

## بازسازی نوسانات اقلیمی در توالی لس-پالتوسول منطقه سعدآباد ۳ (شمال ایران) با

### استفاده از داده‌های میکرومورفولوژی و شاخص MISECA

لیلا رسولی؛ دانشجوی دکتری علوم خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، گرگان، ایران

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

فرشاد کیانی؛ استاد علوم خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، گرگان، ایران

سحر ملکی؛ دکتری اقلیم شناسی، سازمان زمین شناسی و اکتشاف معدن کشور، تهران، ایران

رجب کربانف؛ استاد گروه هیدرواکولوژی، دانشگاه ایالتی مسکو، مسکو، روسیه

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۸

## چکیده

توالی لس-پالتوسول سعدآباد در دامنه‌های شمالی رشته‌کوه البرز به‌عنوان آرشیوی ارزشمند برای بازسازی نوسانات اقلیمی پلیستوسن-هولوسن شناخته می‌شود و شواهدی از دوره‌های سرد و خشک و نیز گرم و مرطوب را در خود ذخیره کرده است. پژوهش موردنظر با هدف بررسی ویژگی‌های میکرومورفولوژیکی و شاخص توسعه خاک MISECA در افق‌های مختلف این توالی انجام گردیده است. توالی مورد پژوهش سعدآباد ۳ در دامنه‌های شمالی رشته‌کوه البرز، استان گلستان، شهر گرگان قرار گرفته است و دارای ارتفاع تقریبی حدود دوازده متر و شامل بیست و هشت افق مجزا می‌باشد. به منظور بررسی میکرومورفولوژیکی این توالی، نمونه‌های دست نخورده تهیه شد و پس از تهیه مقطع نازک از نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی نشان داد که افق‌های پالتوسول دارای ساختار بلوکی، پوشش‌های رسی، نودول‌های آهکی، پدوفیچرهای آهن و منگنز و شاخص بالای تکامل خاک هستند که همگی بیانگر شرایط اقلیمی مرطوب‌تر و فرآیندهای خاک‌زایی می‌باشند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که منطقه سعدآباد ۳ در طول زمان تحت تأثیر نوسانات اقلیمی چندمرحله‌ای قرار گرفته و شرایط متنوع سرد و خشک و گرم و مرطوب را تجربه کرده است؛ شرایطی که زمینه‌ساز تکامل ژنتیکی خاک در این ناحیه بوده است میزان بارش سالانه ماکزیمم در توسعه‌یافته‌ترین افق خاک، یعنی افق Btkgss1 و Btk1 حدود ۷۴۱ میلی‌متر برآورد گردید. و در مقابل، در کم‌توسعه‌یافته‌ترین افق، افق BCkg با میزان ۴۷۰ میلی‌متر مشخص شد. و در افق‌های Bkkm و CBk که همزمان توزیع خاک و فرونشست ذرات لسی رانشان می‌دهد میزان بارندگی تا حدود ۳۷۰ میلی‌متر نیز کاهش یافته است.

واژه‌های کلیدی: میکرومورفولوژی خاک- اقلیم گذشته- توالی های لس - پالتوسول

## مقدمه

سطح زمین به‌طور مستقیم تحت تأثیر اقلیم و شرایط محیطی قرار دارد که منجر به ثبت و نگهداری اطلاعات متنوعی در طول فرآیندهای تشکیل و دگرگونی خاک می‌شود. بنابراین همانند خاک‌های مدرن، خاک‌های دیرینه نیز ویژگی‌هایی را نشان می‌دهند که شرایط زمان شکل‌گیری آن‌ها را منعکس می‌کنند؛ شاخص‌ها و نشانگرهای موجود در خاک‌های دیرینه می‌توانند به عنوان ابزارهایی قدرتمند در بازسازی شرایط محیطی گذشته مورد استفاده قرار گیرند (Sheldon and Tabor, 2009). از این رو در سال‌های اخیر، خاک‌های دیرینه به عنوان شاخص‌هایی مفید و قابل اعتماد شناخته شده‌اند که دانشمندان از طریق آن‌ها موفق به بازسازی تغییرات محیطی و اقلیمی شده‌اند. (Eze et al., 2014) درواقع دوره‌های مختلف زمین‌شناسی که هرکدام شاهد تغییرات قابل توجهی در شرایط آب‌وهوایی بوده‌اند، بارها باعث تغییرات و نوسانات شدید در کره زمین شده‌اند. یکی از این دوره‌ها، دوره کواترنری است که آب‌وهوای آن با دوره‌های متناوب سرد یخچالی و گرم بین‌یخچالی مشخص می‌شود. این تغییرات به خوبی در پروکسی رسوبات دریایی، رسوبات دریاچه‌ای و لس-پالتوسول‌های قاره‌ای حفظ شده‌اند. در این میان، لس-پالتوسول‌های قاره‌ای به عنوان آرشیوهای مهم برای بازسازی تغییرات آب‌وهوایی پلیستوسن-هولوسن در نظر گرفته می‌شوند. (Shah, 2021)

لس به‌عنوان یکی از رسوبات شاخص دوره کواترنری، به‌طور گسترده در سطح خشکی‌های زمین پراکنده شده و حدود ۱۰ درصد از مساحت خشکی‌های جهان را پوشش می‌دهد. این رسوبات عمدتاً از ذرات ریزدانه تشکیل شده‌اند که توسط باد حمل و در مناطق مختلف ته‌نشین شده‌اند. در بسیاری از مناطق، لس‌ها به‌صورت توالی‌های تناوبی با خاک‌های قدیمی یا پالتوسول‌ها ظاهر می‌شوند که به آن‌ها توالی لس-پالتوسول گفته می‌شود. این توالی‌ها به‌عنوان یکی از مهم‌ترین آرشیوهای زمینی تغییرات اقلیمی کواترنری شناخته می‌شوند و اطلاعات ارزشمندی درباره نوسانات اقلیمی در بازه‌های زمانی مختلف ارائه می‌دهند. (Muhs & Budahn, 2006) تغییرات اقلیمی در این توالی‌ها عمدتاً از طریق شدت هوازگی لس‌ها قابل شناسایی است؛ فرآیندی که منجر به تشکیل پالتوسول‌ها می‌شود. در بیشتر بخش‌های کمربند لسی اوراسیا، رسوب‌گذاری گرد و غبار و تشکیل لس‌ها در دوره‌های سرد و خشک (استادیال‌ها) رخ داده است، در حالی که پالتوسول‌ها در دوره‌های بین‌یخبندان و بین‌استادیال، تحت شرایط اقلیمی گرم‌تر و مرطوب‌تر شکل گرفته‌اند. (Vlaminck et al., 2021) دشت ساحلی خزر در شمال ایران بخشی از کمربند لُس اوراسیا است که از شمال غرب اروپا تا آسیای مرکزی و چین امتداد دارد. رسوبات لُس شمال ایران به واسطه ضخامت چشمگیرشان تا حدود ۳۰ متر در دامنه‌های البرز و نزدیک به ۶۰ متر در فلات لُس شمال ایران به‌عنوان آرشیوهای ارزشمند برای مطالعات کواترنری شناخته می‌شوند حدود ۱۷ درصد (۳۲۰۰ کیلومتر مربع) از مساحت گرگان توسط رسوبات لسی پوشیده شده است (Amiri et al., 2025). این رسوبات نه‌تنها اطلاعاتی دقیق از تغییرات اقلیمی گذشته ارائه می‌دهند، بلکه نقش پیونددهنده‌ای میان آرشیوهای آسیای مرکزی و اروپا ایفا می‌کنند. مطالعات انجام‌شده توسط پژوهشگرانی چون (Kehl et al., 2005; Frechen and Kehl, 2010; Kehl et al., 2021; Vlaminck et al., 2016) نشان داده‌اند که این دنباله‌ها ظرفیت بالایی برای بازسازی تغییرات دما، رطوبت، شدت باد و تحول چشم‌انداز در دوران کواترنری دارند. (Kehl et al., 2021; Vlaminck et al., 2016). تغییرات ساختاری خاک را می‌توان به کمک پروکسی‌های مختلف که تحت تأثیر اقلیم شکل می‌گیرند مورد بررسی قرار داد، یکی از دقیق‌ترین پروکسی‌ها استفاده شده میکرومورفولوژی خاک می‌باشد. در دهه‌های اخیر، استفاده از میکرومورفولوژی در مطالعات دیرینه‌اقلیم و زمین‌شناسی به‌طور چشمگیری افزایش یافته و به‌عنوان ابزاری مؤثر در تبیین فرآیندهای پدوژن و بازسازی شرایط محیطی گذشته شناخته شده است. این روش در تحلیل نهشته‌های خاکی با منشأهای مختلف، از جمله رسوبات بادی و آبرفتی، کاربرد

گسترده‌ای یافته است (Khormali & Kehl, 2011; Vlaminck et al., 2016; Taheri et al., 2017). روش‌های قطعی از فرآیندهای خاک‌زایی ارائه می‌دهد و به‌ویژه در تشخیص ویژگی‌هایی مانند پوشش‌های رسی ناشی از انتقال رس بسیار مؤثر است. این علم با تمرکز بر بررسی ویژگی‌های پدولوژیکی در مقیاس میکروسکوپی، اطلاعات ژنتیکی ارزشمندی درباره ساختار خاک شامل مشاهده و تحلیل دقیق روابط بین اجزای معدنی، ذرات و فضاهای خالی موجود در خاک و رسوبات و تغییرات آن در طول زمان ارائه می‌دهد؛ اطلاعاتی که برای بازسازی شرایط اقلیمی گذشته از اهمیت بالایی برخوردارند. (Sprafke et al., 2014; Mao et al., 2021)

در این روش، نمونه‌های دست‌نخورده خاک با استفاده از تکنیک‌های میکروسکوپی و اولتراسکوپی مورد مطالعه قرار می‌گیرند تا اجزای سازنده و روابط فضایی آن‌ها در مقیاس میکروسکوپی مشخص شود. با این حال، تمرکز اصلی بر تحلیل برش‌های نازک با استفاده از میکروسکوپ‌های پلاریزه است که امکان مشاهده ویژگی‌های نوری و ساختاری اجزای خاک را فراهم می‌سازد. (Eze et al., 2014; Stoops, 2003) که با هدف شناسایی اجزای رسوبی، تعیین روابط متقابل آن‌ها و بازسازی فرآیندهای مؤثر در تشکیل یا تحول خاک به کار می‌رود (Bronger and Heinkele, 1989; Khormali & Kehl, 2011; Mao et al., 2021; Stoops et al., 2018, 2020; Taheri et al., 2017; Vlaminck et al., 2018). تحلیل‌ها عمدتاً داده‌های کیفی درباره مورفولوژی کلی، شکل دانه‌های کوارتز، ترکیب کانی‌شناسی و میزان کربنات ارائه می‌دهند و اطلاعات ارزشمندی درباره درجه هوازدگی و شرایط اقلیمی حاکم در زمان تشکیل خاک فراهم می‌کنند (Bronger et al., 1998a; Panin et al., 2019b, 2023a; Zhao et al., 2015; Kehl et al., 2024; Zickel et al., 2024).

مطالعات میکرومورفولوژیکی با ارائه شواهد عینی از پدولوژی‌ها، نقش مکمل و حیاتی در این زمینه ایفا می‌کنند. در این میان، تشکیل پوشش‌های رسی (Clay coatings) به‌عنوان شاخصی کلیدی از دوره‌های مرطوب‌تر اقلیمی شناخته شده است. بهشتی و همکاران (۱۴۰۰) در مطالعه‌ای میکرومورفولوژیکی بر روی افق‌های آرچلیک و پتروکلیک در مقطع لسی آبرفتی غرب مشهد، پوشش‌های ترکیبی کربنات و رس را مشاهده کردند که نشان‌دهنده تناوب دوره‌های خشک و مرطوب طی کواترنر پایانی در منطقه است. طاهری و همکاران (۲۰۱۹) نیز با مطالعه توالی‌های لس در آق‌بند، تشکیل پوشش‌های رسی را با اقلیم مرطوب و نیمه‌مرطوب مرتبط دانستند. فرپور و همکاران (۲۰۱۷) در تحلیل روابط خاک-ژئومورفولوژی در پلایای سیرجان در جنوب ایران، پوشش‌ها و پرشدگی‌های رسی را در خاک‌های پدیمنت یافتند که بازگوکننده وجود اقلیم مرطوب‌تر در گذشته این منطقه است. این یافته‌های درون منطقه‌ای با دیدگاه (Thompson, Schaetzl 2015) مطابقت دارد که بر اساس مطالعه میکرومورفولوژی خاک در نواحی خشک و نیمه‌خشک، وجود پوشش‌های رسی را به حضور دوره‌های مرطوب‌تر در پلیستوسن و اوایل هولوسن نسبت داده‌اند.

در مقابل، ویژگی‌های کربناتی و ژیبسی در این توالی‌ها اطلاعات ارزشمندی درباره دوره‌های خشکی و نوسانات سطح آب‌زیرزمینی ارائه می‌دهند. خرمالی و همکاران (۲۰۰۶) فرآیندهای پیچیده‌ای نظیر حل شدن (هوادیدگی)، انتقال و رسوب را در تشکیل کربنات‌های خاک مؤثر دانسته و برای تشکیل آهک سوزنی‌شکل، وجود شرایط محیطی خاصی از جمله بارندگی نسبتاً زیاد، دمای مناسب و پوشش گیاهی متراکم را ضروری می‌دانند که نشان‌دهنده پیچیدگی تفسیر این ویژگی‌هاست (Ghergherechi et al., 2009). با بهره‌گیری از تکنیک میکرومورفولوژی و مطالعه تجمعات چندگانه آهک‌های ثانویه نشان دادند که طی ۵۰۰ هزار سال گذشته، منطقه مورد مطالعه چندین دوره مرطوب‌تر از حال حاضر را تجربه کرده است. در همین راستا، فرپور و همکاران (۲۰۱۷) نیز در دشت دامنه‌ای و پلایای سیرجان، اشکال عدسی‌شکل گچ و صفحات درهم‌قفل گچ را گزارش کردند که با شرایط تبخیری شدید و اقلیم خشک در زمان تشکیل مرتبط هستند.

مقایسه این یافته‌های داخلی با پژوهش‌های جهانی، جامعیت رویکردهای مذکور را آشکار می‌سازد. به‌عنوان نمونه، مطالعه (Eze et al., 2014) بر روی یک توالی پالتوسول در جنوب آفریقا نشان داد که پدوویژگی‌های میکرومورفولوژیکی بیانگر شرایط آب‌وهوایی نیمه‌گرمسیری و مدیترانه‌ای در زمان تشکیل خاک است، در حالی که رسوبات لس منعکس‌کننده آب‌وهوای (نیمه)خشک هستند که شباهت زیادی به الگوی نوسانات ثبت‌شده در توالی‌های ایران دارد. یکی از ابزارهای تحلیلی مهم در زمینه میکرومورفولوژی خاک، شاخص توسعه خاک میسکا است که توسط (Khormali et al., 2003) برای ارزیابی درجه توسعه افق‌های آرجلیک در خاک‌های بسیار آهکی مناطق خشک و نیمه‌خشک معرفی و تصحیح شد و هدف آن ارزیابی درجه توسعه خاک‌ها در مناطق خشک و نیمه‌خشک با سنگ مادر آهکی است نسخه‌ای اصلاح‌شده از شاخص (MISODI) می‌باشد که بر پایه ارزیابی کمی ویژگی‌های میکرومورفولوژیکی خاک طراحی شده است. این شاخص مجموعه‌ای از معیارهای ساختاری و کانی‌شناسی، از جمله ریزساختمان، b-fabric، پوشش‌های رسی، نواحی دکربناته، حضور اکسیدهای آهن و منگنز، و میزان تغییرات دانه‌های کانی را شامل می‌شود. هر یک از این ویژگی‌ها با استفاده از یک سیستم نمره‌دهی ساده ارزیابی شده و مجموع امتیازات نهایی در بازه‌ای از صفر تا ۲۴ تعیین می‌شود. نمرات بالاتر بیانگر سطح بالاتر توسعه خاک هستند که امکان بازسازی شرایط اقلیمی گذشته را فراهم می‌کنند، و در درک بهتر فرآیندهای خاک‌زایی در مناطق خشک و نیمه‌خشک نیز نقش کلیدی دارند (Amiri et al., 2021, 2012; Khormali et al., 2012; Khormali & Shamsi, 2009). مطالعات لس-پالتوسول به‌عنوان یکی از ارزش‌مندترین بایگانی‌های دیرینه‌اقلیم، به‌ویژه در شناسایی نوسانات اقلیمی کوتاه‌تر در فلات ایران نقش اساسی داشته‌اند. در این راستا، پژوهش‌های متعددی به کاربرد شاخص‌های کمی و کیفی برای کمی‌سازی تکامل خاک و بازسازی شرایط گذشته پرداخته‌اند. شاخص تکامل خاک (MISECA) به‌عنوان یکی از ابزارهای کلیدی در این حوزه مطرح شده است. (Shahriari et al., 2015) با بررسی سه توالی لس-پالتوسول در استان‌های مازندران و گلستان (آق‌بند، مبارک‌آباد و نکا) نشان دادند که این شاخص نه تنها قادر به تفکیک دقیق افق‌های پدوژنیک است، بلکه همبستگی معناداری با میزان بارندگی دارد که کاربرد آن را در بازسازی اقلیم گذشته تأیید می‌کند. (Taheri et al., 2017) نیز با تمرکز بر نهشته‌های قرمز پلیستوسن زیرین در فلات لس ایران، مقادیر بالای میسکا را در افق‌های پالتوسول ثبت کردند که بیانگر توسعه شدید خاک در شرایط گرم‌تر و مرطوب‌تر بود. این رویکرد کمی‌سازی، اخیراً توسط (Amiri et al., 2025) در توالی بلوچ‌آباد شمال ایران به کار گرفته شد و نتایج آن با مراحل بین‌یخبندان پلیستوسن و روند خشکی تدریجی تا عصر حاضر همخوانی کامل داشت.

با توجه به اینکه توالی مورد مطالعه بازه زمانی تا پلیستوسن را در بر می‌گیرد، از نظر مطالعات اقلیمی و محیطی مورد توجه قرار گرفته است این توالیها یک آرشیو استثنایی از تغییرات محیطی در این منطقه و تاریخچه سطح دریای خزر را ارائه می‌دهد و بنابراین با توجه به مطالعات انجام گرفته و نقش و تاثیر بسزایی که مطالعات میکرومورفولوژیکی و شاخص میسکا در بازسازی شرایط اقلیمی گذشته داشته‌اند در این پژوهش نیز دو شاخص میکرومورفولوژی و میسکا به منظور برآورد این مسئله که آیا شاخص‌های مورد مطالعه در این پژوهش همانند سایر مناطق برای منطقه سعدآباد ۳ نیز پاسخگو می‌باشد جهت برآورد میزان توسعه یافتگی و بارش منطقه استفاده گردید.

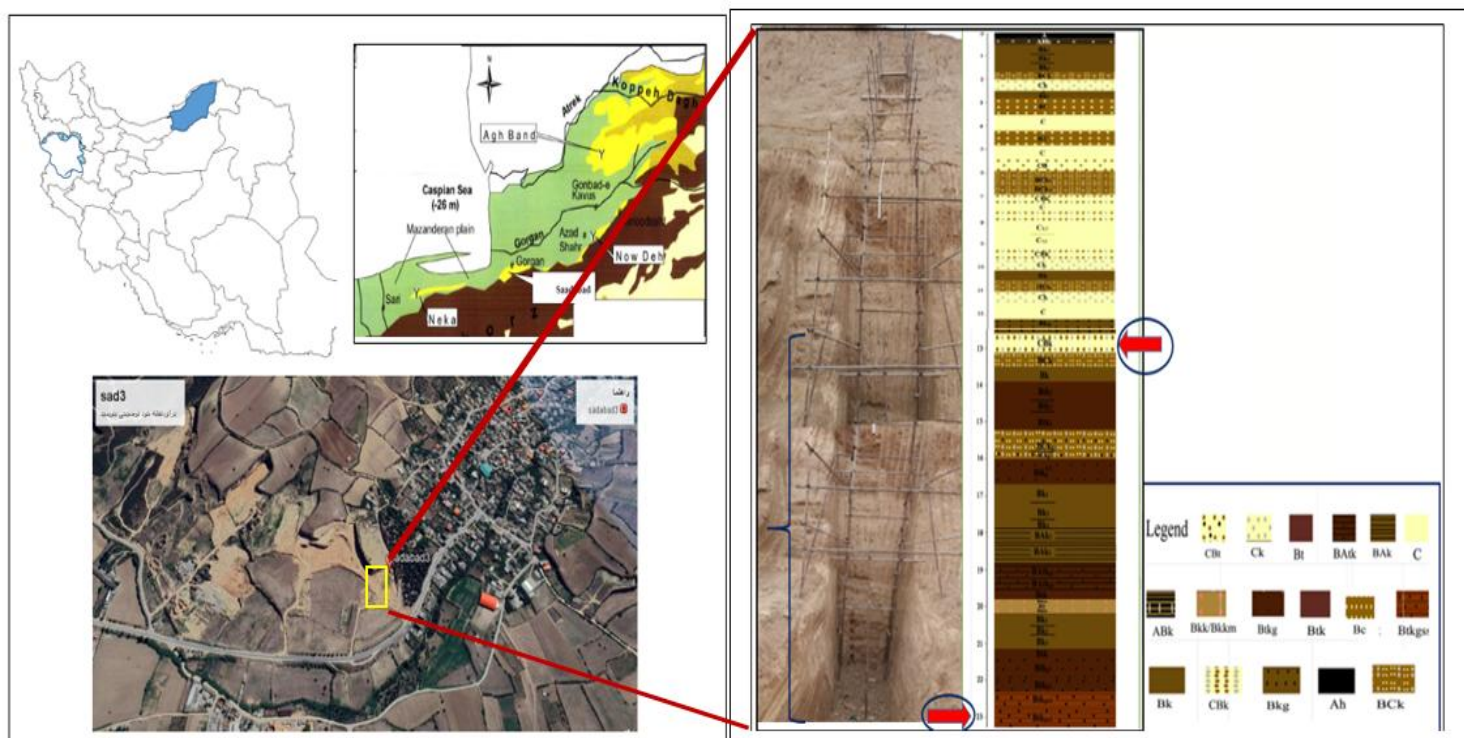
## منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد بررسی توالی لس-خاک قدیمی سعدآباد(۳) در دامنه‌های شمالی رشته‌کوه البرز در استان گلستان، در نزدیکی شهر گرگان در محدوده طول جغرافیایی ۵۴ درجه و ۲۲ دقیقه و ۳۰ ثانیه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۴۹ دقیقه و ۲۳ ثانیه شمالی واقع شده است. پیش از این دو سکانس دیگر در منطقه مورد مطالعه به نام‌های سعدآباد ۱ توسط ملکی و همکاران در ۱۴۰۲) و سکانس سعدآباد ۲ نیز توسط شهپوری و همکاران در سال ۱۳۹۸ مورد مطالعه قرار گرفته است. به طور کلی این منطقه دارای میانگین بارندگی سالانه ۶۲۰ میلیمتر است و از نظر آب‌وهوایی معتدل و نیمه مرطوب محسوب می‌شود. این منطقه دارای رژیم رطوبتی و حرارتی زیریک و ترمیک است دمای متوسط سالیانه خاک در رژیم حرارتی ترمیک بین ۱۵ تا ۲۲ درجه سانتیگراد است. اختلاف دمای متوسط خاک در تابستان و زمستان در این رژیم حرارتی بیش از ۶ درجه سانتیگراد است. بر اساس آمار هواشناسی، این اراضی به لحاظ اقلیمی (طبق سیستم طبقه بندی دومارتن و منحنی آمبروترمیک) و با داشتن ۱۰۰ تا ۱۲۵ روز خشک ( $P < 2T$ )، جزء مناطق آب و هوایی مدیترانه‌ای گرم محسوب می‌شوند و دارای رژیم رطوبتی و حرارتی زیریک و ترمیک است. این منطقه شامل توالی‌های لس پالتوسول از اواسط تا اواخر دوره پلیستوسن است که در امتداد پای شیب‌های شمالی رشته کوه البرز واقع شده‌اند.

گزارش‌ها نشان می‌دهند که این رسوبات بادرفتی شامل تناوب‌هایی از افق‌های لس با رنگ زرد کدر و پالتوسول‌های با درجه تکامل یافتگی متوسط و رنگ قهوه‌ای هستند که به ترتیب در طول دوره‌های یخچالی و بین یخچالی تشکیل شده‌اند. با توجه به موقعیت جغرافیایی، شرایط آب‌وهوایی و جنس خاکها، دارای پوشش گیاهی متنوعی از جمله جنگلهای انبوه، چمنزارها و استپ‌ها است. مجاورت با دریای خزر و رشته کوه‌های البرز باعث شده که در دامنه شمالی البرز، از خط ساحلی دریای خزر تا قله مرتفع، پوشش گیاهی متنوعی به صورت نوارهای مشخص به وجود آید. ارتفاعات کمتر از ۱۵۰۰ متر تا کوه پایه‌ها پوشیده از جنگلهای انبوه پهن برگ است و از کوهپایه‌ها به طرف جلگه‌ها، محصولات زراعی پوشش گیاهی منطقه را تشکیل می‌دهند.

## مواد و روش‌ها

پس از بازدیدهای میدانی و تعیین منطقه مناسب از نظر کامل بودن سکانس لس-پالتوسول نسبت به سکانس‌های واقع در نزدیکی دریای خزر، سکانس منطقه سعدآباد ۳ به عنوان کامل ترین سکانس مورد نظر در منطقه تعیین گردید (شکل ۱) سپس داربست‌هایی بر روی توالی مورد مطالعه جهت برداشت دقیق نمونه‌ها از ارتفاع دقیق نصب شد. افق‌های خاک بر اساس راهنمای رده‌بندی خاک آمریکایی (Soil Survey Staff, 2014) و سیستم WRB (2006) طبقه بندی و نامگذاری گردید سپس نمونه‌های دست نخورده به از هر افق برداشت شد و برای تهیه مقاطع نازک به آزمایشگاه انتقال داده شد.



شکل ۱: منطقه مورد مطالعه - افق‌های خاک ب اساس راهنمای رده‌بندی خاک آم نکایی (Soil Survey Staff, 2014)

## آماده سازی نمونه های میکرومورفولوژی

نمونه‌های دست نخورده خاک پس از خشک شدن، به وسیله رزین پلی استر تلقیح شد. با توجه به گرانروی زیاد رزین، به ازای ۶۰ درصد رزین پلی استر از ۴۰ درصد استون به عنوان رقیق‌کننده استفاده گردید. پیش از تلقیح، به مخلوط استون و رزین، ۲۰ قطره اسید استئاریک به عنوان کاتالیست و ۱۰ قطره سخت‌کننده کبالت افزوده شد. تلقیح نمونه‌ها در چند مرحله با استفاده از پمپ مکش در دسیکاتور، به منظور خروج هوای حبس شده صورت گرفت. بعد از سخت شدن نمونه‌ها به وسیله دستگاه برش به صورت صفحات ۱ سانتی‌متری از وسط برش داده شده و یک سطح آن به وسیله صفحه سایش صاف و صیقلی شد. سطح صیقلی شده بر روی لام‌های شیشه‌ای مات شده به وسیله مخلوطی از رزین، چند قطره سخت‌کننده و کاتالیست، چسبیده و ثابت شد. نمونه‌های چسبیده به لام شیشه‌ای با دستگاه برش به ضخامت حدود ۲ میلی‌متر برش داده و سپس به کمک دستگاه سایش به ضخامت ۷۰ - ۱۰۰ میکرون رسانده شد. متعاقباً، آنها بر روی اسلایدهای شیشه‌ای نصب شدند، به طور دقیق به برش‌هایی برش داده شدند و برای رسیدن به ضخامت تقریبی ۳۰ میکرومتر، طبق روش‌شناسی مطرح شده توسط مورفی (۱۹۸۶)، صیقل داده شدند. توصیفات میکرومورفولوژیکی با استفاده از میکروسکوپ پلاریزاسیون تحت نورهای پلاریزه مسطح و متقاطع (PPL)، (XPL) انجام شد. تفسیر و تعاریف مقاطع نازک بر اساس روش‌های ارائه شده توسط (Bullock et al., 1985; stopes, 2003; stopes et al., 2018) انجام گردید.

## - روش اندازه گیری شاخص میسکا

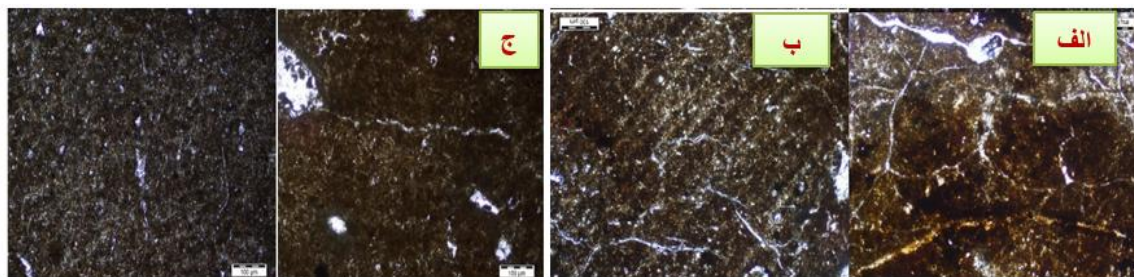
برای بررسی توسعه و تکامل خاکرخ ها بر اساس شاخص های میکرومورفولوژیک از مقاطع نازک تهیه شده از افق ها استفاده شد ضمن کمی نمودن برخی از پارامترها با استفاده از درجه تکامل یافتگی خاکها با توجه به جداول ارائه شده توسط (لیاقت و خرمالی، ۱۳۹۰؛ خرمالی و همکاران، ۲۰۰۳) و جدول تکمیل شده آنها و در نهایت با در نظر گرفتن مقدار تجمعی شاخص های مذکور درجه توسعه خاک تعیین شد. در این روش به هر کدام از پارامترهای میکرومورفولوژیکی بی فابریک، فراوانی پوسته های رسی، مناطق تخلیه شده از آهک، میکروساختمان، اکسیدهای آهن و منگنز و درجه هوادیدگی کانی ها وزنی اختصاص داده می شود و نهایتا با توجه به مقدار تجمعی پارامترها درجه توسعه خاک محاسبه میگردد.

## یافته های پژوهش

### ۱- ویژگی های میکرومورفولوژیکی افق های توالی مورد مطالعه

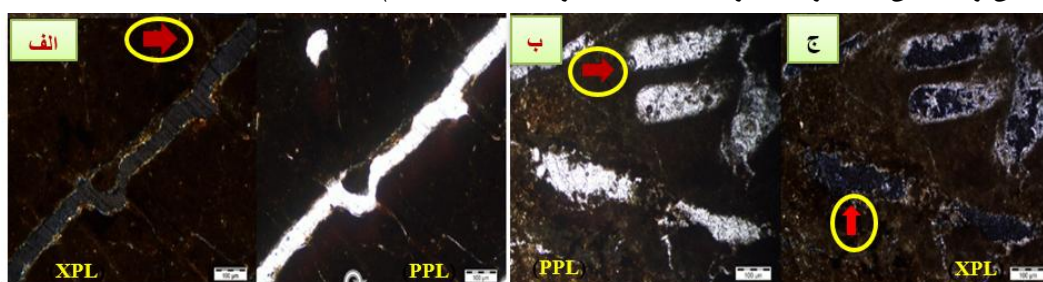
#### ۱-۱- میکروساختمان و حفرات

باتوجه به تفسیر و تشریح مقاطع تهیه شده از توالی مورد مطالعه میکرو ساختمان توده ای در افق های CBk، Bck، Bckg، CBkk و میکرو ساختمان مکعبی زاویه دار و مکعبی بدون زاویه با تمایز ضعیف تا قوی در سایر افق ها مشاهده گردید در واقع مشاهده میکرو ساختمان توده ای تا مکعبی زاویه دار و بدون زاویه نشان از یکسری شرایط خاص در شرایط تشکیل افق ها و خاک منطقه مورد مطالعه می باشد بدینگونه که تشکیل میکروساختمان خاک حاصل فرآیندهای خاکساز می باشد که خاکدانه ها از طی این فرآیند و پروسه ها از ذرات خاک تشکیل میشود بنابراین می توان دریافت که به علت عدم تکامل و تشکیل پدوژنیکی افق های لس میکرو ساختمان آن ها از نوع توده ای می باشد و باتوجه به نتایج تحقیقات انجام شده قبلی همبستگی زیادی مابین ساختمان توده ای و مقادیر سیلت افق ها می باشد بابررسی مقادیر اندازه ذرات خاک و مقادیر بافت خاک افق های لس توالی مورد مطالعه در سعدآباد ۳ که دارای میکرو ساختمان توده ای می باشد مقادیر سیلت در این افق ها نیز دارای بیشترین مقدار می باشد و حالت عکس آن برای افق های کمتر تکامل یافته و خاک های متکامل تر و پالئوسول ها می باشد این افق ها دارای ساختمان مکعبی بدون زاویه ضعیف تا متوسط و مکعبی زاویه دار با تمایز ضعیف تا قوی می باشد این نوع ساختمان به علت انقباض و انبساط خاک در نتیجه خیس شدن و خشک شدن خاک ایجاد میگردد که بابتایج مطالعات قازانچایی و همکاران (۱۳۸۷) مطابقت دارد بابررسی پالئوسول ها که در توالی مورد مطالعه تشخیص داده شده است که شامل افق های Btkgss1، Btk، Bk1، BAtkg1، BAk1، Btkgss2 می باشد مشاهده گردید که دارای ساختمان مکعبی زاویه دار با تمایز ضعیف تا قوی می باشد بنابراین میکروساختمان را می توان به عنوان فاکتور دخیل در شناسایی لس و پالئوسول ها از همدیگر مورد بررسی قرار داد باتوجه به مطالعات خرمالی و همکاران در سال ۲۰۱۱ عنوان کردند که میکرو ساختمان خاک ارتباط تنگاتنگی با مقادیر دما و بارندگی دارد به گونه ای که هرچقدر دما بیشتر افزایش یابد و شاهد کاهش در مقدار بارندگی باشیم میکروساختمان از مکعبی زاویه دار و بدون زاویه با تمایز قوی به سمت ساختمان ضعیف تر مانند ساختمان توده ای و ساختمان مکعبی با تمایز ضعیف پیش می رویم بنابراین همچنان که نتیجه شد در توالی مورد مطالعه ما نیز این امر صدق میکند و میکروساختمان مکعبی زاویه دار با تمایز خوب در پالئوسول ها و میکرو ساختمان با تمایز ضعیف و میکروساختمان توده ای در افق های لس مشاهده گردید.



شکل ۲: نمای میکروسکوپی میکرو ساختمان در نور صفحه ای (PPL) (الف) مکعبی. زاویه دار (ب) میکرو ساختمان مکعبی بدون زاویه (ج) میکرو ساختمان توده ای

بررسی حفرات توالی مورد مطالعه در سعدآباد ۳ نشان داد که اکثر حفرات از نوع کانال، حجره، واگ و پلین (صفحه‌ای) می‌باشد در افق‌های لس مقطع مورد مطالعه بیشترین حفرات از نوع کانال و واگ و در برخی موارد چمبر نیز مشاهد گردید اما حفرات غالب در پالتوسول‌ها کانل و چمبر و واگ و پلین‌ها بود که در همه افق‌های پالتوسول توالی مورد مطالعه به وضوح و به مقدار قابل توجه قابل مشاهده بود وجود حفرات کانل و حجره یا چمبرها نشان دهنده شرایط بیولوژیکی و فعالیت جانوران و گیاهان می‌باشد که آشکارا نشان از شرایط مناسب برای نموی گیاهان می‌باشد که کانال در اثر نفوای رشد ریشه گیاه در خاک و بقایای آن و همچنین فعالیت و حرکت جانوران در خاک ایجاد میگردد (Kemp, 2002; Zárate et al., 2000). اما واگ‌ها در افق‌هایی تشکیل میگرددند که شاهد گستردگی مقادیر توزیع اندازه ذرات می‌باشیم یا اینکه حاصل مقادیر زیاد آهک در افق ۱ می‌باشد به اینگونه که همانند مقادیر رس آهک نیز باعث اتصال ذرات به همدیگر خواهد شد (Brewer, 1976) همانطور که در اکثر افق‌هایی منطقه شاهد مقادیر کم تا زیاد آهک هم در مشاهدات صحرایی هم در برآورد مقادیر اندازه گیری شده آزمایشگاهی این امر قابل مشاهده بود همانطور که خرمالی و همکاران در سال ۲۰۱۲ عنوان کردند که ته نشینی و رسوب رس‌ها و تجمع کلسیم ثانویه از جمله فرآیندهای اصلی خاکساز می‌باشد که حفرات مختلف در افق‌هایی خاک را تحت الشعاع قرار می‌دهد. پلین‌ها یا حفرات صفحه‌ای نیز که در مقاطع مورد مطالعه اکثراً در افق‌های پالتوسول به خوبی و به مقادیر زیاد قابل مشاهده بود که معمولاً به جریان خیس و خشک شدن‌های دوره‌ای که باعث انقباض و انبساط‌های خوب میشود نسبت داده میشود (Kemp, 2002).

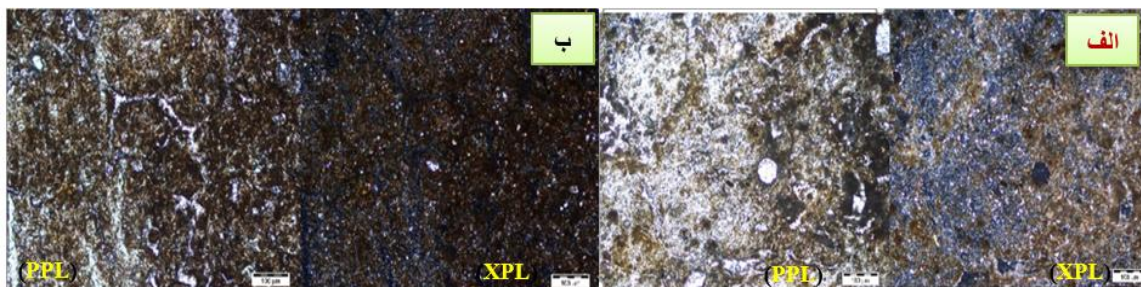


شکل ۳: نمای میکروسکوپی حفرات خاک در نورمقاطع (XPL) و صفحه ای (PPL) (الف) کانال - (ب) واگ (ج) حجره  
گراند مس و بی فابریک b-fabric

## ۲-۱- گراند مس و بی فابریک :

الگوی پراکنش و توزیع نسبی ذرات درشت نسبت به ریز در مقیاس ۲۰ میکرون ارزیابی شد که نشان داد در اکثر افق‌های لس و پالتوسول از نوع پورفریک می باشد و بی فابریک غالب در توالی مورد مطالعه در سعدآباد از نوع کلسیت کریستالیتیک می باشد و در بخشی از قسمت‌ها و در بعضی از افق‌ها نیز از نوع الاستیپل اسپیکلد ( لکه ای) می باشد و در یکسری از افق‌های محدود نیز ترکیبی از هردو نوع بی فابریک قابل مشاهده است و کانی درشت مشاهده شده در اکثر افق‌ها کوارتزهای بدون زاویه و زاویه دار می باشد

بی فابریک غالب توالی مورد مطالعه کلسیت کریستالیتیک می باشد ناشی از شستو شو انحلال یا آبشویی آهک و همچنین رسوب آن در عمق‌های پایین توالی می باشد این بی فابریک غالباً در افق‌ها و خاک‌هایی که مخلوطی از ریز بلورهای رس و کلسیت قابل مشاهده می باشد و همچنین ناشی از فراوانی ذرات ریز کلسیت میکریٹیک نیز در این افق‌ها میتواند باشد رحیمی و همکاران (۱۳۹۸) به گونه‌ای که (Akef et al., 2004) طی مطالعه‌ای که در منطقه‌ای از گیلان انجام دادند ابراز کردند که بی فابریک کلسیت کریستالیتیک بر اثر شستوشو و حرکت آهک به سمت اعماق خاک ایجاد گردیده است همچنین این بی فابریک را میتوان به نوع رس های منطقه مورد مطالعه نیز نسبت داد. در بعضی از موارد نیز ناشی از تجمع دوباره آهک می باشد که کانال های پوشیده شده به وسیله کلسیت به طور کامل و واضح این امر را نمایان می نماید باتوجه به مطالعات زراعت پیشه و خرمالی (۲۰۱۱) در توالی‌های لس پالتوسول استان گلستان با بررسی بی فابریک مقاطع مورد مطالعه به این نتیجه دست یافتند که در مناطقی با بارندگی زیاد بی فابریک از نوع لکه‌ای بوده و حالت عکس آن مناطق دارای بارندگی کمتر بی فابریک از نوع کریستالیک بی فابریک می باشد. نتایج مورد بررسی با مطالعات et Taheri al., 2017; رحیمی و همکاران ۱۳۹۸; قازانچایی و همکاران ۱۳۸۷ مطابقت دارد. بی فابریک لکه‌ای معمولاً در اثر فرآیند بایرفرنجیس و آبشویی و حرکت آهک به سمت عمق های پایین خاک ایجاد شود (FitzPatrick, 1993) و معمولاً در افق های آرچلیک مقطع مورد مطالعه بیشتر قابل مشاهده می باشد تخلیه آهک میتواند نشان از رژیم مرطوب در منطقه مورد مطالعه در هنگام تشکیل افق مورد بررسی باشد فرآیند شستوشوی آهک و آهک زدایی فرآیند اصلی در تشکیل و تکامل خاک های آهکی است که دارای افق آرچلیک می باشند ( طاهری و همکاران ۲۰۱۷); خرمالی و همکاران (۲۰۰۳) همچنین این نوع بی فابریک میتواند بیانگر انبساط و انقباض ناشی از خشک شدن و مرطوب شدن متناوب نیز باشد که بانبایج مطالعات ( لیاقت و خرمالی, ۱۳۹۰) مطابقت دارد. (Alonso et al., 2004) نیز در مطالعات خود به این نتیجه رسیدند که پدوفیچر تخلیه آهک نیز در مناطق دارای رطوبت بیش تری هستند، یافت می شود در بعضی از افق ها که ترکیبی از هردو نوع بی فابریک مشاهده گردید یعنی حضور بی فابریک لکه ای در بخشی از مقطع ها در کنار بی فابریک کلسیت کریستالیتیک میتواند بیانگر تخلیه آهک در افق مور مطالعه باشد و از آن قسمت خاک باشد و یالینکه به علت اشباع شدگی با آهک میکریٹیک در بعضی از افق‌ها که دارای بی فابریک لکه‌ای بود شاهد اختصاص بخشی از مقطع به وسیله بی فابریک کریستالیک بودیم.

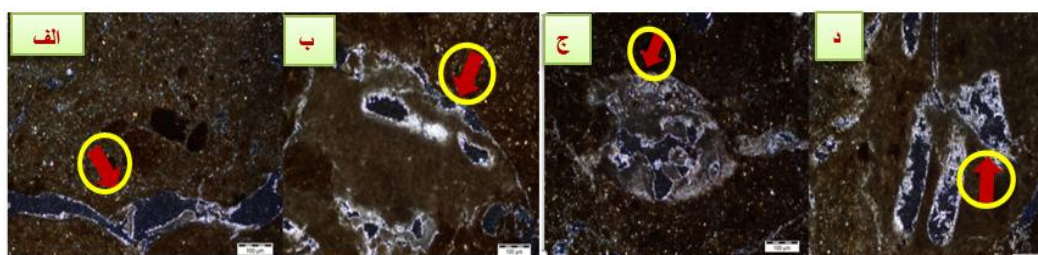


شکل ۴. نمای میکروسکوپی بی فابریک خاک در نورمقاطع (XPL) و صفحه ای (PPL) (الف) بی فابریک کلسیت کریستالیتیک آهکی و (ب) بی فابریک لکه ای

### ۱-۳ پدوفیچرهای آهک

پدوفیچرهای شناسایی شده در مقاطع توالی مورد مطالعه شامل نودول و سخت دانه های آهکی، کوتینگ و هایپو کوتینگ های آهک، کلسیت های سوزنی شکل، میکریت و اسپارتریک می باشد از جمله مهمترین عوارض خاکساز در افق ها و اک هایی که دارای ماده مادری آهکی می باشند حضور پوشش های آهکی می باشد (Kemp, 1995) که میتوان آن ها را به رسوب مجدد کربنات هایی که از افق های بالایی آبشویی پیدا کرده است نسبت داد درواقع آبشویی آهک و تجمع آهکی که شستشو پیدا کرده است باعث ایجاد چنین پوشش هایی در کنار و مرز و کانال و حجره ها و حفرات مختلف در اعماق خاک های قدیمی شده است از متداول ترین عارضه های پدولوژیکی در مناطق خشک و نیمه خشک میتوان به کوتینگ ها و هایپو کوتینگ های آهکی اشاره کرد که معمولا در اثر غلیظ شدن پلاسمای در سطح ذرات و حفرات تشکیل می شود که درمقابل آن نبود یا متر بودن این پوشش ها و عوارض خاکساخت را می توان با فرآیند آبشویی و شستشو بالای آهک از این افق ها مرتبط دانست. برطبق نظر (Brewer and Sleeman, 1964) دو پروسه پخشیدگی و حرکت تعلیقی تشکیل و تکامل این پوشش های آهکی را تحت الشعاع قرار می دهد در پروسه پخشیدگی پلاسمای آهکی از بی فابریک خاک به سمت سطوحی مانند حفرات و خاک دانه ها در حال حرکت می باشد و در پروسه تعلیق کربنات محلول از طرف منافذ به سمت بی فابریک خاک حرکت می کند و روی سطوح خاک مواد آهکی برجای می ماند (Segal and Stoops, 1972) درواقع باتوجه به نتایج تحقیقات (Dar et al., 2015) فرآیندهای خاکساز که باعث تجمع کربنات کلسیم و رسوب و شست و شوی رس ها در توالی های لس پالتوسول میشود جزء فرآیندهای اصلی می باشد. فرم های دیگر آهک در مقاطع نودول ها اسپارتریک و میکریت و نودول های سوزنی شکل آهک می باشد که در تشکیل فرم های میکریت و اسپارتریک زمان بسیار تاثیر گذار می باشد به این شکل که در تشکیل آهک میکریت مدت زمان کوتاه دارد و تحت-تأثیر عواملی مثل بافت خاک، خروج CO<sub>2</sub> فرآیندهای انحلال و خشک شدن های مکرر تبلور مجدد، غلظت نمک، پایداری خاک در مقابل برای تشکیل دارد (Stoops, 1985) آهک اسپارتریک نیاز به زمان طولانی تری می باشد در بخشی از قسمت های مقاطع شاهد پرشدگی حفرات با آهک (سیتومورفیک) و بعضی از نواحی شاهد کلسیت سوزنی شکل یا نیدل شیت های آهک بودیم باتوجه به نظر (Bezze-Deák et al., 1997) کلسیت های سوزنی شکل نشان دهنده وجود شرایطی رطوبتی مناسب و حضور مواد آلی تجزیه پذیر در خاک می باشند که شرایط تشکیل آنها را میتوان به وجود شرایط آب و هوایی گرم همراه با حضور مواد هوموسی و رطوبت مناسب در پالتوسول ها نسبت داد (Kubiena, 1983) اما در لس ها پروسه به شکل دیگری می باشد و وجود پوشش گیاهی در طی روند سوبگذاری لس ها باعث ایجاد این عوارض میشود (قازانچایی و همکاران ۱۳۸۴; Bezze-Deák et al., 1997)؛ مشاهده نواحی خالی از کربنات و نواحی خالی از کربنات نیز در مقاطع تشخیص داده شد که نشان دهنده انحلال کربنات و نفوذ در اعماق پایین خاک یا انتقال ها به افق های پایین تر و رسوب کربنات کلسیم در این افق ها می باشد که بانتهای شریفی گرم دره و همکاران، رضوی پور و همکاران (۱۳۸۳) مطابقت

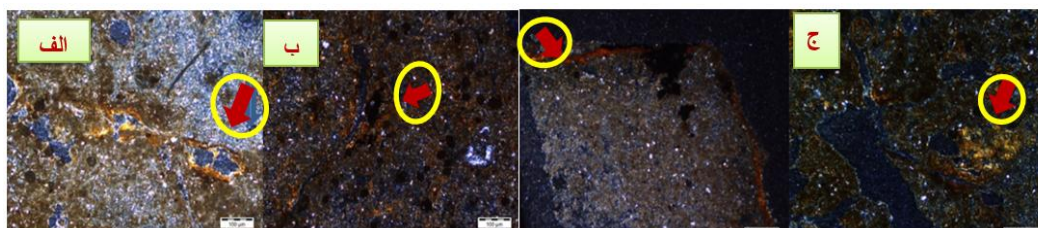
دارد. درافق‌های مورد مطالعه کلسیت ستومورفیک نیز قابل مشاهده می‌باشد و در تعدادی از افق‌های مورد مطالعه تشخیص داده شد که تشکیل آن در جریان ترشح اسیدهای آلی از ریشه می‌باشد که با کربنات کلسیم در ماتریکس خاک حل شده و سلول‌های ریشه یون کلسیم را جذب کرده و کربنات کلسیم در داخل واکوئل‌های سلول‌های ریشه تجمع کرده و این نوع آهک سیتو مورفیک را ایجاد میکند برطبق نظر بژدک و همکاران سلول‌های ریشه ای کلسیت نشان دهنده ثبات طولانی مدت سطح زمین تحت شرایط مساعد اقلیمی می‌باشند و باتوجه به نتایج تحقیقات خرمالی و همکاران (۲۰۰۶) این نوع کلسیت نیاز به شرایط خاص محیطی مانند دمای مناسب، پوشش گیاهی خاص و متراکم، بارندگی نسبتاً زیاد دارد و نشان از شرایط اقلیمی مرطوب تر با پوشش گیاهی متراکم تر در گذشته میباشد (خرمالی و همکاران، ۲۰۰۳) وجود نودل‌های آهکی یا سخت دانه‌های آهکی را نیز میتوان نتیجه رسوب مجدد کربنات ثانویه در اثر آبشویی و شستوشو آهک دانست لیاقت و خرمالی (۱۳۹۰) حضور این سخت دانه‌های آهکی نشان از تجمع این کربنات‌ها در اثر شستوشو از افق‌های بالایی و رسوب در افق‌های پایینی و تجمع آنها تحت شرایط پایدار محیطی به مدت طولانی تشکیل میشود در واقع برطبق نتایج مطالعات میرکریمی و خرمالی (۱۳۹۰) پایداری زمین و نفوذ عمقی آب باعث به وجود آمدن نودول‌های تیپیک بزرگ میشوند و ایجاد نودول‌های کوچک آهک را نتیجه کاهش نفوذپذیری عمقی خاک دانستند. در توالی مورد مطالعه چندین افق آرجلیک تشخیص داده شد که براساس نتایج تحقیقات خرمالی و همکاران (۲۰۰۳) تشکیل و تکامل افق آرجلیک را به فرآیند شستوشو یا آهک در شرایط مرطوب و همچنین شستوشوی متوالی رس نسبت دادند باتوجه به مشاهده و تشخیص این افق‌ها در پالتوسول‌های توالی مورد مطالعه میتوان تشکیل و تکامل افق‌های آرجلیک را نشان از وجود اقلیم گرم و مرطوب در زمان تکامل و تشکیل پالتوسول‌ها نسبت داد که باتنایج تحقیقات شهریاری و همکاران (۱۳۹۳) و ضیایی و همکاران (۱۴۰۲) مطابقت دارد باتوجه به اینکه درجه تکامل افق‌ها در چه سطحی می‌باشد می‌توان شرایط اقلیمی و محیطی زمان تشکیل آن‌ها را تشخیص داد چرا که هرچه‌قدر شرایط اقلیمی مناسب‌تر و بهتر برای فرآیندهای خاکساز باشد درجه تکامل افق‌ها و خاک‌های تشکیل شده نیز بالاتر خواهد رفت (شهریاری و همکاران، ۱۳۹۳؛ خرمالی و همکاران، ۲۰۱۱).



شکل ۵: نمای میکروسکوپی اشکال مختلف کربنات کلسیم خاک در نورمتقاطع (الف) کوتینگ کربنات کلسیم (ب) نودول کربنات کلسیم (ج) پرشدگی حفرات به وسیله کربنات کلسیم (د) بلورهای سوزنی شکل کربنات کلسیم

## ۴-۱- پوشش های رسی

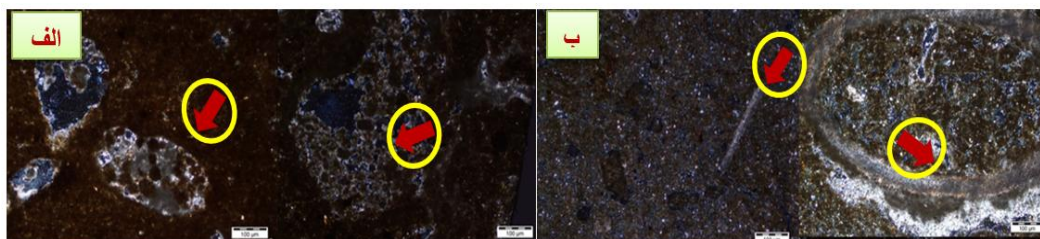
بررسی مقاطع مورد مطالعه نشان داد که بخشی از افق ها و در مواردی از آنها پوشش هایی نارنجی رنگ مشاهده گردید که این عوارض پوشش های رسی یا کلی کوتینگ ها نام دارند که معمولاً در اطراف حفرات و گاه ها در داخل زمینه خاک نیز قابل مشاهده است که پوشش های رسی یا کلی کوتینگ ها نام دارند این پوشش های رسی در اثر نفوذ آب که باعث انتقال رس ها از افق های بالایی به افق های زیرین نسبت داد که برای تشکیل آن ها نیاز به نگهداری و حفظ رس های انتقال داده شده می باشد که طی دوره های خشکی امکان پذیر است (Fedorov et al., 1990 ; McGiego, 1983) در افق های آرچلیک مورد مطالعه پوشش های رسی قابل مشاهده می باشد که می توان آن را نتیجه این فرآیند دانست که در این مقاطع انتقال رس به علت شستشو و افزایش بارندگی که افق تحت الارضی آرچلیک به علت حرکت ذرات رس ریز به صورت سوسپانسیون ایجاد شده است البته این انتقال و تجمع در گذشته در چندین مرحله رسوبگذاری و آبشویی اتفاق افتاده است باتوجه به تحقیقات محمدآبادی و خرمالی، ۱۳۹۰ و همچنین خرمالی و همکاران، ۲۰۱۲ حضور افق آرچلیک با پوشش رسی در مناطق جنگلی و مرطوب دور از انتظار نمی باشد و باتوجه به نتایج تحقیقات سلیمانی و فرپور در سال ۱۳۹۹ و Retallack در سال ۲۰۰۱ حضور افق آرچلیک با پوشش های رسی قوی در مناطق خشک میتواند نشان از حضور شرایط آب و هوایی مرطوب در دوران تشکیل آنها در گذشته باشد



شکل ۶: نمای میکروسکوپی پوشش های رسی متنوع خاک در نورمقاطع (الف) کوتینگ رس ب) پرشدگی رس داخل حفرات ج) هاپو کوتینگ رس

## ۵-۱- بقایای جانوری

یکی از اصلی ترین پدو فیچرهای قابل مشاهده در مقاطع افق های مورد مطالعه بقایای غلاف آهکی ( صدف ) نرم تنان بود و همچنین فضولات جانوری یا ایکس کریمنتال هایی که در داخل بعضی از حفرات قابل مشاهده است که نشان دهنده وجود فعالیت های بیولوژیکی و جانوری در مقاطع مورد مطالعه و اثبات شرایط مناسب محیطی برای فعالیت جانوری و بیولوژیکی در این افق ها و خصوصاً در پالتوسول ها می باشد که از جمله این فعالیت های بیولوژیکی و جانوری میتوان به حضور اشکال بیضوی شکل و مدور که به شکل متراکم یا پرشدگی داخل حفرات می باشند و ناشی از فعالیت های مایت ها و کرم های خاکزی می باشد باتوجه به تحقیقات انجام شده پرشدن حفرات با این عوارض میتواند نشان از دوره های خشکی ناپیوسته در طی زمان رسوبگذاری باشد (Kooistra et al., 2003) باتوجه به نتایج مسداق و همکاران (۱۹۹۹) این فضولات جانوری را به اواخر دوران بین یخبندان و اوایل یخبندان نسبت داد وجود بقایای غلاف آهکی نرم تنان در بخشی از مقاطع مورد مطالعه خصوصاً افق های لس را میتوان نشان از شرایط اقلیمی سرد خشک دانست این بقایا در افق های لس دارای بیشترین مقدار می باشد که نشان از رسوبگذاری با سرعت کم در لس ها می باشد (Bzdak, et al. 1997; فاریابی، ۱۳۸۳) نتایج مطالعات این امر را اثبات میکند که بیشتر این عوارض مربوط به افق های آهکی می باشد که نشان از شرایط بهترین افق ها برای جهت انجام فعالیت های این جانوران می باشد بانیات تحقیقات شهپوری و همکاران (۱۳۹۸) مطابقت دارد.



شکل ۷: نمای میکروسکوپی بقایای جانوری در نورمتقاطع (الف) فضولات جانوری (ب) بقایای صدف نرم تنان (مالوسک)

#### ۱-۶- پدوفیچرهای آهن و منگنز

پدوفیچرهای بررسی شده مربوط به اکسیدهای آهن و منگنز در مقاطع مورد مطالعه بیشتر شامل کوتینگ ها و هایپو کوتینگ و کوازی کوتینگ های آهن و منگنز و نودل های آهن و منگنز می باشد یکسری عوامل در تشکیل پوشش های مختلف آهن و منگنز دخیل هستند که میتوان از آن ها به شرایط اکسید و احیا، پستی و بلند و رطوبت، واکنش خاک اشاره کرد این پدوفیچرها که نشان واضحی از پدوژنز و اشباع آب و فرآیندهای اکسید و احیا می باشند (Burmmaw et al., 1992) درواقع نتیجه تفاوت شرایط اکسید و احیا همراه دوره های خشکی و و زهکشی نامناسب خاک می باشند و زمانی ایجاد می گردد که در طول دیواره منافذ بسیار ریز خاک که سرشار از هوا می باشند آب غنی از آهن و منگنز عبور نماید (McCarthy et al., 1998) غلظت پدوفیچرهای آهن و منگنز در محلول خاک زمانی افزایش می یابد که آهن و منگنز تحت شرایط بی هوازی احیاء شده و محلول خاک با حرکت به نواحی اکسیدی باعث گردد منگنز و آن به شکل کوتینگ ها و هایپو کوتینگ های آهن و منگنز و نودل ها تجمع نمایند که از حالت محلول به حالت نامحلول تبدیل گردد رحمت الله و همکاران (۱۹۹۰) درواقع وجود شرایط اکسیدتر در ماتریکس خاک و احیاء در فضای خلل و فرج باعث ایجاد شرایطی می گردد که اکسیدهای محلول به سمت حفرات حرکت نماید و با شرایط اکسید برخورد کند که باعث ایجاد هایپوکوتینگ های آهن و منگنز در اطراف حفرات میگردد و در تشکیل نودل های آهن و منگنز نیز فرآیند به اینگونه می باشد که اکسیدهای محلول به سمت ماتریکس خاک حرکت کرده در برخورد با شرایط اکسید به صورت نامحلول تبدیل میگردد و رسوب و تجمع نودل ها را شاهد خواهیم بود. (Zárate et al., 2003 ; Khormali et al., 2003)

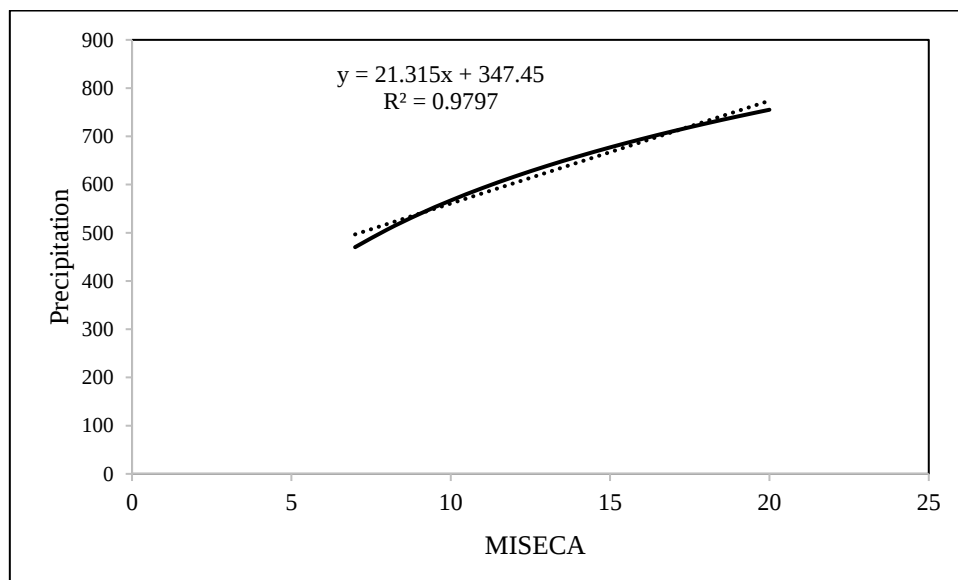


شکل ۸: نمای میکروسکوپی اشکال مختلف آهن و منگنز در نورمتقاطع (الف) کوتینگ آهن و منگنز (ب) نودول آهن (ج) هایپو کوتینگ آهن و منگنز

## ۲- بررسی شاخص MISECA در توالی مورد مطالعه

همانطور که قبلاً اشاره شد شاخص MISECA نخستین بار توسط خرمالی و همکاران (۱۳۸۸) به عنوان یک ابزار شبه کمی برای ارزیابی تکامل افق‌های خاک، به‌ویژه افق آرجیلیک، در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران طراحی گردید. در این روش به هرکدام از پارامترهای میکرومورفولوژیکی منتخب وزنی اختصاص داده می‌شود و در نهایت، با محاسبه مقدار تجمعی این پارامترها، درجه توسعه‌یافتگی خاک تعیین می‌گردد که بعدها طاهری و همکاران در سال ۲۰۱۸ برای جنگل‌های ارسباران، آذربایجان شرقی و شهریار و همکاران در سال ۱۳۹۵ برای استان فارس شاخص را بازسازی کردند.

بررسی شاخص MISECA در منطقه مورد مطالعه نشان داد که افق‌های خاک بر اساس میزان توسعه‌یافتگی به سه کلاس «توسعه‌یافته»، «توسعه یافتگی متوسط» و «کمتر توسعه‌یافته» تقسیم می‌شوند. بر این اساس، افق‌های Btkgss (۲۳۵۰-۲۲۵۰)، Btkg (۲۱۹۵-۲۲۵۰) و Btk3 (۱۳۹۰-۱۴۴۰) BATkg (۱۸۸۲-۱۹۷۰) Btkg (۱۶۷۰-۱۶۰۰) Btk (۱۳۹۰-۱۵۲۰) در گروه خاک‌های توسعه‌یافته قرار گرفتند. سایر افق‌ها در کلاس‌های توسعه‌یافتگی متوسط تا ضعیف طبقه‌بندی شدند از میان پارامترهای مورد بررسی میکرومورفولوژیکی در توالی سعدآباد ۳ پارامترهای منطقه تخلیه شده از آهک، هیدروکسیدهای آهن و منگنز و پوشش رسی دارای بیشترین تاثیر در شاخص توسعه خاک می‌باشد. بر اساس شاخص MISECA محاسبه شده و بررسی‌های انجام گرفته، و با بهره‌گیری از نمودارهای ارائه شده توسط خرمالی و همکاران (۲۰۱۲)، طاهری و همکاران (۲۰۱۶)، و شهریار و همکاران (۲۰۱۸)، میزان بارندگی منطقه مورد مطالعه سعدآباد ۳ به صورت نسبی تخمین زده شد. نتایج حاصل نشان داد که در توسعه‌یافته‌ترین افق خاک، یعنی افق Btkgss1 و Btk1 میزان بارش سالانه حدود ۷۴۱ میلی‌متر برآورد گردید. در مقابل، کم‌توسعه‌یافته‌ترین افق، افق BCkg، با میزان بارندگی ۴۷۰ میلی‌متر مشخص شد. و همچنین در بعضی از افق‌ها همانند افق Bkkm و CBk که همزمان توزیع خاک و فرونشست ذرات لسی رانشان می‌دهد میزان بارندگی تا حدود ۳۷۰ میلی‌متر کاهش یافته است.



شکل ۹: میزان بارندگی تخمین زده شده در زمان تشکیل خاک براساس همبستگی بسیار خوب بین اندیس MISECA و میزان بارندگی

| افق  | عمق       | ساختمان    | بی-فابریک                              | پوشش<br>رسی | منطقه تخلیه<br>شده از آهک | درجه<br>هواپدگی | ی<br>آهن و منگنز | MISECA                     |
|------|-----------|------------|----------------------------------------|-------------|---------------------------|-----------------|------------------|----------------------------|
| CBk  | 1259-1310 | Ms         | Crystallitic                           | -           | 3-5%                      | *               | 1-2%             | 8<br>weakly developed      |
| BCK  | ۱۳۵۰-۱۳۱۰ | Ms+1f abk  | Crystallitic                           | -           | 2%                        | *               | 1-2%             | 8<br>weakly developed      |
| Bk   | ۱۳۹۰-۱۳۵۰ | 2m sbk     | Crystallitic                           | -           | %3                        | 1               | 1-2%             | 12<br>moderately developed |
| Btk1 | ۱۵۲۰-۱۴۷۰ | 3m abk     | speckled,<br>partially<br>Crystallitic | few         | 70 %                      | 2               | 2-5%             | 19<br>well developed       |
| Btk2 | ۱۴۷۰-۱۴۴۰ | m abk      | Crystallitic                           | few         | 5%                        | 2               | 2-5%             | 14<br>moderately developed |
| Btk3 | ۱۴۴۰-۱۳۹۰ | abk        | Crystallitic                           | Common      | 70%                       | 2               | 2-5%             | 18<br>well developed       |
| CBkk | ۱۵۸۰-۱۵۲۰ | Ms+ 1f sbk | Crystallitic                           | -           | 3-5%                      | *               | 2-5%             | 9<br>moderately developed  |
| Bckg | ۱۶۰۰-۱۵۸۰ | 1 f abk    | Crystallitic                           | -           | <20%                      | *               | < 2              | 7<br>weakly developed      |
| Btkg | ۱۶۷۰-۱۶۰۰ | m abk      | Crystallitic,<br>partially<br>speckled | very few    | 5-15%                     | 2               | > 5              | 17<br>well developed       |

جدول شماره ۱. پارامترهای میکرومورفولوژیکی مورد نیاز برای شاخص MISECA

## نتایج و بحث

بازسازی اقلیم دیرینه در منطقه سعدآباد ۳ بر اساس تلفیق شاخص کمی MISECA و بررسی دقیق ویژگی‌های میکرومورفولوژیکی افق‌های لس-پالتوسول نشان می‌دهد که توالی حاکی مورد مطالعه حاصل تأثیرگذاری متناوب و چندمرحله‌ای شرایط اقلیمی متفاوت در طول زمان زمین‌شناسی کواترنری است. تغییرات مشاهده‌شده در درجه تکامل افق‌ها، نوع پدوفیچرها و الگوهای تجمع یا حذف مواد معدنی، بیانگر نوسانات اقلیمی قابل توجه در زمان تشکیل این پالتوسول‌هاست. شاخص میسکا که نمایانگر میزان توسعه‌یافتگی ژنتیکی خاک و شدت فرایندهای پدوژنری است، در این توالی همبستگی مثبت و معناداری با میانگین بارندگی سالانه نشان می‌دهد. افق‌هایی با مقادیر پایین شاخص که معمولاً دارای ساختار ضعیف، تجمع کربنات‌های اولیه و شواهد محدود از انتقال عمقی رس می‌باشند حاکی از شدت پایین هوازدگی و زمان کوتاه پدوژنری است این معرف خاک‌های کم‌توسعه‌یافته هستند که تحت شرایط اقلیمی نیمه‌خشک تشکیل شده‌اند. در مقابل، افق‌هایی با مقادیر بالاتر شاخص که شواهد متعددی از فرایندهای فعال شست‌وشوی عمقی، هوازدگی شیمیایی و تکامل ساختمان خاک نشان‌دهنده مراحل پیشرفته‌تری از خاک‌سازی هستند که در شرایط نیمه‌مرطوب تا مرطوب شکل گرفته‌اند. که همگی بیانگر پایداری نسبی شرایط اقلیمی مرطوب در دوره‌های بین‌یخبندان است. وجود افق‌های آرچلیک با پوشش‌های رسی (clay coatings)، ساختار بلوکی زاویه‌دار تا نیمه‌زاویه‌دار، و واکنش ضعیف با اسید کلریدریک، نشان‌دهنده انتقال فعال رس (lessivage) و حذف تدریجی کربنات‌ها از افق‌های بالایی در اثر نفوذ آب است. این ویژگی‌ها معمولاً در محیط‌هایی با رطوبت کافی، پوشش گیاهی متراکم‌تر و زمان پدوژنری طولانی‌تر توسعه می‌یابند و حاکی از شرایط اقلیمی نسبتاً پایدار و مرطوب در زمان تشکیل این افق‌ها هستند.

در مجموع، تلفیق داده‌های شاخص میسکا، ویژگی‌های میکرومورفولوژیکی، رنگ، ساختمان خاک و واکنش‌های شیمیایی افق‌ها نشان می‌دهد که در زمان تشکیل پالتوسول‌های منطقه سعدآباد ۳، اقلیم منطقه به‌صورت تدریجی از نیمه‌خشک به نیمه‌مرطوب و در نهایت به مرطوب تغییر یافته است. این تغییرات اقلیمی به‌احتمال زیاد در پاسخ به نوسانات دوره‌ای بارندگی، دما و گسترش یا عقب‌نشینی پوشش گیاهی در خلال دوره‌های بین‌یخبندان و پس‌یخبندان کواترنری رخ داده‌اند و شرایط لازم برای تکامل ژنتیکی و ساختاری پیشرفته خاک‌ها را فراهم کرده‌اند.

## منابع:

- شهبوری، م.، خرمالی، ف.، ایوبی، ش.، و محمدی، ش. (۱۳۹۸). بررسی ویژگی‌های میکرومورفولوژیک افق آرجیلیک در خاک‌های آلفی سولز منطقه گلستان. نشریه علوم خاک ایران، ۴۹(۲)، ۲۱۵-۲۲۸.
- مسداق، م.، ایوبی، ش.، و خرمالی، ف. (۱۹۹۹). بررسی میکرومورفولوژی خاک‌های لسی در شمال ایران. مجموعه مقالات چهارمین کنگره علوم خاک ایران، دانشگاه تهران، صفحات ۱۱۲-۱۲۰.
- سمیه شمسی محمودآبادی، فرهاد خرمالی. (۲۰۱۱). میکرومورفولوژی تحول خاک در کاربری‌های مختلف در اراضی لسی منطقه آق سو، استان گلستان. علوم آب و خاک (Isfahan University of Technology), 15(55), 111-125.
- سلیمانی، م.، و فرپور، م. (۱۳۹۹). بررسی میکرومورفولوژی و کانی‌شناسی پوشش‌های رسی در خاک‌های منطقه رفسنجان. مجله علوم خاک و مهندسی منابع طبیعی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان (EJSMS), ۲۰(۱)، ۴۵-۶۰.
- سلیمانی ساردو، ا.، و فرپور، م. (۱۴۰۲). تشکیل و تکامل خاک‌های رخنمون شده کنارصندل و دقیانوس در شهر جیرفت، استان کرمان. مجله علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)، ۳۴(۱)، ۲۳۲-۲۲۰.
- شمسی محمودآبادی، س.، و خرمالی، ف. (۱۴۰۳). میکرومورفولوژی تحول خاک در کاربری‌های مختلف در اراضی لسی منطقه بوسو، استان گلستان. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی (علوم خاک)، ۱۵(۵۵)، ۱۱۱-۱۲۴.
- شهریاری، ع.، خرمالی، ف.، و آرمزدل، ح. (۱۴۰۳). کانی‌شناسی خاک‌های مالی سولر و شبه‌مالی سولر تحت تأثیر فیروگرافی در اراضی جنوب لسی بازنویسی کن گرگانرود، استان گلستان. مجله پژوهش‌های حفاظت خاک و آب، ۴(۳۳)، ۱۰۳-۱۱۰.
- شهریاری، ع.، خرمالی، ف.، کهل، م.، کریمی، ع.، لهندورف، ا.، و تازیکه، ح. (۱۴۰۴). مطالعه خاک‌شناسی پارینه در توالی‌های لس-خاک قدیمی در طول یک ردیف اقلیمی در شمال ایران. مجله پژوهش‌های حفاظت خاک و آب، ۲۲(۲)، ۳۳-۲۱.
- ضیایی، ع.، پاشایی، ع.، خرمالی، ف.، و روشنی، م. ر. (۱۴۰۲). برخی از خصوصیات فیزیکوشیمیایی، کانی‌شناسی و میکرومورفولوژیکی توالی لس-خاک قدیمی به عنوان شاخصی از تغییر اقلیمی، رسوب‌گذاری و خاک‌سازی (مطالعه موردی: گرگان، استان گلستان). مجله پژوهش‌های حفاظت خاک و آب، ۲۳(۱)، ۲۳-۱.
- لیاقت، م.، و خرمالی، ف. (۱۴۰۳). میکرومورفولوژی تکامل برخی خاک‌های لسی غرب استان گلستان در یک توالی اقلیم-توپوگرافی-پوشش گیاهی. پژوهش‌های حفاظت خاک و آب، ۱۳(۱)، ۱-۱۰.
- رضوی پور، م. ۱۳۸۳. بررسی نحوه تکامل خاک ها در طول یک سکانس در اراضی دشت های سده و کامفیروز استان فارس. پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه تهران.
- میرکریمی، م.، و خرمالی، ف. (۱۳۸۸). مطالعه میکرومورفولوژی تخلخل و میکروساختمان خاک‌های مالی سولز تحت تأثیر کاربری اراضی و تناوب کشت. در یازدهمین کنگره علوم خاک ایران، دانشگاه تهران، تهران.
- زراعت‌پیشه، م.، و خرمالی، ف. (۱۳۹۰). بررسی پیدایش و روند تکامل خاک‌های تشکیل‌شده از لس در یک گذار بال لغتی (مطالعه موردی: شرق استان گلستان). پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۱۸(۲)، ۴۸-۶۵.
- قازانجایی، ر.، پاشایی‌اول، ع.، خرمالی، ف.، و ایوبی، ش. (۱۳۸۷). بررسی برخی خصوصیات میکرومورفولوژیک توالی لس-پالتوسول منطقه ناهارخوران گرگان. نشریه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۵(۲)، ۵۸-۷۱.
- بهشتی، ب.، کریمی، ع.، حق‌نیا، غ.، و بیات، ا. (۱۴۰۰). مطالعه میکرومورفولوژیکی افق‌های آرجیلیک و پتروکلیک در یک مقطع لسی آبرفتی، غرب مشهد. در هفدهمین کنگره علوم خاک ایران و چهارمین همایش ملی مدیریت آب در مزرعه، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.
- بزدک، م.، و همکاران. (۱۳۹۳). بررسی کوتینگ‌ها و هایپوکوتینگ‌های آهکی در افق‌های خاک مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران. مجله علوم خاک ایران، ۲۷(۲)، ۴۵-۶۰.
- Thompson, M. L., & Schaetzl, R. J. (2015). Soils and Quaternary Geology: A North American Perspective. In D. S. G. Thomas (Ed.), *Arid Zone Geomorphology: Process, Form and Change in Drylands* (3rd ed., pp. 529-552). Chichester: Wiley.
- Kooistra, M. J., & Kooistra, L. I. (2003). Integrated research in archaeology using soil micromorphology and palynology. Wageningen Environmental Research. Retrieved from
- Bockheim, J. G., Walker, D. A., & Everett, L. R. (1997). Soil carbon distribution in non-acidic and acidic tundra of Arctic Alaska. In R. Lal, J. M. Kimble, R. F. Follett, & B. A. Stewart (Eds.), *Soil Processes and the Carbon Cycle* (pp. 143-155). CRC Press.
- Khormali, F., Ghergherechi, S., Kehl, M., Ayoubi, S., 2012. Soil formation in loess- derived soils along a subhumid to humid climate gradient, Northeastern Iran. *Geoderma* 179-180, 113-122. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.02.002>.
- Volvakh, A. V., Sizikova, M. A., & Zykina, V. S. (2021). Loess-paleosol record of MIS 3-MIS 2 of north-east Cis-Salair plain, south of West Siberia. *\*Quaternary International*, 596-597\*, 155-167. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.11.023>
- Xu, P., Lin, T., Qian, H., & Zhang, Q. (2021). Anisotropic microstructure of loess-paleosol sequence and its significance for engineering and paleoclimate: A case study from Xiushidu (XSD) profile, southern Chinese Loess Plateau. *Engineering Geology*, 286, 106092.
- Mao, P., Pang, J., Zhou, Y., Huang, C.C., Zha, X., & Hu, H. (2021). Micromorphological evidence of pedogenesis and paleoclimatic change in the Holocene loess-paleosol in the south Qinling Mountains, China. *Quaternary International*

- Khormali, F., & Kehl, M. (2011). Micromorphology and clay mineralogy of loess-derived soils in Northern Iran: Implications for Quaternary paleoclimate reconstruction. *Quaternary International*, 234(1–2), 144–157.
- Vlaminck, S., Kehl, M., Khormali, F., Frindte, K., & Lehdorff, E. (2016). Micromorphological and geochemical evidence for pedogenesis and paleoenvironmental change in loess-paleosol sequences from Northern Iran. *Quaternary Research*, 85(3), 456–470.
- Taheri, M., Khormali, F., Wang, X., Brückner, H., Kehl, M., & Frechen, M. (2017). Micromorphology of the lower Pleistocene loess in the Iranian Loess Plateau and its paleoclimatic implications. *Quaternary International*, 451, 101–113.
- Sheldon N.D., and Tabor N.J. 2009. Quantitative paleoenvironmental and paleoclimatic reconstruction using paleosols. *Earth Science Reviews*, 95:1–52.
- Vlaminck, S., Kehl, M., Rolf, C., Franz, S.O., Lauer, T., Lehdorff, 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: 75-95. 10.1016/j.quascirev.2017.11.010.
- Eze PN and Meadows ME, 2014. Mineralogy and micromorphology of a late Neogene paleosol sequence at Langebaanweg, South Africa: Inference of paleoclimates. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 409:205-216.
- Stoops, G. (2003). Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections. Madison, WI: Soil Science Society of America.
- Ahmad, I., & Chandra, R. (2019). Micromorphological study of Kashmir loess-paleosol sediments: A tool for stratigraphic and paleoclimatic reconstruction. *Earth Science India*, 12(2), 83–104.
- Amiri, Z., Khormali, F., Kehl, M., Frechen, M., & Zeeden, C. (2025). Pedogenesis and paleoenvironmental reconstruction in northern Iran: The loess-paleosol sequence at Baluchabad. *Catena*, 253, Article 106835.
- Bullock, P., Fedoroff, N., Jongerius, A., Stoops, G., Tursina, T., 1985. Handbook for soil thin section description. Wayne Research Publications, Wolverhampton.
- Stoops, G., Marcelino, V., Mees, F., 2018. Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths, second ed. Elsevier, Amsterdam
- Stoops, G., 2003. Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections. Soil Science Society of America.
- Khormali, F., Abtahi, A., Mahmoodi, S. and Stoops, G. (2003). Argillic horizon development in calcareous soils of arid and semiarid regions of southern Iran. *Catena*. 53, 273-301.
- Loeppert, R.H. and Suarez, D.L. 1996. Carbonate and gypsum. P.p. 437-474. In: Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., Loeppert, R.H., Soltanpour, P.N., Tabatabai, M.A., Johnson C.T. and Sumner M.E., (eds.), "Methods of Soil Analysis Part 3: Chemical Methods." Pub: Agronomy Monograph, vol. 15. ASA and Soil Science Society of American, Madison, WI .
- Shahriari, A., Khormali, F., & Ayoubi, S. (2015). Micromorphological and mineralogical characteristics of Alfisols in Golestan Province. *Journal of Soil and Water Research*, 46(2), 123–134.
- Khormali, F., Shamsi, S., Ayoubi, Sh., & Gharegharchi, Sh. (2012). Micromorphological evolution of soils under different land uses in loess-derived lands of Agh-Su region, Golestan Province. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 26(1), 1–15.
- Zárate, M., Blasi, A., & Tripaldi, A. (2003). Late Quaternary eolian deposits in the southern Pampas of Argentina: Stratigraphy, palaeosols and environmental implications. *Journal of South American Earth Sciences*, 15(1), 43–54. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(02\)00109-5](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(02)00109-5)
- Khormali, F., Ajami, M., & Davatgar, N. (2003). Micromorphological characteristics of argillic horizons in calcareous and gypsiferous soils of Kohgiluyeh and Boyerahmad Province. In *Proceedings of the 10th Iranian Soil Science Congress*, Karaj, Iran, pp. 102–104.
- Buurman, P., Pape, T., & Muggler, C. C. (1992). Micromorphological interpretation of soil genesis in loess-derived soils. *Geoderma*, 52(1–2), 1–15. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(92\)90002-4](https://doi.org/10.1016/0016-7061(92)90002-4)
- McCarthy, P. J., Martini, I. P., & Leckie, D. A. (1998). Use of micromorphology for interpretation of complex alluvial paleosols: Examples from the Mill Creek Formation (Albian), southwestern Alberta, Canada. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 143(1–3), 87–110. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(98\)00080-7](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(98)00080-7)
- Retallack, G. J. (2001). *Soils of the Past: An Introduction to Paleopedology* (2nd ed.). Oxford: Blackwell Science.
- Bezze-Deák, K., Langohr, R., & Verrecchia, E. P. (1997). Small scale secondary CaCO<sub>3</sub> accumulations in selected sections of the European loess belt. *Geoderma*, 76, 221–252.
- Stoops, G. (1985). *Micromorphology of soils*. Leuven: State University of Ghent, Belgium.
- Kubiena, W. L. (1983). *The Soils of Europe*. Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag.
- Brewer, R. and Sleeman, J.R., 1964. Glaebules: their definition, classification and interpretation. *J. Soil Sci.*, 15, 66-78.
- Segal, G., & Stoops, G. (1972). Micromorphological studies of soil development in loess deposits. In *Proceedings of the International Soil Micromorphology Workshop*, Ghent, Belgium.
- Dar, R.A., Chandra, R., Romshoo, S.A., and Kowser, N., 2015. Micromorphological investigations of the late quaternary loess, 1999, East A Kashmir Valley, India. *Journal of Asian Earth Sciences* 111, 328-338.
- Kemp, R. A. (1995). Distribution and genesis of calcrete in the Plio-Pleistocene sediments of southeast England. *Sedimentology*, 42(4), 655–676.
- Akef, M., Mahmoudi, Sh., Karimian Eghbal, M., and Sarmadian, F. 2004. Physico- Chemical and Micro-Morphological Changes in Paddy Soils Converted from Forest in Foomanat Region, Gilan. *J. Naturalrest*. 56: 4. 407-423.
- Kemp, R. A. (2002). Paleosols in loess sequences: Review and perspectives. *Quaternary International*, 106–107, 133–142. [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(02\)00133-1](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(02)00133-1)
- Zárate, M., Blasi, A., Tripaldi, A., & Borromei, A. (2000). Micromorphology and genesis of Holocene soils in the southern Pampas of Argentina. *Quaternary International*, 68–71, 205–215. [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(00\)00045-4](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(00)00045-4)
- Brewer, R. (1976). *Fabric and Mineral Analysis of Soils*. New York: Krieger Publishing Company.
- Bullock, P., Federoff, N., Jongerius, A., Stoops, G., Tursina, T., and Babel, U., 1985. Handbook for Soil Thin Section Description. Wayne Research Publications, Wolverhampton, UK.

- Ghergherechi, S., Khormali, F., Mahmoodi, S., and Ayoubi, S., 2009. Micromorphology of argillichorizon development in loess derived soils of humid and subhumidregions of Golestan Province, Iran. *Journal of Soil and Water Research* 40, 130-138.
- Alonso, A., Smith, J., & Becker, L. (2004). *Micromorphological indicators of carbonate leaching in humid soils. Geoderma*, 120(3-4), 145-160.
- FitzPatrick, E. A. (1993). *Soil Microscopy and Micromorphology*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Maleki, S., Khormali, F., Kehl, M., Azizi, G., Shahpouri, F., Shahbazi, R., & Frechen, M. (2023). A loess-paleosol record of climate and vegetation change during the past 27,000 years from South-East of the Caspian Sea, Iran. *Quaternary International*.
- Shah, S. A. A., Xu, M., Abrar, M. M., Mustafa, A., Fahad, S., Shah, T., ... & Shi, W. (2021). Long-term fertilization affects functional soil organic carbon protection mechanisms in a profile of Chinese loess plateau soil. *Chemosphere*, 267, 128897.