقال رس و فاصله از منشأ برداشت باشد (شهریاری و همکاران ۲۰۱۴). حداقل و حداکثر مقدار رس به ترتیب در افق‌های Bt خاک‌رخ‌های قپان (۳۵٪) و نکا (۵۲٪) مشاهده شد. وجود کربنات کلسیم از ویژگی‌های رایج در لس‌هاست. دامنه تغییرات کربنات کلسیم معادل در خاک‌رخ‌های مطالعه‌شده از ۰/۵ تا ۳۷ درصد (افق Bk2 نکا) متغیر است.

کانی‌های بخش رس خاک‌های مورد مطالعه و فراوانی نسبی آن‌ها در جدول ۲ آمده است. نتایج نشان داد میکا (ایلیت)، کلریت، ورمیکولیت، اسمکتیت، و کائولینیت در بخش رس خاک حضور دارند. میکا کانی غالب در مواد مادری همه خاک‌هاست. شکل ۲ نمونه‌ای از طیف کانی‌شناسی بخش رس افق C یکی از خاک‌رخ‌ها را نشان می‌دهد. منابع زیادی حضور میکا و کلریت در خاک را ناشی از حضور این کانی‌ها در مواد مادری (منشأ ارثی) می‌دانند. حضور غالب ورمیکولیت در افق Bt خاک‌رخ‌های توشن و نکا و النگدره می‌تواند به دلیل شرایط آب‌شویی بالای این کانی و خروج یون پتاسیم از ایلیت باشد (خرمالی و کهل ۲۰۱۱).

نتایج مطالعات مقاطع نازک نیز هم‌سو با تأیید نتایج کانی‌شناسی نشان داد حضور مقدار زیاد کانی‌های رسی سیلیکاته و الگوی توزیع نسبی پورفیریک باز در قسمت غربی گرادیان بارش در مقایسه با قسمت ابتدایی این گرادیان می‌تواند نشان‌دهنده نوتشکیلی کانی‌های رسی باشد (شکل ۳ الف و ب). انحلال کربنات، آب‌شویی آن از افق‌های خاک، و رسوب

مجدد کربنات ثانویه در اطراف حفرات از عوارضی است که به وضوح در مطالعه مقاطع نازک خاک‌ها قابل مشاهده است (شکل ۳ ج و د). انحلال این کانی‌ها می‌تواند پیش شرط لازم را برای هوادیدگی شیمیایی کانی‌های اولیه، مثل پلاژیوکلاز و میکا، و تغییر شکل آن‌ها به کانی‌های رسی فراهم آورد (برونگر ۲۰۰۳). ولامینگ و همکاران (۲۰۱۸) حضور کانی‌های کوارتز، کلسیت، پلاژیوکلاز، دولومیت، میکا/ایلیت، فلدسپار پتاسیم، کائولینیت/کلریت، اسمکتیت، و آمفیبول را در لس تیبیک توالی توشن با کمترین هوادیدگی گزارش کردند. نتایج آن‌ها نشان داد هوادیدگی کانی‌های مافیک و میکایی عامل اصلی تشکیل رس‌های خاک‌ساخت، مانند اسمکتیت، از طریق نوتشکیلی^۱ و تغییر شکل^۲ است و تخریب فلدسپارها فقط در خاک مدرن و خاک‌های بسیار توسعه یافته قدیمی، مربوط به دوران بین یخچالی آخر این توالی، رخ می‌دهد.

توزیع عناصر اصلی و کمیاب و عوامل مؤثر بر تغییرات آن‌ها در خاک‌رخ

نتایج آنالیز برخی عناصر اصلی و کمیاب همراه برخی نسبت‌های عنصری در شکل ۴ آمده است. میانگین مقادیر ژئوشیمیایی خاک‌رخ‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد Si و Ca اجزای غالب‌اند و Fe و Al در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند. بین عناصر کمیاب Ba و Zr به ترتیب با مقادیر ۵۳۲/۵۹ و ۱۹۸ ppm بیشترین مقدار را دارند. مقدار SiO₂ از ۵۳/۰۳۵ درصد در خاک‌رخ قپان تا ۲۹/۵۹ درصد در خاک‌رخ النگدره متغیر است. مقادیر پایین SiO₂ در نمونه‌های مورد مطالعه نسبت به مقادیر میانگین جهانی را به احتمال زیاد می‌توان به مقدار کمتر ذرات کوارتز در اندازه سیلت نسبت داد (اسدی و همکاران ۲۰۱۳). مقدار CaO بین ۰/۹۲ تا ۲۱/۱۹ درصد (به ترتیب مربوط به خاک‌رخ‌های النگدره و نکا) تغییر می‌کند. افزایش مقدار SiO₂ هم‌زمان با افزایش مقدار Al₂O₃ نشان‌دهنده حضور مقدار زیادی از کانی‌های آلومینوسیلیکاتی مانند فلدسپارها و میکاها در رسوبات لسی منطقه است (شکل ۵ ب). روند تغییرات غلظت SiO₂ و Al₂O₃ در امتداد ترکیب شیمیایی پوسته فوقانی قاره‌ای و مواد رسوبی نسبتاً هوادیده PAAS است، اما، از روند متوسط جهانی (AWL) کمی فاصله دارد؛ که با نتایج اسدی و همکاران (۲۰۱۳) در مناطق دیگر استان گلستان هم‌خوانی دارد. مقدار TiO₂ در مناطق مورد مطالعه از ۰/۵ تا ۰/۸۸ درصد متغیر و میانگین آن به متوسط جهانی لس نزدیک است. این مقدار را در نمونه‌های مورد مطالعه می‌توان ناشی از حضور فیلسیلیکات‌های تیتانیوم دار، مانند بیوتیت و کلریت، دانست. از سوی دیگر، همبستگی زیاد بین SiO₂ و TiO₂ ($r^2 = 0.82$) (شکل ۵ الف) نشان می‌دهد تیتانیوم به میزان بیشتری در بخش ذرات درشت خاک به شکل کانی‌های روتیل و تیتانیت و ایلمینیت یافت می‌شود.

از برخی نسبت‌های عنصری برای ارزیابی درجه هوازگی شیمیایی رسوبات و خاک‌ها استفاده می‌شود؛ مثلاً شدت نسبت‌های عنصری Ba/Sr و Rb/Sr در مراحل اولیه هوازگی، به دلیل هوازگی سریع‌تر پلاژیوکلازها در مقایسه با فلدسپارهای پتاسیم‌دار، افزایش می‌یابد (نسبت و مارکوچ ۱۹۸۰). Sr و Ba به ترتیب در پلاژیوکلازها و فلدسپارهای پتاسیم‌دار جای می‌گیرند (پوچت ۱۹۷۲). این عناصر رفتارهای شیمیایی متفاوتی دارند. استرانسیم در مقایسه با باریم انحلال‌پذیری بالایی دارد (وایت فیلد و ترنر ۱۹۷۹) و می‌تواند به راحتی به صورت محلول در آب درآید. نسبت استرانسیم به

1. Neof ormation
2. Transformation

باریم به طور معمول در رسوبات لس بالاست. زیرا رسوبات لس به شرایط آب‌وهوایی سرد و خشک وابسته‌اند و در اثر نبود یا کمبود آب میان لایه‌های رسوبات Sr نمی‌توانند به صورت محلول در آب درآیند و از محیط بیرون روند. ازین‌رو، در کانی‌های اولیه در بردارنده خود (از جمله پلاژیوکلاز) باقی می‌مانند؛ درحالی‌که در اثر متلاشی شدن پلاژیوکلازها استرانسیم به صورت محلول از محیط خارج می‌شود. به همین علت فراوانی استرانسیم در خاک‌های هوازده نسبت به لس‌های مادری کاهش می‌یابد. نمودار نسبت Ba/Sr در مقابل Rb/Sr (شکل ۵ ج) نشان می‌دهد روند خطی این نسبت در مناطق مورد مطالعه در امتداد ترکیب ژئوشیمیایی UCC و AWL و PAAL است و همه خاک‌ها، هم در قسمت ابتدایی (هوازدگی کمتر) هم در قسمت انتهایی (هوازدگی بیشتر) این روند، نمایندگانی دارند. همبستگی قوی بین Ba/Sr و Rb/Sr (شکل ۵ ج) نشان می‌دهد فراوانی Ba و Rb در خاک‌های مورد مطالعه با کانی‌های پتاسیم‌دار مختلف، مانند فلدسپارهای پتاسیم‌دار و میکا و مسکویت، کنترل می‌شود (اوجواری و همکاران ۲۰۰۸).

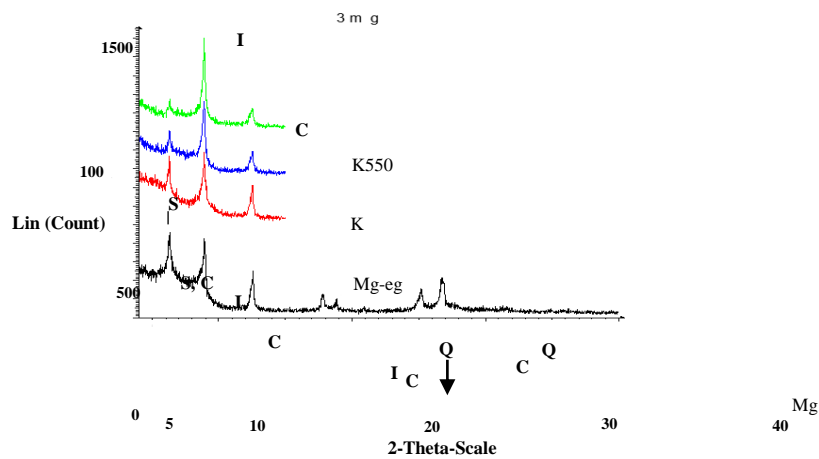
جدول ۲. برخی خصوصیات فیزیکوشیمیایی، کانی‌شناسی، و طبقه‌بندی خاک‌های مورد مطالعه

نوع و ترتیب کانی‌های رسی	رس	سیلت	شن	کربنات کلسیم معادل (%)	کربن آلی (%)	pH	رنگ مرطوب	ضخامت (cm)	افق
	(%)								
Qapan Calcic Haploxerafals (Calcic Luvisols)									
-	۲۹	۵۲	۱۹	۰/۵	۴/۵۵	۶/۲۰	10YR 3.5/4	۲۰-۷	A
I>V>S>C>K	۳۵	۵۳	۱۲	۰/۵	۱/۸۵	۶/۱۵	10YR 3/4	۳۵-۲۰	Bt1
-	۳۲	۵۶	۱۲	۱	۰/۴۴	۶/۹۹	10YR 3/3.5	۶۵-۳۵	Bt2
-	۲۶	۶۰	۱۴	۱۸	۰/۵۲	۷/۴۷	10YR 5/3.5	۸۰-۶۵	Btk
-	۲۸	۵۴	۱۸	۱۴/۵	۰/۴۲	۷/۳۰	10YR 3/4	۱۰۵-۸۰	BCK1
-	۲۶	۵۲	۲۲	۱۴/۵	۰/۴۰	۷/۲۶	10YR 3/4	۱۳۰-۱۰۵	BCK2
I>C>S>K	۲۴	۵۲	۲۴	۱۲/۵	۰/۲۷	۷/۵۰	10YR 4/4	۱۵۵-۱۳۰	Ck
Agh Su Calcic Haploxerafals (Calcic Luvisols)									
-	۳۲	۵۸	۱۰	۱/۵	۲/۰۸	۶/۹۸	10YR 3/4	۱۸-۰	A
I>S>C>K>V	۴۲	۵۰	۸	۱/۵	۱/۳۶	۶/۸۶	10YR 4/4	۴۸-۱۸	Bt1
-	۴۰	۴۸	۱۲	۲۰/۵	۰/۸۴	۶/۹۳	7.5YR 4/5	۹۱-۴۸	Bt2
-	۳۰	۴۴	۲۶	۲۵/۵	۰/۳۹	۶/۹۸	10YR 4/6	۱۲۰-۹۱	Btk
-	۲۸	۴۴	۲۸	۲۶/۵	۰/۴۲	۷/۰۴	10YR 4/6	۱۳۲-۱۲۰	Bk

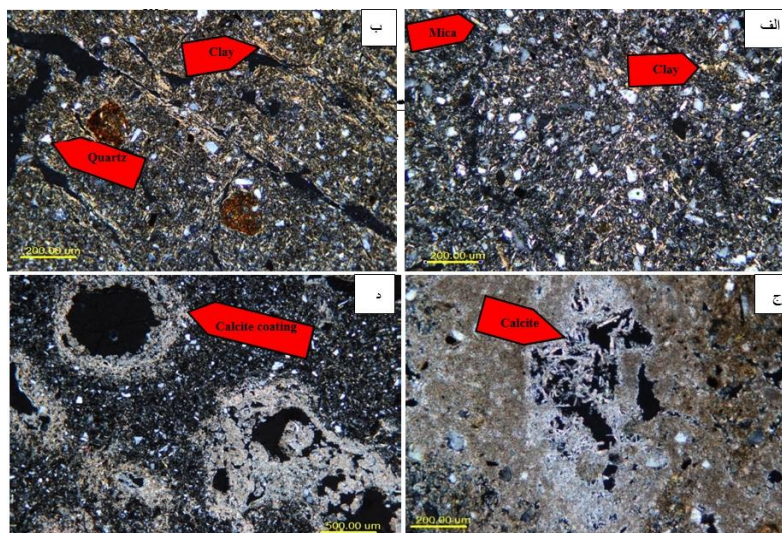
I>C>K>S>V	۲۸	۵۶	۱۶	۲۰/۵	۰/۳۵	۶/۹۸	10YR 4/6	۲۰۰-۱۳۲	C
Sousara Typic Haplxeralfs (Haplic Luvisols)									
-	۳۰	۵۶	۱۴	۱	۵/۲۶	۶/۴۵	10YR 3/3	۱۴-۰	A
-	۳۲	۵۶	۱۲	۱	۱/۳۶	۵/۴۱	10YR 4.5/5	۳۰-۱۴	Bw
S>I>V,C>K	۴۲	۴۶	۱۲	۱/۵	۰/۷۱	۵/۸۶	7.5YR 4/5	۸۰-۳۰	Bt
-	۲۶	۴۶	۲۸	۲۹	۰/۴۲	۷/۱۶	10YR 4/6	۱۱۰-۸۰	Bk1
-	۲۴	۵۰	۲۶	۲۸	۰/۳۹	۷/۰۵	10YR 4/6	۱۷۰-۱۱۰	Bk2
I>V>S>K>C	۲۶	۵۲	۲۲	۲۶	۰/۲۷	۷/۰۸	10YR 4/6	۲۰۰-۱۷۰	C
Toshan Calcic Haploxeralfs (Calcic Luvisols)									
-	۳۲	۵۷	۱۱	۰/۵	۲/۲۹	۶/۳۶	10YR 3/4	۲۰-۰	A
-	۵۰	۳۸	۱۲	۲/۵	۰/۸۵	۵/۹۵	7.5YR 3/4	۴۵-۲۰	Bt1
V>I>S>K	۴۰	۴۶	۱۴	۱/۵	۰/۵۲	۶/۳۰	7.5YR 3.5/4	۹۹-۴۵	Bt2
-	۱۸	۶۲	۲۰	۲۵/۵	۰/۴۲	۷/۲۰	10YR 4/6	۱۳۵-۹۹	Btk1
I>V>S>C>K	۲۲	۶۰	۱۸	۲۷	۰/۳۷	۷/۶۳	10YR 3.5/6	۱۶۵-۱۳۵	Btk2
Alangdareh Typic Haplxeralfs (Haplic Luvisols)									
-	۳۸	۴۶	۱۶	۱/۵	۴/۲۵	۶/۹۵	10YR 3/3	۱۵-۳	A
S,V>I>K>C	۵۲	۳۸	۱۰	۲	۰/۶۰	۵/۸۵	7.5YR 4/3	۴۲-۱۵	Bt1
-	۴۶	۴۶	۸	۱	۰/۶۶	۶/۵۰	7.5YR 3.5/4	۸۸-۴۲	Bt2
-	۱۶	۶۶	۱۸	۷	۰/۲۳	۷/۱۵	10YR 4/4	۱۰۳-۸۸	Btk
-	۲۰	۵۲	۲۸	۳۳/۵	۰/۴۴	۷/۵۵	10YR 4.5/4	۱۳۳-۱۰۳	Bkkm
-	۲۳	۴۹	۲۸	۳۶/۵	۰/۵۰	۷/۳۰	10YR 5/4	۱۶۳-۱۳۳	BC
I>S>K>V	۲۶	۴۶	۲۸	۳۴/۵	۰/۲۹	۷/۴۲	10YR 5/4	۲۱۳-۱۶۳	C
Neka Calcic Argixerolls (Luvi_Calcic Kastanozem)									
-	۳۸	۵۰	۱۲	۳	۲/۵۳	۶/۶۷	10YR 2/3	۱۵-۰	A
V>C>I>S>K	۴۶	۴۲	۱۲	۳	۱/۵۶	۷/۱۶	7.5YR 3.5/4	۳۴-۱۵	ABt
-	۵۲	۳۸	۱۰	۲/۵	۰/۸۴	۶/۷۹	5YR 5/6	۶۰-۳۴	Bt1
-	۴۸	۴۴	۸	۱/۵	۰/۷۱	۶/۸۵	7.5YR 4/6	۸۳-۶۰	Bt2

-	۳۴	۴۸	۱۸	۳۰	۰/۴۲	۷/۱۱	10YR 5/6	۱۰۲-۸۳	Btk
-	۳۲	۴۸	۲۰	۳۱	۰/۴۲	۷/۱۹	10YR 5/6	۱۳۰-۱۰۲	Bk1
-	۲۸	۵۲	۲۰	۳۷	۰/۱۹	۷/۰۴	10YR 5/6	۱۷۰-۱۳۰	Bk2
I>S>C>K	۲۲	۶۴	۱۴	۲۵	۰/۲۷	۷/۳۶	10YR 5/6	۲۰۰-۱۷۰	Ck

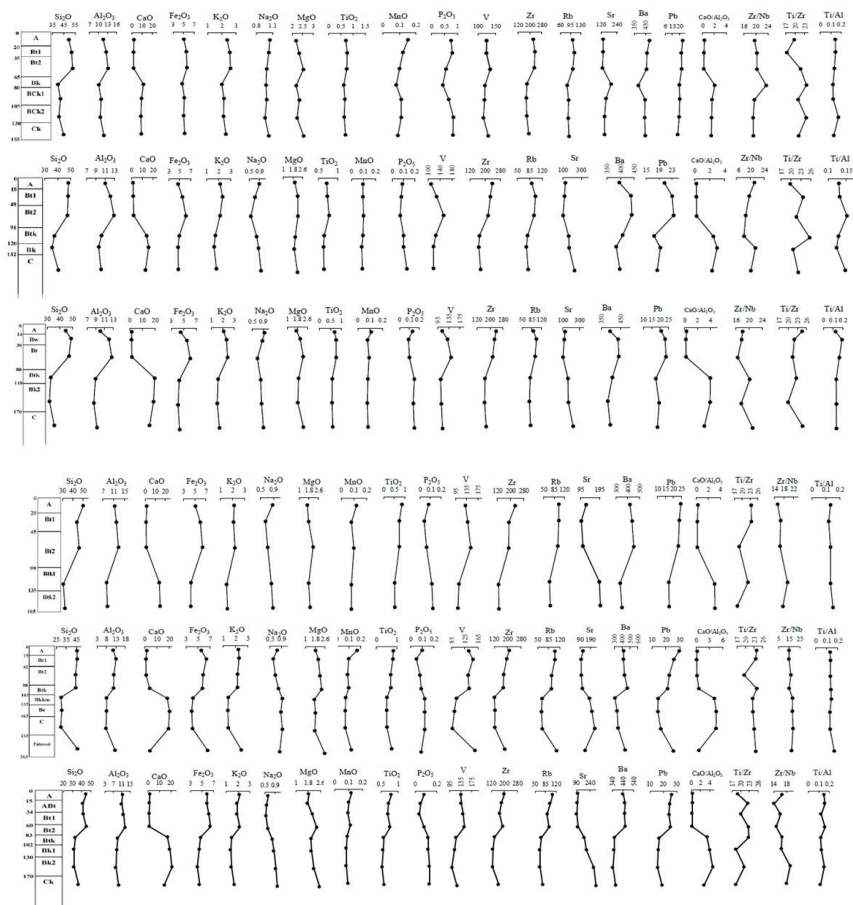
I = ایلیت، S = اسمکتیت، V = ورمیکولیت، C = کلریت، K = کائولینیت



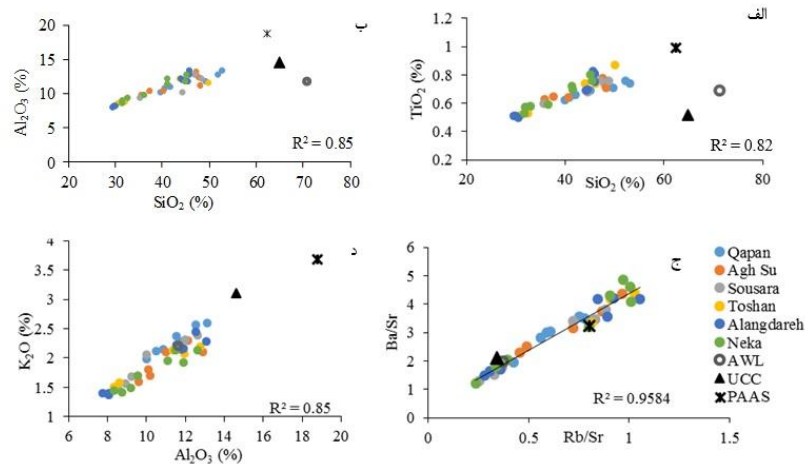
شکل ۲. پراش پرتو ایکس افق Ck خاک رخ قیان (I=ایلیت، S=اسمکتیت، C=کلریت، K=کائولینیت)



شکل ۳. تصاویر میکروسکوپی از کانی‌های موجود در نمونه خاک‌های مورد مطالعه (الف) حضور کانی‌های میکا و کوارتز و کانی‌های رسی و بی‌فابریک لکه‌ای در افق Bt1 خاک رخ آق‌سو؛ (ب) حضور رس، کوارتز، بی‌فابریک خطی، و الگوی توزیع نسبی پورفیریک باز در افق Bt1 خاک رخ نکا؛ (ج) کلسیت‌های سوزنی‌شکل درون حفره در افق Bk1 نوده؛ (د) پوشش کلسیت اطراف حفرات در افق Ck قیان. همه تصاویر XPL هستند.



شکل ۴. تغییرات خصوصیات ژئوشیمیایی خاک‌های مورد مطالعه، شامل عناصر اصلی و نادر و برخی نسبت‌های عنصری (به ترتیب قیان، آق سو، سوسرا، توشن، انگدره، نکا)



شکل ۵. نمودار پراکنش (الف) TiO_2 در مقابل SiO_2 ؛ (ب) Al_2O_3 در مقابل SiO_2 ؛ (ج) Ba/Sr در مقابل Rb/Sr ؛ (د) K_2O در مقابل Al_2O_3 . متوسط ترکیب شیمیایی لس‌های دنیا و دو استاندارد نیز برای مقایسه آمده است.

الگوی عناصر اصلی و کمیاب نرمالیزه شده با ترکیب شیمیایی پوسته فوقانی قاره‌ای (UCC) در مواد مادری خاک‌رخ‌های مورد مطالعه در شکل ۶ الف و ۶ ب آمده است. بر این اساس، روند تغییرات غلظت عناصر اصلی لسی‌ها در مناطق مورد مطالعه با روند تغییرات غلظت این عناصر در ترکیب متوسط جهانی لس (AWL) مشابهت بیشتری نشان می‌دهد. همه خاک‌رخ‌های مورد مطالعه از نظر SiO_2 ، Al_2O_3 ، K_2O و Na_2O نسبت به ترکیب پوسته فوقانی (UCC) تخلیه شده‌اند. منابع مختلف (اوجواری و همکاران ۲۰۰۸؛ اسدی و همکاران ۲۰۱۳) تخلیه SiO_2 را به اثر رقت کانی‌های کربناته و تخلیه K_2O و Na_2O را به تحرک این دو عنصر در طول فرایندهای بعد از رسوب‌گذاری مربوط می‌دانند و از سوی دیگر غنی‌شدگی اکثر خاک‌رخ‌ها را از نظر TiO_2 نسبت به ترکیب پوسته فوقانی (UCC) به درجه جورشدگی فیلوسیلیکات‌هایی مانند بیوتیت و کلریت در فرایند انتقال رسوبات بادی نسبت می‌دهند. به علاوه میزان TiO_2 در مناطق مورد مطالعه از این میزان در شیل متعلق به بعد از آرکئن استرالیا (PAAS) پایین‌تر است که حضور پررنگ‌تر مواد اسیدی در مواد مادری خاک‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. ویژگی شاخص لسی‌های مورد مطالعه مقدار بالای CaO است که به شدت نسبت به UCC غنی شده و بین سایر عناصر اصلی بالاترین مقدار را به خود اختصاص داده است. مقدار CaO در لسی‌ها بسیار متغیر است و هر دو نوع ناهنجاری^۱ مثبت و منفی آن در نمودارهای نرمالیزه شده نسبت به UCC در مناطق مختلف دنیا گزارش شده است (گالت و همکاران ۱۹۹۸؛ جان و همکاران ۲۰۰۱).

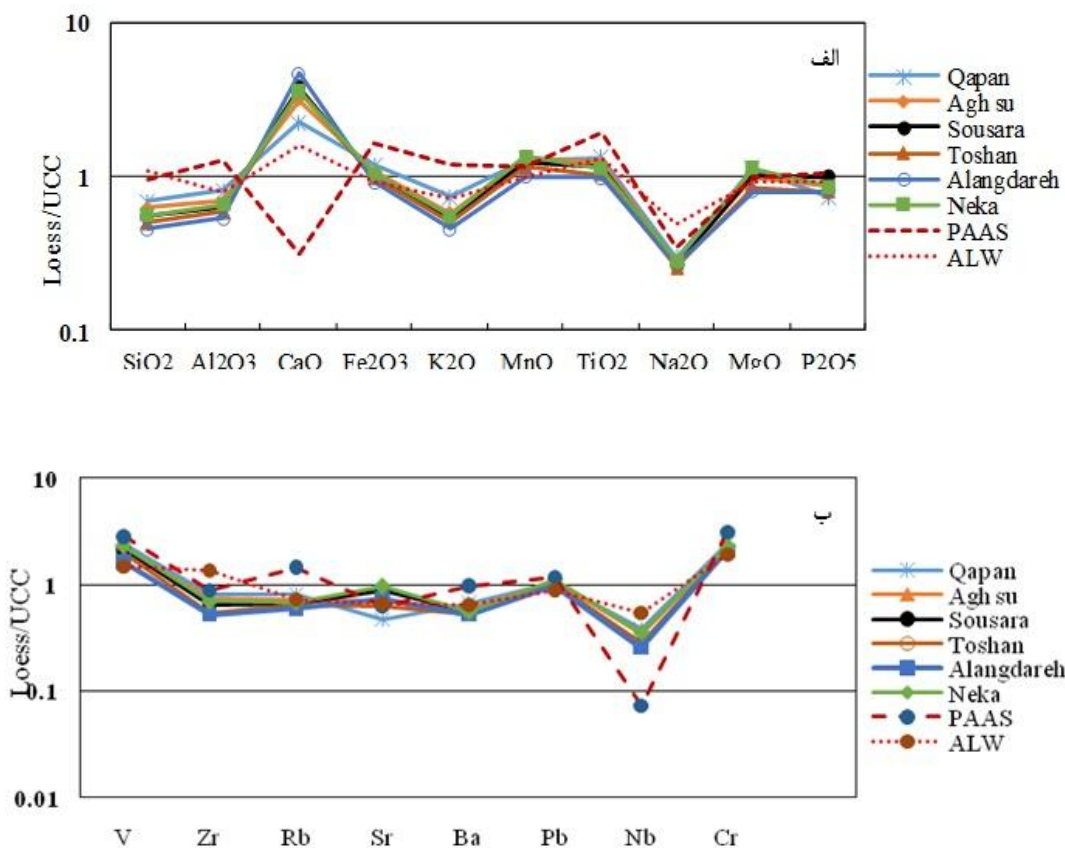
تخلیه مواد مادری خاک‌های مناطق مورد مطالعه از P_2O_5 نسبت به PAAS می‌تواند نشان‌دهنده حضور مقادیر کمتری از فازهای فرعی حاوی این عنصر، مثل آپاتیت و مونازایت، در آن‌ها باشد (ناگراجان و همکاران ۲۰۰۷). در دیاکرام Al_2O_3 در مقابل K_2O (شکل ۵ د) نقاط مربوط به مناطق مورد مطالعه در نزدیکی ترکیب شیمیایی AWL قرار دارند. همبستگی بالای بین این دو عنصر ($r^2 = 0.85$) نشان می‌دهد فراوانی Al_2O_3 نیز توسط حضور فیلوسیلیکات یا فلدسپارهای پتاسیم‌دار کنترل می‌شود.

توزیع عناصر کمیاب نرمالیزه شده با UCC (شکل ۶ ب) نشان می‌دهد در همه نمونه‌های لسی عناصر لیتوفیل بزرگ یون^۲ (Rb ، Sr ، Ba) و عناصر با قدرت میدان بالا^۳ (Zr ، Nb) تخلیه شده‌اند. تخلیه Sr نتیجه حلالیت بالای این عنصر طی هوازدگی است (جان و همکاران ۲۰۰۱). از طرفی همه نمونه‌ها از نظر عناصر کمیاب ترانزیشن (V ، Cr) نسبت به UCC غنی شده‌اند و مقدار سرب نیز مشابه UCC است. با در نظر گرفتن میانگین مقادیر عناصر کمیاب در نمونه‌های مواد مادری مناطق مختلف، توزیع عناصر کمیاب نرمالیزه شده با UCC شباهت زیادی با متوسط مقدار جهانی (AWL) نشان می‌دهد؛ به استثنای عناصر گروه HFSE (Zr ، Nb) که مقدار این عناصر در لسی‌های مناطق مورد مطالعه پایین‌تر از AWL است. از طرفی متوسط مقادیر عناصر V ، Zr ، Sr ، Pb ، Cr در مناطق مورد مطالعه شبیه PAAS است. اما این لسی‌ها از نظر Rb و Ba نسبت به PAAS تخلیه و از نظر Nb به شدت غنی شده‌اند.

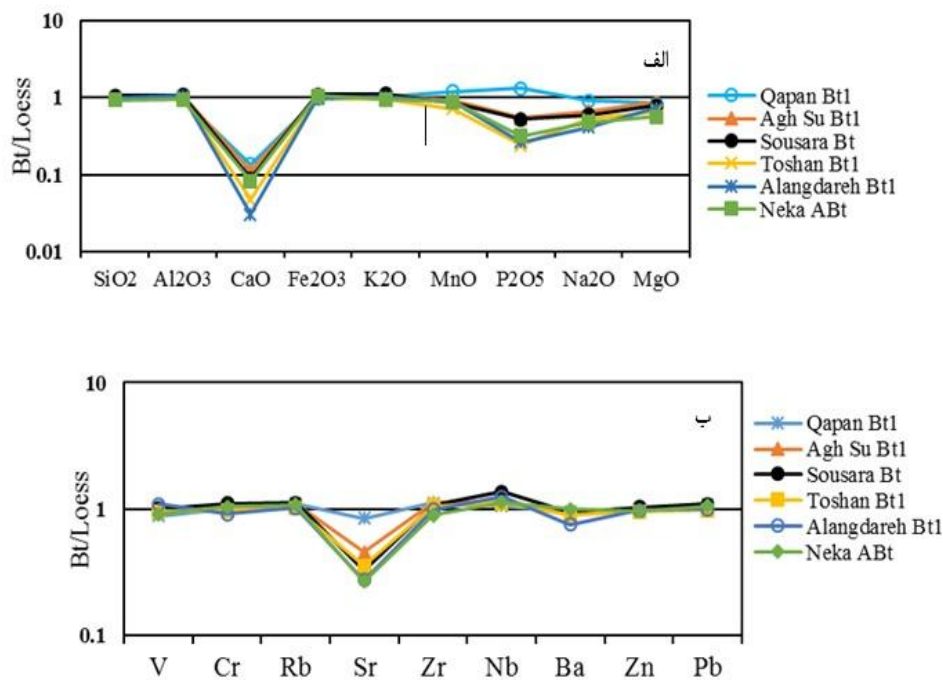
برای بررسی نقش توأم مواد مادری و فرایندهای خاک‌ساز در توزیع و تحرک عناصر در طول هر خاک‌رخ ترکیب عناصر اصلی و کمیاب نرمالیزه شده با مواد مادری در افق Bt، به منزله نماینده هر خاک‌رخ، نسبت به عنصر مرجع تیتانیوم در شکل

1. Anomaly
2. Large ion lithophile elements (LILEs)
3. High field strength elements (HFSEs)

۷ می‌آید. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود افق Bt همه خاک‌رخ‌ها از نظر عناصر محلول Ca و Na و Mg تخلیه شده‌اند و جز افق Bt خاک‌رخ قپان سایر خاک‌رخ‌ها از لحاظ P تخلیه شده‌اند. روند تخلیه عناصر محلول تقریباً با گرادیان بارش موجود در مناطق مورد مطالعه همخوانی دارد. در زمینه ترکیب عناصر کمیاب، همه خاک‌رخ‌ها از نظر عنصر استرانسیم نسبت به ماده مادری خود تخلیه شده‌اند و روند میزان تخلیه این عنصر نیز با افزایش مقدار بارندگی در مناطق مورد مطالعه مطابقت دارد. باریم نیز، که در مقایسه با استرانسیم حلالیت کمتری دارد، در دو منطقه النگدره و توشن تخلیه بیشتری نشان می‌دهد. سایر عناصر اصلی و کمیاب در افق Bt هر خاک‌رخ روندی مشابه مواد مادری آن خاک‌رخ طی می‌کنند. نکته قابل توجه در بررسی فاکتور غنی‌شدگی عناصر اصلی و کمیاب هر خاک‌رخ در مقایسه با پایین‌ترین افق در هر منطقه رفتار ژئوشیمیایی یکسان Ca و Sr است. به دلیل شباهت شعاع یونی این دو عنصر، امکان جانشینی آن‌ها به جای هم در ساختار کانی‌ها وجود دارد و بنابراین پراکنش Sr عمدتاً مرتبط با پراکنش کانی‌های کلسیم‌دار است (کاباتاپندیس و پندیس ۲۰۰۱). میدلبرگ و همکاران (۱۹۸۸) شباهت توزیع ژئوشیمیایی این دو عنصر را نشان‌دهنده هوازگی پلاژیوکلاز می‌دانند.



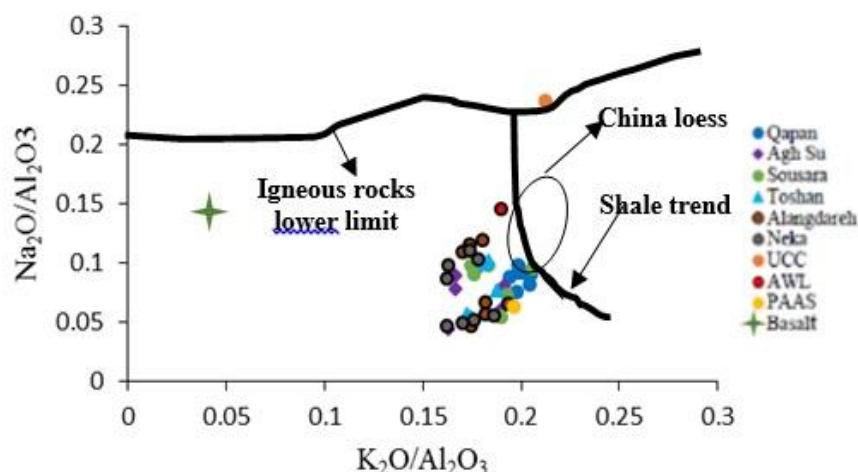
شکل ۶. نمودار عنکبوتی ترکیب عناصر اصلی (الف) و کمیاب (ب) نرمالیزه‌شده با UCC در مواد مادری شش خاک‌رخ مورد مطالعه (لس) و دو مرجع برای مقایسه



شکل ۷. نمودار عنکبوتی شاخص غنی شدن برخی عناصر اصلی (الف) و کمیاب (ب) در افق آرچلیک خاک‌رخ‌های مورد مطالعه (عنصر مرجع Ti)

مطالعات مختلف در زمینه ترکیب شیمیایی لس‌ها نشان می‌دهند اغلب نهشته‌های لسی در سراسر جهان از سنگ‌های رسوبی یا رسوباتی منشأ گرفته‌اند که حداقل یک فاز پیش‌هوازدگی^۱ را طی کرده‌اند (مک لنان ۱۹۸۹؛ گالت و همکاران ۱۹۹۶ و ۱۹۹۸؛ جان و همکاران ۲۰۰۱؛ اجواری و همکاران ۲۰۰۸؛ باگل و همکاران ۲۰۰۹؛ هائو و همکاران ۲۰۱۰). این مفهوم با مفهومی که لس را به صورت رسوب چرخه اول مشتق از تخریب یخچالی سنگ‌های آذرین تعریف می‌کند (موس و بودان ۲۰۰۶) مغایرت دارد. بر اساس شکل ۸، که نسبت $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ را در مقابل $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ نشان می‌دهد، ترکیب شیمیایی گروه لس‌های مورد مطالعه نزدیک به ترکیب شیل‌ها و لس‌های چین است. این مورد به احتمال زیاد به دلیل مقدار کم Na_2O در مقایسه با ترکیب سنگ‌های آذرین است که می‌تواند به خروج پلاژیوکلاز سدیم‌دار از ساختار سنگ‌های منشأ رسوبات نسبت داده شود. در واقع این نمودار درجه بلوغ ژئوشیمیایی خاک‌های لسی منطقه را نسبت به سنگ‌های آذرین نشان می‌دهد. با افزایش رطوبت در غرب گرادیان بارش (نکا) و افزایش تخلیه سدیم نسبت $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ کاهش می‌یابد. این مشاهدات نشان می‌دهد درجات مختلف بلوغ کانی‌شناسی رسوبات لسی به شکل تخریب سدیم عمدتاً تحت تأثیر شرایط آب‌وهوایی محلی در مناطق منشأ این رسوبات قرار دارد. این احتمال وجود دارد که مواد اولیه تشکیل‌دهنده این خاک‌ها، قبل از انتقال توسط باد، تحت تأثیر خروج سدیم از ساختار پلاژیوکلاز سدیم‌دار

قرار گرفته باشند. البته این تفسیر بر اساس دو فرض مطرح می‌شود؛ یکی وجود گرادیان بارشی مشابه گرادیان کنونی در فواصل زمانی تشکیل لس‌های پلیستوسن و دوم اینکه اساساً لس‌ها در حاشیه دریای خزر از منابع محلی منشأ گرفته باشند. گفتنی است این تفسیر، به دلیل اینکه منشأ این رسوبات هنوز به وضوح مشخص نیست، خالی از اشکال نیست.

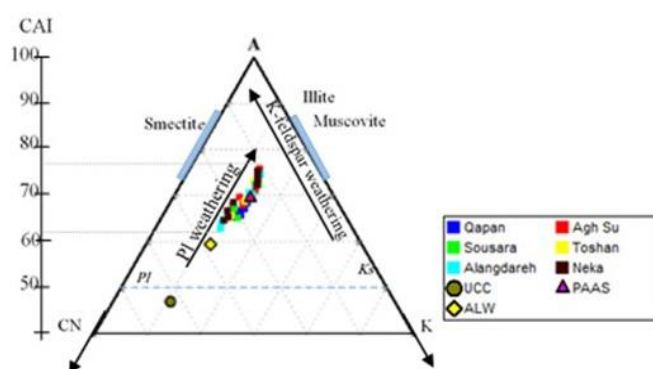


شکل ۸. نمودار $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ در مقابل $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ، که بلوغ ژئوشیمیایی خاک‌ها را در مناطق مورد مطالعه نشان می‌دهد.

شدت هوازدگی بر اساس شاخص هوازدگی شیمیایی CIA

در مراحل اولیه هوازدگی، ترکیب شیمیایی خاک‌ها غالباً توسط ترکیب شیمیایی مواد مادری آن‌ها کنترل می‌شود؛ درحالی‌که ترکیب شیمیایی خاک‌های بالغ منعکس‌کننده اثر هوازدگی است. شاخص‌های هوازدگی روش‌هایی مرسوم برای کمی کردن درجه هوازدگی شیمیایی به شمار می‌رود. یکی از این شاخص‌ها شاخص CIA (نسبیت و یانگ ۱۹۸۲) است که روشی برای اندازه‌گیری میزان تبدیل فلدسپارها به کانی‌های رسی است. مقدار این شاخص برای پلاژیوکلاز و فلدسپار پتاسیم غیرهوازیده تقریباً برابر ۵۰ و شبیه مقادیر سنگ‌های غیرهوازیده پوسته فوقانی قاره‌ای و برای ایلیت و کائولینیت به ترتیب برابر ۷۵ و ۱۰۰ است (نسبیت و یانگ ۱۹۸۲). دیاگرام مثلثی A-CN-K نیز یک روش گرافیکی برای نشان دادن شاخص CIA است. همچنین آزمون ناهمگنی بالقوه ترکیبات فلدسپاری از طریق این دیاگرام بر اهمیت آن می‌افزاید. زیرا افزایش نسبت فلدسپار پتاسیم به آل بیت (پلاژیوکلاز کلسیم‌دار) به افزایش یا کاهش شدید شاخص‌های CIA منجر می‌شود (باگل و همکاران ۲۰۱۱). همان‌طور که شکل ۹ نشان می‌دهد، روند هوازدگی در لس‌های مورد مطالعه در امتداد خطی تقریباً موازی با ضلع A-CN است که خروج سدیم و کلسیم در اثر هوازدگی پلاژیوکلاز و از طرفی نسبت‌های تقریباً پایدار فلدسپار پتاسیم به آل بیت در خاک‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد (ولامینگ و همکاران ۲۰۱۸). نتیجه‌گیری مهم دیگر از این روند آن است که تغییرات دو عنصر Na و Al ناشی از جورشدگی انتخابی ذرات

درشت‌تر (در حد و اندازه فلدسپار) یا ریزتر (رسی) نیست. زیرا در آن صورت پراکنش نقاط مورد مطالعه در فضای دیاگرام باید روند عمودی به سمت رأس A (Al) را دنبال می‌کرد (باگل و همکاران ۲۰۱۱). از طرفی پراکنش نقاط در فضای دیاگرام نشان‌دهنده تغییرات اندک در ترکیب شیمیایی کلی سنگ‌های منشأ این رسوبات است (نسبیت و یانگ ۱۹۸۹). مقدار CIA در نمونه‌های مورد مطالعه بین ۶۲/۹۰ و ۷۵/۶۶ متغیر است که بالاتر از این مقدار در UCC (حدود ۴۸) و AWL و در محدوده درجه هوازگی متوسط قرار می‌گیرد. در عوض این مقدار برای PAAS، به منزله یک نمونه هوازده، نزدیک به میانگین CIA خاک‌رخ‌های مدرن مورد مطالعه است. بررسی روند عمقی شاخص CIA نشان داد مقدار این شاخص در افق‌های Bt همه خاک‌رخ‌ها حداکثر است که می‌تواند نشانه هوازگی بیشتر پلاژیوکلاز باشد.



شکل ۹. منحنی مثلثی A (Al₂O₃)-CN (CaO*+Na₂O)-K(K₂O) برای خاک‌رخ‌های مطالعه‌شده، Ks نشان‌دهنده فلدسپار پتاسیم و PI نشان‌دهنده پلاژیوکلاز هستند.

نتیجه

در این پژوهش، مقدار و الگوی توزیع عناصر اصلی و کمیاب در خاک‌های لسی جنگلی شمال ایران بررسی شد. مقدار و توزیع عناصر مورد بررسی در خاک‌رخ‌های مورد مطالعه به ترکیب کانی‌شناسی لس به منزله مواد مادری و نیز فرایندهای پدوژنیک وابستگی زیاد نشان داد. از یک طرف مقدار بارش با اثرگذاری بر شدت فرایندهای خاک‌ساز، از جمله انحلال و رسوب مجدد کربنات‌ها و آب‌شویی عناصر محلول سدیم و کلسیم و استرانسیم، بر توزیع و انتقال عناصر در پروفیل‌های خاکی مؤثر بود و از طرف دیگر شواهد حاصل از همبستگی آماری بین عناصر تشکیل‌دهنده شبکه کانی‌های سیلیکاته و کانی‌های فرومنیزیمی به منزله کانی‌های میزبان این عناصر و کانی‌های غالب در ماده مادری لس نشان‌دهنده نقش مواد مادری در توزیع عناصر کمیاب (جز Sr) و عناصر اصلی (جز Ca) در خاک‌رخ‌های مورد مطالعه است. به نظر می‌رسد غلظت مطلق عناصری مانند Si و Al در منطقه مورد مطالعه تحت تأثیر اثر رقت کانی‌های کربناته قرار گرفته است و مقدار این عنصر به طور معنادار در مقایسه با ترکیب شیمیایی شیل پس از آرگن و متوسط لس جهانی کاهش یافته است. اعداد مربوط به شاخص هوازگی شیمیایی (CIA) نشان می‌دهد مناطق مختلف در مطالعه حاضر شرایط هوازگی مشابهی دارند و از نظر شدت هوازگی در محدوده هوازگی متوسط قرار می‌گیرند.

- Asadi, S., Moore, F., & Keshavarzi, B. (2013). The nature and provenance of Golestan loess deposits in northeastern Iran. *Geological Journal*, 48: pp. 646-660.
- Bronger, A. (2003). Correlation of loess-palaeosol sequences in east and central Asia with SE Central Europe: towards a continental quaternary pedostratigraphy and palaeoclimatic history. *Quaternary International*, 106-107: pp. 11-31.
- Buggle, B., Hambach, U., Glaser, B., Gerasimenko, N., Marković, S. B., Glaser, I., & Zöller, L. (2009). Stratigraphy, and spatial and temporal palaeoclimatic trends in Southeastern/Eastern European loess-palaeosol sequences. *Quaternary International*, 196 (1-2): pp. 86-106.
- Buggle, B., Glaser, B., Hambach, U., Gerasimenko, N., & Marcović, S. (2011). An evaluation of geochemical weathering indices in loess-palaeosol studies. *Quaternary International*, 240: pp. 12-21.
- Chapman, H. D. (1965). Cation exchange capacity. In: Black, C.A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis- Part 2*. American Society of Agronomy, Madison, WI, pp. 891-901.
- 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.
- Feyzi, V., Azizi, G., Alimohammadian, H., Mohammadi, H., & Shamsipour, A. (2015). The reconstruction of late quaternary climate conditions using magnetic susceptibility and geochemistry of major elements in Azad Shahr Loesses. *Quantitative geomorphological researches*, 3(3): pp. 1-21.
- Feyzi, V., Azizi, G., Alimohammadian, H., & Mollashahi, M. (2017). Paleoclimate analysis of Nowdeh section (Golestan Province) using geochemical element. *Quaternary Journal of Iran*, 3(9): pp. 29-39.
- Gallet, S., Jahn, B., & Torii, M. (1996). Geochemical characterization of the Luochuan loess-palaeosol sequence, China, and paleoclimatic implications. *Chemical Geology*, 133: pp. 67-88.
- Gallet, S., Jahn, B., Van Vliet Lanoë, Dia, A., & Rossello, E. (1998). Loess geochemistry and its implications for particle origin and composition of the upper continental crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 156: pp. 157-172.
- Gee, G. W. & Bauder, J. W. (1986). Particle-size analysis. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis- Part 1. Physical and Mineralogical Methods*, second ed. Agronomy, pp. 383-411.
- Hao, Q., Guo, Z., Qiao, Y., Xu, B., & Oldfield, B. (2010). Geochemical evidence for the provenance of middle Pleistocene loess deposits in southern China. *Quaternary Science Reviews*, 29: pp. 3317-3326.
- Huang, C., Wei, G., Li, W., & Liu, Y. (2018). A geochemical record of the link between chemical weathering and the East Asian summer monsoon during the late Holocene preserved in lacustrine sediments from Poyang Lake, central China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 154: pp. 17-25.
- Jahn, B., Gallet, S., & Han, J. (2001). Geochemistry of the Xining, Xifeng and Jixian sections, Loess Plateau of China: eolian dust provenance and palaeosol evolution during the last 140 ka. *Chemical Geology*, 178: pp. 71-94.
- Kabata-Pendias, A. & Pendias, H. (2001). *Trace Elements in Soils and Plants*. 3rd ed., USA: CRC Press.
- Khormali, F. & Shamsi, S. (2009). Micromorphology and quality attributes of the loess derived soils affected by land use change: A case study in Ghapan watershed, Northern Iran. *Journal of Mountain Science*, 6: pp. 197-204.
- Khormali, F. & Kehl, M. (2011). Micromorphology and development of loess-derived surface and buried soils along a precipitation gradient in Northern Iran. *Quaternary International*. 234: pp. 109-123.
- Khormali, F., Ghergherechi, S., Kehl, M., & Ayoubi, S. (2012). Soil formation in loess-derived soils along a subhumid to humid climate gradient, Northeastern Iran. *Geoderma*, 179-180: pp. 113-122.
- Kittrick, J. A. & Hope, E. W. (1963). A procedure for the particle size separation of soils for X-ray diffraction analysis. *Soil Sci.* 96, pp. 312-325.
- Li, T., Wu, Y., Du, S., Huang, W., Hao, C., Guo, C., Zhang M., & Fu, T. (2016). Geochemical

- characterization of a Holocene aeolian profile in the Zhongba area (southern Tibet, China) and its paleoclimatic implications. *Aeolian Research*, 20: pp. 169-175.
- McLennan, S. M. (1989). Rare earth elements in sedimentary rocks: Influence of provenance and sedimentary processes. In: Lipin, B.R., McKay, G. A. (Eds.), *Geochemistry and Mineralogy of Rare Earth Elements*. Chelsea, Michigan. *Reviews in Mineralogy*, 21: pp. 169-200.
- McLennan, S. M., Hemming, S., McDaniel, D. K., & Hanson, G. N. (1993). Geochemical approaches to sedimentation, provenance and tectonics. In: Johnsson, M.J., Basu, A. (Eds.), *Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments*, Geological Society of America Special Paper, 284: pp. 21-40.
- Mehdipour, F., Alimohammadian, H., & Sabouri, J. (2013). The reconstruction of late quaternary climate conditions in part of north Iran (Neka Loesses) using magnetic parameters and geochemistry. *Scientific Quarterly Journal, Geosciences*, 23(89): pp. 97-108.
- Middelburg, J., van der Weijden, C. J., & Woittiez, J. R. W. (1988). Chemical processes affecting the mobility of major, minor and trace elements during weathering of granitic rocks. *Chem. Geol.* 68 (3-4): pp. 253-273.
- Muhs, D. R. & Budahn, J. R. (2006). Geochemical evidence for the origin of late Quaternary loess in central Alaska. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 43: pp. 323-337.
- Nagarajan, R., Madhavaraju, J., Nagendra, R., Selvamony Armstrong- Altrin, J., & Moutte, J. (2007). Geochemistry of Neoproterozoic shales of the Rabanpalli Formation, Bhima Basin, Northern Karnataka, southern India: implications for provenance and paleoredox conditions. *Revista Mexicana de Ciencias Geologicas*, 24: pp. 150-160.
- Nael, M., Jalalian, A., Khademi, H., Kalbasi, M., Sotohian, F., & Schulin, R. (2010). Effect of geopedological conditions on content and distribution of selected major and trace elements in forest soils of Fuman-Masule region. *Journal of Water and Soil Science*, 14(51): pp. 71-86.
- Nath, B. N., Kundendorf, H., & Plüger, W. (2000). Influence of provenance, weathering, and sedimentary processes on the elemental ratios of the fine-grained fraction of the bed load sediments from the Vembanad Lake and the adjoining continental shelf, southwest coast of India. *Journal of Sedimentary Research*, 70: pp. 1081-1094.
- Nelson, D. W. & Sommers, L. E. (1982). Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Page, A.L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 2*. American Society of Agronomy, Madison. WI, pp. 539-579.
- Nesbitt, H. W. & Markovics, G. (1980). Chemical processes affecting alkalis and alkaline earths during continental weathering. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44: pp. 1659-1666.
- Nesbitt, H. W. & Young, G. M. (1982). Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 229, pp. 715-717.
- Nesbitt, H. W. & Young, G. M. (1989). Formation and diagenesis of weathering profiles. *Journal of Geology*, 97, pp. 129-147.
- Puchelt, H. (1972). Barium. In: K.H., Wedepohl (Eds), *Handbook of Geochemistry*. Springer, 56B1-56O1, Berlin.
- Raheb, A., Heidari, A., & Mahmoodi, Sh. (2016). Geochemical properties of some soils developed on basalt rocks of North-West Iran. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 47(4): pp. 807-818.
- Roy, P. D., Caballero, M., Lozano, R., Ortega, B., Lozano, S., Pi, T., Israde, I., & Morton, O. (2010). Geochemical record of late Quaternary paleoclimate from lacustrine sediments of paleo-lake San Felipe, western Sonora desert, Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 29: pp. 586-596.
- Roy, P. D., Sinha, R., & Smykatz-Kloss, W. (2000). Mineralogy and geochemistry of the evaporitic crust from the hypersaline Sambhar Lake playa, Thar Desert. *Chemie der Erde*, 61: pp. 241-253.
- Salinity Laboratory Staff. (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. United States Department of Agriculture Handbook No. 60 Washington, DC.
- Soil survey staff. (2014). *Keys to soil taxonomy*. U.S. Department of Agriculture, Natural Resources

- Conservation Service.
- Ujvari, G., Varga, A., & Balogh-Brunstad, Z. (2008). Origin, weathering, and geochemical composition of loess in southwestern Hungary. *Quaternary Research*, 69: pp. 421–437.
- Vlaminck, S., Kehl, M., Rolf, C., Franz, S. O., Lauer, T., Lehndorff, E., Frechen, M., & Khormali, F. (2018). Late Pleistocene dust dynamics and pedogenesis in Southern Eurasia – Detailed insights from the loess profile Toshan (NE Iran). *Quaternary Science Reviews*, 180: pp. 75-95.
- Wei, G., Liu, Y., Li, X., Shao, L., & Fang, D. (2004). Major and trace element variations of the sediments at ODP Site 1144, South China Sea, during the last 230 ka and their paleoclimate implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 212: pp. 331–342.
- West, A. J., Galy, A., & Bickle, M. (2005). Tectonic and climatic controls on silicate weathering. *Earth and Planetary Science Letter*, 235: pp. 211–228.
- Whitfeild, M. & Turner, D. R. (1979). Water–rock partition coefficients and the composition of seawater and river water. *Nature*, 278: pp. 32–137.
- Youseffard, M., Ayoubi, S., & Jalalian, A. (2013). Weathering intensity and investigation of weathering indices in some soils developed on igneous rocks in West-North of Iran. *Journal of water and soil (Agricultural science and technology)*, 27(2): pp. 266 - 281.
- Zeraat P Ashe, M. (2010). Carbon stock and mineral factors controlling soil organic carbon in a climosequence, Golestan province. M.Sc Thesis, Gorgan University of Agriculture Sciences and Natural Resources, 135pp. (In Persian with English Abstract).