

صص ۸۰-۶۵

استفاده از میکرومورفولوژی جلای بیابان جهت تعیین سن عوارض ژئومورفیک و ردیابی تغییرات آب و هوایی دوره کوتاه‌تر در بیابان گناباد

منصور صادقی*

دکترای ژئومورفولوژی و مدیریت محیط، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

علی محمد نور محمدی

دکترای ژئومورفولوژی و مدیریت محیط، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

تاریخ پذیرش ۱۴۰۳/۱۲/۱۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۸/۷

چکیده

جلای سنگ شامل پوشش بسیار نازک در حد نانومتر تا میکرومتر، با تنوعی از رنگ‌های نارنجی متمایل به زرد تا مشکی است که بر روی سطوح سنگ‌ها خصوصاً در محیط‌های بیابانی گرم و خشک تشکیل می‌شود. بیشترین مواد سازنده جلای سنگ از ماده معدنی رس است علاوه بر آن اکسید آهن، اکسید منگنز و همچنین بخش بسیار ناچیز از آن را عناصر کمیاب و مواد آلی تشکیل می‌دهند. جلای بیابان در مراحل شکل‌گیری خود، قابلیت‌های منحصربه‌فردی را در ثبت و ذخیره عوامل و فرایندهای محیطی از جمله نویسانات اقلیمی دارند. پژوهش حاضر با هدف ردیابی تغییرات آب و هوایی و سن‌یابی اشکال ژئومورفیک بیابان گناباد واقع در شمال شرق ایران در دوره کوتاه‌تر صورت گرفته است. بر همین اساس، ابتدا نمونه‌ها از سطوح مختلف ژئومورفیک بیابان گناباد جمع‌آوری و برای انجام آزمایش‌های لازم به آزمایشگاه انتقال یافت. پس از انجام تجزیه و تحلیل‌های مقتضی با استفاده از میکروسکوپ الکترون (SEM) و تحلیل‌های انرژی پراکنی اشعه X (EDAX)، ویژگی‌های فیزیکی جلای سنگ مثل عناصر شیمیایی، ضخامت، میکرو چین‌شناسی و مورفولوژی آن مورد مطالعه قرار گرفت. یافته‌ها نشان داد جلای سنگ‌ها از نظر رنگ، بافت و اجزای سازنده با سنگ‌های میزبان خود متفاوت بوده و در شرایط اقلیمی بسیار خشک توأم با فرایندهای بادی و گرد و غبار شدید جوی، شکل گرفته‌اند. وجود درصد بالاتر آهن نسبت به منگنز نشانگر حاکمیت اقلیم خشک در زمان شکل‌گیری جلاها است. هرچقدر نسبت کاتیونی جلای سنگ بزرگ‌تر باشد نشانگر سن کم جلای سنگ و بلعکس می‌باشد. بررسی نسبت کاتیونی نمونه‌ها نشان داد، به احتمال خیلی زیاد تشکیل آن‌ها با شروع دوره خشکی ابتدای هولوسن هم‌زمان بوده است بر همین اساس قدیمی‌ترین اشکال ژئومورفولوژیکی موجود در منطقه را دشت‌های ریگی و رسوبات آبرفتی قدیمی به دلیل پایین بودن نسبت کاتیونی و جوان‌ترین آن‌ها را اینسلب‌رگ‌ها به دلیل بالا بودن نسبت مذکور تشکیل می‌دهند. نتایج پژوهش نشان داد، بررسی ویژگی‌های میکرومورفولوژی جلای بیابان می‌تواند در مطالعه تغییرات آب و هوایی دوره کوتاه‌تر و سن سنجی عوارض ژئومورفولوژیک، ابزاری ضروری و مفید قلمداد شود.

واژگان کلیدی: سن سنجی عوارض، میکرومورفولوژی جلای بیابان، نسبت کاتیونی، تغییرات آب و هوایی کوتاه‌تر.

مقدمه

پوشش‌های تیره‌رنگی که در سطح بسیاری از سنگ‌ها در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان دیده می‌شوند، اغلب در ادبیات علمی جهان به جلای سنگ یا جلای بیابان معروف است (Dorn and Oberlander, 1981). تشکیل جلای سنگ محدوده به نواحی خشک نبوده بلکه در سایر نقاط جهان که هوازدگی جریان داشته باشد نیز دیده می‌شود ولی با توجه به اینکه پراکندگی آن در بیابان‌های گرم چشم‌گیر است به جلای بیابان معروف شده است (Dorn, 2009). گسترش جلای بیابان ناشی از مهاجرت صعودی لایه بسیار نازک مرطوب حاوی منگنز، به سطح سنگ‌های بیابانی است (Lebedeva, et al. 2019). ضخامت آن از ۵۰ تا ۲۰۰ میکرومتر متغیر است و با سرعت بسیار آهسته (۱-۴۰ میکرومتر در هر ۱۰۰۰ سال) تشکیل می‌شود (Liu and Broecker, 2000)؛ و سرعت تشکیل جلای سنگ بر اساس مکان، زمان و شرایط میکروکلیمات متفاوت است (Hayden, 2006). سرعت رشد آن در محیط‌های گرم بیابانی از چند میکرون تا ده‌ها میکرون در هر قرن متغیر است (Spilde, et al. 2013). مشاهدات پتروگرافی نشان داد جلای روی سنگ‌ها با جنس‌های مختلف ضخامت متفاوتی داشتند، مثلاً در تماس با پلاژیوکلازها و کانی‌های فرومگنزی ضخامت کمتر، ولی در سنگ‌های گرانیته با نفوذ عمیق‌تر ضخامت بیشتری داشتند (Martinez-Pabello, et al. 2020). بررسی‌های میکروسکوپی نشان داد که ساختمان آن لایه‌لایه بوده که از لایه‌های فوق‌العاده نازک در حد میکرون تشکیل شده است (Liu and Broecker, 2013). جلای سنگ شامل پوسته‌های نازک در حد میکرومتر، با تنوعی از رنگ‌های قهوه‌ای تا مشکی و سرشار از منگنز بوده که با لعاب متالیک سطوح سنگ‌ها و صخره‌ها را جلا می‌دهد (Broecker and Liu, 2001). تنوع رنگ ظاهری جلای بیابان به خاطر حضور غلظت‌های مختلفی از اکسید آهن و اکسید منگنز است (Potter and Rossman, 1977). غلظت بالای اکسیدهای آهن علاوه بر کانی‌های رسی و سیلیس باعث ایجاد رنگ قرمز، نارنجی و قهوه‌ای می‌شود ولی غلظت بالای اکسیدهای منگنز باعث تیره‌گی رنگ آن می‌شود (Afify, et al. 2015). اکسیدهای آهن در جلا عمدتاً به صورت هماتیت (Fe_2O_3) هستند در حالی که فاز غالب اکسیدهای منگنز به شکل برنزیت^۱ ($\text{MnO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) است (Garvie et al. 2008; Xu et al. 2018)؛ که معمولاً ۳۰ درصد از جلا را شامل می‌شوند در حالی که حدود ۷۰ درصد دیگر آن از مواد معدنی رس تشکیل می‌شود (Potter and Rossman, 1979) و همچنین سایر عناصر جزئی و کمیاب نیز در آن نهشته می‌شود (Zerboni et al. 2022). به نظر می‌رسد سطح جلا محیطی ایدئال برای رشد میکروبی باشد (Chadda & Sharma, 2021) و باکتری‌های متنوعی روی آن‌ها رشد می‌کنند (Chaddha et al. 2021). تجزیه و تحلیل به روش LEfSe نشان داد، برخی از گونه‌های باکتریایی به‌طور قابل‌توجهی در محیط جلا در مقایسه با سنگ‌های فاقد جلا فراوان‌تر بودند (Esposito, A. et al. 2019). تغییر در ویژگی‌های تر شوندگی سطوح آب‌دوست سنگ‌های میزبان به حالت آب‌گریزی در حالت جلا امکان حیات میکروبی در محیط‌های مختلف را تقویت می‌کند (Chaddha & Sharma, et al. 2022). جلای بیابان در اوایل دهه ۱۸۰۰ م. برای اولین بار

¹. bimesite

توسط فون هومبولت در ونزوئلا و مصر گزارش شد (von Humboldt, 1812) بعدها داروین در سفر مطالعاتی خود به آمریکای جنوبی به آن اشاره کرد (Darwin, 1839). از آن پس فرضیات متعددی در خصوص فرایندهای ساخت آن ارائه شد که مهم ترین آن ها اشاره به منشأ زیستی یا غیر زیستی و یا ترکیبی از هر دو تأکید داشتند (Krinsley et al 2017; Wang et al. 2006; Dorn, 2009; Potter, 1979; Engel and Sharp, 1958). برخی عوامل زیستی (Wang et al. 2006; Dorn, 2009; Potter, 1979; Engel and Sharp, 1958) و برخی دیگر عوامل غیر زیستی (Moore & al. 2011; Digregorio, 2005; Krumbein and Jens, 1981) را در ایجاد جلای سنگ مؤثر می دانستند. مکانیسم های مختلفی از جمله ژئوشیمیایی، بیولوژیکی، فیزیکی و یا ترکیبی از آن ها برای تشکیل جلای سنگ وجود دارد. (Dorn, 2009) مکانیسم بیولوژیکی زمانی که محتوای آهن و منگنز توسط میکروارگانیسم ها اکسید شود، جلا بر روی سطوح صخره ها شکل می گیرد (Dorn & Krinsley, 2011). مکانیسم فیزیکی با رسوب ذرات آلی و معدنی گرد و غبار اتمسفری در روی سطح بیرونی سنگ ها رخ می دهد (Esposito, et al. 2015). نتایج تحقیقات جدید از مدل چند منشائی^۲ تشکیل جلای سنگ پشتیبانی می کند (Martinez-Pabello, et al. 2020)؛ که در آن عوامل زیستی و غیر زیستی برای تشکیل پوشش های میکروسکوپی مذکور بر روی سطوح سنگی با یکدیگر همکاری می کنند. شواهد فیزیک و شیمیایی یک بینش و چشم انداز جدیدی را ارائه می کند که در آن آغازگر رویداد، عامل غیر زیستی بوده که به دنبال آن فرایندهای زیستی وارد عمل می شوند (Chaddha, et al. 2024). فرایندهای تجمع اکسید-هیدروکسید در محل شکل گیری جلا به دلیل باکتری های اکسید کننده آهن و منگنز است که ممکن است برای تغذیه به مواد معدنی خاک رس نیاز داشته باشند (Chaddha, et al. 2021). محققان در زمینه های مختلف از جلای سنگ به عنوان ابزاری برای اهداف تحقیقاتی خود استفاده کرده اند. برای مثال کاربردهای که از آن شده است می توان: ارتباط جلای سنگ با سنگ نگاره های دوران باستان (Whitley, et al. 2017; 2012; Dietzel et al. 2008. De la Fuente, 2004) شاخص های اقلیم شناسی دیرینه (Goldsmith et al. 2012; Liu and Broecker. 2007) تعیین زمانی دوره های متوالی خشک و مرطوب پلیستوسن و هلو سن (Liu & Lepre, 2021 ; Liu and Broecker, 2013) شباهت با پوشش سنگ های کره مریخ (; Lanza et al. 2015 Krinsley et al. 2009) و استفاده های اخیر از آن به عنوان الکتروکاتالیست در واکنش های تجزیه آب و تولید انرژی (Chaddha et al. 2022) می باشند. در سال های اخیر بر روی موضوع تشکیل اجلاس بیابان پژوهش های مفیدی صورت گرفته است که چند مورد از آن ها را به طور اجمالی مرور می کنیم. (Xu, et. al. 2019) به مطالعه ای با موضوع ویژگی های جلای بیابان از مقیاس نانومتری تا میکرومتری با استفاده از مدل تصویر - اکسیداسیون در شکل گیری آن پرداختند. نتایج نشان داد شکل گیری جلای بیابان رابطه مستقیم و نزدیک با تابش شدید نور خورشید دارد. (Otter, et. al. 2020) با موضوعی تحت عنوان درک ژئوشیمیایی رابطه جلا با مواد معدنی ذرات گرد و غبار مجاورت آن پژوهشی انجام دادند. طبق نتایج، عناصر ریز تر غنی از منگنز و سایر فلزات کمیاب در قسمت خارجی رابطه

². Polygenetic

نزدیک‌تری با ریزگردها داشته و برعکس عناصر درشت بیشتر شبیه سنگ‌های میزبان خود بودند. (Lingappa, et al. 2021) به پژوهشی در خصوص توضیح اکو فیزیولوژیکی برای غنی‌سازی منگنز در جلای سنگ با استفاده از آمپلیکون 16S و توالی یابی DNA غرب ایالت متحده پرداختند. نتایج نشان داد غنی‌سازی منگنز در جلا حاصل یک مکانیسم بیولوژیکی میکروبی به کمک نور خورشید و آب است. (Chaddha, A.S.et al. 2021) مطالعه‌ای با موضوع شناسایی کانی‌های رسی در جلای سنگ با استفاده از XRD^۳ یک رویکرد کاهش تک‌مرحله‌ای به‌منظور تعیین کمیت و شناسایی کانی‌های رسی جهت درک شکل‌گیری جلا انجام دادند. (Chaddha, A. S.et al. 2022) به پژوهشی با موضوع میکروسپکتروسکوپی اشعه X و تائیکوگرافی^۴ در ساختارهای نانومقیاس در جلای سنگ پرداختند. نتایج مطالعه نشان داده جلای سنگ‌ها در مناطق شهری رشد سریع داشته و برعکس در مناطق بیابانی رشد آن آهسته‌تر صورت گرفته است. (Chaddha, A. S.et al. 2024) به پژوهشی در مورد نحوه شکل‌گیری جلای سنگ‌های مناطق خشک پرداختند. آن‌ها با بررسی نظریات مختلف ارائه شده در این زمینه و انجام آزمایش مختلف به پلی ژنتیکی بودن این پوشش میکروسکوپی پی بردند. (Dorn,R.2024) به مقاله‌ای تحت عنوان بازبینی نحوه شکل‌گیری جلای صخره، ارائه دادند. ایشان هشت فرضیه‌ای که از چهار دهه پیش تابه‌حال برای توضیح نحوه تشکیل جلای سنگ ارائه شده بود را با نه آزمون مورد ارزیابی قرار داد. ماهیت همه فرایندهای شکل زایی دینامیک بیرونی تابع شرایط اقلیمی حاکم در زمان خود است. مرفولوژی کنونی بیابان گناباد حاصل فرایندهای است که در کواترنر جریان داشته است؛ بنابراین درک شرایط اقلیمی خصوصاً کواترنر در پژوهش‌های ژئومورفولوژی منطقه مورد بحث ضرورت دارد. یکی از اهداف این پژوهش ردیابی تغییرات آب و هوایی و مشخص نمودن اقلیم غالب کواترنر در شمال شرق ایران بوده و همچنین از اهداف مهم دیگر آن، مشخص نمودن سن اشکال ژئومورفولوژیکی موجود در بیابان گناباد و تقدّم و تأخّر زمانی شکل‌گیری آن‌ها در پهنه مذکور است.

داده‌ها و روش‌ها

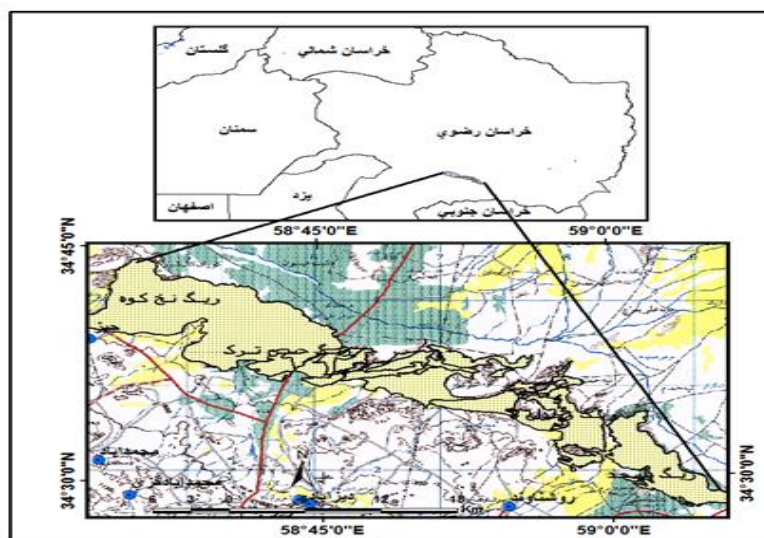
موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

بیابان گناباد با مختصات طول جغرافیایی (۵۸°:۳۴) الی (۵۹°:۳۶) و عرض جغرافیایی (۳۴°:۲۸) الی (۳۴°:۴۴) در جنوب استان خراسان رضوی و شمال شهرستان گناباد واقع شده است (شکل ۱). ارتفاع منطقه بین ۸۲۷ تا ۱۳۰۰ متر از سطح دریا می‌باشد. بیابان گناباد در اقلیم گرم و خشک واقع شده که میانگین بارش سالانه آن ۱۳۱/۹ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۱۷/۵ درجه سلسیوس می‌باشد. بیابان گناباد بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن در اقلیم خشک واقع شده است. بر اساس داده‌های ایستگاه سینوپتیک، در ۹ ماه از سال یعنی از بهمن تا مهرماه، باد غالب منطقه جهت شرقی

^۳. X-Ray Diffraction

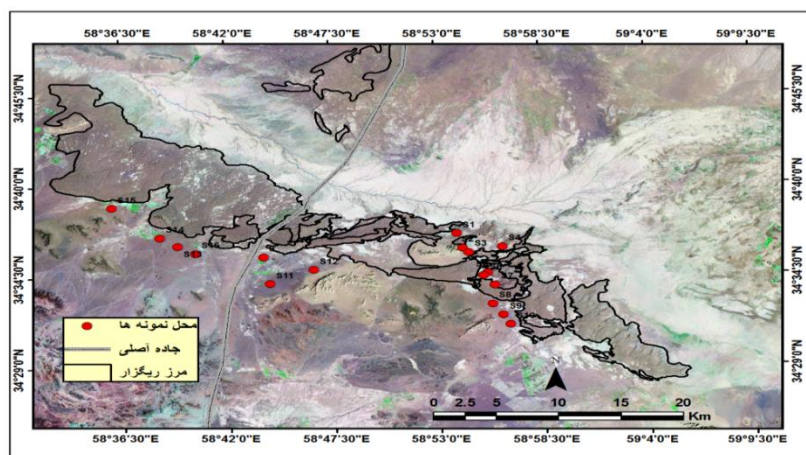
^۴. Ptychography

می‌باشد. منطقه مورد بحث، بخشی از خرده قاره شمال شرق ایران است که ریگزارهای آن بر روی پهنه کویری و دق‌های رسی تشکیل شده که در برخی نقاط سازندهای کرتاسه (آهک، ژپس، کنگلومرا، ماسه سنگ و شیل) به صورت برجستگی‌های کم ارتفاع در داخل ریگ برون‌زدگی یافته‌اند. رسوبات کواترنری از فرسایش واحدهای سنگی منطقه حاصل شده و عمدتاً از قطعه‌سنگ‌های رسوبی، آتشفشانی، ذرات مینرالی کوارتز، فلدسپات، پیروکسن، میکا، کلسیت و کائولین تشکیل شده است. فرایندهای هوازدگی فیزیکی و شیمیایی منجر به شکسته شدن سنگ‌ها شده و آب‌های جاری به همراه جریان باد مهم‌ترین عوامل جابجایی و حمل و نقل مواد هوازده می‌باشند. اشکال مهم ژئومورفولوژیکی منطقه شامل اینسلیبرگ‌ها، پهنه‌های ماسه‌ای، رسوبات آبرفتی قدیمی و دشت‌های ریگی است.



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش، پس از بازدید میدانی، از سنگ‌های جلا دار عوارض مختلف ژئومورفولوژیکی شامل اینسلیبرگ‌ها، پهنه‌های ماسه‌ای، رسوبات آبرفتی قدیمی و دشت‌های ریگی به تعداد ۲۸ نمونه به منظور مطالعات آزمایشگاهی تهیه شد. اشکال ژئومورفولوژیکی که نمونه سنگ‌های جلا دار منطقه از آن‌ها برداشت شده در شکل (۲) آمده است.

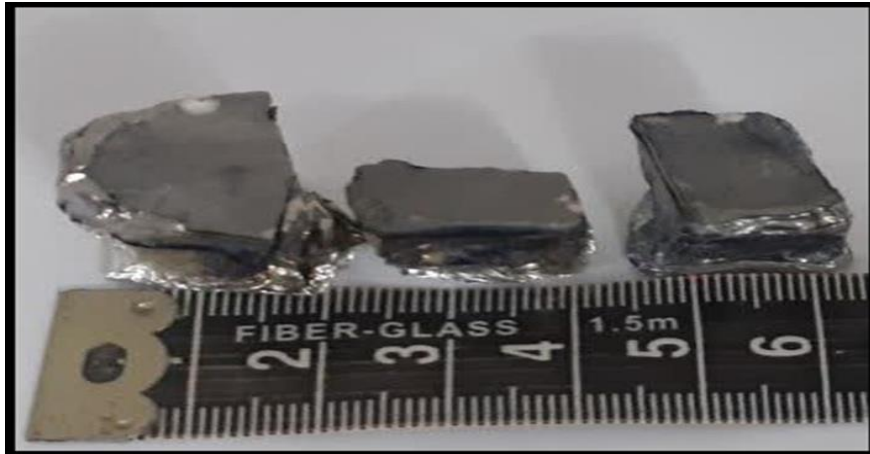


شکل ۲. محل قرارگیری اشکال ژئومورفولوژیکی نمونه سنگ‌های جلا دار بر روی عکس هوایی ۱:۵۵۰۰



شکل ۳. نمونه سنگ‌های جلا دار تهیه شده

ابتدا نمونه‌ها با آب مقطر شسته و در هوای آزاد خشک شدند (شکل ۳). جهت قرارگیری نمونه‌ها در داخل میکروسکوپ الکترونیکی، سنگ‌های جلا دار منتخب در ابعاد 1×1 سانتی‌متر برش داده شد تا بتوان در داخل دستگاه، آنالیزهای مورد نظر را انجام داد. پیش از قرارگیری نمونه‌ها در داخل دستگاه، سطوح جلا دار با پالادیم - طلا پوشانده شد (شکل ۴). طلا و کربن به‌وسیله الکترون اسکن (SEM) و تحلیل‌های انرژی پراکنی اشعه X (EDAX) مشاهده می‌شود. بخش‌های صیقل خورده اطراف سنگ که فاقد جلا بود نیز با ورقه‌های آلومینیوم پوشانده شد تا از ایجاد خطا در محاسبات جلوگیری به عمل آید. بعد از انجام آنالیزها به‌وسیله میکروسکوپ الکترون اسکن و تعیین مورفولوژی جلا با استفاده از تحلیل‌های انرژی پراکنی اشعه X (EDAX) بر روی جلاها عناصر موجود در هر نمونه اندازه‌گیری شد. برای این منظور اشعه X در عمق ۱ میکرون جلا تابیده شد تا مواد تشکیل‌دهنده جلا مورد ارزیابی قرار گیرد. بدین ترتیب میزان ضخامت لایه جلا، مورفولوژی و عناصر سازنده آن تعیین گردید. رنگ جلاهای مورد مطالعه نیز با استفاده از دفترچه رنگ مانسل تعیین شد. جلای بیابان دارای تنوع رنگی از رنگ‌های قهوه‌ای تا مشکی است که این رنگ‌ها ناشی از وجود عناصر مختلف در آن می‌باشد. بیشتر ترکیبات آن را آهن و منگنز تشکیل می‌دهد. وجود غلظت بالای اکسیدهای آهن در جلای همراه کانی‌های رسی و سیلیسی باعث ایجاد رنگ قرمز، نارنجی و قهوه‌ای در آن‌ها می‌شود؛ اما وجود اکسیدهای منگنز باعث تیرگی رنگ جلا می‌شود. اکسیدهای آهن به شکل هماتیت (Fe_2O_3) بوده و اکسیدهای منگنز به‌صورت برنزیت ($\text{MnO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$). برای شناسایی اقلیم منطقه از تفکیک رنگ جلاها استفاده گردید به نحوی که بالا بودن مقدار آهن (Fe) نسبت به منگنز (Mn) نشانگر حاکمیت اقلیم خشک در زمان تشکیل آن است. جلاها به دلیل منشأ رسوبی بودنشان تغییرات آب و هوایی گذشته را ثبت می‌کنند (Broecker and Liu, 2001). به این ترتیب از ضخامت، رنگ و مورفولوژی و عناصر موجود در جلاها برای تعیین اقلیم گذشته و از نسبت کاتیونی و اندازه‌گیری مقدار کاتیون‌ها برای تعیین سن جلاها و عوارض ژئومورفولوژیکی منطقه استفاده گردید. ضمناً در این مطالعه از روش تحلیلی-توصیفی و تجربی استفاده شده است.



شکل ۴. نمونه سنگ‌های جلا دار تهیه شده جهت قرار دادن در دستگاه SEM

بحث و یافته‌ها

فرایند شکل‌گیری و توسعه جالای سنگ در منطقه مورد مطالعه

در طبیعت چندین نوع پوشش سنگی وجود دارد که یکی از آن‌ها جالای سنگ است که سطح ظاهری سنگ را تغییر می‌دهد. جلا در محیط‌های مختلف از کوهستان تا بیابان قابلیت شکل‌گیری دارد. جالای سنگ پوششی نازک به رنگ تیره است که بیشتر بر روی سطوح در معرض هوای سنگ محیط‌های خشک یافت می‌شود و عمدتاً از مواد معدنی رسی، اکسیدهای منگنز و آهن تشکیل شده است (Potter and Rossman, 1977). چندین مدل برای تشکیل و توسعه جلا ارائه شده است. در مدل زیستی با تثبیت میکروارگانیسم‌ها (بیومینرالیزاسیون)^۵ و در مدل غیر زیستی توسط فرآیندهای فیزیک و شیمیایی همراه با بارش گرد و غبار یا نوسانات PH-Eh که در آن منگنز در میکرو حوضه‌ها رسوب کرده و متعاقباً به طرف اعماق فروشویی می‌شود (Goldsmith et al. 2014). ترکیبی از فرآیندهای مختلف زیستی و غیر زیستی در مدل چند منشائی (Dorn, 2009)؛ که با مشارکت آن‌ها پوشش‌های میکروسکوپی جلا بر روی سطوح سنگی ایجاد می‌شود. بر مبنای آزمایش‌ها و تجزیه و تحلیل‌های صورت گرفته بر روی نمونه‌های جمع‌آوری شده می‌توان نتیجه گرفت جالاهای منطقه مورد مطالعه حاصل فرآیندهای فیزیک و شیمیایی هم‌زمان با وقوع بادهای شدید به همراه ترسیب گرد و غبار جوی با مشارکت میکروارگانیسم‌ها بوده است.

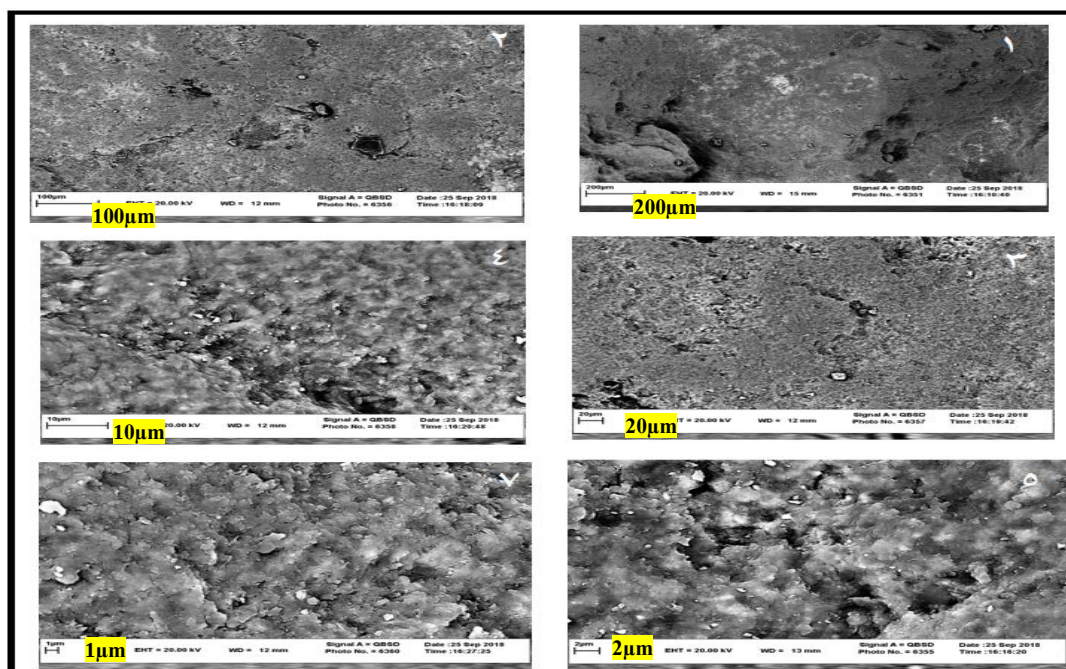
مطالعه میکرومورفولوژی جالای بیابان

تغییرات آب و هوایی منطقه‌ای، ویژگی میکرومورفولوژیکی جالای سنگ‌ها را تغییر می‌دهد. تحقیقات میکرومورفولوژی جالای بیابان، قطعاً برای درک تغییرات محیطی و نوسانات اقلیم دیرینه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مفید خواهد بود (Stoops, 2010). از مهم‌ترین شواهد برای بازسازی تغییرات اقلیم دیرینه مناطق بیابانی، استفاده از میکرومورفولوژی

⁵. Biomineralization

⁶. Microbasins

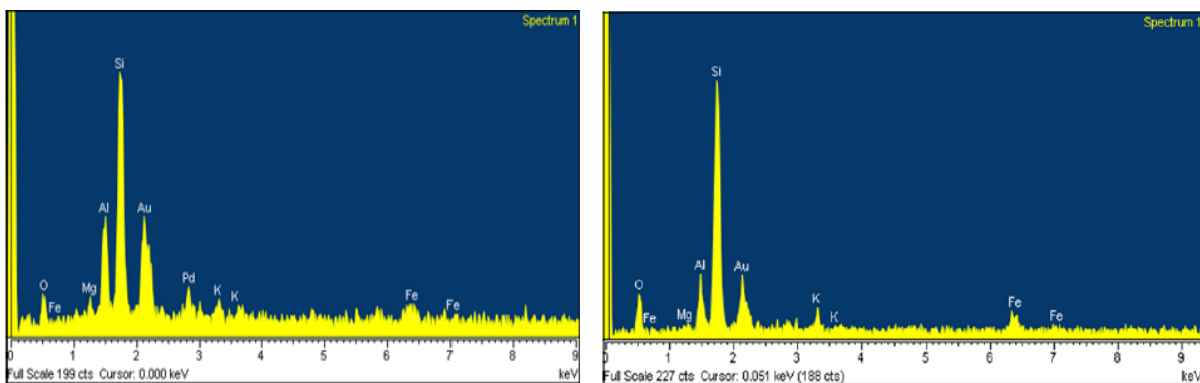
جلای سنگ بیابان است (Zerboni, 2008 و Liu & Broecker 2013). (Perry and Adams, 1978) برای اولین بار ناهمگونی و تنوع در میکرومورفولوژی جلای سنگ را گزارش کردند. ایجاد لایه‌های مختلف در جلا، ویژگی اقلیمی زمان تشکیل خود را ثبت و ضبط می‌کند. اشکال جلا دارای دامنه‌ای از اشکال ورقه ورقه و شبه خوشه‌ای هستند. پایین بودن میزان گرد و غبار باعث ایجاد میکرومورفولوژی خوشه‌ای و برعکس فراوانی گرد و غبار میکرومورفولوژی لایه‌ای ایجاد می‌کند (Doon, 2009). عوامل مختلفی می‌توانند بر میکرومورفولوژی جلای سنگ منطقه مورد مطالعه تأثیر بگذارند از جمله آن‌ها کانی‌شناسی خاک رس، فراوانی منگنز، ارگانوسم‌های مانند قارچ‌ها، مورفولوژی سنگ زیرین، ساییدگی در اثر باد، نوع خاک منطقه و سایر عوامل ریز محیطی می‌باشند. بر اساس مدلی که (Dom, 1986) ارائه کردند، اگر ماده معدنی رس در محیط‌های با وزش باد فراوان قرار گیرد، رسوب پلاکت‌های رس در جهت افقی، به ساختمان جلا شکل ورقه‌ای می‌بخشد که هرکدام از لایه‌ها نشانگر تغییرات محیط اطراف خود هستند. با بررسی مورفولوژی جلاهای شکل گرفته در سطح سنگ‌های بیابان گناباد مشخص شد که شکل آن‌ها به صورت ورقه‌ای است. این مطلب مؤید فراوانی وقوع بادهای شدید به همراه پوشش گیاهی ضعیف در منطقه می‌باشد. ضعف پوشش گیاهی در منطقه افزایش گرد و غبار و ذرات معلق را به دنبال داشته است که با ته‌نشست آن‌ها زمینه‌ساز تشکیل جلا بر روی سنگ‌ها شده است. تصاویر تهیه شده از جلای سنگ در مقیاس‌های ۲۰۰ تا ۱ میکرومتر (شکل ۵) نشان می‌دهد. هر چه مقیاس تصویر بزرگ‌تر می‌شود ورقه‌ای بودن مورفولوژی جلا نمایان تر می‌شود.



شکل ۵. شکل گیری مورفولوژی ورقه‌ای در جلاهای مورد مطالعه

بررسی ژئوشیمی جلای سنگ در ردیابی تغییرات آب و هوایی کواترنر

جلای سنگ یکی از معروفترین رسوبات منگنز و آهن در بسترهای هوازده است که سطح انواع سنگها را می پوشاند. ساختار آن عمدتاً از اکسید منگنز، اکسید آهن، کانی های رسی و با مقدار ناچیزی از سایر مواد معدنی و مواد آلی تشکیل شده است (Xu, et al. 2019). کانی های رس شامل ایلیت و مونتموریلونیت ۷۰ درصد از حجم جلای سنگ را به خود اختصاص می دهند که با آرایش نانوکریستالی اکسیدهای منگنز/آهن بر روی سطح سنگ میزان چسبیده اند (Potter and Rossman, 1977). مقدار منگنز موجود در جلای سنگ توسط اقلیم محل تشکیل آن، کنترل می شود. در اقلیم خشک مقدار منگنز موجود در جلا کاهش می یابد. مطلب مذکور با انجام آنالیزهای شیمیایی میکرولامیناسیون جلا توسط محققان دیگر تأیید شده است (Liu, Broecker. 2013). عناصر موجود در نمونه های جلای تهیه شده به وسیله میکروسکوپ الکترونیکی (Xray) بررسی شد و نتایج حاصله نشان داد عناصر تشکیل دهنده آنها شامل Si, K, Au, Fe, Mg, Pd, Ca, Ti و Mn است. بالا بودن مقدار آهن (Fe) نسبت به منگنز (Mn) نشانگر حاکمیت اقلیم خشک در زمان تشکیل جلای سنگ می باشد. با توجه به این مطلب که هرچه از زمان تشکیل جلا بگذرد به دلیل پایداری تیتانیوم (Ti)، همواره بر مقدار آن افزوده شده و بالعکس از مقادیر سایر کاتیون ها مثل Mg, K, Ca کاسته می شود. جزئی بودن مقدار تیتانیوم در نمونه های بررسی شده بیانگر این واقعیت است که دوره خشکی که در آن جلا شکل گرفته از منظر زمین شناسی عمر چندانی نداشته و نهایتاً چند هزار سال بیشتر قدمت ندارد (شکل ۶).

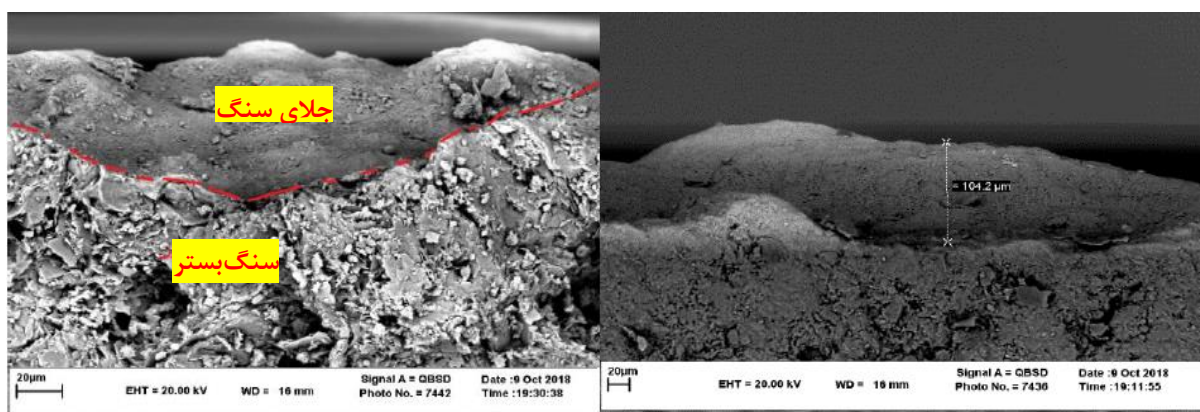


شکل ۶. میزان عناصر موجود در جلای سنگ های مورد مطالعه با استفاده از میکروسکوپ الکترونیکی (Xray)

رابطه لایه بندی و ضخامت جلای سنگ با تغییرات آب و هوایی کواترنر

جلای سنگ یک پوشش تیره غنی از منگنز و آهن با رشد بسیار کند (بین ۱ تا ۴۰ $\mu\text{m/ky}$) روی سطوح سنگی در معرض هوا است که بیشتر در مناطق بیابانی جهان دیده می شود (Liu and Broecker, 2000). جلاها به دلیل منشأ رسوبی بودنشان تغییرات آب و هوایی گذشته را ثبت می کنند (Broecker and Liu, 2001). اغلب جلای سنگها دارای میکرو مورفولوژی هایی لایه ای، خوشه ای یا حالت بینابین قرار دارند (Doon, 2009). یکی از مهم ترین روش های

تعیین تغییرات آب و هوای دیرینه استفاده از روش میکرو لامیناسیون جلا (VML)^۷ است. لایه‌های سیاه، زرد و نارنجی در جلا منعکس‌کننده تغییرات آب و هوایی منطقه‌ای است (Liu, 2003). مطالعات متعددی که در این خصوص صورت گرفته است، تمایز بین مرز جلا تشکیل‌شده با سنگ میزبان را نه به صورت تدریجی بلکه به صورت ناگهانی گزارش کرده‌اند (Sarmast et al, 2019; Jones, 1991; Potter and Rossman, 1979). بررسی میکرو چینه‌شناسی یا میکرو لایه‌بندی (VML) بر روی نمونه سنگ‌های جلا دار به وسیله میکروسکوپ الکترو اسکن صورت گرفت (شکل ۷). مشاهدات میکرو مورفولوژیکی تفاوت در رنگ و بافت جلا را نسبت به سنگ میزبان نشان داد. بر اساس تفاوت‌های مذکور بین جلا با سنگ میزبان، مرز این دو تعیین گردید. نتایج نشان داد جلای روی سنگ‌ها تک لایه بوده و فاقد لایه‌بندی متعدد است. لایه مذکور متشکل از رس، آلومینیوم، آهن و دیگر کاتیون‌ها بوده و رنگ جلاها قهوه‌ای تا قهوه‌ای خیلی تیره می‌باشد که حاکی از حاکمیت اقلیم خشک در زمان تشکیل جلای سنگ منطقه است (جدول ۱). احتمالاً اقلیم خشک منطقه بعد از آخرین دوره مرطوب شروع شده و تاکنون ادامه دارد.



شکل ۷. ضخامت جلا بر روی سنگ‌های میزبان منطقه مورد مطالعه

جدول ۱. ویژگی نمونه‌های جلا از سطوح مختلف ژئومورفیک مورد مطالعه

سطح ژئومورفیک	رنگ جلا	ضخامت (μm)	سطح توپوگرافی
پایدار	تیره	۶۶/۴۷	ناهموار
پایدار	تیره	۱۰۴/۲	هموار
پایدار	تیره	۳۹/۲	هموار
پایدار	تیره	۲۰۰/۳	هموار

بررسی نسبت کاتیونی جلای سنگ

روش سن‌یابی نسبت کاتیونی $(Na+Mg+k+ Ca/Ti)$ یا $(Ca+K/Ti)$ عناصر جلای سنگ از روش‌های پذیرفته‌شده در پژوهش‌های علمی جهان محسوب می‌شود. اگر از جلای سنگ جهت سن‌یابی به نحوه صحیحی استفاده شود می‌تواند

نتایج رضایت بخشی به دنبال داشته باشد (Loendorf, 1991). مشاهدات اولیه در مورد ترکیبات شیمیایی جلاها نشان می دهد که مقادیر اولیه کاتیون ها عموماً دارای یک ضریب نسبی در ارتباط با یکدیگر هستند. تغییرات جزئی بعدی در مقادیر کاتیون ها در گذر زمان ایجاد می شود. جلای سنگ حاوی عناصری است که به سرعت شسته می شوند (Dorn and Krinsley, 1991; Krinsley, 1998). بر اساس همین یافته علمی، با گذشت زمان کاتیون های قابل شستشو در جلای سنگ از قبیل سدیم، کلسیم، منیزیم، پتاسیم به تدریج تخلیه و یا توسط کاتیون های نامتحرک از قبیل تیتانیوم (Ti) جایگزین خواهد شد (Dorn, 2001). کاهش نسبت کاتیونی مذکور شاخصی از مدت زمانی می باشد که جلا در معرض آبشویی کاتیونی قرار گرفته است در نتیجه هرچه قدر نسبت کاتیونی کمتر باشد، نشان دهنده سن بیشتر جلای بیابان می باشد (Pineda, et al. 1988). از روش سن یابی نسبت کاتیونی در مکان هایی مانند چین (Zhang et al. 1990) و ایران (Sarmast et al. 2017) استفاده شده است. از مزایای استفاده تکنیک نسبت کاتیونی در تحلیل شیمیایی عناصر جلای سنگ، هزینه پایین و سادگی انجام آن می باشد. در این روش، نحوه نمونه برداری بسیار حساس و مهم است زیرا از یک طرف باید فاکتورهای میکرو محیطی کنترل شود و از طرف دیگر در مرحله آماده سازی نمونه ها از تداخل ناخالصی ها حاصل از سنگ میزبان با جلا اجتناب شود. در بررسی نسبت کاتیونی حداقل و حداکثر نسبت برای منطقه مورد مطالعه محاسبه شد. نسبت های مذکور نشان دهنده حداقل و حداکثر سن برای جلاهای منطقه است. مقدار عددی حاصله هرچه قدر بزرگ تر باشد نشانگر سن پایین جلا و بالعکس می باشد (جدول ۲). نسبت کاتیونی برای اشکال ژئومورفیک به صورت رابطه شماره (۱) محاسبه شد.

$$\text{رابطه (۱).} \quad K+Ca:Ti \quad 9/2 + 1/5 : 0/92 = 11/63$$

جدول ۲. ترکیب شیمیایی نمونه جلای سنگ های منطقه مورد مطالعه

میانگین عناصر (%)											واحد ژئومورفولوژیک
Mn	Na	Ba	Ti	Ca	Mg	Fe	K	Au	Al	Si	
۰/۳	۰/۳۱	۰/۰۷	۰/۹۲	۱/۵	۴/۳	۵/۲	۹/۲	۱۱/۶	۱۴/۳	۵۲/۴	اینسلیبرگ
۰/۵	۰/۳۲	۰/۰۸	۰/۹	۲/۸	۳/۲	۶/۷	۷/۸	۱۵/۲	۱۳/۶	۴۸/۹	پهنه ماسه ای
۰/۴	۰/۳۳	۰/۰۵	۰/۸۵	۳/۲	۴/۲	۷/۱	۵/۲	۱۰/۵	۱۵/۱	۵۳/۱	رسوبات آبرفتی قدیمی
۰/۳	۰/۳۰	۰/۰۵	۰/۷۵	۳/۲	۳/۱	۷/۶	۵/۶	۱۱/۳	۱۲/۶	۵۵/۲	دشت ریگی

جدول ۳. نسبت کاتیونی محاسبه شده نمونه جلای سنگ های منطقه مورد مطالعه

نسبت کاتیونی عناصر		واحد ژئومورفولوژیک
K+ Ca: Ti	Na+ Mg+ K+ Ca: Ti	
۱۱/۶۳	۱۶/۶	اینسلیبرگ
۱۰/۶	۱۵/۵	پهنه ماسه ای
۸/۹	۱۳/۵	رسوبات آبرفتی قدیمی
۹/۸	۱۳/۳	دشت ریگی

بررسی نسبت کاتیونی بر اساس رابطه $K+Ca:Ti$ نشان می‌دهد این نسبت بین ۸/۹ تا ۱۱/۶۳ قرار دارد (جدول ۳). نسبت‌های به‌دست آمده نشان‌دهنده شروع دوره خشکی یا به عبارت دیگر ابتدای هولوسن است که در آن رسوب‌گذاری و تشکیل جلای سنگ صورت گرفته است. به احتمال زیاد در میانه هولوسن به‌صورت کوتاه مدت منطقه با افزایش رطوبت مواجه بوده است. بر همین اساس قدیمی‌ترین اشکال ژئومورفولوژیکی موجود در منطقه مورد مطالعه، دشت ریگی و رسوبات آبرفتی قدیمی و جوان‌ترین آن‌ها اینسلیبرگ‌ها می‌باشند. فرایندهای اقلیمی از جمله بادهای شدید به همراه فرسایش آبی با فرسودن سازندهای نرم منطقه و باقی‌ماندن سازندهای سخت زمینه را برای تشکیل اینسلیبرگ‌ها جوان فراهم ساخته‌اند.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر از میکرومورفولوژی جلای بیابان جهت تعیین سن عوارض ژئومورفیک و ردیابی تغییرات آب و هوایی دوره کواترنر در بیابان‌های شمال شرق کشور استفاده شده است. جلای سنگ‌ها به‌عنوان وقایع‌نگاران چشم‌نواز اطراف ما، می‌توانند پنجره‌ای رو به گذشته باشند. با بررسی و آزمایش نمونه‌های جلاهای جمع‌آوری شده از منطقه مورد مطالعه مشخص گردید تقریباً از اوایل هولوسن با حاکمیت دوره خشکی و وزش بادهای شدید، جلای سنگ‌ها شروع به شکل‌گیری نمودند. بررسی میکرومورفولوژی جلای سنگ‌ها نشان داد که مورفولوژی آن‌ها به‌صورت ورقه‌ای تک لایه بوده و فاقد لایه‌بندی متعدد می‌باشند که دلالت بر خشکی همراه با فعالیت‌های بادی و طوفان‌های گردوغبار در منطقه دارد. مطالعات نشان داده در مناطقی از کره زمین که دوره‌های مرطوب طولانی‌تری داشتند جلای سنگ‌ها از شکل ورقه‌ای به خوشه‌ای تغییر پیدا کرده‌اند و این تغییرات در عناصر سازنده آن‌ها نیز منعکس شده است. برای مثال در دوره‌های مرطوب مقدار و درصد بیشتری از عنصر منگنز (Mn) در جلاها انباشته شده‌اند. در نمونه جلاهای آزمایش شده منطقه، مقدار منگنز بسیار کم بوده ولی برعکس مقدار عنصر آهن (Fe) بیشتر است که خود شاهی بر حاکمیت دوره خشکی و فقدان پوشش گیاهی در منطقه می‌باشد. بررسی نسبت کاتیونی ($K+Ca:Ti$) جلاها نشانگر رسوب‌گذاری و تشکیل آن‌ها هم‌زمان با شروع دوره خشکی یا به عبارت دیگر ابتدای هولوسن در حدود ۱۰۵۰۰ سال قبل است. همچنین نسبت‌های کاتیونی استخراج شده بیانگر شکل‌گیری و تغییر و تحول منطقه مورد مطالعه بعد از وقوع آخرین دوره حداکثر گسترش یخچال‌ها در هولوسن همراه با انباشت تپه‌های ماسه‌ای بوده که تا به امروز با نوسانی از شدت و ضعف جریان داشته است. بر اساس یافته‌ها هرچند در این منطقه دوره‌های مرطوب طولانی مدت وجود نداشته ولی دوره‌های مرطوب به‌صورت کوتاه مدت به وقوع پیوسته است. نتایج مطالعه حاضر به‌وضوح نشان داد جلای سنگ‌ها می‌تواند شاخصی ژئومورفولوژیکی برای بررسی تغییرات آب و هوایی و تعیین سن عوارض ژئومورفیک دوره کواترنر باشد زیرا ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن‌ها منعکس‌کننده شرایط محیطی هم‌زمان با دوره رسوب‌گذاری و تشکیل جلای بیابان در منطقه می‌باشند. نتایج این پژوهش با یافته‌های (Doon, 1983) و (Liu & Broecker, 2007) که جلای بیابان را شاخصی

مناسب برای مطالعه نوسانات و تغییرات اقلیمی کواترنر می‌دانستند و همچنین با نتایج تحقیقات پژوهشگران دیگر مثل (Pineda, et al. 1988) و (Sarmast et al. 2017) که جلای بیابان را ابزاری مهم برای تعیین سن اشکال ژئومورفولوژیک عنوان کردند؛ همخوانی نزدیک دارد.

منابع

- 1- Afify, A.M& Sanz-Montero, M.E& Calvo, J.P. (2015): "Ironstone Deposits Hosted In Eocene Carbonates From Bahariya (Egypt) New Perspective On Cherty Ironstone Occurrences", *Sedimentary Geology*, Vol. 329, 81–97. DOI: 10.21608/Shedet.2021.207866.
- 2- Broecker, W. Liu, T. (2001). Rock Varnish Recorder Of Desert Wetness. *GSA Today* 11(8), Pp: 4–10. DOI:10.1130/1052-5173.
- 3- Chaddha AS, Singh NK, Malviya M, Et Al. (2022): Birnessite-Clay Mineral Couple In The Rock Varnish: A Nature's Electrocatalyst. *Sustainable Energy Fuels* 6(10):Pp. 2553–2569. Doi.Org/10.1039/D1SE01230D.
- 4- Chaddha, A.S. Sharma, A. Singh, N.K. (2021): Clay Minerals Identification In Rock Varnish By XRD: A One-Step Reduction Approach. *Methods* 8, 101511. <https://doi.org/10.1016/J.Mex.2021.101511>
- 5- Chaddha, A. S. Et Al. (2024): Biotic-Abiotic Mingle In Rock Varnish Formation: A New Perspective, *Chemical Geology*, 648, 121961. Pp: 1-15. <https://doi.org/10.1016/J.Chemgeo.2024.121961>.
- 6- Darwin, C.R. (1839): Narrative Of The Surveying Voyages Of His Majesty'S Ships Adventure And Beagle Between The Years 1826 And 1836, Describing Their Examination Of The Southern Shores Of South America, And The Beagle'S Circumnavigation Of The Globe. *Journal And Remarks*. 1832-1836. London: Henry Colburn.
- 7- De La Fuente, B. (2004): Presentation La Pintura Mural Prehispánica En México, *Boletín Informativo*, 13(26), 3-5.
- 8- Dietzel, M. Kolmer, H. P'Olt, P. Simic, S. (2008): Desert Varnish And Petroglyphs On Sandstone –Geochemical Composition And Climate Changes From Pleistocene To Holocene (Libya). *Geochemistry*: Pp. 68, 31–43. DOI:10.1016/J.Chemer.2007.03.001.
- 9- Digregorio, B.E. (2005): Rock Varnish And The Manganese Oxide Connection. *Anal. Chem.* 77.
- 10- Dorn RI (2001): Chronometric Techniques: Engravings. In: Whitley DS (Ed.) *Handbook Of Rock Art Research*, Pp. 167–189. Walnut Creek: Altamira Press.
- 11- Dorn RI And Krinsley DH (1991): Cation-Leaching Sites In Rock Varnish. *Geology* 19: Pp. 1077–1080.
- 12- Dorn, R. I. (1983): Cat Ion Ratio Dating A New Rock Varnish Age-Determination Technique, *Quaternary Res.* 20: Pp. 49-73. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(83\)90065-0](https://doi.org/10.1016/0033-5894(83)90065-0).
- 13- Dorn, R.I. (1986): Rock Varnish As An Indicator Of Aeolian Environmental Change, In *Aeolian Geomorphology The Binghamton Symposia In Geomorphology: International Series 17*, Allen And Unwin, Boston, Pp. 291–307.

- 14- Dorn, R. I. (2009): Desert Rock Coatings, In Parsons, A.J. Abrahams, A.D. (Eds), *Geomorphology Of Desert Environments*: Dordrecht, Springer, Pp. 153-186.
- 15- Dorn, R.I& Krinsley, D. (2011): Spatial, Temporal And Geographic Considerations Of The Problem Of Rock Varnish Digenesis, *Scale Issues In Geomorphology*, Vol. 130, No. 1, Pp. 91–99. Doi:10.1016/J.Geomorph.2011.02.002
- 16- Dorn, R.I. Ober Lander, T.M. (1981): Microbial Origin Of Desert Varnish. *Science* 213, Pp. 1245–1247.
- 17- Dorn, Ronald. (2024): Rock Varnish Revisited, *Progress In Physical Geography*, Vol. 43 (3). Pp: 389-419. Doi/10.1177/03091333241248038.
- 18- Elvidge, C.D. Fuente, C.B. (1980): Restoration Of Petroglyphs With Artificial Desert Varnish. *Stud. Conserv.* 25, Pp. 108–117.
- 19- Engel, C.G. Sharp, R.P. (1958): Chemical Data On Desert Varnish: *Geological Society Of America Bulletin*, 69(5), Pp. 487- 518. <https://doi.org/10.1130/0016-7606>.
- 20- Esposito, Alfonso. Et Al. (2015): “Comparison Of Rock Varnish Bacterial Communities With Surrounding Non-Varnished Rock Surfaces: Taxon-Specific Analysis And Morphological Description”, In: *Microbial Ecology*, Vol. 70, No. 3, Pp: 741–50. Doi.Org/10.1007/S00248-015-0617-4.
- 21- Esposito, Alfonso. Et Al. (2019): Taxonomic And Functional Insights Into Rock Varnish Micro Biome Using Shotgun Met genomics, *Microbiology Ecology*, Vol 95, No 12, Pp:1-10. Doi: 10.1093/Femsec/Fiz180
- 22- Garvie, L.A.J. Burt, D.M. Buseck, P.R. (2008): Nanometer-Scale Complexity, Growth, And Digenesis In Desert Varnish. *Geology* 36, Pp. 215–218. Doi: 10.1130/G24409A.1
- 23- Goldsmith, Y. Stein, M. And Enzel, Y. (2014): From Dust To Varnish: Geochemical Constraints On Rock Varnish Formation In The Negev Desert, Israel. *Geochemical Cosmo Chemical Acta*, 126, Pp. 97-111. <https://doi.org/10.1016/J.Gca.2013.10.040>
- 24- Goldsmith. Y, Enzel. Y, Stein. M, (2012): Systematic Mn Fluctuations In Laminated Rock Varnish Developed On Coeval Early Holocene Flint Artifacts Along A Climatic Transect, Negev Desert, *Quat. Res.* 78, Pp. 474–485. <https://doi.org/10.1016/J.Yqres.2012.07.009>
- 25- Hayden JD. (2006): Pre-Altithermal Archaeology In The Sierra Pinacate, Sonora, Mexico. *Am Antiq.*
- 26- Jones, C.E. (1991): Characteristics And Origin Of Rock Varnish From The Hyper Arid Coastal Deserts Of Northern Peru. *Quaternary Research*, 35 (1); 116-129. Doi:10.1016/0033-5894(91)90099-Q
- 27- Krinsley, D. (1998): Models Of Rock Varnish Formation Constrained By High Resolution Transmission Electron Microscopy. *Sedimentology* 45: Pp. 711–725. <https://doi.org/10.1046/J.1365-3091.1998.00172.X>
- 28- Krinsley D, Dorn RI, Digregorio B. (2009): Astor Biological Implications Of Rock Varnish In Tibet. *Astrobiology* 9, Pp: 551–562. DOI: 10.1089/Ast.2008.0238
- 29- Krinsley, D.H. Digregorio, B. Dorn, R.I. Razink, J. Fisher, R. (2017): Mn-Fe-Enhancing Budding Bacteria In Century-Old Rock Varnish, Erie Barge Canal, New York: *The Journal Of Geology*, 125(3), 317-336. DOI: 10.1086/691147.
- 30- Krumbein, W.E. Jens, K. (1981): Biogenic Rock Varnishes Of The Negev Desert (Israel) An Ecological Study Of Iron And Manganese Transformation By Cyanobacteria And Fungi. *Oecologia* 50, Pp. 25–38. <https://doi.org/10.1007/BF00378791>.

- 31- Lanza, N.L. Ollila, A.M. Cousin, A. Et Al. (2015): Understanding The Signature Of Rock Coatings In Laser-Induced Breakdown Spectroscopy Data. *Icarus* 249, 62–73. Doi.:10.1016/J.Icarus.2014.05.038.
- 32- Lebedeva, Marna. Et Al. (2019): .Microscopic And Tomographic Studies For Interpreting The Genesis Of Desert Varnish And The Vesicular Horizon Of Desert Soils In Mongolia And The USA, *Boletín De La Sociedad Geológica Mexicana*, Vol. 71, No.1, Pp:21-42. <https://doi.org/10.18268/BSGM2019v71n1a3>.
- 33- Lingappa, Usha.F. Et Al. (2021).An Eco Physiological Explanation For Manganese Enrichment In Rock Varnish, *PNAS*, VOL 118, No. 25, Pp: 1-8. <https://doi.org/10.1073/Pnas.2025188118>.
- 34- Liu, T. Broecker, W.S. (2000): How Fast Does Rock Varnish Grow? *Geology*, Vol 28(2), Pp: 183–196. [http://dx.doi.org/10.1130/0091-7613\(2000\)28%3C183:HFDRVG%3E2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1130/0091-7613(2000)28%3C183:HFDRVG%3E2.0.CO;2).
- 35- Liu, T. (2003): Blind Testing Of Rock Varnish Micro Stratigraphy As A Chronometric Indicator: Results On Late Quaternary Lava Fl Ows In The Mojave Desert, California. *Geomorphology* 53, 209–234. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00331-8](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00331-8).
- 36- Liu, T. Broecker, W.S. (2007): Holocene Rock Varnish Micro Stratigraphy And Its Chronometric Application In The Drylands Of Western USA: *Geomorphology*, 84 (1-2), Pp: 1-21. Doi.Org/10.1016/J.Geomorph.2006.06.008
- 37- Liu, T. Broecker, W.S. (2013): Millennial-Scale Varnish Micro Lamination Dating Of Late Pleistocene Geomorphic Features In The Drylands Of Western USA. *Geomorphology* 187, Pp: 38–60. DOI:10.1016/J.Geomorph.2012.12.034.
- 38- Liu, Tanzhue; Lepre, Christopher. (2021): Rock Varnish Record Of The African Humid Period In The Lake Turkana Basin Of East Africa, *The Holocene*, Vol.31(8), Pp: 1239-1249. DOI:10.1177/09596836211011655.
- 39- Loendorf, L. (1991): Cation-Ratio Varnish Dating And Petroglyph Chronology In Southeastern Colorado. *Antiquity* 65: Pp. 246–255. <https://doi.org/10.1017/S0003598X00079692>.
- 40- Martinez-Pabello, Pavel. Et Al. (2020): Rock Varnish As A Natural Canvas For Rock Art In La Proveedora, Northwestern Sonoran Desert (Mexico): Integrating Archaeological And Geological Evidences, *Quaternary International*, 572(6). DOI:10.1016/J.Quaint.2020.10.028.
- 41- Moore, C. Elvidge, C. (1982): Desert Varnish. In: *Reference Handbook On The Deserts Of North America*. Greenwood Press, Westport, Conn, Pp. 527–536.
- 42- Otter, Laura. M. Et Al. (2020): Geochemical Insights Into The Relationship Of Rock Varnish And Adjacent Mineral Dust Fractions, *Chemical Geology*, 551. Pp: 1-16. Doi:10.1016/J.Chemgeo.2020.119775.
- 43- Perry, R. S. And Adams, J. B. (1978): Desert Varnish: Evidence For Cyclic Deposition Of Manganese. *Nature* 276, 489-491. <https://doi.org/10.1038/276489a0>.
- 44- Perry, R.S. Lynne, B.Y. Sephton, M.A. Kolb, V.M. (2006): Baking Black Opal In The Desert Sun: The Importance Of Silica In Desert Varnish. *Geol* 34, 537. <https://doi.org/10.1130/G23410C.1>.
- 45- Pineda, C. Peisach, M And Jacobson, L. (1988): Ion Beam Analysis For The Determination Of Cat Ion Ratios As A Means Of Dating Southern African Rock Varnishes. *Nucl. In Strum. Meth. Phys. Res.*35: Pp.463-466.
- 46- Potter, R. M. (1979): The Tetravalent Manganese Oxides: Clarification Of Their Structural Variations And Relationships And Characterization Of Their Occurrence In The Terrestrial

- Weathering Environment As Desert Varnish And Other Manganese Oxides: Pasadena, California Institute Of Technology, Ph.D. Dissertation Thesis, 245 P.
- 47- Potter, R.M. Rossman, G.R. (1977): Desert Varnish: The Importance Of Clay Minerals. Science, 196(4297), Pp. 1446-1448. DOI: 10.1126/Science.196.4297.1446.
 - 48- Potter, R.M. Rossman, G.R. (1979): Mineralogy Of Manganese Dendrites And Coatings. American Mineralogist, 64(11-12), Pp. 1219-1226. DOI:0003-004X/79/1112-121902.00.
 - 49- Sarmast M, Farpoor MH, And Esfandiarpour, I. (2017): Soil And Desert Varnish Development As Indicators Of Landform Evolution In Central Iranian Deserts. Catena 149: Pp. 98–109. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.09.003>
 - 50- Sarmast. M, Farpoor M.H, Jafari A, And Esfandiarpour, I. (2019): Tracing Environmental Changes And Paleo Climate Using The Micromorphology Of Soils And Desert Varnish In Central Iran. Desert 24(2): 331–353. DOI:10.22059/Jdesert.2019.76389.
 - 51- Stoops, G. (2010): Micromorphology As A Tool In Soil And Regolith Studies. Interpretation Of Micro Morphological Features Of Soils And Regolith. Amsterdam, Netherlands, Elsevier, Pp: 1-13.
 - 52- Spilde, M.N. Melim, L.A. Northup, D.E (2013): Anthropogenic Lead As A Tracer Of Rock Varnish Growth: Implications For Rates Of Formation: Geology, 41(2), Pp. 263- 266. DOI:10.1130/G33514.1
 - 53- Von Humboldt, A. (1812): Personal Narrative Of Travels To The Equinoctial Regions Of America During The Years 1799–1804 By Alexander Von Humboldt And Aimed Bond Land. London, Bell, 521 P. (Trans. And Ed. By T. Ross In 1907).
 - 54- Wang, X. Zeng, L. Wines, M. Schloßmacher, U. Joachim, K.P. Schroder, H.C. (2011): Evidence For A Biogenic, Micro Organismal Origin Of Rock Varnish From The Grandees Belt Of Tibet. Micron 42, Pp. 401–411. Doi: 10.1016/j.micron.2010.12.001.
 - 55- Whitley, D.S. Santoro, C. M. Valenzuela, D. (2017): Climate Change, Rock Coatings, And The Archaeological Record. Elements, 13(3), 183-186. DOI:10.2113/Gselements.13.3.183.
 - 56- Xu, X. Ding, H. Li, Y. Lu, A. Li, Y. Wang, C. (2018): Mineralogical Characteristics Of MN Coatings From Different Weathering Environments In China: Clues On Their Formation. Mineral. Petrol. 112, 671–683. DOI:10.1007/S00710-018-0564-0.
 - 57- Xu, Xiaoming. Et Al. (2019): Characteristics Of Desert Varnish From Nanometer To Micrometer Scale: A Photo-Oxidation Model On Its Formation, Chemical Geology, 522, Pp: 55-70. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2019.05.016>.
 - 58- Zerboni A, Villa F, Wu Y-L, Et Al. (2022): The Sustainability Of Rock Art: Preservation And Research. Sustainability 14: 6305. DOI: 10.3390/Su14106305.
 - 59- Zerboni, A. (2008): Holocene Rock Varnish On The Massac Plateau (Libyan Sahara): Chronology Of Weathering Processes. Geomorphology, 102 (3); Pp. 640-65. Doi.10.1016/J.Geomorph.2008.06.010.
 - 60- Zhang Y, Liu T, And Li S (1990): Establishment Of A Cation-Leaching Curve Of Rock Varnish And Its Application To The Boundary Region Of Gansu And Xinjiang, Western China. Seismology And Geology (Beijing) 12: Pp. 251–261. Doi:10.1006/Qres.1995.1031.