

بازسازی آب‌وهوای کواترنر پسین در بخشی از شمال ایران (لس‌های نکا) با استفاده از داده‌های مغناطیسی و ژئوشیمیایی

فرشته مهدی پور حسکوئی^۱، حبیب‌علیمحمدیان^۲ و جعفر صبوری^۳

^۱ کارشناسی ارشد، پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

^۲ دکتر، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

^۳ کارشناسی ارشد، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۱/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۶/۱۹

چکیده

گستره مورد مطالعه در استان مازندران، در مسیر جاده اصلی ساری-گرگان، در حدود ۸ کیلومتری شهرستان نکا و ۳۳ کیلومتری جنوب باختری شهرستان بهشهر قرار دارد. منطقه مورد مطالعه از نظر پهنه‌های اصلی رسوبی-ساختاری ایران جزو کناره جنوبی خزر به شمار می‌آید و از جنوب به شمال گسل البرز و از شمال به کناره دریای خزر محدود شده است. بر پایه مطالعات و کاربرد روش‌های نوین محیط مغناطیسی روی برش رسوبی توالی‌های لس/خاک دیرینه نکا در پیرامون روستای کُلت، آب‌وهوای ۵۰ هزار سال گذشته شمال ایران در این منطقه بازسازی شد. با استفاده از روش‌های محیط مغناطیسی و کانی‌شناسی مغناطیسی، داده‌های محیط مغناطیسی به دست آمده و به‌عنوان ویژگی‌های تغییرات محیطی، در بازسازی آب‌وهوای دیرینه استفاده شد. برای بررسی ارتباط میان تغییرات آب‌وهوا در منطقه با تغییرات توان مغناطیسی رسوبات، داده‌های مغناطیسی و ژئوشیمیایی به دست آمده با یکدیگر مقایسه شد. با توجه به این نتایج، تغییرات آب‌وهوایی (تغییرات دما و رطوبت) با تغییرات مغناطیسی رسوبات و خاک‌های دیرینه کاملاً مرتبط و قابل انطباق است. همچنین، نمودارهای مغناطیسی-ژئوشیمیایی به دست آمده از بررسی تغییرات نسبت‌های عامل‌های آب‌وهوایی ژئوشیمیایی با تغییرات متغیرهای آب‌وهوایی مغناطیسی، در برش مورد مطالعه، همخوانی نزدیکی نشان می‌دهند. بر پایه مطالعه تغییرات قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی نیز چنین نتیجه‌گیری می‌شود که برش رسوبی مورد مطالعه نشان‌دهنده تغییرات آب‌وهوایی (دما و رطوبت دیرینه) در طی حدود ۴۸ هزار سال پیش تا ۲۰ هزار سال پیش است. با استفاده از داده‌های مغناطیسی، چرخه‌های کوتاه مدت آب‌وهوایی معروف به استادیال‌ها و اینتراستادیال‌ها در توالی لس/خاک دیرینه مورد مطالعه مشخص شد. این جهش‌های آب‌وهوایی در واحد خاک سطحی با ۴ جهش کوتاه مدت سرمایشی یا استادیال، در واحد لس بالایی با دست کم ۶ جهش گرمایشی یا اینتراستادیال، در واحد لس پایینی، یک دوره اینتراستادیال و در واحد خاک دیرینه پایینی نیز با یک دوره استادیال مشخص شد.

کلیدواژه‌ها: محیط مغناطیسی، توالی‌های لس/خاک دیرینه، ژئوشیمی، قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی، آب‌وهوای دیرینه، نکا

*نویسنده مسئول: حبیب‌علیمحمدیان

E-mail: halimohammadian@gmail.com

۱- پیش‌گفتار

موجود در منطقه از نوع امتدادلغز و دارای یک مؤلفه وارون با شیب به سوی جنوب هستند. روند ساختارها عموماً شمال باختری- جنوب خاوری است. مهم‌ترین گسل در این منطقه گسل خزر است که از جنوب گنبد کاووس تا لاهیجان، به طول تقریبی ۵۵۰ کیلومتر، در امتداد و به موازات ساحل دریای خزر کشیده شده است. آثار این گسل از بهشهر تا ساری در سطح زمین نمایان است، ولی در بیشتر مناطق این گسل در زیر رسوبات آبرفتی پنهان شده است. از دید ماهیتی این گسل از نوع عادی و با شیب به سمت جنوب است. گسل خزر با گسل بزرگ شمال البرز تقریباً موازی است و به سوی باختر به تدریج به یکدیگر نزدیک و در پایان یکی می‌شوند (کبیرنیا و همکاران، ۱۳۸۲).

برش رسوبی مورد مطالعه از توالی‌های لس/خاک دیرینه تشکیل شده است، که هر کدام از این واحدها، احتمالاً در دوره‌های آب و هوایی سرد و خشک (لس) و یا گرم و مرطوب (خاک‌های دیرینه) تشکیل شده‌اند (شکل ۲) که توالی این برش از بالا به پایین عبارت است از:

- خاک سطحی (S_p): یک لایه خاک کاملاً پیشرفته و به ستبرای ۲ متر است، زیرا آب و هوای مرطوب حاکم بر شمال ایران سبب گسترش افق‌های خاک می‌شود. بر پایه سن‌یابی‌های صورت گرفته به روش تحریک با پرتو نوری (Optically Stimulated Luminescence)، قاعده این لایه خاک در حدود $20 \pm 2/0$ هزار سال پیش سن‌یابی شده است (Kehl et al., 2005).

- واحد لس بالایی (UL): این رسوبات دارای ۶ متر ستبرای و به رنگ زرد روشن هستند. بر پایه مطالعات مورفوسکوپی صورت گرفته روی ذرات رسوبی این واحد

برش مورد مطالعه در حوالی روستای کُلت (Kolet) قرار دارد، این روستا از توابع شهرستان نکا و در مسیر جاده اصلی ساری- بهشهر قرار گرفته است. موقعیت جغرافیایی این برش در $36^{\circ} 39' 44''$ عرض شمالی و $53^{\circ} 23' 56''$ طول خاوری است (شکل ۱). منطقه مورد مطالعه از دید پهنه‌های اصلی رسوبی- ساختاری ایران جزو کناره جنوبی خزر به شمار می‌آید (کبیرنیا و همکاران، ۱۳۸۲). نبوی (۱۳۵۵) از دید ساختمانی- رسوبی، منطقه مورد مطالعه را جزو پهنه گرگان- رشت بیان کرده و آقانباتی (۱۳۷۹ و ۱۳۸۵) نیز، آن را جزو حوضه پاراتیسی دانسته است. این پهنه شامل مناطقی است که در شمال گسل البرز قرار دارد و کناره دریای خزر را در سواحل ایران مسدود کرده است و به سمت خاور با لایه‌های ستبری از لس پوشیده می‌شود. با توجه به برگه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ ساری (کبیرنیا و همکاران، ۱۳۸۲) از ویژگی‌های مهم این پهنه نبود سنگ‌های انوسن و الیگوسن و دگرشیبی لایه‌های میوسن روی سنگ‌های کرتاسه است. نتایج حفاری‌های بسیار رسوبات پلیو- پلیوستوسن، در نوار ساحلی دریای خزر نشان می‌دهد که در اواخر سنوزویک در این ناحیه دریای کم‌ژرفایی وجود داشته است. این رسوبات متعلق به دریای خزر بوده که به علت فرونشینی کف آن و تبخیر ساحل کهن عقب‌نشینی کرده است. کهن‌ترین سنگ‌ها در این ناحیه نهشته‌های آهکی و سنگ آهک‌های دولومیتی ژوراسیک و جوان‌ترین واحدها نهشته‌های کواترنری هستند که گسترش قابل توجهی در منطقه دارند. منطقه نکا در برگه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ ساری (کبیرنیا و همکاران، ۱۳۸۲) بخشی از پهنه ساختاری البرز است که از شمال گسل البرز تا ساحل دریای خزر امتداد دارد. به جز مجموعه گسل‌های خزر که به صورت عادی هستند، دیگر شکستگی‌های

لُس/خاک‌های دیرینه ناشی از حضور کانی‌های مغناطیسی است. امروزه، بحث و بررسی روی چگونگی سازوکار تغییر مقادیر قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی ذرات رسوبی به عنوان یک عامل آب و هوایی بسیار کاربرد دارد (Heller & Evans, 1995). Liu & Heller (1982) بر پایه تجزیه و تحلیل دقیق قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی یک توالی لُس استنتاج کردند که تغییرات قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی کاملاً منطبق با تغییرات آب‌وهوایی دیرینه هستند. آنها در سال ۱۹۸۴ تشریح کردند که افزایش قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی توسط افزایش تراکم کانی‌های مغناطیسی ناشی از پیش‌روی فرایندهای تولید خاک است (An et al., 1991).

طبق استاندارد جهانی، برای توالی‌های لُس/خاک دیرینه همیشه خاک‌های دیرینه میزان قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی بیشتری نسبت به لُس‌های هم‌جوار خود دارند (Song et al., 2008)، زیرا فرایندهای تولید خاک (که با افزایش میزان رطوبت به پیش می‌روند) سبب تشکیل کانی‌های مغناطیسی قوی از اکسیدهای آهن مانند: مگنتیت (Fe_3O_4)، مگه‌میت ($\gamma-Fe_2O_3$) و هماتیت ($\alpha-Fe_2O_3$) در خاک می‌شوند (جدول ۱). در حالی که مقادیر کانی‌های مغناطیسی نهشته‌های لُس به تغییر در ذرات موجود در منبع بادرفت‌ها (Eolian sources) وابسته هستند.

Kukla et al. (1988) در پژوهش‌های خود فرض کردند که یک جریان آواری از ذرات مگنتیت بسیار ریزدانه ممکن است دلیل افزایش قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی کل باشد. همچنین، کاهش ته‌نشینی دانه‌های سیلتی در طی دوره‌های گرم سبب افزایش فراوانی ذرات مغناطیسی می‌شود و مقادیر قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی را افزایش می‌دهد، در حالی که در طی دوره‌های سرد، ورود مداوم مگنتیت آواری از مناطق منشأ، سبب ایجاد قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی در نهشته‌های بادی (لُس) می‌شود (Spassov, 2002).

به‌طور کلی، با افزایش میزان رطوبت در طی دوره‌های آب‌وهوایی گرم‌تر (دوره‌های میان‌یخچالی)، شرایط مناسب برای گسترش فرایندهای تولید خاک و بالا رفتن قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی، فراهم آمده و کانی‌های مغناطیسی قوی (مگنتیت و مگه‌میت) به‌صورت در جا در خاک‌های دیرینه تشکیل شده‌اند. اندازه‌گیری مغناطیس خاک‌های امروزی نیز نشان می‌دهد که کانی‌های مغناطیسی تولیدشده، با مقدار رطوبت حاکم بر محیط، مرتبط هستند (Maher, 2011).

فرایند تشکیل خاک‌ها در شرایط آب‌وهوایی گرم و مرطوب (شرایط تولید خاک‌های دیرینه)، موجب افزایش تولید کانی‌های مغناطیسی قوی با مقدار قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی بالا و در نتیجه، سبب افزایش قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی در خاک‌های دیرینه (خاک‌های فسیل سرخ رنگ) در مقایسه با نهشته‌های لُس (رسوب‌گذاری در طی ادوار سرد و خشک) است (An et al., 1977).

۲- بازسازی تغییرات آب‌وهوای دیرینه در برش رسوبی کُلت

در برش رسوبی مورد مطالعه (کُلت)، تغییرات قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی به‌صورت یک نمودار در برابر ستبرای ستون چینه‌ای رسم شده است. در این نمودار مطابق با محل واحدهای لُس مقادیر متغیر قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی ذرات رسوبی کاهش و در برابر لایه‌های خاک دیرینه افزایش یافته است (شکل ۱).

با توجه به شکل ۱ چنین درک می‌شود که در برش رسوبات کُلت ۳ دوره متناوب گرم و مرطوب (با در نظر گرفتن لایه خاک بالایی)، در میان دوره‌های سرد و خشک (که در طی آن لُس توسط وزش بادهای چیره در آن زمان حمل و نهشته شده‌اند) وجود دارد که در آنها تشکیل خاک‌های سطحی رخ داده است. میزان قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی بالاتر بیانگر نسبی میزان بالاتری از دما و رطوبت دیرینه است. گفتنی است که در هر کدام از مقاطع لُسی استاندارد جهان، همیشه خاک‌های دیرینه میزان پذیرفتاری مغناطیسی بیشتری نسبت به لایه‌های لُس هم‌جوار خود دارند (Maher, 2011).

لُس، آثار حمل و نقل توسط بادهای دیرینه در ذرات آن به‌صورت دانه‌های کوارتز مات شده قابل مشاهده است (شکل ۳- الف). سن قاعده این واحد به روش OSL، حدود بیش از ۳۸ هزار سال پیش (نمودار ۱) گزارش شده است (Kehl et al., 2005). خاک دیرینه بالایی (US): این واحد تقریباً به ستبرای یک متر و به رنگ سرخ زنگ‌زده (نشان‌دهنده حضور اکسیدهای آهن در اثر عملکرد فرایند اکسایش) است. این لایه خاک دیرینه احتمالاً بیانگر عملکرد فرایندهای تولید و تشکیل خاک در یک دوره آب‌وهوایی گرم و مرطوب است. بر پایه مطالعات مورفوسکوپی بیشتر ذرات این لایه خاک شامل خرده‌سنگ‌هایی هستند، که برخی از آنها با اندازه‌های بزرگ‌تر از ۰/۲ میلی‌متر به‌صورت لوله‌ای شکل دیده شده‌اند. این خرده‌سنگ‌ها احتمالاً در پیرامون ریشه گیاهان تشکیل شده‌اند و پس از بین رفتن ریشه به صورت حفراتی به این شکل دیده می‌شوند (شکل ۳- ب).

واحد لُس پایینی (LL): دارای ویژگی‌هایی است که در لُس بالایی دیده می‌شود و ستبرای کمتری دارد (حدود ۱/۵ متر). بر پایه سن‌یابی OSL، پایین‌ترین و کهن‌ترین آثار شروع سرمایش هوا در این رسوبات، در محدوده زمانی تقریباً 4877 ± 47 هزار سال پیش (نمودار ۱) تعیین شده است (Kehl et al., 2005).

خاک دیرینه پایینی (LS): دارای ویژگی‌هایی است که در خاک دیرینه بالایی دیده می‌شود، و از دید ستبرای نیز تقریباً مشابه آن است.

محیط مغناطیسی (Environmental magnetism) علمی به نسبت جدید و مرتبط با رشته‌های مطالعاتی مختلفی است. این علم، مطالعه ویژگی مغناطیسی ذرات مغناطیس‌دار است که شدت مغناطیس‌شدگی و سوی شمال مغناطیسی را در زمان تشکیل شدن در خود ثبت و نگهداری می‌کنند (Dekkers, 1997). نهشته‌های لُس رسوبات بادی ریزدانه با ذرات زاویه‌داری هستند که در کناره کویرها یا محیط‌های یخچالی تشکیل می‌شوند. امروزه ثابت شده است که توالی‌های لُس/خاک دیرینه ترکیبی از مجموعه اطلاعات و آرشوهای طبیعی برای بیان آب‌وهوای دیرینه هستند (Maher, 1998).

در به کار گرفتن روش‌های نوین محیط مغناطیسی برای بازسازی آب‌وهوای دیرینه تغییرات مقادیر قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی (Magnetic Susceptibility) در توالی‌های لُس / خاک دیرینه (Loess/ Paleosol Sequences) بررسی می‌شود.

مغناطیس لُس (Loess Magnetism) به مطالعاتی اشاره دارد که در چند دهه گذشته روی نيمرخ‌های لُس صورت گرفته است. این مطالعات مشخص کردند که لُس‌ها به‌طور طبیعی سوی قطبیت میدان مغناطیسی زمین را به هنگام نهشته شدن در خود ثبت کرده‌اند. بر پایه مطالعات امروزی، اندازه‌گیری‌های مغناطیسی کانی‌ها را می‌توان برای به‌دست آوردن داده‌های آب‌وهوایی استفاده کرد. یک نمونه کلاسیک از این مطالعات، مطالعه نهشته‌های لُس است (Evans & Heller, 2003)، زیرا این رسوبات معمولاً دربردارنده شمار بسیاری از میان‌لایه‌های خاک دیرینه نیز هستند. تشکیل این توالی‌های لُس/خاک دیرینه نیازمند رخداد چرخه‌های آب‌وهوایی است (Guo et al., 2008). خاک‌های دیرینه به‌عنوان نتیجه هوازگی شیمیایی شدید واحدهای لُس‌ها، که به صورت رسوبات میان‌لایه‌ای در این واحدها نمایان هستند، در نظر گرفته می‌شوند (An et al., 1991; Liu et al., 1985).

فرایندهای حمل و نقل و وزش بادهای دیرینه ورود ذرات آواری را به محل نهشت توالی‌های لُس/خاک دیرینه گسترش داده و فرایندهای هوازگی هم که بیشتر توسط آب‌وهوا کنترل شده‌اند، سبب تجزیه و انحلال کانی‌ها و آزادسازی آهن آنها در هنگام پیشرفت مراحل فرایند تولید خاک می‌شوند. محتوای خاک‌ها در خلال فرایندهای تشکیل خاک، غنی از کانی‌های مغناطیسی می‌شوند و قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی خاک را افزایش می‌دهند (Spassov, 2002).

بررسی‌های آزمایشگاهی دقیق روی نمونه‌ها و نیز بررسی وضعیت مغناطیسی آنها نشان می‌دهد که افزایش پذیرفتاری مغناطیسی مشاهده‌شده روی توالی‌های

۳- معیارهای ژئوشیمیایی تغییرات آب‌وهوا

در سالهای اخیر برخی از پژوهشگران، از آثار ژئوشیمیایی به جا مانده از هوازدهگی شیمیایی خاک‌های دیرینه و لُس‌ها برای بازسازی شرایط محیطی دیرینه استفاده کرده‌اند (Roy et al., 2000; 2010). در این میان دو ایده بسیار ساده سبب گسترش مطالعات زیست محیطی دیرینه شد، اول این که، مواد و عناصر موجود در نهشته‌های لُس، تولیدات محیط‌های بیابانی هستند و دوم این که، تشکیل میان‌لایه‌های خاک نیاز به حضور آب (رطوبت) دارد (Smykatz-Kloss & Roy, 2010).

در مطالعات آب‌وهوای دیرینه بر پایه داده‌های ژئوشیمیایی با این که کربنات کلسیم در محیط ناپایدارتر است ولی تعداد بی‌شماری از کانی‌های تبخیری همچون: کربنات‌ها و کلریدهای Na, K, Ca و Mg به‌عنوان نشانه‌هایی از سرزمین‌های خشک دیرینه به کار برده می‌شوند (Holser, 1979; Moore & Mason, 1982). سدیم معمولاً انحلال‌پذیری بالایی دارد (در محیط‌های خشک در عناصر آب‌دار فراوان است) و حتی در هنگام عملکرد بسیار کم آب نیز به صورت محلول است؛ محیط‌های مناسب برای حفظ Na^+ ، محیط‌های نیمه‌بیابانی تا بیابانی هستند (Wenigwieser, 1992).

با استفاده از آثار ژئوشیمیایی در توالی‌های لُس/خاک دیرینه و نسبت عناصر محلول/غیرمحلول، می‌توان آب‌وهوای دیرینه را مورد بحث قرار داد و تشریح کرد. در اثر هوازدهگی واحدهای لُس کانی‌های آواری موجود (فلدسپار، میکاها و به مقدار کمتر آمفیبول و پیروکسن) در بالاترین لایه‌های لُس‌ها به سوی شکل‌گیری خاک سطحی پیش می‌روند. با انحلال و حذف عناصری مانند Mg, Na و K در بالاترین بخش هر لایه لُس، نسبت عناصر انحلال‌پذیر (K و Mg, Na) به ترکیبات انحلال‌ناپذیر مانند Al_2O_3 , Fe_2O_3 و TiO_2 تغییر می‌کند. در شرایط آب‌وهوایی مرطوب مقادیر این نسبت‌ها پایین می‌آید و افزایش گوناگونی نسبت‌های یادشده (مانند تغییرات نسبت Na_2/TiO_2 در توالی‌های لُس/خاک دیرینه) بیانگر کاهش رطوبت در محیط است. برای نمونه، Ti^{4+} از جمله عناصر آب‌دار (نشانه محیط گرم و مرطوب) است که در برابر هوازدهگی محلول‌های معمولی پایدار و با شستشوی عناصری که با آب ترکیب می‌شوند، مقادیر فراوانی کانی‌های دربردارنده این عنصر بالا می‌رود. گوناگونی در مقادیر کربناتی، نشانه روند فزاینده آب‌دار در طی فرایند تشکیل خاک است (Ding et al., 2001) و کاهش Ca در رسوبات ممکن است ناشی از فرایند شستشوی این کانی، در اثر رخداد فرسایش در لُس‌ها باشد (Smykatz-Kloss & Roy, 2010). Sr و Ba به‌ترتیب در پلاژیوکلاز و فلدسپارهای پتاسیم‌دار جایگیری می‌کنند (Puchelt, 1972). این عناصر رفتارهای شیمیایی متفاوتی دارند، Sr در مقایسه با Ba انحلال‌پذیری بالایی دارد (Whitfeild & Turner, 1979) و می‌تواند به راحتی به صورت محلول در آب درآید و از بافت سنگ بیرون بیاید و یا به درون آن وارد شود. رسوبات لُس به‌طور معمول، نسبت Sr/Ba بالایی از خود نشان می‌دهند. زیرا رسوبات لُس وابسته به شرایط آب‌وهوایی سرد و خشک هستند و در اثر نبود و یا کمبود آب در میان لایه‌های رسوبات، Sr نمی‌تواند به‌صورت محلول در آب‌های طبیعی درآید و از محیط بیرون برود، از این‌رو در کانی‌های اولیه در بردارنده خود (از جمله پلاژیوکلاز) باقی می‌ماند. درحالی که در اثر افزایش رطوبت محیط (آب‌های میان‌لایه‌ای) پلاژیوکلازهای (دربردارنده Sr) موجود در رسوبات لُس دچار هوازدهگی می‌شوند. از این‌رو در اثر متلاشی شدن پلاژیوکلازها، Sr به صورت محلول از محیط بیرون می‌رود (علت کاهش فراوانی Sr در خاک‌های هوازده) و نسبت Sr/Ba در رسوبات لُس کاهش می‌یابد. زیرا پلاژیوکلازها بسیار آسان‌تر از فلدسپارهای پتاسیم‌دار (دربردارنده Ba) هوازده می‌شوند و Sr نیز محلول‌تر از Ba است (Liu et al., 1993).

فلدسپارهای پتاسیم‌دار، مهم‌ترین کانی‌های در بردارنده Pb هستند (Beswick, 1973). در حالی که Th و U بیشتر در برخی از کانی‌های سنگین مانند زیرکن که در برابر هوازدهگی بسیار پایدارند، انباشته می‌شوند. از این رو متلاشی

با توجه به آب‌وهوای بسیار مرطوب امروزی منطقه نکا، میزان قابلیت پذیرفتاری مشاهده‌شده در شکل ۱ نیز کاملاً در حالت بیشینه قرار دارد. در شکل ۱ نوسان‌ها و تغییرات کوتاه‌مدت نیز که نشانه‌ای از دوره‌های آب‌وهوایی کوتاه‌مدت گرم‌تر در واحدهای لُس معروف به اینتراستادیاها (Interstadials) و یا دوره‌های آب‌وهوایی کوتاه‌مدت سردتر در لایه‌های خاک دیرینه معروف به استادیاها (Stadials) هستند، به صورت محدوده‌هایی با رنگ خاکستری به نمایش گذاشته شده است. به طور معمول، در طی یک دوره یخبچالی یا یک دوره میان‌یخبچالی، یخبچال‌های طبیعی پیش‌روی‌ها و پس‌روی‌های جزئی را تجربه می‌کنند که هر کدام از این چرخه‌های فرعی را یک مرحله کوچک یخبچال‌زایی و به اصطلاح "استادیا" و زمان‌های میان آنها را "اینتراستادیاها" و یا یک مرحله کوچک میان‌یخبچالی می‌نامند. به عبارت دیگر، استادیاها دوره‌ای از آب‌وهوای سردتر است که در درون یک دوره آب و هوای گرم‌تر رخ می‌دهد. دوره‌های استادیاها بر خلاف دوره‌های یخبچالی، مدت زمان کوتاهی دارند و احتمالاً یک استادیا را می‌توان یک دوره یخبچالی ناقص یعنی بدون شدت سرما یا مدت زمان کافی در نظر گرفت. از سوی دیگر، اینتراستادیاها یک دوره آب‌وهوای گرم‌تر کوتاه‌مدت است که درون یک دوره آب‌وهوای سردتر رخ می‌دهند، ولی نمی‌توان آن را دوره میان‌یخبچالی نامید. زیرا معمولاً اینتراستادیاها دارای مدت زمان کمتر از ۱۰ هزار سال هستند، در حالی که یک دوره میان‌یخبچالی باید مدت زمانی بیشتر از ۱۰ هزار سال داشته باشد (Cronin, 1999).

نمودار ۱ نشان می‌دهد، که حدود ۲۰ تا ۳۷ هزار سال پیش از این (لُس بالایی) برش مورد مطالعه دارای تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی تقریباً یکنواختی داشته است. که برای توجیه آن می‌توان دو احتمال را در نظر گرفت؛ یکی آن که ممکن است بر اثر دوره سرد و خشک، فرایندهای تولید خاک کاهش یافته باشد و دیگری آنکه ممکن است، مقدار مگنتیت آواری ورودی به نهشته‌های لُس کاهش یافته باشد. به هر حال، رخداد یک دوره یخبچالی در حدود تقریباً ۴۰ هزار سال پیش، که بر اثر رخداد انحراف محور زمین روی داده، در حال حاضر تأیید شده است (Spassov, 2002).

طبق تغییرات مقادیر قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی نمایش داده‌شده در نمودار ۱، باید واحدهای لُس در دوره‌های آب‌وهوایی سرد و خشک تشکیل شده باشند و منبع کانی‌های مغناطیسی پاسخ‌گو به آزمایش‌های محیط مغناطیسی نیز باید تنها از منبع بادرف‌ها تأمین شده باشد. در حالی که در لایه‌های خاک دیرینه به دلیل افزایش مقادیر قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی، باید افزون بر کانی‌های مغناطیسی که از منبع بادرفتی تأمین شده‌اند، کانی‌های مغناطیسی اصلی (اکسیدهای آهن خاک) به عنوان محصولات هوازدهگی رسوبات و در اثر پیشرفت فرایندهای تشکیل خاک‌های دیرینه، به‌صورت درجا تشکیل شده باشند. مطالعات و بررسی‌های انجام‌شده روی متغیر قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی تأییدی بر این مدعا است.

نتایج داده‌های پذیرفتاری مغناطیسی به‌دست آمده از برش کُلت در این مطالعه، با نتایج گرده‌شناسی از مغزه‌های رسوبی به طول ۱۰۰ متر گرفته‌شده از دریاچه ارومیه (Djamali et al., 2008)، با نتایج تجزیه ایزوتوپی اکسیژن ۱۸ روی مغزه رسوبی دریای عرب (Tzedakis, 1994) و همچنین با نتایج گرده‌شناسی روی مغزه رسوبات دریایی از یونان (Reichert et al., 1997) مقایسه شد (شکل ۴). در این مقایسه الگوی تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی برش کُلت، همخوانی بسیار نزدیکی با الگوی تغییرات ایزوتوپ اکسیژن ۱۸ دریای عرب و گرده‌شناسی دریاچه ارومیه نشان می‌دهد.

همچنین نتایج الگوی تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی به‌دست آمده از برش رسوبی کُلت با نتایج مطالعات ایزوتوپی اکسیژن ۱۸، ۴۰ هزار ساله از مغزه‌های رسوبی (Connolley, 2011) و از مغزه‌های یخی مربوط به ۱۴۰ هزار سال پیش به‌دست آمده از پروژۀ شمال گرینلند (NGRIP, 2004) مقایسه شد (شکل ۵). همه این الگوها همخوانی بسیار نزدیکی با الگوی تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی برش کُلت نشان می‌دهند.

دیرینه بالایی و پائینی در اثر هوازدگی و پیشرفت فرایندهای تولید و تشکیل خاک‌ها (و تولید عناصر حاصل از تشکیل خاک‌ها مانند Al_2O_3 و Fe_2O_3) روی بالاترین سطح از واحدهای لُس شکل گرفته‌اند. به‌طور کلی پیش‌روی روند هوازدگی در اثر افزایش رطوبت دیرینه، با انحلال عناصر ناپایدار و انحلال‌پذیر در آب‌های دیرینه (آب‌های میان‌لایه‌ای) و بیرون آمدن این عناصر از محیط خاک همراه است. در نتیجه بیرون آمدن عناصر انحلال‌پذیر از محیط‌های خاکی، نسبت فراوانی عناصر پایدار و انحلال‌ناپذیر در خاک‌های دیرینه بالا می‌رود. در حالی که، این نسبت فراوانی در واحدهای لُس تقریباً غیرهوازده، به همان صورت اولیه باقی‌مانده‌اند. چگونگی این مطلب در نمودار ۴ به نمایش گذاشته شده است. در این نمودار روند تغییرات مقادیر نسبت Na_2O/Fe_2O_3 و Na_2O/Al_2O_3 ، Na_2O/TiO_2 (نمونه‌ای از اکسیدهای عناصر اصلی انحلال‌پذیر با اکسیدهای عناصر انحلال‌ناپذیر) در برش رسوبی کُلث نشان داده شده است.

هر کدام از این نسبت‌ها می‌توانند به طور مستقل به عنوان یک متغیر آب‌وهوایی برای بازسازی تغییرات رطوبت دیرینه به کار روند. زیرا به دلیل شسته شدن و بیرون آمدن عنصر انحلال‌پذیر Na_2O از محیط در طی فرایندهای هوازدگی و تولید خاک، مقادیر نسبت این عنصر به عناصر پایدار در خاک‌های دیرینه کاهش می‌یابد. از این رو کاهش این نسبت‌ها با افزایش رطوبت دیرینه در ارتباط هستند (Smykatz-Kloss & Roy, 2010).

۵- مقایسه و تفسیر داده‌های ژئوشیمیایی و مغناطیسی

برای بررسی درستی مطالعات بازسازی آب‌وهوای دیرینه با استفاده از روش‌های مغناطیسی و داده‌های ژئوشیمیایی، نمودارها و نتایج به‌دست آمده از این مطالعات و بررسی‌ها با یکدیگر مقایسه شد. به‌طور کلی، هوازدگی شیمیایی در خاک‌ها نه تنها به ترکیب رسوبات هوازده شده، بلکه به دما و رطوبت نیز وابسته است. البته، به سختی می‌توان تأثیر هر دو این ویژگی‌ها را بر هوازدگی از یکدیگر جدا کرد. زیرا این دو ویژگی مستقل از یکدیگر نیستند. بدین معنا که هوای گرم می‌تواند بخار آب بیشتری را نسبت به هوای سرد نگه دارد و موجب افزایش دما و در نتیجه افزایش نرخ واکنش‌های شیمیایی شود (Veresub et al., 1993). معرفی آب‌وهوای دیرینه در توالی‌های لُس به‌طور معمول بر پایه ۳ اظهار نظر در مورد آب‌وهوا و خاک منطقه مورد مطالعه برقرار است:

- اول، باید دانست خاک‌هایی که روی سطح منطقه مورد مطالعه قرار دارند، فراوانی یا غلظت قابل ملاحظه‌ای از ترکیبات یکنواخت لُس‌ها را به نمایش می‌گذارند (Liu et al., 1985).
 - دوم، این خاک‌ها به خوبی زهکشی شده‌اند؛ زیرا آب موجود در خاک می‌تواند میزان هوازدگی شیمیایی را افزایش دهد و سبب تغییر تولیدات هوازدگی شود (Liu et al., 1985; Maher & Thompson, 1999).
 - سوم، قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی نیز به عنوان یک ویژگی آب‌وهوایی بیانگر درجه هوازدگی است. با افزایش هوازدگی تولید ذرات مغناطیسی (اکسیدهای آهن مانند هماتیت $(\alpha-Fe_2O_3)$) افزایش می‌یابند. این ذرات به دلیل توان بالای مغناطیسی خود سبب افزایش قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی می‌شوند (Veresub et al., 1993).
- در معیارهای ژئوشیمیایی بازسازی آب‌وهوای دیرینه، کربنات‌ها به عنوان کانی‌های مناطق خشک شناخته می‌شوند. در ارتباط دادن این مطلب با بازسازی آب‌وهوای دیرینه توسط روش‌های ژئوشیمیایی می‌توان بیان کرد که تجمع کربنات کلسیم نقش مغناطیس‌زدایی (یعنی کاهش قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی) دارد، زیرا با تجمع یافتن کربنات کلسیم، محیطی با خاصیت قلیایی قوی‌تر شکل می‌گیرد که می‌تواند ساختار کانی‌های مغناطیسی قوی را متلاشی کند و شدت مغناطیس‌شوندگی را در ذرات سازنده خاک کاهش دهد (Song et al., 2008).

شدن فلدسپار پتاسیم‌دار سبب جدایش و پراکندگی Pb می‌شود و احتمالاً فراوانی آن در رسوبات نشانه‌ای از میزان تأثیر هوازدگی بر فلدسپارهای پتاسیم‌دار است (Liu et al., 1993).

با توجه به تغییرات فراوانی عناصر اصلی، فرعی و خاکی کمیاب به‌دست آمده از آزمایش‌های ICP و XRF (جدول ۲) در می‌یابیم که فراوانی Sr یا Pb افزایش یافته با فراوانی کانی‌های دربردارنده آنها متناسب است.

۴- تفسیر آب‌وهوایی نمودارهای ژئوشیمیایی

نمودارهای ژئوشیمیایی به عنوان ویژگی‌های تعبیر و تفسیر شرایط آب‌وهوایی به‌کار برده می‌شوند. این نمودارها می‌توانند هوازدگی‌های گوناگونی را با شدت و ضعف به نمایش بگذارند. در مطالعه لُس‌ها، چندین نسبت شیمیایی وجود دارد که برای بازسازی تغییرات آب‌وهوایی دیرینه استفاده می‌شود. برای نمونه، تغییرات در نسبت‌های U/Th ، Sr/Ba ، Sr/Rb به عنوان دلیلی از هوازدگی شیمیایی با شدت بالا در خاک‌های دیرینه معرفی شده‌اند. این داده‌ها را می‌توان با برخی خواص فیزیکی مختلف همچون مقادیر کوارتز موجود در رسوبات مختلف تلفیق کرد. چگونگی ارتباط ژئوشیمیایی لُس‌ها با آب‌وهوای دیرینه، توسط نسبت‌های U/Th ، Sr/Ba ، Sr/Rb در نمودار ۲ نشان داده شده است. با توجه به مطالعات (Beswick, 1973)، به دلیل تشکیل رسوبات لُس در شرایط آب و هوایی سرد و خشک و در اثر نبود و یا کمبود آب در میان لایه‌های رسوبی و در نتیجه هوازدگی کم پلاژیوکلاز دربردارنده عنصر Sr، واحدهای لُس در برش مورد مطالعه باید نسبت Sr/Ba بالایی را نشان دهند (Liu et al., 1993)، زیرا Sr یک عنصر انحلال‌پذیر بوده و در واکنش به تغییرات آب‌وهوایی بسیار حساس است، به گونه‌ای که کمبود این عنصر در رسوبات می‌تواند نشانه‌ای از هوازدگی شدید باشد (Ding et al., 2001). با توجه به نمودار ۲، مقدار نسبت Sr/Ba در واحدهای لُس بالاست و در خاک‌های دیرینه به دلیل افزایش هوازدگی و حذف عنصر Sr این نسبت کاهش یافته است.

از سوی دیگر، نسبت Sr/Rb با نسبت U/Th رابطه عکس دارد، زیرا Th و U بیشتر در برخی از کانی‌های سنگین مانند زیرکن که در برابر هوازدگی بسیار پایدار است، انباشته می‌شوند (Liu et al., 1993).

از دیگر نسبت‌های ژئوشیمیایی که در مطالعه لُس‌ها برای بازسازی تغییرات آب‌وهوایی دیرینه استفاد می‌شود، نسبت SiO_2 به $MgO+CaO$ است. افزایش این نسبت نشانه رخداد هوازدگی شیمیایی شدید ناشی از آب‌وهوای گرم و مرطوب است. همچنین، افزایش مقادیر Al_2O_3 و Fe_2O_3 که دو اکسید بسیار مهم برای بازسازی آب‌وهوای دیرینه هستند، بیانگر افزایش دما و رطوبت دیرینه است. از سوی دیگر، کاهش مقادیر MgO و CaO موجود در رسوبات، بیانگر انحلال کربنات‌ها هستند، زیرا تغییرات در مقادیر کربنات‌های موجود در رسوبات با مقادیر Al_2O_3 و Fe_2O_3 نسبت وارون دارند (Muhs & Bettis, 2000).

با توجه به نمودار ۳ تغییرات مقادیر Al_2O_3 و Fe_2O_3 ناشی از تغییرات رطوبت دیرینه (احتمالاً مرتبط با تغییرات دما و بارندگی) در برش رسوبی مورد مطالعه، با توالی‌های لُس/خاک دیرینه همخوانی قابل توجهی نشان می‌دهند.

نمودار ۳ نشان می‌دهد که عناصر Al_2O_3 و Fe_2O_3 در لایه‌های خاک دیرینه بالایی و پائینی افزایش یافته‌اند، به گونه‌ای که در این نمودار دو تغییر شرایط آب‌وهوایی شدید در گذر لایه‌های لُس/خاک دیرینه مشاهده می‌شوند. دلیل این تغییرات ناگهانی در گذر توالی‌های لُس/خاک دیرینه می‌تواند تفاوت قابل توجه موجود در میان مقادیر عناصر انحلال‌ناپذیر نسبت به عناصر انحلال‌ناپذیر باشد که ناشی از تغییرات شدید رطوبت دیرینه بوده است.

با افزایش رطوبت دیرینه در دوره‌های گرم و مرطوب میان‌یخچالی لایه‌های خاک

(نمودار ۶- الف). از سوی دیگر، تغییرات فراوانی Fe_2O_3 و قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی (χ) نیز، به طور مشابه با یکدیگر و همزمان پیشرفته اند (نمودار ۶- ب). با توجه به این شکل تنها ۳ نمونه که وابسته به خاک‌های دیرینه (دوایر سیاه توپر) هستند، بیشترین مقادیر قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی را دارند. از این رو می‌توان اثبات کرد که قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی، یک متغیر حساس به تغییرات آب‌وهوایی و رطوبت دیرینه است، که حتی می‌تواند بیانگر درجه پیشرفت هوازنگی و فرایندهای تولید و تشکیل خاک‌های دیرینه باشد.

۶- نتیجه‌گیری

- با مقایسه نمودار مغناطیسی- ژئوشیمیایی این گونه دریافت می‌شود که پاسخ‌های به‌دست آمده از بررسی تغییرات نسبت‌های آب‌وهوایی ژئوشیمیایی با تغییرات متغیرهای آب و هوایی مغناطیسی مانند قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی تشابه دارند.

- تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی برای واحد خاک دیرینه پایین که در طی یک دوره آب‌وهوای گرم‌تر یا اینتراستادیاال نهشته شده است، نشانگر وجود یک دوره آب و هوای سردتر یا استادیاال است (نمودار ۱).

- تغییرات نمودار قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی در واحد لُس پایینی نیز که در طی یک دوره آب‌وهوای سردتر نهشته شده است، نشان‌دهنده یک جهش کوتاه‌مدت آب‌وهوای گرم‌تر یا اینتراستادیاال در طی نهشته شدن این لُس‌ها است.

- تغییرات قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی در واحد لُس بالایی که ستبرای حدود ۶ متر دارد و در طی یک دوره سرد و خشک نهشته شده است، نشان‌دهنده دست کم ۶ جهش آب‌وهوای گرم‌تر یا اینتراستادیاال است (نمودار ۱).

- نمودار تغییرات قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی برای واحد خاک سطحی که از حدود ۲۰ هزار سال گذشته و در طی دوره آب‌وهوای گرم‌تر شروع به تشکیل شدن کرده است، نشان از وجود دست کم ۴ کاهش کوتاه‌مدت آب‌وهوای سردتر یا استادیاال دارد.

- با توجه به این بررسی‌ها، شرایط مناسب تشکیل خاک (همزمان با تولید درجا برخی از اکسیدها از جمله Al_2O_3 و Fe_2O_3) سبب افزایش قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌های دیرینه شده است. تولید درجای کانی‌های مغناطیسی قوی که در افزایش قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌های دیرینه مؤثر هستند، احتمالاً در اثر افزایش رطوبت، هوازنگی و پیشرفت فرایندهای تولید و تشکیل خاک‌ها رخ داده است.

- با توجه به مقایسه نمودار مغناطیسی- ژئوشیمیایی دریافت می‌شود که متغیر قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی به‌دلیل وابستگی به کانی‌های حساس به تغییرات آب‌وهوایی، یک متغیر بسیار کارآمد برای بازسازی تغییرات آب‌وهوایی است.

- با توجه به حساسیت بالای کانی‌های مغناطیسی به گرما و رطوبت، پیشنهاد می‌شود که در مطالعات مشابه بعدی، لایه‌های رسوبی بیشتری تعیین سن شوند تا دقت کار بیش از پیش بالا رود و همبندی داده‌ها با نتایج بین‌المللی به‌مراتب آسان‌تر انجام شود.

سپاسگزاری

نویسندگان مراتب سپاس خود را از ریاست محترم سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ریاست محترم پژوهشکده علوم زمین، مدیریت محترم زمین‌شناسی دریایی و همکاران محترم، مدیریت محترم امور آزمایشگاهی سازمان زمین‌شناسی و همکاران محترم و از سرکار خانم‌ها دهقان و رحیم‌زاده و آقای معینی به دلیل حمایت‌هایشان و در اختیار گذاشتن امکانات و تسهیلات آزمایشگاهی ابراز می‌دارند.

مطالعات درباره رابطه میان کربنات و قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی خاک نشان می‌دهد که افزایش مقدار کربنات می‌تواند مقدار بیشینه قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی خاک دیرینه را کاهش دهد (Han et al., 1996)، بنابراین می‌توان گفت که با افزایش شدت هوازنگی و بالا رفتن نسبت مقادیر اکسیدهای پایدار دارای Fe_2O_3 و کاهش نسبت مقادیر اکسیدهای ناپایدار دارای CaO در اثر پیشرفت فرایندهای تشکیل خاک، قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌های دیرینه افزایش یافته است.

همچنین، افزایش کانی‌های انحلال‌ناپذیر و به‌نسبت پایدار دارای Al_2O_3 ، در برابر کاهش کانی‌های انحلال‌پذیر و ناپایدار حاوی CaO می‌باشد به معنای افزایش هوازنگی شیمیایی رسوبات در شرایط گرم و مرطوب دوره‌های میان‌یخچالی است. این ویژگی در نمودار ۵ نمایش داده شده است.

در نمودار ۵، در خاک‌های دیرینه با کاهش نسبت CaO/Al_2O_3 و Na_2O/Al_2O_3 (این نسبت بیانگر تغییرات رطوبت دیرینه است) مقادیر قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی افزایش می‌یابد (در اثر افزایش توان مغناطیسی خاک ناشی از افزایش فراوانی کانی‌های مغناطیسی قوی دارای Fe_2O_3) که نشانه افزایش دما هوا و شدت هوازنگی است. برای دانستن ارتباط میان اکسیدهای آهن حاصل از فرایندهای تشکیل خاک

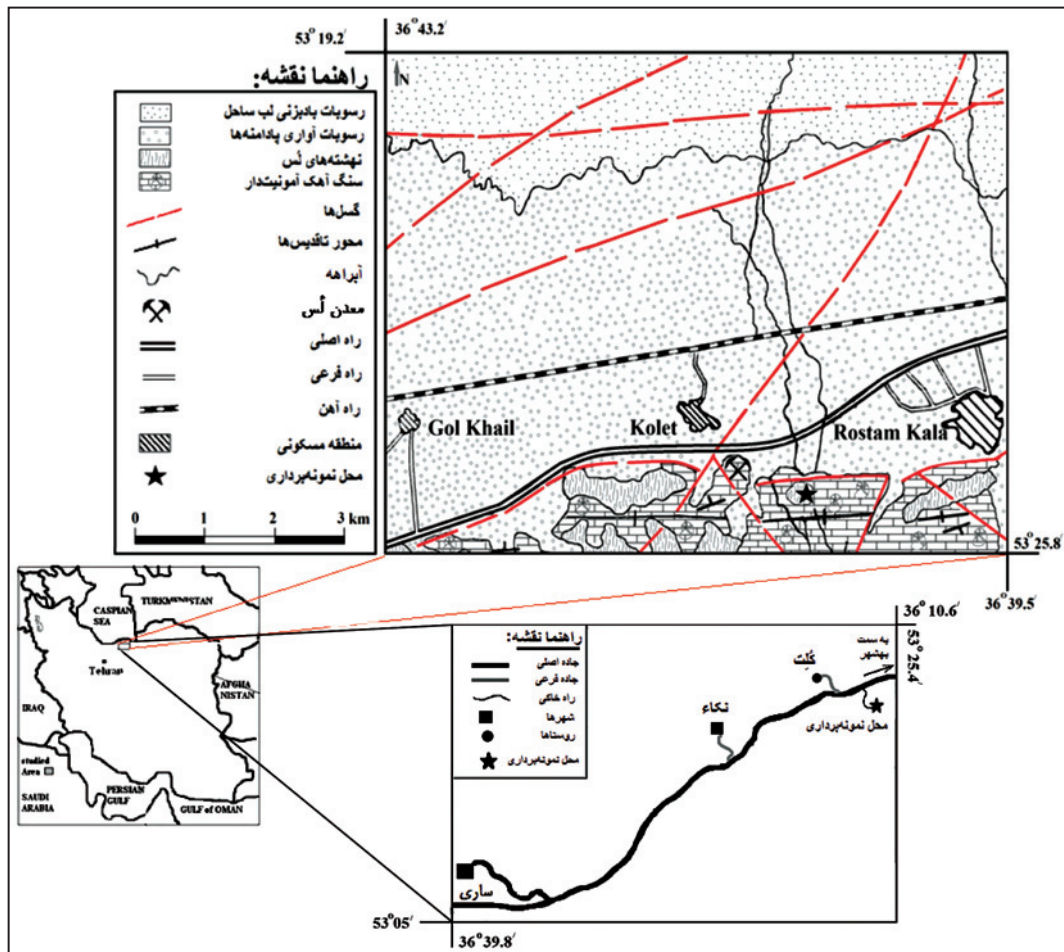
و ذرات مغناطیسی مؤثر در افزایش قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی لازم است، ارتباط اکسیدهای آهن و ذرات مغناطیسی به طور جدا بررسی شود. همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی بالا در توالی لس/خاک دیرینه به‌طور ساده بازتابی از فراوانی بالای ذرات مغناطیسی قوی مانند مگنتیت (Fe_2O_3)، مگهمیت ($\gamma-Fe_2O_3$) و هماتیت ($\alpha-Fe_2O_3$) است (Liu et al., 1999; Maher & Thompson 1999; Fine et al., 1995). قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی بالایی دارند، بیانگر شرایط آب‌وهوایی مرطوب هستند (Tite & Linington, 1975). کانی هماتیت، یک کانی اکسید آهن است که در دمای بالا، در شرایط یک دوره بارندگی کوتاه‌مدت، در اثر هوازنگی سریع آهن (از آزادسازی آهن موجود در کانی‌های آهن‌دار گوناگون) و نیز در شرایط کمی اسیدیته تشکیل می‌شود (Schwertmann, 1971).

برخی از پژوهشگران بر این باورند، که یک فصل پر باران کوتاه‌مدت (بیش از ۳۵۰ میلی‌لیتر در سال)، در شرایط آب‌وهوایی ویژه‌ای با دمای بالا می‌تواند به تشکیل مقادیر قابل ملاحظه‌ای از هماتیت بیانجامد (Maher, 1998) و سبب ایجاد رنگ سرخ زنگ‌زده در خاک‌های دیرینه شود.

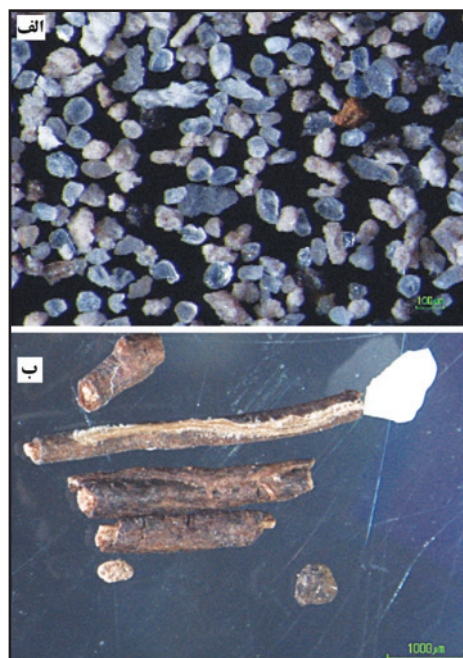
با توجه به نمودار ۳ یادآور می‌شویم که با افزایش شدت هوازنگی مقدار غلظت و فراوانی کانی‌های پایدار مانند Al_2O_3 ، SiO_2 و Fe_2O_3 نیز افزایش یافته است. مطابق با مطالب بیان‌شده در مطالعات مغناطیسی، برخی از این کانی‌ها مانند Fe_2O_3 احتمالاً به طور درجا تولید شده‌اند و حاصل هوازنگی ناشی از آب‌وهوای گرم و مرطوب هستند. همچنین، با توجه به نمودار ۵ یادآور می‌شویم که پاسخ‌های به‌دست آمده از بررسی تغییرات نسبت‌های آب‌وهوایی ژئوشیمیایی با تغییرات متغیرهای آب‌وهوایی مغناطیسی مانند قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی (MS) مشابه هستند.

نکته جالب این است که با استفاده از معادله $X=Z$ و $Y=Z$ پس $X=Z$ می‌توان ثابت کرد که اگر و فقط اگر فقط تغییرات فراوانی در $MS=Fe_2O_3$ و $Fe_2O_3=Al_2O_3$ باشد پس تغییرات فراوانی $MS=Al_2O_3$ است. از این رو این امکان هست که تغییرات فراوانی Al_2O_3 (که یک کانی اصلی در بررسی تغییرات آب‌وهوایی دیرینه است) با تغییرات قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی همزمان رخ دهد. زیرا هر دو این متغیرها به تغییرات رطوبت وابسته هستند.

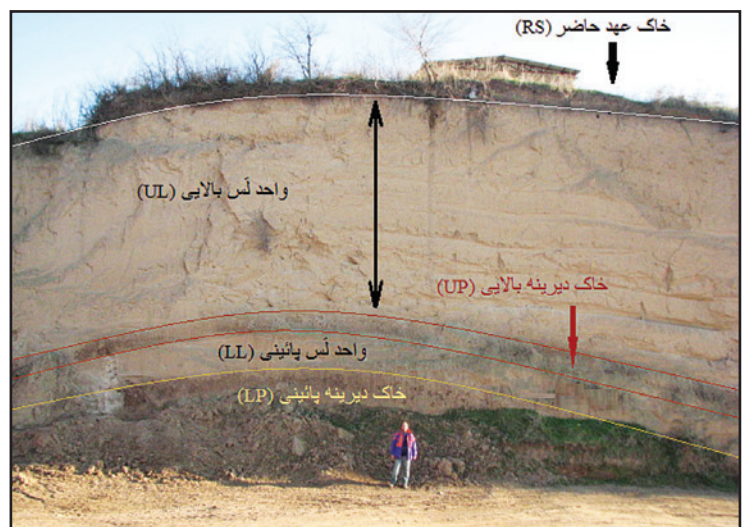
با توجه به نمودار ۶ می‌توان دریافت که تغییرات فراوانی کانی‌های وابسته به آب‌وهوای گرم و مرطوب مانند Al_2O_3 و Fe_2O_3 با یکدیگر مشابه هستند



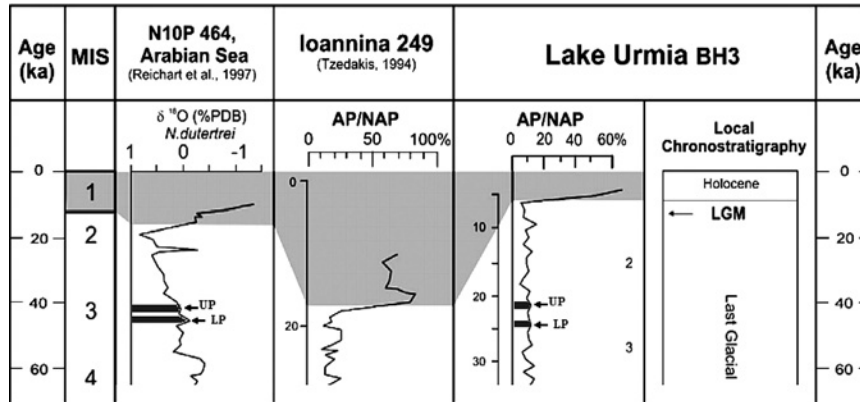
شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی، موقعیت جغرافیایی و راه‌های ارتباطی به منطقه مورد مطالعه در پیرامون روستای کَلت در نزدیکی بهشهر.



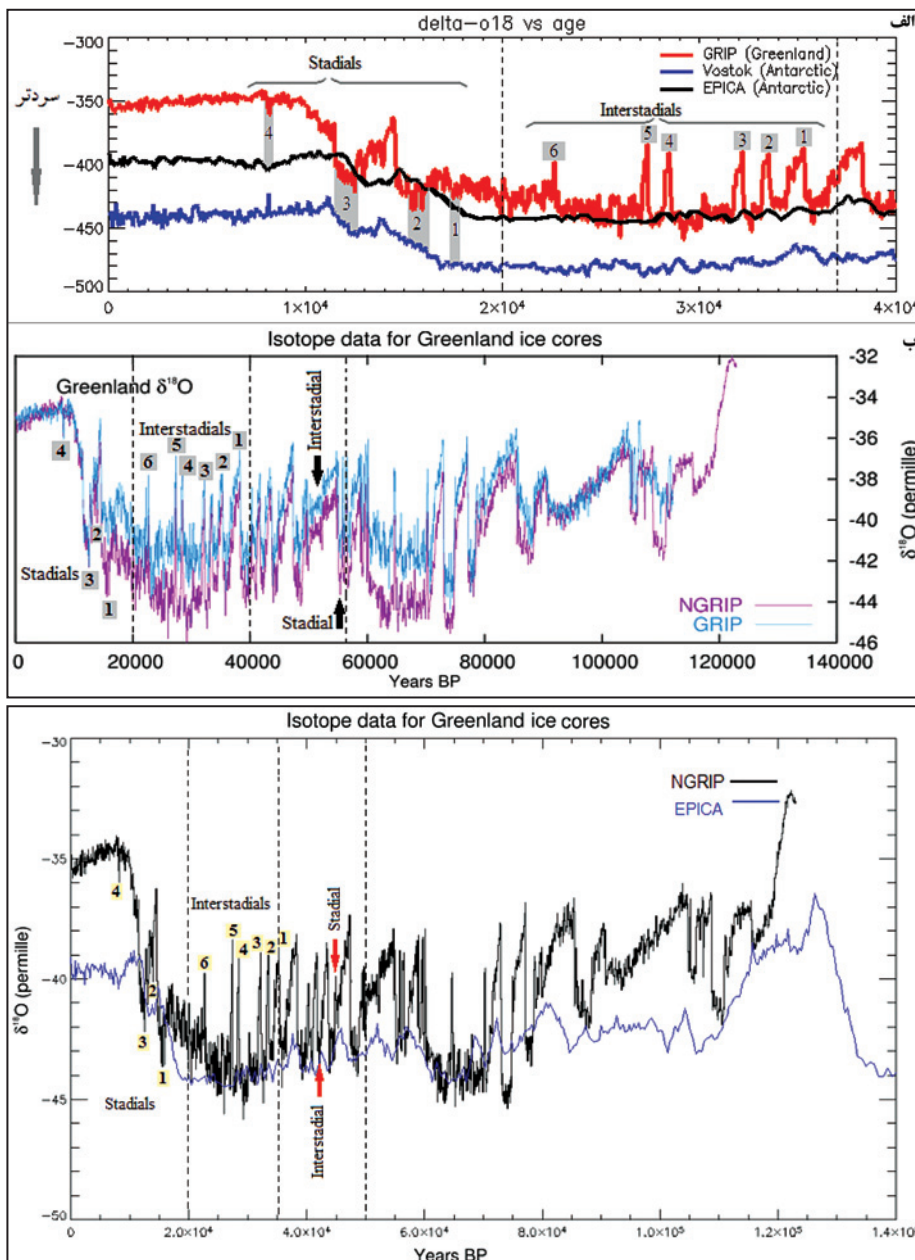
شکل ۳- الف) دانه‌های کوآرتز مات‌شده در واحدهای نُس و ب) آثار رشد گیاهی به صورت خرده‌سنگ‌های لوله‌ای شکل در میان لایه‌های خاک دیرینه در توالی نُس/خاک دیرینه کَلت-نکاء



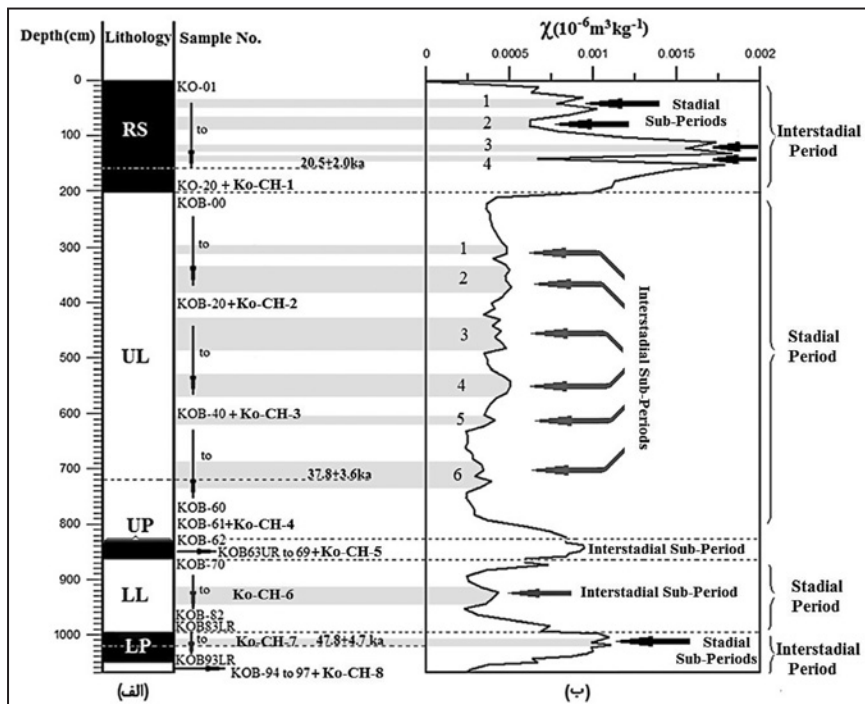
شکل ۲- در برش رسوبی کَلت، شیب‌دار بودن لایه‌ها و پیروی کردن چگونگی نهشته آنها از توپوگرافی دیرینه نشان می‌دهد که احتمالاً ذرات رسوبی توسط بادهای دیرینه حمل شده‌اند.



شکل ۴- مقایسه نتایج داده‌های قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی به‌دست آمده برش کُلت با نتایج گرده‌شناسی از مغزه رسوبی دریاچه ارومیه (Djamali et al., 2008) و نتایج آزمایش ایزوتوپ اکسیژن ۱۸ مغزه رسوبی دریای عرب (Tzedakis, 1994) و نتایج گرده‌شناسی مغزه رسوبات دریایی از یونان (Reichart et al., 1997). در این نمودار محل واحد خاک دیرینه بالایی و پایینی برش رسوبی کُلت به‌ترتیب با نماد UP و LP نشان داده شده است.

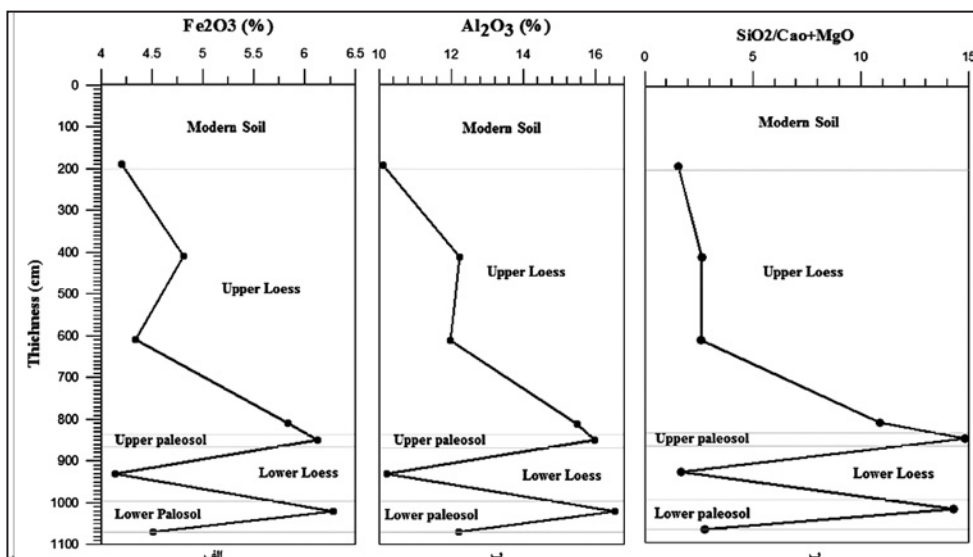
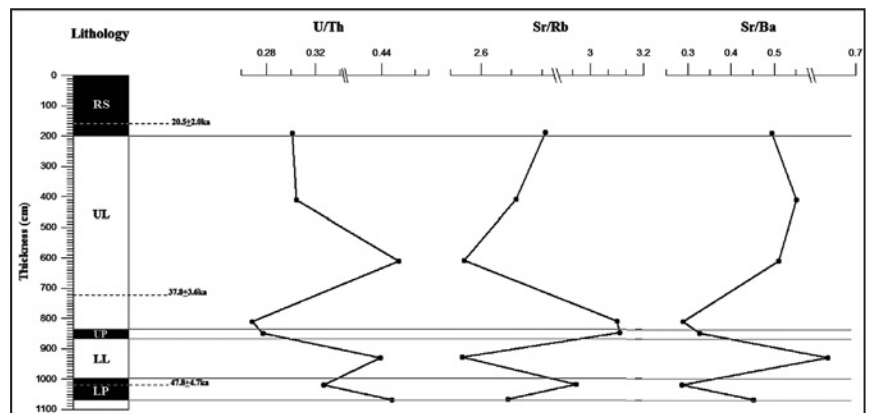


شکل ۵- نمایش و تطبیق موقعیت دوره‌های استادیال و اینتراستادیال به‌دست آمده از تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی در برش کُلت با نتایج مطالعات ایزوتوپ اکسیژن ۱۸ به‌دست آمده از مغزه‌های رسوبی و نیز مغزه‌های یخی مربوط به رسوبات منطقه گرینلند: الف) نمودار سرخ از مغزه‌های رسوبی رسم شده است (Connolley, 2011)؛ ب) نمودار آبی از مغزه‌های یخی رسم شده است (NGRIP, 2004) و ج) نمودار سیاه از نتایج ۱۴۰ هزار ساله مطالعات ایزوتوپ اکسیژن ۱۸ به‌دست آمده از مغزه‌های یخی شمال گرینلند رسم شده و روی آن موقعیت دوره‌های استادیال و اینتراستادیال به‌دست آمده از تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی در برش کُلت مشخص شده است (NGRIP, 2004).

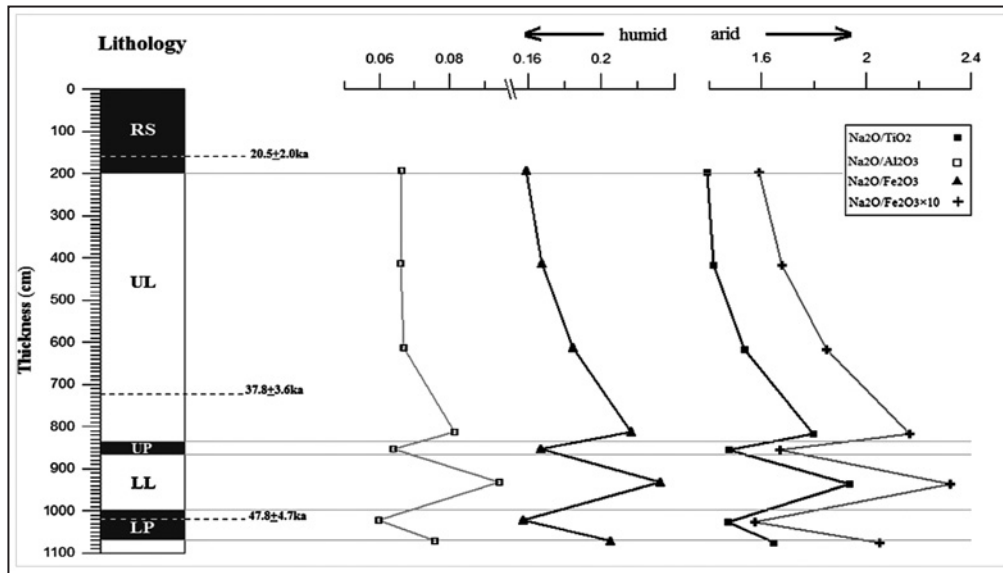


نمودار ۱- نمایش استادیال‌ها در خلال دوره‌های میان‌یخبجالی و اینتراستادیال‌ها در خلال دوره‌های یخبجالی بر پایه تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی در برش رسوبی مورد مطالعه

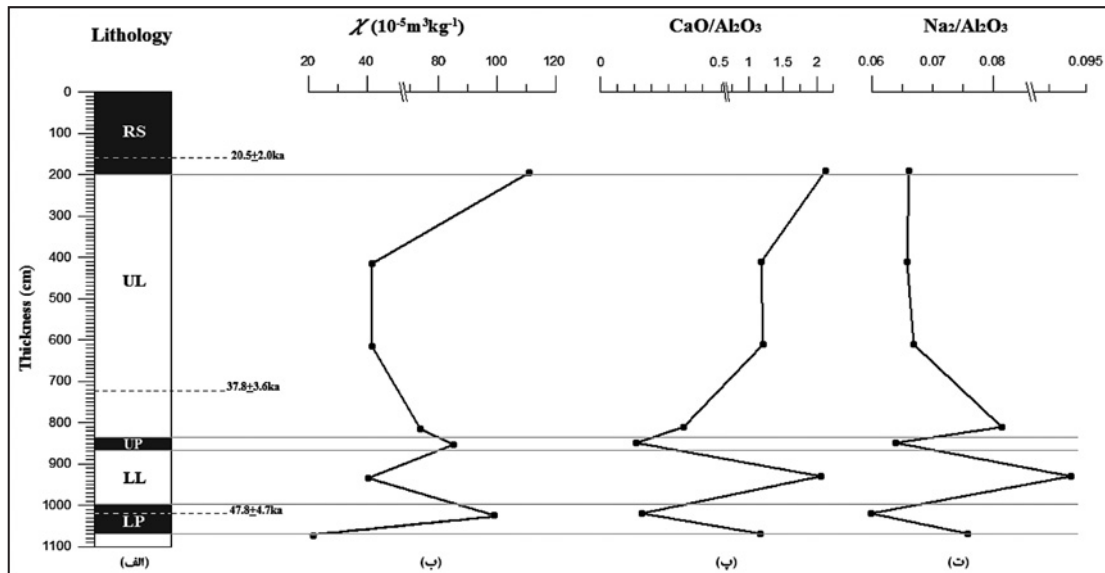
نمودار ۲- نمایش چگونگی تغییرات آب‌وهوایی دیرینه با استفاده از تغییرات نسبت‌های آب‌وهوایی Sr/Ba, Sr/Rb و U/Th در برابر برش رسوبی مورد مطالعه.



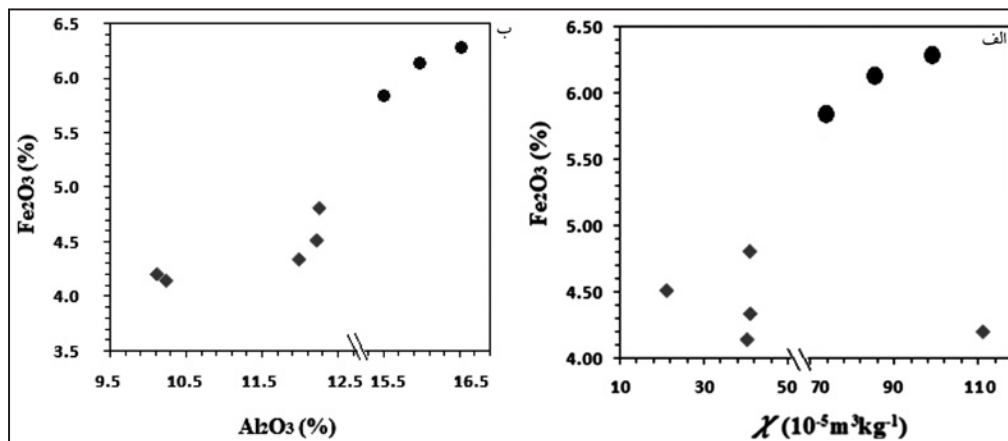
نمودار ۳- تغییرات درصد Fe₂O₃ و Al₂O₃ به‌همراه تغییرات نسبت SiO₂ / (CaO+ MgO) (متأثر از وجود کلسیت و دولومیت) در برابر توالی‌های لُس/خاک دیرینه ستون چین‌های کُلت.



نمودار ۴- بررسی رابطه نسبت عناصر انحلال‌پذیر و انحلال‌ناپذیر مختلف با تغییرات آب‌وهوایی در برش رسوبی کلت-نکا.



نمودار ۵- بررسی تغییرات نسبت اکسیدهای انحلال‌پذیر/اکسیدهای به نسبت انحلال‌ناپذیر در مقایسه با تغییرات قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی در برش رسوبی مورد مطالعه (کلت-نکا).



نمودار ۶- الف) بررسی رابطه درصد پراکندگی Fe_2O_3 در برابر Al_2O_3 و ب) بررسی رابطه درصد پراکندگی Fe_2O_3 با تغییرات قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی؛ دواپر سیاه توپر نمونه خاک‌های دیرینه و لوزی‌ها نمونه رسوبات کُس برگرفته از برش رسوبی مورد مطالعه (کلت-نکا) هستند.

جدول ۱- اکسیدهای آهن خاک و قابلیت پذیرفتاری آنها (After Schwertmann & Taylor, 1977).

قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی ($10^{-8} m^3 kg^{-1}$)	وضعیت مغناطیسی	فرمول‌ها	کانی‌ها
۴۰	آنتی فری مغناطیس	$\alpha-Fe_2O_3$	هماتیت
۷۰	آنتی فری مغناطیس	$\alpha-FeOOH$	گوتیت
۲۶۰۰۰	فری مغناطیس	$\gamma-Fe_2O_3$	مگنهمیت
۷۰	پارامغناطیس	$\gamma-FeOOH$	لپیدوکروسیت
۴۰	پارامغناطیس	$5Fe_2O_3 \cdot 9H_2O$	فری هیدریت
۵۶۵۰۰	فری مغناطیس	Fe_3O_4	مگنتیت

جدول ۲- درصد اکسیدهای عناصر اصلی و مقادیر عناصر فرعی و خاکی کمیاب برحسب ppm

Sampl. No.	Ko-CH-1	Ko-CH-2	Ko-CH-3	Ko-CH-4	Ko-CH-5	Ko-CH-6	Ko-CH-7	Ko-CH-8
Thick. (cm)	۱۹۰	۴۱۰	۶۱۰	۸۱۰	۸۵۰	۹۳۰	۱۰۲۰	۱۰۷۰
Na ₂ O	۰/۶۷	۰/۸۱	۰/۸۰	۱/۲۶	۱/۰۲	۰/۹۶	۰/۹۹	۰/۹۳
MgO	۲/۰۷	۲/۷۵	۲/۷۷	۲/۸۹	۳/۰۰	۲/۲۹	۲/۹۵	۲/۳۰
Al ₂ O ₃	۱۰/۱۰	۱۲/۲۵	۱۱/۹۸	۱۵/۵۰	۱۵/۹۸	۱۰/۲۳	۱۶/۵۳	۱۲/۲۱
SiO ₂	۳۷/۰۲	۴۵/۵۲	۴۵/۱۶	۶۰/۵۱	۶۱/۸۳	۳۹/۰۹	۶۲/۰۱	۴۶/۱۱
P ₂ O ₅	۰/۱۱	۰/۱۶	۰/۱۵	۰/۱۴	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۱۱	۰/۱۰
SO ₃	۰/۴۶	۰/۳۴	۰/۳۲	۰/۴۲	۰/۲۱	۰/۳۰	۰/۳۹	۰/۳۰
K ₂ O	۱/۷۴	۲/۳۰	۲/۰۷	۲/۷۱	۲/۶۶	۱/۷۹	۲/۷۲	۲/۰۱
CaO	۲۱/۵۵	۱۴/۵۱	۱۴/۶۲	۲/۶۸	۱/۱۷	۲۱/۰۰	۱/۴۰	۱۴/۲۵
TiO ₂	۰/۴۸	۰/۵۷	۰/۵۲	۰/۷۰	۰/۶۹	۰/۵۰	۰/۶۷	۰/۵۶
MnO	-	<۰/۱	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۱۲	<۰/۱	<۰/۱	۰/۱۰
Fe ₂ O ₃	۴/۲۰	۴/۸۱	۴/۳۴	۵/۸۴	۶/۱۳	۴/۱۴	۶/۲۸	۴/۵۱
BaO	-	-	-	-	-	-	-	۰/۲۱
L.O.I.	۲۱/۵۶	۱۵/۸۴	۱۷/۱۲	۷/۲۲	۷/۰۲	۱۹/۴۴	۵/۸۴	۱۶/۳۴
Ag	۰/۱	۰/۳	۰/۱	۰/۱	۱۰/۲	۱/۷	۰/۸	۰/۷
As	۱۱/۲	۳۰/۵	۱۵/۷	۱۳/۱	۹/۸	۵/۳	۱۳/۵	۲۵/۹
B	۳۰/۶	۴۰/۸	۴۳/۱	۳۱/۴	۳۶/۵	۳۷/۲	۳۵/۵	۳۰/۳
Ba	۵۴۷/۷	۶۰۹/۶	۶۸۲/۹	۸۰۵/۳	۷۵۵/۹	۵۰۹/۷	۸۱۴/۱	۶۱۹/۲
Be	۲/۶	۲/۸	۳/۱	۴/۲	۴/۱	۲/۳	۴/۳	۲/۸
Bi	۲/۷	۱/۱	۲/۷	۰/۴	۲/۶	۲/۵	۲/۲	۱/۲
Cd	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱
Ce	۴۹/۴	۶۰/۵	۷۸/۱	۸۱/۶	۸۸/۳	۴۷/۸	۸۰	۶۷/۲
Co	۲۰	۲۰/۳	۲۳/۵	۲۶/۹	۲۹/۸	۱۸/۸	۲۸/۷	۱۹/۵
Cr	۷۲	۸۰/۴	۱۳۶/۹	۱۳۵/۹	۱۳۵/۲	۷۲/۷	۱۳۷/۷	۱۰۰/۳
Cu	۳۶/۲	۴۲/۷	۴۶/۸	۴۹/۱	۶۳/۵	۲۹/۹	۵۳/۵	۲۹/۹
Dy	۱	۲/۶	۲/۷	۶/۶	۶/۸	۱	۵/۹	۲/۳
Er	۲/۶	۲/۱	۲/۶	۳/۷	۲/۹	۱/۸	۳/۳	۲/۶
Eu	۲/۲	۲/۳	۲/۶	۲/۱	۲/۱	۲/۵	۲/۸	۱/۶
Ga	۱۸/۵	۱۴/۱	۲۰/۴	۳۰/۴	۳۲/۹	۲۰/۹	۳۱/۲	۲۰/۹
Gd	۴/۸	۵/۲	۵/۹	۷/۵	۸/۲	۳/۹	۷/۶	۴/۷
Ge	۱/۳	۱/۷	۱/۸	۲/۹	۳/۶	۱/۶	۴	۲/۱
Hf	۱۴/۳	۱۴/۷	۱۶/۳	۷	۶/۶	۶/۵	۱۰/۴	۹/۱
Hg	۰/۰۵	<۰/۰۵	<۰/۰۵	۰/۰۶	<۰/۰۵	<۰/۰۵	<۰/۰۵	۰/۰۸
La	۴۱/۳	۴۵/۵	۵۱/۱	۵۲	۴۸/۹	۴۲/۵	۴۷/۸	۴۳

Sampl. No.	Ko-CH-1	Ko-CH-2	Ko-CH-3	Ko-CH-4	Ko-CH-5	Ko-CH-6	Ko-CH-7	Ko-CH-8
Li	۴۱/۶	۴۶/۴	۵۵/۵	۶۴/۲	۶۳/۷	۳۷/۸	۶۵	۵۵/۷
Lu	۰/۵	۰/۵	۰/۶	۰/۸	۰/۸	۰/۴	۰/۸	۰/۴
Mn	۷۲۴	۷۸۸/۷	۹۰۶/۳	۱۱۹۹/۷	۱۱۴۶/۵	۶۵۵/۲	۷۹۵/۵	۷۳۹/۷
Mo	۱	۱	۱/۳	۳/۲	۲/۵	۳/۶	۲	۲/۱
Nb	۱۲/۱	۱۲/۵	۱۳/۱	۱۸/۵	۱۶/۴	۹/۶	۱۶/۳	۱۴/۹
Nd	۳۶/۱	۳۶/۹	۴۲/۲	۳۸/۹	۴۰/۱	۳۳/۲	۳۶/۶	۳۵/۶
Ni	۴۷/۳	۵۷/۲	۵۱/۱	۶۷	۸۰/۱	۴۲	۹۰/۱	۴۸/۲
P	۶۱۸/۱	۸۰۸/۷	۷۹۴/۸	۷۲۴/۷	۷۰۱/۴	۷۰۴/۹	۶۹۰	۵۸۱/۴
Pb	۶۰/۴	۶۴/۲	۶۱	۷۳/۵	۸۱۵۸	۱۰۳۰/۲	۵۰۸/۴	۴۱۱/۲
Rb	۹۸/۹	۱۲۵/۴	۱۳۵/۶	۷۵/۱	۷۹/۴	۱۳۵	۷۸/۹	۱۰۵/۱
S	۴۲۲/۴	۳۵۵/۴	۴۱۶/۳	۳۰۸	۱۵۵۱/۸	۸۲۶	۴۰۵/۱	۴۸۰/۹
Sb	۰/۳	۰/۳	۰/۴	۰/۱	۰/۹	۰/۶	۰/۴	۰/۶
Sc	۱۳/۱	۱۴/۴	۱۶/۶	۲۰/۸	۲۱/۶	۱۱/۴	۱۸/۷	۱۳/۶
Sm	۴/۹	۵/۵	۶/۹	۷/۱	۷/۴	۴/۶	۶/۶	۵/۱
Sn	۲/۶	۳/۴	۱/۸	۳/۸	۳/۱	۳/۴	۱/۸	۴/۱
Sr	۲۷۰/۹	۳۳۵/۶	۳۴۷/۶	۲۳۲/۸	۲۴۶/۹	۳۴۵/۴	۲۳۲/۶	۲۷۹/۴
Ta	۲/۶	۲/۴	۳/۸	۴	۳/۹	۲/۸	۳/۹	۳/۶
Th	۱۱	۱۲/۸	۹/۶	۱۶/۸	۱۷/۳	۸/۸	۱۷/۱	۱۱
Ti	۳۹۹۹/۲	۴۳۹۶	۴۸۴۴/۶	۶۱۱۵/۷	۵۳۱۰/۵	۳۲۷۷/۷	۵۴۳۴/۸	۴۰۹۵/۶
Tl	۰/۹	۱/۱	۱/۳	۰/۹	۰/۸	۱/۲	۱	۱
U	۳/۳	۳/۹	۴/۳	۴/۵	۴/۸	۳/۹	۵/۶	۴/۹
V	۱۲۰/۹	۱۲۸/۵	۱۴۶/۳	۱۷۳/۲	۱۷۷	۱۰۲/۹	۱۶۷/۹	۱۱۹
Y	۱۷/۶	۱۸/۹	۲۱/۷	۲۳/۷	۲۴/۵	۱۴	۲۳/۴	۱۵/۹
Yb	۲/۴	۲/۳	۲/۷	۲/۶	۲/۷	۱/۹	۲/۶	۲
Zn	۹۵/۱	۹۶/۳	۱۱۰/۵	۱۲۷/۲	۲۶۷/۱	۱۰۲/۵	۱۴۰/۴	۱۸۵/۷
Zr	۱۱۷/۷	۱۱۹/۴	۱۳۹/۹	۱۰۷	۱۲۴/۵	۶۰/۲	۱۱۹	۸۰/۴

کتابنگاری

- آفانیاتی، ع.، ۱۳۷۹- پهنه‌های رسوبی- ساختاری عمده ایران (کارت پستال)، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- آفانیاتی، ع.، ۱۳۸۵- زمین شناسی ایران. سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۶۱۹ صفحه.
- کبیرنیا، ا. ر.، اسدی، ا.، خان نظر، ن. ه.، و کیلی، ف.، بهرمنند، م.، معصومی، ر. و قمی‌شی، ا.، ۱۳۸۲- ورقه ۱:۱۰۰،۰۰۰ ساری، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- نبوی، م. ح.، ۱۳۵۵- دیباچه‌ای بر زمین شناسی ایران، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۰۹ صفحه.

References

- An, Z. S., Kukla, G., Porter, S. C. & Xiao, J. L., 1991- Magnetic susceptibility evidence of monsoon variation on the Loess Plateau of Central China during the last 130,000 years. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, III227-30, Massachusetts.
- An, Z. S., Wang, J. & Li, H., 1977- Paleomagnetic research of the Lochuan loess section. Geochimica, 4, 239-249.
- Beswick, A. E., 1973- An experimental study of alkali metal distributions in feldspars and micas. Geochimica et Cosmochimica Acta, 37, 183-208.
- Connolley, W., 2011- Was an imminent Ice Age predicted in the <70s>?. The Christian Science Monitor, (194) 4270, 1121-32.
- Cronin, T. M., 1999- Principles of Climatology. Columbia University Press, 1-204, New York.
- Dekkers, M. J., 1997- Environmental magnetism: an introduction. Geology 76, 275-320, Mijnbouw.
- Ding, Z. L., Sun, J. M., Yang, S. L. & Liu, T. S., 2001- Geochemistry of the Pliocene red clay formation in the Chinese Loess Plateau and implications for its origin, source provenance and paleoclimate change. Geochimica et Cosmochimica Acta, (65) 6, 901-913.
- Djamali, M., Beaulieu, J. L., Shah-hosseini, M., Andrieu-Ponel, V., Ponel, P., Amini, A., Akhiani, H., A. G. Leroy, S., Stevens, L., Lahijani, H. & Brewer, S., 2008- A late Pleistocene long pollen record from Lake Urmia, NW Iran. Quaternary Research, 69, 413-420.
- Evans, M. E. & Heller, F., 2003- Environmental Magnetism Principles and Applications of Enviromagnetics. Academic Press, London, 1-296.

- Fine, P., Verosub, K. L. & Singer, M. J., 1995- Pedogenic and lithogenic contributions to the magnetic susceptibility record of the Chinese loess/paleosol sequence. *Geophysical Journal*, 122, 97–107.
- Guo, Z. T., Sun, B., Zhang, Z. S., Peng, S. Z., Xiao, G. Q., Ge J. Y., Hao, Q. Z., Qiao, Y. S., Liang, M. Y., Liu, J. F., Yin, Q. Z. & Wei, J. J., 2008- A major reorganization of Asian climate by the early Miocene. *Climatology of Past*, 4, 153–174.
- Han, J. M., Jiang, W. Y., Liu, T. S., Lü, H. Y., Guo, Z. T. & Wu, N. Q., 1996- Carbonate isotopic records of paleoclimate changes in Chinese loess. *Science China*, (39)5, 458–467.
- Heller, F. & Evans, M. E., 1995- Loess magnetism. *Reviwe Geophysical*, 33, 211–240.
- Heller, F. & Liu, T. S., 1982- Magnetostratigraphical dating of loess deposits in China. *Nature* 300, 431-433.
- Holser, W. T., 1979- Mineralogy of Evaporites. In: Burns, R.G. (Eds.), *Marine Minerals*. Mineralogical Society of America Short Course Notes, 6, 124–150.
- Kehl, M., Sarvati, R., Ahmadi, H., Frechen, M. & Skowronek, A., 2005- Loess paleosol–sequences along a climatic gradient in Northern Iran. *Eiszeitalter und Gegenwart* 55, 149–173.
- Kukla, G., Heller, F., Liu, X. M., Xu, T. C., Liu, T. S. & An, Z. S., 1988- Pleistocene climates in China dated by magnetic susceptibility. *Geology*, 16, 811–814.
- Liu, C. Q., Masuda, A., Okada, A., Yabuki, S., Zhang, J. & Fan, Z. L., 1993- A Geochemical Study of Loess and desert sand in northern China. *Chemical Geology*, 106, 359–374.
- Liu, T. S., Rolph, J., Bloemendal, J., Shaw, J. & Liu, T. S., 1985- *Loess and Environment*. China Ocean Press, 1–215, Beijing.
- Liu, X. M., Hesse, P. & Rolph, T., 1999- Origin of maghemite in Chinese loess deposits: aeolian or pedogenic. *Physical Earth Planetary Interiors*, 112, 191– 201.
- Maher, B. A. & Thompson, R., 1999- *Quaternary Environments, Climates and Magnetism*. Cambridge University Press, 321–331.
- Maher, B. A., 1998- Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosols:Paleoclimatic implications. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* 137, 25–55.
- Maher, B. A., 2011- The magnetic properties of Quaternary aeolian dusts and sediments, and their palaeoclimatic significance. *Aeolian Research* 3, 87–145.
- Moore, C. B. & Mason, B., 1982- *Principles of Geochemistry*. Wiley, 216–344, New York.
- Muhs, D. R. & Bettis, E. A., 2000- Geochemical Variations in Peoria Loess of Western Iowa Indicate Paleowinds of Midcontinental North America during Last Glaciation. *Quaternary Research* 53, 49–61.
- Puchelt, H., 1972- Barium. In: K.H., Wedepohl (Eds), *Handbook of Geochemistry*. Springer, 56B1–56O1, Berlin.
- Reichart, G. J., Dulk, M., den Visser, H. J., Weijden, C. H. & vander Zachariasse, W. J., 1997- A 225 kyr record of dust supply, paleoproductivity & the oxygen minimum zone from the Muttay Ridge (northern Arabian Sea). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 134, 149–169.
- 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, 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, 241–253.
- Schwertmann, U. & Taylor, R. M., 1977- Iron oxides. In: Dixon, J.B., Weed, S.B. (Eds.), *Minerals in Soil Environments*. Soil Science Society American, WI, 145–180.
- Schwertmann, U., 1971- Transformation of hematite to goethite in soils. *Nature*, 232, 624– 625.
- Smykatz–Kloss, W. & Roy, P. D., 2010- Evaporite mineralogy and major element geochemistry as tools for palaeoclimatic investigations in arid regions. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, (62)3, 380–390.
- Song, Y., Shi, Z., Dong, H., Nie, J., Qian, L., Chang, H. & Qiang, X., 2008- Loess Magnetic Susceptibility in Central Asia and its Paleoclimatic Significance. *IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium*, II 1227-1230, Massachusetts.
- Spassov, S., 2002- *Loess Magnetism, Environment and Climate Change on the Chinese Loess Plateau*. Doctoral Thesis, ETH Zürich, 1–151.
- Tite, M. S. & Linington, R. E., 1975- Effect of climate on the magnetic susceptibility of soils. *Nature*, 265, 565–566.
- Tzedakis, P. C., 1994- Vegetation change through glacial–interglacial cycles:along pollen sequence perspective. *Philosophical Transactions of Royal Society of London*, B345, 403–432.
- Verosub, K. L., Fine, P., Singer, M. J. & TenPas, J., 1993- Pedogenesis and palaeoclimate: interpretation of magnetic susceptibility of Chinese loess/palaeosol sequences. *Geology*, 21, 1011 –1014.
- Wenigwieser, S., 1992- *Mineralogische Untersuchungen an den Evaporiten und Tonen des Wadi El–Natrun (NW–Ägypten)*. Doctoral Thesis, University of Karlsruhe, 1–151.
- Whitfield, M. & Turner, D. R., 1979- Water–rock partition coefficients and the composition of seawater and river water. *Nature*, 278, 132–137.