



## The glacial origin of carbonates in the calcic and petrocalcic horizons of the soils developed on glacial deposits in the southern Alborz Mountain slope

Ahmad Heidari<sup>1✉</sup>, Abbas Kordpour Kermanshahi<sup>2</sup>, Alireza Raheb<sup>3</sup>

1. Corresponding Author, Soil Science Department, College of Agriculture and Natural Resource, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: [ahaidari@ut.ac.ir](mailto:ahaidari@ut.ac.ir)

2. Soil Science Department, College of Agriculture and Natural Resource, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: [abaskordpour@ut.ac.ir](mailto:abaskordpour@ut.ac.ir)

3. Soil Science Department, College of Agriculture and Natural Resource, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: [araheb@ut.ac.ir](mailto:araheb@ut.ac.ir)

### Article Info

**Article type:** Research Article

**Article history:**

**Received:** July. 30, 2023

**Revised:** Dec. 7, 2023

**Accepted:** Dec. 11, 2023

**Published online:** Feb. 20, 2024

**Keywords:**

Carbonates,  
Carbon Dioxide,  
Glacial Sediments,  
Micromorphology,  
Removal of Carbonates.

### ABSTRACT

The dissolution of carbon dioxide in water is one of the sources of soil carbonates, which have an inverse relationship with water temperature. The origin of soil-forming carbonates formed in glacial sediments, and the effect of glacial processes on their formation were investigated. This study was conducted in the year 2021 in Alborz province, and eight profiles located in Karaj and Hashtgerd regions with glacial-alluvial parent materials were described and sampled. Physical and chemical characteristics, including soil texture before and after the removal of carbonates by the hydrometer method, pH, and EC in saturated extract, organic carbon by the Walkley-Black method, Calcium Carbonate Equivalent (CCE) measured by the calcimetric method in 27 samples were determined. Cation Exchange Capacity (CEC) measured by the ammonium acetate method. Soil description and classification were performed based on the American classification system. A micromorphological study of undisturbed samples, before and after the removal of carbonates, was carried out following their impregnation with polyester resin, cutting, sawing, mounting on glass slides, and reducing the thickness to about 30 microns. Imaging was done with a polarizing microscope, and the analysis and interpretation of the results were carried out according to the guide for the analysis of thin sections. The results showed that the petrocalcic horizons formed on glacial tills and moraines are the result of the long-term infiltration of cold water rich in dissolved carbonates into the soil. This model of the formation of secondary carbonates in the soil is different from other models that mainly consider the origin of carbonates to be the dissolution and recrystallization of primary carbonates or the biological respiration of roots and living organisms.

Cite this article: Heidari, A., Kordpour Kermanshahi, A., & Raheb, A., (2024). The glacial origin of carbonates in the calcic and petrocalcic horizons of the soils developed on glacial deposits in the southern Alborz Mountain slope, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54 (12), 1963-1979. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.363088.669542>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.363088.669542>



## منشأ یخچالی کربنات‌ها در افق‌های کلسیک و پتروکلسیک خاک‌های تشکیل شده بر روی نهشته‌های

## یخچالی دامنه جنوبی رشته کوه البرز

احمد حیدری<sup>۱</sup>، عباس کردپور کرمانشاهی<sup>۲</sup>، علیرضا راهب<sup>۳</sup>۱. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک دانشکده کشاورزی دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران. رایانامه: [ahaidari@ut.ac.ir](mailto:ahaidari@ut.ac.ir)۲. گروه علوم و مهندسی خاک دانشکده کشاورزی دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران. رایانامه: [abaskordpour@ut.ac.ir](mailto:abaskordpour@ut.ac.ir)۳. گروه علوم و مهندسی خاک دانشکده کشاورزی دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران. رایانامه: [araheb@ut.ac.ir](mailto:araheb@ut.ac.ir)

## اطلاعات مقاله

## چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۵/۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۹/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۹/۲۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۲/۱

## واژه‌های کلیدی:

رسوبات یخچالی،

میکرومورفولوژی،

کربنات‌ها،

دی‌اکسید کربن،

حذف کربنات‌ها.

انحلال دی‌اکسید کربن در آب، یکی از منابع کربنات‌های خاک می‌باشد که با دمای آب رابطه معکوس دارد. منشأ کربنات‌های خاکساخت تشکیل یافته در رسوبات یخچالی و تأثیر فرآیندهای یخچالی بر تشکیل آن‌ها بررسی شد. این مطالعه در سال ۱۴۰۰ در استان البرز انجام گرفت و هشت خاک‌رخ در منطقه کرج و هشتگرد با کاربری مرتع و اقلیم نیمه‌خشک تشریح و نمونه برداری شدند. مواد مادری خاک‌رخ‌های مورد مطالعه، رسوبات یخچالی آبرفتی می‌باشند. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی ۲۷ نمونه برداشت شده از افق‌های ژنتیکی خاک‌رخ‌ها شامل بافت خاک (قبل و بعد از حذف کربنات‌ها) با روش هیدرومتر، pH و EC در عصاره اشباع، کربن آلی به روش والکلی-بلک، کربنات کلسیم معادل (CCE) با روش کلسیمتری و ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) با روش استات آمونیوم اندازه‌گیری شدند. تشریح و رده‌بندی خاک‌ها براساس سامانه رده‌بندی آمریکایی انجام شد. مطالعه میکرومورفولوژی نمونه‌های دست‌نخورده (قبل و بعد از حذف کربنات‌ها)، پس از تلقیح نمونه‌ها با رزین پلی‌استر، برش و سایش و چسباندن بر روی لام‌های شیشه‌ای و کاهش ضخامت به حدود ۳۰ میکرون انجام شد. آنالیز تصاویر با میکروسکوپ پلاریزان و تشریح و تفسیر نتایج بر اساس راهنمای تشریح مقاطع نازک صورت پذیرفت. نتایج نشان داد که افق‌های پتروکلسیک تشکیل شده بر روی تیل‌ها و مورن‌های یخچالی، حاصل نفوذ درازمدت آب سرد غنی از کربنات محلول در درون خاک است. این مدل تشکیل کربنات‌های ثانویه در خاک با سایر مدل‌هایی که عمدتاً منشأ تشکیل کربنات‌ها را انحلال و تبلور مجدد کربنات‌های اولیه و یا تنفس زیستی ریشه و موجودات زنده می‌داند، متفاوت است. این تحقیق ثابت کرد که انحلال دی‌اکسید کربن در آب سرد یکی از منابع کربنات‌ها در خاک است.

استناد: حیدری، احمد؛ کردپور کرمانشاهی، عباس؛ و راهب، علیرضا (۱۴۰۲). منشأ یخچالی کربنات‌ها در افق‌های کلسیک و پتروکلسیک خاک‌های تشکیل شده در نهشته‌های یخچالی دامنه جنوبی رشته کوه البرز، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۴ (۱۲)، ۱۹۷۹-۱۹۶۳.

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.363088.669542>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.363088.669542>

## مقدمه

یکی از منابع کربنات‌ها در خاک، انحلال دی‌اکسیدکربن در آب می‌باشد که در آب سرد یخچال‌ها میزان انحلال آن از حدود ۱۰ گرم بر کیلوگرم در دمای ۲۵ درجه سلسیوس و فشار یک بار، به حدود ۳۲ گرم بر کیلوگرم در آب صفر درجه سلسیوس و فشار یک بار افزایش می‌یابد. قبل و بعد از انجماد که دما نزدیک صفر درجه سلسیوس است، این افزایش انحلال موجب اشباع محلول و رسوب کربنات‌ها در مواد مادری با منشأ یخچالی می‌شود (Perkins, 2003). افزایش زیاد انحلال دی‌اکسیدکربن در آب، تعادل شیمیایی موجود بین آنیون بی‌کربنات و کاتیون‌های قلیایی خاکی (Ca, Mg, Na, K و سایر کاتیون‌ها) را به سمت تشکیل ترکیبات کربناتی این کاتیون‌ها سوق می‌دهد که عمدتاً نامحلول بوده و رسوب می‌نمایند. آب حاصل از ذوب یخچال ممکن است مدت زیادی در پشت رسوبات یخچالی متوقف بماند و فرایند رسوب کربنات در حین ذوب یخ ادامه یابد. البته بخشی از آب حاصل از ذوب یخچال نیز ممکن است به همراه خود، رسوبات یخچالی را حمل نموده و کربنات‌های تشکیل شده در دشت رسوبی یخچالی<sup>۱</sup> را پدید آورد. بسته به میزان انباشت و تراکم، تیپ‌های مختلفی از کربنات‌ها اعم از افق‌های پتروکلسیک و کربنات پودری و ناپیوسته ممکن است در این مناطق تشکیل شوند. مطالعات اخیر گویای گستره وسیعی از رسوبات یخچالی در دامنه‌های جنوبی البرز میانی می‌باشند (راهب و همکاران، ۱۳۹۵) که به احتمال زیاد تحت این فرایندها تشکیل شده‌اند.

## پیشینه تحقیق

ورود بقایای موجودات زنده به خاک و تبدیل آن به دی‌اکسیدکربن و هوموس، غلظت دی‌اکسیدکربن هوای خاک را بین ۱۰ تا ۱۰۰ برابر افزایش می‌دهد که نتیجه آن، افزایش مواد آلی و رسوب کربنات‌ها و در نهایت، کاهش دی‌اکسیدکربن اتمسفر است. حداکثر توانایی خاک برای کاهش غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفر در مقیاس جهانی، حدود ۴۵۰ تا ۹۰۰ میلیون تن در سال برآورد شده است. کربن موجود در خاک، یکی از مهم‌ترین منابع کربن موجود در جهان بوده و شامل دو شکل کربن آلی (SOC)<sup>۲</sup> و غیرآلی (SIC)<sup>۳</sup> است (Shi et al., 2012). بنا بر اظهارات Burke et al. 1989 بسته به عوامل محیطی و اقلیم، میزان کربن موجود در خاک اکوسیستم‌های مختلف متغیر می‌باشد. یکی از فرآیندهایی که سبب ترسیب کربن در خاک می‌شود، ذوب شدن یخچال‌ها می‌باشد. یخچال‌ها پس از ذوب شدن منجر به آزاد شدن حجم وسیعی از آب می‌شوند (Mölg et al., 2018) که نمره آن آبشویی خاک، هوادیدگی مواد معدنی و افزایش فعالیت بیولوژیکی بوده است. افزایش فعالیت بیولوژیکی منجر به اثرات مختلفی از جمله انتشار دی‌اکسیدکربن و متان (Aschenbach et al., 2013) و یا ترسیب کربن در خاک می‌شود (Bockheim, & Munroe, 2014). فرآیندهای یخچالی که سبب انباشت مواد کربناتی و تشکیل کانی‌های رسی ثانویه می‌شوند، معرف وجود شرایط اقلیم گذشته می‌باشند. به سبب سهم بیشتر کربن آلی نسبت به کربن غیرآلی در محتوای کربن خاک در بیشتر مناطق و جذب دی‌اکسیدکربن، بیشتر توجهات به کربن آلی معطوف بوده است (Li et al., 2007). این در حالی است که در مناطق خشک و نیمه‌خشک، که یک‌سوم از سطح زمین و بیش از ۸۲ درصد از مساحت کشور ایران را به خود اختصاص داده‌اند (Khoshbakht, 2011)، کربن غیرآلی که شامل کربنات‌ها می‌باشد، در مقایسه با کربن آلی، بخش غالب بوده و حدود ۲ تا ۱۰ برابر بیشتر از فرم آلی است (Eswaran et al., 2000). کربنات‌ها به دو شکل کربنات‌های اولیه یا موروثی (لیتوژنیک)<sup>۴</sup> و کربنات‌های ثانویه یا خاک‌ساخت (پدوژنیک)<sup>۵</sup> تقسیم می‌شوند (Ming, 2002). کربنات‌های ثانویه حاصل از انحلال و رسوب مجدد کربنات‌های موروثی، تحت تأثیر افزایش فشار دی‌اکسیدکربن و هوادیدگی سیلیکات‌های کلسیم‌دار ایجاد می‌شوند (Durand et al., 2010).

افزون بر نقش کربنات‌ها در تثبیت و انتشار دی‌اکسیدکربن، شکل آزاد کربنات بر پایداری خاکدانه، فعالیت‌های میکروبی خاک، pH خاک، سرعت تجزیه مواد آلی خاک، قابلیت جذب عناصر، نفوذپذیری، پایداری خاک، قابلیت نگهداشت آب و تغذیه گیاه تأثیرگذار می‌باشد و با توجه به مقدار موجود در خاک، اثرات مثبت و منفی بر جای می‌گذارد (Bowman et al., 2008). یکی دیگر از اثرات وجود کربنات معدنی در خاک، تغییراتی است که بسته به اندازه ذرات کربنات و یا هم‌آوری ذرات اولیه خاک و تشکیل ذرات ثانویه، در توزیع اندازه ذرات خاک (PSD)<sup>۶</sup> ایجاد می‌نماید. Lebron et al., 2002 نیز کربنات کلسیم موجود در خاک را از ویژگی‌های تأثیرگذار بر توزیع اندازه ذرات

1 Glacial outwash

2 SOC: Soil Organic Carbon

3 SIC: Soil Inorganic Carbon

4 Lithogenic

5 Pedogenic

6 Particle Size Distribution



معرفی نمودند. Kraimer & Monger, 2009 بیان کردند اگر چه کربنات خاک ساخت در همه ابعاد اندازه‌ای وجود دارند، ولی غالباً در ابعاد سیلت و رس رسوب می‌کنند؛ در حالی که کربنات‌های موروثی معمولاً در ابعاد درشت‌تر (مثل شن) ظاهر می‌شوند.

حذف کربنات‌ها در خاک‌هایی با مقادیر زیاد کربنات، سبب حذف بخشی از ذرات اولیه خاک خواهد شد. از طرفی پس از حذف کربنات کلسیم از خاک، به دلیل تخریب ساختمان خاک، جرم ویژه ظاهری آن نیز تغییر می‌کند. حال با توجه به کربناتی بودن غالب خاک‌های کشور ایران و تأثیر حذف کربنات بر میزان ذرات اولیه، همچنین هزینه‌بر بودن حذف مواد سیمانی، در بیشتر موارد در هنگام اندازه‌گیری بافت خاک از حذف کربنات خودداری می‌شود (Shein, 2009).

شناسایی کربنات‌های خاک ساخت از کربنات‌های موروثی، به‌ویژه در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک که مواد مادری کربناتی و یا سنگ‌های کربناتی به مقدار زیاد حضور دارند (Stoops, 2003)، کاری بس دشوار می‌باشد. یکی از مناسب‌ترین روش‌های تشخیصی، بررسی خصوصیات میکرومورفولوژیکی به‌جای مانده حاصل از فعالیت کربنات‌ها در خاک است (Stoops, 2003). از عوارض ویژه کربنات‌های خاک ساخت، می‌توان به پوشش‌ها<sup>۱</sup>، پرشدگی<sup>۲</sup> درز و ترک‌ها، رگه‌ها، سخت‌دانه‌ها، گرهک‌ها<sup>۳</sup>، قشر سطحی و ریشه‌های کربناتی‌شده (ریزولیت‌ها<sup>۴</sup>) اشاره نمود (McCoy et al., 2016).

منابع علمی منتشر شده عمدتاً منشأ کربنات‌های ثانویه خاک را به انحلال و بازتوزیع کربنات‌های اولیه و یا انحلال دی‌اکسیدکربن حاصل از تنفس در محلول خاک و سپس رسوب به صورت کربنات‌ها ربط داده‌اند و در مورد منشأ یخچالی کربنات‌ها اطلاعات زیادی منتشر نشده است. اهداف اصلی این پژوهش، بررسی منشأ کربنات کلسیم خاک ساخت در خاک‌های تشکیل یافته در رسوبات یخچالی و مطالعه تأثیر فرآیندهای یخچالی بر تشکیل کربنات خاک ساخت و عوارض میکرومورفولوژیک حاصل و نیز بررسی امکان تشکیل کربنات‌های خاک از انحلال مستقیم دی‌اکسیدکربن در آب‌های سرد یخچالی می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

در این مطالعه هشت خاک‌رخ در حد فاصل امتداد کرج - هشتگرد (شکل ۱) با کاربری مرتعی و اقلیم نیمه‌خشک (جدول ۱) مورد بررسی گرفت. رژیم‌های حرارتی و رطوبتی خاک مناطق مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار NSM<sup>۱</sup> تعیین گردید (USDA-NRCS, 2012). از نظر تنوع مواد مادری نیز خاک‌رخ‌های مورد مطالعه در هر منطقه مذکور از نوع رسوبات یخچالی-آبرفتی تشخیص داده شد. از طرف دیگر، خاک‌های مورد مطالعه با توجه به نوع مواد مادری از نظر عمق، از خاک‌های نسبتاً کم‌عمق تا خاک‌های بسیار عمیق متغیر هستند. اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی و شیمیایی در ۲۷ نمونه برداشت‌شده از افق‌های ژنتیکی خاک‌رخ‌های مطالعه‌شده، پس از هواخشک کردن و عبور از الک دو میلی‌متری صورت گرفت. بافت خاک قبل و بعد از حذف کربنات کلسیم با اسید کلریدریک ۱ نرمال و آبشویی اسید اضافی، به روش هیدرومتر، pH و EC در عصاره اشباع (Carter and Gregorich, 2008)، کربن آلی به روش والکلی-بلک، درصد کربنات کلسیم معادل (CCE) با استفاده از روش کلسیمتری و ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) با استفاده از روش استات آمونیوم در pH=۷ اندازه‌گیری شدند (Sparks, 1996). تشریح خاک‌رخ‌ها براساس روش استاندارد وزارت کشاورزی آمریکا (Ditzler et al., 2017) و رده‌بندی خاک‌ها نیز براساس نسخه سیزدهم کلید سیستم رده‌بندی آمریکایی (Survey Soil Staff, 2022) صورت گرفت. به‌منظور مطالعه میکرومورفولوژی نمونه‌های دست‌نخورده، پس از هواخشک کردن نمونه‌ها، تلقیح نمونه‌ها با اضافه کردن رزین پلی‌استر و استایرن با نسبت ۴۰ به ۶۰ و اضافه نمودن سخت‌کننده و کاتالیست در دستگاه دسیکاتور خلاء صورت پذیرفت. پس از سخت شدن نمونه‌ها برش با اره الماسه انجام گرفت و پس از صاف و صیقلی کردن سطوح برش داده شده، بر روی لام‌های شیشه‌ای زبر و کاملاً تمیز چسبانده شدند و تا حدود ۳۰ میکرون نازک گردیدند. مقاطع نازک تهیه‌شده با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان Olympus مدل (BX51) در دو حالت نور پلاریزه صفحه‌ای<sup>۵</sup> (PPL) و نور پلاریزه متقاطع<sup>۶</sup> (XPL) مورد مطالعه قرار گرفتند. تشریح و تفسیر نتایج بر اساس راهنمای تشریح مقاطع نازک صورت پذیرفت (Stoops, 2003) و از عوارض مورد نظر عکس‌برداری شد.

1 Coating

2 Infilling

3 Nodules

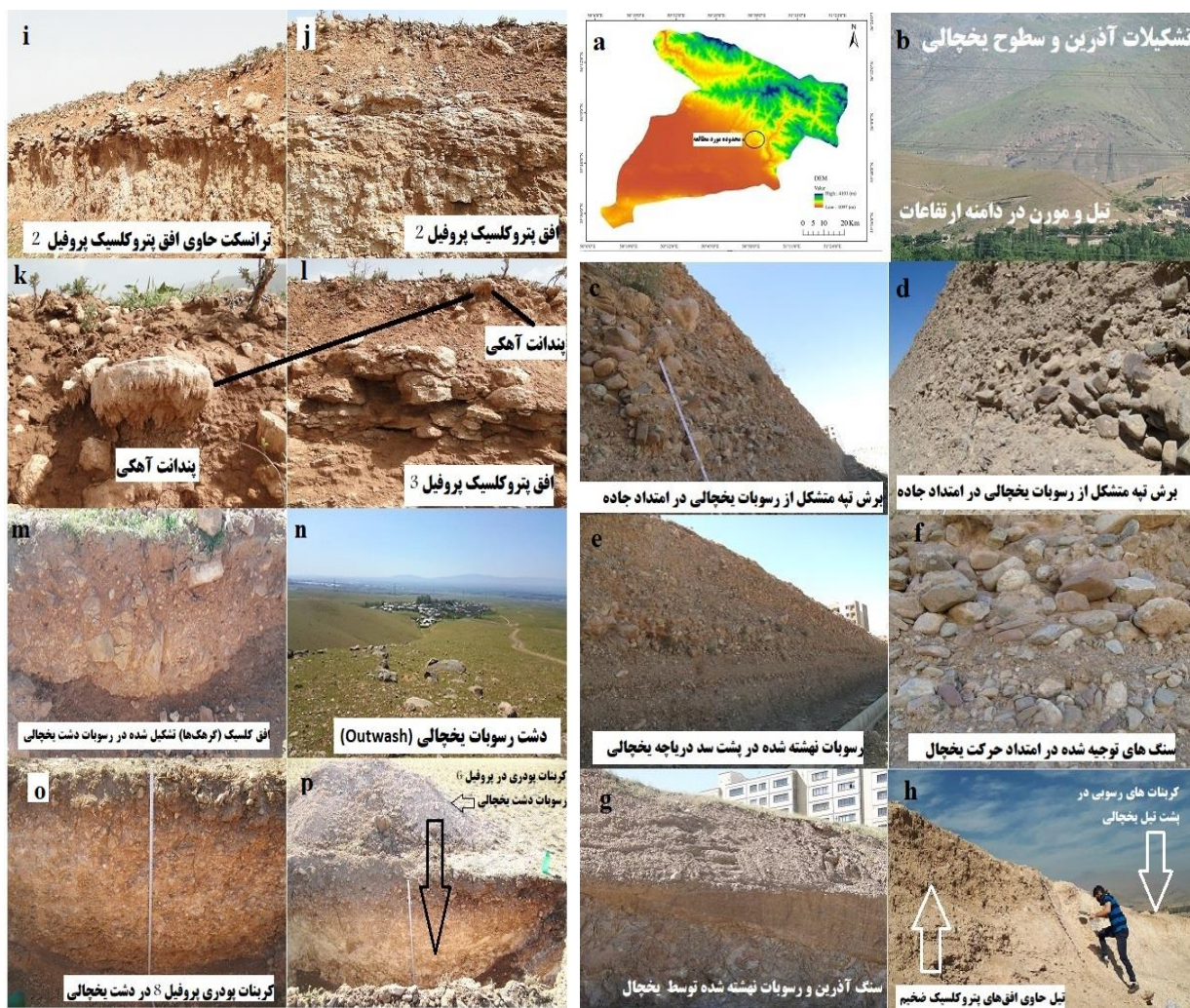
4 Rizolite

5 Plane polarized light

6 Cross polarized light

جدول ۱- خصوصیات اقلیمی و رژیم‌های رطوبتی و حرارتی خاک در مناطق مورد مطالعه

| منطقه  | ارتفاع (m a.s.l.) | میانگین بارندگی (mm) | میانگین دما (°C) | رژیم رطوبتی | رژیم حرارتی |
|--------|-------------------|----------------------|------------------|-------------|-------------|
| کرج    | ۱۳۱۲ متر          | ۲۳۹/۵                | ۱۵/۲۰            | زریک        | ترمیک       |
| هشتگرد | ۱۶۱۳ متر          | ۳۳۷/۹                | ۱۵/۰۳            | زریک        | ترمیک       |



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه بر روی نقشه استان البرز و تصاویر خصوصیات ژئومورفولوژی و مورفولوژی برخی از خاک‌های مطالعه شده.

a موقعیت منطقه مورد مطالعه، b سطوح ژئومورفیک یخچالی، c برش تیل یخچالی، d برش تیل یخچالی، e نهشته‌های در دامنه پایین سد یخچالی، f سنگ‌های توجیه شده در بستر یخچال، g سنگ بسار آذرین و رسوبات یخچالی، h رسوب کربنات در بستر دریاچه و افق‌های پتروکلسیک، i ترانسکت افق پتروکلسیک در محل پروفیل ۲، j افق پتروکلسیک پروفیل ۲، k پندانت آهکی از پروفیل ۳، l افق پتروکلسیک پروفیل ۳، m افق کلسیک پروفیل ۵، n دشت یخچالی، o کربنات پودری پروفیل ۸، p کربنات پودری در پروفیل ۶، رُسوبات دشت یخچالی

## نتایج و بحث

### خصوصیات مورفولوژیکی خاک‌ها

خاک‌های منطقه مورد مطالعه با توجه به نتایج حاصل از تشریح خاک‌رخ‌ها، در رده اینسپتی سول طبقه‌بندی می‌شوند (جدول ۲). بر اساس نتایج، عمق خاک‌رخ‌های مورد مطالعه بین ۷۰ تا ۱۵۰ سانتی‌متر متغیر است. افق‌های ژنتیکی مشاهده شده شامل افق A، Bw، Bk، Bkm، BC و CB بودند که در خاک‌رخ شماره ۱ افق‌های Bk و Bck با مواد مادری مشابه مدفون شده‌اند و برای نشان دادن آنها پسوند b افزوده



شده است.

همچنین خاک‌های شماره ۲ و ۳ دارای افق پتروکلسیک هستند که پسوند m نشان‌دهنده آن می‌باشد. تجمع کربنات‌های پودری با درجه تباین واضح با فراوانی حدود (۱۵-۱۰٪) در منطقه کرج تا تجمع کربنات به شکل گرهک‌های مشخص (۲۵-۲۰٪) و اشکال سیمانی پتروکلسیک (۴۰-۳۰٪) در منطقه هشتگرد با بارندگی بیشتر بود (شکل ۱).

جدول ۲- نتایج تشریح خصوصیات مورفولوژیکی خاک‌های مورد مطالعه

| افق  | عمق (cm) | تجمعات کربناتی % | حفرات* | ساختمان** | ریشه*     | سنگ‌ریزه % | ارتفاع (m) |
|--|----------|------------------|--------|-----------|-----------|------------|------------|
| خاک‌رخ شماره یک: Coarse-loamy, mixed, superactive, thermic, Typic Calcixerepts       |          |                  |        |           |           |            |            |
| A  | ۰-۲۵     | -                | 2m/f   | 2mabk     | vf,f/f/2m | ۲-۵        | ۱۶۰۱       |
| Bw   | ۴۰-۲۵    | -                | 1f     | 1,2m/fabk | 1vf       | ۱۵-۱۰      |            |
| Bkb  | ۴۰-۱۱۰   | ۱۵-۲۰            | 1vf    | 1fabk     | 1vf       | ۱۵-۲۰      |            |
| BCkb   | ۱۵۰-۱۱۰  | ۵-۱۰             | 1vf    | 1fabk     | 1vf       | ۱۵-۲۰      |            |
| خاک‌رخ شماره دو: Coarse-loamy, mixed, superactive, thermic, Petrocalcic Calcixerepts |          |                  |        |           |           |            |            |
| A  | ۰-۱۱     | -                | 1f     | 2f/mabk   | 1f        | ۲۰-۱۵      | ۱۶۱۴       |
| Bk1  | ۱۱-۳۵    | ۱۵-۲۰            | 1vf    | 2mabk     | 1vf       | ۲۰-۳۰      |            |
| Bk2  | ۳۵-۷۳    | ۲۰-۳۰            | 1vf    | 2m/cabk   | 1vf       | ۳۰-۴۰      |            |
| Bkm  | ۷۳-۱۱۰   | ۳۰-۴۰            | -      | 2m/cabk   | -         | >۴۰        |            |
| خاک‌رخ شماره سه: Coarse-loamy, mixed, superactive, thermic, Petrocalcic Calcixerepts |          |                  |        |           |           |            |            |
| A  | ۰-۱۰     | ۲۰-۳۰            | 2m/f   | 2f/mabk   | 1vf/2m    | ۲۰-۳۰      | ۱۵۶۰       |
| Bk   | ۱۰-۳۸    | ۱۵-۲۰            | 1vf    | 2mabk     | 1vf       | ۱۵-۲۰      |            |
| Bkm  | ۳۸-۸۰    | ۱۵-۲۰            | -      | 2mabk     | -         | ۱۵-۲۰      |            |
| C  | +80      |                  |        |           |           |            |            |
| خاک‌رخ شماره چهار: Coarse-silty, mixed, superactive, thermic, Typic Calcixerepts     |          |                  |        |           |           |            |            |
| A  | ۰-۱۲     | -                | 2f     | 1fabk     | 1f/vf/c   | ۱۵-۲۰      | ۱۳۴۲       |
| Bw   | ۱۲-۳۰    | -                | 2m/f   | 2mabk     | 1f/c      | ۲۰-۳۰      |            |
| BCk  | ۳۰-۸۰    | ۱۰-۱۵            | 1vf    | 2mabk     | 1vf       | ۳۰-۴۰      |            |
| C  | +80      |                  |        |           |           |            |            |
| خاک‌رخ شماره پنجم: Coarse-loamy, mixed, superactive, thermic, Typic Calcixerepts     |          |                  |        |           |           |            |            |
| A  | ۰-۱۰     | -                | 2m     | 1/2f/mabk | 2m/1f/vf  | -          | ۱۳۵۱       |
| Bw   | ۱۰-۲۰    | -                | 1/2f   | 1/2f/mabk | 1m/f      | -          |            |
| BCk  | ۲۰-۸۰    | ۵-۱۰             | 1vf    | 2mabk     | 1vf       | -          |            |
| CBk  | ۸۰-۱۵۰   | ۲۰-۲۵            | 1vf    | 2mabk     | 1vf       | -          |            |
| خاک‌رخ شماره شش: Coarse-loamy, mixed, superactive, thermic, Typic Calcixerepts       |          |                  |        |           |           |            |            |
| A  | ۰-۲۱     | -                | 2m     | 2mabk     | 1m/f      | ۱۰-۱۵      | ۱۳۹۳       |
| Bk   | ۲۱-۵۸    | ۱۰-۱۵            | 1f/vf  | 2mabk     | 1f/vf     | ۲۰-۳۰      |            |
| BC   | ۵۸-۱۲۰   | -                | 1vf    | 1fabk     | 1vf       | ۳۰-۴۰      |            |
| خاک‌رخ شماره هفت: Coarse-loamy, mixed, superactive, thermic, Typic Calcixerepts      |          |                  |        |           |           |            |            |
| A  | ۰-۲۳     | -                | 2m     | 2mabk     | 2c/m/f    | ۱۰-۱۵      | ۱۴۳۰       |
| Bw   | ۲۳-۳۵    | -                | 1f/vf  | 1fabk     | 2m/1f/vf  | ۳۰-۴۰      |            |
| Bk   | ۳۵-۸۲    | ۱۰-۱۵            | 1vf    | 1fsbk     | 1vf       | ۲۰-۳۰      |            |
| BC   | +82      |                  |        |           |           |            |            |
| خاک‌رخ شماره هشت: Coarse-loamy, mixed, superactive, thermic, Typic Calcixerepts      |          |                  |        |           |           |            |            |
| A  | ۰-۱۰     | -                | 2m     | 2msbk     | 2m/f      | ۱۰-۱۵      | ۱۴۷۴       |
| Bw   | ۱۰-۲۵    | -                | 1vf    | 1fsbk     | 1/2vf     | ۱۵-۲۰      |            |
| Bk   | ۲۵-۷۰    | ۵                | 1vf    | 1fsbk     | 1vf       | ۲۰-۳۰      |            |
| BC   | +70      |                  |        |           |           |            |            |

\* vf: very fine, f: fine, m: medium, c: coarse, 1: few, 2: common.

\*\* f: fine, m: medium, 1: weak, 2: moderate, abk: angular blocky, sbk: subangular blocky

ریشه در افق‌ها، در اندازه‌های درشت تا خیلی ریز و در مقادیر ناچیز تا متوسط، تغییر می‌نماید. مواد مادری تشکیل‌دهنده خاک‌ها متشکل از رس، سیلت، شن و سنگریزه به همراه قطعات سنگی بسیار بزرگ، به صورت یک‌جا و فاقد جورشدگی می‌باشند که از مشخصات رسوبات یخچالی است. وجود سنگ‌های مسطح و توجیه‌شده در راستای بزرگ‌ترین سطح در زیر لایه رسوبات و بر روی سنگ بستر آذرین از دیگر شواهد مؤید رسوبات یخچالی در منطقه می‌باشد (شکل ۱). درصد سنگ‌ریزه در خاک‌ها متفاوت بوده و از خاک‌ریز فاقد سنگ‌ریزه (خاک‌ریز پنچ) تا بیش از ۴۰ درصد (خاک‌ریز دو) متغیر می‌باشد که با افزایش عمق افزایش می‌یابد. ساختمان در تمامی خاک‌ریزها، مکعبی و اکثراً از نوع مکعبی زاویه‌دار در اندازه‌های کوچک تا درشت و در وضوح کم تا متوسط ارزیابی شده است. برخلاف آنچه از نتایج تجزیه‌های آزمایشگاهی به دست آمده است (جدول ۳)، افزایش درصد رس و تشکیل پوسته‌های رسی در هیچ‌یک از خاک‌ریزهای مورد بررسی مشاهده نشد. همچنین در مطالعه مقاطع نازک تهیه‌شده از اعماق مختلف خاک‌ریزها نیز عوارض تجمع رس مشاهده نشد.

### خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها

جدول ۳ نتایج اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های تهیه‌شده از خاک‌ریزهای مطالعه شده را نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده از توزیع اندازه ذرات خاک بدون حذف کربنات‌ها نشان‌دهنده افزایش درصد رس از سطح به عمق در اغلب خاک‌های (خاک‌ریزهای دو تا هشت) توسعه‌یافته بر روی رسوبات آبرفت یخچالی<sup>۱</sup> می‌باشد. با مشاهده افزایش زیاد درصد رس تعیین شده در افق‌های زیرین در مقایسه با افق‌های سطحی (جدول ۳)، انتظار می‌رود که در تشریح صحرائی و همچنین تشریح مقاطع نازک با پوشش‌های رسی به مقدار زیاد مواجه شویم ولی بررسی‌های دقیق مورفولوژی خاک‌ها و مطالعه مقاطع نازک تهیه‌شده اثبات نمود که هیچگونه پوشش رسی در این خاک‌ریزها تشکیل نشده است. بنابراین افزایش درصد رس به احتمال زیاد به کربنات‌های در ابعاد رس (رس‌های غیرسیلیکاتی) نسبت داده شد. برای اثبات این مدعا اقدام به حذف کربنات‌ها و تعیین مجدد توزیع اندازه ذرات در نمونه‌های فاقد کربنات گردید (جدول ۳). بررسی توزیع اندازه ذرات خاک‌ریزهای توسعه‌یافته بر روی رسوبات یخچالی قبل و بعد از حذف کربنات‌ها نشان داد که بخش عمده کربنات‌های موجود در این خاک‌ها در ابعاد رس (و تا حدودی سیلت) می‌باشند؛ به نحوی که با حذف کربنات‌ها درصد رس آنها به شدت کاهش یافت (جدول ۳) و کلاس توزیع اندازه ذرات در آنها از کلاس‌های لومی و لوم-رسی به کلاس‌های درشت‌بافت‌تر لوم‌شنی، شن لومی و حتی شن تغییر یافت (شکل ۲). پس از حذف کربنات، مقادیر شن خیلی ریز افزوده شد. درصد رس در خاک‌ریزهای مطالعه‌شده پیش از حذف کربنات‌ها به ۴۰٪ نیز می‌رسد این در حالی است که پس از حذف کربنات کلسیم از خاک مقادیر رس در بیش از ۹۰٪ از نمونه‌ها بسیار کم بوده و از ۱۵٪ تجاوز نمی‌کند. این موضوع نشان می‌دهد که کربنات کلسیم موجود در نمونه‌ها غالباً در ابعاد رس بوده و به این جهت پیش از حذف کربنات شاهد درصد بالای رس در خاک بوده‌ایم.

نکته حائز اهمیت دیگر در توزیع اندازه ذرات آن است که بیشترین مقادیر بخش رس (که بخش عمده آن کربنات می‌باشد) در بخش میانی خاک‌ریزها دیده می‌شود و در اعماق بیشتر روند نزولی دارد (جدول ۳) که به احتمال زیاد با عمق نفوذ آب‌های سرد و رسوب کربنات محلول در عمق نفوذی پس از واکنش با کاتیون‌های حاضر در محیط شوند، به همین دلیل در اعماق بیشتر، مقادیر آنها کاهش یافته است. چنین روندی پس از حذف کربنات‌ها در اغلب موارد از بین رفته است (جدول ۳).

نکته مهم دیگر در توزیع اندازه ذرات، تفاوتی است که بین خاک‌ریزهای دارای افق پتروکلسیک و خاک‌ریزهای فاقد آن است. همانطور که در جدول ۳ نشان داده شده است درصد رس قبل و بعد از حذف کربنات‌ها در بخش میانی این خاک‌ریزها شرایط لازم را برای احراز خصوصیات افق آرگیلیک دارا می‌باشند. با وجود این، مطالعه مقاطع نازک قبل از حذف کربنات‌ها عوارض پوشش رسی را نشان نداد. بررسی مقاطع نازک پس از حذف کربنات‌ها نشان داد که b-فابریک کریستالیتیک موجود در ریزتوده حذف و تبدیل به b-فابریک نامتمایز شد و b-فابریک لکه‌ای متشکل از رس‌های فیلوسیلیکاتی و پوشش‌های رسی ضعیف بر روی قطعات سنگ آشکار شد (شکل ۵e و ۵f) که مؤید جهت‌یافتگی‌های جزئی رس و احتمالاً انتقال رس می‌باشد. البته احتمال انتقال رس‌های فیلوسیلیکاتی همراه با آب حاصل از ذوب یخچال‌ها و هم‌رسوبی آنها هم‌زمان با رسوب کربنات‌ها در افق‌های پتروکلسیک دور از انتظار نیست.

مطلوبی و همکاران (۱۳۸۹) پس از بررسی تأثیر حذف کربنات بر ویژگی‌های رطوبتی خاک‌های سری گرمسار اظهار نمودند در اکثر نمونه‌ها پس از حذف آهک، فراوانی نسبی شن، افزایش و فراوانی نسبی رس و سیلت، کاهش یافته است. به عبارت دیگر با حذف کربنات‌ها، درصد ذرات بخش سیلت و رس کاهش، در نتیجه درصد ذرات شن خاک، افزایش یافته است. مطالعات پژوهش لطفی (۱۳۹۵)



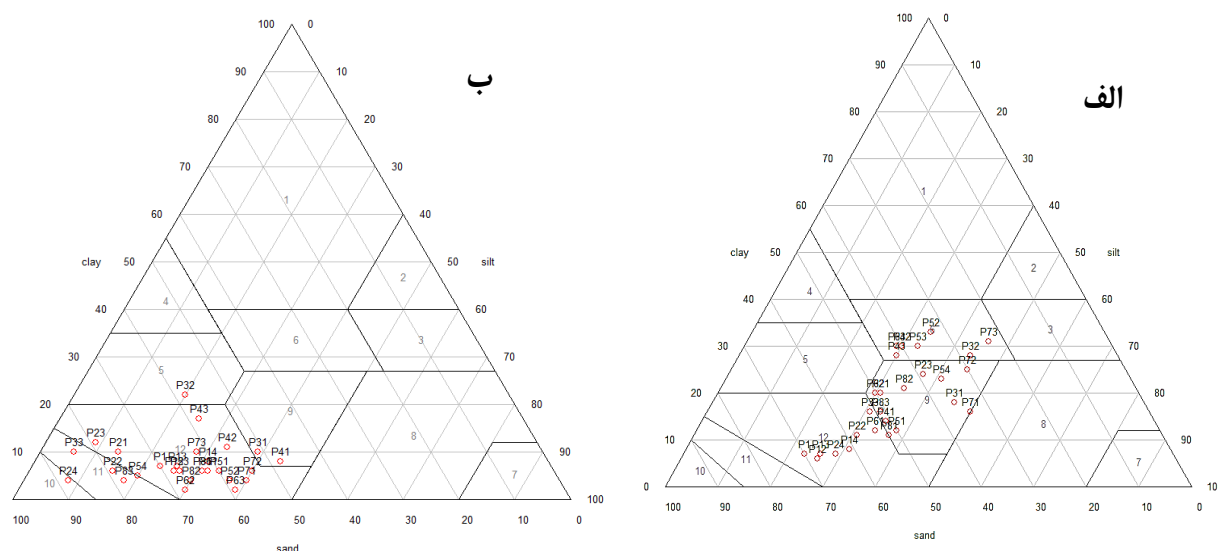
بر روی تأثیر حذف کربنات بر ذرات اولیه خاک نشان داد که حذف کربنات بر روی درصد ذرات رس، سیلت و شن خیلی ریز تأثیر معنی داری داشته، اما بر روی شن تأثیر معنی داری نداشته است. مقادیر زیادتر بخش سیلت و شن ریز قبل از حذف کربنات‌ها را می‌توان مربوط به خاصیت سیمان‌کنندگی آنها دانست که ذرات ریز را به هم متصل کرده و سبب افزایش درصد سیلت و شن می‌شود. Jensen et al., 2017. خاصیت سیمانی کربنات کلسیم در خاک را علت افزایش قطر ذرات خاکدانه‌ها دانستند و کربنات را به‌عنوان یک ماده سیمانی در خاک معرفی کردند.

جدول ۳- نتایج اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های مورد مطالعه

| عمق (cm)   | افق  | توزیع اندازه ذرات از حذف کربنات‌ها % |      |      |                |           |             |             |         |      |      |      |                | pH e | ECe (ds/m-1) | CCE (%) ** | CEC (cmol/kg) | OC % |
|--|------|--------------------------------------|------|------|----------------|-----------|-------------|-------------|---------|------|------|------|----------------|------|--------------|------------|---------------|------|
|  |      | Clay                                 | Silt | Sand | Very Fine sand | Fine Sand | Medium Sand | Coarse Sand | Texture | Clay | Silt | Sand | Very Fine sand |      |              |            |               |      |
| خاک‌رخ شماره یک: Typic Calcixerepts (WRB: Haplic Calcisols)                |      |                                      |      |      |                |           |             |             |         |      |      |      |                |      |              |            |               |      |
| ۰-۲۵   | A    | ۷                                    | ۲۳   | ۷۰   | ۱۷             | ۱۵        | ۱۲          | ۱۶          | sl      |      |      |      |                | ۸/۳  | -۰/۶         | ۸/۶        | ۱۵            | ۱/۲  |
| ۲۵-۴۰  | Bw   | ۶                                    | ۲۶   | ۶۸   | ۱۶             | ۱۳        | ۱۲          | ۱۱          | sl      |      |      |      |                | ۸/۲  | -۰/۷         | ۱۲         | ۱۵            | ۰/۳  |
| ۴۰-۱۱۰   | Bkb  | ۷                                    | ۲۶   | ۶۷   | ۱۳             | ۲۶        | ۱۰          | ۱۸          | sl      |      |      |      |                | ۸/۲  | -۰/۸         | ۱۲         | ۱۶            | ۰/۳  |
| ۱۱۰-۱۶۰  | BCKb | ۸                                    | ۳۱   | ۶۱   | ۱۸             | ۱۳        | ۹           | ۱۱          | sl      |      |      |      |                | ۷/۲  | -۰/۸         | ۲۱         | ۱۵            | ۰/۱  |
| خاک‌رخ شماره دو: Petrocalcic Calcixerepts (WRB: Skeletic Petric Calcisols) |      |                                      |      |      |                |           |             |             |         |      |      |      |                |      |              |            |               |      |
| ۰-۱۱   | A    | ۲۰                                   | ۳۱   | ۴۹   | ۱۵             | ۱۱        | ۷           | ۸           | l       | ۱۰   | ۱۴   | ۷۶   | ۶۱             | ۷/۹  | -۰/۶         | ۱          | ۹             | ۰/۴  |
| ۱۱-۳۵  | Bk1  | ۱۱                                   | ۳۱   | ۵۸   | ۱۶             | ۹         | ۹           | ۹           | sl      | ۶    | ۱۵   | ۷۹   | ۵۴             | ۸/۰  | -۰/۷         | ۱          | ۱۱            | ۰/۳  |
| ۳۵-۷۳  | Bk2  | ۲۴                                   | ۳۷   | ۳۹   | ۱۳             | ۹         | ۹           | ۶           | cl      | ۱۲   | ۹    | ۷۹   | ۷۶             | ۸/۱  | -۰/۶         | ۰          | ۷             | ۰/۷  |
| ۷۳-۱۱۰   | Bkm  | ۷                                    | ۲۹   | ۶۴   | ۹              | ۱۳        | ۱۰          | ۱۵          | sl      | ۴    | ۸    | ۸۸   | ۷۳             | ۷/۷  | -۰/۸         | ۴          | ۶/۴           | ۰/۱  |
| خاک‌رخ شماره سه: Petrocalcic Calcixerepts (WRB: Petric Calcisols)          |      |                                      |      |      |                |           |             |             |         |      |      |      |                |      |              |            |               |      |
| ۰-۱۰   | A    | ۱۸                                   | ۴۶   | ۳۶   | ۱۶             | ۸         | ۴           | ۴           | l       | ۱۰   | ۳۹   | ۵۱   | ۴۲             | ۸/۴  | -۰/۵         | ۱          | -             | ۰/۸  |
| ۱۰-۳۸  | Bw   | ۲۸                                   | ۴۲   | ۲۸   | ۱۵             | ۵         | ۳           | ۳           | cl      | ۲۲   | ۲۰   | ۵۸   | ۵۴             | ۸/۱  | -۰/۶         | ۵          | -             | ۰/۴  |
| ۳۸-۸۰  | BCK  | ۱۶                                   | ۳۱   | ۵۳   | ۱۴             | ۱۳        | ۸           | ۹           | sl      | ۱۰   | ۶    | ۸۴   | ۷۶             | ۸/۱  | -۰/۷         | ۱          | -             | ۰/۲  |
| خاک‌رخ شماره چهار: Typic Calcixerepts (WRB: Skeletic Calcisols)            |      |                                      |      |      |                |           |             |             |         |      |      |      |                |      |              |            |               |      |
| ۰-۱۲   | A    | ۱۴                                   | ۳۵   | ۵۱   | ۳۲             | ۹         | ۵           | ۲           | l       | ۸    | ۴۴   | ۴۸   | ۳۰             | ۸/۵  | -۰/۶         | ۱          | -             | ۰/۷  |
| ۱۲-۳۰  | Bw   | ۳۰                                   | ۳۰   | ۴۰   | ۲۶             | ۷         | ۳           | ۲           | cl      | ۱۱   | ۳۳   | ۵۶   | ۴۱             | ۸/۸  | -۰/۴         | ۲          | -             | ۰/۴  |
| ۳۰-۸۰  | BCK  | ۲۸                                   | ۳۰   | ۴۲   | ۲۹             | ۶         | ۳           | ۲           | cl      | ۱۷   | ۲۵   | ۵۸   | ۴۵             | ۸/۷  | -۰/۴         | ۲          | -             | ۰/۲  |
| خاک‌رخ شماره پنج: Typic Calcixerepts (WRB: Haplic Calcisols)               |      |                                      |      |      |                |           |             |             |         |      |      |      |                |      |              |            |               |      |
| ۰-۱۰   | A    | ۱۲                                   | ۳۸   | ۵۰   | ۲۴             | ۱۵        | ۶           | ۴           | l       | ۶    | ۳۴   | ۶۰   | ۳۹             | ۸/۸  | -۰/۵         | ۳          | ۱۴            | ۰/۳  |
| ۱۰-۲۰  | Bw   | ۳۳                                   | ۳۴   | ۳۳   | ۱۸             | ۷         | ۳           | ۳           | cl      | ۴    | ۳۷   | ۵۹   | ۴۷             | ۸/۸  | -۰/۴         | ۲          | ۲۰            | ۰/۳  |
| ۲۰-۸۰  | BCK  | ۳۰                                   | ۳۳   | ۳۷   | ۱۴             | ۹         | ۶           | ۴           | cl      | ۶    | ۲۷   | ۶۷   | ۴۸             | ۸/۷  | -۰/۷         | ۳          | ۱۲            | ۰/۱  |
| ۸۰-۱۵۰   | CBk  | ۲۳                                   | ۴۱   | ۳۶   | ۱۵             | ۴         | ۴           | ۴           | l       | ۵    | ۲۰   | ۷۵   | ۶۲             | ۸/۵  | -۰/۷         | ۲          | ۱۱            | ۰/۰  |
| خاک‌رخ شماره شش: Typic Calcixerepts (WRB: Skeletic Calcisols)              |      |                                      |      |      |                |           |             |             |         |      |      |      |                |      |              |            |               |      |
| ۰-۲۱   | A    | ۱۲                                   | ۳۴   | ۵۴   | ۲۵             | ۱۳        | ۶           | ۶           | sl      | ۶    | ۳۲   | ۶۲   | ۳۹             | ۸/۷  | -۰/۵         | ۳          | ۹             | ۰/۴  |
| ۲۱-۵۸  | Bk   | ۲۰                                   | ۳۰   | ۵۰   | ۲۷             | ۹         | ۴           | ۵           | l       | ۲    | ۳۰   | ۶۸   | ۴۷             | ۸/۷  | -۰/۴         | ۴          | ۱۳            | ۰/۲  |
| ۵۸-۱۲۰   | BC   | ۳۰                                   | ۲۹   | ۴۱   | ۱۰             | ۱۳        | ۷           | ۷           | cl      | ۲    | ۳۹   | ۵۹   | ۴۱             | ۸/۵  | -۰/۷         | ۳          | ۱۶            | ۰/۱  |
| خاک‌رخ شماره هفت: Typic Calcixerepts (WRB: Skeletic Calcisols)             |      |                                      |      |      |                |           |             |             |         |      |      |      |                |      |              |            |               |      |
| ۰-۲۳   | A    | ۱۶                                   | ۵۰   | ۳۴   | ۱۷             | ۷         | ۴           | ۳           | sl      | ۴    | ۴۰   | ۵۶   | ۴۸             | ۸/۷  | -۰/۴         | ۱          | -             | ۰/۴  |
| ۲۳-۳۵  | Bw   | ۲۵                                   | ۴۵   | ۳۰   | ۱۷             | ۵         | ۳           | ۳           | l       | ۶    | ۴۰   | ۵۴   | ۴۸             | ۸/۷  | -۰/۴         | ۱          | -             | ۰/۵  |
| ۳۵-۴۵  | Bk   | ۳۱                                   | ۴۶   | ۲۳   | ۱۳             | ۴         | ۲           | ۳           | cl      | ۱۰   | ۲۸   | ۶۲   | ۵۶             | ۸/۶  | -۰/۶         | ۱          | -             | ۰/۲  |
| خاک‌رخ شماره هشت: Typic Calcixerept (WRB: Haplic Calcisols)                |      |                                      |      |      |                |           |             |             |         |      |      |      |                |      |              |            |               |      |
| ۱۰-۰۰  | A    | ۱۱                                   | ۳۷   | ۵۲   | ۲۲             | ۱۴        | ۷           | ۶           | l       | ۶    | ۳۱   | ۶۳   | ۴۶             | ۸/۷  | -۰/۵         | ۳          | -             | ۰/۸  |
| ۲۵-۱۰  | Bw   | ۲۱                                   | ۲۵   | ۴۴   | ۱۷             | ۱۰        | ۵           | ۶           | l       | ۴    | ۳۰   | ۶۶   | ۵۲             | ۸/۷  | -۰/۳         | ۳          | -             | ۰/۳  |
| ۷۰-۲۵  | Bk   | ۱۶                                   | ۳۳   | ۵۱   | ۱۸             | ۱۲        | ۷           | ۷           | l       | ۴    | ۱۸   | ۷۸   | ۶۲             | ۸/۶  | -۰/۵         | ۳          | -             | ۰/۱  |



نتایج این مطالعه نشان داد که بافت خاک از لومرسی و لومی قبل از حذف کربنات، به لومشنی و شن‌لومی و شنی پس از حذف کربنات تغییر می‌کند. همچنین آرایش موقعیت نمونه‌ها در مثلث بافت خاک (شکل ۳) پیش از حذف کربنات و پس از حذف کربنات مؤید آن است که کربنات‌های موجود در این خاک‌ها عمدتاً در ابعاد رس و سیلت قرار گرفته است. بر طبق نتایج حاصل، میزان pH نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده کمی قلیایی تا قلیایی (۸/۷-۷/۹) قرار دارد که نشان‌دهنده حضور کربنات‌های کلسیم در دامنه پایین و کربنات سدیم در حد بالایی آن می‌باشد. منافی و همکاران (۱۳۸۸) نیز به نتایج مشابهی دست یافتند و محدود بودن تغییرات pH خاک را در نتیجه خاصیت بافری ایجاد شده حاصل از مقادیر بالای کربنات کلسیم معرفی نمودند.



شکل ۲- مثلث بافت خاک قبل (الف) و بعد از حذف کربنات (ب)

دامنه تغییرات EC از حداقل  $0.35 \text{ dSm}^{-1}$  در افق Bw خاک رخ ۵، تا  $21/3 \text{ dSm}^{-1}$  در افق Bck خاک رخ ۱ متغیر می‌باشد. میانگین EC ( $1/22 \text{ dSm}^{-1}$ ) نشان می‌دهد که غالب خاک‌ها غیرشور هستند و علت آن را می‌توان منشأ یخچالی و سنگریزه‌دار بودن خاک‌های منطقه و قابلیت آبشویی بیشتر آن‌ها دانست.

مقادیر کربن آلی در مناطق مورد مطالعه از حداقل مقدار (صفر درصد) مربوط به افق CBk در خاک رخ ۵، تا  $1/23$  در افق A خاک رخ ۱ متغیر بود و در اکثر خاک‌ها روند کاهشی منظم با عمق را نشان می‌دهد. تغییرات نامنظم کربن آلی در برخی خاک‌ها می‌تواند به علت رسوب‌گذاری متناوب مواد یخچالی نسبت داده شود. در تمامی خاک‌ها غالباً افق A دارای حداکثر میزان کربن آلی بوده که می‌تواند به علت زمان کافی برای تجمع و شرایط میکرواقليمی مناسب باشد. Douglass & Bockheim, 2006 در مطالعه مورن‌های یخچالی، تجمع کربن آلی را مربوط به تأثیرات میکرواقليمی دانستند.

مقدار کربنات کلسیم معادل (CCE) موجود در خاک‌ها از  $8/6$  درصد در افق سطحی خاک رخ یک که بر روی رسوبات کوه‌رفتی قرار دارد تا بیش از  $70/3$  درصد کربنات پودری در بعد رس و سیلت در عمق میانی خاک رخ هفت که بر روی رسوبات دشت‌های آبرفتی یخچالی واقع شده است متغیر می‌باشد. در خاک‌های دو و سه که دارای افق پتروکلسیک هستند و بر روی تیل‌های یخچالی (به‌صورت درجا و احتمالاً مدت زمان طولانی‌تر تأثیر آب سرد یخچال) توسعه یافته‌اند نیز مقدار کربنات بالاست و به بیش از ۶۰ درصد رسیده است. افق پتروکلسیک با ضخامت زیاد و همچنین پندانت‌های کربناتی که گاهی طول آنها در زیر قطعات درشت به بیش از ۵ سانتی‌متر می‌رسد مؤید این زمان طولانی انتقال کربنات‌ها همراه ذوب یخچال می‌باشد. Douglass & Bockheim, 2006 بیان نمودند که تجمع کربنات پدوژنیک در ابعاد ذرات رس در مورن‌های یخچالی ارتباط خوبی با زمان دارد.

مراحل چهارگانه تشکیل افق‌های کلسیک و پتروکلسیک (Gile et al., 1966) و مراحل شش‌گانه ارائه‌شده توسط Machette, 1985 مؤید خاک‌های فوق‌العاده مسن در خاک‌های دو و سه این مطالعه می‌باشد.

طی فرآیندهای یخچالی به دلیل فوق اشباع شدن آب از یون کربنات بر اثر انحلال زیاد دی‌اکسید کربن در آب سرد حاصل از ذوب یخچال، کربنات‌ها رسوب می‌نمایند. بدین ترتیب در دریاچه یخچالی تشکیل شده در پشت تیل و مورن یخچالی و همچنین در آب حمل‌کننده رسوبات آبرفتی دشت یخچالی، مقادیر زیادی کربنات‌های انواع کاتیون‌ها رسوب کرده و به ترتیب افق‌های پتروکلسیک و کلسیک (پودری) را تشکیل داده است. عمق تشکیل افق‌های پتروکلسیک و همچنین کربنات پودری افق‌های کلسیک در دشت یخچالی با عمق نفوذ آب و توزیع اندازه ذرات ریزتر افق‌های بالایی خاک در مقایسه با افق‌های سنگریزه‌دار زیرین، قابل تفسیر می‌باشد. تجمع کربنات‌ها در افق‌های پتروکلسیک، موجب مسدود شدن منافذ و توسعه افق پتروکلسیک به سمت سطح خاک و کاهش ضخامت خاک رویین گردیده است (Gile et al., 1966). در افق‌های بالایی خاک‌های دو و سه، گرهک‌های کربناتی با اندازه‌های متوسط تا درشت به مقدار متوسط تا زیاد، نشانگر مراحل میانی (مرحله III) تشکیل کربنات‌های خاک‌ساخت طبق نظریه Gile et al., 1966 و Machette, 1985 است. تجمع کربنات‌ها در افق‌های زیرین نیز نشان‌دهنده انتقال کربنات‌های محلول در آب سرد نفوذی حاصل از ذوب یخچال می‌باشد که با نتایج ضیایی و همکاران (Ziyae et al., 2013) و نجفی نیا و همکاران (۱۳۹۷) مطابقت دارد.



شکل ۳- مدل شماتیک توسعه افق‌های پتروکلسیک و کلسیک در رسوبات یخچالی منطقه مورد مطالعه

نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که آب‌های غنی از کربنات‌ها در موقعیت‌هایی که آب‌های حاصل از ذوب یخچال ایستا هستند، به مقدار زیاد و به صورت عمودی نفوذ یافته و موجبات تشکیل افق‌های پتروکلسیک ضخیم را فراهم آورده‌اند و در موقعیت‌های دشت‌های رسوبی یخچالی، انتقال جانبی آب حاوی کربنات‌ها موجب تشکیل کربنات‌های پودری در وسعت زیاد شده است (شکل ۳).

#### خصوصیات میکرومورفولوژیکی خاک‌ها

جدول ۴ نتایج تشریح خصوصیات مقاطع نازک تهیه شده از خاک‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. الگوی توزیع نسبی ذرات درشت به ریز (c/f) در اکثر مقاطع مورد مطالعه، پورفیریک<sup>۱</sup> بوده و درصد ذرات درشت در مقاطع مختلف از ۱۰ تا ۶۰ درصد متفاوت می‌باشد. ساختمان میکروسکوپی در تمام مقاطع نازک تهیه شده غالباً از نوع مکعبی نیمه‌زاویه‌دار و کروی با حفرات آرایشی<sup>۲</sup> و صفحه‌ای می‌باشد (شکل ۴a و ۴b). وجود حفرات صفحه‌ای (شکل ۴a و ۴b) به همراه ساختمان میکروسکوپی مکعبی عمدتاً بر اثر فشردگی ناشی از یخبندان می‌باشد (حیدری، ۱۹۹۳). Fanning & Fanning, 1989. داشتن ساختمان میکروسکوپی مکعبی را شواهدی ناشی از انقباض و انبساط خاک در نتیجه خشک و مرطوب شدن دانستند. همچنین Todisco & Bhiry, 2008 این ساختمان میکروسکوپی مکعبی را حاصل یخبندان دانستند. نجفی نیا و همکاران (۱۳۹۷) بیان نمودند که خاک‌های مربوط به اوایل پلیستوسن تحت تأثیر فرآیندهای یخچالی حفرات کانالی، بی‌شکل و همچنین ساختمان‌های میکروسکوپی اسفنجی و کروی به تدریج کاهش یافته و به تعداد حفرات انقباضی افزوده شده است.

b-فابریک غالب در تمامی مقاطع از نوع خرده بلوری<sup>۱</sup> می‌باشد که حاصل ذرات ریز کلسیت میکریتی<sup>۲</sup> (جدول ۴ و شکل ۴a) است (راهب و همکاران، ۱۳۹۵). عوارض خاک‌ساخت کربنات ثانویه در تمامی مقاطع تهیه شده در گستره وسیع و اشکال متنوع اعم از انواع پوشش (جدول ۴ و شکل ۴f)، پوشش زیرسطحی<sup>۳</sup>، آویزه<sup>۴</sup> (جدول ۴ و شکل ۴d)، کلاهِک<sup>۵</sup> (جدول ۴ و شکل ۴f)، با اندازه‌های میکریتی و اسپاریتی (جدول ۴ و شکل ۴f)، پرشدگی حفرات (جدول ۴ و شکل ۴c) مشاهده گردید. انواع پوشش‌های کربناتی در سطوح خاکدانه، در اطراف حفرات و قطعات سنگی تشکیل شده‌اند که فراوانی آنها با افزایش عمق افزایش یافته است. منافی و همکاران (۱۳۸۸) در بررسی میکرومورفولوژی پوشش‌های کربنات پدوژنیک خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک البرز جنونی نیز نتایج مشابهی گزارش کردند. در مقاطع مورد مطالعه پوشش‌های اسپاریتی غالباً به رنگ روشن مشاهده گردیدند (جدول ۴ و شکل ۴f). پوشش‌های کربناتی روشن را کلسایت‌های نسبتاً خالص با شواهدی از دوره‌های خشکی هستند، وجود این دسته از کربنات‌ها علاوه بر وجود دوره‌های خشکی، شواهدی بر فقدان شرایط مطلوب برای فعالیت بیولوژیکی هستند. شکستگی قطعات سنگی بدون جابجایی (جدول ۴ و شکل ۴e) شاهد فشار ناشی از یخبندان می‌باشد که در اغلب مقاطع نازک مورد مطالعه دیده شدند.

جدول ۴- نتایج خصوصیات میکرومورفولوژی مقاطع نازک تهیه‌شده از خاک‌های مطالعه‌شده

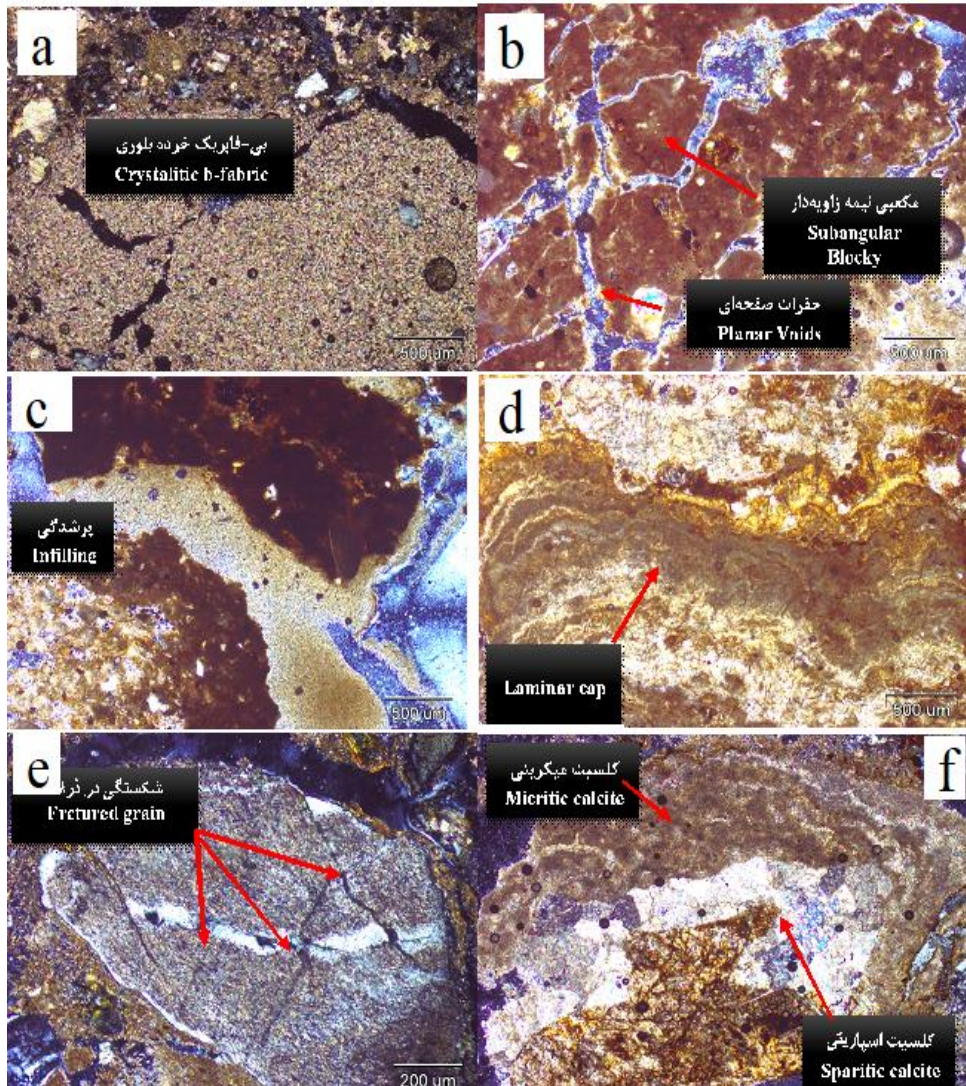
| pedofeatures                              |               |                  |                  |           |         |           |           |                  |                |                         |              |           |                        | عمق<br>cm   | افقی    |                             |
|---|---------------|------------------|------------------|-----------|---------|-----------|-----------|------------------|----------------|-------------------------|--------------|-----------|------------------------|-------------|---------|-----------------------------|
| Fe/Mn                                     | Orthic nodule | Disorthic nodule | Inherited nodule | Depletion | Coating | Infilling | Excrement | Fine mass        | Rock fragments | b <sub>p</sub> . fabric | R.d. Pattern | c/f ratio | b <sup>void</sup> type |             |         | a <sup>Microstructure</sup> |
| خاک‌رخ شماره یک: Typic Calcixerepts       |               |                  |                  |           |         |           |           |                  |                |                         |              |           |                        |             |         |                             |
| +   | +             | +                | -                | -         | +       | +         | +         | sparite, micrite | Gr, Ba         | cr                      | cp           | 6:4       | pv                     | sbk         | ۲۵-۰    | A                           |
| -   | -             | -                | -                | +         | +       | -         | +         | micrite          | Ba             | cr                      | ssp          | 4:6       | pv, pla                | sbk         | ۱۵۰-۱۱۰ | Bck                         |
| خاک‌رخ شماره دو: Petrocalcic Calcixerepts |               |                  |                  |           |         |           |           |                  |                |                         |              |           |                        |             |         |                             |
| +   | -             | +                | +                | -         | +       | -         | -         | sparite          | Gr, Ba, Sa     | cr                      | po, mo       | 1:9       | pv, pla                | sbk, gr     | ۱۱-۰    | A                           |
| +   | -             | -                | -                | -         | -       | +         | -         | sparite, micrite | Gr             | cr                      | po           | 3:7       | pv, cham, pla          | pla, sp, gr | ۳۵-۷۳   | Bk2                         |
| -   | -             | -                | -                | -         | +       | -         | -         | sparite          | -              | cr                      | po           | 2:8       | vu                     | ma          | ۱۱۰-۷۳  | Bkm                         |
| خاک‌رخ شماره پنج: Typic Calcixerepts      |               |                  |                  |           |         |           |           |                  |                |                         |              |           |                        |             |         |                             |
| +   | -             | +                | -                | -         | +       | -         | -         | sparite, micrite | Gr, Ba         | cr, st, sp              | po           | 4:6       | pv                     | sp, gr      | ۱۰-۰    | A                           |
| +   | -             | +                | -                | -         | +       | -         | +         | sparite, micrite | Sa             | cr                      | po           | 3:7       | vu, pla                | sbk         | ۲۰-۸۰   | Bck                         |
| خاک‌رخ شماره شش: Typic Calcixerepts       |               |                  |                  |           |         |           |           |                  |                |                         |              |           |                        |             |         |                             |
| -   | -             | +                | -                | +         | -       | -         | -         | sparite, micrite | Gr, Ba         | cr                      | po           | 5:5       | pv                     | sp, gr      | ۰-۲۱    | A                           |
| -   | +             | -                | -                | -         | +       | +         | +         | micrite          | Gr             | cr                      | po           | 4:6       | pla                    | gr          | ۵۸-۲۱   | Bk                          |
| خاک‌رخ شماره هفت: Typic Calcixerepts      |               |                  |                  |           |         |           |           |                  |                |                         |              |           |                        |             |         |                             |
| +   | -             | -                | -                | -         | -       | +         | -         | sparite, micrite | Sa             | cr                      | po           | 2.5:7.5   | pla, vu, chan          | sbk         | ۲۳-۰    | A                           |
| +   | -             | +                | -                | +         | +       | -         | -         | sparite, micrite | Ba             | cr                      | po           | 3:7       | pv, cham               | sbk, gr     | ۸۲-۳۵   | Bk                          |

<sup>a</sup> sbk: Subangular Blocky, gr: Granular, pla: Platy, massive, sp: Spongy- <sup>b</sup> pv: Packing void, pla: Planar, cham: Chamber, vu: Vugh, chan: Channel- <sup>c</sup> cp: Close Porphyric, ssp: Single Spaced Porphyric, po: Porphyric, mo: Monic- <sup>d</sup> cr: Crystallitic b-fabric, sp: speckled b-fabric, st: Striated b-fabric- <sup>e</sup> Gr: Granite, Ba: Basalt, Sa: Sandstone.

آویزه‌ها از دیگر انواع عوارض موجود در مقاطع نازک بودند و با افزایش عمق شاهد افزایش این عارضه در مقاطع می‌باشیم (جدول

- 4 Crystallitic b-fabric
- 2 Micritic calcite
- 3 Hypo-coating
- 4 Pendant
- 5 Capping

۴ و شکل ۴d). آویزه‌های موجود مستقیماً در زیر قطعات سنگی تشکیل شده‌اند و به صورت لایه‌ل‌های کلسیت میکریتی و اسپاریتی دیده می‌شوند. منافی و همکاران (۱۳۸۸) در مطالعه پوشش‌های کربنات کلسیم پدوژنیک در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک البرز جنوبی به نتایج مشابهی دست یافتند و تشکیل این آویزه‌ها را تحت تأثیر جریان روبه پایین آب حاوی کربنات معرفی نمودند. Khormali et al., 2006 وجود آویزه‌های موجود در اقلیم خشک را مربوط به اقلیم مرطوب‌تر گذشته دانستند. Levine & Hendricks, 1990 اظهار نمودند که این عوارض به سبب انحلال کربنات کلسیم در داخل خاک و حرکت آن از اطراف قطعات درشت به زیر این قطعات و کاهش فشار دی اکسیدکربن در فضای تخلخل زیر آن‌ها به وجود آمده است.

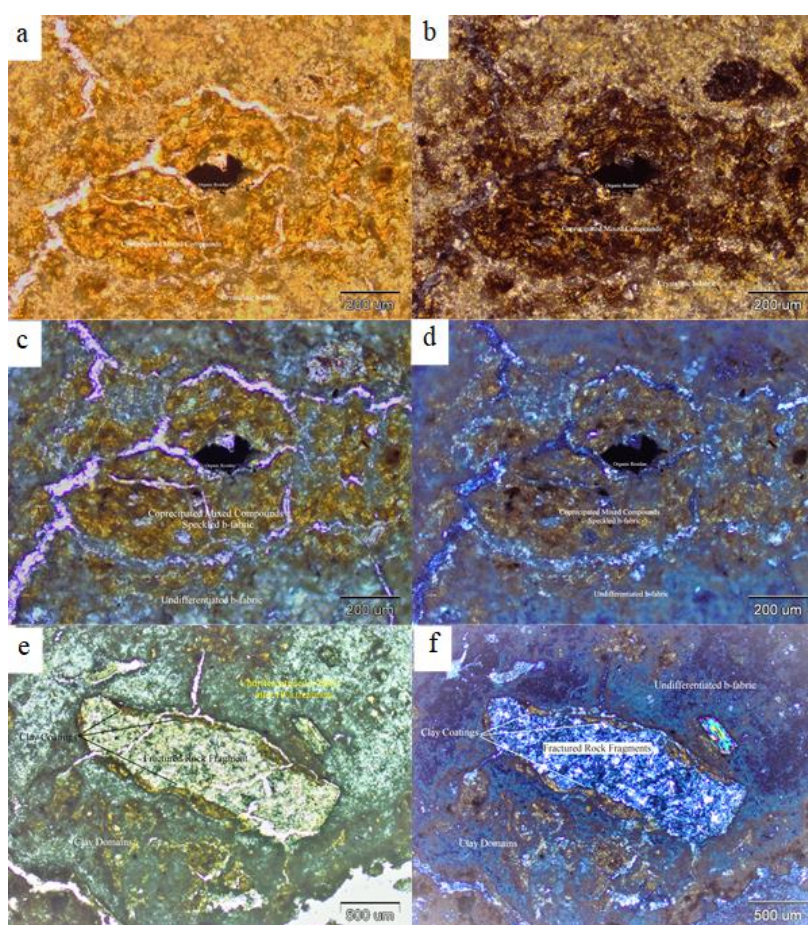


شکل ۴- برخی خصوصیات میکرومورفولوژیکی مقاطع نازک تهیه‌شده از خاک‌های ۲ و ۳ مورد مطالعه

کلاهِک‌های کربناتی نیز به شکل لایه‌لایه و از کلسیت‌های میکریتی و اسپاریتی تشکیل شده‌اند و مکانیسم تشکیل آنها شبیه به آویزه‌ها می‌باشد ولی معمولاً در مکان‌هایی دیده می‌شوند که امکان نفوذ بیشتر آب وجود ندارد و آب نفوذی در انتهای مسیر خود متوقف و پس از تبخیر کربنات‌ها را برجای می‌گذارد. Alonso-Zarza, 1999 تشکیل کلاهِک را ناشی از عدم توانایی حرکت آب به لایه‌های زیرین خاک در اثر نفوذپذیری پایین خاک معرفی نموده است و این پایین بودن نفوذپذیری می‌تواند به علت وجود کربنات و سخت لایه‌های سنگی در خاک باشد. Kemp et al., 2001 در مطالعات خود، گرهک‌ها و پوشش‌های زیرسطحی کربناتی را در بیشتر مقاطع مورد مطالعه، حاصل رسوب مجدد کربنات ثانویه انتقالی دانستند. Raheb et al., 2017 در مطالعه تشکیل کربن غیرآلی در خاک‌های توسعه‌یافته بر روی بازالت به نتایج مشابهی دست یافتند و ادعان نمودند که وجود مرز واضح و پخشیده در گرهک‌های برجا، نشان‌دهنده منشأ خاک‌ساخت این عوارض بوده است.

به‌منظور بررسی امکان وجود پوسته‌های رسی پوشانده شده با کربنات‌ها، پس از تشریح و عکس‌برداری برخی از مقاطع نازک (شکل ۵a (ppl) و ۵b (xpl)) اقدام به حذف کربنات‌ها با اسید کلریدریک نرمال شد و از نقاط عکس‌برداری شده در مرحله قبل از حذف کربنات‌ها مجدداً عکس‌برداری شد (شکل ۵c (ppl) و ۵d (xpl)). مقایسه تصاویر قبل و بعد از حذف کربنات‌ها نشان داد که b-fabریک خرد-بلوری (کریستالیتیک) کاملاً حذف شده و به‌جای آن، b-fabریک نامتمایز آشکار می‌شود و در برخی قسمت‌های مقاطع، b-fabریک منقوطة‌ای (Speckled b-fabric) در درون واحدهای خاکدانه آشکار شد که نشان‌دهنده جهت‌یافتگی رس‌هایی است که به‌صورت هم‌رسوبی با کربنات‌ها تشکیل شده‌اند و در اثر فشارهای ناشی از یخبندان در راستای بزرگ‌ترین بعد خود توجیه شده‌اند؛ اما امکان تشکیل پوشش رسی را نداشته‌اند. علاوه بر جهت‌یافتگی رس در متن خاک، مقادیر اندکی پوشش رسی بر روی قطعات سنگی نیز مشاهده شد (شکل ۵e (ppl) و ۵f (xpl)). تشکیل پوشش‌های رسی بر روی قطعات سنگی و عدم مشاهده آنها در سطوح حفرات، مؤید آن است که به احتمال زیاد این رس‌ها هم‌زمان با تشکیل کربنات‌ها و فشار ناشی از تبلور کربنات‌ها و یخبندان، ایجاد شده‌اند و مقدار بسیار کم (کمتر از یک درصد در مقاطع نازک) آنها نشان می‌دهد که این افق‌ها از نوع آرجیلیک (جدول‌های ۳ و ۴) نیستند.

شکستگی و جابه‌جایی قطعات سنگی و کانی‌ها از دیگر عوارضی می‌باشد که به‌صورت گسترده در مقاطع نازک (شکل ۴e و شکل‌های ۵e و ۵f) نشان‌دهنده فشارهای ناشی از تبلور کربنات‌ها و همچنین یخبندان می‌باشد. به‌طور کلی این عارضه‌ها را می‌توان به‌عنوان عوارض تحت تأثیر فرآیندهای یخچالی دانست. Hiemstra & Van Der Meer, 1997 قطعات درشت و ذرات شکسته شده موجود در مقاطع نازک را مرتبط با فرآیندهای یخچالی دانستند و این شکستگی‌ها را معیاری مناسب برای تشخیص رخدادهای یخچالی معرفی نمودند. May, 1980 اذعان نمود که شکستگی‌های موجود در کانی‌های کمتر هوادیده به سبب فرآیندهای انجماد و ذوب در رسوبات یخچالی رخ می‌دهد. این شکستگی‌ها بیشتر در افق‌های سطحی دیده شدند. بنابراین، می‌توان بیان داشت این شکستگی‌ها با تبلور کربنات‌ها از یک طرف و رشد بلورهای یخ از سوی دیگر در ارتباط می‌باشند.



شکل ۵- مقایسه مقاطع نازک مورد مطالعه برای بررسی امکان وجود افق آرجیلیک. ۵a (ppl) و ۵b (xpl) عکس‌های مقاطع نازک قبل از حذف کربنات‌ها، ۵c (ppl) و ۵d (xpl) عکس‌های مقاطع نازک بعد از حذف کربنات‌ها، عکس‌های ۵e (ppl) و ۵f (xpl) آشکار شدن پوشش رسی بر روی سطح سنگریزه (کمتر از یک درصد مقطع نازک)

## نتیجه گیری

وجود رسوبات یخچالی در استان البرز به صورت پراکنده در نقشه‌های زمین‌شناسی گزارش شده است ولی مطالعه خاک‌های توسعه‌یافته بر روی این رسوبات به طور کامل صورت نگرفته است. این مطالعه وجود رسوبات یخچالی را در منطقه تأیید نمود و خاک‌های تشکیل شده بر روی این رسوبات را مورد بررسی قرار داد. دلیل اصلی انجام این مطالعه آن بود که نتایج اندازه‌گیری دقیق توزیع اندازه ذرات خاک، قبل از حذف کربنات‌ها، افزایش زیاد رس را در اعماق میانی نشان می‌داد که احتمال وجود افق آرچلیک را تقویت می‌کرد ولی در مطالعه مورفولوژی و میکرومورفولوژی آنها پوشش‌های رسی مشهود نبود. حذف کربنات‌ها و آنالیز مجدد توزیع اندازه ذرات و همچنین آنالیز مقاطع نازک تهیه شده از خاک‌ها اثبات کرد که علت افزایش رس در خاک‌ها به انتقال رس مربوط نبوده بلکه نتیجه رسوب کربنات‌های محلول در آب در حال یخ بستن قبل از تشکیل یخچال و همچنین آب حاصل از ذوب یخچال‌ها می‌باشد. بر اساس نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه، سنگ‌های اراضی بالادست که منشأ رسوبات یخچالی هستند همگی از نوع سنگ‌های آذرین و آذرآواری می‌باشند که فاقد سنگ‌ها یا رسوبات کربنات‌های اولیه هستند. از سوی دیگر، افق‌های پتروکلسیک شناسایی شده همگی بر روی تیل‌ها و مورن‌های یخچالی واقع شده‌اند که به عنوان سدی در مقابل دریاچه یخچالی می‌باشند و آب نزدیک به دمای صفر درجه سلسیوس در پشت این سد مدت‌ها قبل از یخ بستن و پس از ذوب شدن متوقف بوده و در اعماق این خاک‌ها نفوذ یافته است. در حالی که افق‌های کلسیک با کربنات‌های پودری در دشت‌های یخچالی و تا عمق نفوذ آب سرد یخچالی تشکیل شده‌اند. این مدل تشکیل کربنات‌های ثانویه در خاک با سایر مدل‌هایی که عمدتاً منشأ تشکیل کربنات‌ها را انحلال و تبلور مجدد کربنات‌های اولیه و یا تنفس زیستی ریشه و موجودات زنده می‌داند متفاوت است. شواهد زمین‌شناسی، پدولوژیکی و خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و مورفولوژیکی (میکرومورفولوژیکی) به دست آمده از منطقه، همگی این مدل تشکیل کربنات‌ها در خاک و علت اختلاف بین مورفولوژی کربنات‌ها در افق‌های پتروکلسیک و کربنات‌های پودری را تأیید می‌کند. علاوه بر این، شواهد موجود نشان‌دهنده تغییرات اقلیمی شدید بعد از دوره یخبندان و توسعه اقلیم خشک و نیمه‌خشک در منطقه می‌باشند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

## منابع

- پژوهش، مهدی و لطفی، معصومه (۱۳۹۵). تأثیر حذف کربنات بر ذرات و فرسایش‌پذیری خاک مطالعه موردی: حوضه‌ی جوققان استان چهارمحال و بختیاری. مجله پژوهش‌های فرسایش محیطی، ۶(۲)، ۳۱-۴۵. DOR: 20.1001.1.22517812.1395.6.2.5.0
- حیدری، احمد (۱۳۹۳). تشکیل و طبقه بندی خاک مبتنی بر پایگاه جهانی منابع خاک (WRB, 2014). انتشارات جهاد دانشگاهی تهران.
- راهب، علیرضا؛ حیدری، احمد و محمودی، شهلا (۱۳۹۵). شرایط زیست اقلیمی و نقش آن در تشکیل کربنات غیرآلی در خاک‌های توسعه‌یافته بر روی بازالت. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۳(۵)، ۴۷-۶۵.
- منافی، شهرام؛ محمودی، شهلا؛ سرمیدان، فریدون؛ حیدری، احمد و رزا ماریا، پوک (۱۳۸۸). میکرومورفولوژی پوشش‌های کربنات کلسیم پدوژنیک در خاک‌های مناطق خشک و نیمه خشک البرز جنوبی، تاکستان- ایران. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۳۹(۱)، ۷۵-۵۷.
- نجفی‌نیا، معصومه؛ خرما، فرهاد؛ کیانی، فرشاد و بارانی مطلق، مجتبی (۱۳۹۷). میکرومورفولوژی خاک‌های لسی اوایل پلیستوسن و مقایسه آن با لس‌های مدرن. مجله علمی کشاورزی مهندسی زراعی، ۴۱(۴)، ۶۷-۸۲.

## REFERENCES

- Alonso-Zarza, A.M. (1999). Initial stages of laminar calcrete formation by roots: examples from the Neogene of central Spain. *Sedimentary Geology*, 126(1-4), 177-191.
- Bockheim, J.G. & Munroe, J.S. (2014). Organic carbon pools and genesis of alpine soils with permafrost: a review. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 46, 987-1006.
- Bowman, W.D., Cleveland, C.C., Halada, L., Hreško, J. & Baron, J.S. (2008). Negative impact of nitrogen deposition on soil buffering capacity. *Nature Geoscience*, 1, 767-770.
- Burke, I.C., Yonker, C.M., Parton, W.J., Cole, C.V., Flach K. & Schimel. D.S. (1989). Texture, climate, and cultivation effects on soil organic matter content in U.S. Grassland Soil. *Soil Science Society Am. J.*, 53:800-805.
- Carter, M.R. & Gregorich, E.G., (2008) *Soil Sampling and Methods of Analysis*. 2nd Edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton.
- Ditzler, C., Scheffe, K. & H.C. (2017). *Soil survey manual*. USDA Handbook 18. Government Printing Office,

Washington, D.C.

- Douglass, D.C., & Bockheim, J.G. (2006). Soil-forming rates and processes on Quaternary moraines near Lago Buenos Aires, Argentina. *Quaternary Research*, 65(02), 293-307.
- Durand, N., Monger, H.C. & Canti, M.G. (2010). Calcium carbonate features. In *Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths*. Edited by Stoops, G., Marcelino, V. & Mees, F.. Elsevier, Amsterdam, 149-194.
- Eswaran, H., Reich, P.F., Kimble, J.M., Beinroth, F.H., Padmanabhan, E. & Moncharoen, P. (2000). *Global Climate Change and Pedogenic Carbonates*, 15-25.
- Fanning, D.S. & Fanning, M.C.B. (1989). *Soil morphology, genesis, and classification*, John Wiley and Sons, New York. Chapter 10, p.395.
- Gile, L.H., Peterson, F.F., Grossman, R.B., 1966. Morphological and genetic sequences of carbonate accumulation in desert soils. *Soil Science*, 101(5), pp.347-360.
- Hiemstra, J.F., & Van Der Meer, J.J. (1997). Pore-water controlled grain fracturing as an indicator for subglacial shearing in tills. *Journal of Glaciology*, 43(145), 446-454.
- Jensen, J.L., Schjøning, P., Watts, C.W., Christensen, B.T. & Munkholm, L.J. (2017). Soil texture analysis revisited: Removal of organic matter matters more than ever. *PloS one*, 12(5), 0178039.
- Kemp, R.A., Derbyshire, E. & Meng, X. (2001). A high-resolution micromorphological record of changing landscapes and climates on the western Loess Plateau of China during oxygen isotope stage Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 170(1-2), 157-169.
- Khormali, F., Abtahi A. & Stoops G. (2006). Micromorphology of calcitic features in highly calcareous soils of Fars Province. Southern Iran. *Geoderma* 132(1), 31-46.
- Khoshbakht, K. (2011). Country Report: Iran. Workshop on Climate Change and its Impact on Agriculture. Seoul, Korea. Available in <http://www.adbi.org>
- Kraimer, R.A. & Monger, H.C. (2009). Carbon isotopic subsets of soil carbonate-a particle size comparison of limestone and igneous parent materials. *Geoderma*, 150(1-2), 1-9.
- Lebron, I., Suarez, D.L. & Yoshida, T. (2002). Gypsum effect on the aggregate size and geometry of three sodic soils under reclamation. *Soil Science Society of America Journal*, 66(1), 92-98.
- Levine, S.J. & Hendricks, D.M. (1990). Carbonate forms in residual horizons of limestone derived soils in northern Arizona. In *Developments in soil science*. Elsevier. 19, 373-380.
- Li, Z.P., Han, F.X., Su, Y., Zhang, T.L., Sun, B., Monts, D.L. & Plodinec, M.J. (2007). Assessment of soil organic and carbonate carbon storage in China. *Geoderma* 138, 119-126.
- Machette, M.N. (1985). Calcic soils of the southwestern United States. *Geological Society of America*. 203, 1-21.
- Manafi, Sh., Mahmoodi, Sh., Sarmadian, F., Heidari, A., & Poch R.M. (2008). Micromorphology of Secondary Calcium Carbonate Coatings in Some Arid and Semiarid Soils in Southern Alborz, Takestan-Iran. *Iranian J. Soil and Water Res.* 39(1) 57-75. (In Persian).
- May, R.W. (1980). The formation and significance of irregularly shaped quartz grains in till. *Sedimentology*, 27(3), 325-331.
- McCoy, V.E., Young, R.T. & Briggs, D.E.G. (2016). Sediment permeability and the preservation of soft-tissues in concretions: an experimental study. *Palaios* 30 (8), 608-612.
- Ming, D.W. (2002). Carbonates. In: Lal, R. (Ed.), *Encyclopedia of Soil Science*. Marcel Dekker Inc., New York. 139-141.
- Mölg, N., Bolch, T., Rastner, P., Strozzi, T. & Paul, F. (2018). A consistent glacier inventory for the Karakoram and Pamir derived from Landsat data: distribution of debris cover and mapping challenges. *Earth System Science Data Discussions*. 10, 1807-1827.
- Perkins, E. (2003). *Fundamental geochemical processes between CO<sub>2</sub>, water and minerals*. Alberta Innovates-Technology Futures. 250 Karl Clark Road. Edmonton, Alberta T6N 1E4.
- Najafinia, M., Khormali, F., Kiani, F. & Baranimotlagh, M. (2019). Comparison of the micromorphology of the early Pleistocene paleosols with modern loess-derived soils. *Iranian Journal of Agriculture Science*. 41(4), 67-82. (In Persian).
- Pajooresh M. & Lotfi M. (2016). Lime removal impacts on the soil particles and erodibility Case study: (watershed Jooneghan, Chaharmahal va Bakhtiari province). *E.E.R.*; 6(2), 31-45. (In Persian). [DOR: 20.1001.1.22517812.1395.6.2.5.0]
- Raheb, A.R., Heidari A. & Mahmoudi Sh. (2017). Bioclimatic condition and its effect on the genesis of inorganic carbon in soils developed on basalt. *J. of Water and Soil Conservation*, 23(5), 47-65. (In Persian).



- Raheb, A., Heidari A., & Mahmoodi, Sh. (2017). Organic and inorganic carbon storage in soils along an arid to dry sub-humid climosequence in northwest of Iran. *Catena* 153: 66–74.
- Shein, E.V. (2009). The particle-size distribution in soils: problems of the methods of study, interpretation of the results, and classification. *Eurasian soil science*, 42(3), 284-291.
- Shi, Y., Baumann, F., Ma, Y., Song, C., Kühn, P., Scholten, T., & He J.-S. (2012). Organic and inorganic carbon in the topsoil of the Mongolian and Tibetan grasslands: pattern, control and implications. *Biogeosci. Discuss.* 9, 1869-1898.
- Soil Survey Staff, (2022). *Keys to Soil Taxonomy*, 13th edition. USDA Natural Resources Conservation Service.
- Sparks, D. L., Page, A. L., Helmke, P. A., & Loeppert, R. H. (1996). *Methods of Soil Analysis Part 3-Chemical Methods*. Soil Science Society of America Book Series 5.3. Madison, WI: Soil Science Society of America, American Society of Agronomy.
- Stoops, G. (2003). *Guide lines for the analysis and description of soil and regolith thin sections*. Soil Science Society of America. Medison, WI, USA. 184p.
- Todisco, D. & Bhiry, N. (2008). Micromorphology of periglacial sediments from the Tayara site, Qikirtaq Island, Nunavik (Canada). *Catena*, 76(1), 1-21.
- USDA-NRCS. (2012). *jNSM: Java Newhall Simulation Model User guide-part 1*. National Soil Survey Center.
- Ziyae, A., Pashaei, A., Khormali, F. & Roshani, M.R. (2013). Some physico-chemical, clay mineralogical and micromorphological characteristics of loess-paleosols sequences indicators of climate change in south of Gorgan. *J. of Water and Soil Conservation*, 20(1), 1-27.



## The glacial origin of carbonates in the calcic and petrocalcic horizons of the soils developed on glacial deposits in the southern Alborz Mountain slope

### EXTENDED ABSTRACT

#### Objectives

The main goals of this research are 1. To investigate the origin of soil-forming carbonates in soils formed in glacial sediments 2. Study the effect of glacial processes on the formation of pedogenic carbonates and the resulting micromorphological complications, and 3. To explore the possibility of pedogenic carbonates forming directly through the dissolution of carbon dioxide in cold glacial waters.

#### Materials and Methods

This study was conducted in the year 2021 in Alborz Province. Eight profiles located in the Karaj and Hashtgerd regions with glacial-alluvial parent materials were described and sampled. Physical and chemical characteristics, including soil texture before and after the removal of carbonates by the hydrometer method, pH, and EC in saturated extract, soil organic carbon by the Walkley-Black method were determined in 27 samples. Calcium Carbonate Equivalent (CCE) was measured by the calcimetric method, and Cation Exchange Capacity (CEC) was measured by the ammonium acetate method. Soil description and classification were performed based on the American classification system. Micromorphological study of the undisturbed samples, before and after the removal of carbonates, was carried out following their impregnation with polyester resin, cutting, sawing, mounting on glass slides, and reducing the thickness to about 30 microns. Imaging was done with a polarizing microscope, and the analysis and interpretation of the results were conducted according to the guide for the analysis of thin sections.

#### Results

Examining the particle size distribution of the soils developed on the glacial sediments before and after the removal of carbonates revealed that most of the carbonates in these soils are in the clay fraction (and to some extent in the silt fraction). With the removal of carbonates, the percentage of clay decreased drastically, and the particle size distribution classes changed from loam and clay-loam to coarser texture classes of loamy-sand, sandy-loam, even sandy. The percentage of clay in the middle part of the profiles before and after the removal of carbonates demonstrates the characteristics of the argillic horizons. The thin sections did not show clay coating pedofeatures before the removal of carbonates. Examination of the thin sections after the removal of carbonates showed that the crystalline b-fabric (related to carbonates) in the micromass was removed and turned into an undifferentiated b-fabric. A speckled b-fabric with phyllosilicate clays and weak clay coatings on some parts of the sections appeared. Of course, the possibility of transporting phyllosilicate clays together with the water resulting from the melting of glaciers and their co-precipitation with carbonates in the petrocalcic horizons is not far from expected.

#### Conclusions

The petrocalcic horizons formed on glacial tills and moraines result from the long-term infiltration of cold water rich in dissolved CO<sub>2</sub> into the soil. This model of secondary carbonate formation in the soil differs from other models that mainly consider the origin of carbonates to be the dissolution and recrystallization of primary carbonates or the biological respiration of roots and living organisms.

**Keywords:** Carbonates, Carbon Dioxide, Glacial Sediments, Micromorphology, Removal of Carbonates