

بازسازی تغییرات اقلیم کواترنری پسین با استفاده از پذیرفتاری مغناطیسی لس‌های

سعدآباد - گرگان

سحر ملکی؛ دانشجوی دکترای آب و هواشناسی دیرینه، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران و عضو انجمن کواترنری ایران، ایران
قاسم عزیزی*؛ استاد، آب و هواشناسی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، ایران

فرهاد خرمالی؛ استاد، خاک‌شناسی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، گرگان، ایران

رضا شهبازی؛ دکتر، مهندسی منابع طبیعی، مدیریت مخاطرات و زیست‌محیطی، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ایران

مارتین کهل؛ استاد، خاک‌شناسی، دانشگاه کلن، کلن، آلمان

عاتکه اصلانی؛ کارشناسی ارشد آزمایشگاه محیط و دیرین مغناطیس، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۳۰

چکیده

شناخت علل تغییرات اقلیمی جهانی یکی از چالش‌های مهم علمی است. بازسازی آب‌وهوای گذشته از بایگانی‌های مختلف رسوب و یخ نشان می‌دهد که آب‌وهوا می‌تواند به طور چشمگیری در بازه‌های زمانی متفاوت، از چندین دهه تا هزاره، تغییر کند. گردوغبار بادی، که با تغییرات آب‌وهوایی جهانی در ارتباط است، یکی از مؤلفه‌های مهم سیستم آب‌وهوایی است که تغییرات ناگهانی گذشته را نشان می‌دهد. لس‌ها به طور بالقوه می‌توانند تغییرات دیرینه محیطی را طی چندین چرخه یخبندان ثبت کنند. در این پژوهش، برش رسوبی سعدآباد، واقع در استان گرگان، جهت بررسی آب‌وهوای دیرینه، مربوط به MIS 5e (۱۴۷۰۰۰ تا ۵۷۰۰۰ سال پیش) شمال شرقی ایران، با توجه به نبود اطلاعات کافی در خصوص آب‌وهوای دیرینه و سیستم‌های تأثیرگذار بر آن در این دوره زمانی، مطالعه شد. بدین منظور ابتدا مطالعات کتابخانه‌ای و میدانی و سپس مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفت و تعداد ۹۲ نمونه به فواصل ۱۰ سانتی‌متری از توالی مورد نظر تهیه و برای همه آن‌ها پذیرفتاری مغناطیسی اندازه‌گیری شد. بر اساس نتایج به دست آمده، نمونه‌ها دارای نوسانات افزایشی در بخش‌های پالئوسولی و کاهش در بخش‌های لسی بودند. نتایج حاکی از آن بود که برش رسوبی سعدآباد در طول حدود ۱۴۷۰۰۰ تا ۵۷۰۰۰ سال گذشته حدود سه دوره آب‌وهوایی گرم و مرطوب و سه دوره سرد و خشک داشته است. در دوره آب‌وهوایی گرم و مرطوب لایه‌های خاک دیرینه و شبه‌خاک دیرینه با میزان پذیرفتاری مغناطیسی بالا و در دوره آب‌وهوایی سرد و خشک لایه‌های لس با میزان پذیرفتاری پایین تشکیل شده است. آب‌وهوای دیرینه و پی بردن به جزئیات تغییرات آن در گذشته به برنامه‌ریزی‌های مدیریتی و زیرساختی و ایجاد سناریوهای منطقی اقلیمی در کشور کمک شایانی خواهد کرد.

کلیدواژه‌گان: آب‌وهوای دیرینه، پالئوسول، پذیرفتاری مغناطیسی، لس.

مقدمه

اقلیم یکی از عوامل مهم و مؤثر در زندگی انسان است. ازین رو همواره یکی از مؤلفه‌های مهم برای دستیابی به اهداف علمی و اقتصادی و صنعتی بوده است. دگرگونی‌های اقلیم بر زندگی انسان و استراتژی‌های اقتصادی و اجتماعی تأثیری ژرف بر جا می‌نهد. بدین دلیل انسان همیشه در پی دستیابی به پیشینه و شواهد و علل و پیش‌بینی دگرگونی‌های اقلیم بوده است (عساکره ۱۳۸۶: ۳). تغییر ویژگی ذاتی اقلیم است که هم در مقیاس زمانی کوتاه هم در مقیاس زمانی بلند روی می‌دهد (محمدی ۱۳۸۸: ۳۱۷).

دگرگونی‌های ایجادشده در دوره کواترنری نظر بسیاری از پژوهندگان را جلب کرده است. با توجه به دوره‌ای بودن تغییرات اقلیمی در کواترنری و افزایش دما در سال‌های اخیر و خطر دگرگونی‌های بیشتر آن در آینده، شناخت چگونگی دگرگونی‌ها در گذشته، به منظور برنامه‌ریزی‌های کشاورزی و زیست‌محیطی آینده، اهمیت فراوانی دارد (ایوبی و همکاران ۱۳۸۲: ۵۱). تغییر اقلیم، امروز، موضوعی جهانی است که سیاستمداران، اقتصاددانان، دانشمندان، محققان، و حتی کشاورزان و دامداران بدان توجه می‌کنند. به دلیل اثر انکارناپذیر این پدیده بر اقتصاد، انرژی، ذخایر آبی، و بسیاری از پدیده‌های مرتبط با زندگی بشر تغییر اقلیم امروزه از چالش‌های مهم سیاسی تلقی می‌شود (رفعتی آلاشتی ۱۳۸۶: ۸).

پدیده تغییر آب‌وهوا موضوع تازه‌ای نیست؛ واقعیتی است که از دوره‌های گذشته تا به امروز به طور پیوسته زمین و هر آنچه در آن حیات داشته را متأثر ساخته و می‌سازد. این تغییرات گاه در بازه‌های زمانی کوتاه و با روندی سریع و گاه با روندی آرام و تدریجی رخ داده است. بی‌شک در آینده نیز تغییرات آب‌وهوایی چهره زمین را دستخوش تغییر خواهد ساخت و مناطق مختلف کره زمین آب‌وهوایی متفاوت با آنچه امروز بر آن‌ها مستولی است خواهند داشت. بدین جهت از چند دهه گذشته تاکنون بر مطالعه تغییرات آب‌وهوایی و سازوکار رخداد آن‌ها بیشتر تمرکز شده است.

متأسفانه اطلاعات ثبت‌شده از تغییرات آب‌وهوایی به کمک ماهواره‌ها و در ایستگاه‌های هواشناسی مربوط به حدود ۱۵۰ سال اخیر است؛ که برای تعیین دامنه تغییرات آب‌وهوایی خیلی کوتاه است. بنابراین، بسیار ضروری است که تغییرات آب‌وهوایی گذشته، مربوط به صدها و هزاران سال قبل، را با استفاده از پروکسی‌های دیرینه آب‌وهواشناسی-همچون حلقه‌های درختی، مرجان‌ها، رسوبات دریایی و دریاچه‌ای، یخچال‌ها، و غیره- بررسی کنیم.

مطالعات دیرینه آب‌وهواشناسی به‌خصوص در درک این موضوع کمک خواهد کرد که آیا سامانه آب‌وهوایی کره زمین می‌تواند بین حالت‌های آب‌وهوایی مختلف حدی تغییر کند. درک رخدادهای حدی آب‌وهوایی گذشته به بشر کمک خواهد کرد تا در برابر تغییرات آب‌وهوایی ناگهانی آینده غافلگیر نشوند.

دگرگونی‌های اقلیمی آثار محیطی آشکاری بر جا می‌گذارد و تصویری هرچند کلی از آب‌وهوای دیرینه در اختیار ما قرار می‌دهد (عساکره ۱۳۸۶: ۶۳). به عبارت دیگر، آگاهی از تغییرات محیطی گذشته نه‌تنها زمینه مطالعه تغییرات حال و آینده را فراهم می‌سازد، بلکه ما را در شناسایی مکانیسم‌های طبیعی مهم و مؤثر در تغییرپذیری‌های اقلیمی یاری می‌کند. آنچه مسلم است این است که بررسی‌های پالئوکلیماتولوژی به تجزیه و تحلیل سری‌های زمانی گذشته، حاصل از فنون و ابزاری که چندین محقق به کار گرفته‌اند، نیاز دارد. بنابراین، همان‌طور که استنباط می‌شود، برای برطرف کردن فقر اندازه‌گیری مستقیم، متخصصان «دیرینه اقلیم» باید با استفاده از شواهد و مدارک غیرمستقیم داده‌ها را کشف و بازسازی

کنند. این شواهد در رسوبات کف اقیانوس‌ها، میزان ایزوتوپ اکسیژن در صدف‌های فسیل و مغزه‌های یخی، خاک‌های قدیمی، حلقه‌های رشد درختی، و حتی اسناد تاریخی یافت می‌شوند (عزیزی ۱۳۸۳: ۱۰۲).

معرف‌ها و نشانگرهای موجود در پالئوسول‌ها می‌توانند ابزاری قدرتمند در بازسازی شرایط محیطی گذشته باشند (شلدون و تابور ۲۰۰۹). به عبارت دیگر، یکی از کاربردهای مهم خاک استفاده از آن به منزله پنجره‌ای به شرایط اقلیمی و محیطی گذشته از طریق پالئوسول‌هاست. پالئوسول‌های مدفون در شرایط محیطی گذشته تشکیل شده‌اند؛ اما، با رسوبات جوان‌تر، مانند لس‌ها و رسوبات انتقال‌یافته یخچالی و رسوبات آبرفتی، دفن شده‌اند و به همین دلیل به راحتی قابل شناسایی‌اند. توالی‌های لس- پالئوسول در فراهم آوردن اطلاعات و داده‌های مختلف در زمینه اقلیم و محیط گذشته می‌توانند به کار گرفته شوند (شاتزل و اندرسون ۲۰۰۵).

یکی از فرایندهای دوره کواترنری توالی‌های یخچالی و بین‌یخچالی است که در دوره‌های یخچالی رسوب لس و در دوره‌های بین‌یخچالی پالئوسول‌ها تشکیل شده‌اند (لیو و همکاران ۱۹۹۹). رسوبات لسی، به دلیل داشتن ویژگی‌های منحصر به فرد، از دیرباز مورد توجه محققان رسوب‌شناسی و خاک‌شناسی و ژئومورفولوژیست‌ها بوده است. پیشینه مطالعات لس در دنیا به بیش از ۱۸۰ سال می‌رسد. در این مدت، رویارویی فرضیه‌های گوناگون برای توجیه چگونگی تشکیل لس، در نهایت، بادرفتی بودن این رسوبات را نشان داد. همچنین، ارتباط نهشته شدن رسوبات لسی در طول دوران سرد و یخچالی و خاک‌سازی در دوران بین‌یخچالی روشن شد و این موضوع لس‌ها را یکی از بیگانه‌های مهم تغییرات اقلیم در خشکی معرفی کرد که باعث شد در بسیاری از مطالعات برای بازسازی اقلیم گذشته، حتی فراتر از کواترنری، از آن‌ها استفاده شود (کریمی ۱۳۸۷).

بخش شمالی ایران، به لحاظ جغرافیایی، هم‌عرض کشورهایی مانند چین است که مناطق وسیعی از آن در طول دوران یخچالی پلیستوسن با رسوبات بادرفتی پوشیده شده است (فرشن و همکاران ۲۰۰۹). رسوبات لسی شمال ایران منعکس‌کننده چندین چرخه تغییر اقلیم و تکامل سیمای سرزمین برای دوره میانی تا انتهایی کواترنری است. در این منطقه توالی‌های لس- پالئوسول یکی از بیگانه‌های مهم زمینی است که تغییرات اقلیمی را نشان می‌دهد و پل ارتباطی بین رسوبات لسی جنوب شرقی اروپا و رسوبات لسی آسیای میانه را فراهم می‌کند. تغییر اقلیم در ارتفاعات ایران و مناطق اطراف آن در اواسط و اواخر دوره کواترنری بسیار بحث‌برانگیز بوده و در گذشته بر اساس دوره‌های یخچالی و بین‌یخچالی درباره آن بحث شده است (کهل ۲۰۰۹).

برای بازسازی تغییرات آب‌وهوای دیرین از پذیرفتاری مغناطیسی به منزله شاخصه آب‌وهوا استفاده می‌شود (سانگ و همکاران ۲۰۰۸). پذیرفتاری مغناطیسی معمولاً نشان‌دهنده مقدار غلظت حجم کانی‌های مغناطیسی موجود در نمونه است. مقدار زیاد پذیرفتاری مغناطیسی نشان‌دهنده مقدار زیاد حجم کانی‌های مغناطیس است (ماهر ۲۰۱۱؛ روبرتس و همکاران ۱۹۹۵).

هوازدگی شیمیایی باعث تشکیل کانی‌های مغناطیسی، مانند مگنتیت و مگهمایت، می‌شود (هلر و اوانز ۱۹۹۵). این مواد معدنی در پالئوسول‌ها فراوان‌اند و با تجزیه و تحلیل حساسیت مغناطیسی لس و پالئوسول‌ها قابل تعیین‌اند. بنابراین، حساسیت مغناطیسی در پالئوسول‌ها افزایش یافته است؛ درحالی‌که لایه‌های لس مقادیر کم مگنتیت و مگهمایت را نشان می‌دهد (اوانز و هلر ۲۰۰۳). خواص مغناطیسی توالی لس- پالئوسول یک شاهد از بارش دیرینه و هوازدگی دیرینه در نظر گرفته می‌شود.

این دیدگاه را که میزان پذیرفتاری مغناطیسی با میزان بارندگی و رطوبت و با فرایندهای پدوژنیک در زمان تشکیل خاک مرتبط است اولین بار ماهر و تامپسون (۱۹۹۵) ارائه کردند. آن‌ها ابتدا بین پذیرفتاری مغناطیسی افق‌های B و C خاک‌های هولوسن فلات لسی چین و بارندگی سالیانه آن‌ها همبستگی برقرار کردند. سپس، با قرار دادن پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌های قدیمی در رابطه به دست آمده، میزان بارندگی فلات لسی را در زمان‌های متفاوت محاسبه کردند. تورنت^۱ و همکارانش (۲۰۰۷) اعلام کردند هنگام رسوب‌گذاری لس در دوران یخچالی میزان ذرات باردار کم شده است. اما در دوران بین‌یخچالی، زمانی که رسوب‌گذاری لس کمتری وجود داشته، ذرات باردار کمتر تحت تأثیر دیگر ذرات قرار گرفته‌اند. بنابراین، میزان پذیرفتاری مغناطیسی خاک افزایش یافته است. بالسام و همکارانش (۲۰۱۱) از تحقیقات خود نتیجه گرفتند که میزان پذیرفتاری مغناطیسی خاک با افزایش بارندگی از ۲۰۰ میلی‌متر تا حدود ۱۲۰۰ میلی‌متر افزایش می‌یابد. با افزایش بارندگی به بیشتر از ۱۲۰۰ میلی‌متر میزان پذیرفتاری مغناطیسی خاک کاهش می‌یابد و وقتی بارندگی به ۲۰۰۰ میلی‌متر می‌رسد میزان پذیرفتاری مغناطیسی خاک تقریباً صفر می‌شود. غفارپور و همکارانش (۲۰۱۶)، پورمعصومی و همکارانش (۲۰۱۹)، اشتفان و همکارانش (۲۰۱۸)، شهریاری و همکارانش (۲۰۱۶)، طاهری و همکارانش (۲۰۱۶)، و ... نشان دادند در منطقه نوده، آق‌بند، و مبارک‌آباد افق‌های لسی میزان پذیرفتاری کمی دارند و در افق‌های پالتوسولی این مقدار بالا می‌رود.

مطالعات نشان داده‌اند حساسیت مغناطیسی خاک با سنگ‌شناسی مواد والد، آب‌وهوا، اکسیداسیون / احیا، محتوای ماده آلی، توپوگرافی، منبع رسوب، اندازه ذرات، و زمان متفاوت است. سنگ‌شناسی مواد والد کانی‌های مغناطیسی اولیه را ارائه می‌دهد. علاوه بر این، کانی‌های غیر مغناطیسی ممکن است طی هوازگی آهن آزاد کنند. بنابراین، به تشدید حساسیت مغناطیسی خاک از طریق تشکیل کانی مغناطیسی پدوژنیک کمک می‌کنند (ماهر ۱۹۸۶).

آب‌وهوا بر سرعت فرایندهای تشکیل خاک و فرایندهای مرتبط با توزیع حساسیت مغناطیسی با عمق تأثیر می‌گذارد. حساسیت مغناطیسی با افزایش بارش سالیانه افزایش و با کاهش دما کاهش می‌یابد. بارش زیاد مهم‌تر از دمای هواست. تایت و لینینگتون (۱۹۷۵) اعلام کردند آب‌وهوای مدیترانه‌ای، به دلیل چرخه‌های اکسید و احیای متناوب، برای تبدیل اکسیدهای آهن خاک به فرومغناطیس مناسب است (تایت و لینینگتون ۱۹۷۵؛ سینگر و فاین ۱۹۸۹).

چرخه‌های اکسید- احیا در توسعه حساسیت مغناطیسی بسیار مهم‌اند. زیرا بارش‌های فراوان احتمال احیا شدن بیشتر را افزایش می‌دهد (لو بورگ ۱۹۵۵ و ۱۹۶۰؛ کراکفورد و ویلت ۱۹۹۷؛ کراکفورد و ریچاردسون ۲۰۰۰). تبدیل کانی‌های غیر مغناطیسی یا ضعیف مغناطیسی به کانی‌های به‌شدت مغناطیسی از طریق احیا شدن و به دنبال آن اکسیداسیون و تجمع ترجیحی این کانی‌ها در ارتباط با سایر کانی‌های مرتبط با هوازگی باعث تقویت حساسیت‌پذیری می‌شود. تجمع ترجیحی مگنتیت موروثی (گرفته‌شده از سنگ والد) و مگهمایت پدوژنیک نیز در تقویت حساسیت‌پذیری نقش دارد. لو بورگن (۱۹۵۵ و ۱۹۶۰) اولین کسی بود که افزایش حساسیت مغناطیسی سطحی خاک مربوط به «تقویت مغناطیسی ماده والد» را توصیف و اعلام کرد که دو مکانیسم مسئول تولید حساسیت مغناطیسی در خاک‌ها هستند: الف) احیا شدن کانی‌هایی مانند هماتیت ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) در محیط‌های بی‌هوازی به

مگنتیت (Fe_3O_4)، (ب) احیا شدن هماتیت به مگنتیت هنگام سوختن مواد آلی خاک در سطوح خاک و به دنبال آن اکسید شدن آن به مگهمایت ($\gamma-Fe_2O_3$) حین سرد شدن.

وجود ماده آلی فراوان و رطوبت در فصول گرم سال فرصت احیای آهن را افزایش می‌دهد و به دنبال آن اکسیداسیون تشکیل‌دهنده کانی‌های فرومغناطیسی می‌شود (بابین و همکاران ۱۹۷۶ و ۲۰۰۰؛ مولینز ۱۹۷۷؛ وودیانیسکی ۱۹۸۲). مولینز (۱۹۷۷) گزارش داد تشکیل مگهمایت در خاک‌های سطحی در حضور ماده آلی و تحت شرایط دمای بالا، غالباً، با آب‌زدایی گوئیت و لپیدوکروسیت مرتبط است. وودیانیسکی (۱۹۸۲) نشان داد فرومغناطیس (کانی‌های فرومغناطیسی، غیرفرومغناطیسی، فری مغناطیسی) طی یک دوره کوتاه بین مرطوب بودن و خشک بودن تشکیل شده و پس از خشک شدن خاک فرایند متوقف شده است. علاوه بر این، حداقل ۲ درصد ماده آلی برای تشکیل فرومغناطیس پایدار در خاک مورد نیاز است. شوترمن (۱۹۸۸) اظهار داشت ممکن است مگهمایت یا هماتیت به طور کامل یا جزئی در خاک حل شود (تحت تأثیر ماده آلی) و به صورت محلول در تشکیل گوئیت به کار رود.

توپوگرافی از طریق کنترل رواناب و رسوب مؤثر (به طور پدوژنز) وارد شده به پروفیل خاک بر تشکیل و فرسایش خاک تأثیر می‌گذارد. نوسانات سطح اساس آب به واکنش‌های احیا-اکسید کمک می‌کند. گزارش شده است که احیای آهن، به دنبال شسته شدن، آهن را از پروفیل‌های خاک خارج می‌کند و در نتیجه مقادیر حساسیت‌پذیری کمتر از یک‌سوم مقادیر حساسیت‌پذیری خاک‌های خوب زهکش شده را نشان می‌دهد (رامری و همکاران ۱۹۷۹؛ دیرینگ و همکاران ۱۹۸۵؛ سینگر و فاین ۱۹۸۹؛ کراکفورد و ریچاردسون ۲۰۰۰).

در خاک‌های با زهکشی ضعیف آب‌زدایی لپیدوکروسیت مکانیسمی اضافی برای افزایش حساسیت‌پذیری مغناطیسی خاک به نظر می‌رسد (مولینز ۱۹۷۷). الیز و تاونزند (۱۹۶۳) اعلام کردند خاک‌های کاملاً هوازده با ماده آلی قابل توجه برای حساسیت‌پذیری مغناطیسی خاک بهینه‌اند. فاین و همکارانش (۱۹۹۲) مقدار و الگوی تقویت در خاک را به انتشار Fe^{+2} مرتبط با هوازده‌گی و به دنبال آن اکسیداسیون به مگهمایت نسبت دادند. آهن آزاد شده در محلول خاک ممکن است به کانی‌های مغناطیسی که در جای خود باقی می‌مانند تبدیل شود و از این طریق به تقویت حساسیت مغناطیسی خاک کمک کند. آهن موجود در محلول خاک ممکن است به خاک زیرین منتقل شود؛ جایی که امکان دارد کانی‌های جدید مغناطیسی تشکیل شود یا از خاک خارج شود. فاین و همکارانش (۱۹۹۲) همچنین نشان دادند تجمع ترجیحی تجمعات فری مغناطیس پدوژنیکی یا نشئت گرفته از مواد والد به تشدید حساسیت‌پذیری منجر می‌شود.

مقادیر حساسیت مغناطیسی با اندازه ذرات مختلف متفاوت است (ساندرن و تامپسون ۱۹۹۰؛ کراکفورد و ویلت ۱۹۹۷). حساسیت‌پذیری مغناطیسی در دانه‌های بزرگ‌تر با اندازه ۱۰ تا ۲۰ میکرومتر کاهش می‌یابد و در دانه‌های کوچک‌تر با اندازه > 2 میکرومتر افزایش پیدا می‌کند.

زمان، گذشته از تأثیرگذاری بر سرعت شکل‌گیری خاک و سن خاک و چشم‌اندازها، بر میزان حساسیت مغناطیسی و توزیع آن و درجه تقویت آن نیز اثر می‌گذارد.

درک فعلی از شواهد اقلیمی و سن رسوبات لسی شمال ایران باید با استفاده از روش‌های استدلالی در چارچوب زمان تا دوره پلیستوسن میانی بررسی و تأیید شود. مطالعات مربوط به اقلیم گذشته در ایران بیشتر به صورت توصیفی و بر اساس

فرصیه‌های اثبات‌نشده است و هنوز دید مناسب و روشی از تغییرات اقلیمی در ایران وجود ندارد. از سوی دیگر، تا کنون مطالعات انگشت‌شماری با استفاده از بایگانی‌های رسوبی تغییر اقلیم در ایران انجام شده است؛ شامل رسوبات دریاچه‌ای دریاچه ارومیه (جمالی و همکاران ۲۰۰۸)، دریاچه هشیلان (صفایی‌راد و همکاران ۱۳۹۷)، رسوبات شنی اردکان (توماس و همکاران ۱۹۹۷)، رسوبات لسی در شمال (کهل و همکاران ۲۰۰۵؛ فریچن و همکاران ۲۰۰۹؛ کهل ۲۰۱۰؛ خرمالی و کهل ۲۰۱۱؛ غفارپور و همکاران ۲۰۱۶؛ اشتفان و همکاران ۲۰۱۸؛ شهریاری و همکاران ۲۰۱۶؛ رحیم‌زاده و همکاران ۲۰۱۹؛ مهدی‌پور حسکوئی و همکاران ۱۳۹۲؛ فیضی و همکاران ۱۳۹۵؛ و ...)، شمال شرق ایران (کریمی و همکاران ۲۰۱۱؛ بیات و همکاران ۲۰۱۷؛ و ...) و برای روشن شدن تغییرات اقلیمی تحقیق و مطالعه بیشتر در این زمینه ضروری به نظر می‌رسد.

مطالعات لس و بررسی جنبه‌های مختلف آن در ایران نسبت به مطالعات انجام‌شده در دنیا ناچیز است و اطلاعات فراوانی در این رسوبات وجود دارد که با پژوهش‌های مناسب قابل استخراج است. بنابراین، در این تحقیق سعی شد با استفاده از پارامترهای مغناطیسی به بررسی آب‌وهوای گذشته نهشته‌های لس منطقه سعدآباد- گرگان پرداخته شود. گفتنی است بیشتر مطالعات شرایط عمومی اقلیمی حاکم بر منطقه را نشان داده‌اند. اما در این پژوهش سعی می‌شود سیستم‌های آب‌وهوایی تشکیل‌دهنده این فرایندها مقایسه شود.

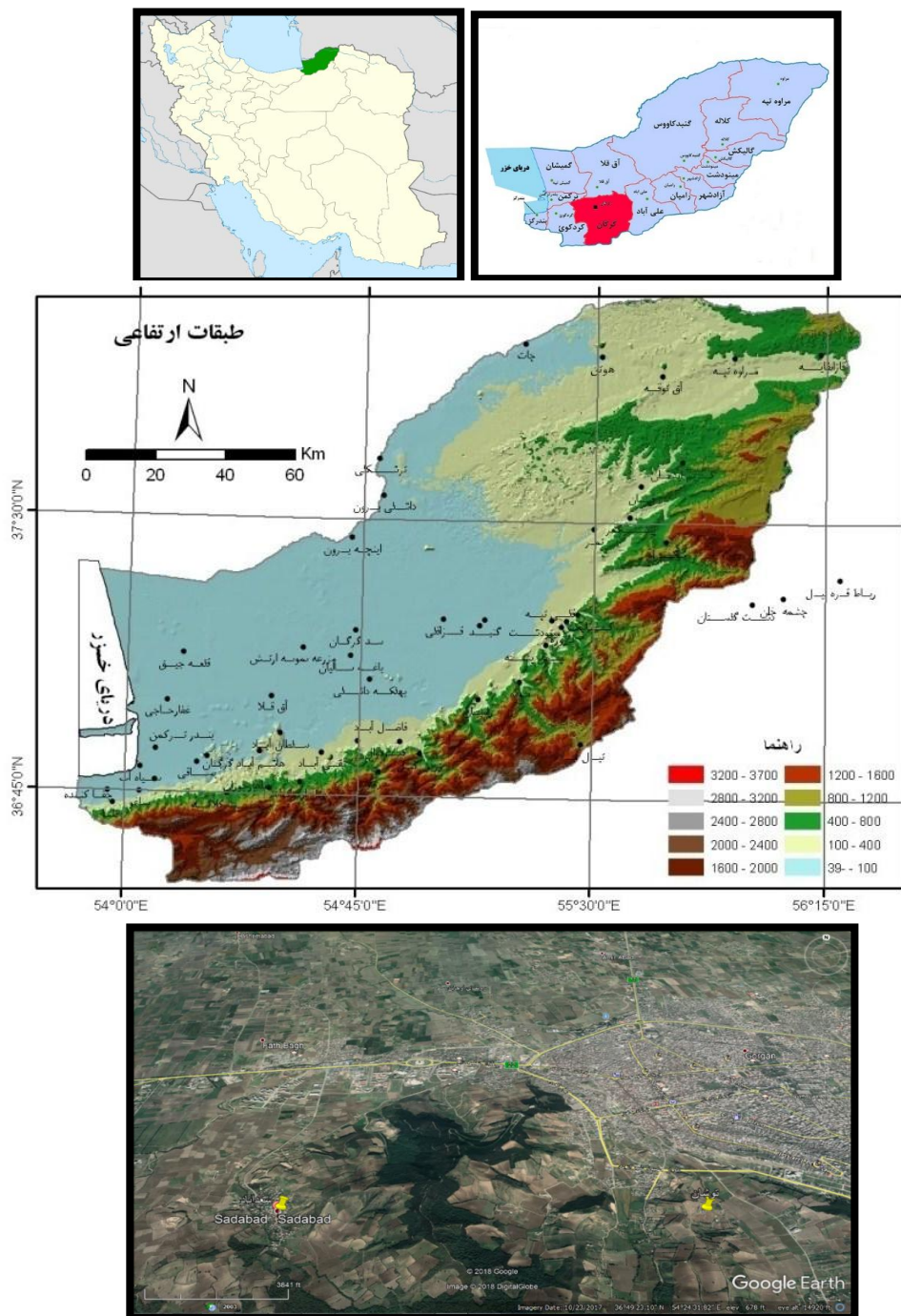
منطقه مورد مطالعه

موقعیت جغرافیایی برش رسوبی سعدآباد در عرض شمالی $36^{\circ}49'03''$ و طول شرقی $46^{\circ}23'54''$ در ارتفاع ۱۴۰ متری از سطح آب‌های آزاد است. این برش در نزدیکی روستای سعدآباد از توابع شهرستان گرگان قرار دارد. برش رسوبی سعدآباد در زون ساختمانی البرز (اشتوکلین ۱۹۶۸) و از نظر پهنه‌های اصلی رسوبی- ساختاری ایران جزء حاشیه جنوبی خزر است. این زون شامل مناطقی است که در شمال گسل البرز قرار دارد و حاشیه دریای خزر را در سواحل ایران مسدود می‌کند و به سمت شرق با لایه‌های ضخیمی از لس پوشیده می‌شود (شکل ۱).

سرزمین‌های پایین دست خزر خود نمایانگر حوضه فرونشستی است (برونت و همکاران ۲۰۰۳) که می‌تواند فضای گسترده‌ای برای رسوبات دریایی و آبرفتی، مانند رسوبات رودخانه اترک (جداکننده ایران از ترکمنستان) و رودخانه گرگان، فراهم کند. ویژگی‌های رواناب آن‌ها به طور متناوب، به دلیل تغییرات آب‌وهوایی کواترنری (فرشن و همکاران ۲۰۰۹) و تغییرات سطح اساس به دلیل نوسانات سطح دریای خزر (فورت و کاوگیل ۲۰۱۳)، تغییر می‌کند. رسوبات رودخانه‌ای به احتمال زیاد منبعی جزئی برای لایه‌های لس محلی بوده‌اند. در این زمینه فرشن و همکارانش (۲۰۰۹) اظهار کرده‌اند ضخامت رسوبات لس در دشت خزر نزدیک رودخانه‌ها بیشتر است. آب‌وهوا در حال حاضر در گرگان با متوسط بارش سالیانه ۶۰۰ میلی‌متر در ایستگاه هواشناسی گرگان اندازه‌گیری می‌شود. به سمت استپ ترکمن، میزان بارندگی به سرعت به میانگین سالیانه ۲۰۰ میلی‌متر کاهش می‌یابد. در نزدیکی بخش نکا، واقع در غرب گرگان، میانگین بارندگی در سال به ۷۵۰ میلی‌متر می‌رسد. میانگین سالیانه دما در دشت خزر تقریباً ۱۷ درجه سانتی‌گراد است.

الگوهای اصلی باد در ایران تا حد زیادی با اختلاف فشار فصلی بین دریای خزر و ارتفاعات ایران اداره می‌شود. در فلات ایران یک سلول با فشار بالا در ماه‌های سرد زمستان ایجاد می‌شود؛ درحالی‌که سطح آب دریای خزر به دلیل عدم

تحرك حرارتی آن دارای فشار نسبتاً كم است (گنجی ۱۹۶۸). توزیع فشار باعث می شود توده های هوا از فلات ایران به سمت دریای خزر جاری شوند. در ماه های گرم تابستان سلول فشار قوی در فلات ایران با یک فشار شدید گرما جایگزین می شود؛ درحالی که یک مرکز نسبی فشار بالا در بالای دریای خزر شکل می گیرد و به جهت باد مخالف منجر می شود (گنجی ۱۹۶۸). نحوه پراکنش باد در منطقه می تواند به منشأیابی رسوبات لسی در دوره های مختلف تا حدی کمک کند.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

مواد و روش‌ها

در این تحقیق ابتدا به مطالعات کتابخانه‌ای پرداخته شد و منابع فارسی و لاتین در زمینه لس‌ها و کاربرد آن در مطالعات آب‌وهواشناسی دیرینه، نحوه نمونه‌گیری، و آنالیزهایی که بر لس‌ها انجام می‌شود بررسی شد. در عملیات میدانی، که در اردیبهشت سال ۱۳۹۷ انجام گرفت، پس از مشخص کردن محل دقیق برش رسوبی، نمونه‌برداری انجام شد. با توجه به ارتفاع بالای سکشن و در دسترس نبودن قسمت‌هایی از آن، سه مقطع انتخاب و مقطع C برای شاهد مقطع A انتخاب شد. پیش از نمونه‌برداری، لایه‌های رسوبی هوازده کنده و کنار زده شد تا سطح تازه از رسوبات نمایان شود. سپس، با استفاده از متر، لایه مورد نظر به فواصل ۱۰ سانتی‌متری تقسیم شد (شکل ۲). گفتمی است در این مطالعه افق‌های آخرین بین‌یخبندان (ایمین) بررسی شد تا بتوان میزان پذیرفتاری مغناطیسی و به تبع آن میزان توسعه خاک را در این دوره تجزیه و تحلیل و در یک شیب اقلیمی با سایر مناطق در شمال کشور مقایسه کرد تا به عملکرد سیستم‌های آب‌وهوایی تأثیرگذار در این فرایند دست یافت. سکشن مورد نظر از این لحاظ که بین یک سکشن مرطوب‌تر واقع در نکا و سکشن خشک‌تر واقع در نوده و آق‌بند قرار داشت مورد توجه قرار گرفت و انتخاب شد.



شکل ۲. مراحل برداشت نمونه در ۳ پروفیل A و B و C

۹۲ نمونه به فواصل ۱۰ سانتی‌متری از توالی مورد نظر تهیه شد. جهت این آنالیز ابتدا نمونه‌ها در هاون چینی کاملاً کوبیده و به اندازه‌های حدود ۲ میلی‌متری رسانده شد. سپس نمونه‌ها در بوته‌های کوچک ریخته و فشرده شد. پسماند

مغناطیسی طبیعی^۱ با دستگاه مغناطیس‌سنج چرخان مدل JR-6A و پذیرفتاری مغناطیسی^۲ با دستگاه اندازه‌گیری شدت مغناطیسی در آزمایشگاه مغناطیس‌سنجی سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور اندازه‌گیری شد. سپس در نرم‌افزار اکسل نمودارها رسم شد.

یافته‌ها

جدول ۱ مقادیر اندازه‌گیری‌شده پارامترهای مغناطیسی را نشان می‌دهد. برای طولانی نشدن جدول، فقط تعدادی از نمونه‌ها در جدول آورده شده است.

جدول ۱. مقادیر اندازه‌گیری‌شده پارامترهای مغناطیسی

Samples	NRM (A/M) 10 ⁻³	Mass Susceptibility [m ³ /kg] 10 ⁻⁹	χ Lf	χ hf 10 ⁻⁵ SI	χ fd % (وابستگی فرکانسی یا تابع فراوانی)
B18	1.514	355	47	45	4.255
B14	4.706	414	55	52	5.455
B7	11.79	793	107	97	9.346
B1	7.41	507	67	61	8.955
A1	7.536	411	55	51	7.273
A7	2.336	237	33	31	6.061
A13	4.729	352	47	44	6.383
A17	11.92	796	115	106	7.826
A21	10.29	804	117	106	9.402
A27	7.82	526	70	64	8.571
A31	5.963	406	54	51	5.556
A35	2.909	230	32	32	0.000
A39	5.691	315	42	39	7.143
A44	9.579	661	101	93	7.921
A47	11.81	659	100	94	6.000
A51	12.28	737	114	105	7.895
A55	11.71	791	114	105	7.895
A59	9.287	528	86	81	5.814
A68	7.063	547	83	78	6.024
A71	5.126	412	63	58	7.937
A74	5.789	368	60	57	5.000

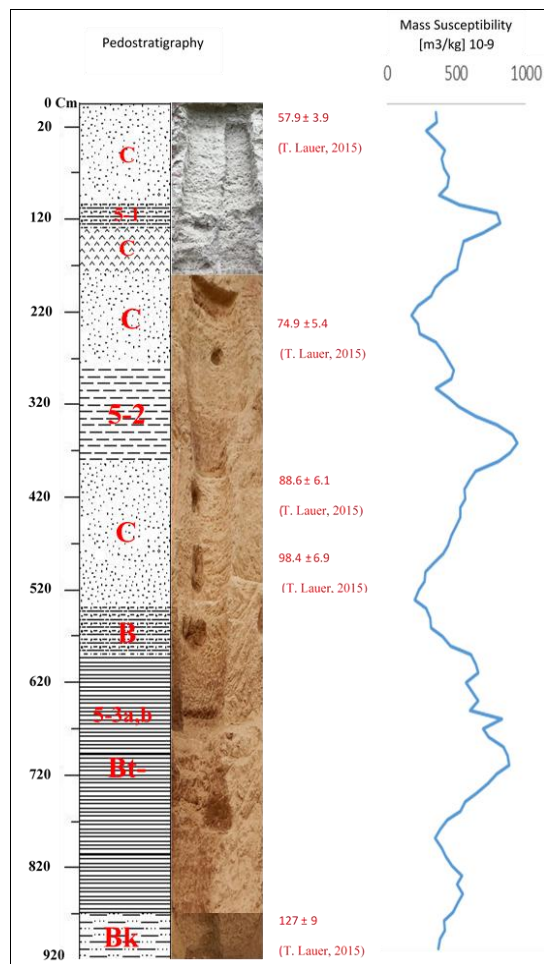
پذیرفتاری مغناطیسی برش رسوبی سعدآباد

پذیرفتاری مغناطیسی یا قابلیت مغناطیسی شدن کمیتی است که میزان مغناطیسی شدن یک جسم در یک میدان مغناطیسی را نشان می‌دهد و میزان این تأثیر تابع مقدار و نوع کانی‌های مغناطیسی است که در نمونه وجود دارد. عامل ایجاد ویژگی مغناطیسی در خاک بیشتر کانی‌های مگنتیت و مگهمایت هستند. غلظت این کانی‌ها در خاک کم است. اما، نسبت به دیگر کانی‌های آهن‌دار شدت پذیرفتاری مغناطیسی خاک را تنظیم می‌کنند (مولینز ۱۹۷۷). افزایش پذیرفتاری خاک اساساً به دلیل تشکیل پدوژنیک کانی‌های فری‌مگنتیک است که به میزان زیادی به عوامل خاک‌ساز- شامل ماده مادری، آب‌وهوا، پستی و بلندی، پوشش گیاهی- بستگی دارد (فنگ و جانسون ۱۹۹۵).

1. NRM

2. Magnetic Susceptibility

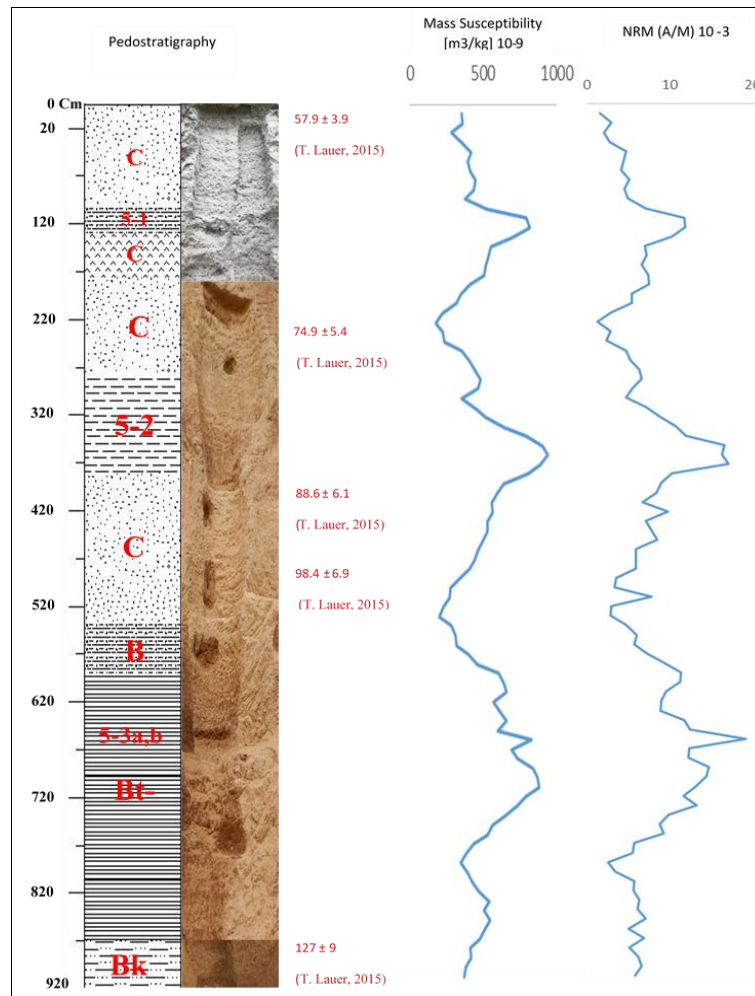
تغییرات این پارامتر در برش رسوبی سعدآباد بین ۱۷۵ تا ۹۴۰ 10^{-9} $[m^3/kg]$ است. بیشترین میزان پذیرفتاری مغناطیسی در لایه‌های پالئوسولی ۵-۱، ۵-۲، و افق Bt مربوط به خاک ۵-۳a است و کمترین میزان آن در لایه‌های لسی بالای افق خاک (۵-۲) و افق خاک (۵-۳) است (شکل ۳).



شکل ۳. پذیرفتاری مغناطیسی برش رسوبی سعدآباد

تغییرات نمودار پسماند مغناطیسی طبیعی (NRM) برش رسوبی سعدآباد

به اندازه‌گیری مقدار مغناطیسی نمونه، قبل از هر گونه آزمایش مغناطیسی بر آن، اندازه‌گیری پسماند مغناطیسی طبیعی گفته می‌شود. این پسماند گویای روند تغییرات میدان مغناطیسی زمین در طول زمان زمین‌شناسی است که اثر آن بر کانی مغناطیسی ثبت شده است. با توجه به شکل ۴، شدت میدان مغناطیسی زمین طی دوره‌های سرد یخچالی (زمان نهشته شدن لُس‌ها) با شدت میدان مغناطیسی زمین طی دوره‌های گرم بین‌یخچالی (زمان تشکیل خاک‌های دیرینه) متفاوت است.



شکل ۴. تغییرات نمودار پسماند مغناطیسی طبیعی (NRM) برش رسوبی سعدآباد

پذیرفتاری وابسته به فرکانس برش رسوبی سعدآباد

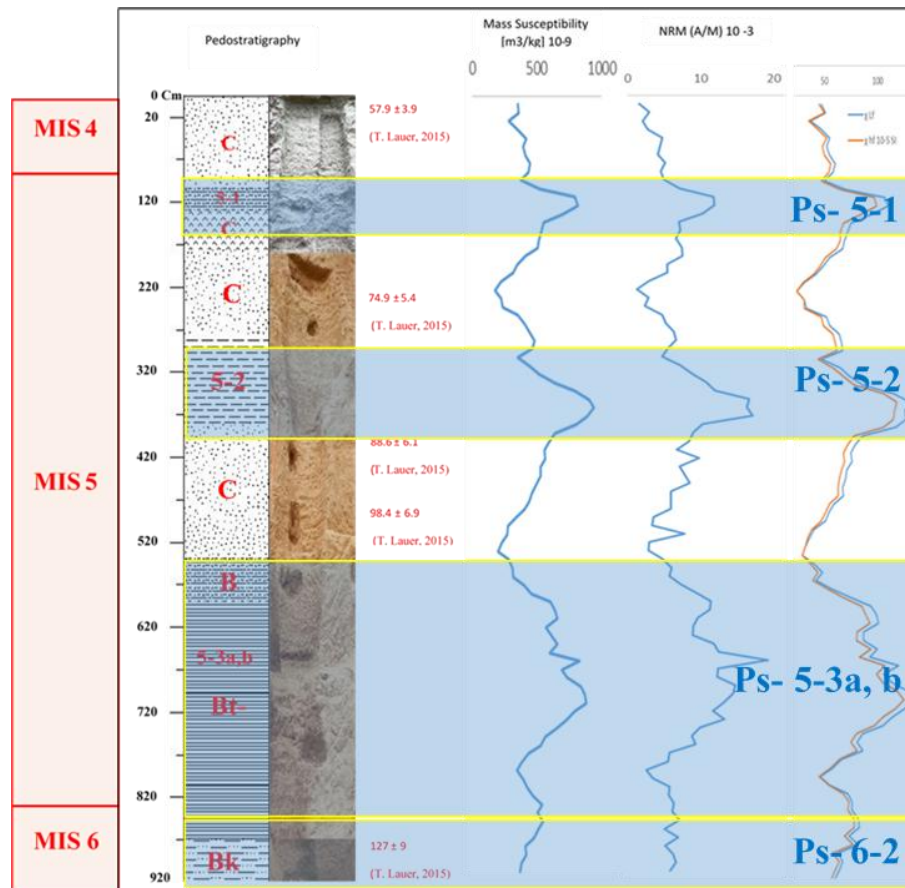
شاخص دیگر پذیرفتاری اندازه‌گیری پذیرفتاری وابسته به فرکانس است که با پذیرفتاری در میدان‌های مغناطیسی ایجاد شده در دو فرکانس مختلف ۰٫۴۶ و ۴٫۶ کیلو هرتز مرتبط است. این نوع اندازه‌گیری برای تشخیص حضور کانی‌های بسیار ریز سوپرپارامگنتیک (>۰٫۰۳ میکرومتر)، که به مثابه بلورهایی که تا حد زیادی توسط فرایندهای پدوژنیک در خاک تولید می‌شوند، استفاده می‌شود. در نمونه‌های حاوی مقدار نسبتاً زیاد کانی‌های بسیار ریز تفاوت بیشتری بین قرائت‌ها در دو فرکانس مشاهده می‌شود. پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس (χ_{fd}) با رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

رابطه ۱

$$\chi_{fd} = 100(\chi_{lf} - \chi_{hf}) / \chi_{lf}$$

که در آن χ_{fd} پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس بر حسب درصد، χ_{lf} پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس پایین (۰٫۴۶ KHZ)، و χ_{hf} پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس بالا (۴٫۶ KHZ) است. هر چه اختلاف میان پذیرفتاری

مغناطیسی در فرکانس زیاد و کم یک خاک بیشتر باشد از دخالت بیشتر ذرات مغناطیسی با اندازه کوچکتر از ۰.۳ میکرومتر، که عمدتاً پدوژنیک هستند، حکایت می‌کند (دیرینگ ۱۹۹۹) (شکل ۵).



شکل ۵. پذیرفتاری وابسته به فرکانس برش رسوبی سعدآباد

بحث

تغییرات مغناطیس‌پذیری در توالی لس- پالتوسول (MIS 5 و MIS 6) در سکانس سعدآباد- شمال ایران
همان‌طور که در گراف پذیرفتاری مغناطیسی جرمی در برابر عمق مشاهده می‌شود، منحنی رسم‌شده در سه قسمت دارای حداکثر مقدار پذیرفتاری مغناطیسی جرمی است و در نگاهی کلی به منحنی مشاهده می‌شود که مقدار پذیرفتاری در لایه‌های عمیق‌تر بیشتر است. مقایسه این پیک‌های منحنی با توالی لس و خاک دیرین مورد مطالعه تطابق خوبی نشان می‌دهد. از آنجا که پذیرفتاری مغناطیسی بالا می‌تواند نشان‌دهنده تمرکز بیشتر کانی‌های مغناطیسی در نمونه باشد، می‌توان نتیجه گرفت که خاک‌های دیرینه توالی مورد مطالعه نسبت به لس‌ها مواد مغناطیسی بیشتری دارند. این مواد داخل خاک‌ها می‌توانند در نتیجه فرایندهای خاک‌زایی به وجود آیند. از آنجا که افزایش دما و رطوبت باعث فرایندهای خاک‌زایی و در نتیجه افزایش اکسیداسیون (بلومندال ۲۰۰۸؛ هوسک و همکاران ۲۰۱۵) و افزایش مقدار مواد مغناطیسی

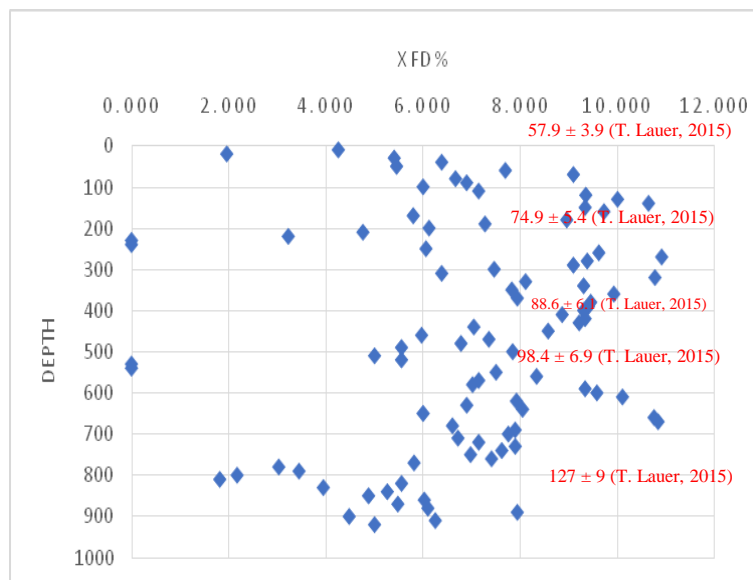
می‌شوند، می‌توان نتیجه گرفت در نقاطی با پذیرفتاری مغناطیسی بالاتر آب‌وهوای گرم و مرطوب بر محیط حاکم بوده است که این شرایط را در سه دوره زمانی به صورت واضح در توالی مورد مطالعه می‌توان دید: ۱. حدود ۱۴۰۰۰ تا ۹۰۰۰ سال پیش که لایه‌های پایینی آن احتمالاً مربوط به MIS6 است و به سمت بالا به احتمال زیاد مربوط به خاک 5-3a و 5-3b است که به احتمال زیاد در منطقه مورد مطالعه تداخل یافته و افق خاکی با ضخامت حدود ۳٫۵ متر ایجاد کرده است. کاهش میزان حساسیت در لایه‌های بینابین این افق‌های خاک احتمالاً به علت ته‌نشست لس یا لایه‌های خاک با تکامل کمتر است که به احتمال زیاد مربوط به دوره‌های با شدت باد بیشتر است. ۲. حدود ۸۵۰۰۰ تا ۷۰۰۰۰ سال پیش و مربوط به افق خاک 5-2 است. ۳. حدود ۶۵۰۰۰ تا ۶۰۰۰۰ سال پیش و مربوط به افق خاک 5-1 در توالی مورد نظر است.

علاوه بر پیک‌های بزرگ، که کاملاً مشهود است، تغییرات کوچک‌تری نیز داخل پیک‌های بزرگ‌تر مشاهده می‌شود که می‌تواند حاکی از تغییرات کم ترکیب مغناطیسی درون خاک‌های دیرینه در زمان‌های کوتاه باشد (ژو و همکاران ۱۹۹۰). افزایش مغناطیس در خاک‌های دیرینه را به نوعی فرایند درج‌ازا، که در طول تشکیل خاک اتفاق می‌افتد، ارتباط می‌دهند. مقدار این پارامتر در لس‌ها از ۱۸۰ تا ۳۴۰ و در خاک‌های دیرینه از ۹۳۰ تا ۵۵۰ متغیر است.

پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس نیز از پارامترهای مهم در مطالعات مغناطیسی است که برای نشان دادن حضور ذرات بسیار ریز سوپرپارامغناطیسی (SP) در داخل مواد استفاده می‌شود و $\chi_{fd}\%$ تخمینی از سهم نسبی دانه‌های SP ریز به کل مغناطیس است. تامپسون و اولدفیلد (۱۹۸۶) و دیرینگ (۱۹۹۶) و دیرینگ و همکارانش (۱۹۹۷) نشان دادند اگر مقدار درصد پذیرفتاری وابسته به فرکانس ($\chi_{fd}\%$) نمونه‌ها کمتر از ۲ باشد مقدار ذرات سوپرپارامغناطیس درونشان بسیار کم است یا اصلاً وجود ندارد، اگر این پارامتر بین ۲ تا ۱۰ درصد باشد مخلوطی از ذرات سوپرپارامغناطیس و ذرات درشت‌تر در آن‌ها وجود دارد، و اگر این پارامتر بین ۱۰ تا ۱۴ درصد باشد ذرات SP بالاتر از ۷۵ درصد ذرات مغناطیسی را تشکیل می‌دهند و نمونه‌هایی با $\chi_{fd}\%$ بالای ۱۴ درصد بسیار کمیاب‌اند و عمدتاً به آلودگی نمونه یا خطای دیگر مربوط می‌شود. بیشتر نمونه‌های مورد مطالعه در توالی یادشده مقدار $\chi_{fd}\%$ بین ۲ تا ۱۰ دارند که از حضور ذرات سوپرپارامغناطیس همراه ذرات درشت‌تر مغناطیسی در آن‌ها حکایت می‌کند. البته تعدادی از نمونه‌ها نیز مقدار بالاتر از ۱۰ را نشان می‌دهند که ناشی از حضور قابل توجه ذرات سوپرپارامغناطیس در نمونه‌هاست. مقدار این پارامتر در لس‌ها از ۰ تا ۲ و در خاک‌های دیرینه از ۸ تا ۱۱ متغیر است (شکل ۶).

همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، χ_{lf} در پالئوسول بخش ۱-۶ و بخش پایینی 5-3b کاهش می‌یابد. دوره‌های بین‌یخبندان ممکن است خاک‌های اشباع‌شده و شرایط اکسیداسیون مرطوب قوی‌تر داشته باشند. اگر رطوبت بیش از یک مقدار بحرانی باشد، محیط پدوژن به سمت شرایط کاهنده اکسیداسیون پیش می‌رود که به تخریب بیشتر اکسیدهای آهن (مگهمایت و مگنتیت) منجر می‌شود تا هیدروکسیدهای آهن باثبات‌تر (مانند گوتیت) تشکیل شود. رطوبت بیشتر، که باعث اشباع خاک (گلی شدن) می‌شود، به از بین رفتن اکسیدهای آهن برای تشکیل سولفیدهای آهن می‌انجامد. در هر دو فرایند یادشده، اکسیدهای آهن رسوب‌شده توسط گردوغبار از بین می‌رود و کانی‌های پارامغناطیس بیشتری تولید می‌شود که به ایجاد رابطه منفی بین حساسیت مغناطیسی با پدوژن می‌انجامد.

مطالعات میکرومورفولوژیکی لایه‌های رسی هیدروکسید Fe-Mn نشان می‌دهد که پالتوسول بخش ۵ و ۶ متوسط تا به‌خوبی توسعه یافته است (ملکی و همکاران ۲۰۲۰ در دست چاپ). هو و همکارانش (a2009 و b2009) فرض کردند، طی فرایندهای هیدرومورفیک پس از رسوب، مگهمایت پدوژن آسان‌تر از هماتیت از بین می‌رود که باعث کاهش xlf می‌شود. بنابراین، شرایط موقت افزایش اکسیژن ممکن است در پالتوسول بخش ۱-۶ و بخش پایینی 3b-5 به دلیل بارندگی زیاد اتفاق بیفتد و ممکن است مگهمایت به طور کامل از بین رفته باشد، اما، هماتیت به طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار نگرفته باشد. ازین‌رو، ممکن است سطح xlf این افق ابتدا بالاتر بوده و بعداً کاهش یافته باشد. در نتیجه، xlf بخش ۱-۶ و بخش پایینی 3b-5 با درجه بالای پدوژن آن مغایر است. ناهم‌انگهی بین مغناطیس‌پذیری پایین و درجه هوازگی شدید را قبلاً در توالی‌های لسی لیو و همکارانش (۱۹۹۹ و ۲۰۰۱)، سان و لیو (۲۰۰۰)، هو و همکارانش (۲۰۰۳) و a2009 و b2009)، بالسام و همکارانش (۲۰۰۴ و ۲۰۱۱)، و غفارپور و همکارانش (۲۰۱۶) مشاهده کرده و توضیح داده‌اند. لیو و همکارانش (۲۰۰۳) نشان دادند اگر رطوبت خاک از سطح بحرانی افزایش یابد و باکتری‌های کاهنده آهن وجود داشته باشند، FM حل می‌شود و از بین می‌رود و همبستگی پدوژن و xlf در رسوبات لس ممکن است نامشخص باشد. نتیجه مشابهی را هو و همکارانش (a2009 و b2009) گزارش کرده‌اند. آن‌ها اظهار داشته‌اند xlf فقط می‌تواند به منزله پروکسی دیرینه اقلیم استفاده شود. زیرا مقدار FM به میزان قابل توجهی با میزان توسعه خاک در ارتباط است. ممکن است کاهش MS در بخش ۱-۶ و بخش پایینی 3b-5 در توالی سعدآباد به علت افزایش غیرطبیعی اکسیژن ناشی از بارش بسیار بالا باشد که نشان‌دهنده شرایط مرطوب هنگام تشکیل خاک است.



شکل ۶. تغییرات xfd در برابر عمق

با توجه به گراف رسم‌شده شکل ۳ بر اساس پذیرفتاری‌های مغناطیسی اندازه‌گیری شده در فرکانس پایین و بالا، می‌توان مشاهده کرد که هر دو منحنی روندی مانند پذیرفتاری مغناطیسی جرمی نشان می‌دهند. اما، منحنی پذیرفتاری

مغناطیسی در فرکانس بالا دارای مقدارهای کمتری نسبت به پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس پایین است که حضور ذرات سوپرپارامغناطیس در نمونه‌ها را نشان می‌دهد. زیرا نمونه‌های دارای ذرات سوپرپارامغناطیس در فرکانس بالا پذیرفتاری مغناطیسی کمتری دارند (دیرینگ و همکاران ۱۹۹۶a).

پارامتر NRM مغناطیس پسماند طبیعی نمونه است که در واقع حاصل جمع مغناطیس‌شدگی پسماند اولیه و ثانویه است و با J_r نشان داده می‌شود و واحد آن آمپر بر متر (A/m) است. این پارامتر هم تمرکز مواد مغناطیسی به‌خصوص فرومغناطیس‌ها را داخل نمونه نشان می‌دهد. در گراف رسم‌شده از این پارامتر مشاهده می‌شود که منحنی پارامتر NRM به منحنی پذیرفتاری مغناطیسی بسیار شبیه است که با توجه به این مشاهده می‌توان نتیجه گرفت حامل اصلی مغناطیس پسماند طبیعی و پذیرفتاری مغناطیسی در نمونه‌ها مواد فرومغناطیس هستند.

مکانیسم‌های تشدیدکننده حساسیت مغناطیسی در سکانس

چندین مکانیسم برای تشدید مغناطیس فلات لسی چین ارائه شده است که شامل کم شدن گردوغبار (کوکلا و آن ۱۹۸۹)، متراکم شدن رسوب و شسته شدن کربنات (هلر و تونگسنگ ۱۹۸۴)، تجزیه بقایای گیاهی (منگ و همکاران ۱۹۹۷)، و خاک‌زایی (ژو و همکاران ۱۹۹۰؛ ماهر ۱۹۹۸) است (غفارپور و همکاران ۲۰۱۶). مدل دیگر برای تشدید مغناطیسی فرضیه سرعت/توان باد است (همچنین مدل Alaskan یا سیبری نام‌گذاری شده است) که در آن قدرت باد بر مقادیر حساسیت‌پذیری مغناطیسی لس از طریق جداسازی فیزیکی دانه‌های مغناطیسی تأثیر می‌گذارد (بیت و هاوکینز ۱۹۸۹). یکی از تفسیرهای پذیرفته‌شده در زمینه افزایش حساسیت مغناطیسی لس تشکیل درجای ذرات مغناطیسی فوق ریز در طول پدوژنز (یعنی مدل پدوژنیک) است که نشان می‌دهد تشدید مغناطیسی نتیجه شکل‌گیری کانی‌های مغناطیسی بسیار ریز (سوپرپارامغناطیس (SP) و تک‌حوزه‌ای (SD)) طی فرایند پدوژنیک (لیو و همکاران ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸؛ سونگ و همکاران ۲۰۱۰a) است.

رابطه بین بارش و شدت پدوژن که می‌تواند پیشرفت MS در سعدآباد را توضیح دهد در حال حاضر مثبت است (غفارپور و همکاران ۲۰۱۶؛ خرماالی و همکاران ۲۰۰۳). هنگامی که آب‌وهوا به سمت درجه حرارت بالاتر و رطوبت بالاتر تغییر می‌کند، هوازدگی و پدوژنز نیز افزایش می‌یابد که به توسعه محیط اکسیداسیون پدوژنیک منجر می‌شود و تشکیل دانه‌های مغناطیسی فوق ریز، مانند مگهمایت و مگنتیت، در این محیط اکسیدکننده و در نتیجه افزایش حساسیت مغناطیسی (سانگ و همکاران ۲۰۱۰a) را به وجود می‌آورد. در سعدآباد، مقدار بالای xlf همراه با درصد بالای xfd حاکی از آن است که بسیاری از دانه‌های فوق‌العاده ریز مگهمایت و مگنتیت ممکن است در طول پدوژنز تحت اقلیم دیرینه مرطوب و گرم ایجاد شده باشند. سونگ و همکارانش (۲۰۱۰a) فرض کردند آب‌وهوای مرطوب و گرم برای تشکیل کانی‌های ریز مغناطیسی جدید مطلوب است و پدوژنز قوی باعث ایجاد کانی جدید مغناطیسی می‌شود. همچنین، افزایش بارندگی به هوازدگی شیمیایی و فرایندهای بیولوژیکی و پدوژنز می‌انجامد. بنابراین، مدل پدوژنیک می‌تواند پیشرفت‌های MS در سکانس سعدآباد را توضیح دهد.

نتیجه

مشکل مهم و اساسی انسان در حال حاضر فهمیدن چگونگی تغییرات و سرعت تغییرات آب‌وهوای گذشته زمین با و بدون تأثیر انسان بر چرخه جهانی کربن است. کانی‌های مغناطیسی بقایای به‌دست‌آمده و اغلب اکسیدهای آهن و سولفیدها همه جا در رسوبات به وجود می‌آیند. آن‌ها می‌توانند به مثابه ثبت‌کننده‌های حساس اقلیم‌های گذشته عمل کنند. زیرا با تغییر آب‌وهوا (یخبندان‌ها تا میان یخبندان) کانی‌شناسی و دامنه مغناطیسی و ترکیب و منبع این کانی‌ها تغییر می‌کند. یک مزیت عمده شواهد مغناطیسی دیرینه اقلیم این است که آن‌ها حساس، نسبتاً سریع، ارزان، و غیرمخرب هستند و بازیابی با وضوح بالای داده را در طول زمان زمین‌شناسی و فضای جهانی امکان‌پذیر می‌کنند. مغناطیس محیطی با استفاده از سابقه تغییرات در خواص مغناطیسی رسوبات به جدیدترین پیشرفت مغناطیسی در ژئوفیزیک تبدیل شده و تأثیر عمده و فزاینده‌ای بر درک ما از شرایط آب‌وهوایی گذشته و حال و تغییرات محیطی در سیاره زمین دارد. این سوابق مغناطیسی محیطی شامل بایگانی‌های طبیعی بارندگی‌های گذشته است.

مقادیر بالای xlf و درصد xfd حاکی از بارش زیاد هنگام شکل‌گیری پالئوسول‌هاست. فرایندهای پس از رسوب ممکن است با تولید کانی‌های فرومغناطیسی جدید در طول اکسیداسیون خاک‌های هوازده مقدار MS را افزایش و با کاهش فرایندها مقدار MS را کاهش دهد (فرشن و همکاران ۲۰۰۹). پالئوسول بخش ۱-۶ و ۳b-۵ بارش بیشتر و کاهش MS را نشان می‌دهد که شرایط بسیار مرطوب را ایجاد می‌کند. مطالعات نشان می‌دهد مواد لسی که خاک‌سازی در آن اتفاق افتاده است عامل اصلی تأثیرگذار بر تغییر کانی‌شناسی مغناطیسی و حساسیت‌پذیری مغناطیسی است. این مطالعه همچنین نشان می‌دهد حساسیت‌پذیری مغناطیسی یک پارامتر پیچیده است و کاربرد آن به منزله یک شاهد بارندگی محدودیت‌ها و شرایط خاص دارد و هنگامی که از خواص مغناطیسی لس‌ها برای بازسازی دیرینه اقلیم استفاده می‌شود باید توجه بیشتری به توپوگرافی، محیط رسوبی، و عوامل آب‌وهوایی شود (لیو و همکاران ۲۰۰۸).

سیستم جو نقش غالب انتقال و جابه‌جایی انرژی کره زمین را دارد. با این جابه‌جایی و حرکت، گردش عمومی جو، هوا و اقلیم مناطق مختلف زمین به وجود می‌آید. یکی از عوامل مؤثر بر نوسانات اقلیمی سالیانه کره زمین شاخص‌های پیوند از دور در گستره جهانی و منطقه‌ای است که از مهم‌ترین آن‌ها پدیده النینو- نوسان جنوبی (ENSO)، نوسان اطلس شمالی (NAO)، نوسان شمالگان (AO)، نوسان مادن جولیان (MJO)، و شاخص نوسان جنوبی (SOI) است. هر یک از این پدیده‌ها اقلیم بخش‌های مختلفی از کره زمین را تحت کنترل دارند. نوسان شمالگان و نوسان اطلس شمالی از الگوهای مؤثر پیوند از دور زمستانه در محدوده برون‌حاره نیم‌کره شمالی و از عوامل اصلی کنترل عناصر اقلیمی است. تغییرات شدید نوسان شمالگان و نوسان اطلس شمالی باعث رخدادهای حدی اقلیمی در سراسر عرض‌های میانه و وقوع زمستان‌های شدید می‌شود (چن و همکاران ۲۰۱۴: ۶۲۷).

با توجه به تکرارپذیری سیستم گردش عمومی جو در دوره‌های زمانی مختلف می‌توان نتیجه گرفت به احتمال زیاد در دوره بین‌یخبندان قبلی نیز تغییرات نوسان شمالگان و اطلس شمالی از عوامل اصلی کنترل دما و بارش در منطقه بوده است. همان‌طور که در حال حاضر در منطقه شاهد یک شیب اقلیمی از نکا تا آق‌بند هستیم مطالعات دیرینه بر توالی‌های لس- پالئوسول نیز وجود این پدیده را در گذشته تأیید می‌کند که نشان‌دهنده کاهش توسعه خاک از منطقه نکا به سمت آق‌بند است که کاهش درجه رطوبت و بارندگی از نکا به سمت آق‌بند را نشان می‌دهد.

منابع

- ایوبی، ش.، جلالیان، ا.، کریمیان اقبال، ا. (۱۳۸۲). «آثاری از تغییرات آب‌وهوای دیرینه کواترنری موجود در برخی پارینه‌خاک‌های دو منطقه اصفهان و امام قیس چهارمحال و بختیاری»، علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، س ۷، ش ۳، صص ۵۱ - ۶۸.
- رفعتی آلاشتی، س. (۱۳۸۶). «تغییرپذیری منابع آب و تأثیر اقلیم بر آن، مطالعه موردی: حوضه آبریز سد لتیان»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده علوم انسانی.
- صفایی‌راد، ر.، عزیزی، ق.، مقصودی، م. (۱۳۹۷). «نقش تغییرات سامانه‌های بزرگ‌مقیاس جوئی در تکوین آب‌وهوای پلیستوسن پسین و هولوسن در زاگرس»، د ۴، ش ۳.
- عزیزی، ق. (۱۳۸۳). *تغییر اقلیم، قومس*.
- عساکره، ح. (۱۳۸۶). *تغییر اقلیم، انتشارات دانشگاه زنجان*.
- فیضی، و.، علی‌محمدیان، ح.، عزیزی، ق.، محمدی، ح.، شمسی‌پور، ع. (۱۳۹۵). «ثبث تغییرات اقلیم کواترنر پسین در پذیرفتاری مغناطیسی لس‌های آزادشهر»، *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، د ۴۸، ش ۲، صص ۱ - ۱۹.
- کریمی، ع. (۱۳۸۷). «تعیین منشأ سن‌یابی رسوبات سیلتی، و بررسی تکامل خاک‌ها در لندفرم‌های اطراف مشهد»، رساله دکترای خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران، ۱۵۰ ص.
- ماوی، ه. اس. تاپر، جی. (۱۳۸۸). *آب‌وهوایشناسی کشاورزی - اصول و کاربردهای مطالعات آب‌وهوا در کشاورزی*، مترجم: ح. محمدی، انتشارات دانشگاه تهران.
- مهدی‌پور حسکوئی، ف.، علی‌محمدیان، ح.، صبوری، ج. (۱۳۹۲). «بازسازی آب‌وهوای کواترنر پسین در بخشی از شمال ایران (لس‌های نکا) با استفاده از داده‌های مغناطیسی و ژئوشیمیایی»، *علوم زمین*، س ۲۳، ش ۸۹، صص ۹۷ - ۱۰۸.
- Asakreh, H. (2007). *Climate change*, Zanjan University Press. (In Persian)
- Ayoubi, Sh., Jalalian, A., & Karimian Eghbal, A. (2003). "Evidences of Climate Change Recorded in Quaternary Paleosols from Isfahan and Emam-Gheis (Chaharmahal & Bakhtiary)". *JCPP*. 2003, 7 (3), pp. 51-69. (In Persian)
- Azizi, Gh. (2004). *Climate change*, Qoms. (In Persian)
- Babanin, V. F., Ivanov, A. V., Pukhov, D. E., & Shipilin, A. M. (2000). "Magnetic properties of concretions in surface-gleyed podzolic soils", *Pochvovedenie*, 10: pp. 1224-1232.
- Babanin, V. F., Karpachevskii, L. O., Opalenko, A. A., & Shoba, S. A. (1976). "On the forms of iron compounds in concretions from different soils", *Pochvovedenie*, 5: pp. 132-138.
- Balsam, W. L., Ellwood, B. B., Ji, J., Williams, R. R., Long, X., & Hassani, A. E. (2011). "Magnetic susceptibility as a proxy for rainfall: Worldwide data from tropical and temperate climate", *Quaternary Science Reviews*, 30: pp. 2732-2744.
- Balsam, W. L., Ji, J., & Chen, J. (2004). "Climatic interpretation of the Luochuan and Lingtai loess section, China, based on changing iron oxide mineralogy", *Earth and Planetary Science Letters*, 223: pp. 335-348.
- Bayat, O., Karimi, A., & Khademi, H. (2017). Stable isotope geochemistry of pedogenic carbonates in loess-derived soils of northeastern Iran: Paleoenvironmental implications and

- correlation across Eurasia, *Quaternary International*, Vol. 429, Part B, 30 January 2017, pp. 52-61.
- Beget, J. E. & Hawkins, D. B. (1989). "Influence of orbital parameters on Pleistocene loess deposition in central Alaska", *Nature*, 337, pp. 151-153.
- Bloemendal, J., Liu, X. M., Sun, Y. B., & Li, N. N. (2008). "An assessment of magnetic and geochemical indicators of weathering and pedogenesis at two contrasting sites on the Chinese Loess Plateau", *Palaeogeogr, Palaeoclimatol, Palaeoecol*, 257, pp. 152-168.
- Brunet, M-F., Korotaev, M. V., Ershov, A. V., & Nikishin, A. M. (2003). "The South Caspian Basin: a review of its evolution from subsidence modeling", *Sedimentary Geology*, 156: pp. 119-148.
- Crockford, R. H. & Richardson, D. P. (2000). "Partitioning of rainfall into through fall, stem flow and interception: effect of forest type, ground cover and climate", *Hydrol, Process*, 14(16): pp. 2903-2920.
- Crockford, R. H. & Willett, I. R. (1997). The Magnetic Properties of a Stratigraphic Section of a Sedimentary Soil in New South Wales, Australia [electronic resource], CSIRO Land and Water, <http://www.clw.csiro.au/publications/technical/tr22-97.pdf>.
- Dearing, J. A. (1999). Environmental magnetic susceptibility, using the Bartington MS2 System. Kenilworth, UK: Chi Publ. 54 p.
- Dearing, J. A., Bird, P. M., Dann, R. J. L., & Benjamin, S. F. (1997). "Secondary ferromagnetic minerals in Welsh soils: A comparison of mineral magnetic detection methods and implications for mineral formation", *Geophysical Journal International*, 130: pp. 727-736.
- Dearing, J. A., Dann, R. J. L., Hay, K., Lees, J. A., Loveland, P. J., Maher, B. B., & O'Grady, K. (1996a). "Frequency-dependent susceptibility measurements of environmental materials", *Geophysical Journal International*, 124: pp. 228-240.
- Dearing, J. A., Maher, B. A., & Oldfield, F. (1985). Geomorphological linkages between soils and sediments: the role of magnetic measurements. In: -Richards, K. S., Arnett, R. R., & Ellis, S. (Eds.), *Geomorphology and Soils*, George Allen and Unwin, London, pp. 245-266.
- Djamali, M., De Beaulieu, J. -L., Shah-Hosseini, M., Andrieu-Ponel, V., Ponel, P., Amini, A., Akhiani, H., Leroy, S. A. G., Stevens, L., Lahijani, H., & Brewer, S. (2008). "A late Pleistocene long pollen record from Lake Urmia, Iran", *Quaternary Research*, 69: 413-420.
- Evans, M. E. & Heller, F. (2003). *Environmental Magnetism – Principles and Applications of Enviromagnetics*, Academic Press, San Diego, California.
- Feizi, W., Ali-Mohammadian, H., Azizi, Gh., Mohammadi, H., & Shamsipour, A. (2016). "Registration of Late Quaternary Climate Change in Magnetic Acceptance of Azadshahr Lessons", *Natural Geography Research*, Vol. 48, No. 2, pp. 1-191. (In Persian)
- Feng, Z. D. & Johnson, W. C. (1995). Factors affecting the magnetic susceptibility of a loess-soil sequence, Barton County, Kansas, USA. *Catena*, 24: pp. 25-37.
- Fine, P., Singer, M. J., & Verosub, K. L. (1992). "Use of magnetic susceptibility measurements in assessing soil uniformity in chronosequence studies", *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56: pp. 1195-1199.
- Forte, A. M. & Cowgill, E. (2013). "Late Cenozoic base-level variations of the Caspian Sea: A review of its history and proposed driving mechanisms", *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 386: pp. 392-407.

- Frechen, M., Kehl, M., Rolf, C., Sarvati, R., & Skowronek, A. (2009). "Loess chronology of the Caspian Lowland in Northern Iran", *Quaternary International*, 128: pp. 220-233.
- Ganji, M. H. (1968). Climate. In: Fisher, W. B. (Ed.). *The Land of Iran*. Cambridge, pp. 212-249.
- Ghafarpour, A., Khormali, F., Balsam, W., Karimi, A., & Ayoubi, Sh. (2016). Climatic interpretation of loess-paleosol sequences at Mobarakabad and Aghband, Northern Iran, *Quaternary Research*, 86, pp. 95-109.
- Heller, F. & Evans, M. E. (1995). "Loess magnetism", *Reviwe Geophysical*, 33: pp. 211-240
- Heller, F., Xiuming, L., Tungsheng, L., & Tongchun, X. (1991). "Magnetic susceptibility of loess in China", *Earth and Planetary Science Letters*, 103: pp. 301-310.
- Hošek, J., Hambachb, U, Lisá, L, Matys Grygar, T, Horáček, I, Meszner, S., & Knésl, I. (2015). An integrated rock-magnetic and geochemical approach to loess/paleosol sequences from Bohemia and Moravia (Czech Republic): Implications for the Upper Pleistocene paleoenvironment in central Europe, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 418, pp. 344–358.
- Hu, X. F., Cheng, T. F., & Wu, H. X. (2003). "Do multiple cycles of aeolian depositpedogenesis exist in the reticulate red clay sections in southern China", *Chinese Science Bulletin*, 48(12): pp. 1251-1258.
- Hu, X. F., Wei, J., Xu, L. F., Zhang, G. L., & Zhang, W. G. (2009b). "Magnetic susceptibility of the Quaternary Red Clay in subtropical China and its paleoenvironmental implications", *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 279, pp. 216-232.
- Hu, X. F., Xu, L. F., Pan, Y., & Shen, M. N. (2009a). "Influence of the aging of Fe oxides on the decline of magnetic susceptibility of the Tertiary red clay in the Chinese Loess Plateau", *Quaternary International*, 209, pp. 22-30.
- Karimi, A. (2012). "Determining the origin, sampling of silty sediments, and studying the evolution of soils in landforms around Mashhad", PhD thesis in Soil Science, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology, Iran, 150 p. (In Persian)
- Karimi, A., Frechen, M., Khademi, H., Kehl, M., & Jalalian, A. (2011). "Chronostratigraphy of loess deposits in northeast Iran", *Quaternary International*, 234: pp. 124-132.
- Karimi, A., Frechen, M., Khademi, H., Kehl, M., & Jalalian, A. (2011). "Chronostratigraphy of loess deposits in northeast Iran", *Quaternary International*, 234: pp. 124-132.
- Kehl, M. (2009). "Quaternary climate change in Iran – the state of knowledge", *Erdkunde*, 63: pp. 1-17.
- Kehl, M. (2010). *Loess, loess-like sediments, soils and climate change in Iran*. Relief, Boden, Paläoklima 24. Gebr. Borntraeger science publishers, Stuttgart, Germany, 208 p.
- Kehl, M., Frechen, M., & Skowronek, A. (2005). "Paleosols derived from loess and loess-like sediments in the Basin of Persepolis, Southern Iran", *Quaternary International*, 140/141: pp. 135-149.
- Khormali, F. & Abtahi, A. (2003). Origin and distribution of clay minerals in calcareous arid and semi-arid soils of Fars Province, southern Iran. *Clay Minerals* 38: pp. 511-527.
- 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.
- Kukla, G. & An, Z. (1989). "Loess stratigraphy in Central China", *Palaeogeography*,

- Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 72: pp. 203-225.
- Le Borgne, E. (1955). Susceptibilité magnétique anormale du sol superficiel. *Ann. Geophys.* 11: pp. 399-419.
- Le Borgne, E. (1960). Influence du feu sur les propriétés magnétiques du sol et du granite. *Ann. Geophys.* 16: pp. 159-195.
- Liu, T. S., Ding, Z., & Rutter, N. (1999). Composition of Milankovitch periods between continental loess and deep sea records over the last 2.5 Ma. *Quaternary Science Review*, 18: pp. 1205-1212.
- Liu, X. M., Hesse, P., Beget, J., & Rolph, T. (2001). Pedogenic destruction of ferrimagnetics in Alaskan loess deposits. *Soil Research*, 39: pp. 99-115.
- Liu, X. M., Hesse, P., Rolph, T., & Beget, J. E. (1999). "Properties of magnetic mineralogy of Alaskan loess: evidence for pedogenesis", *Quaternary International*, 62: pp. 93-102.
- Liu, X. M., Rolph, T., An, Z. S., & Hesse, P. (2003). "Paleoclimatic significance of magnetic properties on the red clay underlying the loess and paleosols in China", *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 199: pp. 153-166.
- Liu, X. M., Xia, D., & Liu, D. S. (2007). "Discussion on two models of paleoclimatic records of magnetic susceptibility of Alaskan and Chinese loess (in Chinese)", *Quaternary Sciences*, 27: pp. 210-220.
- Liu, X., Liu, T., Paul, H., Xia, D., Jiri, C., & Wang, G. (2008). Two pedogenic models for paleoclimatic records of magnetic susceptibility from Chinese and Siberian loess, *Science in China Series D: Earth Sciences*, 51: pp. 284-293.
- Mahdipour Haskouei, F., Ali-Mohammadian, H., & Sabouri, J. (2013). "Reconstruction of Late Quaternary Climate in a Part of Northern Iran (Neka Lakes) Using Magnetic and Geochemical Data", *Earth Sciences*, Vol. 23, No. 89, pp. 97-108. (In Persian)
- Maher, B. A. & Thompson, R. (1995). "Paleorainfall reconstructions from pedogenic MS variations in the Chinese loess and paleosols", *Quaternary Research*, 44: pp. 383-391.
- Maher, B. A. (1986). "Characterization of soils by mineral magnetic measurements", *Phys. Earth Planet. Inter.* 2: pp. 76-92.
- Maher, B. A. (1998). "Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosol: paleoclimatic implication", *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 137: pp. 25-54.
- Maher, B. A. (2011). "The magnetic properties of Quaternary aeolian dusts and sediments, and their palaeoclimatic significance", *Aeolian Research*, 3: pp. 87-145.
- Mavi, H. S. & Taper, G. (2013). *Agricultural Meteorology - Principles and Applications of Climate Studies in Agriculture*, Translator: H. Mohammadi, University of Tehran Press. (In Persian)
- Meng, X., Derbyshire, E., & Kemp, R. A. (1997). "Origin of the magnetic susceptibility signal in Chinese loess", *Quaternary Science Reviews*, 16: pp. 833-839.
- Mullins, C. E. (1977). Magnetic susceptibility of the soil and its significance in soil science: a review. *J. Soil Sci.* 28: pp. 223-246.
- Oades, J. M. & Townsend, W. N. (1963). The detection of ferromagnetic minerals in soils and clays. *Eur. J. Soil Sci.* 1492, pp. 179-187.
- Oldfield, F., Hunt, A., Jones, M. D. H., Chester, R., Dearing, J. A., Olsson, L., & Prospero, J.

- M. (1985). "Magnetic differentiation of atmospheric dusts", *Nature*, 317: pp. 516–518.
- Pourmasoumi, M., Khormali, F., Ayoubi, Sh., Kehl, M., & Kiani F. (2019). "Development and magnetic properties of loess-derived forest soils along a precipitation gradient in northern Iran", *Journal of Mountain Science*, Vol. 16, Issue 8, pp. 1848-1868.
- Rafati Alashti, S. (2007). "Variability of water resources and the impact of climate on it, a case study: the catchment area of Latian Dam", M. Sc. Thesis, Tarbiat Modares University, Faculty of Humanities. (In Persian)
- Rahimzadeh, N., Khormali, F., Gribenskia, N., Tsukamoto, S., Kehl, M., Pint, A., Kiani, F., & Frechen, M. (2019). Timing and development of sand dunes in the Golestan Province, northern Iran—Implications for the Late-Pleistocene history of the Caspian Sea, *Aeolian Research*, Vol. 41.
- Roberts, A. P., Cui, Y., & Verosub, K. L. (1995). Wasp – waisted hysteresis loops: Mineral magnetic characteristics and discrimination of components in mixed magnetic systems. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 100, pp.
- Rummery, T. A., Bloemendal, J., Dearing, J. A., & Oldfield, F. (1979). The persistence of fire-induced magnetic oxides in soils and lake sediments. *Ann. Geophys*: 35, pp. 103–107.
- Safaierad, R., Azizi, Gh., & Maghsoudi, M. (2018). "The role of changes in large-scale atmospheric systems in the formation of Late Pleistocene and Holocene climates in the Zagros, Vol. 4, No. 3. (In Persian)
- Sandgren, P. & Thompson, R. (1990). Mineral magnetic characteristics of podzolic soils developed on sand dunes in the Lake Gosciadz catchment, central Poland. *Phys. Earth Planet. Inter.* 60(1-4): pp. 297–313.
- Schaetzl, R. J. & Anderson, S. (2005). *Soils: Genesis and Geomorphology*, Cambridge University Press. 833 p.
- Schatz, A. K., Zech, M., Buggle, B., Gulyás, S., Hambach, U., Markovic, S. B., Sümegid, P., & Scholten, T. (2011). "The late Quaternary loess record of Tokaj, Hungary: Reconstructing palaeoenvironment, palaeovegetation and palaeoclimate using stable C and N isotopes and biomarkers", *Quaternary International*, 240(1-2): pp. 52-61.
- Schwertmann, U. (1988). Occurrence and formation of iron oxides in various pedo-environments. In: Stucki, J. W., Goodman, B. A., Schwertmann, U. (Eds.), *Iron in Soils and Clay Minerals*. D. Reidel, Dordrecht, pp. 267–308. NATO ASI Series C217.
- Shahriari, A., Khormali, F., Kehl, M., Karimi, A., Mousavidastenaeei, M., & Lehndorff, E. (2016). Reconstruction of the palaeoenvironment using biomarkers and clay mineralogy in loess deposits of northern Iran, *Journal of Water and Soil* 2016, Vol. 30, No. 1, pp. 149-161 ref. 37.
- Sheldon, N. D. & Tabor, N. J. (2009). "Quantitative paleoenvironmental and paleoclimatic reconstruction using paleosols", *Earth Science Reviews*, 95: pp. 1-52.
- Singer, M. J. & Fine, P. (1989). Pedogenic factors affecting magnetic susceptibility of northern Californian soils. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 53(4): pp. 1119–1127.
- Song, Y. G., Nie, J. S., Shi, Z. T., Wang, X. L., Qiang, X. K., & Chang, H. (2010b). "A preliminary study of magnetic enhancement mechanisms of the Tianshan loess", *Journal of Earth Environment*, 1(1): pp. 60-67.
- Song, Y. G., Shi, Z. T., Fang, X. M., Nie, J. S., Naoto, I., Qiang, X. K., & Wang, X. L. (2010a).

- “Loess magnetic properties in the Ili Basin and their correlation with the Chinese Loess Plateau”, *Science in China: Earth Sciences*, 53(3): pp. 419-431.
- 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.
- Stöcklin, J. (1968). Structural history and tectonics of Iran: A review: American Association of Petroleum Geologists, Vol. 52, pp. 1229–1258.
- Sun, J. & Liu, T. (2000). “Multiple origins and interpretations of the magnetic susceptibility signal in Chinese wind-blown sediments”, *Earth and Planetary Science Letters*, 180: pp. 287-296.
- Taheri, M., Khormali, F., Wang, X., Amini, A., Landi, A., Wei, H., Kehl, M., & Chen, F. (2016). Clay mineralogy and geochemistry of the Lower Pleistocene Loess in the Iranian Loess Plateau (Agh Band section) and implications for its provenance and paleoclimate change, <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.09.011>
- Thomas, D. S. G., Bateman, M. D., Mehrshadi, D., & O’Hara, S. L. (1997). “Development and environmental significance of an Eolian Sand Ramp of Last-Glacial Age, central Iran”, *Quaternary Research*, 48: pp. 155-161.
- Thompson, R. & Oldfield, F. (1986). Environmental Magnetism, Allen and Unwin, London, pp. 1–227.
- Tite, M. S. & Linington, R. E. (1975). “Effect of climate on the magnetic susceptibility of soils”, *Nature*, 256: pp. 565–566. <https://doi.org/10.1038/256565a0>.
- Torrent, J., Liu, Q. S., & Bloemendal, J. (2007). “Magnetic enhancement and iron oxides in the upper Luochuan loesspaleosol sequence, Chinese Loess Plateau”, *Journal of Soil Science Society of America*, 71: pp. 1570-1578.
- Vlaminck, S., Kehl, M., Rolf, C., Oliver Franz, S., 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.
- Vodyanitskiy, Y. N. (1982). Formation of ferromagnetics in sodpodzolic soil. *Sov. Soil Sci.* 14: pp. 89–100.
- Zhou, L. P., Oldfield, F., Wintle, A. G., Robinson, S. G., & Wang, J. T. (1990). “Partly pedogenic origin of magnetic variations in Chinese loess”, *Nature*, 346: pp. 737–739.