

دو فصلنامه کواترنری ایران (علمی-پژوهشی)، دوره ۸، شماره ۴ و ۳، پاییز و زمستان ۱۴۰۱

ص ۴۱۴ تا ۴۳۰

بررسی میکرومورفولوژی و برآورد بارندگی گذشته در توالی لس-پالتوسل شرق استان گلستان

زانیار امیری؛ دانشجوی دکتری مدیریت منابع خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، گرگان، ایران

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

مانفرد فرشن؛ استاد، زمین‌شناسی، موسسه لیاگ، هانوفر، آلمان

مارتین کهل؛ استاد، ژئومورفولوژی، دانشگاه کلن، آلمان

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۰۹

چکیده

رسوبات لسی شمال شرق ایران به‌عنوان آرشیو اقلیمی بی‌نظیری از دوران کواترنر تا حال حاضر دارای اهمیت زیادی است که در دهه اخیر مورد توجه بسیاری از دانشمندان ایرانی و بین‌المللی قرار گرفته است. مطالعه خاک‌های دست‌نخورده با استفاده از تکنیک‌های میکروسکوپی می‌تواند اطلاعات ارزشمندی برای درک شرایط محیطی و اقلیمی در زمان تشکیل خاک‌های مشتق شده از لس (پالتوسل) در اختیار ما قرار دهد. هدف اصلی این پژوهش بازسازی میزان بارندگی در زمان تشکیل پالتوسل‌های مربوط به اواخر دوره پلیستوسن با کمک مطالعات میکرومورفولوژیکی در شرق استان گلستان است. برای این منظور از تمام پالتوسل‌های شناسایی شده مقطع نازک تهیه گردید و با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان مطالعه شد. نتایج مطالعه میکرومورفولوژی نشان داد که با افزایش درجه تکامل پالتوسل‌ها اعداد مربوط به شاخص MISECA نیز افزایش یافت. بررسی داده‌های حاصل از میکرومورفولوژی نشان داد که وجود افق‌های غنی از کربنات کلسیم و رس در پالتوسل‌های به‌خوبی توسعه یافته با افزایش مقدار بارندگی رابطه مستقیم دارد. همچنین تفاوت در مقدار شاخص MISECA نشان‌دهنده شرایط اقلیمی متفاوت در زمان شکل‌گیری پالتوسل‌ها است.

کلیدواژه‌ها: کواترنر، تغییر اقلیم، پلیستوسن، میکرومورفولوژی.

مقدمه

لس رسوب بادی سست از ذرات به‌اندازه سیلت مایل به زرد است که بیشتر در طول دوره کواترنر تشکیل شده است. به‌طور کلی ساختاری همگن و متخلخل دارد و عمدتاً از ذرات کوارتز و فلدسپار تشکیل شده است (لی و همکاران ۲۰۲۰: ۱۰۲۹۴۷). دوره کواترنر جدیدترین دوره زمین‌شناسی است که از حدود ۲۶ میلیون سال پیش تاکنون را شامل می‌شود، این دوره به دلیل نوسانات متناوب آب‌وهوایی بین دوره‌های یخبندان (سرد) و دوره‌های گرم بین یخبندان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، در طول دوران یخبندان رسوبات لسی و در دوران بین یخبندان خاک‌های مشتق شده از لس (پالئوسول‌ها) تشکیل شده‌اند (لیو و همکاران ۱۹۹۹: ۱۲۰۵؛ ماهر ۲۰۱۶: ۳۰؛ رتلاک ۱۹۸۸: ۱۱). مطالعه رسوبات لسی و خاک‌های مشتق از لس که تقریباً ۱۰ درصد از سطح زمین را پوشش می‌دهند، به دلیل پتانسیل آن‌ها برای ارائه اطلاعات در مورد محیط دیرینه، به‌ویژه در دوره کواترنر، از اهمیت قابل‌توجهی برخوردار است. تاریخچه مطالعات صورت گرفته بر روی رسوبات لسی اروپا را که مستند شده باشد را می‌توان از حدود ۲۰۰ سال پیش دانست (اسمالی و همکاران ۲۰۰۱: ۸). دانشمندان زیادی با بررسی توالی‌های لس-پالئوسول و مشاهده شواهد خاک سازی در این توالی‌ها بیان کردند که تناوب لایه‌های لسی و پالئوسول نشان‌دهنده تناوب در دوره‌های خشک و مرطوب شدن است، در واقع طی دوران بین یخبندان با مساعد شدن شرایط اقلیمی و هوازدگی رسوبات لسی این رسوبات به پالئوسول (خاک‌های قدیمی که طی دوره‌های زمین‌شناسی گذشته به وجود آمده‌اند) تبدیل می‌شوند. فرایند تبدیل شدن رسوبات لسی به پالئوسول به عوامل مختلفی مانند پوشش گیاهی، آب‌وهوا، توپوگرافی، فعالیت میکروبی و زمان بستگی دارد بنابراین پالئوسول‌ها با حفظ اثر این عوامل دارای پتانسیل بالقوه‌ای برای بازسازی محیط دیرینه هستند (بوخورست و همکاران ۲۰۰۹: ۱۱۵؛ باگل و همکاران ۲۰۱۱: ۱۴؛ پنین و همکاران ۲۰۱۸: ۹۰). فلات لسی شمال شرق ایران یکی از مهم‌ترین بایگانی‌های زمینی منطقه است که می‌تواند مانند پلی برای یافتن ارتباط بین رسوبات لسی اروپا و آسیا عمل کند (فرشن و همکاران ۲۰۰۹: ۲۲۰). در دهه اخیر مطالعات مختلفی برای بررسی و رمزگشایی از توالی‌های لس-پالئوسول شمال شرق ایران انجام شده است (غفارپور و همکاران ۲۰۱۶: ۱۰۹؛ خرمالی و همکاران ۲۰۱۹: ۷۹؛ پورمعصومی و همکاران ۲۰۱۹: ۱۸۴۸؛ رحیم‌زاده و همکاران ۲۰۱۹: ۱۰۰۵۳۸؛ طاهری و همکاران ۲۰۱۸: ۱۰۰).

تجربیات به دست آمده از مطالعه پالتوسول‌ها نشان داده است که مطالعات میکرومورفولوژی توالی‌های لس-پالتوسول می‌تواند یکی از موفق‌ترین و کارآمدترین روش‌ها برای شناسایی ژنتیکی پالتوسول‌ها و به دست آوردن درک صحیحی از شرایط محیطی در زمان شکل‌گیری آن‌ها باشد (برونگر و هیکل ۱۹۸۹: ۱۲۳؛ استوپس و همکاران ۲۰۲۰: ۱۰۴۱۸). در طول دهه‌ها مطالعه میکرومورفولوژی پالتوسول‌ها نشان داده است که پیدایش پالتوسول‌ها را می‌توان ردیابی کرد، حتی اگر بیشتر ویژگی‌های بصری آن از بین رفته باشد. به‌طور کلی هدف میکرومورفولوژی شناسایی اجزا تشکیل‌دهنده رسوب، تعیین رابطه متقابل آن‌ها و بازسازی فرآیندهای مسئول تشکیل و/یا تبدیل خاک است (برونگر و همکاران ۱۹۹۸: ۱۹؛ استوپس ۲۰۰۳: خرمالی و کهل ۲۰۱۱: ۱۰۹؛ مائو و تالینی ۲۰۰: ۶۶). بررسی میکرومورفولوژی اطلاعات مفیدی در مورد درجه هوازدگی و تکامل (که مرتبط با اقلیم و فرآیندهای پدوژنیک رخ داده بر مواد مادری است) واحدهای لس‌پالتوسول فراهم می‌کند که می‌تواند برای بازسازی شرایط محیطی گذشته مورد استفاده قرار گیرد. از این‌رو برای کمی‌سازی داده‌های کیفی حاصل از مطالعه میکرومورفولوژیکی باید از شاخص‌ها استفاده کرد. مگلدی و تالینی (۲۰۰۰: ۲۶۱) برای کمی‌سازی نتایج آنالیزهای میکرومورفولوژی شاخص توسعه میکرومورفولوژی خاک^۱ (MISODI) را تعریف کردند که ویژگی‌های میکرومورفولوژیکی مختلفی (ریز ساختمان، بی-فابریک، پوشش‌ها، نودول‌ها و درجه هوازدگی کانی‌ها) را به‌عنوان معیاری برای انعکاس درجه توسعه خاک، شرایط اقلیمی گذشته و فرآیندهای پدوژنیک استفاده کردند. هر یک از این ویژگی‌ها با استفاده از یک رتبه‌بندی که درجه توسعه آن را بیان می‌کند، کمی‌سازی شد. خرمالی و همکاران (۲۰۰۳: ۲۷۳) با اصلاح شاخص MISODI شاخص میکرومورفولوژی تکامل خاک‌های آهکی در شرایط خشک و نیمه‌خشک^۲ (MISECA) را ارائه دادند که در آن با افزایش درجه توسعه خاک عدد شاخص MISECA از ۰ تا ۲۴ متغیر است بدین معنی که با افزایش تکامل خاک این شاخص عدد بالاتری را نشان می‌دهد. همبستگی شاخص MISECA با درجه تکامل خاک‌های لسی شمال شرق ایران توسط محققان زیادی مورد بررسی قرار گرفته است که می‌توان نتایج آن را در مقالات بین‌المللی منتشر شده مشاهده نمود (خرمالی و کهل ۲۰۱۱: ۱۰۹؛ قرقره‌چی و همکاران ۲۰۱۱: ۲۳۷؛ خرمالی و همکاران ۲۰۱۲: ۱۱۳؛ شهریاری

¹ Micromorphological soil development index (MISODI)

² Micromorphological Index of Soil Evolution in highly Calcareous arid to semiarid Conditions (MISECA)

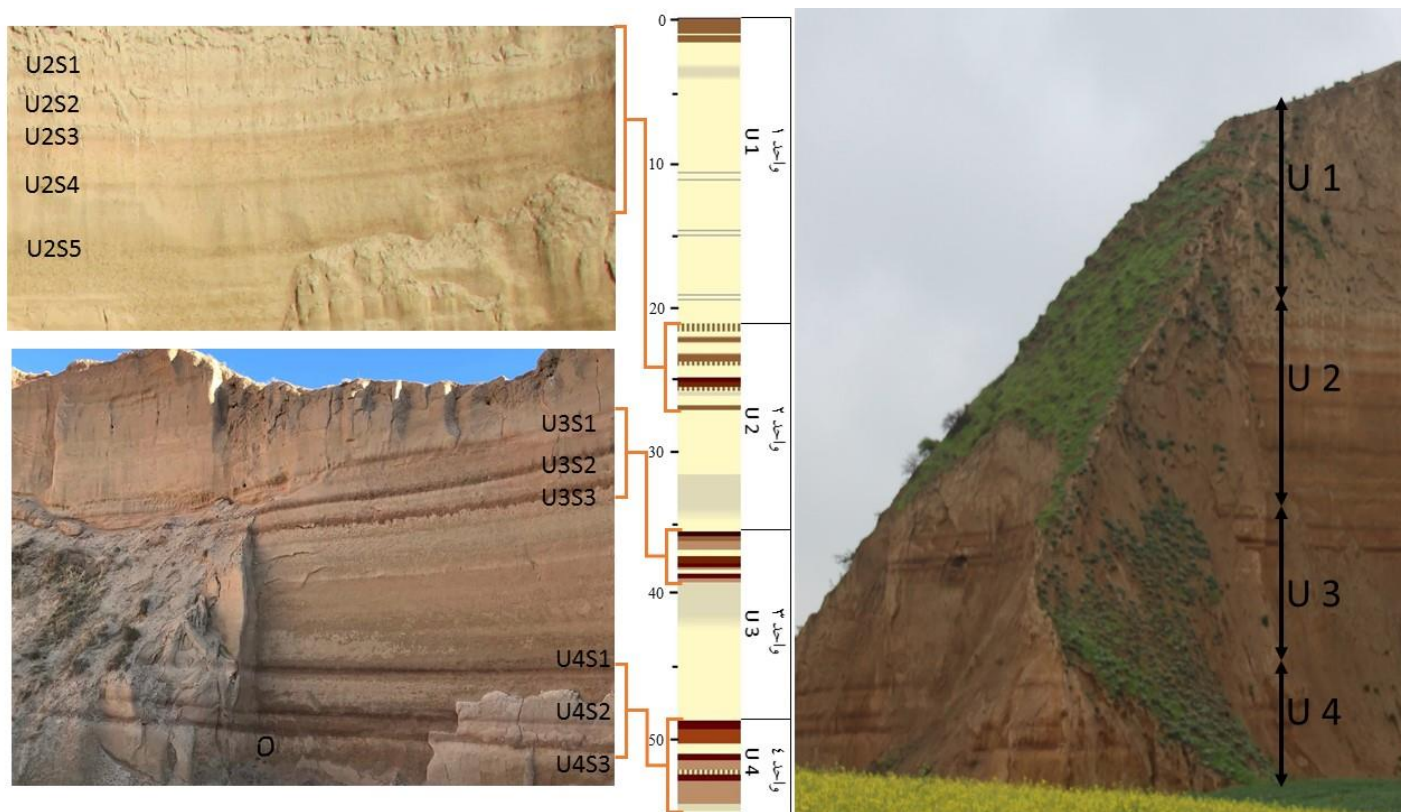
و همکاران ۲۰۱۵: ۲۱؛ طاهری و همکاران ۲۰۱۷: ۳۱). هدف اصلی این پژوهش بازسازی شرایط اقلیمی گذشته با بررسی میکرومورفولوژیکی توالی لس-پالتوسول در شرق استان گلستان به انجام رسیده است.

مواد و روش‌ها

توالی لس-پالتوسول بلوچ‌آباد (شکل ۱ و ۲) با عرض و طول جغرافیایی $37^{\circ} 30' 13''$ و $26' 33' 55''$ در ۲۰ کیلومتری شرق شهرستان کلالة قرار گرفته است. برای بررسی میکرومورفولوژی توالی لس-پالتوسول مورد مطالعه ۳۷ نمونه دست‌نخورده از افق‌ها و لایه‌های مختلف گرفته شد و در مجاورت هوا خشک گردید. نمونه‌ها با ترکیبی از استون و رزین پلی‌استر سه‌جزئی در شرایط خلأ در دسیکاتور اشباع شدند و سپس تا سخت شدن کامل در هوای آزاد قرار گرفتند، پس از سخت شدن نمونه‌ها برش خورده و بر روی شیشه چسبانده شدند و تا ضخامت ۳۰ میکرون با استفاده از سمباده و پودر کربورانوم نازک شدند. مقاطع تهیه‌شده با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان زیر نور متقاطع (XPL) و معمولی (PPL) به‌صورت کیفی مطالعه شدند.



شکل ۱: الف) تصویر گوگل ارث از پروفیل مورد مطالعه. ب و ج) به ترتیب تصویر روبرو و داخل پروفیل حفر شده.



شکل ۲: چینه نگاری توالی‌های لس-پالتوسول از سطح خاک بر حسب متر

یافته‌ها و بحث

1

2

جدول ۱ شاخص میکرومورفولوژی توسعه خاک MISECA و برخی خصوصیات میکرومورفولوژیکی نمونه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

جدول ۱: تشریح ویژگی‌های میکرومورفولوژی تعدادی از افق‌های مورد مطالعه در پائوسل‌ها

واحد- افق Unit- Horizon	نسبت ذرات درشت به ریز (۲۰ میکرون) و بی-فابریک C/F rel. dist. (20 μm), And b- fabric	ریز ساختمان و حفرات Microstructure and Voids	پدوفیچر Pedofeature	پوشش رسی Clay coating	مناطق تخلیه شده از آهک (درصد) Decalcified zone (%)	درجه هوادیدگی Alteration degree	هیدروکسیدهای آهن و منگنز Fe.Mn hydroxides	میسکا (شاخص توسعه یافتگی پائوسول-ها) MISECA (Degree of paleosols development)
U1S1- A	3/7- Cry	Well se sbk- Ch-Vu-Chm	Ex, Calcite nodule, coating and hypocoating of calcite	-	-	0	-	5- weakly developed
U1S1- Bw	3/7- Cry	Moderately se sbk- Ch-Vu-Chm	Calcite nodule, hypocoating and infilling of calcite- Ex	-	-	0	-	5- weakly developed
U2S1 BC	4/6- Cry	Vughy –Massive- Vu- Ch	Few clay and Mn hypocoating- Ex	Few	5-10	1	Few	6- weakly developed
U2S2- Bw	3/7- Cry	Weakly se sbk- Ch- Vu	Few Ex- Calcite coating	-	5-10	1	-	6- weakly developed
U2S3- Bw	3/7- Cry	Weak se sbk- Vu- Ch	Ex- Few calcite coating and infilling- Mn nodule- Clay concentration	Few	5-10	1	Few	8- weakly to moderately developed
U2S3- Bck	4/6- Cry	Massive- Weakly se sbk- Vu- Ch-Chm	Ex- Calcite coating and infilling	-	-	1	-	4- weakly developed
U2S4- Bt	3/7- spe	Well se sbk- Ch-Vu	Ex- few Mn coating- Clay coating and hypocoating	common	<50	2	Few	14- Moderately developed
U2S4- Bk	3/7- spe and Cry	Moderately se sbk- Ch- Chm	Calcite nodule, coating, hypocoating and infilling- Few Ex- Few clay concentration	Very few	-	1	-	9- Moderately developed
U2S4- Bck	3/7- Cry	Weakly se sbk- Vu- Ch	Calcite nodule - Few Ex- Calcite infilling and coating	Few	-	1	-	6- weakly developed
U2S5- Bw	3/7- Cry	Weakly to moderately sbk- Ch- Chm	Ex- Few calcite coating- Calcite micrite	Few	-	-	-	4- weakly developed
U3S1- AB	3/7- spe and str	Moderately se anb- Chl- Chm	Calcite coating- Clay domains concentration	Few	40-50	2	-	12- Moderately developed

U3S1- Bwk	3/7- cry and spe	Moderately se sbk- Ch- Vu	Calcite coating, infilling and needle shape- Mn hypocoating	Few	15-20	1	Few	9- Moderately developed
U3S1- Bk	3/7- Cry	Weakly developed sbk- Ch- Chm	Few Ex, Calcite nodule, coating, and needle shape	-	-	1	-	6- weakly developed
U3S2- Btk1	3/7- spe and Cry	Well se anb- Chl	Clay coating and hypocoating, Calcite coating and infilling, Mn hypocoating	Common	<50	2	Few	13- Moderately developed
U3S2- Btk2	2/8- cry and spe	Weakly se sbk- Chl- Vu	Clay coating, Mn concentration, Ex	Few to common	15-20	2	Few	12- Moderately developed
U3S3- Btk1	2/8- str and spe	Anb- Chl	Clay coating and hypocoating, calcite infilling, Fe/Mn nodule	Common	>50	2	Few	17- well developed
U3S3- Btk2	2/8- spe and Cry	Weakly seprated sbk- Vu- Chl	Calcite coating and sitomorphic, Fe/ Mn hypocoating	Few	15-20	2	Few	11- Moderately developed
U4S1- Bt	2/8- spe	Weakly to moderately sbk- Ch- Chm	Clay coating and hypocoating, Ex	Few	50-70	2	Few	14- Moderately developed
U4S2- Btkg	2/8- spe and Cry	Anb- sbk- Ch- Chm	Calcite Coating- Mn coating- Diffused Clay domains in groundmass	Few to common	50-70	2	Few to common	16- Moderately developed
U4S2- Bkg	3/7- spe and Cry	Anb- sbk- Ch- Chm	Calcite nodule and coating- Mn nodules	Few	15-20	2	Few	12- Moderately developed
U4S3- Btkg	2/8- spe	Sbk- Ch- Vu	Calcite nodule, coating and infilling- Mn coating- Clay coating and hypocoating	Common	>70	2	Common	18- well developed
U4S3- Bkg	3/7- Cry	sbk- Vu- Ch	calcic nodule- Mn oxide	-	-	1	Common	7- weakly developed

Se= separated (جداشدگی), Sbk= subangular blocky (بلوکی نیمه زاویه‌دار), abk= angular blocky (بلوکی زاویه‌دار), Ch= channel (کانال), Chm= chamber (حجره), spe= speckeld (لکه‌های), Cry= crystallitic (کریستالی), str= striated (خطی), Vu= vughy (وگی), Ex= excrement (فضولات جانوری), CaN (ندول آهک), Coating (پوشش), Fe/ Mn Oxide (اکسید آهن و منگنز)

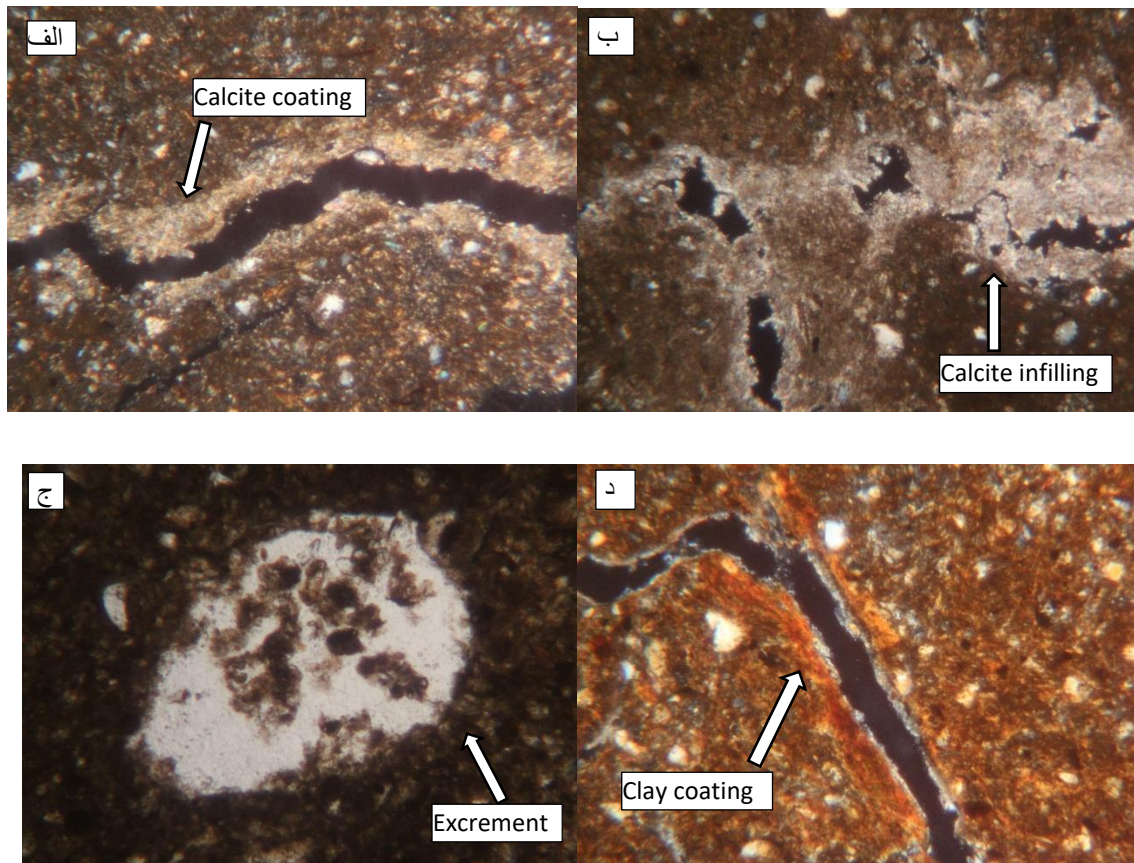
میکروساختمان و حفرات: بررسی میکروساختمان توالی لس-پالئوسول مورد مطالعه نشان داد که لایه‌های لس (افق C) دارای میکروساختمان توده‌ای هستند که نشان‌دهنده عدم تکامل پدوژنیکی این لایه‌ها است و پالئوسول‌ها با درجات مختلف تکامل دارای یکی از انواع ساختمان‌های مکعبی زاویه‌دار یا بدون زاویه و واگی می‌باشند. طی فرایند خاکساری ذرات خاک به خاکدانه تبدیل می‌شوند و ریز ساختمان خاک را ایجاد می‌کنند که در صورت ادامه تکامل ساختمان خاک را که با چشم غیرمسلح قابل تشخیص است را می‌توانند ایجاد کنند (شخونبرگر و همکاران ۲۰۱۲)؛ بنابراین ریز ساختمان می‌تواند به‌عنوان فاکتوری برای شناسایی لس از پالئوسول استفاده شود. نتایج ریز ساختمان نشان داد که پالئوسول‌های فوقانی در واحد ۲ ساختار ضعیف‌تری نسبت پالئوسول‌های زیرین واحد ۲ و پالئوسول‌های واحد ۳ و ۴ داشتند که نشان‌دهنده تکامل ضعیف‌تر این پالئوسول‌ها است. برای تفسیر شرایط محیطی گذشته ساختمان پالئوسول‌ها از جنبه فعالیت‌های بیولوژیکی و وضعیت زهکشی دارای اهمیت است. محققان دریافته‌اند که با پیشرفت چرخه مرطوب و خشک شدن متوالی خاک در طول دوره توسعه (تکامل) به تدریج باعث تبدیل ساختمان توده‌ای به ساختمان‌های بلوکی و صفحه‌ای می‌شود (استویس و همکاران ۲۰۱۸). با توجه به نتایج به‌دست‌آمده بیشتر حفرات توالی لس-پالئوسول مورد مطالعه در لایه‌های لسی از نوع واگی و در پالئوسول‌ها ترکیبی از کانال، چمبر و واگی بودند. خرمالی و همکاران (۲۰۱۲: ۱۱۳) به این نتیجه رسیدند که حفره‌ها در اثر فعالیت‌های انقباضی و انبساطی حاصل از تر و خشک شدن ایجاد شده‌اند که بعد از به وجود آمدن ممکن است تحت تأثیر فعالیت‌های پدوژنیکی مانند آبشویی رس و تجمع کربنات کلسیم قرار گیرند. ریز ساختمان‌ها، حفرات، چمبرها و کانال‌ها نقش مهمی در فعالیت‌های بیولوژیکی مانند رشد و نفوذ ریشه‌ها در خاک، حرکات جانوران و توسعه افق‌ها دارند (بولاک و همکاران ۱۹۸۵؛ کمپ ۱۹۹۹: ۱۷۹؛ زاراته و همکاران ۲۰۰۰: ۴۸۱). مشاهده آثار فعالیت‌های زیستی در پالئوسول‌ها نشان‌دهنده محیط دیرینه مطلوب از لحاظ آب‌وهوایی برای ریزجانداران و گیاهان است که باعث تکامل و توسعه پالئوسول‌ها شده است.

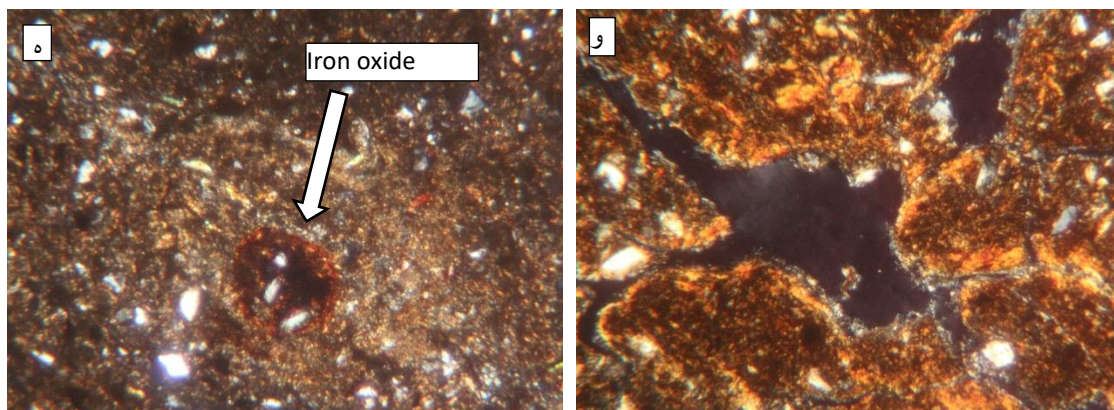
پراکنش ذرات درشت به ذرات ریز C/F: نسبت ذرات درشت به ذرات ریز در مقیاس ۲۰ میکرون ارزیابی شد.

نتایج نشان داد که اعداد آن از ۴/۶ در لایه‌های لسی و پالئوسول‌های با درجه تکامل کمتر به ۳/۷ در پالئوسول‌های با درجه توسعه متوسط و ۲/۸ در پالئوسول‌های به‌خوبی توسعه‌یافته تغییر کرده است، به‌عبارت‌دیگر با تبدیل رسوبات لسی به

خاک‌های مشتق شده از لس (پالتوسول) تعداد یا مقدار ذرات بزرگ کاهش یافته است که می‌تواند نشان‌دهنده هوازدگی ذرات درشت و تبدیل آن‌ها به ذرات ریزتر باشد. بررسی یافته‌های حاصل از مطالعات میکرومورفولوژیکی رسوبات لسی و خاک‌های مشتق شده از لس نشان می‌دهند که نسبت ذرات درشت به ذرات ریز در پالتوسول‌ها کاهش داشته است (طاهری و همکاران ۲۰۱۷: ۳۱؛ زراعت‌پیشه و خرمالی ۲۰۱۲: ۴۵؛ پورمعصومی و همکاران ۲۰۱۹: ۱؛ نجفی نیا و همکاران ۲۰۱۹: ۶۷؛ پلاتا و همکاران ۲۰۲۱: ۱۳۳).

پدوفیچرها: از پدوفیچرهای اصلی مشاهده شده می‌توان به شکل‌های مختلف پوشش‌های رسی و کربنات کلسیم ثانویه، پدوفیچرهای ناشی از فعالیت‌های ریز جانداران و اکسیدهای آهن و منگنز اشاره کرد. شکل‌های مختلف کربنات کلسیم مشاهده شده شامل نودول، پرشدگی، کوتینگ و هایپوکوتینگ شکل (۳) بودند.



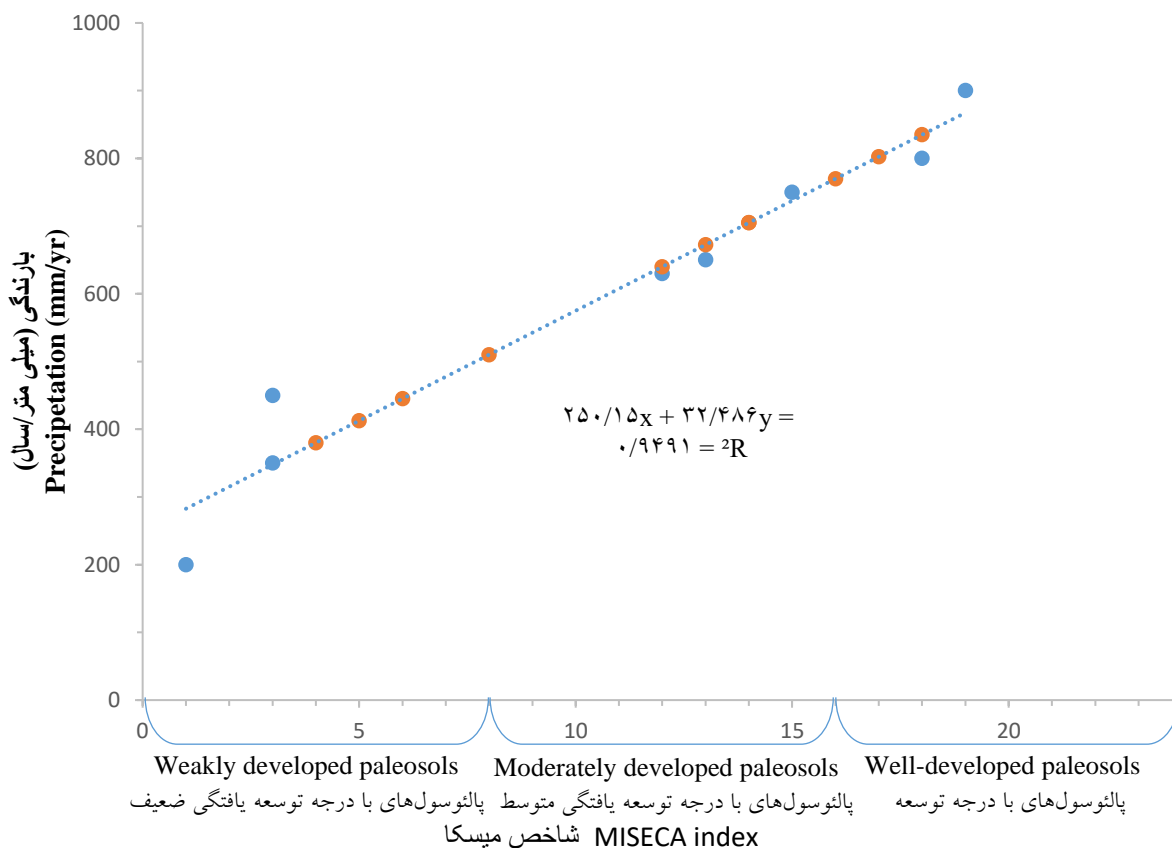


شکل ۳: الف) پوشش آهک (ب) پرشدگی توسط آهک ج) بقایای فضولات ریز جانداران د) و (پوشش رس ه) اکسید آهن

کمپ (۱۹۹۹: ۱۷۹) بیان کرد یکی از رایج‌ترین ویژگی‌های میکرومورفولوژیکی گزارش شده از توالی‌های لس-پالتوسول تجمع کلسیت در شکل‌های مختلف است که به‌طور گسترده‌ای با آبسویی آن از افق‌های سطحی به افق‌های زیرسطحی در رژیم‌های نیمه‌خشک مرتبط است. پوشش‌های رسی و کربناتی در پالتوسول‌ها نشان‌دهنده شکل‌گیری آن‌ها در طول دوره خاکساری است که می‌تواند بیان‌کننده شرایط محیطی نسبتاً گرم و مرطوب باشد (برونگر و همکاران ۱۹۹۸: ۱۹؛ مائو و همکاران ۲۰۲۱: ۶۶؛ کمپ ۱۹۹۸: ۱۳۳؛ ولامینک و همکاران ۲۰۱۶: ۱۲۲). یکی دیگر از پدوفیچرهای مشاهده‌شده در پالتوسول‌های توسعه‌یافته وجود اکسیدهای آهن و منگنز بود، شکل‌گیری و رفتار اکسیدهای آهن و منگنز تحت تأثیر شرایط هیدرومورفیک است و نشان‌دهنده شرایط محیطی مرطوب و پایدار است (دیکسون و همکاران ۱۹۹۲: ۳۱؛ مککارتی و همکاران ۱۹۹۸: ۸۷؛ تن و همکاران ۲۰۰۵: ۶۰۰). پدوفیچرهای ناشی از فعالیت‌های بیولوژیک و ریز جانداران، وجود بقایای فضولات (اکسکریمنت) ریز جانداران، بقایای ریشه‌ها گیاهی و غلاف آهکی نرم‌تنان در مقاطع نازک تأیید‌کننده حضور و فعالیت آن‌ها در شرایط محیطی مطلوب و دوران بین یخچالی است، در واقع فراوانی این پدوفیچرها نشان‌دهنده شرایط اقلیمی مختلف در زمان فعالیت آن‌ها است (زراعت‌پیشه و خرمالی ۲۰۱۲: ۴۵).

شاخص MISECA: با توجه به کلاس‌های تعریف‌شده در جدول ۱ برای مقادیر مختلف شاخص MISECA پالتوسول های U1S1, U1S2, U2S1, U2S2, U2S3 و U2S5 در کلاس پالتوسول‌های با درجه توسعه‌یافتگی ضعیف قرار دارند و پالتوسول های U2S4, U3S1, U3S2, U4S1 و U4S2 در دسته پالتوسول‌های با توسعه‌یافتگی متوسط قرار گرفتند

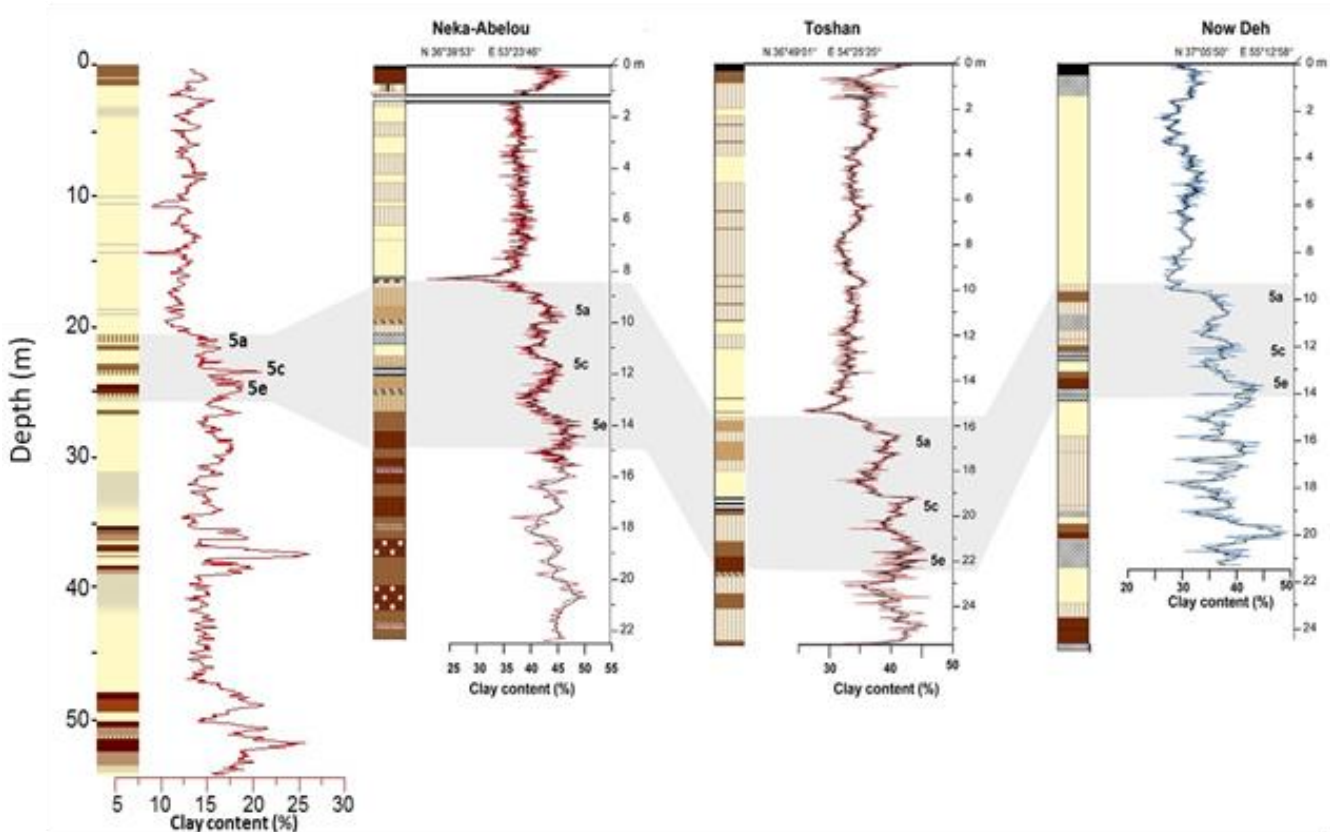
و پالتوسول‌های U4S3 و U2S4, U3S2, U3S3, U4S1, U4S2 متکامل‌ترین پالتوسول‌های پروفیل موردبررسی بودند. خرمالی و کهل (۲۰۱۱: ۱۰۹) با بررسی میکرومورفولوژیکی و محاسبه میزان توسعه‌یافتگی خاک‌های مشتق شده از لس در یک ردیف اقلیمی در استان گلستان با استفاده از شاخص MISECA بیان کردند که درجه توسعه خاک با شرایط اقلیمی رابطه مستقیم دارد که این رابطه روند افزایشی قابل توجهی را با میزان بارندگی سالانه دارد. شکل ۴ نشان‌دهنده رابطه MISECA و میزان بارندگی در یک ردیف اقلیمی را نشان می‌دهد، با فرض بر اینکه این رابطه در شرایطی محیطی گذشته هم صدق کند می‌توان مقدار بارندگی گذشته را در زمان تشکیل پالتوسول‌ها تخمین زد.



شکل ۴: برآورد بارندگی در زمان تشکیل پالتوسول‌ها در پروفیل مورد مطالعه براساس رابطه میسکا و میزان بارندگی حال حاضر گزارش شده توسط خرمالی و کهل (۲۰۱۱) و طاهری و همکاران (۲۰۱۷) (دایره‌های آبی)، دایره‌های قرمز اعداد میسکا پروفیل مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

بنابراین می‌توان با استفاده از شکل بالا می‌توان این‌گونه بیان کرد که مقدار بارندگی در زمان تشکیل خاک‌های با درجه تکامل ضعیف مقدار بارندگی کمتر از ۵۰۰ میلی‌متر در سال، خاک‌های با درجه تکامل متوسط مقدار بارندگی بین ۵۰۰ تا ۷۰۰ میلی‌متر در سال و در زمان تشکیل خاک‌های با درجه تکامل خوب مقدار بارندگی بیشتر از ۸۰۰ میلی‌متر در سال بوده است.

مقایسه با سایر توالی‌های لس-پالتوسول استان گلستان: مطالعه توالی‌های لس-پالتوسول در استان گلستان نشان داده است که اولین پالتوسول به‌خوبی توسعه‌یافته در توالی‌های لس-پالتوسول شمال شرق ایران معادل دوره MIS 5-e است (شکل ۵) که به ترتیب از شرق به غرب در توالی‌های نوده، توشن و نکا مشاهده شده است (ولامینک و همکاران ۲۰۱۶: ۱۲۲؛ لاور و همکاران ۲۰۱۷: ۳؛ ولامینک و همکاران ۲۰۱۸: ۷۵؛ کهل و همکاران ۲۰۲۱: ۲۵۳). چینه نگاری توالی مورد مطالعه نشان می‌دهد که اولین پالتوسول به‌خوبی توسعه‌یافته در واحد ۲ از لحاظ چینه نگاری با اولین پالتوسول توسعه‌یافته در سایر توالی‌های مطالعه شده در استان گلستان همبستگی دارد، بنابراین از دیدگاه چینه نگاری می‌توان بیان کرد که پالتوسول‌های شکل‌گرفته در این واحد طی دوره MIS 5 تشکیل شده است. با توجه به عدم مشاهده چینه نگاری مشابه با پالتوسول‌های واحد سه و چهارم این فرض به وجود می‌آید که پالتوسول‌های واحد سه و چهارم در دوره‌های MIS 7 و 9 شکل‌گرفته است. بررسی میکرومورفولوژی توالی‌های نوده، توشن و نکا نشان داده است که پالتوسول‌های شکل‌گرفته در اواخر دوره بین یخچالی MIS 5 تکامل کمتری نسبت به ابتدا این دوره دارند، اما پالتوسول تشکیل شده در اوایل این دوره از دیدگاه خاکشناسی و خصوصیات میکرومورفولوژی (مانند میکروساختمان، پوشش رسی، تخلیه آهک و ...) به‌خوبی توسعه‌یافته است که با نتایج حاصل از مطالعه میکرومورفولوژی حاصل از توالی بلوچ‌آباد مطابقت دارد.



شکل ۵: همبستگی چینه نگاری توالی لس-پالتوسول بلوچ آباد با سایر توالی‌های لس-پالتوسول پراکنده در دامنه شمالی رشته کوه البرز.

نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه خاک در پاسخ به فعل‌وانفعالات بین لیتوسفر، هیدروسفر و اتمسفر تشکیل می‌شوند به‌طور بالقوه اطلاعات فیزیکی، بیولوژیکی و شیمیایی در مورد شرایط محیطی گذشته را ثبت می‌کنند و می‌توان با مطالعه آن شرایط اقلیمی گذشته را بازسازی کرد. وجود و مطالعه توالی‌های لس-پالتوسول مربوط به اواخر دوره پلیستوسن در استان گلستان زمینه را برای مطالعه تغییرات اقلیمی گذشته شمال شرق ایران فراهم کرده است. بررسی میکرومورفولوژیکی توالی مورد لس-پالتوسول مورد مطالعه نشان داد که فرایندهای انتقال و رسوب رس و کربنات کلسیم ثانویه و متعاقب آن ایجاد افق‌های غنی از رس و کربنات کلسیم ثانویه از مهم‌ترین فرایندهای پدوژنیک صورت گرفته در خاک‌های با تکامل خوب است. وجود پالتوسول‌های ضعیف تا به‌خوبی توسعه‌یافته نشان‌دهنده شرایط اقلیمی و محیطی متفاوت در زمان تشکیل آن‌ها

است. میکرومورفولوژی می‌تواند ابزار مفیدی برای بررسی شرایط و محیط شکل‌گیری این پالتوسول‌ها باشد. نتایج نشان داد که استفاده از شاخص MISECA یک روش معتبر برای ارزیابی میزان توسعه پالتوسول‌ها باشد. شواهد میکرومورفولوژیکی نشان می‌دهد که شرایط اقلیمی و محیطی در زمان تشکیل پالتوسول‌های مورد مطالعه متفاوت بوده و این پالتوسول‌ها در دوره‌های زمانی و اقلیمی متفاوتی به وجود آمده‌اند.

منابع:

- Bokhorst, M. P., Beets, C. J., Marković, S. B., Gerasimenko, N. P., Matviishina, Z. N., & Frechen, M. (2009). Pede-chemical climate proxies in Late Pleistocene Serbian–Ukrainian loess sequences. *Quaternary International*, 198, 113–123.
- Bronger, A., & Heinkele, Th. (1989). Micromorphology and genesis of paleosols in the Luochuan loess section, China: Pedostratigraphic and environmental implications. *Geoderma*, 45, 123–143.
- Bronger, A., Winter, R., & Sedov, S. (1998). Weathering and clay mineral formation in two Holocene soils and in buried paleosols in Tadjikistan: Towards a Quaternary paleoclimatic record in Central Asia. *CATENA*, 34, 19–34.
- Buggle, B., Glaser, B., Hambach, U., Gerasimenko, N., & Marković, S. (2011). An evaluation of geochemical weathering indices in loess–paleosol studies. *Quaternary International*, 240, 12–21.
- Bullock, P., Fedoroff, N., Jongerius, A., Stoops, G., & Tursina, T. (1985). Handbook for soil thin section description. *Handbook for Soil Thin Section Description*. Retrieved from <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19861904489>
- Dixon, J.B., and Skinner, H.C.W. 1992. Manganese minerals in surface environments. In: Skinner, H.C.W., Fitzpatrick, R.W. (Eds.), *Biominalization Processes of Iron and Manganese- Modern and Ancient Environments*. Catena Verlag. Cremlingen, pp: 31-50.
- Frechen, M., Kehl, M., Rolf, C., Sarvati, R., & Skowronek, A. (2009). Loess chronology of the Caspian Lowland in Northern Iran. *Quaternary International*, 198, 220–233.
- Ghafarpour, A., Khormali, F., Balsam, W., Karimi, A., & Ayyoubi, S. (2016). Climatic interpretation of loess-paleosol sequences at Mobarakabad and Aghband, Northern Iran. *Quaternary Research*, 86, 95–109.
- Ghergherechi, S., Khormali, F., Mahmoody, S., & Ayyoubi, S. A. (2011). Micromorphology of Argillic Horizon Developed on Loess Derived Soils in Humid and Sub Humid Regions of South Western Golestan Province. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 41, 237–249.
- Kehl, M., Vlaminc, S., Köhler, T., Laag, C., Rolf, C., Tsukamoto, S., Frechen, M., Sumita, M., Schmincke, H.-U., & Khormali, F. (2021). Pleistocene dynamics of dust accumulation and soil

- formation in the southern Caspian Lowlands—New insights from the loess-paleosol sequence at Neka-Abelou, northern Iran. *Quaternary Science Reviews*, 253, 106774.
- Kemp, R. A. (1998). Role of micromorphology in paleopedological research. *Quaternary International*, 51–52, 133–141.
- Kemp, R. A. (1999). Micromorphology of loess–paleosol sequences: A record of paleoenvironmental change. *CATENA*, 35, 179–196.
- Khormali, F., Abtahi, A., Mahmoodi, S., & Stoops, G. (2003). Argillic horizon development in calcareous soils of arid and semiarid regions of southern Iran. *CATENA*, 53, 273–301.
- Khormali, Farhad, & Kehl, M. (2011). Micromorphology and development of loess-derived surface and buried soils along a precipitation gradient in Northern Iran. *Quaternary International*, 234, 109–123.
- Khormali, Farhad, 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.
- Khormali, Farhad, Shahriari, A., Ghafarpour, A., Kehl, M., Lehndorff, E., & Frechen, M. (2019). Pedogenic carbonates archive modern and past precipitation change – a transect study from soils and loess-paleosol sequences from Northern Iran. 552, 79-90
- Lauer, T., Frechen, M., Vlaminc, S., Kehl, M., Lehndorff, E., Shahriari, A., & Khormali, F. (2017). Luminescence-chronology of the loess palaeosol sequence Toshan, Northern Iran – A highly resolved climate archive for the last glacial–interglacial cycle. *Quaternary International*, 429, 3–12.
- Li, Y., Shi, W., Aydin, A., Beroya-Eitner, M. A., & Gao, G. (2020). Loess genesis and worldwide distribution. *Earth-Science Reviews*, 201, 102947.
- Liu, T., Ding, Z., & Rutter, N. (1999). Comparison of Milankovitch periods between continental loess and deep sea records over the last 2.5 Ma. *Quaternary Science Reviews*, 18, 1205–1212.
- Magaldi, D., & Tallini, M. (2000). A micromorphological index of soil development for the Quaternary geology research. *CATENA*, 41, 261–276.
- Maher, B. A. (2016). Palaeoclimatic records of the loess/palaeosol sequences of the Chinese Loess Plateau. *Quaternary Science Reviews*, 154, 23–84.
- Mao, P., Pang, J., Zhou, Y., Chang Huang, 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*, 598, 66–77.
- McCarthy, P. J., Martini, I. P., & Leckie, D. A. (1998). Use of micromorphology for palaeoenvironmental interpretation of complex alluvial palaeosols: An example from the Mill Creek Formation (Albian), southwestern Alberta, Canada. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 143, 87–110.
- Najafinia, M., Khormali, F., Kiani, F., & Baranimotlagh, M. (2019). Comparison of the micromorphology of the early Pleistocene paleosols with modern loess-derived soils. *Journal*

- of Agricultural Engineering Soil Science and Agricultural Mechanization, (Scientific Journal of Agriculture), 41(4), 67-82. (In Persian)*
- Panin, P. G., Timireva, S. N., Morozova, T. D., Kononov, Yu. M., & Velichko, A. A. (2018). Morphology and micromorphology of the loess-paleosol sequences in the south of the East European plain (MIS 1–MIS 17). *CATENA*, 168, 79–101.
- Plata, J. M., Rodríguez, R., Preusser, F., Boixadera, J., Balasch, J. C., Antúnez, M., & Poch, R. M. (2021). Red soils in loess deposits of the Eastern Ebro Valley. *CATENA*, 204, 105430.
- Pourmasoumi Parashkouh, M., Khormali, F., Ayoubi, S. O., Kiani, F., Kehl, M., & Lehndorff, E. (2019). The micromorphology of forest soils developed on loess along a precipitation gradient in northern Iran. *Journal of Agricultural Engineering Soil Science and Agricultural Mechanization, (Scientific Journal of Agriculture), 42(2), 1-20. (In Persian)*
- Pourmasoumi, M., Khormali, F., Ayoubi, S., 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*, 16, 1848–1868.
- Rahimzadeh, N., Khormali, F., Gribenski, N., Tsukamoto, S., Kehl, M., Pint, A., 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*, 41, 100538.
- Retallack, G. (1988). Field recognition of paleosols. Geological Society of America, Special Paper 216, 1–19.
- Schoeneberger, P. J., Wysocki, D. A., & Benham, E. C. (2012). Field Book for Describing and Sampling Soils. Government Printing Office.
- Shahriari, A., Kehl, M., & Lehndorff, E. (2015). Paleopedological study of loess-paleosol sequences along a climosequence in northern Iran. *Journal of Water and Soil Conservation*, 22, 21–39.
- Smalley, I. J., Jefferson, I. F., Dijkstra, T. A., & Derbyshire, E. (2001). Some major events in the development of the scientific study of loess. *Earth-Science Reviews*, 54, 5–18.
- Stoops, G. (2003). Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections. Guidelines for Analysis and Description of Soil and Regolith Thin Sections. Retrieved from <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20033054441>
- Stoops, Georges, Langohr, R., & Van Ranst, E. (2020). Micromorphology of soils and palaeosoils in Belgium. An inventory and meta-analysis. *CATENA*, 194, 104718.
- Stoops, Georges, Marcelino, V., & Mees, F. (2018). Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths. Elsevier.
- Taheri, M. (2018). Geochemistry of the red soils in the Northern Iranian Loess Plateau and implications for its origin and paleoclimate reconstruction. *Journal of Agricultural Engineering Soil Science and Agricultural Mechanization, (Scientific Journal of Agriculture), 41, 99–111.*

- Taheri, M., Khormali, F., Wang, X., Amini, A., Wei, H., Kehl, M., Chen, F. (2017). Micromorphology of the lower Pleistocene loess in the Iranian Loess Plateau and its paleoclimatic implications. *Quaternary International*, 429, 31–40.
- Tan, W., Liu, F., Feng, X., Huang, Q., and Li, X. 2005. Adsorption and redox reaction of heavy metals on Fe- Mn nodules from Chinese Soils. *Journal of Colloid and Interface Science*, 284: 600-605
- Vlaminck, S., Kehl, M., Lauer, T., Shahriari, A., Sharifi, J., Eckmeier, E., Frechen, M. (2016). Loess-soil sequence at Toshan (Northern Iran): Insights into late Pleistocene climate change. *Quaternary International*, 399, 122–135.
- Vlaminck, S., Kehl, M., Rolf, C., Franz, S. O., Lauer, T., Lehndorff, E., Frechen, M., & Khormali, F. (2018). Late Pleistocene dust dynamics and pedogenesis in Southern Eurasia – Detailed insights from the loess profile Toshan (NE Iran). *Quaternary Science Reviews*, 180, 75–95
- Zarate, M., Kemp, R. A., Espinosa, M., & Ferrero, L. (2000). Pedosedimentary and palaeoenvironmental significance of a Holocene alluvial sequence in the southern Pampas, Argentina. *The Holocene*, 10, 481–488.
- Zeraat Pische M. and Khormali F. 2012. The investigation of soil formation and evolution of losses derived soils in a climosequence, case study: eastern of Golestan province. *Journal of Water and Soil Conservation*, 18(2), 45-65. (In Persian).