

بررسی فرایندهای دیاژنتیکی سنگ های کربناته سازند خوش ییلاق بر اساس مطالعات کاتدولومینسانس و میکروسکوپ الکترونیکی روبشی

علی محمد برزگر^۱، محمد خانه باد^{۱*}، عباس قادری^۱، حسین غلامعلیان^۲

۱- گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

*mkhanehbad@ferdowsi.um.ac.ir

چکیده

در این پژوهش فرایندهای دیاژنتیکی با تاکید بر فرآیند سیمانی شدن و فرآیند استیلولیت در تحول بلورشناختی سنگ‌های کربناته سازند خوش‌ییلاق بررسی شده است. به منظور دستیابی به این هدف، از تلفیق مطالعات کاتدولومینسانس (CL) و میکروسکوپ الکترونیکی روبشی (SEM) استفاده شد. نتایج مطالعات پتروگرافی نشان می‌دهد که این سازند یک تاریخچه دیاژنتیکی چندمرحله‌ای شامل دیاژنز دریایی اولیه، متئوریک و تدفینی را تجربه کرده‌اند. این مطالعه نقش کلیدی روش‌های CL و SEM را در تفسیر فرایندهای بلورشناختی و کانی‌شناسی دیاژنزی سنگ‌های کربناته نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: سازند خوش ییلاق، کاتدولومینسانس، دیاژنز، میکروسکوپ الکترونی روبشی.

Investigation of diagenetic processes of carbonate rocks of Khoshyeilagh Formation, based on cathodoluminescence and scanning electron microscopy studies

Ali Mohammad Barzegar¹, Mohammad Khanehbad^{1*}, Abbas Ghaderi¹, Hossein Gholamalian²

1- Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

2- Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

*mkhanehbad@ferdowsi.um.ac.ir

Abstract

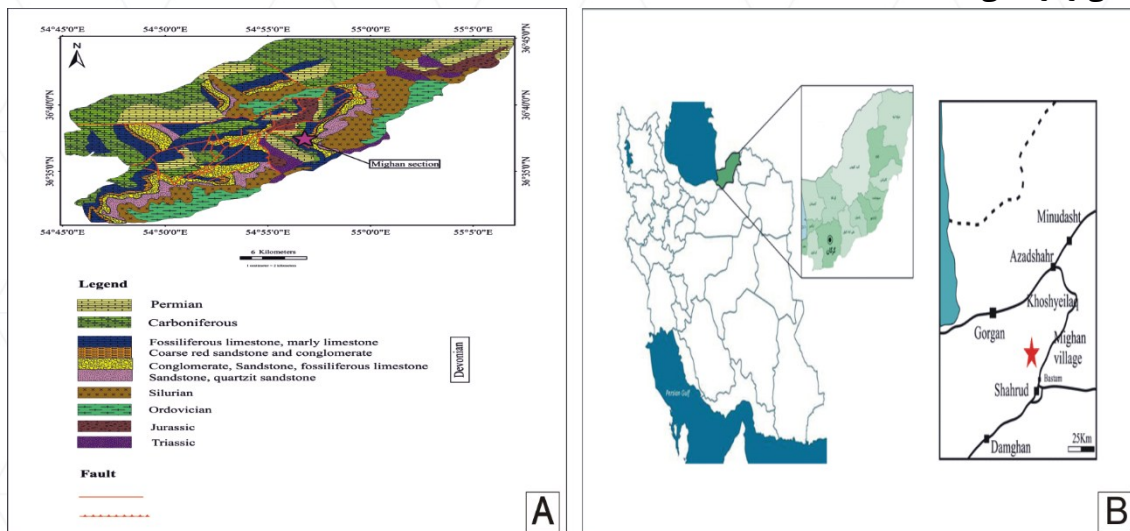
In this study, diagenetic processes with emphasis on the cementation and the stylolite processes in the crystallographic evolution of carbonate rocks of the Khoshyeilagh Formation have been investigated. In order to achieve this goal, a combination of cathodoluminescence (CL) and scanning electron microscopy (SEM) studies was used. The results of petrographic studies indicate that this formation has experienced a multi-stage diagenetic history including early marine, meteoric, and burial diagenesis. This study demonstrates the key role of CL and SEM methods in interpreting the crystallographic and mineralogical processes of carbonate rock diagenesis.

Keywords: Khoshyeilagh Formation, cathodoluminescence, diagenesis, scanning electron microscopy.

۱- مقدمه

سازند خوش ییلاق که نخستین بار توسط بزرگ‌نیا (۱۹۷۳) معرفی و توصیف شده است، در بخش‌های خاوری کوه‌های البرز، دارای توالی ضخیمی از سنگ‌آهک‌های اسکلتی، شیل و ماسه‌سنگ با میان‌لایه‌های دولومیتی بوده که در قالب دو واحد کربناته و یک واحد ماسه‌سنگی/کنگلومرایی از یکدیگر تفکیک شده‌اند (Wendt et al., 2005). منطقه مورد مطالعه در ۵ کیلومتری شمال

غرب روستای میقان، یکی از روستاهای باستانی بخش بسطام شهرستان شاهرود، در استان سمنان قرار دارد. این منطقه همچنین در فاصله ۲۵ کیلومتری شمال شاهرود و ۲۰۷ کیلومتری شهر سمنان (مرکز استان) جای دارد (شکل ۱). شواهد رسوب‌شناسی نشان می‌دهد که این سازند در یک محیط دریایی کم‌عمق نهشته شده (Ranjbar et al., 2005) و پس از آن تحت تأثیر فشار و فرآیندهای دیاژنز قرار گرفته است. دیاژنز مجموعه‌ای از فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی است که پس از رسوب‌گذاری بر سنگ‌های رسوبی اثر می‌گذارد (Schmid et al., 2004) و نقش تعیین‌کننده‌ای در تکامل کانی‌شناسی، ریزساختار بلورها و ویژگی‌های مخزنی سنگ‌های کربناته دارد لذا مطالعه دقیق این مهم می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در خصوص تاریخچه شیمیایی سیالات و شرایط فیزیکوشیمیایی محیط فراهم می‌کند. هدف اصلی این پژوهش، تجزیه و تحلیل فرآیندهای دیاژنزی نظیر رشد بلور به صورت سیمان رو رشدی (Overgrowth)، سیلیسی شدن، همتاتی شدن، بازبلوری شدن (neomorphism) در قالب دولومیتی و فسفاتی شدن و تشکیل استیلولیت و شکستگی بوده که گویای ارتباط مستقیم با شرایط شیمیایی سیالات دیاژنتیکی و فاکتور فشار با تکیه بر داده‌های کانی‌شناسی است. نتایج حاصل از این مطالعات امکان شناسایی تغییرات کانی‌شناسی نظیر الگوهای مختلف لومینسانس در قالب زون‌بندی رشد بلورها در فرآیند سیمانی شدن، تفاوت در مورفولوژی و اندازه بلورهای کلسیت و شواهد بازبلوری شدن را فراهم نموده و نقش هر یک را در ارتباط با این رویداد مشخص می‌سازد. این مهم روندی مناسب را برای بازسازی یک تاریخچه دیاژنتیکی چندمرحله‌ای شامل دیاژنز دریایی اولیه، متئوریک و تدفینی را ارائه می‌دهد.



شکل ۱- A: نقشه زمین‌شناسی ناحیه مورد مطالعه (شهرابی، ۱۳۶۹)، با ترسیم مجدد. B: نقشه راه‌های دسترسی به منطقه مورد مطالعه.

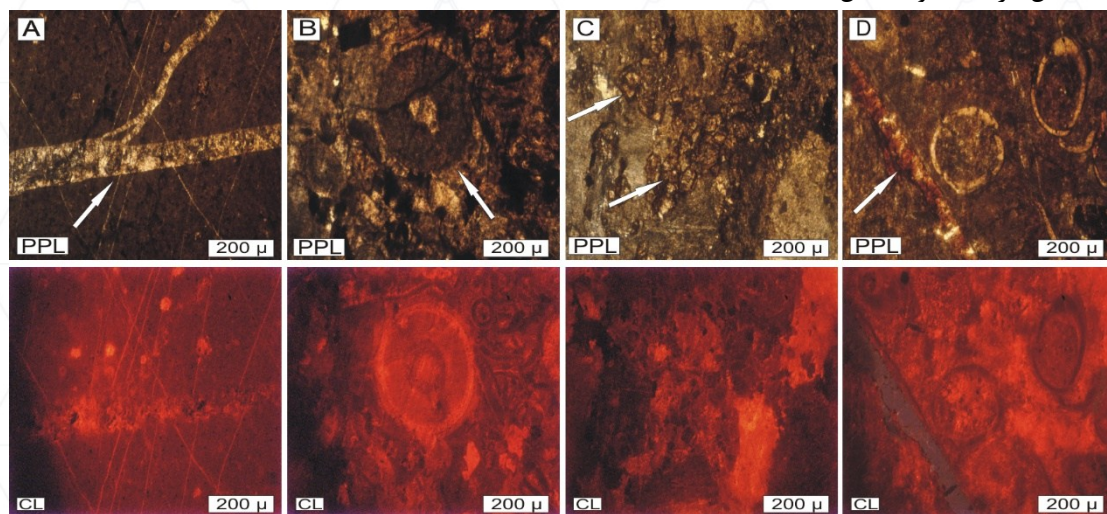
۲- مواد و روش‌ها

با توجه به مطالعات اولیه پژوهش و بر پایه‌ی بررسی نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه، برش میقان از سازند خوش بیلاق، به‌عنوان مناسب‌ترین رخنمون جهت انجام نمونه‌برداری انتخاب شد. در این رخنمون، ۲۱۵ نمونه‌ی دستی با فاصله نمونه‌برداری ۱ الی ۲ متر جمع‌آوری گرد. در طی فرآیند برداشت نمونه‌ها، خصوصیات فیزیکی رسوبات شامل رنگ، اندازه‌ی دانه و الگوی لایه‌بندی به‌طور دقیق مشاهده و ثبت گردید. عوامل و فاکتورهای دیاژنتیکی سبب شده است که این توالی‌های دونین خوش بیلاق به منظور مطالعات کانی‌شناسی، از درجه اهمیت بالایی برخوردار باشند. نمونه‌های کربناته به منظور بررسی‌های دقیق‌تر، به صورت مقطع نازک تهیه شدند. در راستای تکمیل داده‌ها، آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) با دستگاه LEO 1450 VP در دانشگاه فردوسی مشهد برای تهیه تصاویر با قدرت تفکیک بالا و تجزیه و تحلیل آن‌ها به منظور بررسی ریزساختار بلورها، مورفولوژی سیمان‌ها و شواهد بازبلوری شدن بیشتر بر روی نمونه‌های کربناته صورت گرفت. در ابتدا، ۳ قطعه از هر نمونه با ابعاد

۱×۱ سانتی‌متر به روش اولتراسونیک و با استفاده از حلال مناسب پاک‌سازی شدند تا آلودگی‌های سطحی حذف گردد. سپس نمونه‌ها تحت مطالعات کاندولومینسانس (CL) قرار گرفت. در این مطالعات، شدت و رنگ بندی لومینسانس در سیمان به عنوان شاخصی از تغییرات شیمی شبکه بلوری کلسیت و نسبت عناصر Mn/Fe و حضور عناصر فعال کننده تفسیر شد.

۳- بحث

بحث اصلی این پژوهش بر روی فرآیندهای دیاژنتیکی با تلفیق داده‌های CL و SEM می‌باشد. مطالعات انجام شده امکان تفکیک نسل‌های مختلف سیمان، تشخیص مراحل رشد بلور و بازسازی توالی دیاژنتیکی را فراهم می‌سازد. فشار حاصله در طی زمان، شکستگی‌ها و درزه‌هایی را ایجاد نموده است و نفوذ کانی‌های کلسیت اسپاری در قالب فرآیند سیمانی حاکی از نسل بعدی سیمان بوده و گواه تحمل و شرایط دیاژنتیکی برای این امر می‌باشد (شکل ۲A). در شناسایی شرایط دیاژنز و همچنین تفکیک محیط‌های دیاژنزی، فابریک و مورفولوژی سیمان نقش مهمی دارد. البته در محیط‌های دیاژنتیکی مختلف فابریک‌های واضحی از سیمان می‌تواند شکل بگیرد که ما به خوبی می‌توانیم آن را در فرآیند سیمان رورشدی مشاهده کنیم، که موید شرایط مورد بحث ما می‌باشد (شکل ۲B). دولومیتی شدن فرآیندی است که طی آن کلسیت (CaCO_3) یا آراگونیت در سنگ‌های کربناته با دولومیت ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) جایگزین می‌شود. این جایگزینی معمولاً در اثر نفوذ سیالات غنی از منیزیم در شرایط خاص فیزیکی و شیمیایی رخ می‌دهد و می‌تواند ساختار، بافت، تخلخل و خواص مخزنی سنگ را به شدت تغییر دهد (شکل ۲C). فرآیند فسفاتی شدن در سنگ‌های کربناته خوش ییلاق باعث شده که آلومک‌های فسیلی تحت شرایط دیاژنز به فسفات تبدیل گردیده شود (شکل ۲D).

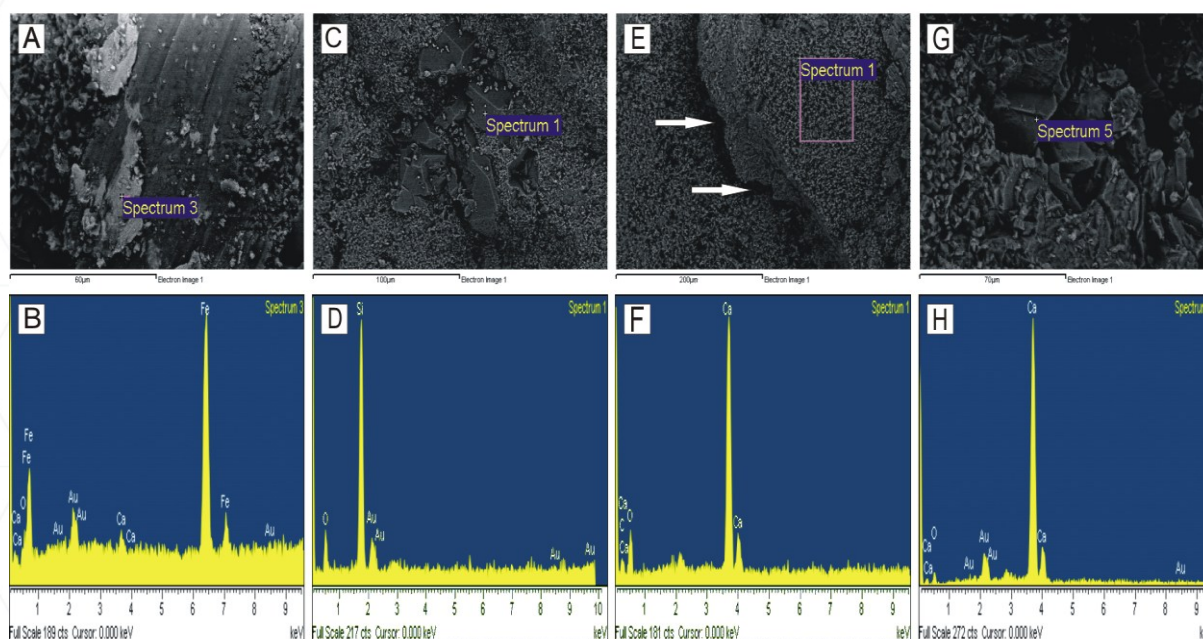


شکل ۲- تصاویر پتروگرافی و کاندولومینسانس (CL) نمونه‌های کربناته ناحیه مورد مطالعه: A: فرآیند دیاژنزی شکستگی حاوی بلور کلسیت. B: فرآیند دیاژنزی سیمان رورشدی. C: فرآیند دولومیتی شدن. D: فرآیند فسفاتی شدن.

در اطلاعات اخذ شده از تصاویر SEM، از تفاوت در ماتریکس کربنات‌ها، حاوی فشارهای حاصله و گویای شرایط ثانویه و فرآیند دیاژنزی هماتی و سیلیسی شدن، انحلال و تشکیل استیلولیت، و نومورفیزم پرده برداشته و آن را به نمایش گذاشته است. فرآیند هماتی شدن فرآیندی است که طی آن آهن محلول در آب‌های میان‌دانه‌ای در شرایط اکسیدان رسوب کرده و به صورت هماتیت (Fe_2O_3) در فضای بین‌دانه‌ای یا به عنوان جایگزین کانی‌های اولیه ظاهر می‌شود. این فرآیند باعث رنگ قرمز تا قهوه‌ای سنگ، افزایش سختی، و در برخی موارد کاهش تخلخل می‌شود (شکل ۳A، ۳B). فرآیند سیلیسی شدن فرآیندی دیاژنتیکی است که طی آن سیلیس (SiO_2) از محلول‌های میان‌دانه‌ای یا هیدروترمال در سنگ رسوب می‌کند و جایگزین مواد اولیه یا فضای بین‌دانه‌ای می‌شود (شکل ۳C، ۳D). فرآیند استیلولیت خطوط موج‌دار یا دندان‌های که نشان‌دهنده انحلال فشاری‌اند، معمولاً در سنگ‌های آهکی دیده می‌شوند. این فرآیند در بخش‌های عمیق تر و در مرحله مزوژنز و در ادامه فرآیند فشردگی

فیزیکی رخ می دهد. وجود استیلولیت بیانگر تأثیرگذاری فشردگی شیمیایی بر روی رسوبات مورد پژوهش به شکل تماس بین خرده های اسکلتی به صورت محدب-معر دیده می شود.

استیلولیت ها یکی از مهم ترین عوارض انحلال فشاری می باشند که به صورت مضرس و یا انحنادار با دامنه تغییرات کوچک و بزرگ به صورت ماکروسکوپی و میکروسکوپی شکل می گیرند (شکل ۳F، ۳E). فرآیند نئومورفیسم در سنگ های کربناته خوش ییلاق گویای شرایط دیگری از دیاژنز بوده که باعث از بین رفتن ساختمان داخلی پوسته های فسیلی از جنس آراگونیت (معمولا ریز بلور)، شده که حاصل این فرآیند بلورهای دانه درشت کلسیت جانشین آن ها می شود (شکل ۳G، ۳H).



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپی SEM از شواهد دیاژنز در سنگ های کربناته سازند خوش ییلاق در ناحیه مورد مطالعه:

A: تصاویر میکروسکوپی SEM از فرآیند دیاژنز هماتیته شدن. B: تصویر آنالیز EDX از نمونه مشخص شده در تصویر A.

C: تصاویر میکروسکوپی SEM از فرآیند دیاژنز سیلیسی شدن. D: تصویر آنالیز EDX از نمونه مشخص شده در تصویر C.

E: تصاویر میکروسکوپی SEM از فرآیند دیاژنز استیلولیت. F: تصویر آنالیز EDX از نمونه مشخص شده در تصویر E.

G: تصاویر میکروسکوپی SEM از فرآیند دیاژنز نئومورفیسم. H: تصویر آنالیز EDX از نمونه مشخص شده در تصویر G.

توالی پاراژنتیکی

توالی پاراژنتیکی به تقدم و تاخر رویدادهای دیاژنتیکی در سنگ ها نسبت به یکدیگر گفته می شود. فرآیندهای مختلف دیاژنزی در سه محیط ائوژنز، مزوژنز و تلوژنز و در اعماق و شرایط شیمیایی متفاوت بر روی نهشته ها تاثیر می گذارند (رستم پور و دیگران ۱۴۰۳)، که در (شکل ۴) قابل مشاهده نیز است.

دیاژنز دریایی اولیه (ائوژنز)

در تصاویر CL، سیمان های اولیه کلسیتی عمدتاً فاقد لومینسانس یا دارای لومینسانس ضعیف هستند که نشان دهنده نسبت بالای Fe و شرایط شیمیایی نسبتاً پایدار محیط دریایی است. در تصاویر SEM، این سیمان ها اغلب به صورت بلورهای ریزدانه مشاهده می شوند که بیانگر تبلور سریع در محیط های کم عمق دریایی است.

دیاژنز مزوژنز

در این مرحله، سیمان‌های کلسیتی با لومینسانس قوی‌تر و زون‌بندی منظم دیده می‌شوند. این زون‌بندی بازتاب‌دهنده رشد مرحله‌ای بلورها در اثر نوسانات شیمیایی سیالات متئوریک و تغییر شرایط $Eh-pH$ است. از دیدگاه بلورشناسی، افزایش اندازه بلورها و ظهور اشکال سیمان از جمله پدیده رو رشدی و نئومورفیسم نشان‌دهنده رشد تعادلی‌تر کلسیت در این مرحله است.

دیاژنز تلوزنز

فرآیند انحلال و پدیده استیلولیت و پرشدگی شکستگی‌ها توسط سیمان‌های لومینسانس‌دار، کاهش تخلخل اولیه و شواهد بازبلوری شدن گسترده در تصاویر SEM، همگی مؤید دیاژنز تدفینی هستند. در این مرحله، بازآرایی شبکه بلوری کلسیت در قالب فرآیند سیمانی شدن در پاسخ به دما و فشار بالاتر شرایط تدفینی پیشرفته و گردش سیالات دیاژنتیکی رخ داده است. این فرآیندها نقش مهمی در تغییر ویژگی‌های مخزنی (کاهش تخلخل و کاهش تراکم) سازند خوش‌ییلاق داشته‌اند.

روند دیاژنز			فرآیندهای دیاژنز	
				
تلوزنز	مزوژنز	ائوژنز		
	*****		دولومیتی شدن	
	*****		رو رشدی	سیمانی شدن
	*****	*****	نئومورفیسم	
	*****		استیلولیتی شدن	
**	*****	**	سیلیسی شدن	جانشینی
*****		*****	هماتیتی شدن	
		*****	فسفاتی شدن	
*****			شکستگی و پر شدگی	

شکل ۴- توالی پارازنتیکی سنگ‌های کربناته سازند خوش‌ییلاق ناحیه مورد مطالعه.

۴- نتیجه‌گیری

مطالعات کاتدولومینسانس و میکروسکوپ الکترونی ابزارهای موثری برای تشخیص نسل‌های مختلف سیمان و بازسازی شرایط دیاژنتیکی این سازند هستند. سنگ‌های کربناته سازند خوش‌ییلاق یک تاریخچه دیاژنتیکی چندمرحله‌ای را تجربه کرده‌اند که به‌وضوح در ریزساختار بلورها در تصویر SEM و الگوهای زون‌بندی کاتدولومینسانس در قالب فرآیند سیمانی شدن CL منعکس شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تلفیق مطالعات CL و SEM ابزار قدرتمندی برای تفسیر فرآیندهای بلورشناسی و کانی‌شناسی دیاژنز سنگ‌های کربناته است. این رویکرد می‌تواند در مطالعات مخازن کربناته و سایر سازندهای مشابه در ایران مورد استفاده قرار گیرد.

۵- تقدیر و تشکر

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه فردوسی مشهد در قالب طرح پژوهشی ۳/۶۳۳۴۹ انجام شده است.

۶- مراجع

شهرابی، م.، ۱۳۶۹، نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ گرگان، سازمن زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور تهران.
رستم پور، م.، خانه باد، م.، صباغ بجنانی، م.، ۱۴۰۳، تفسیر توالی پارازنتیکی سنگ‌های کربناته سازند آیتامیر در برش شوراب واقع در شرق حوضه کپه داغ. نهمین همایش ملی انجمن رسوب‌شناسی ایران، ژئوپارک جهانی طبس، ایران.

Aghanabati, M., 2004. *Geology of Iran (in Farsi)*. Tehran: Geological Survey of Iran.

Bozorgnia, F., 1973. Paleozoic foraminiferal biostratigraphy of Central and East Alborz Mountains, Iran. *National Iranian Oil Company, Geological Laboratories* 4: 1–185.

Wendt, J., Kaufmann, B., Belka, Z., Farsan, N., and Bavandpur, A.K., 2005. Devonian/Lower Carboniferous stratigraphy, facies patterns and palaeogeography of Iran. Part II. North and central Iran. *Acta Geologica Polonica* 55(1): 31–97.

Ranjbar, H., Ghaderi, A., Gholamalian, H., and Hairapetian, V., 2024. Middle Devonian-Early Carboniferous microscopic fish remains from Khoshyeilagh Formation, Mighan section, Eastern Alborz. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 34(1), 131,1-18.

Schmid, S., Worden, R.H., Fisher, Q.J., 2004. Diagenesis and reservoir quality of the Sherwood Sandstone (Triassic), Corrib Field, Slyne Basin, west of Ireland. *Marine and Petroleum Geology*, 21, 299– 315.