

فشردگی، شکستگی و سیمانی شدن، رخدادهای اصلی دیاژنتیکی: مثالی از ماسه‌سنگ‌های بالایی سازند لالون، منطقه بینالود، ایران

مهدی رضا پورسلطانی

دانشیار گروه زمین شناسی، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

پست الکترونیک: poursoltani1852@mshdiau.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۴/۹/۱۷

تاریخ دریافت: ۹۴/۳/۳

چکیده

توالی رسوبی سیلیسی آواری سازند لالون (کامبرین پیشین) با ضخامت ۷۰ متر، در منطقه چنار با یک سطح گسلی بر روی سازند دولومیتی سلطانیه (کامبرین پیشین) قرار گرفته است. این توالی توسط رسوبات آواری دانه درشت انوسن به طور ناپیوسته پوشیده شده است. طی مطالعات صحرایی، دو واحد اصلی شیل در زیر و ماسه‌سنگ در بالای توالی شناسایی شده است. به طور عمده، ماسه‌سنگ‌ها از نظر کانی شناسی رسیده بوده و دارای بلوغ ترکیبی بالایی هستند و شامل کوارتز آرنایت، ساب آرکوز و ساب لیت آرنایت می‌باشند. بر اساس مطالعات پتروگرافی انجام شده فشردگی، شکستگی و سیمانی شدن (به طور عمده سیلیسی) مهم‌ترین رخدادهای دیاژنتیکی این رخساره‌های ماسه‌سنگی محسوب می‌گردند. بنابر رخدادهای دیاژنتیکی شناسایی شده، تاریخچه دیاژنتیکی ماسه‌سنگ‌های لالون در منطقه چنار شامل سه مرحله دیاژنز اولیه، دفنی عمیق و انتهایی است.

واژه‌های کلیدی: دیاژنز؛ سازند لالون؛ کامبرین پیشین؛ بینالود.

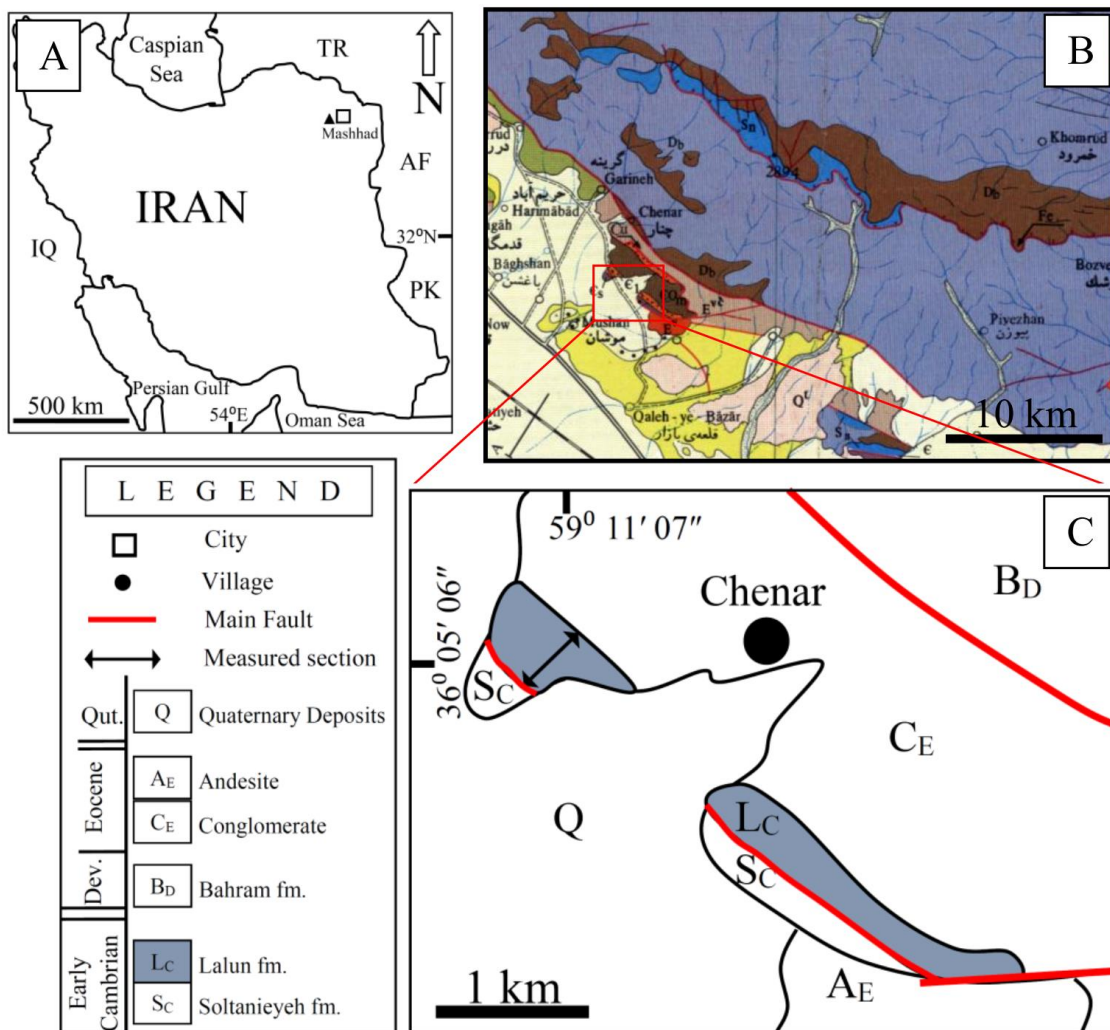
مقدمه

نظریات متفاوتی در مورد پهنه ساختاری بینالود ارائه شده است. Stocklin (1968) این پهنه را جزو واحد البرز می‌داند، در حالی که نبوی (۱۳۵۵) بینالود را به عنوان یک واحد تدریجی بین البرز و ایران مرکزی در نظر گرفته است. مرز جنوبی آن گسل میامی یا گسل شاهرود و حد شمال غربی آن را گسل سمنان می‌دانند. گسترش واقعی این پهنه بین نواحی شمال سبزوار و نیشابور تا شمال مشهد است. پهنه بینالود عمدتاً شامل مجموعه‌هایی از سنگ‌های آذرین و دگرگونی به ویژه در غرب و جنوب - غرب مشهد است که در افغانستان نیز قابل ردیابی هستند. بنابراین حد شرقی این پهنه به ادامه هندوکوش غربی محدود می‌گردد

منطقه مورد مطالعه در پهنه ساختاری بینالود واقع شده است. رشته کوه بینالود با روند تقریبی شمال غربی - جنوب شرقی بین ورقه مستحکم توران و خرد قاره ایران مرکزی قرار گرفته و دربردارنده توالی از ردیف رسوبات پالئوزوئیک، مزوزوئیک و سنوزوئیک می‌باشد (آقانباتی، ۱۳۸۳) که از دیدگاه ژئودینامیکی در لبه شمال شرقی قطعه لیتوسفری ایران قرار گرفته‌اند. ارتفاعات بینالود، نواری چین خورده و گسل خورده از نوع نازک پوسته‌ای است که به دنبال برخورد میان قطعات لیتوسفری ایران و توران در حاشیه شمال شرق ایران تشکیل شده است (Alavi, 1991; 1992). به طور کلی از نظر تقسیم بندی زمین شناسی ایران،

رسوبات آواری درشت دانه ائوسن به طور هم‌شیب و ناپیوسته پوشیده شده است (شکل ۲A,B). این توالی رسوبی از نظر جایگاه چینه‌ای و سنگ‌شناختی با سازند لالون در دیگر نواحی مشابهت دارد (شهرابی و داودزاده، ۱۳۶۵). بخش زیرین این توالی به طور عمده از شیل‌های قرمز رنگ و بخش بالایی آن از رسوبات ماسه‌سنگی غنی از کوارتز تشکیل شده (Poursoltani *et al.*, 2014) که گاهی به ماسه‌سنگ درشت دانه تغییر رخساره می‌دهند. بخش شیلی این توالی هم‌ارز شیل میانی و بخش ماسه‌سنگی هم‌ارز ماسه‌سنگ بالایی سازند لالون در دیگر مناطق است.

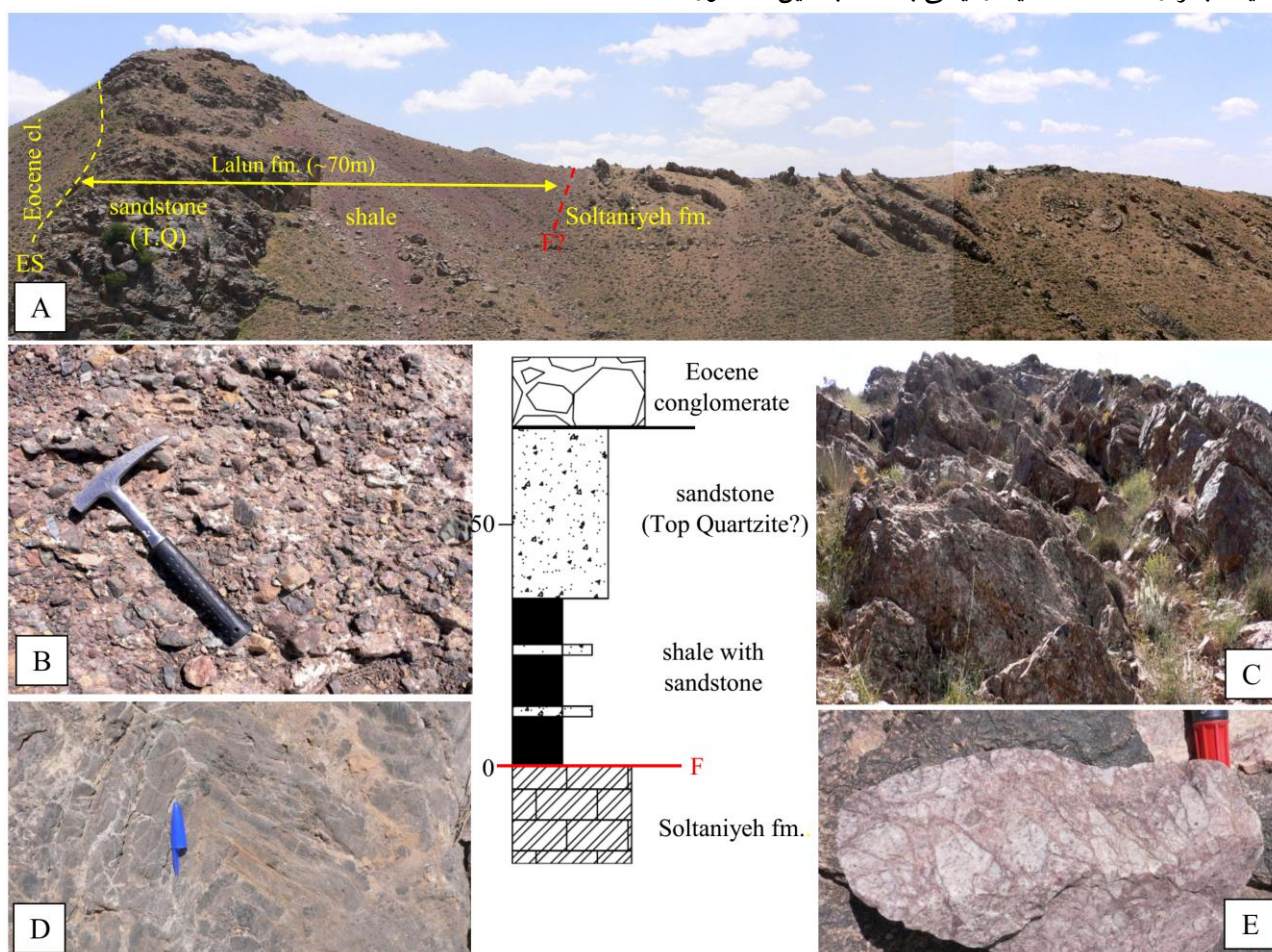
(درویش زاده، ۱۳۸۰). رسوبات سیلیسی آواری مورد مطالعه در این پژوهش در پهنه بینالود و در مجاورت روستای چنار، جنوب غرب مشهد، با سن کامبرین پیشین و با موقعیت جغرافیایی $36^{\circ} 05' 06''$ عرض شمالی و $59^{\circ} 11' 07''$ طول شرقی و 36° عرض شمالی رخنمون دارند (شکل ۱). این توالی رسوبی با ضخامت تقریبی ۷۰ متر، از دو بخش شیل زیرین و ماسه‌سنگ بالایی تشکیل شده است (شکل ۲A,C)، گرچه در برخی قسمت‌ها برش حاصل از تأثیرات تکتونیکی نیز شناسایی شده است (شکل ۲E). این توالی به طور هم‌شیب با یک مرز گسلی بر روی دولومیت‌های سازند سلطانیه قرار گرفته (شکل ۲D) و خود توسط



شکل ۱: (A) موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه (مثلث توپر)، (B) نقشه زمین‌شناسی منطقه (مستطیل قرمز)، برگرفته از نقشه ۱:۲۵۰,۰۰۰ مشهد (شهرابی و داود زاده، ۱۳۶۵)، (C) نقشه زمین‌شناسی منطقه در مقیاس بزرگتر.

رخدادهای دیاژنتیکی در رخساره‌های ماسه‌سنگی این توالی در منطقه مورد مطالعه که شامل فشردگی، شکستگی و سیمانی شدن است مورد تفسیر و بررسی قرار گرفته‌اند. گفتنی است از میان سیمان‌های شناسایی شده، سیمان سیلیسی که بیشترین فراوانی را دارد با جزئیات بیشتری توصیف و مورد بحث قرار خواهد گرفت.

از آن جا که در بیشتر نقاط دنیا رسوبات ماسه‌سنگی کامبرین به عنوان یکی از سنگ مخزن‌های اصلی مواد هیدروکربوری محسوب می‌گردند (برای مثال: Abdel Wahab, 1998؛ Eren & Kadir, 2013) و با توجه به گسترش سازند لالون در نقاط مختلف ایران، این سازند می‌تواند نقطه عطفی جهت مطالعات دقیق سنگ‌شناسی با تأکید بر رخدادهای دیاژنتیکی باشد. بدین منظور



شکل ۲: برش چینه‌شناسی سازند لالون در منطقه چنار (اعداد بر حسب متر می‌باشند): (A) نمای کلی از سازندهای سلطانیه و لالون که با یکدیگر مرز گسلی دارند (دید به شمال شرق). (B) کنگلومرای ائوسن از نوع ارتوکنگلومرا پلی‌میکتیک؛ (C) نمایی از ماسه‌سنگ‌های سازند لالون (معادل کوارتزیت بالایی)؛ (D) چین‌خوردگی کوچک مقیاس در دولومیت‌های سازند سلطانیه در محل برخورد آن با سازند لالون (مقیاس ۳ سانتی‌متر)؛ (E) نمونه برشی شده از نوع مونومیکتیک که در اثر حرکات تکتونیکی حاصل شده است.

روش مطالعه

مقطع نازک جهت مطالعات سنگ‌شناسی تهیه شده‌اند. در این مطالعه تعداد ۲۰ مقطع نازک به روش نقطه‌ای (Gazzi, 1966) (۵۰۰ نقطه در هر مقطع) با میکروسکپ پلاریزان Nikon E400 و نرم‌افزار Petrog شمارش شده و

به منظور مطالعات سنگ‌شناسی بر روی سازند لالون با ضخامت ۷۰ متر در منطقه چنار، تعداد ۶۷ نمونه ماسه‌سنگی به طور سیستماتیک برداشت شده است که از آنها تعداد ۵۰

مطالعات پتروگرافی

طی مطالعات پتروگرافی انجام شده بر روی ماسه‌سنگ‌های بالایی سازند لالون در منطقه چنار، اجزای مختلف شامل قطعات تشکیل دهنده (کوارتز، فلدسپات، خرده سنگ‌ها و درصد کمی کانی‌های فرعی)، سیمان (به طور عمده سیلیسی، کربناته، اکسید آهن، رس) و میزان کمی ماتریکس شناسایی شده‌اند (جدول ۱، شکل ۳B). علاوه بر این رخساره‌ها از نظر فابریک و بلوغ ترکیبی نیز مورد توجه قرار گرفته‌اند.

نام‌گذاری ماسه‌سنگ‌ها نیز بر مبنای طبقه‌بندی Folk (1980) صورت گرفته است. همچنین با استفاده از تقسیم‌بندی Boggs (1992) جهت نام‌گذاری رسوبات کنگلومرایی کمک گرفته شده است. جهت شناسایی شکستگی‌ها ۸ عدد از نمونه‌های ماسه‌سنگی با میکروسکپ کاتدولومینسانس مدل HC4-LM، در شرایط خلأ و همچنین تعداد ۴ نمونه جهت آنالیزهای نقطه‌ای با میکروسکپ الکترونی مدل LEO 450vp با ولتاژ 30kv مجهز به دستگاه BSE متصل به SEM در دانشگاه سنت مریس کانادا مطالعه گردیده است.

جدول ۱: اجزای تشکیل دهنده ماسه‌سنگ‌های سازند لالون در منطقه چنار بر حسب درصد؛ در جدول زیر فقط اجزای متشکله (دانه‌های اصلی) نمونه‌هایی که به روش شمارش نقطه‌ای مطالعه شده‌اند آورده شده است. Qm: کوارتز تک بلوری، Qp: کوارتز چند بلوری، K-F: پتاسیم فلدسپات، Pl: پلاژیوکلاز، VRF: خرده‌سنگ آتشفشانی، MRF: خرده‌سنگ دگرگونی، SRF: خرده‌سنگ رسوبی، CH: چرت، F: فلدسپات، RF: خرده‌سنگ.

Sample	Qm	Qp	K-F	Pl	VRF	MRF	SRF	TOTAL	Compositional maturity		
									Q+CH	F+RF	Q+CH/F+RF
C1	86.0	4.9	5.0	1.2	0.0	2.9	0.0	100.0	90.9	9.1	9.9
C4	78.5	3.3	5.9	2.1	0.0	9.4	0.8	100.0	81.8	18.2	4.5
C7	82.6	14.2	1.9	0.2	0.0	1.1	0.0	100.0	96.8	3.2	30.2
C11	72.1	6.1	10.8	1.2	0.0	9.8	0.0	100.0	78.2	21.8	3.6
C16	89.8	6.1	2.2	0.0	0.0	1.0	0.0	100.0	95.9	4.1	23.4
C21	64.3	12.0	12.2	0.8	0.0	9.1	1.6	100.0	76.3	23.7	3.2
C24	82.4	6.9	8.5	0.0	0.0	2.2	0.0	100.0	89.3	10.7	8.3
C27	73.7	11.5	3.9	1.0	0.5	9.4	0.0	100.0	85.2	14.8	5.8
C30	64.5	15.7	7.1	0.6	0.0	11.2	0.9	100.0	80.2	19.8	4
C32	91.1	5.6	1.4	0.0	0.0	1.9	0.0	100.0	96.7	3.3	29.3
C36	65.1	13.2	15.0	0.4	0.0	5.5	0.8	100.0	78.3	21.7	3.6
C41	86.7	10.6	2.0	0.0	0.0	0.7	0.0	100.0	97.3	2.7	36
C45	69.8	7.4	8.7	1.1	0.0	12.4	0.8	100.0	77.2	22.8	3.4
C49	76.4	6.1	9.3	1.5	0.0	6.7	0.0	100.0	82.5	17.5	4.7
C52	81.4	4.7	11.3	0.8	0.0	1.8	0.0	100.0	86.1	13.9	6.2
C55	87.5	8.9	2.0	0.0	0.0	1.6	0.0	100.0	96.4	3.6	26.8
C59	73.4	9.1	6.2	1.2	0.0	9.4	0.7	100.0	82.5	17.5	4.7
C62	87.4	8.5	2.4	3.0	0.0	1.7	0.0	100.0	95.9	4.1	23.4
C65	89.3	7.7	0.9	0.0	0.0	2.1	0.0	100.0	97	3	32.3
C67	90.2	6.3	1.1	0.0	0.0	2.4	0.0	100.0	96.5	3.5	27.6
Average	79.61	8.44	5.89	0.75	0.02	5.11	0.28	---	88.05	11.95	7.4

طولی، محدب - مقعر و مضرس شده، که مرزهای محدب - مقعر و مضرس بیشترین نوع آن است (شکل ۴A, D). از دیگر دانه‌های اصلی شناسایی شده فلدسپات بوده که از این میان بیشتر دانه‌ها از نوع فلدسپات پتاسیم دار بوده، اما میزان حضور فلدسپات‌ها در این رخساره‌ها چشمگیر نمی‌باشد. خرده‌سنگ‌های شناسایی شده نسبت به کوارتز و

دانه‌های کوارتز به طور عمده از نوع تک بلوری بوده، گرچه در برخی نمونه‌ها انواع چند بلوری نسبت بالایی دارند (جدول ۱، شکل ۴). فشردگی باعث ادغام دانه‌ها از جمله دانه‌های کوارتز در یکدیگر شده و در نهایت تغییر شکل دانه‌های اولیه را سبب شده است. همچنین میزان فشردگی، باعث تنوع تماس دانه‌ها از نوع تماس نقطه‌ای،

سیمان‌های شناسایی شده در ماسه‌سنگ‌های سازند لالون متنوع است. از عمده سیمان‌های موجود سیلیس، اکسید آهن، کربنات و به ندرت رس است که از این میان سیلیس بیشترین فراوانی را داراست (شکل‌های ۴ تا ۶).

بنابر نوع دانه‌ها بیشتر ماسه‌سنگ‌های سازند لالون، بر مبنای طبقه‌بندی Folk (1980) از نوع کوارتزآرنایت (شکل ۴A,C)، ساب‌آرکوز (شکل ۴D) و ساب‌لیتارنایت می‌باشند (شکل ۳A).

رخدادهای دیاژنتیکی

رسوبات ماسه‌سنگی بالایی سازند لالون در منطقه چنار، تحت تأثیر عوامل فیزیکی و شیمیایی قرار گرفته به طوری که تأثیر عوامل فیزیکی، شامل فشارهای تکتونیکی و وزن رسوبات، باعث تغییرات بافتی سنگ و ایجاد رخدادهای دیاژنتیکی نظیر فشرده‌گی و شکستگی گردیده است. این رسوبات نیز تحت تأثیر واکنش‌های شیمیایی قرار گرفته، که رخدادهای دیاژنتیکی همانند دگرسانی کانی‌های ناپایدار، انحلال فشاری، سیمانی شدن و انحلال را به دنبال داشته است. در این نوشتار، فقط به توصیف رخدادهای فشرده‌گی، شکستگی و سیمانی شدن پرداخته شده و سپس هر یک از رخدادهای دیاژنتیکی مذکور تفسیر شده‌اند.

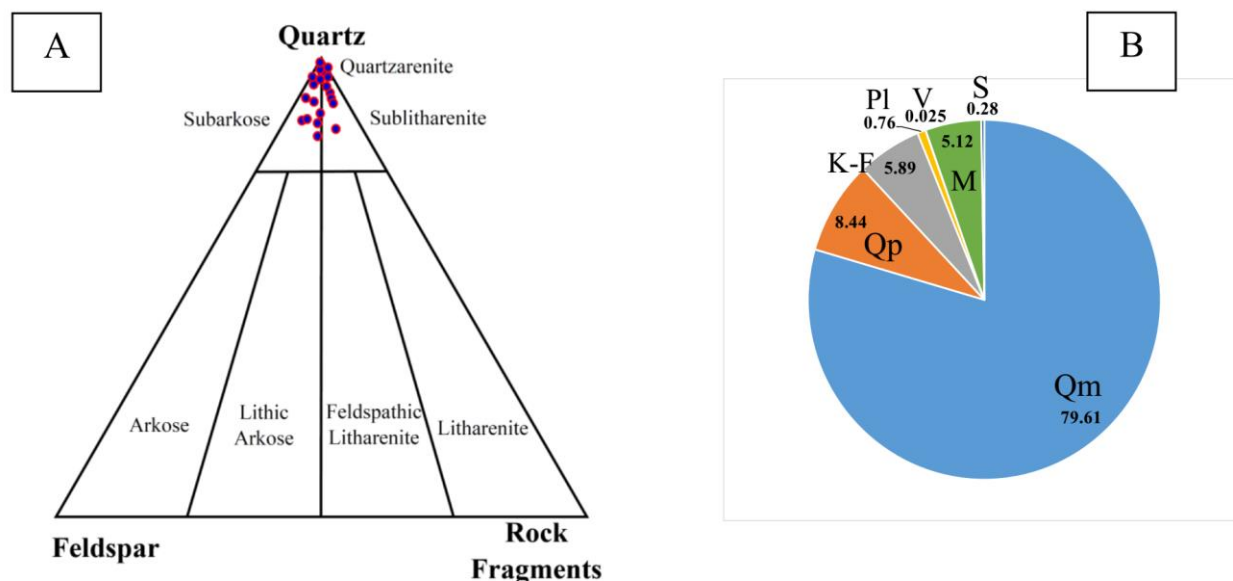
سیمانی شدن

سیمان‌های شناسایی شده در ماسه‌سنگ‌های لالون به ترتیب فراوانی، شامل سیلیس، کربنات، اکسید آهن و به ندرت کانی‌های رسی است که پرکننده حفرات و شکستگی‌ها هستند. در این مبحث به طور عمده بر سیمان سیلیسی به عنوان فراوان‌ترین سیمان تأکید نموده و دیگر سیمان‌های موجود فقط مورد اشاره قرار می‌گیرند.

سیلیس به عنوان فراوان‌ترین سیمان در ماسه‌سنگ‌های سازند لالون، دارای میانگین ۷۶ درصد بوده، اما در برخی نمونه‌ها تا ۹۳ درصد از کل سیمان موجود را شامل

فلسپات درصد کمتری دارند. بیشتر خرده‌سنگ‌های شناسایی شده از نوع دگرگونی (کوارتزیت)، رسوبی (ماسه‌سنگ) و به ندرت آذرین هستند. اندازه دانه‌ها در ماسه‌سنگ‌ها متغیر بوده و از خیلی ریز تا خیلی دانه‌درشت تغییر می‌کنند، اما عمده آن‌ها دانه متوسط و دانه ریزند؛ گرچه برخی از ماسه‌سنگ‌ها دارای دانه‌بندی درشت و خیلی دانه‌درشت نیز می‌باشند که درصد بالایی را شامل نمی‌شوند. در برخی نمونه‌ها که تحت تأثیر تکتونیک قرار گرفته‌اند، درزه‌های حاصل، از دانه‌های شکسته شده ریز تا خیلی ریز، زاویه‌دار با جورشدگی ضعیف، پر شده که نمی‌توان آن را جزو فابریک اصلی محسوب نمود (شکل ۴C). بیوتیت و مسکویت نیز از کانی‌های فرعی عمده در این رخساره هستند که در برخی نمونه‌ها به شدت دگرسان شده‌اند. کانی‌های سنگین شناسایی شده شامل مگنتیت، ایلمنیت و زیرکان بوده که زیرکان از فراوانی بیشتری برخوردار است (شکل ۶A,B).

بسیاری از دانه‌ها دارای گردشدگی خوب تا کمی زاویه‌دار هستند که در بسیاری از رخساره‌ها، عامل فشرده‌گی و شکستگی باعث کاهش گردشدگی دانه‌ها شده است. جورشدگی دانه‌ها نیز از ضعیف تا خوب تغییر می‌کند (شکل ۴A). میزان ماتریکس نیز در ماسه‌سنگ‌های سازند لالون متغیر بوده، به طوری که بسیاری از نمونه‌ها فاقد ماتریکس بوده، اما رخساره‌های معدودی نیز مقدار ناچیزی ماتریکس دارند. در میان رخساره‌های شناسایی شده، بیشتر ماسه‌سنگ‌ها دارای بلوغ بافتی ساب‌مچور تا مچور می‌باشند. ماسه‌سنگ‌های مورد مطالعه دارای بلوغ ترکیبی با میانگین ۷/۴ بوده (جدول ۱) که بر اساس نسبت دانه‌های پایدار (کوارتز و چرت) به دانه‌های ناپایدار (فلسپات و خرده‌سنگ‌ها) (Tucker, 2001) اندازه‌گیری شده است و نشان دهنده بلوغ ترکیبی نسبتاً بالایی برای ماسه‌سنگ‌های مورد مطالعه می‌باشد.



شکل ۳: A) انواع ماسه‌سنگ‌های لالون در منطقه چنار بر مبنای تقسیم‌بندی Folk (1980) B) میانگین درصد دانه‌های اصلی تشکیل دهنده ماسه سنگ‌ها با توجه به جدول ۱؛ Qm: کوارتز تک بلوری، Qp: کوارتز چند بلوری، K-F: پتاسیم فلسپات، Pl: پلاژیوکلاز، V: خرده‌سنگ آتشفشانی، M: خرده‌سنگ دگرگونی، S: خرده‌سنگ رسوبی.

آنالیز نقطه‌ای که بر روی ماسه‌سنگ‌های سازند لالون در منطقه چنار انجام شده، وجود کانی رسی کائولن را تأیید می‌کند که در برخی رخساره‌ها پرکننده درزه‌ها است (شکل ۶C).

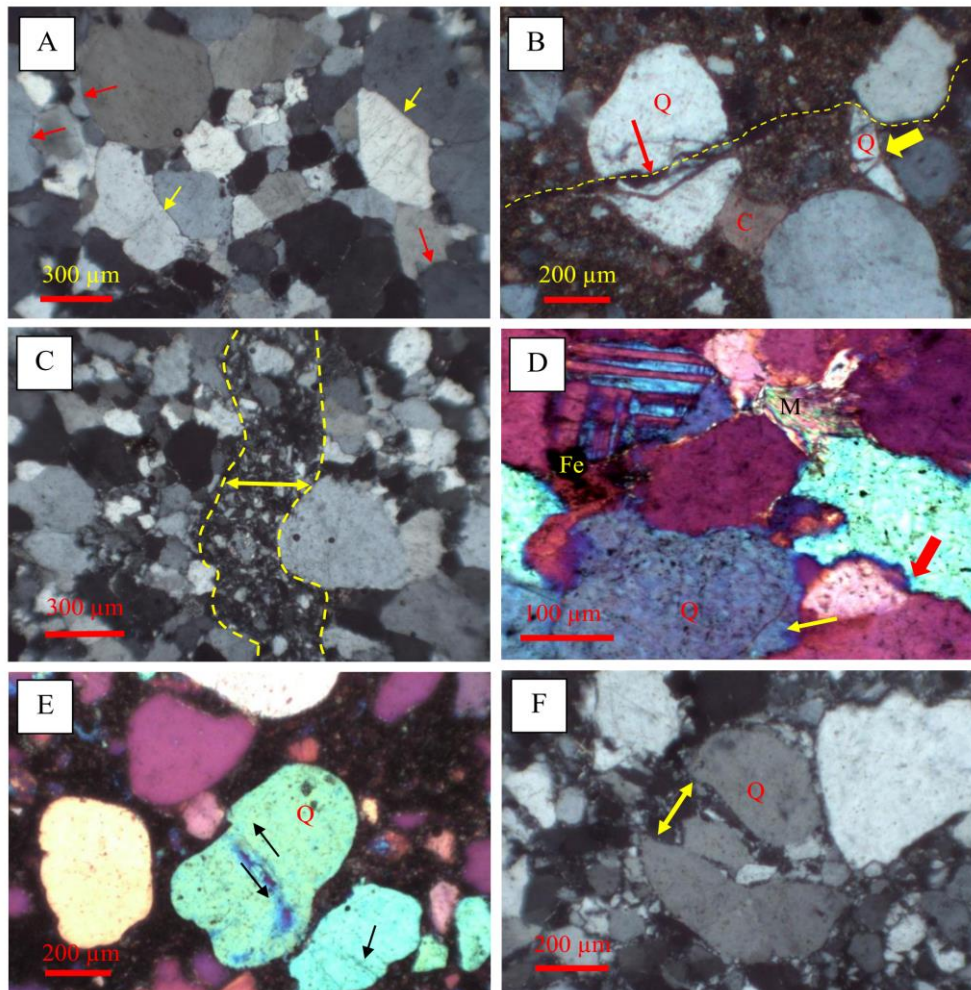
فشردگی

فشردگی از جمله رخدادهای دیاژنتیکی است که در بیشتر رخساره‌های رسوبی قابل شناسایی است و بنابر میزان وقوع آن می‌توان مراحل دیاژنز را تا حدی تفسیر نمود. بر اساس نتایج حاصل از مطالعات انجام شده بر روی رخساره‌های سازند لالون، فشردگی به صورت مکانیکی و شیمیایی، یکی از رخدادهای اصلی مؤثر بر این ماسه‌سنگ‌ها در منطقه چنار است. در فشارهای مکانیکی وارد شده، دانه‌های کوارتز، در یکدیگر فرورفته‌اند. این فشردگی سبب ایجاد تماس‌های نقطه به نقطه، طولی، محدب - مقعر و مضرس گردیده است. از این میان تماس محدب - مقعر و مضرس که نشانگر مراحل پیشرفته‌ای از فشردگی بوده، از دیگر تماس‌ها بیشتر است (شکل ۴A, D)، اما در مقابل، دانه‌های قابل انعطاف همانند میکا در اثر فشردگی، شکستگی کمتری

می‌گردد. این نوع سیمان به طور عمده به سه صورت رورشدی (شکل ۴D)، پرکننده حفرات بین دانه‌ای (شکل ۴، ۵ و ۷) و میکرو کریستالین پرکننده برخی از درزه‌ها (شکل ۵C) ظاهر شده است.

سیمان کربناته با درصد کم در برخی نمونه‌ها به صورت پرکننده حفرات بین دانه‌ای نهشته شده گرچه در بسیاری از نمونه‌ها شناسایی نشده است (شکل ۴B). ترکیبات اکسید آهن نیز یکی از سیمان‌های شناسایی شده در ماسه‌سنگ‌های سازند لالون است. این سیمان پرکننده فضای خالی بین دانه‌ها (شکل ۴D، ۷A) و درزه‌ها است (شکل ۵A و ۷B) و حضور آن باعث رنگ قرمز این ماسه‌سنگ‌ها در منطقه گردیده است. اکسیدهای آهن موجود به طور عمده شامل هماتیت و مگنتیت بوده که کانی مگنتیت در بعضی رخساره‌ها به صورت بلورهای بی‌شکل ظاهر شده‌اند (شکل ۷A).

در رخساره‌های ماسه‌سنگی سازند لالون، سیمان رسی نسبت به دیگر انواع سیمان‌ها فراوانی کمتری داشته به طوری که برخی از رخساره‌ها فاقد این نوع سیمان است.



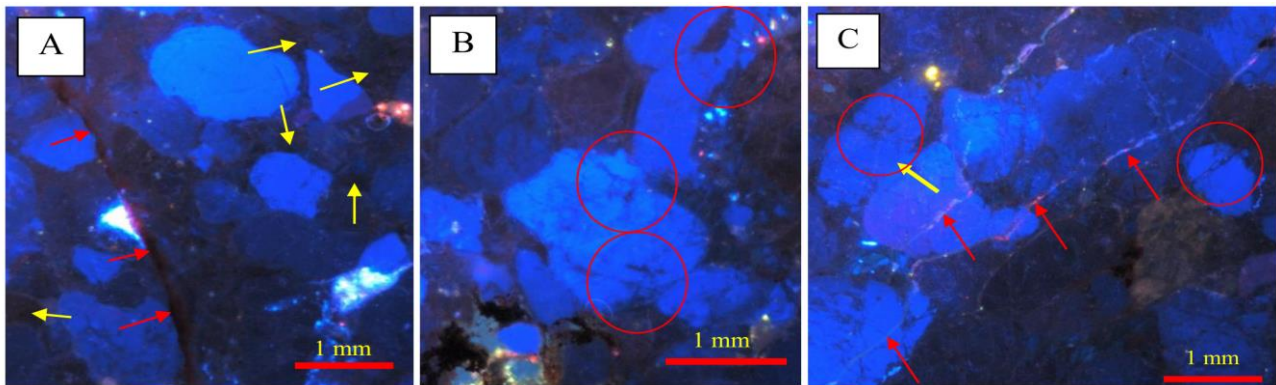
شکل ۴: A) ماسه‌سنگ از نوع کوارتز آرنایت دارای با جورشدگی نسبتاً ضعیف؛ در این ماسه‌سنگ تماس‌های طولی (پیکان‌های زرد) و محدب - مقعر (پیکان‌های قرمز) به فراوانی تشکیل شده است. B) شکستگی دانه کوارتز در اثر حرکات تکتونیکی (پیکان قرمز)؛ خط‌چین مسیر درزه حاصل در طول مقطع را نشان می‌دهد. پیکان زرد جهت فشار وارده از طرف دانه‌های کوارتز مجاور را نشان می‌دهد که باعث شکستگی دانه کوارتز شده است (شکستگی حاصل از فشردگی). سیمان کربناته (C قرمز) نیز به میزان کم تشکیل شده است. C) خطوط منقطع درزه حاصل از شکستگی را نشان می‌دهد که با میکروپرش پر شده است. D) ماسه‌سنگ از نوع ساب آرکوز؛ پیکان زرد سیمان سیلیسی رورشدی را نشان می‌دهد. همچنین سیمان اکسید آهن (Fe) به طور موضعی تشکیل شده است. پیکان قرمز تماس مضرس حاصل از فشردگی بالا را نشان می‌دهد. در این تصویر میکا از نوع مسکویت (M) که تغییر شکل داده، مشهود است. E) دانه کوارتز که در اثر حرکات تکتونیکی شکسته شده است. پیکان‌ها جهت جابه‌جایی را نشان می‌دهند. F) شکستگی دانه کوارتز که در اثر حرکات تکتونیکی باز شده و شکل برشی به خود گرفته است. پیکان میزان باز شدگی دانه کوارتز را نشان می‌دهد (تصاویر D و E با استفاده از تیغه λ تهیه شده‌اند).

ترک‌هایی ایجاد شده که بسیاری از این شکستگی‌ها توسط سیمان پر شده‌اند. در نمونه‌های مورد مطالعه برخی از شکستگی‌ها با میکروسکپ پلاریزان شناسایی شده، اما بسیاری از این شکستگی‌ها با میکروسکپ پلاریزان قابل رؤیت نبوده که توسط میکروسکپ کاتدولومینسانس و میکروسکپ الکترونی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. لذا بر اساس این مطالعات دو نوع شکستگی شناسایی و معرفی می‌گردند:

داشته و فقط تغییر شکل پیدا نموده‌اند (برای مثال: Kim & Lee, 2003; McBride *et al.*, 1987). در شکل ۴D، مسکویت در اثر فشار تغییر شکل داده است.

شکستگی

شکستگی یکی از رخدادهای دیاژنتیکی بوده که در مراحل مختلف دیاژنز رخ می‌دهد (Dickinson & Milliken, 1995; Zhang *et al.*, 2013). در رخساره‌های ماسه‌سنگی بالایی سازند لالون، به دلیل فشارهای وارده، درزه و



شکل ۵: (A) فضای بین دانه‌ها که با سیمان سیلیسی پر شده است (پیکان‌های زرد) و پر شدگی درزه موجود با اکسید آهن (پیکان قرمز); (B) دایره‌های قرمز درزه‌های حاصل از فشردگی دانه‌ها که در محل تماس دانه‌ها ایجاد شده را نشان می‌دهند. (C) پیکان‌های قرمز درزه‌های حاصل از فشارهای حاصل از فشردگی دانه‌ها که با سیمان سیلیسی میکروکریستالین پر شده است را نشان می‌دهند. درزه‌های حاصل از فشردگی دانه به وسیله دایره‌های قرمز نشان داده شده است. پیکان زرد جهت فشار وارده را مشخص نموده است (تصاویر توسط میکروسکپی کاتدولومینسانس تهیه شده است).

۴C). برخی از دانه‌ها در اثر حرکات تکتونیکی، شکستگی چرخشی (بازشدگی) پیدا نموده‌اند که حاکی از جهت نیروهای وارد شده می‌باشد (شکل ۴F). بیشتر این شکستگی‌ها توسط میکروبرش پر شده‌اند. شکل‌های ۴، ۵ و ۷ شکستگی‌های موجود در رخساره‌های ماسه‌سنگی مورد مطالعه را نشان می‌دهد که در اثر تکتونیک ایجاد شده که توسط سیمان‌های مختلف پر شده‌اند.

بحث

سیمانی شدن

سیمانی شدن از رخداد‌های مهمی است که به دلیل تنوع و تفاوت در شرایط تشکیل از جمله ترکیب، زمان و دما می‌توان تا حد زیادی مراحل دیاژنز را بر مبنای زمان و شرایط تشکیل آن تفسیر نمود.

بنابر نتایج حاصل از مطالعات انجام شده بر روی رخساره‌های ماسه‌سنگی سازند لالون در منطقه چنار، سیمان سیلیسی به عنوان یکی از رخداد‌های اصلی دیاژنتیکی محسوب می‌گردد که به صورت‌های مختلف (پرکننده حفرات، رورشدی و میکروکریستالین) شناسایی شده است. به طور معمول عوامل اصلی وجود سیال اشباع از یون سلیس، زمان طولانی، دمای بالا و فضای مناسب،

الف) شکستگی حاصل از فشارهای وارده از وزن رسوبات که دانه‌های مقاوم مانند کوارتز، فلدسپات، زیرکان و مگنتیت در یکدیگر فرو رفته و بسیاری از آن‌ها شکسته شده‌اند (پورسلطانی و قطبی راوندی، ۱۳۹۳). در شکل‌های ۴B، ۵ و ۷ دانه‌های کوارتز در اثر فشار وارده از طرف دانه‌های دیگر شکسته شده‌اند. در برخی دانه‌ها شکستگی به صورت شعاعی در داخل دانه پخش شده است (شکل ۷B). همچنین در برخی دانه‌ها شکستگی‌های به وجود آمده شکل چند وجهی دارند. شکل ۶ نشانگر شکسته شدن دانه‌های مگنتیت و زیرکان بوده که در اثر شکستگی حالت بازشدگی به صورت چرخشی در آن‌ها پدید آمده است. برخلاف دانه‌های مقاوم، دانه‌های قابل انعطاف کمتر شکسته شده‌اند. همه درز و ترک‌های ایجاد شده با سیمان سیلیسی و برخی با سیمان رسی پر شده‌اند (شکل ۶C).

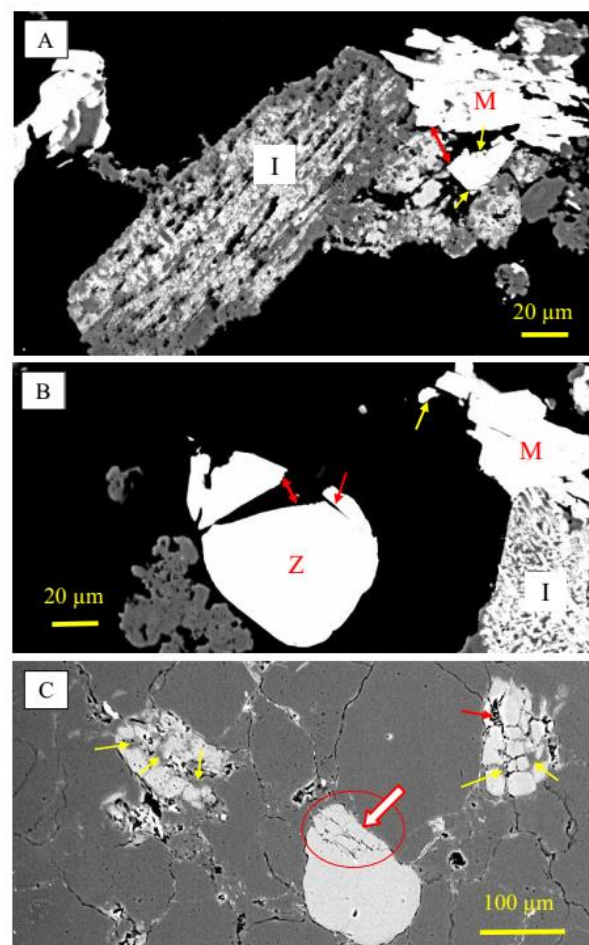
ب) نوع دیگر شکستگی شناسایی شده در این رخساره‌ها، شکستگی‌هایی است که علاوه بر شکستگی دانه‌ها در سیمان سنگ نیز قابل تعقیب است و بیشتر حاصل تأثیرات تکتونیکی می‌باشد (Friis *et al.*, 2010). تماس نداشتن دانه‌های شکسته شده با دیگر دانه‌ها که بخشی از دانه جابه‌جا شده (شکل ۴E) و همچنین وجود میکروبرش در محل شکستگی دلیلی بر تأثیرات تکتونیکی است (شکل

Zhang *et al.*, 2008؛ Kim & Lee, 2003)؛ Lander *et al.*, 2012)، اما به طور معمول رشد بلور کوارتز از مرحله دیاژنز اولیه شروع شده که با افزایش میزان سیلیس و دما، در مرحله دیاژنز دفنی عمیق کامل تر می‌گردد (McBride, 1989). بنابراین حضور این نوع سیمان در رخساره‌های مورد مطالعه مؤید وجود شرایط تشکیل سیمان سیلیسی به گونه‌های مختلف بوده که در طی مراحل دیاژنز به خصوص دفنی عمیق اتفاق افتاده است. بنابر مطالعات انجام شده سیلیس موجود را نیز می‌توان به چند منشأ احتمالی نسبت داد:

الف) سیلیس حاصل از انحلال فشاری: رخداد انحلال فشاری یکی از عوامل مؤثر در تشکیل سیمان سیلیسی است. بر اثر تأثیر فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی، به دلیل فشرده‌گی دانه‌های کوارتز با یکدیگر و یا با دیگر دانه‌های آواری سخت، در اثر پدیده انحلال فشاری سیلیس آزاد شده که در طی زمان به صورت سیمان ته نشست می‌گردد (Ketzner *et al.*, 2005؛ Goldstein & Rossi, 2002؛ Poursoltani & Gibling, 2011).

ب) سیلیس حاصل از دگرسانی: بخشی از سیلیس حاصل را می‌توان در نتیجه دگرسانی دانه‌های ناپایدار به خصوص فلدسپات‌ها دانست. بسیاری از این دانه‌ها در نمونه‌های مورد مطالعه دگرسان شده‌اند که طی مراحل مختلف دیاژنتیکی اتفاق افتاده است. دگرسانی فلدسپات را می‌توان توسط واکنش فلدسپات در حضور آب که به تشکیل سیلیس و کانی رسی منجر می‌گردد توجیه نمود (Siebert *et al.*, 1984). سیلیس حاصل از دگرسانی می‌تواند به شکل آزاد در آب درون حفره‌ای وارد شده و پس از اشباع شدن، در بین دانه‌ها و یا به فرم رورشدی ته نشین شود.

پ) سیلیس حاصل از تبدیل کانی‌های رسی ناپایدار به کانی‌های رسی پایدار: تبدیل کانی‌های رسی به یکدیگر همانند تبدیل اسمکتیت به ایلیت را می‌توان یکی از منابع



شکل ۶: شکستگی در دانه‌های ماسه سنگ‌های سازند لالون که در اثر فشرده‌گی ایجاد شده است. بخش‌های سیاه رنگ کوارتز است. شکستگی در مگنتیت (پیکانا زرد)؛ پیکان قرمز جهت بازشدگی این کانی را نشان می‌دهد. (B) شکستگی در زیرکان (پیکان قرمز)، جهت بازشدگی نیز نشان داده شده است. پیکان زرد قطعه جدا شده از کانی مگنتیت را نشان می‌دهد. (C) بیضی شکستگی در دانه فلدسپات حاصل از فشار وارد شده توسط دانه کوارتز را نشان می‌دهد. شکستگی‌های حاصل در دانه‌های فلدسپات به طور عمده از سیمان سیلیسی پر شده‌اند (پیکان‌های زرد). پیکان قرمز نشانگر پرشدگی شکستگی با کانی رسی از نوع کائولن است (تصاویر به روش BSE تهیه شده‌اند). (Z: زیرکان، I: ایلمنیت آلتزه شده، M: مگنتیت).

در تشکیل سیلیس مؤثرند (Bennett & Siegel, 1987؛ Goldstein & Rossi, 2002). بسیاری از محققین تشکیل سیمان سیلیسی را در دمای بالاتر از ۹۰ درجه سانتی‌گراد می‌دانند به طوری که رورشدی کوارتز احتمالاً در دمای بین ۹۰ الی ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد اتفاق می‌افتد و لذا احتمال وقوع آن در مرحله دیاژنز دفنی عمیق بیشتر است

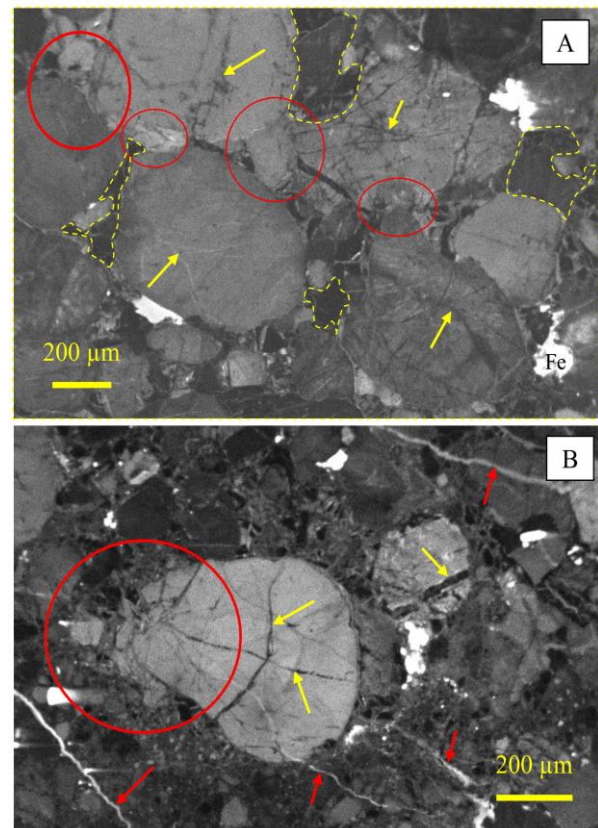
فشردگی

فشردگی از جمله رخدادهای دیاژنتیکی بوده که به محض رسوب گذاری در رسوبات به میزان کم یا زیاد اتفاق می افتد و به طور عموم در طول مراحل دیاژنتیکی اعم از اولیه و دفنی عمیق ادامه دارد (McBride *et al.*, 1987؛ Liu, 2002؛ Kim & Lee, 2003). این رخداد از ابتدای مرحله دیاژنز اولیه شروع شده و تا انتهای دیاژنز دفنی عمیق ادامه داشته است. مطالعات انجام شده حاکی از این است تماس های طولی، محدب - مقعر و مضرس که حاصل فشردگی مکانیکی است، در مرحله دیاژنز دفنی عمیق اتفاق افتاده است (برای مثال: Dickinson & Millikan, 1989؛ Milliken, 1995؛ Ochoa *et al.*, 2007). دانه های قابل انعطاف همانند میکا، در اثر فشردگی مکانیکی تغییر شکل داده اند (شکل ۴D). چنین حالتی نشانگر فشار بالای وارد شده طی دیاژنز دفنی عمیق است (Liu, 2002). فشردگی شیمیایی که از آن به انحلال فشاری نیز می توان یاد کرد، از جمله فرآیندهای دیاژنتیکی دفنی عمیق محسوب می گردد که در ماسه سنگ های سازند لالون به وقوع پیوسته است. بیشترین اثرات انحلال فشاری در ماسه سنگ ها، در هم فرورفتن دانه ها و ایجاد سیمان سیلیسی است که به عنوان یک منشأ سیلیس شناخته شده است (McBride, 1989؛ Molenaar, *et al.*, 2007). بنابراین مطالعات Schmid *et al.* (2004) و McBride (1989) وجود رخداد انحلال فشاری حاکی از دمای بالاتر از ۹۰ درجه سانتی گراد و عمق بیش از ۲ کیلومتر بوده که در مرحله دفنی عمیق ایجاد می گردد.

شکستگی

پدیده ایجاد شکستگی از دیگر فرآیندهای دیاژنتیکی محسوب می گردد که در تمامی مراحل احتمال وقوع آن می باشد. شکستگی های شناسایی شده در ماسه سنگ های

احتمالی تأمین سیلیس دانست. وجود واحد شیلی در بخش زیرین ماسه سنگ های سازند لالون در مراحل دیاژنز دفنی احتمالاً عامل تبدیل اسمکتیت به ایلیت شده که به آزاد سازی سیلیس منجر گردیده است. سیلیس حاصل می تواند طی زمان به لایه های ماسه سنگی نفوذ نموده و ته نشست گردد (Hartmann, *et al.*, e.g. Boles & Franks, 1976؛ Poursoltani & Mansourbeg *et al.*, 2008؛ Gibling, 2011). چنین منشأیی برای سیمان سیلیسی ماسه سنگ های سری داهو (کامبرین زیرین) در ایران مرکزی توسط پورسلطانی و قطبی راوندی (۱۳۹۳) در نظر گرفته شده است.



شکل ۷: دایره ها و بیضی ها مکان شکستگی های حاصل از فشردگی در دانه های کوارتز را نشان می دهند. درزه های حاصل از فشردگی با پیکان زرد نشان داده شده است. پیکان قرمز شکستگی های حاصل از اثرات تکتونیک که با سیمان اکسید آهن پر شده اند را نشان می دهد (تصویر B). خط چین های بسته سیمان سیلیسی پرکننده حفرات بین دانه ای را نشان می دهند (تصویر A). نقاط روشن سیمان اکسید آهن است که حفرات بین دانه ها را پر نموده است (تصاویر به روش SEM-CL تهیه شده است).

بالایی سازند لالون بر مبنای فرآیند تشکیل آن‌ها دو نوع می‌باشند:

۱- گروه اول شکستگی‌هایی که حرکات تکتونیکی باعث تشکیل آن‌ها شده است و علاوه بر دانه، اثرات درزه‌ها و شکستگی در سیمان نیز ادامه دارد (شکل ۴B,C). این نوع شکستگی به طور عمده پس از سیمانی شدن اتفاق افتاده که بیشتر مربوط به مرحله دیاژنز انتهایی است، گرچه احتمال وقوع آن در دیگر مراحل نیز می‌باشد.

۲- گروه دوم شکستگی‌هایی هستند که در اثر وزن رسوبات بالایی و فشرده شدن دانه‌ها در یکدیگر حاصل شده‌اند. این نوع شکستگی که در دانه‌های سخت همانند کوارتز، فلدسپات، زیرکان و مگنتیت ایجاد شده، مربوط به مرحله دیاژنز دفنی عمیق است (شکل ۶). مشابه این مطالعات توسط محققین مختلف بر روی رخساره‌های ماسه‌سنگی در نقاط مختلف دنیا انجام شده است (برای مثال: Milliken, Baron & Dickinson & Milliken, 1995; 1989; Zhang *et al.*, 2012; Parnell, 2007).

توالی پاراژنتیکی

بر مبنای مطالعات دیاژنتیکی انجام شده و نتایج حاصل، سه مرحله رخدادهای دیاژنز برای ماسه‌سنگ‌های سازند لالون در منطقه چنار معرفی می‌گردد.

دیاژنز اولیه از زمان رسوب‌گذاری شروع شده و تا شروع تدفین رسوبات ادامه دارد. رخدادهای دیاژنتیکی که در دیاژنز اولیه اتفاق می‌افتد، توسط عوامل مرتبط با ترکیب دانه‌های آواری، نرخ رسوب‌گذاری و احتمالاً ترکیب شیمیایی سیالات موجود کنترل می‌گردند (Schmidt & McDonald, 1979; Salem *et al.*, 2005). در سازند لالون نیز احتمال تأثیر این عوامل در رخدادهای دیاژنتیکی می‌باشد. از طرفی، به دلیل این که رخدادهای دیاژنز اولیه و

انتهایی نزدیک به سطح و در شرایط مشابهی همچون دما و فشار اتفاق افتاده‌اند، بنابراین تمایز رخدادهای این دو مرحله قدری مشکل است. بخشی از رخدادهای دیاژنتیکی فشرده‌گی، شکستگی و سیمانی شدن از جمله رخدادهایی هستند که در این مرحله اتفاق افتاده‌اند. گرچه بخش اصلی این رخدادهای مربوط به مرحله دیاژنز دفنی عمیق است.

بیشترین رخدادهای دیاژنتیکی مورد بحث در دیاژنز دفنی عمیق، که طولانی‌ترین مرحله با دمای بالا است، اتفاق افتاده است. بر اساس مطالعات انجام شده بر روی رخساره‌های سازند لالون، رخدادهای دیاژنتیکی فشرده‌گی، انحلال فشاری، شکستگی دانه‌های سخت و مقاوم و سیمانی شدن، خصوصاً سیمان سیلیسی از نوع رورشدی، از جمله رخدادهایی هستند که در این مرحله اتفاق افتاده‌اند.

سازند لالون نیز در طول زمان زمین‌شناسی تحت تأثیر حرکات تکتونیکی زیادی قرار گرفته که این حرکات می‌توانند در شکل‌گیری مرحله دیاژنز انتهایی نقش داشته باشند. درزه‌ها و شکستگی‌های ایجاد شده که در اثر وقوع گسل‌ها و چین‌خوردگی در منطقه ایجاد شده‌اند (شکل ۲)، از رخدادهای دیاژنز انتهایی محسوب می‌گردند. تشکیل سیمان‌های مختلف همانند اکسید آهن و کربنات و در برخی موارد سیلیس که پرکننده درزه‌های موجود می‌باشند، نیز جزو رخدادهای دیاژنتیکی شناسایی شده در رسوبات ماسه‌سنگی بخش بالایی سازند لالون است که مؤید وقوع پدیده دیاژنز انتهایی می‌باشند (شکل ۸). اگرچه کانی رسی نوع کائولن نیز به طور نادر شناسایی شده است، اما نمی‌توان زمان دقیقی برای آن متصور شد؛ هرچند طبق مطالعات Berner (1977) این کانی می‌تواند در مرحله اولیه و همچنین انتهایی نیز تشکیل شود.

Diagenetic events	Eodiagenesi	Mezodiagenesis (Burial Diagenesis)	Telodiagenesis
Cementation			
Carbonate	-----		-----
Silica	-----	Quartz overgrowth	
		Pressure solution	
			Pore filling
			Microcrystalline
Smencite to illite		----- [?] -----	
Kaolinite	-----		-----
Iron oxide		-----	-----
Compaction	-----	-----	-----
Fracturing	-----	-----	-----

شکل ۸: توالی دیاژنتیکی پیشنهادی ماسه سنگ‌های بالایی سازند لالون در برش چنار؛ خطوط پررنگ رخداد‌های اصلی، خطوط کم‌رنگ رخداد‌های فرعی و خطوط منفصل رخداد‌های احتمالی را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

رخساره‌های ماسه‌سنگی سازند لالون در منطقه چنار بینالود، بر اساس مطالعات پتروگرافی انجام شده، دارای مچوریتی ترکیبی بالایی بوده و به طور عمده شامل کواتز آرنایت، ساب آرکوز و ساب لیتارنایت می‌باشد. بنابر نتایج مطالعات پتروگرافی و نتایج حاصل از آنالیزهای ژئوشیمیایی، سیمان‌های سیلیسی، کربناته و اکسید آهن و به ندرت کانی‌های رسی شناسایی شده، سیمان سیلیسی بیشترین درصد را به خود اختصاص داده است. سیلیس حاصل از انحلال فشاری، آلتراسیون کانی‌های ناپایدار و تبدیل کانی‌های رسی به یکدیگر از منشأهای احتمالی سیمان سیلیسی محسوب می‌گردند. فشردگی نیز از دیگر رخداد‌های اصلی این ماسه‌سنگ‌ها بوده که به تبع آن شکستگی دانه‌های شکننده و تغییر شکل دانه‌های نرم را به همراه داشته است. سه رخداد دیاژنتیکی فشردگی،

شکستگی و سیمان سیلیسی از رخداد‌های اصلی این ماسه‌سنگ‌ها محسوب می‌گردد. بر مبنای رخداد‌های دیاژنتیکی مؤثر بر رخساره‌های ماسه‌سنگی مذکور، مراحل دیاژنتیکی حاکم بر این رسوبات شامل دیاژنز اولیه، دفنی عمیق و انتهای می‌باشد.

سپاس‌گزاری

از دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد جهت تأمین بودجه تحقیقاتی و از دانشگاه سنت مریس کانادا جهت انجام برخی آنالیزهای ژئوشیمیایی به روش ماکروپروب و کاتدولومینسانس قدردانی می‌شود. همچنین از داوران محترم که با نظرات ارزشمندشان باعث ارتقای کیفی این مقاله شده‌اند، نیز سپاس‌گزاری می‌گردد.

منابع

- آقانباتی، س.ع.، ۱۳۸۳. زمین‌شناسی ایران. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۶ ص.
- پورسلطانی، م.ر.، قطبی راوندی، م.ر.، ۱۳۹۳. تاریخچه دیاژنز رسوبات کامبرین زیرین در رخنمون گزویی، ایران مرکزی. پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی، ۴: ۱۰۳-۱۲۵.
- درویش زاده، ع.، ۱۳۸۰. زمین‌شناسی ایران. نشر دانش امروز، ۹۰۱ ص.
- شهرابی، م.، داود زاده، م.، ۱۳۶۵. نقشه زمین‌شناسی چهارگوش ۱:۲۵۰۰۰۰ مشهد. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- نبوی، م.ح.، ۱۳۵۵. دیاچهای بر زمین‌شناسی ایران. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور. ۱۰۹ ص.
- Abdel Wahab, A., 1998. Diagenetic history of Cambrian quartzarenites, Ras Dib-Zeit Bay area, Gulf of Suez, eastern desert, Egypt. *Sedimentary Geology*, 121: 121-140.
- Alavi, M., 1991. Sedimentary and Structural Characteristics of the paleotethys remnants in northeastern Iran. *Geological Society of America Bulletin*, 103: 983-992.
- Alavi, M., 1992. Thrust Tectonic of the Binalood Region, NE Iran. *Tectonics*, 11: 360-370.
- Baron, M., & Parnell, J., 2007. Relationships between stylolites and cementation in sandstone reservoirs: Examples from the North Sea, U.K. and East Greenland. *Sedimentary Geology*, 194:17-35.
- Bennett, P., & Siegel, D.I., 1987. Increased solubility of quartz in water due to complexing by organic compounds. *Nature*, 326: 684-686.
- Boles, J.R., & Franks, S.G., 1979. Clay diagenesis in Wilcox sandstone of southwest Texas: implications of smectite diagenesis on sandstone cementation. *Journal of Sedimentary Petrology*, 49: 55-70.
- Boggs, S.J., 1992. Petrology of Sedimentary Rocks. *Macmillan Publishing Co.*, New York, 596 p.
- Berner, R.A., 1977. Mechanism of feldspar weathering: some observational evidence. *Geology*, 5: 369-372.
- Dickinson, W.W., & Milliken, K.L., 1995. The diagenetic role of brittle deformation in compaction and pressure solution, Etjo sandstone, Namibia. *The Journal of Geology*, 103: 339-347.
- Eren M., & Kadir S., 2013. Colour origin of red sandstone beds within the Hüdai Formation (Early Cambrian), Aydıncık (Mersin), southern Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 22: 563-573.
- Folk, R.L., 1980. Petrology of Sedimentary Rock. *Hemphill Publishing Co.*, Texas, 182 p.
- Friis, H., Sylvestersen, R.L., Nebel, L.N., Poulsen, M.L.K., & Svendsen, J.B., 2010. Hydrothermally influenced cementation of sandstone-An example from deeply buried Cambrian sandstones from Bornholm, Denmark. *Sedimentary Geology*, 227: 11-19.
- Gazzi, P., 1966. Le arenarie dell' Appenninomodense; correlazioni con il flysch di Monghidoro. *Mineralogy Petrography Acta*, 12: 69-97.
- Goldstein, R.H., & Rossi, C., 2002. Recrystallization in quartz overgrowths. *Journal of Sedimentary Research*, 72: 432-440.
- Hartmann, B.H., Ramseyer, K., & Matter, A., 2000. Diagenesis and pore-water evolution in Permian sandstones, Gharif Formation, Sultanate of Oman. *Journal of Sedimentary Research*, 70: 533-544.
- Ketzer, J.M., De Ross, L.F., & Norberto, D., 2005. Kaolinitic meniscus bridges as an indicator of early diagenesis in Nubian sandstone, Sinai, Egypt-discussion. *Sedimentology*, 52: 3213-217.
- Kim, Y., & Lee, Y.I., 2003. Diagenesis of shallow marine sandstones, the Lower Ordovician Dongjeom Formation, Korea: response to relative sea-level changes. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23: 235-245.
- Lander, R.H., Larese, R.E., & Bonell, L.M., 2008. Toward more accurate quartz cement models: the importance of euhedral versus noneuhedral growth rates. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 92: 1537-1563.
- Liu, K.W., 2002. Deep-burial diagenesis of the siliciclastic Ordovician Natal Group, South Africa. *Sedimentary Geology*, 154: 177-189.
- Mansurbega, H., Morada, S., Salemi, A., Marfield, R., El-ghalib, M.A.K., Nystuenf, J.P., Cajad, M.A., Amorosi, A., Garcia, D., & La Iglesia, A., 2008. Diagenesis and reservoir quality evolution of palaeocene deep-water, marine sandstones, the Shetland-Faroes Basin, British continental shelf. *Marine and Petroleum Geology*, 25: 514-543.
- McBride, E.F., 1989. Quartz cement in sandstones: A review. *Earth-Science Reviews*, 26: 69 - 112.

- McBride, E.F., Land, L.S., & Mack, L.E., 1987. Diagenesis, Norphler Formation (Upper Jurassic), Rankin County, Mississippi, and Mobile County, Alabama. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 71: 1019-1034.
- Milliken, K.L., 1989. Petrography and composition of authigenic feldspars, Oligocene Frio Formation, South Texas. *Journal of Sedimentary Petrology*, 59: 361-374.
- Molenaar, N., Cyziene, J., & Sliupa, S., 2007. Quartz cementation mechanisms and porosity variation in Baltic Cambrian sandstones. *Sedimentary Geology*, 195: 135-159.
- Ochoa, M., Arribas, J., Mas, R., & Goldstein, R.H., 2007. Destruction of a fluvial reservoir by hydrothermal activity (Camos Basin, Spain). *Sedimentary Geology*, 202: 158-173.
- Poursoltani, M.R., & Gibling, M.R., 2011. Composition, porosity and reservoir potential of the Middle Jurassic Kashafud Formation, northeast Iran. *Marine and Petroleum Geology*, 28: 1094-1110.
- Poursoltani, M.R., Gibling, M.R., & Pe-Piper, G., 2014. Petrography analyses of Lower Cambrian sandstones from central Iran. *The Atlantic Geoscience Society, 40th Colloquium and Annual Meeting, Canada*, 38-39.
- Salem, A.M., Ketzer, J.M., Morad, S., Rizk, R.R., & Al-Aasm, I. S., 2005. Diagenesis and Reservoir-Quality evolution of incised-valley sandstones: Evidence from the Abu Madi Gas Reservoirs (Upper Miocene), The Nile Delta Basin, Egypt. *Journal of Sedimentary Research*, 75: 572-584.
- Sawatzky, C.C., & Pe-Piper, G., 2013. Detrital quartz sources in the Scotian Basin, eastern Canada, using hot-cathode cathodoluminescence: Availability of coarse-grained sand for reservoirs. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 9807: 1503-1520.
- Siebert, R.M., Moncure, G.K., & Lanham, R.W., 1984. A theory of framework grain dissolution in sandstones, In: *Clastic Diagenesis* (Ed. D. A. McDonald and R. C. Surdan). Tulsa. Oklahoma. U.S.A. *American Association of Petroleum Geologists Memoir*, 37: 163-176.
- 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.
- Schmidt, V., & McDonald, D.A., 1979. The role of secondary porosity in the course of sandstone diagenesis. In: Scholle, P.A., Schluger, P.R. (Eds.), *Aspects of Diagenesis. SEPM, Special Publication*, 26: 175-207.
- Stocklin, J., 1968. Structural history and tectonics of Iran; a review. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 52 (7): 1229-1258.
- Tucker, M.E., 2001. *Sedimentary Petrology: An Introduction to the Origin of Sedimentary Rocks*, 2nd edition. *Blackwell Scientific Publication*, London, 262p.
- Zhang, B., Zhang, J., Yan, S., Gu, Z., & Wang, X., 2012. Detrital quartz and quartz cement in Upper Triassic reservoir sandstones of the Sichuan basin: Characteristics and mechanisms of formation based on cathodoluminescence and electron backscatter diffraction analysis. *Sedimentary Geology*, 267-268: 104-114.
- Zhang, B., Yan, S., Gu, Z., & Zhang, J., 2013. SEM/EBSD analysis of quartz cementation and compaction microstructures during diagenesis of sandstone. *Science China: Earth Sciences*, 56 (8): 1281-1293.

Compaction, fracturing and cementation, the main diagenetic events: An example from upper sandstone of Lalun Formation, Binalud Zone, Iran

Poursoltani, M.R.*

Associate Professor, Department of Geology, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran

*Email: poursoltani1852@mshdiau.ac.ir

Introduction

The siliciclastic Lalun Strata (Early Cambrian), in the Binalud zone, with thickness of 70 metres in the Chenar area, rests with an fault contact on the Early Cambrian sedimentary rocks (Soltaniyeh dolomite). This strata overlain with erosional surface by Eocene conglomerates. The upper part of this strata contains sandstone that compare with upper sandstone unit of other parts (Poursoltani et al., 2014; Poursoltani and Ghotbi Ravandi, 2015). This formation is red to reddish-brown in color, and mostly purple. The one stratigraphic section was logged graphically, and 67 fresh sandstone samples were systematically collected, and 50 thin sections were made. Petrographic modal analyses were done using a Nikon Eclipse E400 Pol microscope, with 500 point counts on 20 samples. Four polished thin sections were studied to determine the composition of mineral components. The Scanning Electron Microscope (SEM) used was a LEO 1450 VP at an acceleration voltage of 30.00 kv.

Discussion

Based on field and laboratory studies, two facies association including sandstone and shale have been identified. The sandstones are fine- to medium-grained and grain-supported, with some coarse-grained and well-rounded components. Based on angularity, sorting, and matrix content, most sandstones are mature and submature. Detrital grains are quartz, predominantly monocrystalline quartz with subordinate polycrystalline quartz, K-feldspar and plagioclase, lithic grains, and accessory minerals and micas. Lithic grains are mainly metamorphic (quartzite) and sedimentary (sandstone and chert), with a few volcanic grains. Heavy minerals include opaques, zircon and tourmaline, scattered or present as a thin laminae. The sandstones have a compositional range from quartzarenite to subarkose and sublitharenite (Folk, 1980).

Results

The Lalun sandstones experienced diagenetic events that included compaction, fracturing and cementation. The predominant cement is silica, but some samples contain considerable proportions of carbonate, iron oxides and clays cements, with minor authigenic minerals. The silica is typically non-luminescent, and mainly occurs as syntaxial overgrowths on detrital quartz grains; reddish rims of very fine-grained material that probably include clay and iron oxides mark the contacts between authigenic and detrital quartz. Silica also forms pore-filling cement in primary pores, and large volumes of cement lie along primary and secondary fractures (McBride, 1989; Friis et al., 2010). The cements occupy inter- and intragranular spaces, form veins and fill fractures, and vary from microcrystalline to coarsely crystalline in the case of calcite. Iron oxide cement is present throughout the Lalun Formation as an alteration product and cement. Clay minerals present less than other type of cements, but illite and kaolinite are the main clay minerals cement in Lalun sandstones (Ketzer et al., 2005). Dissolution is prominent in the sandstones. Detrital K-feldspar, quartz, volcanic rock fragments, and carbonate cement all show evidence of partial to complete dissolution. In feldspars, the proportion of voids is variable, with dissolution prominent along cleavages and fractures. The sandstones show variable degrees of mechanical and chemical compaction, which is particularly prominent where early cements are lacking (Mansurbeg et al., 2008). Grain contacts include elongate and concavo-convex, point contacts in rare cases, and sutured contacts that indicate intergranular pressure solution and deformation at a more advanced stage. Quartz and feldspar grains have been intensively fractured but the fractures have been largely healed through silica cementation, allowing the grains to maintain their integrity (Milliken, 1989; Dickinson and Milliken, 1995). This was evident using SEM and CL techniques, which show that the majority of grains contain fractures. Based on petrological and geochemical studies, it is

interpreted that diagenetic history of the Lalun sandstones can be related to early, deep burial and late stages (Abdel Wahab, 1998; Salem et al., 2005).

Conclusion

Based on petrographic studies of upper sandstone units of the Lalun Formation, in Binalud Zone, compaction, fracturing and cementation (mainly silica) are the most important diagenetic events of these sandstones. The cements occupy inter- and intragranular spaces, form veins and fill fractures, and vary from microcrystalline to coarsely crystalline. The sandstones show variable degrees of mechanical and chemical compaction, which is particularly prominent where early cements are lacking. Quartz and feldspar grains have been intensively fractured but the fractures have been largely healed through silica cementation, allowing the grains to maintain their integrity. According to diagenetic events, diagenetic history for the Lalun sandstones, in study area, is related to early, deep burial and late stages.

Keywords: Diagenesis; Lalun Formation; Early Cambrian; Binalud.

Reference

- Abdel Wahab, A., 1998. Diagenetic history of Cambrian quartzarenites, Ras Dib-Zeit Bay area, Gulf of Suez, eastern desert, Egypt. *Sedimentary Geology*, 121: 121-140.
- Dickinson, W.W., & Milliken, K.L., 1995. The diagenetic role of brittle deformation in compaction and pressure solution, Etjo sandstone, Namibia. *The Journal of Geology*, 103: 339-347.
- Folk, R.L., 1980. Petrology of Sedimentary Rock. *Hemphill Publishing Co.*, Texas, 182 p.
- Friis, H., Sylvestersen, R.L., Nebel, L.N., Poulsen, M.L.K., & Svendsen, J.B., 2010. Hydrothermally influenced cementation of sandstone-An example from deeply buried Cambrian sandstones from Bornholm, Denmark. *Sedimentary Geology*, 227: 11-19.
- Ketzer, J.M., De Ross, L.F., & Norberto, D., 2005. Kaolinitic meniscus bridges as an indicator of early diagenesis in Nubian sandstone, Sinai, Egypt-discussion. *Sedimentology*, 52: 3213-217.
- Mansurbega, H., Morada, S., Salemc, A., Marfild, R., El-ghalie, M.A.K., Nystuenf, J.P., Cajad, M.A., Amorosig, A., Garcia, D., & La Iglesia, A., 2008. Diagenesis and reservoir quality evolution of palaeocene deep-water, marine sandstones, the Shetland-Faroes Basin, British continental shelf. *Marine and Petroleum Geology*, 25: 514-543.
- McBride, E.F., 1989. Quartz cement in sandstones: A review. *Earth-Science Reviews*, 26: 69-112.
- McBride, E.F., Land, L.S., & Mack, L.E., 1987. Diagenesis, Norphler Formation (Upper Jurassic), Rankin County, Mississippi, and Mobile County, Alabama. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 71: 1019-1034.
- Milliken, K.L., 1989. Petrography and composition of authigenic feldspars, Oligocene Frio Formation, South Texas. *Journal of Sedimentary Petrology*, 59: 361-374.
- Poursoltani, M.R., Gibling, M.R., & Pe-Piper, G., 2014. Petrography analyses of Lower Cambrian sandstones from central Iran. *The Atlantic Geoscience Society, 40th Colloquium and Annual Meeting, Canada*, 38-39.
- Poursoltani, M.R., & Ghotbi Ravandi, M.R., 2015. Diagenetic history of Early Cambrian sandstones, at Gazouieyeh outcrop, Central Iran. *Stratigraphy and Sedimentology Researches*, 4: 103-125
- Salem, A.M., Ketzer, J.M., Morad, S., Rizk, R.R., & Al-Aasm, I. S., 2005. Diagenesis and Reservoir-Quality evolution of incised-valley sandstones: Evidence from the Abu Madi Gas Reservoirs (Upper Miocene), The Nile Delta Basin, Egypt. *Journal of Sedimentary Research*, 75: 572-584.