



<https://jssr.ui.ac.ir/?lang=en>

Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches University of Isfahan
E-ISSN: 2423-8007
Vol. 37, Issue 2, No. 83, Summer 2021, pp 119-146
Received: 07.09.2020 Accepted: 23.12.2020

Research Paper

Petrography and diagenetic history of the Shurijeh Formation (Late Kimmeridgian–Hautrivian) at Estarkhi section, Kopet-Dagh Basin, NE Iran

Mehdi Reza Poursoltani *

Associate Professor, Department of Geology, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran
poursoltani1852@mshdiau.ac.ir

Abstract

The Shurijeh Formation is a Late Jurassic–Early Cretaceous (Late Kimmeridgian–Hautrivian) siliciclastic rock unit of the Kopet-Dagh Basin, up to 392 m thick. In the Estarkhi section, it rests disconformably on the Mozduran Formation (Oxfordian), and is disconformably overlain by carbonate rocks of the Tirgan Formation (Barremian–Aptian). The sandstones are predominantly subarkose, sublitharenite, feldspathic litharenite, and litharenite with minor quartzarenite, rich in quartz and feldspars, sedimentary and igneous rock fragments (plutonic), and rarely metamorphic fragments. Based on petrological and geochemical studies, minor diagenetic events in the early diagenetic stage include cementation by calcite and iron oxide. Deep burial diagenetic events were dominated by compaction, cementation (silica, dolomite, chlorite), fracturing, dissolution, pressure solution, and albization. Minor late diagenetic events include dissolution and cementation (calcite, iron oxide). Based on diagenetic events, a temperature of >80°C during burial diagenesis is suggested for Shurijeh Formation. The existing porosity is secondary, resulting largely from the dissolution of feldspar and carbonate cement, with some fracture porosity. The porosity and permeability of 11 core plugs average 7.78% and 4.84 md, and the point count of 38 thin sections shows an average porosity of 10.05%. The good porosity and permeability of the middle part of the section predict an acceptable reservoir potential for this formation in the study area.

Keywords: Kopet-Dagh, Shurijeh Formation, diagenesis, porosity, Cretaceous

Introduction

The Kopet-Dagh Basin is the most important zone due to the existence of the best outcrops of Jurassic and Cretaceous rocks in NE Iran and also its high potential of petroleum system elements. The Kopet-Dagh Basin formed after the closure of the Hercynian Ocean following the Early Cimmerian orogeny. The siliciclastic Shurijeh Formation comprises important gas reservoirs in the Kopet-Dagh Basin. The Shurijeh Formation with 392 meters thick, in the Estarkhi area, rests disconformably on the Mozduran Formation, and is disconformably overlain by the Tirgan Formation. In this paper, the petrography, interpretation of diagenetic history, thermal history, porosity, and permeability of the Shurijeh sandstones in the Estarkhi area are presented.

Material & Methods

The one stratigraphic section was logged graphically, and 60 fresh sandstone samples were systematically collected, from

which 38 thin sections were made. Petrographic modal analyses were made using a Nikon E400 Pol microscope, with 500 point counts on 38 selected samples using the Gazzi-Dickinson method to identify grains, cement types and proportions. The porosity and permeability were determined on core plugs from 11 sandstone samples using standard methods. The samples were vacuum-dried at 60°C and analyzed using a permeameter for permeability in nitrogen (air), and for porosity using porosimeter in helium gas, under a pressure of 120 to 380 psi, at a temperature of 180°C, and the amount of gas output was measured. Porosity percentages were also estimated using 500 counts on 38 thin sections, stained with blue epoxy. Closely similar porosity measurements were obtained using these two methods. Six polished thin sections were studied to determine the composition of mineral components.

Discussion of Results & Conclusion

*Corresponding author

Poursoltani, M. (2021). Petrography and diagenetic history of the Shurijeh Formation (Late Kimmeridgian–Hautrivian) at Estarkhi section, Kopet-Dagh Basin, NE Iran. *Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches*, 37(2), 119-146.



2423-8007 / © 2021

This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



<http://dx.doi.org/10.22108/jssr.2020.124716.1181>



<https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087888.1400.37.2.6.4>

Based on field and laboratory studies, three terrigenous lithofacies of different grain sizes including conglomerate, sandstone, and shale and minor carbonate facies have been identified. The sandstones are fine- to medium-grained and grain-supported, with some coarse-grained and well-rounded components. Based on the angularity, sorting, and matrix content, most sandstones are mature, sub-mature, and rarely supermature. The sandstones are predominantly subarkose, sublitharenite, feldspathic litharenite, and litharenite with minor quartzarenite, rich in quartz and feldspars, sedimentary and igneous rock fragments, and rarely metamorphic fragments.

The Shurijeh sandstones experienced diagenetic events that included cementation, alteration, compaction, and fracturing, dissolution and albitization. The predominant cement are silica and carbonate, iron oxide, clay minerals, with minor authigenic minerals such as K-feldspar overgrowth, albitization, and rutile. The cement occupy inter- and intragranular spaces, form veins and fill fractures, and vary from microcrystalline to coarsely crystalline in the calcite cement type. Iron oxide cement is present throughout the Shurijeh sandstones as an alteration product and cement. Clay minerals are less widespread than other types of cements, but chlorite is the main clay mineral. The sandstones show variable degrees of mechanical and


chemical compaction especially prominent where early cement are lacking. 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. Dissolution is prominent in the sandstones. Detrital K-feldspar, quartz, and carbonate cement all show evidence of partial to complete dissolution.

According to petrological and geochemical studies, minor diagenetic events in the eodiagenetic stage include cementation. Mesodiagenetic events were dominated by cementation, compaction, grain microfractures, dissolution and replacement, pressure solution, the formation of K-feldspar overgrowth and albitization and rarely rutile. Minor telodiagenetic events include dissolution and cementation. Thus, based on diagenetic events, a temperature of $>80^{\circ}\text{C}$ during burial diagenesis is suggested for Shurijeh Formation. Existing porosity is secondary, resulting largely from the dissolution of feldspar and carbonate cement, with some fracture porosity. The porosity and permeability of 11 core plugs average 7.78% and 4.84 md, and the point count of 38 thin sections shows an average porosity of 10.05%. The bulk of the porosity is secondary.



مقاله پژوهشی

پetroگرافی و تاریخچه دیاژنتیکی ماسه‌سنگ‌های سازند شوربجه (کیمریجین پسین - هاتریوین) در برش اسطرخی، حوضه رسوبی کپه‌داغ، شمال شرق ایران

مهدی رضا پورسلطانی *، دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی مشهد، مشهد، ایران

poursoltani1852@mshdiau.ac.ir

چکیده

سازند شوربجه یک توالی سیلیسی‌آواری ژوراسیک پسین - کرتاسه پیشین (کیمریجین پسین - هاتریوین) واقع در حوضه رسوبی کپه‌داغ با ضخامت ۳۹۲ متر در برش اسطرخی است. در برش اسطرخی، این سازند به‌طور هم‌شیب روی سازند کربناته مزدوران (آکسفوردین) نهشته شده و به‌طور هم‌شیب نیز با سازند کربناته تیرگان (بارمین - آپتین) پوشیده شده است. ماسه‌سنگ‌ها به‌طور عمده ساب‌آرکوز، ساب‌لیت آرنایت، فلدسپاتیک لیت آرنایت و لیت آرنایت و به‌طور جزئی کوارتز آرنایت و غنی از کوارتز، فلدسپات و خرده‌سنگ‌های رسوبی و آذرین (پلوتونیک) هستند و به‌ندرت خرده‌سنگ‌های دگرگونی دارند. براساس مطالعات سنگ‌شناسی و ژئوشیمیایی، رخدادهای جزئی در مرحله دیاژنز اولیه شامل سیمانی‌شدن (کلسیت، اکسید آهن) است. رخدادهای مرحله دیاژنز دینی عمیق غالب و شامل فشردگی، سیمانی‌شدن (سیلیس، دولومیت، کلریت)، شکستگی، انحلال، انحلال فشاری و آلیتی‌شدن است. مرحله دیاژنز انتهایی نیز شامل رخدادهای جزئی انحلال و سیمانی‌شدن (کلسیت، اکسید آهن) است. براساس رخدادهای دیاژنتیکی، دمای بیش از ۸۰ درجه طی مرحله دیاژنز دینی برای سازند شوربجه پیشنهاد می‌شود. تخلخل موجود ثانویه و به‌طور عمده ناشی از انحلال فلدسپات و سیمان کربناته و شکستگی است. میانگین تخلخل و نفوذپذیری ۱۱ مغزه و ۷/۷۸٪ و ۴/۸۴ میلی‌داری است و شمارش نقطه‌ای ۳۸ مقطع نازک، میانگین تخلخل ۱۰/۰۵٪ را نشان می‌دهد. با توجه به تخلخل و نفوذپذیری قابل قبول، بخش میانی سازند در منطقه مطالعه‌شده از لحاظ مخزنی مورد توجه است.

واژه‌های کلیدی: کپه‌داغ، سازند شوربجه، دیاژنز، تخلخل، کرتاسه

* نویسنده مسئول

پورسلطانی، م. ر. (۱۳۹۹). پترولوجرافی و تاریخچه دیاژنتیکی ماسه‌سنگ‌های سازند شوربجه (کیمریجین پسین - هاتریوین) در برش اسطرخی، حوضه رسوبی کپه‌داغ، شمال شرق ایران، پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی، ۳۷(۲): ۱۱۹-۱۴۶.



مقدمه

Moussavi-Harami and Brenner 1990, 1992, 1993, 1987

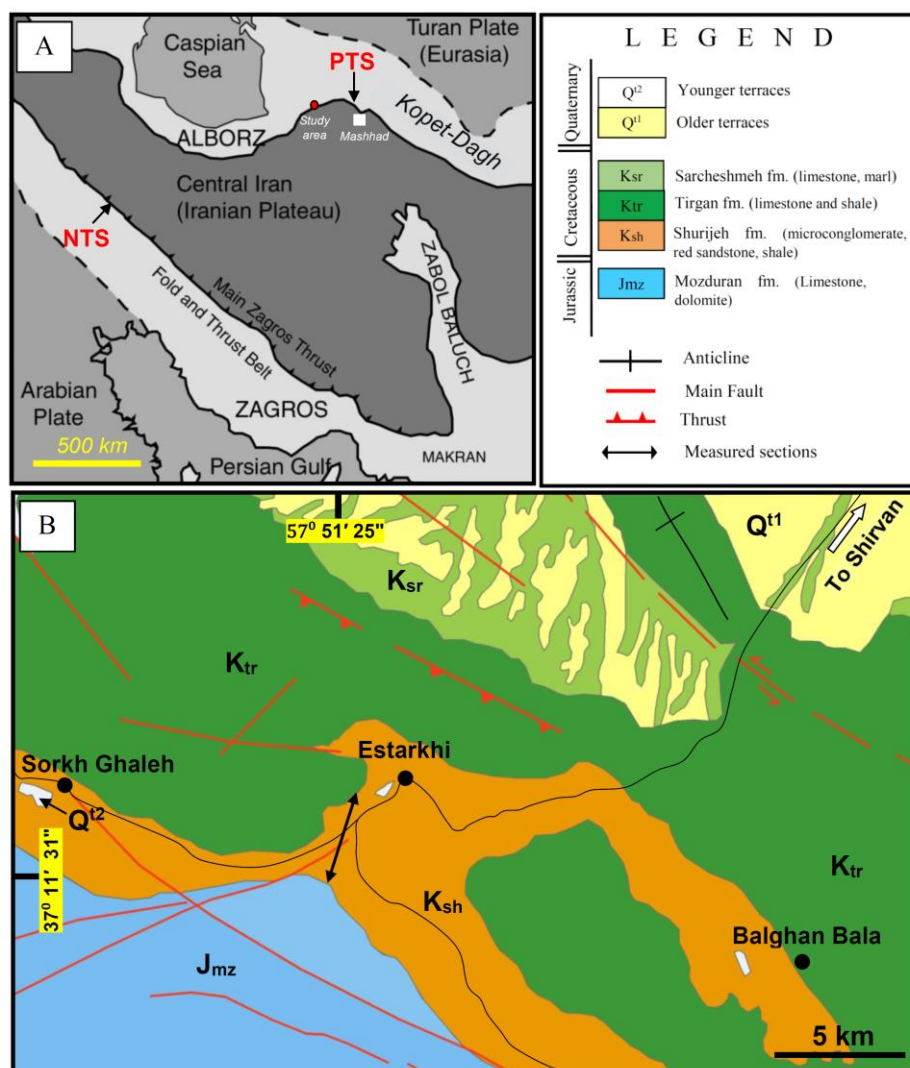
و Tabatabai et al. 2013, Mortazavi et al. 2012
Golafshani et al. 2014. این سازند را در مناطق مختلف
حوضه مطالعه کرده‌اند.

این سازند به‌طور عمده از رسوبات سیلیسی‌آواری (شیل،
ماسه‌سنگ، کنگلومرا) و بسیار کم از لایه‌های کربناته و در
بعضی بخش‌ها از لایه‌های تبخیری تشکیل شده است. در
مناطق مختلف تغییرات رخساره‌ای در این سازند به‌خوبی
مشهود است. بنا بر آنالیز رخساره‌ها و ساخت‌های رسوبی
موجود، این توالی نشان‌دهنده نهشته‌شدن در سیستم‌های
رودخانه‌ای (نوع بریده‌بریده با بستر گراولی) نهشته‌شده است؛
اما به طرف غرب و نواحی مرکزی حوضه محیط‌های
رودخانه‌ای ماندری، دریاچه‌های شور، دلتایی، دشت ساحلی و
دریایی برای این سازند پیشنهاد شده است (Moussavi-
Harami and Brenner 1990, 1992, 1993; Moussavi-
Harami et al. 2009).

سازند شوربچه در منطقه اسطرخی با مختصات جغرافیایی
۳۱' ۱۱" ۳۷° شمالی و ۲۵' ۵۱" ۵۷° شرقی در جنوب غرب
شیروان با ضخامت ۳۹۲ متر مطالعه و بررسی شده است
(شکل ۱). در منطقه این سازند نیز روی سازند مزدوران و زیر
سازند تیرگان نهشته شده است (شکل ۲). دانه‌بندی تدریجی،
ریپل مارک، لامیناسیون، چینه‌بندی متقاطع و آثار فسیلی
تالاسینوئیدس، از ساخت‌های رسوبی عمده این سازند در
منطقه مطالعه شده است.

حوضه رسوبی کپه‌داغ به دلیل داشتن توالی‌های منظم و
پیوسته رسوبی، وجود بهترین رخنمون‌ها از سنگ‌های
ژوراسیک و کرتاسه در ایران و همچنین برخورداری از
پتانسیل زیاد مواد هیدروکربوری اهمیت خاصی دارد
(Afshar-Harb 1969). بسیاری از پژوهشگران معتقدند این
حوضه پس از بسته‌شدن اقیانوس هرسی نین بر اثر کوه‌زایی
سیمرین پیشین و در زمان تریاس میانی تشکیل شده است
(Afshar-Harb 1979; Berberian and King 1981;)
(Poursoltani et al. 2007) که در شمال خاوری ایران و بخش
وسعی از ترکمنستان و شمال افغانستان گسترش دارد و
میدان‌های گازی بزرگی را شامل می‌شود (Afshar-Harb
1969).

سازند شوربچه با سن کیمریجین پسین - هاتریوین
(Jamali et al. 2012) در برش الگو (دره‌خور، جاده کلات -
مشهد) حدود ۹۸۰ متر ضخامت دارد و به‌مثابه یک
سنگ‌مخزن در شمال خاور ایران شناخته می‌شود (Afshar-
Harb 1994). این سازند به‌طور هم‌شیب روی سازند کربناته
مزدوران (آکسفوردین) و در زیر سازند کربناته تیرگان
(بارمین - آپتین) قرار گرفته است (Aghanabati 2004)؛
بنابراین لازم است این سازند در بخش‌های مختلف به‌طور
دقیق و تفصیلی از دیدگاه سنگ‌شناسی، تأثیرات دیاژنتیکی و
میزان تخلخل و تراوایی مطالعه شود. در این زمینه
پژوهشگرانی چون Afshar-Harb 1969, 1979, Kalantari

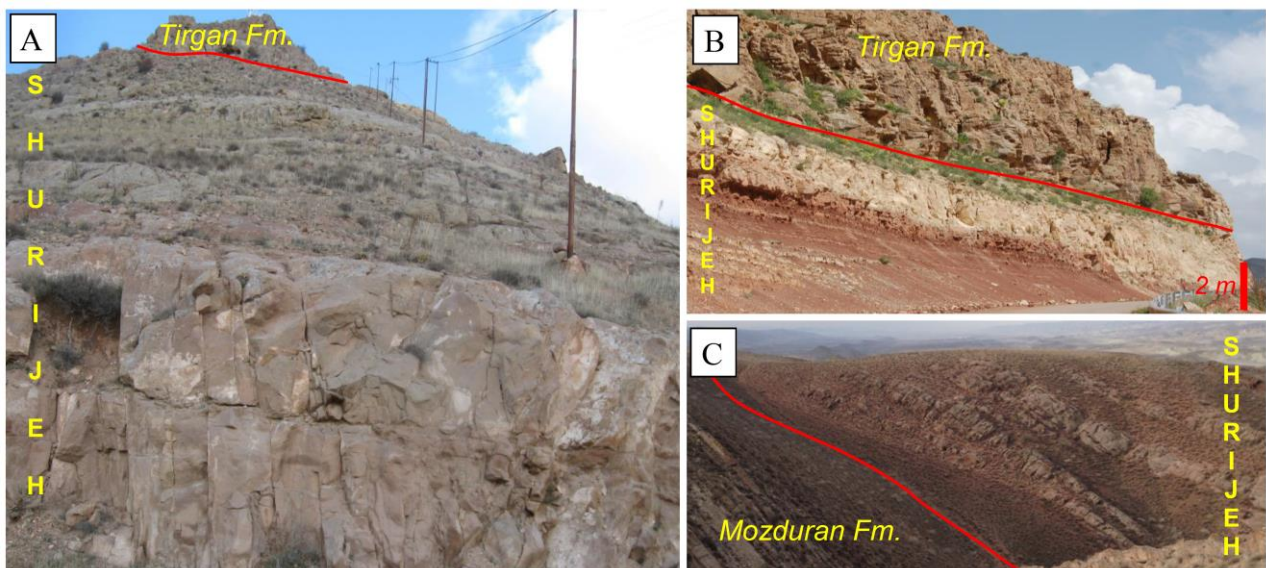


شکل ۱- A) زون‌های ساختمانی رسوبی و موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعه‌شده (Berberian and King 1981); B) نقشه زمین‌شناسی و واحدهای رسوبی منطقه اسطرخی (برگرفته از نقشه زمین‌شناسی بجنورد ۱:۲۵۰,۰۰۰ (Bolurchi et al. 1986)). علامت پیکان، مکان برداشت برش چینه‌شناسی را نشان می‌دهد. NTS: خط درز نئوتتیس؛ PTS: خط درز پالتوتیس).

Fig 1- A) Sedimentary structural zones and geographical location of the study area (Berberian and King 1981); B) Geological map and sedimentary units of the Estarkhi area (modified from Bolourchi et al. 1986; Geological map of Bojnurd, 1: 250000). The arrow showing measured stratigraphy section (NTS: Neo-Tethys Suture; PST; Paleo-Tethys Suture).

سنگ مخزن اصلی میدان‌های گازی ترکمنستان در نظر گرفته می‌شود (Aghanabati 2004)؛ بر این اساس علاوه بر مطالعات سنگ‌شناسی و تفسیر تاریخچه دیاژنتزی، تاریخچه حرارتی و میزان تخلخل و تراوایی این سازند در منطقه اسطرخی مطالعه شده است.

سازند شوربجه، یک سنگ مخزن در منطقه شمال شرق ایران محسوب می‌شود (Afshar-Harb 1979; Moussavi-Harmi 1992, 1993 and Brenner)؛ از طرفی از نظر زمانی و شرایط رسوبی معادل رسوبات دیگر در حوضه‌های رسوبی البرز و زاگرس است و همچنین معادل ماسه‌سنگ‌های شاتلیک به‌مثابه



شکل ۲- A) نمای کلی از بخش فوقانی سازند شوريجه در منطقه اسطرخی؛ B) مرز بالایی سازند شوريجه با سازند تیرگان؛ C) مرز زیرین سازند شوريجه با سازند مزدوران

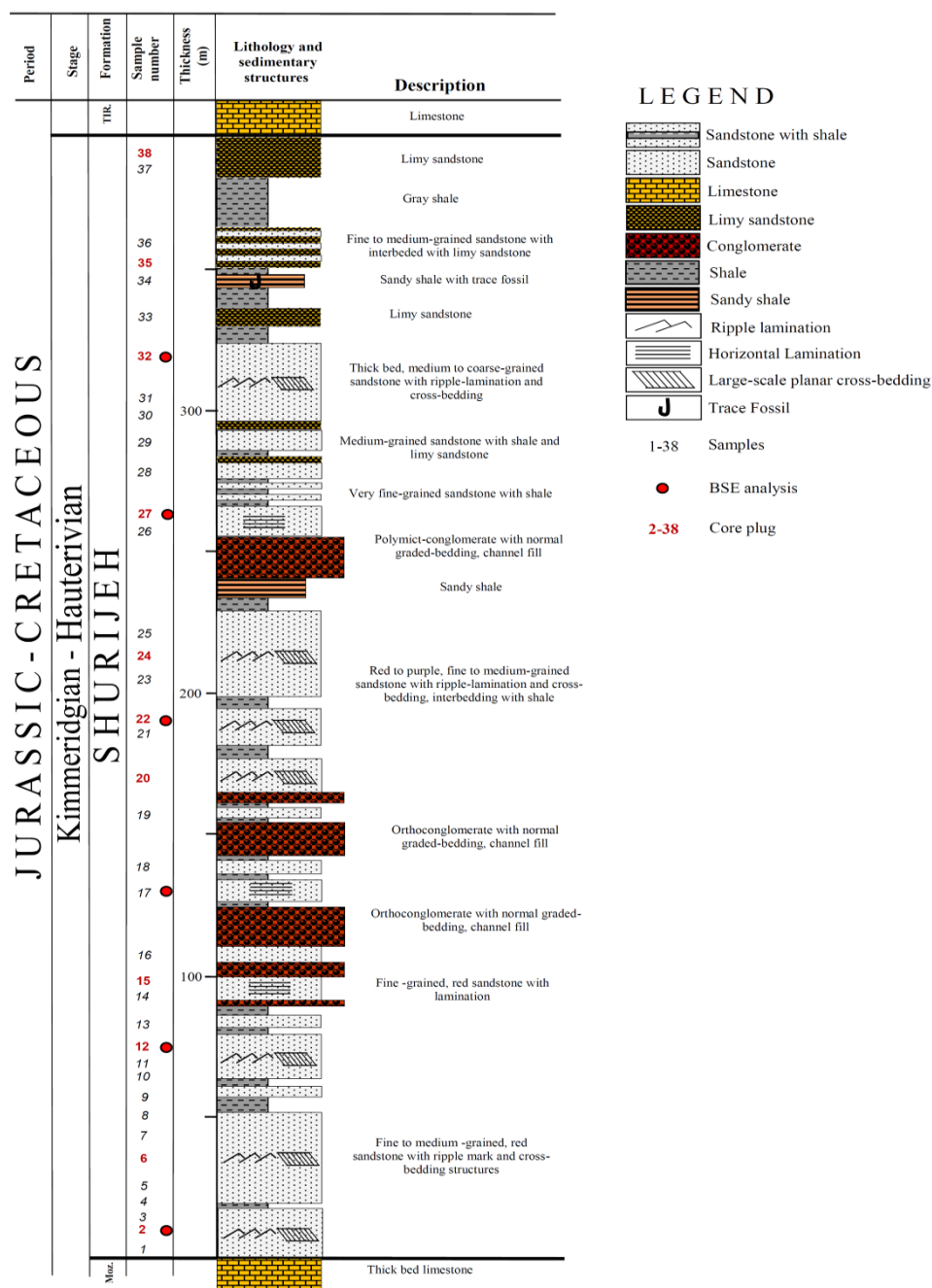
Fig 1- A) Overview of the upper part of Shurijeh Formation in the Estarkhi area; B) Upper boundary of Shurijeh Formation with Tirgan Formation; C) Lower boundary of Shourijeh Formation with Mozduran Formation.

شده است؛ بدین منظور تعداد ۶ نمونه با روکش کربن تهیه و با استفاده از میکروسکوپ الکترونی مدل LEO 450vp با ولتاژ 30kv مجهز به دستگاه EDS متصل به SEM در دانشگاه سنت مریس کانادا آنالیز شده است؛ همچنین تعداد ۱۱ نمونه به منظور تعیین تخلخل و تراوایی به آزمایشگاه دانشگاه آلبرتای کانادا ارسال شده است. در روش تعیین تخلخل و تراوایی، مغزه‌هایی با طول ۴ تا ۵ سانتی‌متر با ضخامت ۲/۵ سانتی‌متر تهیه و به مدت ۵ روز در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری می‌شوند تا کاملاً خشک شوند؛ سپس با قراردادن نمونه‌ها در محفظه دستگاه، گاز نیتروژن یا هلیوم به طور مداوم زیر فشار ۱۲۰ تا ۳۸۰ کیلوپاسکال در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد از نمونه عبور داده و میزان خروجی گاز سنجیده می‌شود. برای تعیین تراوایی از گاز نیتروژن در شرایط خلأ و برای تعیین تخلخل از گاز هلیوم استفاده شده است (Wu et al. 1998)؛ (جدول ۱).

روش پژوهش

به منظور مطالعه در زمینه‌های مختلف، از هر لایه و به فواصل معین تعداد ۶۰ نمونه ماسه‌سنگی برداشت شد که برای مطالعات سنگ‌شناسی از ۳۸ نمونه مقطع نازک تهیه شده است (شکل ۳)؛ علاوه بر این به همین تعداد، نمونه‌های آغشته به ماده رنگی آبی برای مطالعات تخلخل تهیه شده است. برای آنالیز مودال نمونه‌های ماسه‌سنگی، به منظور مطالعات سنگ‌شناسی، از روش نقطه‌شماری 1996 Gazzi استفاده شده است. در این روش در هر مقطع نازک تعداد ۵۰۰ نقطه با میکروسکوپ پلاریزان مدل Nikon E200 شمارش شده است و ماسه‌سنگ‌ها براساس طبقه‌بندی Folk 1980 نام‌گذاری شده‌اند.

برای مطالعات دقیق‌تر و شناخت عناصر که به تشخیص دقیق کانی‌های تشکیل‌دهنده ماسه‌سنگ‌ها منجر می‌شود، از روش آنالیز عنصری نقطه‌ای با دستگاه EDS کمک گرفته



شکل ۳- برش چینه‌شناسی سازند شوريجه در منطقه اسطرخی (برای موقعیت برش به شکل ۱B مراجعه شود).

Fig 3- Stratigraphy section of the Shurijeh Formation in the Estarkhi area (for section location see Fig 1B).

رسوبات این توالی را شامل شده است که در این پژوهش فقط ماسه‌سنگ‌های سازند شوريجه مطالعه شده‌اند.

اجزای تشکیل‌دهنده ماسه‌سنگ‌ها براساس مشاهدات میکروسکوپی شامل کوارتز، فلدسپات، خرده‌سنگ‌های آذرین، رسوبی (چرت، ماسه‌سنگ، کربناته)، دگرگونی و کانی‌های

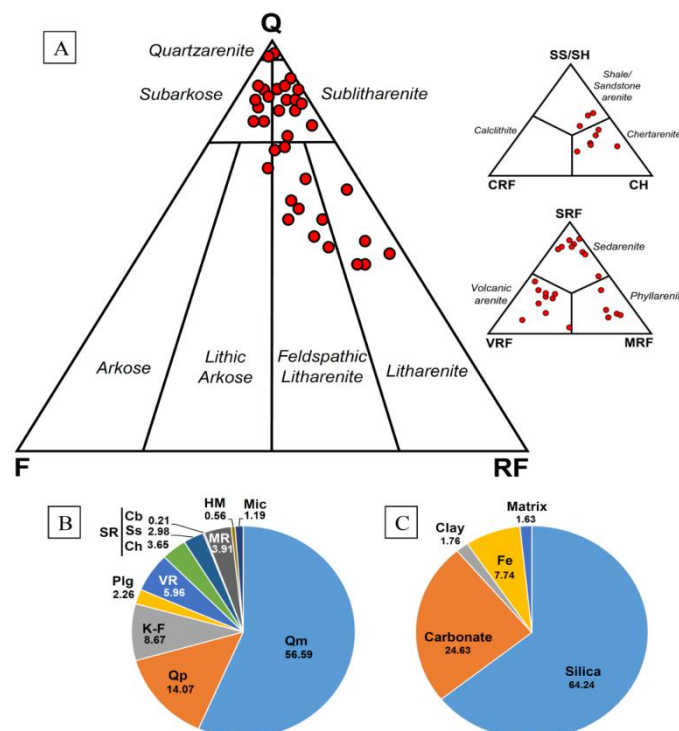
یافته‌های پژوهش
پetroگرافی

طی مطالعات صحرایی و پetroگرافی سه نوع رخساره کنگلومرایی، ماسه‌سنگی، شیلی و به‌طور جزئی کربناته شناسایی شده است. رخساره‌های ماسه‌سنگی و شیلی عمده

۶۴/۲ درصد، کربنات با میانگین ۲۴/۶ درصد (به‌طور عمده شامل کلسیت و دولومیت)، اکسید آهن با میانگین ۷/۷ درصد و کانی‌های رسی با میانگین ۱/۶ درصد است (جدول ۱؛ شکل ۴C).

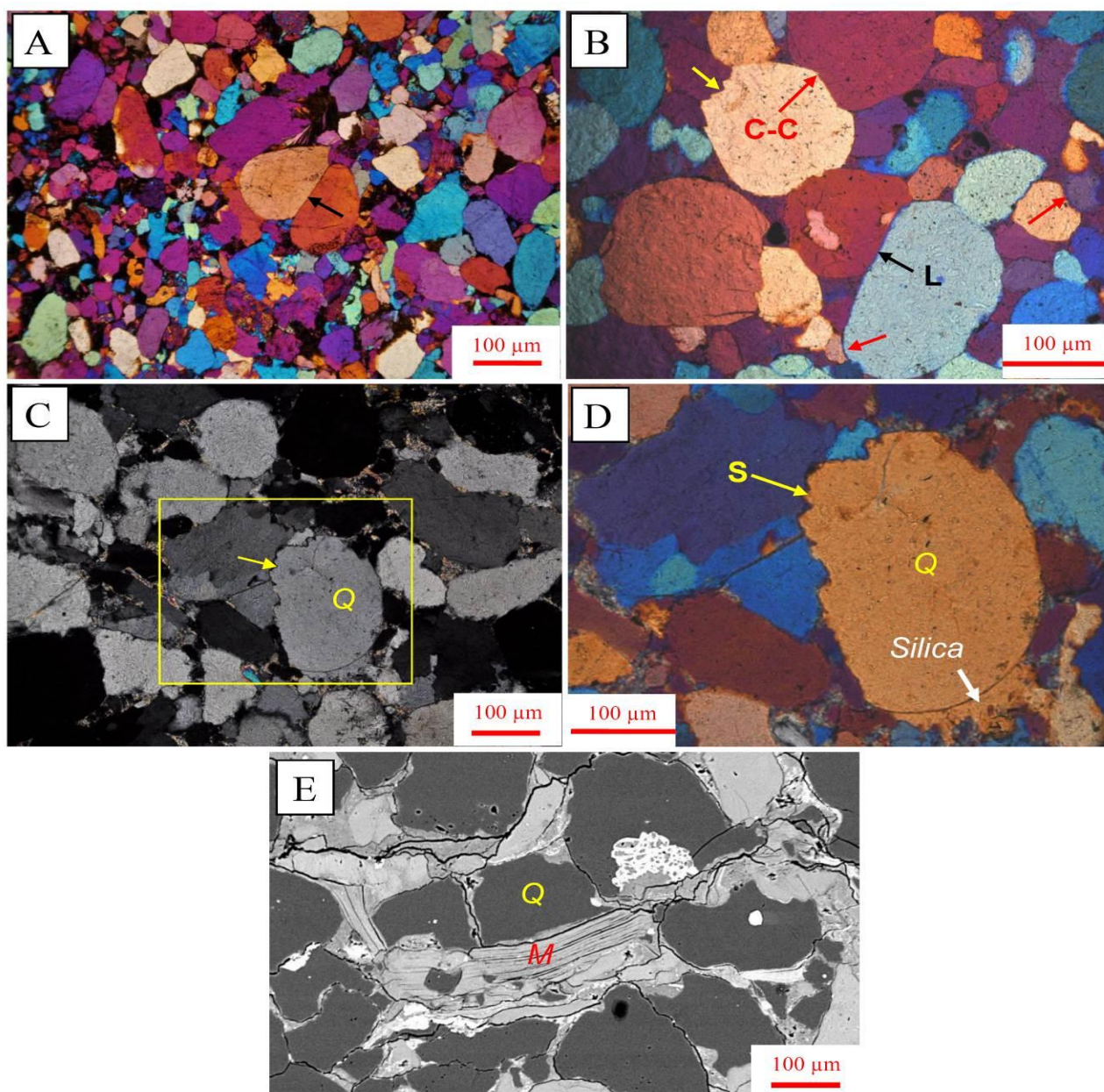
اندازه دانه‌ها در ماسه‌سنگ‌های مطالعه‌شده متغیر است و از خیلی دانه‌ریز تا دانه‌درشت (۰/۶۲۵ تا ۰/۵ میلی‌متر) با گردش‌دگی خوب تا زاویه‌دار تغییر می‌کند (شکل ۵A, B, C). بعضی از دانه‌های کوارتز نیز کرویت بالا دارد که ممکن است نتیجه حمل طولانی‌مدت باشد (شکل ۵B, C). جورشدگی دانه‌ها نیز از ضعیف تا خوب تغییر می‌کند (شکل ۵A, B). ماتریکس با میانگین ۱/۶ درصد در بعضی نمونه‌ها به‌طور جزئی شناسایی شده است، اگرچه بسیاری از نمونه‌ها فاقد آن هستند. بنا بر نتایج حاصل عمده ماسه‌سنگ‌های این سازند بلوغ بافتی میچور تا ساب میچور دارند و به‌طور جزئی سوپر میچور هستند.

فرعی (زیرکان، ترکیبات آهن، تورمالین) است. دانه‌های کوارتز میانگین ۶۹/۹ درصد (کوارتز تک‌بلوری، ۵۶٪؛ کوارتز چندبلوری، ۱۳/۹٪) دارد. از دیگر دانه‌های اصلی شناسایی‌شده، فلدسپات با میانگین ۱۰/۸ درصد (فلدسپات پتاسیم‌دار، ۸/۶٪؛ پلاژیوکلاز، ۲/۲٪) است. عمده خردسنگ‌های شناسایی‌شده از نوع آذرین (به‌طور عمده اسیدی) با میانگین ۵/۹ درصد، رسوبی با میانگین ۶/۸ درصد (چرت، ۵/۶٪؛ ماسه‌سنگ، ۳٪؛ کربناته، ۰/۲٪) و دگرگونی ۳/۹ درصد است. کانی‌های گروه میکا (۱/۲٪) همانند بیوتیت و مسکویت، و کانی‌های سنگین (۰/۵٪) در نمونه‌های مطالعه نیز شناسایی شده‌اند (جدول ۱، شکل ۴B). براساس نتایج حاصل و نام‌گذاری Folk 1980، عمده ماسه‌سنگ‌ها از نوع ساب لیت آرنایت، ساب آرکوز، فلدسپاتیک لیت آرنایت، لیت آرنایت (ولکانیک آرنایت، چرت آرنایت، سنداستون آرنایت) و به‌طور جزئی کوارتز آرنایت است (شکل‌های ۴A؛ ۵B؛ ۶). سیمان موجود در این ماسه‌سنگ‌ها از نوع سیلیس با میانگین



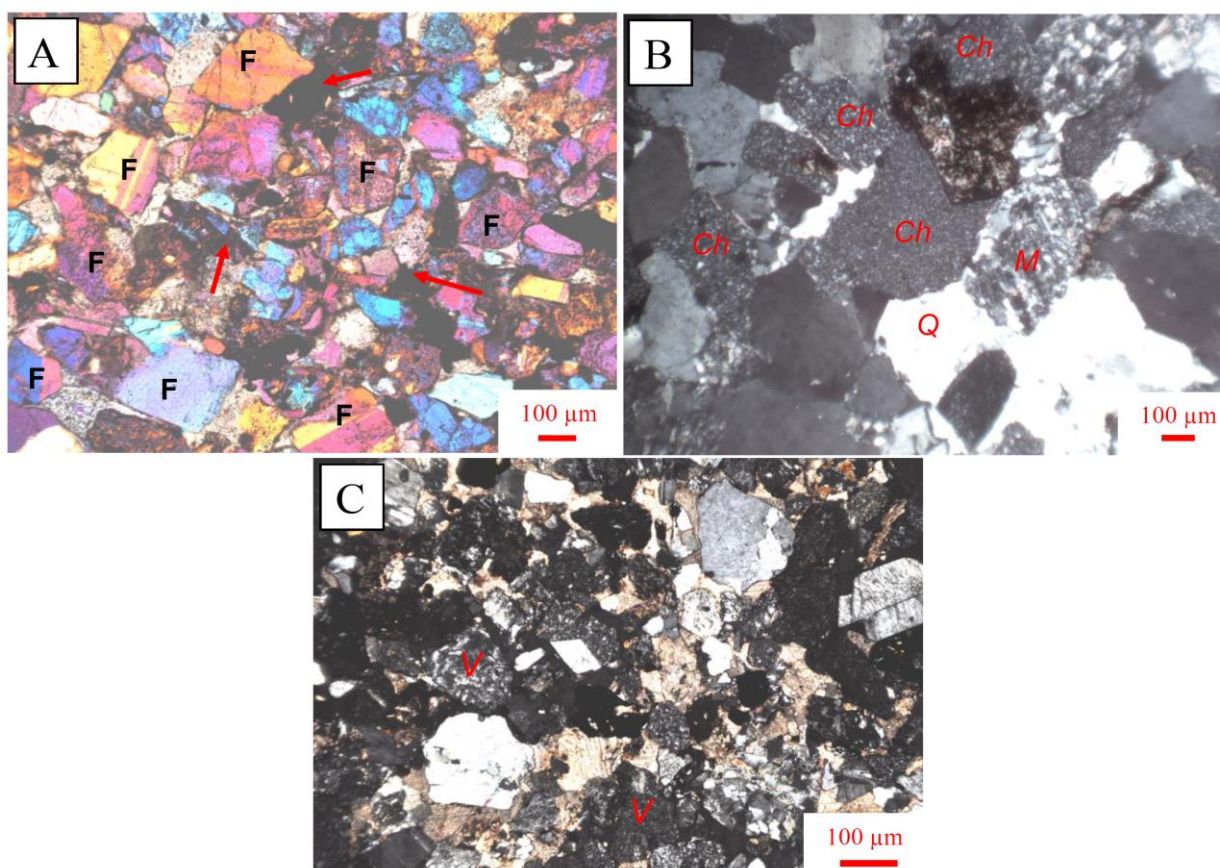
شکل ۴- A) انواع ماسه‌سنگ‌های سازند شورجه در منطقه اسطرخی براساس طبقه‌بندی Folk 1980؛ B) Composition of major grain types of Shurijeh sandstones on average in terms of percentage؛ C) Cement types on average in terms of percentage.

شکل ۴- A) انواع ماسه‌سنگ‌های سازند شورجه در منطقه اسطرخی براساس طبقه‌بندی Folk 1980؛ B) Composition of major grain types of Shurijeh sandstones on average in terms of percentage؛ C) Cement types on average in terms of percentage.



شکل ۵- A) جورشدگی ضعیف با سیمان اکسید آهن؛ تماس طولی با پیکان سیاه مشخص شده است. B) ماسه‌سنگ کوارتز آرنایت با جورشدگی ضعیف و دانه‌های گردشده با کرویت نسبتاً زیاد؛ وجود تماس‌های محدب-مقعر (پیکان قرمز)، مضرس (پیکان زرد) و طولی (پیکان سیاه) حاکی از فشردگی زیاد است. C) وجود دانه‌های کوارتز گردشده با کرویت زیاد؛ پیکان زرد تماس مضرس در اثر فشردگی زیاد را نشان می‌دهد. D) بزرگنمایی بالا از قسمت زرد در شکل C؛ سیمان رورشدی در قسمت پایین دانه کوارتز مشاهده می‌شود. E) تغییر شکل میکا؛ بین دانه‌های سخت کوارتز فشرده شده است. Q: کوارتز؛ M: میکا؛ L: تماس طولی؛ C-C: تماس محدب-مقعر؛ S: تماس مضرس؛ تصاویرهای A, B, D از تیغه λ استفاده شده، تصویر C در نور پلاریزه و تصویر E با روش BSE تهیه شده است.

Fig 5- A) Poor-sorted with Fe-Oxid cement; arrow showing elongate contact. B) Poor-sorted quartzarenite sandstones, with rounded grains and relatively high sphericity; the presence of convex-concave (red arrow), sutured (yellow arrow) and elongated (black arrow) contacts indicate high compaction. C) Existence of rounded quartz grains with high sphericity; yellow arrow showing sutured contact due to high; D) closeup of yellow box in C; overgrowth cement is visible at the lower part of quartz grain. E) Deformed mica, compacted between resistant quartz grains (Q: quartz; M: mica; L: elongated contact; C-C: concave-convex contact; S: sutured contact; A, B and D used λ wedge, E taken under cross-polarized light, and E used BSE).



شکل ۶- تصاویر میکروسکوپی ماسه‌سنگ‌های سازند شوريجه در منطقه اسطرخی: (A) ماسه‌سنگ ساب آرکوز؛ سیمان اکسید آهن پرکننده حفره‌های بین دانه‌ها (پیکان)، بعضی از دانه‌های فلدسپات نشان داده شده‌اند. (B) ماسه‌سنگ چرت آرنایت؛ دانه‌های چرت قابل مشاهده‌اند. سیمان سیلیسی بسیاری از حفره‌های بین دانه‌ها را پر کرده است. خرده‌سنگ‌های دگرگونی مشهودند. (C) ماسه‌سنگ ولکانیک آرنایت با سیمان کربناته (F: فلدسپات؛ Ch: چرت؛ V: خرده‌سنگ آذرین؛ M: خرده‌سنگ دگرگونی؛ تصویر A از تیغه λ استفاده شده است، و تصویرهای B و C در نور پلاریزه تهیه شده‌اند).

Fig 6- Photomicrographs of Shurijeh sandstones in the Estarkhi area: A) Subarkose sandstone; Fe-oxide pore-filling (arrow), some of feldspar grains are showing. B) Chertarenite sandstone; chert grains are visible. Silica cement fills most intergranular pores. Metamorphic rock fragments are visible. C) Volcanicarenite sandstone with carbonate cement (F: feldspar; Ch: chert; V: volcanic rock fragment; M: metamorphic rock fragment; A used λ wedge, B and C taken under cross-polarized light).

Yerino and Maynard 1984، نزدیک به مناطق حواشی

غیرفعال (TE) و امتداد لغز (SS) است.

جایگاه تکتونیکی ماسه‌سنگ‌های شوريجه در منطقه روستای آبگرم در شرق حوضه را نیز پژوهشگرانی چون Golafshani et al. 2014 مطالعه کرده‌اند. آنها براساس داده‌های پتروگرافی و ژئوشیمیایی کوهزایی چرخه مجدد، حاشیه غیرفعال قاره‌ای را جایگاه تکتونیکی رسوبات شوريجه تعیین کرده‌اند که با محدوده‌های تعیین‌شده در این پژوهش نسبتاً همخوانی دارد.

براساس نتایج حاصل از سنگ‌شناسی (جدول ۱) و با

استفاده از نمودارهای Dickinson et al. 1983 و Yerino and

Maynard 1984، وضعیت تکتونیکی سنگ‌های منشأ رسوبات

سازند شوريجه تا حدی قابل تخمین است (شکل ۷)؛ اگرچه

برای تعیین وضعیت تکتونیکی و منشأ رسوبات به

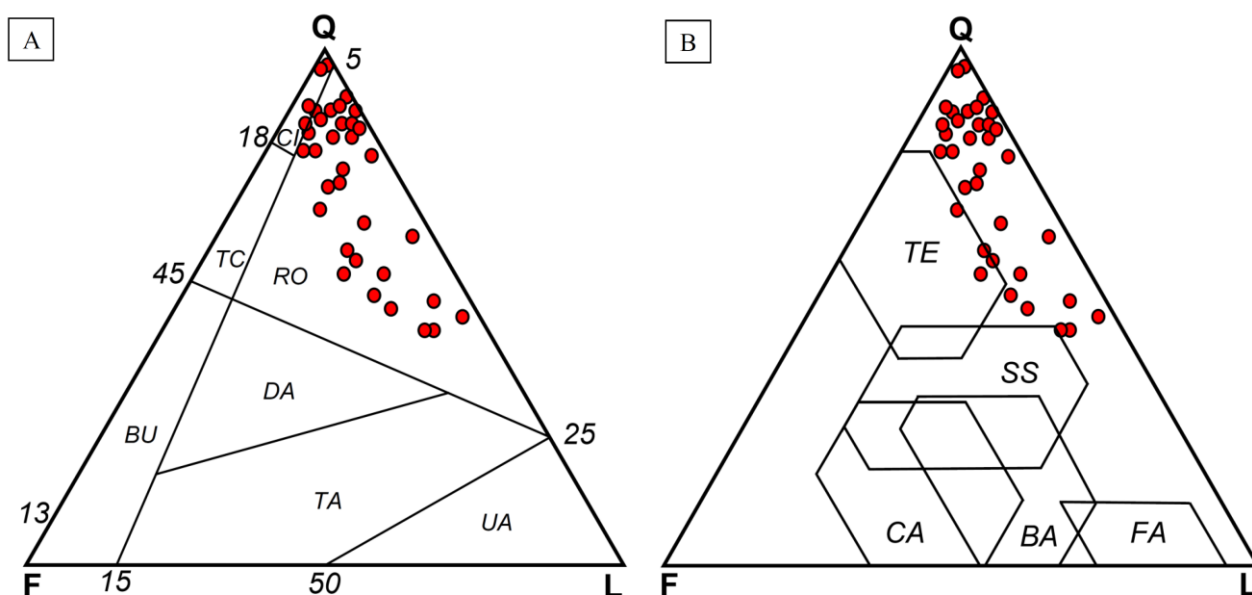
آزمایش‌های دقیق‌تر ژئوشیمیایی نیاز است که موضوع این

نوشتار نیست؛ بنابراین با استفاده از درصد کوارتز، فلدسپات و

خرده‌سنگ‌ها، موقعیت احتمالی تکتونیکی براساس نمودار

Dickinson et al. 1983 مربوط به مناطق درون کراتونی

(CI) و کوهزایی با چرخه مجدد (RO) و براساس نمودار



شکل ۷- منشأ تکتونیکی ماسه‌سنگ‌های سازند شوریهجه؛ (A) براساس تقسیم‌بندی‌های Dickinson et al. 1983؛ (B) Yerino and Maynard (1984).

Fig 7- Tectonic provenance classification of Shurijeh sandstones: A) Dickinson et al. (1983); B) Yerino and Maynard (1984).

CI: craton interior; TC: transitional continental; BU: basement uplift; RO: recycled orogeny; DA: dissected arc; TA: transitional arc; UA: undissected arc; QR: quartzose recycled; MZ: mixed zone; TR: transitional recycled; LR: lithic recycle; TE: trailing edge (passive margin); FA: fore arc to island arc; BA: back arc to island arc; CA: continental-margin arc; SS: strike-slip.

سیمانی شدن، شکستگی دانه‌های سخت، تغییر شکل دانه‌های نرم، انحلال فشاری، انحلال و تشکیل کانی‌های جزئی درج‌ازا شده و هریک از رخدادهای بالا در کیفیت مخزنی سازند به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم تأثیرگذار بوده است.

رخدادهای دیازنتیکی

ماسه‌سنگ‌های سازند شوریهجه متأثر از عوامل فیزیکی و شیمیایی بوده که خود باعث ایجاد رخدادهای مختلف دیازنتیکی همانند فشردگی (فیزیکی و شیمیایی)،

جدول ۱- اجزای تشکیل‌دهندهٔ ماسه‌سنگ‌های سازند شورجه، منطقهٔ اسطرخی: در جدول زیر فقط از اجزای تشکیل‌دهنده نمونه‌هایی آورده شده است که به روش نقطه‌شماری مطالعه شده‌اند. درصد دانه‌ها و سیمان‌ها به‌طور مجزا محاسبه شده است.

Table 1- Components of sandstones of Shurijeh Formation, in the Estarkhi area: The table below shows only the components of the samples that have been studied by point counting method. Percentage of grains and cements are calculated separately.

Sample	Thickness (m)	Q		Feldspars		VRF	SRF			MRF	H.M.	Mica	Sum	Cements				Matrix	Sum	Thin section ψ (%)	Core plug ψ (%)	Perm. (md)
		Qm	Qp	%F	%G		Ch	Sa	Ch					Silica	Carb	Clay	Fe					
33	300	40	14	8	1	13	5	3	3	5	1	0	100	20	65	1	5	0	100	2.16	0.02	0.21
37	383	30	15	20	0	10	8	5	0	10	1	1	100	10	78	2	4	6	100	0.91		
36	370	45	12	15	2	6	5	3	0	8	0	4	100	60	40	0	0	100	1.33			
35	350	40	19	10	1	15	5	0	0	10	0	0	100	55	40	1	4	0	100	2.83	1.3	0.39
34	345	48	13	16	2	7	2	5	0	7	0	0	100	55	29	5	11	0	100	0.66		
33	337	14	10	1	0	10	5	7	0	10	1	3	398	13	75	0	7	5	100	6.66		
32	325	74	5	6	1	3	2	1	0	2	1	0	100	80	12	0	8	0	100	12.25	7.9	3.83
31	305	81	15	2	0	1	0	0	0	0	0	1	100	74	5	2	19	0	100	15.7		
30	300	44	17	17	3	6	5	0	1	5	1	1	100	80	20	0	0	0	100	18.25		
29	280	71	11	13	0	2	1	0	0	2	0	0	100	70	30	0	0	0	100	12.33		
28	273	44	15	4	0	7	9	11	0	6	1	3	100	30	52	0	13	0	100	14.16		
27	265	61	12	12	1	2	5	2	0	2	1	2	100	76	18	0	5	1	100	15.7	10.5	7.37
26	260	45	19	5	1	10	6	4	2	5	1	2	100	33	50	2	15	0	100	9.33		
25	230	47	15	19	4	10	5	0	0	0	0	0	100	80	10	1	8	1	100	17.16		
24	220	60	16	4	0	5	6	3	1	3	0	2	100	35	60	0	5	0	100	12.25	9.16	8.03
23	210	63	15	5	7	1	2	4	0	0	2	1	100	39	17	6	16	2	100	9.66		
22	190	40	30	13	2	2	4	5	0	2	0	2	100	64	31	0	5	0	100	10.33	11.3	7.09
21	185	66	13	5	8	2	1	5	0	0	0	0	100	60	40	0	0	0	100	8.7		
20	170	38	13	10	0	15	5	5	0	10	1	3	100	72	18	0	8	2	100	12.3	14.2	12.34
19	165	40	20	7	0	19	6	0	0	5	1	2	100	60	21	0	19	0	100	10.12		
18	135	60	20	9	4	0	3	1	0	3	0	0	100	79	6	0	10	5	100	7.02		
17	128	42	16	15	7	0	5	5	0	7	1	2	100	90	10	0	0	0	100	11.16		
16	110	73	9	1	0	1	0	11	0	4	0	1	100	81	7	5	5	2	100	5.73		
15	95	36	20	13	4	5	5	3	0	6	1	2	100	70	10	13	0	7	100	9.66	6.85	3.41
14	90	70	15	2	0	4	1	6	0	2	0	0	100	30	50	14	0	6	100	7.48		
13	80	65	17	3	4	2	1	1	0	2	0	0	100	73	3	2	3	9	100	6.3		
12	78	67	8	6	1	10	5	0	0	1	2	0	100	81	16	1	2	0	100	12.33	8.43	3.37
11	75	68	10	10	4	3	0	0	0	5	0	0	100	80	5	2	13	0	100	9.16		
10	72	75	13	4	0	2	5	0	0	0	1	0	100	70	10	2	15	3	100	12.7		
9	60	67	10	6	1	6	2	3	0	2	0	3	100	90	5	0	5	0	100	8.4		
8	50	52	15	10	4	10	0	0	0	5	2	2	100	76	5	1	16	2	100	9.08		
7	47	63	10	9	3	0	5	5	0	3	1	1	100	80	15	0	5	0	100	15.1		
6	40	50	10	10	5	10	5	5	0	5	0	0	100	75	20	0	5	0	100	12.12	9.3	2.01
5	28	60	10	10	7	5	5	0	0	0	0	3	100	70	20	0	10	0	100	13.3		
4	20	75	12	5	1	5	0	0	0	0	0	2	100	70	23	0	5	2	100	9.13		
3	15	39	13	5	5	6	3	2	0	5	0	2	100	80	5	6	9	0	100	10.65		
2	8	71	8	4	2	2	5	2	0	5	1	0	100	73	15	0	12	0	100	7.9	5	1.97
1	1	83	14	2	0	0	0	0	1	0	0	0	100	82	0	1	17	0	100	11.4		
Average		66.68	14.07	8.87	2.28	6.96	3.86	2.88	0.21	3.81	0.68	1.18	64.24	24.63	1.76	7.74	1.63	10.05	7.68	4.34		

فشردگی و شکستگی

فشردگی در ماسه‌سنگ‌های شوربچه به دو صورت مکانیکی و شیمیایی تأثیرگذار بوده است. فشارهای مکانیکی واردشده تأثیراتی را بر دانه‌ها یا تمام سنگ اعمال کرده است. فشارهای مکانیکی علاوه بر فرورفتن دانه‌ها در یکدیگر و ایجاد تماس‌های مختلف یا تغییر شکل آنها، سبب شکستگی در بسیاری از دانه‌های سخت همانند کوارتز و فلدسپات‌ها شده است. در بیشتر مواقع این شکستگی‌ها با سیمان سیلیسی، کربناته یا اکسید آهن پر شده‌اند (شکل AC, D). فشارهای مکانیکی علاوه بر شکستگی دانه‌های سخت سبب تغییر شکل دانه‌های انعطاف‌پذیر مانند میکا نیز شده است (شکل ۵E). فشردگی شیمیایی باعث فرورفتن دانه‌ها در یکدیگر شده و به ایجاد تماس‌های طولی، محدب-مقعر و مضرس انجامیده است (شکل ۵). تماس‌های محدب-مقعر و مضرس نشان‌دهندهٔ انحلال فشاری است که در مراحل پیشرفته‌ای از فشردگی روی داده است.

سیمانی شدن

سیلیس، کربنات، ترکیبات اکسید آهن و کانی‌های رسی از عمده‌ترین سیمان‌ها هستند که طی مراحل دیاژنتزی باعث پرشدن حفره‌ها و شکستگی‌های ماسه‌سنگ‌های سازند شوربچه شده‌اند (جدول ۱؛ شکل ۴C).

الف) سیمان سیلیسی: سیلیس با میانگین $64/24\%$ ، از سیمان‌های اصلی محسوب می‌شود که به‌صورت رورشدی و پرکنندهٔ حفره‌ها شناسایی شده است. سیمان رورشدی با هالهٔ رسی و ترکیبات اکسید آهن از دانهٔ اصلی تمیز داده می‌شود (شکل‌های ۸A؛ ۵D).

ب) سیمان کربناته: سیمان کربناته با میانگین $24/63\%$ به‌مثابهٔ یکی از سیمان‌های اصلی در ماسه‌سنگ‌های سازند شوربچه است؛ اگرچه بعضی نمونه‌ها این نوع سیمان را ندارند (شکل ۸). کلسیت و دولومیت از کانی‌های کربناته در این ماسه‌سنگ‌ها محسوب می‌شود. کلسیت به‌طور عمده در بیشتر نمونه‌ها که سیمان کربناته دارند به شکل بلورهای شکل‌دار ظاهر شده است. این نوع سیمان پرکنندهٔ حفره‌هاست

(شکل AC). بلورهای دولومیت نیز در بیشتر مواقع به‌صورت ریزبلور و درشت‌بلور (شکل‌دار) ظاهر شده‌اند و ثانویه هستند (شکل‌های ۸D و ۹A). وجود دولومیت حاصل پدیدهٔ جاننشینی است که طی مراحل دیاژنتز، جاننشین کلسیت شده است.

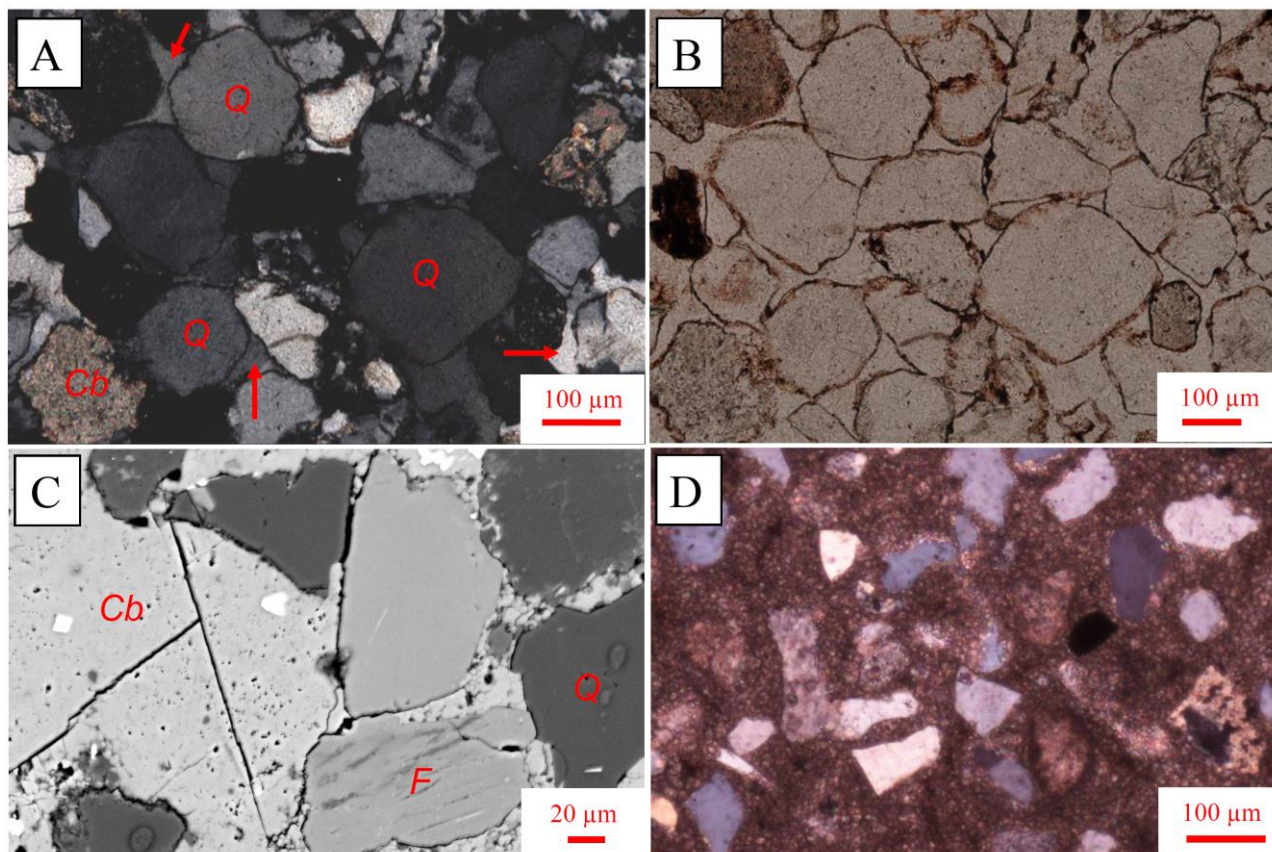
پ) سیمان ترکیبات اکسید آهن: ترکیبات اکسید آهن (هماتیت و مگنتیت) با میانگین $7/74\%$ معمولاً پرکنندهٔ حفره‌ها و شکستگی‌هاست (جدول ۱؛ شکل ۴C)؛ البته در بسیاری از نمونه‌ها اکسید آهن به‌صورت هاله‌ای اطراف دانه‌ها را فراگرفته که احتمالاً نشانهٔ منشأ اولیهٔ رسوبات و محیط اکسیدان است (شکل ۷A, B). بلورهای شکل‌دار مگنتیت نیز در بعضی نمونه‌ها طی دیاژنتز تشکیل شده‌اند (شکل ۸B).

ت) سیمان کانی‌های رسی: در ماسه‌سنگ‌های شوربچه، سیمان رسی با میانگین $1/76\%$ نسبت به دیگر انواع سیمان‌ها فراوانی کمتری دارد (جدول ۱؛ شکل ۸B). کلریت از عمده کانی‌های رسی شناسایی شده در این ماسه‌سنگ‌ها محسوب می‌شود. این کانی به‌طور عمده در جازا بوده و طی مراحل مختلف دیاژنتیکی در اثر آلتزه شدن کانی‌های ناپایدار تشکیل شده است.

ث) کانی‌های جزئی در جازا: کانی‌های در جازا شامل فلدسپات، آلیتی شدن و روتیل است. آلیتی شدن دانه‌های فلدسپات را برخی پژوهشگران (Milliken 1988; González-) (Acebrón et al. 2010; Poursoltani and Gibling 2011) به‌مثابهٔ یک رخداد دیاژنتیکی گزارش کرده‌اند. این رخداد در بعضی ماسه‌سنگ‌های سازند شوربچه شناسایی شده است (شکل AC). چنین به نظر می‌رسد که این رخداد در اثر وجود سیالات حاوی یون سدیم، آلیت جاننشین دانهٔ پتاسیم فلدسپات شده است. Walker 1984 معتقد است آلیت به‌طور مستقیم جاننشین فلدسپات می‌شود؛ در صورتی که تصور Milliken 1989 بر این است که پس از انحلال فلدسپات، آلیت جایگزین آن می‌شود. در نهایت مکانیزم انحلال و ته‌نشست، عوامل اصلی آلیتی شدن فلدسپات‌ها طی مراحل دیاژنتز محسوب می‌شوند (Saigal et al. 1988; Ramseyer et al. 1992).

فلدسپات تشکیل شده است. تشکیل این کانی در فضای کافی و با حضور سیالات غنی از پتاسیم صورت گرفته است (eg. (De Ros 1998; Poursoltani et al. 2019)؛ (شکل ۸E).

کانی روتیل نیز به‌طور جزئی در درزه‌ها و فضاها حاصل از انحلال در بعضی نمونه‌ها شناسایی شده است (شکل ۸F). کانی فلدسپات نیز به‌صورت رورشدی روی بعضی از دانه‌های



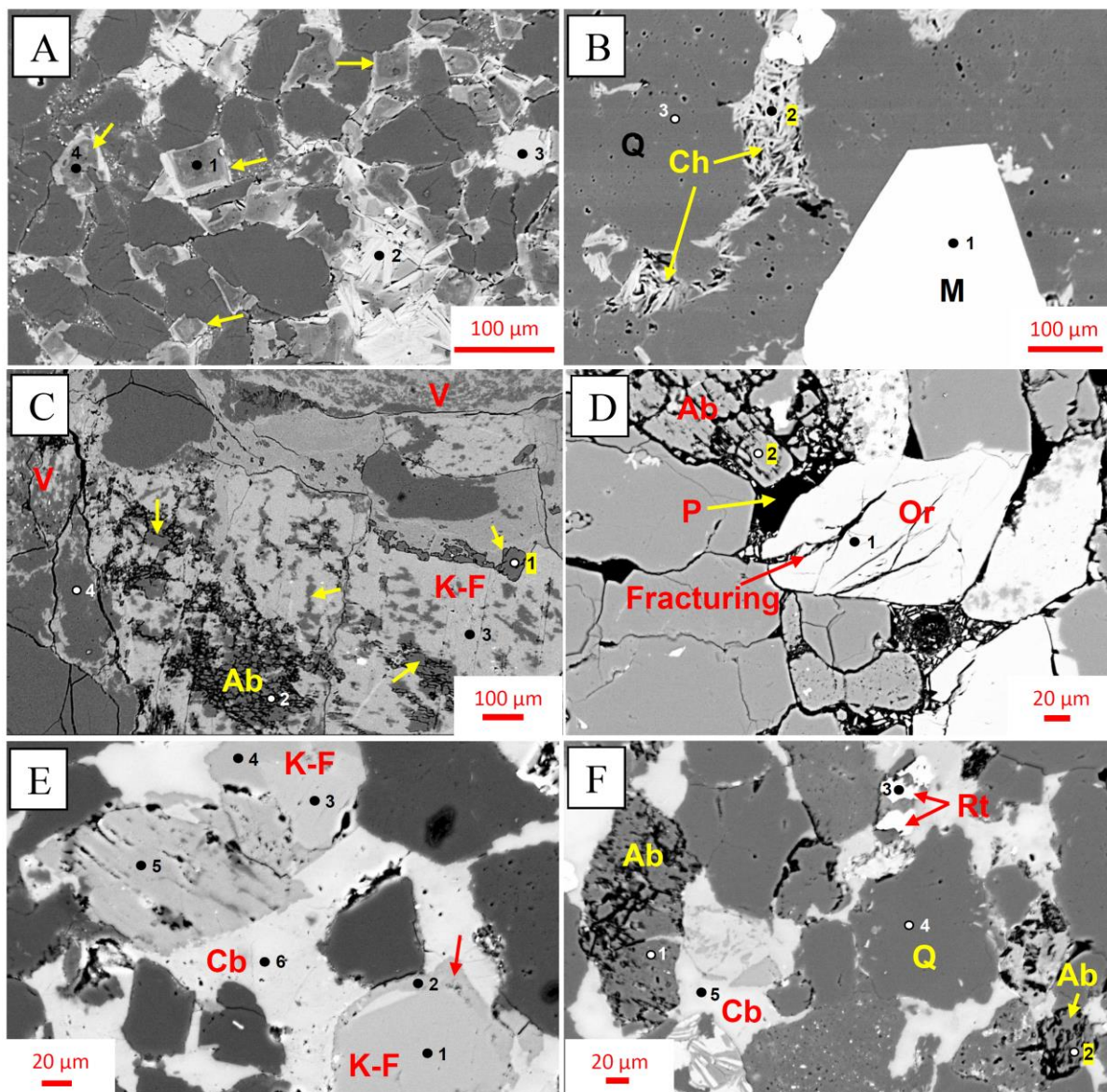
شکل ۸- انواع سیمان در ماسه‌سنگ‌های سازند شوريجه: A, B سیمان سیلیسی پرکننده حفره‌ها (پیکان‌های قرمز) در ماسه‌سنگ ساب لیت آرنایت که با هاله‌ای از اکسید آهن از دانه‌های اصلی قابل تفکیک است. خرده‌سنگ رسوبی کربناته در پایین تصویر، گوشه‌چپ مشهود است. سیمان اکسید آهن در تصویر **B** به‌طور کامل دیده می‌شود؛ **C** سیمان کلسیت شکل‌دار پرکننده حفره‌ها؛ **D** دولومیت ریزبلور به‌مثابه سیمان کربناته در یک ماسه‌سنگ آهکی؛ دانه‌های آواری بدون تماس در سیمان شناورند؛ **Q**: کوارتز؛ **Cb**: کربنات؛ **F**: فلدسپات؛ تصویرهای **A** و **D** در نور پلاریزه، تصویر **B** در نور معمولی و تصویر **C** به روش **BSE** تهیه شده‌اند.

Fig. 8- Cement types of Shurijeh sandstones: A, B) Silica scement filling the pores (red arrows) in sublitharenite sandstone, which can be separated from the main grains by iron oxide rim. A carbonate rock fragment is visible in the lower left corner of the image. Fe-oxide cement is visible in image B. C) Euhedral calcite as a pore-filling cement. D) Microcrystalline dolomite as a carbonate cement in a limy sandstone; detrital isolated grains floating in carbonate cement. (Q: quartz; Cb: carbonate; F: feldspar; A and D taken under cross-polarized light. B taken under normal light, and C used BSE)

انحلال

بعضی ماسه‌سنگ‌ها دانه‌های کوارتز و آلبیت نیز متأثر از انحلال قرار گرفته‌اند؛ اگرچه در تمام آنها عمومیت ندارد (شکل ۸E, F). به‌طور عمده بخش‌های انحلال‌یافته با سیمان‌های مختلف پر شده است؛ اما در بعضی نمونه‌ها فضاها ایجاد شده به‌صورت تخلخل ثانویه باقی مانده‌اند.

انحلال از رخدادهای مهم است که در همه سنگ‌های رسوبی باعث ایجاد تخلخل و درنهایت افزایش توان اقتصادی آنها می‌شود. این پدیده در ماسه‌سنگ‌های شوريجه در دانه‌های ناپایدار و سیمان‌ها به‌ویژه نوع کربناته رخ داده است. در



شکل ۹- A) Euhedral dolomite crystals; B) Authigenic chlorite; euhedral magnetite crystal is visible. C) Albitization in K-feldspar grain (yellow arrows), at the upper part of image volcanic rock fragment is visible. D) Fractured feldspar, dissolution of albite and formation of intracrystalline pores. E) Authigenic feldspar overgrowths (red arrows) around detrital feldspar (red arrow); carbonate is the main cement of sandstone. F) Albite dissolution (D: dolomite; Ch: chlorite; M: magnetite; Ab: albite; V: volcanic rock fragment; P: pore; Images used BSE. Black circles and numbers on the photos showing the EDS analyses points. For analyses results see table 2).

شکل ۹- A) بلورهای شکل‌دار دولومیت؛ B) کلریت درجا، بلور شکل‌دار مگنتیت در تصویر دیده می‌شود؛ C) آلپیتی شدن دانه پتاسیم فلدسپات (پیکان‌های زرد)، در گوشه بالا تصویر خرده‌سنگ آذرین نیز مشهود است؛ D) شکستگی در دانه فلدسپات، انحلال آلپیت و ایجاد حفره‌های درون‌بلوری؛ E) سیمان رورشدی روی دانه‌های فلدسپات (پیکان قرمز)؛ کربنات سیمان عمده ماسه‌سنگ است؛ F) انحلال دانه‌های آلپیت (تصاویر به روش BSE تهیه شده‌اند. دایره‌های سیاه و اعداد روی تصاویر نقاط آنالیز به روش EDS را نشان می‌دهند. برای نتایج آزمایش به جدول ۲ مراجعه شود).

جدول ۲- نتایج آنالیزهای ژئوشیمیایی بعضی از نمونه‌های ماسه‌سنگی سازند شوربجه در منطقه اسطرخی به روش EDS.

Table 2- Results of geochemical analyzes of some sandstone samples of Shurijeh Formation in the Estarkhi area by EDS method.

Sample	Figure	Position	Mineral	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Total	
Sh12	Fig 9A	1	Dolomite	1.07			0.71	57.35	40.41				99.54	
		2	Muscovite	51.19	0.63	27.76	5.21	0.74	2.67			11.82	100.02	
		3	K-feldspar	65.74		17.78					0.46	16.01		99.99
		4	Dolomite				0.68	57.77	41.17					99.62
Sh17	Fig 9B	1	Magnetite	1.5			97.74						99.24	
		2	Chlorite	42.51		21.54	14.58	18.55			2.84		100.02	
		3	Quartz	99.1			0.61						99.71	
Sh32	Fig 9C	1	Albite	68.69		18.95			0.28	11.86	0.22		100	
		2	Albite	68.97		18.8				12.08	0.13		99.98	
		3	K-feldspar	66.1		17.84				0.27	15.78		99.99	
		4	Quartz	99.99									99.99	
Sh2	Fig 9D	1	K-feldspar	61.67		17.31	5.47			0.77	14.79		100.01	
		2	Albite	68.6		18.84			0.22	10.21	2.14		100.01	
Sh27	Fig 9F	1	Albite	69.27		18.97				11.76			100	
		2	Albite	69.2		18.56				12.24			100	
		3	Rutile	7.1	87.46	3.87	0.36			0.53		0.67	99.99	
		4	Quartz	97.78	0.73	1.02					0.47		100	
		5	Calcite				0.44		99.57				100.01	
Sh32	Fig 11A	1	K-feldspar	65.52		18.12				0.44	15.2		99.28	
		2	K-feldspar	65.91		18.73	0.3			1.64	12.96		99.54	
		3	K-feldspar	65.72		18.05				0.84	14.94		99.55	
		4	K-feldspar	68.86		18.61				0.35	12.17		99.99	
		5	K-feldspar	66.84		18.31				1.21	13.36		99.72	
		6	Calcite				0.83	1.38	97.71				99.92	
Sh22	Fig 11B	1	K-feldspar	66.29		17.84				0.46	15.42		100.01	
		2	Albite	70.21		18.4			0.2	10.87	0.13		99.81	
		3	K-feldspar	67.51		18.06				1.55	12.88		100	

تخلخل و تراوایی

به‌طور کلی دو نوع تخلخل اولیه و ثانویه در ماسه‌سنگ‌های سازند شوربجه شناسایی شده‌اند. با توجه به اینکه تخلخل اولیه به‌طور چشمگیری در اثر رخدادهای دیاژنتیکی همچون سیمانی شدن و فشردگی کاهش می‌یابد، چنین تصور می‌شود که بیشتر تخلخل موجود ثانویه بوده و در اثر رخدادهای انحلال و شکستگی طی مراحل مختلف دیاژنتیکی حاصل شده است (شکل ۹)؛ اگرچه بیشتر تخلخل‌های موجود حاصل انحلال سیمان کربناته و بعضی دانه‌هاست (e.g. Paxton et al.

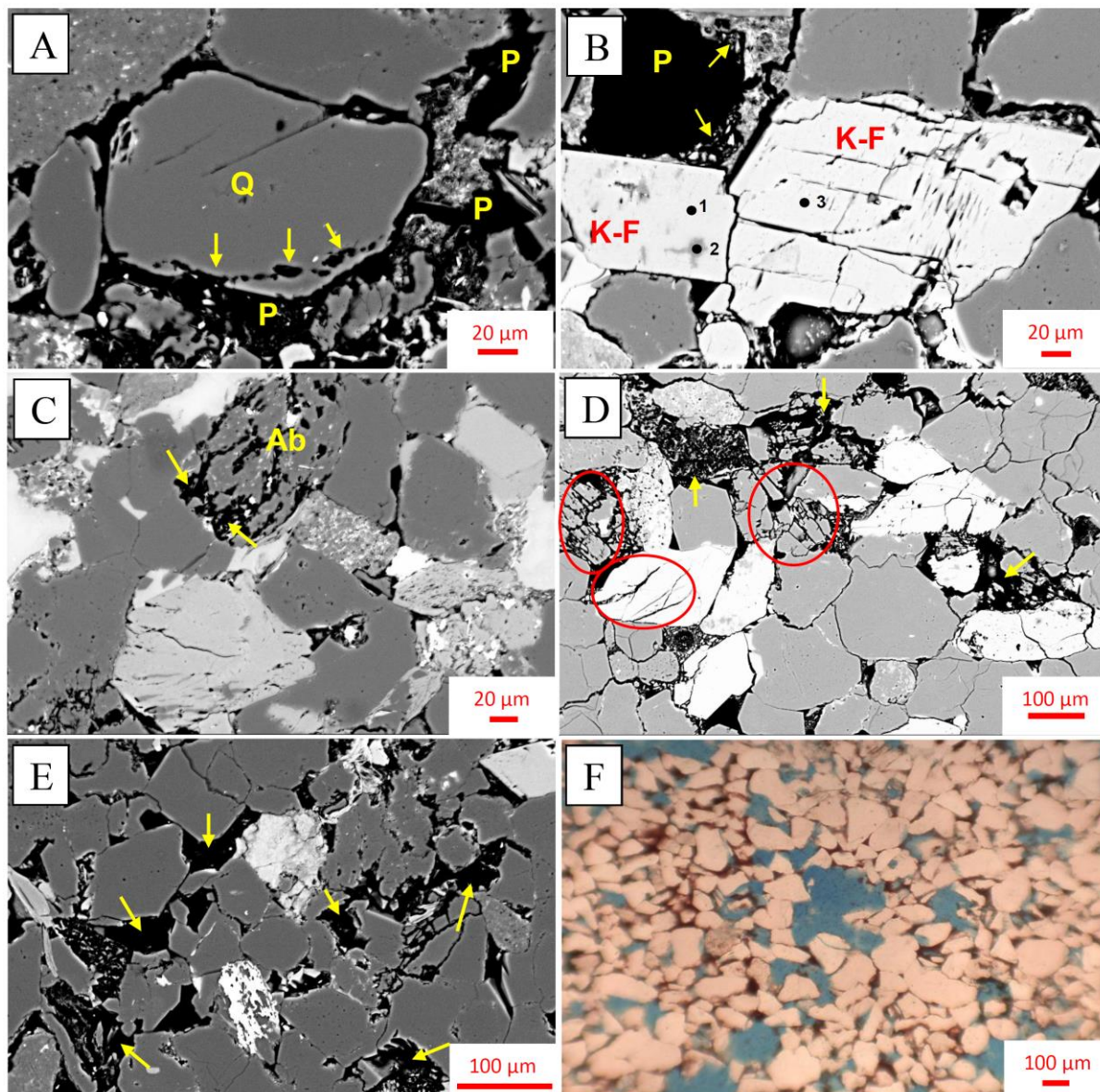
2010; Taylor et al. 2002)؛ (شکل ۹ و ۱۰). انحلال در بعضی دانه‌های کوارتز نیز روی داده، اما این رخداد آنقدر جزئی است که در میزان تخلخل تأثیر چندانی ندارد (شکل ۹A). انحلال فلدسپات‌ها درصد بسیار کمی از تخلخل را شامل شده است (شکل ۹B, C)؛ درمقابل شکستگی بیشتر مربوط به دانه‌های سخت مانند فلدسپات و کوارتز است که به‌طور چشمگیری بر میزان تخلخل افزوده است (شکل‌های ۸D و ۹C).

بنا بر اظهارات Giles and deBoer 1990 انتقال آب‌های

متئوریک و سیالات به قسمت‌های عمیق‌تر باعث گسترش تخلخل ناشی از انحلال می‌شود. فشردگی مکانیکی در مراحل مختلف دیازنتیکی سبب شکستگی دانه‌ها شده است؛ همچنین در اثر حرکات تکتونیک و بالآمدگی لایه‌ها، شکستگی دانه‌ها یا سنگ در مرحله دیازنز انتهایی روی داده است (e.g. Makowitz and Milliken 2003; Kordi et al. 2011; Poursoltani and Gibling 2011; Poursoltani et al. 2019). در نهایت چنین تصور می‌شود که عمده تخلخل‌های موجود که با سیمان پر نشده‌اند، باعث افزایش تخلخل و نفوذپذیری سنگ شده‌اند. در مقابل می‌توان احتمال داد رخداد سیمانی شدن در گلوگاهها و مجاری، عامل اصلی کاهش تخلخل مفید و تراوایی محسوب می‌شود (Moraes and De Ros 1990; Wang et al. 2018).

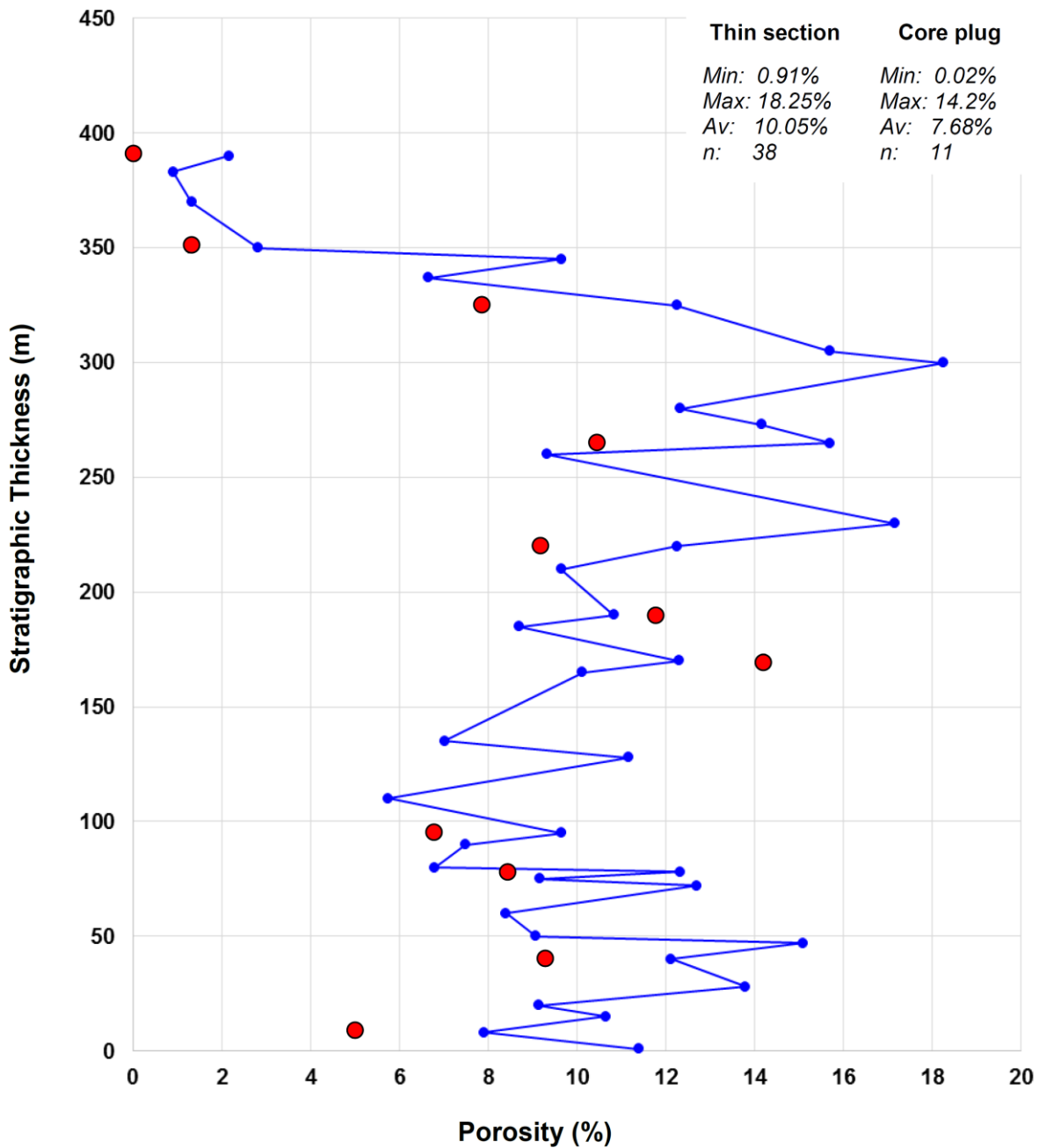
براساس مطالعات انجام شده روی مقاطع میکروسکوپی و مغزه‌های تهیه شده از ماسه‌سنگ‌های سازند شوربجه در منطقه اسطرخی نتایج زیر حاصل شده است (جدول ۱؛ شکل ۱۰). میانگین تخلخل حاصل از مطالعه مقاطع میکروسکوپی ۱۰/۰۵ درصد محاسبه شده است؛ به طوری که حداکثر تخلخل ۱۸/۲۵ درصد مربوط به ضخامت ۳۰۰ متری و حداقل تخلخل ۰/۹۱

درصد مربوط به ضخامت ۳۸۵ متری است؛ اما براساس انجام آزمایش‌های تخلخل روی مغزه‌ها، حداکثر تخلخل ۱۴/۲ درصد مربوط به ضخامت ۱۷۰ متر و حداقل تخلخل ۰/۰۲ درصد مربوط به ضخامت ۳۹۰ متری سازند بوده و میانگین تخلخل حدود ۷/۷۸ درصد تعیین شده است. در این زمینه در همین راستا کمترین حد تراوایی در برش مطالعه شده، ۰/۲۱ میلی‌داری است که به ماسه‌سنگ‌های آهکی در بخش‌های فوقانی توالی تعلق دارد و بیشترین حد تراوایی ۱۲/۳۴ میلی‌داری است که به لایه‌های ماسه‌سنگی ضخامت‌های ۱۷۰ متری تعلق دارد (شکل‌های ۳ و ۱۱). میانگین تراوایی برای این توالی ۴/۸۴ میلی‌داری تعیین شده است. با توجه به نتایج حاصل از میزان تخلخل و تراوایی و براساس توصیف کیفی North 1985 بنا به مقایسه تغییرات تخلخل و تراوایی (جدول ۱ و شکل‌های ۱۰ و ۱۱)، لایه‌های ماسه‌سنگی واقع در ضخامت‌های ۰/۷۸، ۱۷۰، ۱۹۰، ۲۲۰ و ۲۶۵ متری کیفیت مخزنی قابل قبولی در برش اسطرخی دارند؛ البته داده‌های بالا براساس مطالعات سطح الارضی است که احتمال تغییر در عمق وجود دارد.



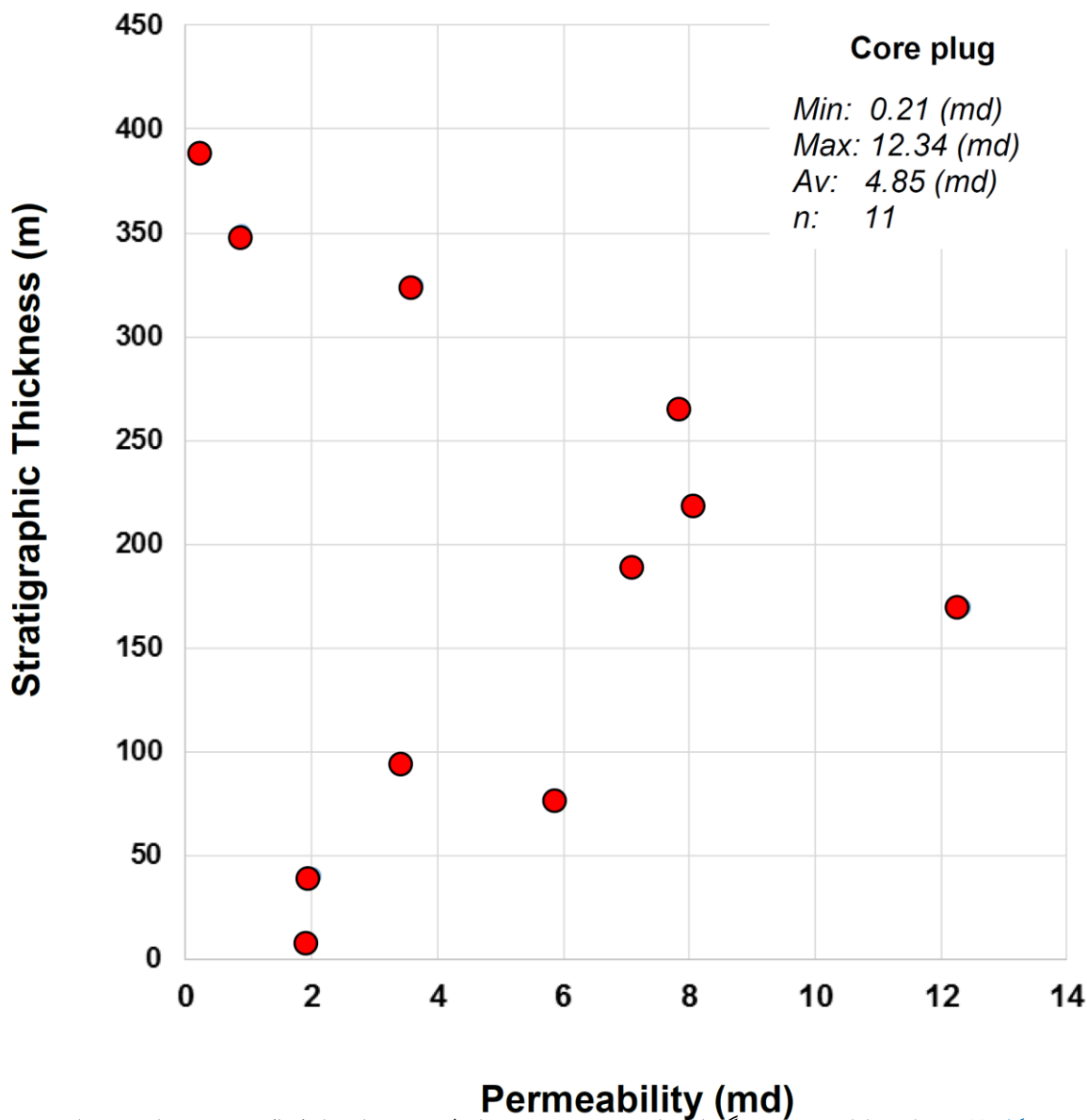
شکل ۱۰- انواع تخلخل در ماسه‌سنگ‌های سازند شوربجه، منطقه اسطرخی: (A) انحلال دانه کوارتز (پیکان‌ها)؛ (B) انحلال فلدسپات در امتداد رخ‌ها؛ تخلخل حاصل از انحلال یک خرده‌سنگ، ذرات باقی‌مانده از خرده‌سنگ در اطراف حفره مشهود است (پیکان‌ها)؛ (C) انحلال آلبیت (پیکان‌ها)؛ (D) پیکان‌ها تخلخل حاصل از انحلال و دواير قرمز شکستگی را نشان می‌دهند؛ (E) ماسه‌سنگ کوارتز آرنایت، تخلخل موجود حاصل انحلال سیمان است (پیکان‌ها)؛ (F) تخلخل بین دانه‌ای حاصل از انحلال سیمان K-F: پتاسیم فلدسپات؛ Cb: کربنات؛ P: تخلخل؛ Ab: آلبیت؛ تصاویر A, B, C, D, E به روش BSE تهیه شده‌اند و تصویر F در نور معمولی با استفاده از ماده آبی تهیه شده است. دایره‌های سیاه و اعداد روی تصاویر، نقاط آنالیز به روش EDS را نشان می‌دهند. برای نتایج آزمایش به جدول ۲ مراجعه شود).

Fig. 10- Type of porosity in the sandstones of Shurijeh Formation in the Estarkhi area: A) Dissolution of quartz (arrows). B) Dissolution of feldspar along the cleavages; The porosity resulting from dissolution of a rock fragment, the particles remaining from the rock fragment around the pore are visible (arrows). C) Dissolution of albite (arrows). D) The arrows show the porosity resulting from the dissolution and the red circles showing fracture. E) Quartzarenite sandstone, existing porosity is the result of cement dissolution (arrows). F) Intergranular porosity resulting of cement dissolution. (K-F: K-feldspar; Cb: carbonate; P: porosity; Ab: albite; A, B, C, D, E used BSE; F taken under normal light, used blue-epoxy; Black circles and numbers on the photos showing the EDS analyses points. For analyses results see table 2).



شکل ۱۱- تغییرات تخلخل در ماسه‌سنگ‌های سازند شوریهجه در برش اسطرخی؛ ضخامت از کنتاکت زیرین محاسبه شده است. دایره‌های آبی نمونه‌های مقاطع نازک و دایره‌های قرمز نمونه‌های مغزه را نشان می‌دهد.

Fig. 11- Porosity changes in sandstones of Shurijeh Formation in the Estarkhi section; the thickness is calculated from the lower contact. The blue circles showing thin sections and the red circles represent core samples.



شکل ۱۲- تغییرات تراوایی در ماسه‌سنگ‌های سازند شوربجه در برش اسطرخی؛ ضخامت از کنتاکت زیرین محاسبه شده است.

Fig. 12- Porosity changes in sandstones of Shurijeh Formation in the Estarkhi section; the thickness is calculated from the lower contact.

بحث

توالی پارازنتیکی ماسه‌سنگ‌های سازند شوربجه براساس رخدادهای دیاژنزی و شرایط وقوع آنها تفسیر شده است؛ بنابراین سه مرحله دیاژنز اولیه، دفنی عمیق و انتهایی قابل پیش‌بینی است (شکل ۱۲).

دیاژنز اولیه (Eodiagenesis)

رخدادهای مربوط به دیاژنز اولیه محدود و شامل فشردگی، سیمانی شدن (ترکیبات اکسید آهن، کربنات) و انحلال است. فشردگی: این رخداد نیز به‌طور جزئی در مرحله دیاژنز اولیه در ماسه‌سنگ‌های سازند شوربجه روی داده است. برخی پژوهشگران معتقدند فشردگی به محض رسوب‌گذاری در رسوبات از مرحله دیاژنز اولیه شروع شده است و تا مرحله دیاژنز انتهایی ادامه دارد (McBride et al. 1987; Liu 2002; Kim)

(and Lee 2003).

سیمانی شدن: سیمان ترکیبات اکسید آهن در ماسه‌سنگ‌های سازند شوربچه به اشکال مختلف شناسایی شده است. هالهٔ اکسید آهن در اطراف بعضی دانه‌ها نشانهٔ تشکیل آن طی دیاژنز اولیه و همزمان با رسوب‌گذاری بوده که حاکی از محیطی اکسیدان است (Liu 2002; Reed et al. 2005; Götte et al. 2013). البته این سیمان به صورت‌های مختلف در دیگر مراحل نیز روی داده است. تشکیل سیمان کربناته نیز به‌طور عمده در دمای بیش از ۲۰ درجهٔ سانتی‌گراد و به‌طور معمول در شرایط نزدیک به سطح روی می‌دهد که به دیاژنز اولیه منحصر است (Reed et al. 2005; Salem et al. 2005). این رخداد، یک رخداد اصلی در این مرحله محسوب می‌شود.

انحلال: احتمال وقوع رخداد انحلال در تمام مراحل دیاژنتیکی وجود دارد (Tang et al. 1997). حضور سیالات، وجود رخ بعضی کانی‌ها و درزه، دما و شرایط شیمیایی از جمله عوامل اصلی مؤثر در انحلال محسوب می‌شود (Wahab 1998; Liu 2002). مطالعات نشان داده به‌طور معمول رخداد انحلال کربنات‌ها از دیاژنز اولیه شروع شده است و حتی در دیاژنز انتهایی نیز ادامه دارد (Liu 2002; Reed et al. 2005). براساس مطالعات انجام‌شده، انحلال سیمان کربناته در ماسه‌سنگ‌های سازند شوربچه گستردگی زیادی دارد که بخشی از آن در دیاژنز اولیه رخ داده است.

دیاژنز دفنی عمیق (Mesodiagenesis)

از رخداد‌های مهمی که در دیاژنز دفنی عمیق بر ماسه‌سنگ‌های سازند شوربچه تأثیر گذاشته، سیمانی شدن (کربناته، سیلیسی، کانی‌های رسی)، کانی‌های درج‌ازا، فشردگی و شکستگی و انحلال است.

فشردگی و شکستگی: رخداد فشردگی از جمله رخداد‌های دیاژنتیکی است که به محض رسوب‌گذاری در رسوبات از مرحلهٔ دیاژنز اولیه شروع شده است و تا مرحلهٔ دیاژنز انتهایی ادامه دارد (McBride et al. 1987; Liu 2002; Kim 2002).

(and Lee 2003). افرادی مانند Dickinson, Millikan 1994 and Lee 2003 معتقدند فشردگی مکانیکی به‌طور عمده در مرحلهٔ دیاژنز دفنی عمیق روی می‌دهد. فشردگی شیمیایی که انحلال فشاری نیز نامیده می‌شود، از جمله رخداد‌های دیاژنتیکی دفنی عمیق محسوب می‌شود (Renard et al. 2000) که در ماسه‌سنگ‌های سازند شوربچه به وقوع پیوسته است. بنا بر مطالعات McBride 1989 و Schmid et al. 2004، وجود رخداد انحلال فشاری حاکی از دمای بیش از ۹۰ درجهٔ سانتی‌گراد و عمق بیش از ۲ کیلومتر بوده است که در مرحلهٔ دفنی عمیق روی می‌دهد. شکستگی دانه‌های سخت حاصل فشردگی دانه‌ها به یکدیگر بوده که به مرحلهٔ دیاژنز دفنی عمیق مربوط است (Makowitz and Milliken 2003; Baron and Parnell 2007; Zhang et al. 2012; Poursoltani et al. 2019).

سیمانی شدن: براساس تنوع ترکیبی و شرایط مختلف تشکیل همانند دما، عمق و زمان هریک از انواع سیمان به‌مثابهٔ یکی از رخداد‌های مهم دیاژنتیکی، می‌توان مراحل احتمالی دیاژنز را تفسیر کرد. نتایج پتروگرافی ماسه‌سنگ‌های سازند شوربچه نشان‌دهندهٔ وجود سیمان سیلیسی به صورت‌های مختلف (پرکنندهٔ حفره‌ها و رورشدی) است. زمان، دمای بالا، وجود سیالات اشباع از یون سیلیس و فضای مناسب از عوامل مؤثر در تشکیل سیمان سیلیس محسوب می‌شوند (Goldstein 2002 and Rossi). تشکیل این نوع سیمان به‌طور عمده طی مرحلهٔ دیاژنز دفنی عمیق در دمای بالا روی می‌دهد (Kim and Lee 2003; Lander et al. 2008). از نظر بسیاری از پژوهشگران دمای تشکیل سیمان سیلیسی به‌صورت رورشدی بیش از ۷۰ درجه یا حتی ۹۰ درجهٔ سانتی‌گراد است (De Ros 1998; Lander et al. 2008)؛ اما برخی دیگر مانند McBride 1989 معتقدند رشد بلوری کوارتز از مرحلهٔ دیاژنز اولیه شروع و با افزایش میزان سیلیس و دما در مرحلهٔ دیاژنز دفنی عمیق کامل تر می‌شود؛ بنابراین سیمان سیلیسی به‌طور عمده طی مرحلهٔ دیاژنز دفنی عمیق تشکیل شده است. منشأ احتمالی

(et al. 2008).

انحلال: انحلال از رخدادهای مهم دیاژنتیکی محسوب شده است که در افزایش کیفیت مخزنی نقش مهمی دارد. مطالعات نشان داده است به‌طور معمول رخداد انحلال کربنات‌ها از دیاژنز اولیه شروع شده است و حتی در دیاژنز انتهایی نیز ادامه دارد (Schmid et al. 2004). بیشترین انحلال کربنات‌ها در مرحله دیاژنز دفنی عمیق رخ داده است؛ اما انحلال کانی‌های سیلیکاته مانند کوارتز و فلدسپات به‌طور عمده طی دیاژنز دفنی عمیق و به‌طور جزئی در مرحله انتهایی روی می‌دهد که عامل اصلی این رخداد، عبور سیالات حلال و افزایش دماست (Liu 2002; Reed et al. 2005; Poursoltani et al. 2019).

دیاژنز انتهایی (Telodiagenesis)

رخدادهای سیمانی شدن (کربنات و ترکیبات آهن)، انحلال کربنات‌ها و شکستگی از رخدادهای عمده این مرحله محسوب می‌شوند.

سیمانی شدن: سیمان‌های کربناته و ترکیبات اکسید آهن در ماسه‌سنگ‌های سازند شوربچه علاوه بر اینکه در مراحل دیاژنز اولیه و دفنی عمیق تشکیل می‌شوند، در مرحله دیاژنز انتهایی نیز تشکیل شده‌اند (e.g., Mansurbeg et al. 2008; Poursoltani et al. 2019).

شکستگی: شکستگی سنگ‌ها از جمله رخدادهای دیاژنز انتهایی است که در ماسه‌سنگ‌های سازند شوربچه روی داده است. بنا بر مطالعات Laubach 1997, Poursoltani 2017, Poursoltani et al. 2019، شکستگی‌هایی که در کل سنگ روی می‌دهد، به تأثیر تکتونیک مربوط دانسته‌اند که طی مرحله دیاژنز انتهایی حادث شده است.

انحلال: انحلال نیز از رخدادهای دیاژنتیکی است که به‌طور عمده در کربنات‌ها به وقوع پیوسته است. این رخداد تأثیر بسزایی بر افزایش کیفیت مخزنی سازند دارد. پژوهشگرانی چون Liu 2002 و Kim et al. 2007 زمان

سیلیس موجود انحلال فشاری دانه‌های کوارتز، انحلال دانه‌های سیلیکاته اعم از کوارتز و فلدسپات‌ها، و سیلیس حاصل از رخدادهای دیاژنتیکی است که روی کانی‌های رسی لایه‌های شیلی صورت گرفته است (McBride 1989). تشکیل سیمان کربناته پرکننده حفره‌ها نیز به‌طور عمده در دمای بیش از ۲۰-۷۰ درجه سانتی‌گراد (Land 1984; Lundegard and Trevena 1990) و به‌طور معمول در شرایط نزدیک به سطح روی می‌دهد؛ اما بعضی از کانی‌ها مانند دولومیت در عمق تشکیل می‌شوند (Reed et al. 2005; Salem et al. 2005). دولومیت در ماسه‌سنگ‌های سازند شوربچه به‌صورت ثانویه، احتمالاً طی دیاژنز دفنی عمیق جانشین کلسیت می‌شود و در دمای ۶۵-۱۳۰ درجه سانتی‌گراد شکل می‌گیرد (eg. El-ghali et al. 2008; Mansurbeg et al. 2006; et al.).

Lanson et al. 2002 معتقدند کانی‌های رسی بنا بر ترکیب آنها در مراحل مختلف دیاژنتیکی تشکیل می‌شوند. کلریت یکی از کانی‌های موجود در ماسه‌سنگ‌های سازند شوربچه است. برخی پژوهشگران تشکیل کانی کلریت را در فشار بالا و دمای بیش از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌دانند که به مرحله دیاژنز دفنی عمیق مربوط است (Hillier 1994; Reed et al. 2005; et al.); در صورتی که El-ghali et al. 2006, Kim et al. 2007 و Mansurbeg et al. 2008 دمای تشکیل کلریت را بیش از ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد گزارش کرده‌اند.

کانی‌های جزئی درج‌ازا: براساس مطالعات انجام‌شده، آلیتی شدن در دمای بیش از ۸۵ درجه سانتی‌گراد به وقوع می‌پیوندد (González-Acebrón et al. 2010); اگرچه دمای حدود ۶۵ درجه هم برای این رخداد گزارش شده است (Saigal et al. 1988); بنابراین این رخداد به‌طور عمده طی دیاژنز دفنی به وقوع پیوسته است (Milliken 1989; Morad et al. 2011; Poursoltani et al. 1990; al.). مطالعات برخی پژوهشگران تشکیل فلدسپات به‌صورت رورشدی را دلیل وجود دمای بیش از ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد در انتهای مرحله دیاژنز دفنی عمیق می‌داند (Lee and Parsons 2003; Mansurbeg et al.).

انحلال کربنات‌ها را از دیاژنز اولیه تا دیاژنز انتهایی می‌دانند.

Diagenetic events	Eodiagenesis	Mesodiagenesis (Burial Diagenesis)	Telodiagenesis
Compaction		Mechanical (concave-convex and suture contacts)	
		overgrowth quartz; pore filling	
Cementation	Calcite		calcite pore filling
		dolomite	
Fracturing	Fe-Oxide	Euhedral magnetite	Fe-Oxide
		Chlorite	
Dissolution		Grain fracturing	Rock fracturing
		Carbonate dissolution	
Authigenic minerals		Feldspar, and quartz dissolution	
		albitization	
		Feld-overgrowth	
		Rutile	

شکل ۱۳- توالی دیازنتیکی ماسه‌سنگ‌های سازند شوربجه در منطقه اسطرخ؛ خطوط پررنگ رخدادهای اصلی، خطوط کم‌رنگ رخدادهای فرعی و خطوط نقطه‌چین رخدادهای احتمالی را نشان می‌دهد.

Fig. 13- Diagenetic sequence in Shurijeh Formation sandstones in the Estarkhi area; Heavy lines represent major diagenetic events, light lines represent minor diagenetic events, and dashed lines represent probable diagenetic events.

دیازنتیکی به شرح زیر تفسیر می‌شود. بسیاری از پژوهشگران

تاریخچه حرارتی

دمای تشکیل سیمان سیلیسی نوع رورشدی را حدود ۷۰ تا

تاریخچه حرارتی سازند شوربجه بر مبنای رخدادهای

بیش از ۳ کیلومتر باشد؛ بنابراین دمای حاکم طی دیاژنز دفنی عمیق بیش از ۸۰ درجه سانتی‌گراد پیش‌بینی می‌شود.

نتیجه

براساس مطالعات صحرایی و پتروگرافی سازند شوربچه در برش اسطرخی، سه نوع رخساره کنگلومرایی، ماسه‌سنگی و شیلی شناسایی شده است. اجزای تشکیل‌دهنده ماسه‌سنگ‌ها براساس مشاهدات میکروسکوپی شامل کوارتز، فلدسپات، خرده‌سنگ‌های رسوبی، آذرین و کانی‌های فرعی است؛ از این بین دانه‌های کوارتز با میانگین ۶۹/۹ درصد، فراوان‌ترین دانه محسوب می‌شود.

براساس اجزای شناسایی‌شده، ماسه‌سنگ‌های مطالعه‌شده به‌طور عمده شامل ساب لیت آرنایت، ساب آرکوز، فلدسپاتیک لیت آرنایت، لیت آرنایت و به‌طور جزئی کوارتزآرنایت است. رخدادهای فشردگی، سیمانی‌شدن (سیلیسی، کربناته و ترکیبات آهن از جمله مگنتیت، کانی‌های رسی به‌طور عمده کلریت)، شکستگی، انحلال فشاری و تشکیل کانی‌های درج‌ازا (آلبیتی‌شدن، فلدسپات رورشدی، روتیل) رخدادهای دیاژنتیکی این ماسه‌سنگ‌ها به شمار می‌رود که به شناسایی سه مرحله دیاژنز ابتدایی، دفنی عمیق و انتهایی منجر شده است. رسوبات مطالعه‌شده براساس اجزای تشکیل‌دهنده از نظر منشأ تکنونیک به مناطق درون کراتونی و کوه‌زایی با چرخه مجدد، حواشی غیرفعال و امتداد لغز مربوط است.

بنا بر رخدادهای دیاژنتیکی، تشکیل سیمان سیلیسی نوع رورشدی در دمای حدود ۷۰ تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد، کانی کلسیت در دمای ۲۰ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد، کانی دولومیت در دمای ۶۵-۱۴۵ درجه سانتی‌گراد، تشکیل کانی رسی کلریت در دمای بیش از ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، انحلال فلدسپات در دمای بیش از ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد، آلبیتی‌شدن در دمای ۶۵ تا ۱۱۵ درجه سانتی‌گراد و تشکیل فلدسپات رورشدی بیش از ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد بوده است؛ درنهایت

۹۰ درجه سانتی‌گراد می‌داند (M McBride 1989; Worden and Morad 2000; Schmid et al. 2004; Lander et al. 2008; Taylor et al. 2010). از طرفی کانی کلسیت در دمای ۲۰ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد تشکیل می‌شود (Land 1984; Lundegard and Trevena 1990)، در صورتی که کانی دولومیت در دمای ۶۵-۱۴۵ درجه سانتی‌گراد شکل می‌گیرد (Trevena and Clark 2007; Kim et al. 1997; Tang et al. 1986)؛ همچنین برخی از پژوهشگران دمای بیش از ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد را برای تشکیل کانی رسی کلریت پیشنهاد داده‌اند (Boles and Frank 2007; Kim et al. 2007; El-ghali et al. 2006; Giroir et al. 1989; Mansurbeg et al. 2008).

براساس مطالعات بسیاری از پژوهشگران، رخداد انحلال فلدسپات در دمای بیش از ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است (eg. Boles and Franks 1979; Land 1984; Milliken 1989; Fisher and Land 1986; Gold 1987; Saigal et al. 1988). González-Acebrón et al. 2010 دمای رخداد آلبیتی‌شدن را ۶۵ تا ۱۱۵ درجه سانتی‌گراد و دمای تشکیل فلدسپات رورشدی را بیش از ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد گزارش کرده‌اند. بنا بر مباحث بالا، دمای حاکم بر رسوبات سازند شوربچه بین ۲۰ تا ۱۴۵ درجه سانتی‌گراد تغییر می‌یابد.

از طرفی تاریخچه دمای تدفین رسوبات در شرق حوضه رسوبی کپه‌داغ را (Moussavi-Harami and Brenner 1992, Fig 3) تفسیر کرده‌اند. براساس دمای وقوع رخدادهای دیاژنتیکی و همچنین با در نظر گرفتن موقعیت قرارگیری عمق سازند شوربچه در بخش شرق حوضه رسوبی کپه‌داغ، عمق بیش از ۳ کیلومتر برای این رسوبات برآورد شده است و با احتساب دمای سطح ۲۵ درجه سانتی‌گراد و اینکه گرادیان حرارتی به‌ازای هر کیلومتر ۲۵ درجه سانتی‌گراد با شرایط ثابت و یکسان در نظر گرفته شود، دمای تدفین در بخش تحتانی سازند شوربچه بیش از ۸۰ درجه سانتی‌گراد برآورد می‌شود. درنهایت با توجه به اینکه توالی‌های رسوبی در حوضه کپه‌داغ از شرق به غرب افزایش می‌یابد، چنین انتظار می‌رود که عمق احتمالی رسوبات سازند شوربچه در منطقه

- Khangiran gas field. Bulletin of the Iranian Petroleum Institute, 37: 86-96. (in Persian).
- Afshar-Harb A. 1979. The stratigraphy, tectonic and petroleum geology of Kopet-Dagh region, northern Iran. Ph.D. thesis, Petroleum Geology Section, Imperial College, London, 316 p.
- Afshar-Harb A. 1994. Kopet Dagh- Geology, Iranian Geological Geography Book Development Plan, 11: 275 p. (in Persian).
- Aghanabati A. 2004. Geology of Iran. Geological Survey of Iran, 558 p. (in Persian).
- Baron M. and 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.
- Berberian M. and King G.C.P. 1981. Toward a paleogeography and tectonic evaluation of Iran. *Canadian Journal Earth Sciences*. 18: 210-265.
- Boles J.R. and Franks S.G. 1979. Clay diagenesis in Wilcox sandstones of southwest Texas: implications of smectite diagenesis on sandstone cementation. *Journal of Sedimentary Petrology*. 49: 55-70.
- Bolurchi M.H. Shemirani A. and Baghbani D. 1986. Geological map of Bujnord, 1: 250000, Geological Survey of Iran.
- De Ros L.F. 1998. Heterogeneous generation and evolution of diagenetic quartzarenites in the Silurian-Devonian Fumas Formation of the Paran Basin, southern Brazil. *Sedimentary Geology*. 116: 99-128.
- Dickinson W.R. Beard L.S. Brakenridge G.R. Erjavec J.L. Ferguson R.C. Inman K.F. Knepp R.A. Lindberg F.A. and Ryberg P.T. 1983. Provenance of North American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting. *Geol. Soc. Am. Bull.* 94: 222-235.
- Dickinson W.W. and Milliken K.L. 1995. The diagenetic role of brittle deformation in compaction and pressure solution, Elltjo Sandstone, Namibia. *Journal of Geology*. 103: 339-347.
- El-ghali M.A.K. Mansurbeg H. Morad S. Al-Aasm I.S. and Ajdanlisky G. 2006. Distribution of diagenetic alterations in fluvial and paralic deposits within sequence stratigraphic framework: Evidence from the Petrohan Terrigenous Group and the Svidol Formation, Lower Triassic, NW Bulgaria. *Sedimentary Geology*. 190: 299-321.
- Folk R.L. 1980. *Petrology of Sedimentary Rock*, Hemphill Publishing Co., Texas, 182 p.
- Fisher R.S. and Land L.S. 1986. Diagenetic history of Eocene Wilcox sandstones, South-Central Texas. *Geochimica Cosmochimica Acta*. 50: 551-561.
- Gazzi P. 1966. Learenariedelfly schsopracretaceodell' Appenninomodense; correlazioni con ilflysch di Monghidoro. *Mineralogy Petrography Acta*. 12: 69-97.

دمای حاکم بر رسوبات سازند شوربچه بین ۲۰ تا ۱۴۵ درجه سانتی‌گراد تغییر می‌یابد؛ بنابراین براساس دمای وقوع رخدادهای دیازنتیکی و با توجه به اینکه توالی‌های رسوبی در حوضه کپه‌داغ از شرق به غرب افزایش می‌یابد، چنین انتظار می‌رود که عمق احتمالی رسوبات سازند شوربچه در منطقه بیش از ۳ کیلومتر باشد و با در نظر گرفتن گرادیان حرارتی، دمای حاکم بر این رسوبات طی دیازنتز دینی عمیق بیش از ۸۰ درجه سانتی‌گراد پیش‌بینی می‌شود.

عمده تخریفات‌های شناسایی‌شده در این توالی از نوع ثانویه است و انحلال و شکستگی، عوامل اصلی ایجاد تخریفات در این ماسه‌سنگ‌ها محسوب می‌شود. براساس مطالعه مقاطع میکروسکوپی ماسه‌سنگ‌های سازند شوربچه در منطقه اسطرخی، میانگین تخریفات ۱۰/۰۵ درصد، حداکثر تخریفات ۱۸/۲۵ درصد و حداقل تخریفات ۰/۹۱ درصد است؛ اما براساس انجام آزمایش‌های تخریفات با دستگاه تخریفات سنج، حداکثر تخریفات ۱۴/۲ درصد، حداقل تخریفات ۰/۰۲ درصد و میانگین تخریفات حدود ۷/۷۸ درصد برآورد شده است؛ همچنین حداقل تراوایی ۰/۲۱ میلی‌داری، حداکثر تراوایی ۱۲/۳۴ میلی‌داری و میانگین تراوایی برای این توالی ۴/۸۴ میلی‌داری تعیین شده است؛ بنابراین بخش‌های میانی توالی نسبت به بخش‌های بالایی و پایینی کیفیت مخزنی بهتری دارد.

تشکر و قدردانی

نویسنده از دانشگاه آزاد اسلامی مشهد به دلیل در اختیار قرار دادن امکانات آزمایشگاهی تشکر می‌کند؛ همچنین از داوران محترم که با پیشنهادهای ارزشمند خود باعث بهبود این نوشتار شده‌اند، صمیمانه قدردانی می‌کند. از آقای دکتر عباسی، دانشگاه زنجان نیز برای شناسایی آثار فسیلی سپاسگزاری می‌کند؛ در نهایت از دانشگاه سنت مریس کانادا نیز برای انجام آزمایش‌های EBS قدردانی می‌شود.

References

- Afshar-Harb A. 1969. A brief history of geological exploration and geology of the Sarakhs area and the

- from the Cambrian-Ordovician lower sandstone unit in southwestern Sinai, Egypt. *Mar. Petrol. Geol.* 28: 1554–1571.
- Land L.S. 1984. Frio sandstone diagenesis, Texas Gulf Coast: a regional isotopic study. In: McDonald, D.A., and R.C. Surdam, (Eds.), *Clastic Diagenesis*. Tulsa, Oklahoma, U.S.A. AAPG Memoir. 37: 47–63.
- Lander R.H. Larese R.E. and Bonell L.M. 2008. Toward more accurate quartz cement models: the importance of euhedral versus noneuhedral growth rates. *AAPG Bulletin*. 92: 1537–1563.
- Lanson B. Beaufort D. Berger G. Bauer A. Cassagnabère A. and Meunier A. 2002. Authigenic kaolin and illitic minerals during burial diagenesis of sandstones: A review: *Clay Mineral.* 37: 1–22.
- Laubach S.E. 1997. A method to detect natural fracture strike in sandstones. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 81:604–623.
- Lee M. and Parsons I. 2003. Microtextures of authigenic Or-rich feldspar in the Upper Jurassic Humber Group, UK North Sea. *Sedimentology*. 50: 597–608.
- Liu K.W. 2002. Deep-burial diagenesis of the siliciclastic Ordovician Natal Group, South Africa. *Sedimentary Geology*. 154: 177–189.
- Lundegard P.D. and Trevena A.S. 1990. Sandstone diagenesis in the Pattani Basin (Gulf of Thailand): history of water-rock interaction and comparison with the Gulf of Mexico. *Applied Geochemistry*. 5: 669–685.
- Mansurbeg H. Morada S. Salem A. Marfild R. El-ghalie M.A.K. Nystuenf J.P. Cajad M.A. Amorosig A. Garcia D. and 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.
- Makowitz A. and Milliken K.L. 2003. Quantification of brittle deformation in burial compaction, Frio and Mount Simon Formation sandstones. *J. Sediment. Petrol.* 73: 1007–1021.
- Makowitz A. Lander R.H. and Milliken K.L. 2006. Diagenetic modeling to assess the relative timing of quartz cementation and brittle grain processes during compaction. *AAPG Bulletin*. 90: 873–885.
- McBride E.F. 1989 Quartz cement in sandstones: A review. *Earth–Science Reviews*. 26: 69 – 112.
- McBride E.F. Land L.S. and Mack L.E. 1987. Diagenesis, Norphler Formation (Upper Jurassic), Rankin County, Mississippi, and Mobile County, Alabama. *AAPG Bulletin*. 71: 1019–1034.
- Milliken K.L. 1988. Loss of provenance information through subsurface diagenesis in PlioPleistocene sandstones, northern Gulf of Mexico. *Sediment. Petrol.* 58: 992–1002.
- Giles M.R. and deBoer R.B. 1990, Origin and significance of redistributional secondary porosity. *Marine and Petroleum Geology*. 6: 378–397.
- Giroir G. Merino E. and Nahon D. 1989. Diagenesis of Cretaceous sandstone reservoirs of the South Gabon Rift Basin, West Africa: mineralogy, mass transfer, and thermal evolution. *Journal of Sedimentary Petrology*. 59: 482–493.
- Golafshani T. Khanehbad M. Moussavi-Harami R. and Mahboubi A. 2014. Depositional environment and provenance of the Shurijeh Formation sandstones (Neocomian) in the Abgarm village, east of Kopet-Dagh basin. *Sedimentary Facies*. 7 (1):125-149 (in Persian).
- Gold P.B. 1987. Textures and geochemistry of authigenic albite from Miocene sandstones, Louisiana Gulf Coast. *Journal of Sedimentary Petrology*. 57: 353–362.
- Goldstein R.H. and Rossi C. 2002. Recrystallization in quartz overgrowths. *Journal of Sedimentary Research*. 72: 432–440.
- González-Acebrón L. Arribas J. and Mas R. 2010. Role of sandstone provenance in the diagenetic albitization of feldspars, A case study of the Jurassic Tera Group sandstones (Camerós Basin, NE Spain), *Sedimentary Geology*. 229: 53–63.
- Götte T. Ramseyer K. Pettke T. and Koch-Müller M. 2013. Implications of trace element composition of syntaxial quartz cements for the geochemical conditions during quartz precipitation in sandstones: *Sedimentology*. 60: 1111–1127.
- Hillier S. 1994. Pore-lining chlorites in siliciclastic reservoir sandstones: electron microprobe, SEM and XRD data, and implications for their origin: *Clay Minerals*. 29: 665–679.
- Jamali A.M. Sadeghi A. Shemirani A. Baghbani D. 2012. Biostratigraphy of the Shurijeh Formation in stratigraphic section of Hamam Ghaleh, south of Kalat-Naderi, *Journal of Stratigraphy and Sedimentary Research*. 28 (1):95-112. (in Persian).
- Kalantari A. 1987. Biofacies map of Kopet-Dagh region: Unpublished map, NIOC Exploration and Production, Tehran, I sheet.
- Kim Y. and 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.
- Kim C.K. Lee Y. and Hisada K. 2007. Depositional and compositional controls on sandstone diagenesis, the Tetori Group (Middle Jurassic - Early Cretaceous), central Japan. *Sedimentary Geology*. 195: 183–202.
- Kordi M. Turner B.R. and Salem A.M.K. 2011. Linking diagenesis to sequence stratigraphy in fluvial and shallow marine sandstones: evidence

- Bulletin. 86: 2047–2067.
- Poursoltani M.R. Moussavi-Harami R. and Gibling M.R. 2007. Jurassic deep water fans in the Neotethys Ocean, the Kashafrud Formation of the Kopet-Dagh Basin Iran, *Sedimentary Geology*. 198: 53–74.
- Poursoltani M.R. and Gibling M.R. 2011. Composition, porosity and reservoir potential of the Middle Jurassic Kashafrud Formation, northeast Iran. *Marine and Petroleum Geology*. 28: 1094–1110.
- Poursoltani M.R. 2017. Petrography and diagenesis of Padeha Formation sandstones (Lower-Middle Devonian) at Bujhan section, Binalud Basin, NE Iran. *Journal of Stratigraphy and Sedimentary Research*. 65: 87–112 (in Persian).
- Poursoltani M.R. Gibling M.R. and Pe-Piper G. 2019. Diagenesis, burial history, and hydrocarbon potential of Cambrian sandstone in the northern continental margin of Gondwana: A case study of the Lalun Formation of central Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*. 172: 143–169.
- Ramseyer K. Boles J.R. and Lichtner P.C. 1992. Mechanism of diagenetic albitization. *Journal of Sedimentary Petrology*. 62(3): 349–356.
- Reed J.S. Eriksson K.A. and Kowalewski M. 2005. Climatic, depositional and burial controls on diagenesis of Appalachian Carboniferous sandstones: qualitative and quantitative methods. *Sedimentary Geology*. 176: 225–246.
- Renard F. Brosse E. and Gratier J.P. 2000. The different processes involved in the mechanism of pressure solution in quartz-rich rocks and their interactions. In: Worden R.H. and Morad S. (Eds.), *Quartz Cementation in Sandstones*: Blackwell Science. 67–78 p.
- Schmid S. Worden R.H. and 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.
- Saigal G.C. Morad S. Bjørlykke K. Egeberg P.K. and Aagaard P. 1988. Diagenetic albitization of detrital K-feldspar in Jurassic, Lower Cretaceous, and Tertiary clastic reservoir rocks from offshore Norway, I. Textures and origin. *Journal of Sedimentary Petrology*. 58(6): 1003–1013.
- Salem A.M. Ketzer J.M. Morad S. Rizk R.R. and 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.
- Schmid S. Worden R.H. and Fisher Q.J. 2004. Diagenesis and reservoir quality of the Sherwood Sandstone (Triassic), Corrib Field, Slyne Basin, west of Ireland. *Marine and Petroleum Geology*.
- Milliken K.L. 1989. Petrography and composition of authigenic feldspars, Oligocene Frio Formation, South Texas. *Journal of Sedimentary Petrology*. 59: 361–374.
- Milliken K.L. 1994. The widespread occurrence of healed microfractures in siliciclastic rocks: evidence from scanned cathodoluminescence imaging. In: Nelson P.P. and Laubach S.E. (Eds.), *Rock Mechanics: Models and Measurements, Challenges from Industry*, 1st North American Rock Mechanics Symposium, A.A. Balkema. 825–832 p.
- Morad S. Bergan M. Knarud R. and Nystuen J.P. 1990. Albitization of detrital plagioclase in Triassic Reservoir sandstones from the Snorre Field, Norwegian North Sea. *Journal of Sedimentary Petrology*. 60(3): 411–425.
- Moraes M.A.S. and De Ros L.F. 1990. Infiltrated clays in fluvial Jurassic sandstones of Reconcavo Basin, northeastern Brazil. *J. Sediment. Petrol.* 60: 809–819.
- Mortazavi M. Mosavi-Harami R. Mahbobi A. and Najafi M. 2012. Paleosols, types and their characteristics in the Shurijeh Formation, Kopet-Dagh basin, NE Iran, *Journal of Stratigraphy and Sedimentary Research*. 28(1):1–32 (in Persian).
- Mussavi-Harami, R., and R.L. Brenner, 1990. Lower Cretaceous (Neocomian) fluvial deposits in eastern Kopet-Dagh basin, north-eastern Iran, *Cretaceous Research*. 11: 163–174.
- Moussavi-Harami R. and Brenner R.L. 1992. Geohistory analysis and petroleum reservoir characteristics of Laubach S.E. 1997. A method to detect natural fracture strike in sandstone: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. 81: 604–623.
- Lower Cretaceous (Neocomian) sandstones, eastern Kopet Dagh Basin, northeastern Iran. *AAPG Bulletin*. 76: 1200–1208.
- Mussavi-Harami R. and Brenner R.L. 1993. Diagenesis of non-marine petroleum reservoirs: the Neocomian (Lower Cretaceous) Shurijeh Formation, Kopet-Dagh basin, NE Iran, *Journal of Petroleum Geology*. 16(1): 55–72.
- Moussavi-Harami R. Mahboubi A. Nadjafi M. Brenner R.L. and Mortazavi M. 2009. Mechanism of calcrite formation in the Lower Cretaceous (Neocomian) fluvial deposits, northeastern Iran based on petrographic, geochemical data. *Cretaceous Research*. 30(5): 1146–1156.
- North F.K. 1985. *Petroleum Geology*. Allen and Unwin, Boston, U.S.A., 607 p.
- Paxton S.T. Szabo J.O. Ajdukiewicz J.M. and Klimentidis R.E. 2002. Construction of an intergranular volume compaction curve for evaluating and predicting compaction and porosity loss in rigid-grain sandstone reservoirs. *AAPG*

- 21: 299-315.
- Tabatabai P. Lasemi Y. Jahani D. and Asililian mahabadi H. 2013. Facies and depositional environment of Shurijeh Formation in the Qor-Qoreh and Khangiran sections, west of Kopet-Dagh basin, Journal of Oil and Gas Exploration and Production. 104:27-78 (in Persian).
- Tang Z. Parnell J. and Longstaffe F.J. 1997. Diagenesis and reservoir potential of Permian – Triassic fluvial/lacustrine sandstone in the Southern Junggar Basin, Northwestern China. AAPG Bulletin. 81: 1843 – 1865.
- Taylor T.R. Giles M.R. Hathon L.A. Diggs T.N. Braunsdorf N.R. Birbiglia G.V. Kittridge M.G. Macaulay C.I. and Espejo I.S. 2010. Sandstone diagenesis and reservoir quality prediction: Models, myths, and reality. AAPG Bulletin. 94: 1093–1132.
- Trevena A.S. and Clark R.A. 1986. Diagenesis of sandstone reservoirs of Pattani Basin, Gulf of Thailand. AAPG Bulletin. 70: 299-308.
- Wahab A.A. 1998. Diagenetic history of Cambrian quartzarenites, Ras Dib–Zeit Bay area, Gulf of Suez, eastern desert, Egypt. Sedimentary Geology. 121: 121–140.
- Walker T.R. 1984. Diagenetic albitization of potassium feldspars in arkosic sandstones. Journal of Sedimentary Petrology. 54: 3-16.
- Wang Y.P. Zhang F. Zoua Y.R. Sun J.N. Lin X.H. and Liang T. 2018. Oil source and charge in the Wuerxun Depression, Hailar Basin, northeast China: A chemometric study. Marine and Petroleum Geology. 89: 665–686.
- Worden R.H. and Morad S. 2000. Quartz cementation in oil field sandstones: a review of the key controversies. In: Worden R.H. and Morad S. (Eds.), Quartz Cementation in Sandstones. International Association of Sedimentologists, Special Publication. 29: 1–20.
- Wu Y.S. Pruess K. and Persoff P. 1998. Gas flow in porous media with Klinkenberg effects. Transport in Porous Media. 32: 117-137.
- Yerino L.N. and Maynard J.B. 1984. Petrography of modern marine sands from the Peru–Chile Trench and adjacent areas. Sedimentology. 31: 83–89.
- Zhang B. Zhang J. Yan S. Gu Z. and 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.