




## Research Article

### Investigation of facies, elemental and isotopic changes of carbonate deposits of Tirgan Formation (Barrmian-Aptian) in Kopeh Dagh sedimentary basin (Northeast of Iran)

Samanesadat Rafati<sup>1</sup>, Mohammad Javanbakht<sup>\*2</sup> , Davood Jahani<sup>1</sup>, Mohsen Pourkermani<sup>1</sup>, Nader Kohansal ghadimvand<sup>1</sup>

1-Department of geology, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2-Department of geology, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran

Received: 02 Jan 2023

Accepted: 17 Jul 2023

## Extended Abstract

**Introduction:** The Kopeh Dagh sedimentary basin is an intercontinental basin formed following the closure of the Paleo-tethys ocean due to a collision between the two continents of Iran and Turan and in has arisen the Early Cimmerian orogenic phase. Deposition of shallow carbonates during the Lower Cretaceous (Barmin-Apsin) in the Kopet Dagh sedimentary basin has been introduced as the Tirgan Formation. This formation is located in three studied sections on the Shurijeh detrital siliceous formation and below the limestone-marni formation of Sarcheshmeh.

**Materials and methods:** In this research, this formation uses petrographic studies and geochemical analyzes to evaluate the sedimentary model, primary carbonate mineralogy and diagenetic processes in Shirvan (197.7 m), Quchan (464.4 m) and Chenaran (127.8) sections. 720 thin sections were prepared for petrographic studies. To separate ferroan calcite and dolomite from nonferroan samples, the samples were stained with potassium ferrocyanide solution (Dickson, 1996). In order to name carbonate rocks, the method (Dunham, 1962) and detrital rocks, classification (Folk, 1980) were used. The method (Flügel, 2010) was also used to interpret the facies and present the sedimentary model. For geochemical studies, 41 samples were analyzed by ICP-OES method in Iran-Karaj Mineral Processing Research Center (Emidro Company) for elemental analysis and by ICP-MS method in Science Laboratory Center of Ottawa University of Canada for carbon isotope and oxygen.

**Results and discussion:** Petrographic studies led to the identification of 18 microfacies that were deposited in four facies belts open marin, lagoon, Barrier and tidal flat. The frequency of tidal facies along with barrier facies and the absence of large reef barrier and turbidite sediments indicate the deposition of this formation in a ramp system with a carbonate slope. Diagenetic processes in this formation include: cementation, micritization, dissolution, compaction, dolomitization, fracture, stylolitification and silicification. The abundance of skeletal and non-skeletal components of calcite along with calcite cement, abundance and presence of dolomite with high content of stransiom refers to the initial mineralization of calcite in the carbonates of Tirgan Formation in time. Also, the values of major (Mg, Ca) and minor elements (Sr, Na, Mn, Fe) and the isotopic range of oxygen 18 and carbon 13 of the limestones of Tirgan Formation, also indicate the composition of primary calcite mineralogy in these areas. This value also shows the impact of the burial diagenesis environment on these deposits in a semi-closed diagenesis system with a low water-to-rock ratio. The average diagenetic temperature of seawater at the time of sedimentation of carbonates of Tirgan Formation using the heaviest oxygen isotope in calcareous samples is estimated to be 18.21 °C.

**Conclusion:** Comparison of the data obtained from the three studied sections and the information provided from the eastern and western regions, shows an increase in temperature and thus an increase in strontium to the west, which it is indicates a change in the mineralogical composition from calcite to aragonite from east to west basin


**Keywords:** Diageneses, Carbonate sediment geochemistry, Tirgan formation, Sedimentary model.

**Citation:** Samanesadat Rafati, Mohammad Javanbakht et al, (2023). Investigation of facies, elemental and isotopic changes of carbonate deposits of Tirgan Formation, *Res. Earth. Sci.* 14(3), (35-51) DOI: 10.48308/ESRJ.2021.101729

\* Corresponding author E-mail address: Mo\_ja58@yahoo.com



## تغییرات ریزرخساره‌ای، عنصری و ایزوتوپی نهشته‌های کربناته سازند تیرگان (بارمین-آپسین) در حوضه رسوبی کپه داغ (شمال شرق ایران)

سمانه سادات رفعتی<sup>۱</sup>، محمد جوانبخت<sup>۲\*</sup> , داوود جهانی<sup>۱</sup>، محسن پورکرمانی<sup>۱</sup>، نادر کهنسال قدیم وند<sup>۱</sup>

۱- گروه زمین‌شناسی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- گروه زمین‌شناسی، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

(پژوهشی) دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۱۲ پذیرش نهایی مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۲۶

### چکیده گسترده

**مقدمه:** حوضه رسوبی کپه داغ به صورت یک حوضه درون قاره‌ای، به دنبال بسته شدن اقیانوس پالئوتتیس بر اثر تصادم و برخورد بین دو قاره ایران و توران و بر اثر فاز کوهزایی سیمیرین پیشین شکل گرفته است و در پی تاثیر کوهزایی سیمیرین پیشین، در زمان تریاس میانی به وجود آمده است. رسوبگذاری کربنات‌های کم‌عمق در زمان کرتاسه زیرین (بارمین-آپسین) در حوضه رسوبی کپه داغ به عنوان سازند تیرگان معرفی گردیده است. این سازند در سه برش مورد مطالعه به صورت هم شیب بر روی سازند سیلیسی آواری شوربجه و در زیر سازند آهکی-مارنی سرچشمه قرار دارد.

**مواد و روش‌ها:** در این تحقیق این سازند با استفاده از مطالعات پتروگرافی و آنالیزهای ژئوشیمیایی، به منظور ارزیابی مدل رسوبی، کانی‌شناسی اولیه کربناته و فرایندهای دیاژنزی در برش‌های شیروان (۱۹۷/۷ متر)، قوچان (۴۶۴/۴ متر) و چناران (۱۲۷/۸ متر) مورد بررسی قرار گرفت. جهت مطالعات پتروگرافی ۷۲۰ مقطع نازک تهیه شد. برای جداسازی کلسیت و دولومیت آهن‌دار از نمونه‌های بدون آهن، نمونه‌ها توسط محلول فروسیانید پتاسیم به روش (Dickson, 1996) رنگ‌آمیزی شدند. به منظور نامگذاری سنگ‌های کربناته از روش دانهام (Dunham, 1962) و سنگ‌های آواری نیز از طبقه‌بندی فولک (Folk, 1980) بهره‌گیری شد. همچنین برای تفسیر ریزرخساره‌ها و ارائه مدل رسوبی از روش فلوگل (Flugel, 2010) کمک گرفته شد. به منظور بررسی‌های ژئوشیمیایی، ۴۱ نمونه به روش ICP-OES در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران-کرج (شرکت ایمیدرو) جهت آنالیز عنصری و به روش ICP-MS در مرکز آزمایشگاهی علوم دانشگاه Ottawa کانادا جهت ایزوتوپ کربن و اکسیژن آنالیز شد.

**نتایج و بحث:** مطالعات پتروگرافی منجر به تشخیص ۱۸ ریزرخساره گردید که در چهار کمربند رخساره‌ای دریای باز، لاگون، سدی و جزر و مدی نهشته شدند. فراوانی رخساره‌های جزر و مدی همراه با رخساره‌های الئیدی سدی و نبود سدهای بزرگ ریفی و رسوبات توربیدیتی حاکی از رسوبگذاری این سازند در یک سیستم رمپ هم شیب کربناته می‌باشد. فرایندهای دیاژنزی در این سازند شامل: سیمانی شدن، میکریتی شدن، انحلال، فشردگی، دولومیتی شدن و سیلیسی شدن می‌باشد. فراوانی اجزای اسکلتی و غیراسکلتی از جنس کلسیت اشاره به کانی‌شناسی اولیه کلسیتی در کربنات‌های سازند تیرگان در زمان تشکیل دارد. هم‌چنین مقادیر اصلی (Ca, Mg) و فرعی (Sr, Fe, Mn, Na) و گستره ایزوتوپی اکسیژن ۱۸ و کربن ۱۳ سنگ آهک‌های سازند تیرگان، نیز نشان دهنده ترکیب کانی‌شناسی اولیه کلسیتی در این نواحی است. هم‌چنین این مقدار تاثیر محیط دیاژنزی تدفینی بر روی این نهشته‌ها را در یک سیستم دیاژنزی نیمه بسته و نسبت آب به سنگ پایین نشان می‌دهد. دمای اولیه دیاژنتیکی آب دریا به‌طور میانگین در زمان ته‌نشست کربنات‌های سازند تیرگان با بهره‌گیری از سنگین‌ترین ایزوتوپ اکسیژن در نمونه‌های آهکی، ۱۸/۲۱ درجه سانتی‌گراد برآورد شده است.

**نتیجه‌گیری:** مقایسه اطلاعات به دست آمده از سه برش مورد مطالعه و اطلاعات ارائه شده از نواحی شرقی و غربی نشان دهنده افزایش دما و در نتیجه افزایش استرانسیم به سمت غرب می‌باشد که حاکی از تغییر ترکیب کانی‌شناسی از کلسیتی به آراگونیتی از سمت شرق به غرب حوضه می‌باشد.

**واژگان کلیدی:** دیاژنزی، ژئوشیمی رسوبات کربناته، سازند تیرگان، مدل رسوبی.

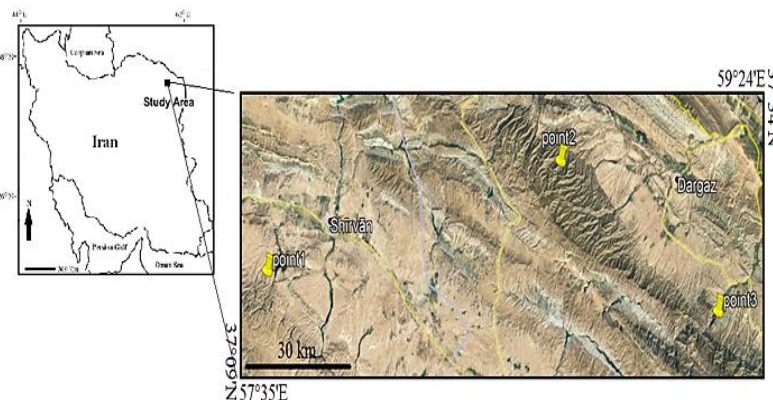
**استناد:** سمانه سادات رفعتی، محمد جوانبخت و همکاران (۱۴۰۲). تغییرات ریزرخساره‌ای، عنصری و ایزوتوپی نهشته‌های کربناته سازند تیرگان،

پژوهشهای دانش زمین: ۱۴(۳)، (۵۱-۳۵)، DOI: 10.48308/ESRJ.2021.101729

## مقدمه

به‌طور هم شیب بر روی سازند سیلیسی آواری شوربجه و زیر سازند آهکی مارنی سرچشمه قرار دارد. بررسی‌های انجام گرفته بر روی آن نشان دهنده پتانسیل مخزنی در این سازند به ویژه در نواحی شرقی است (Javanbakht et al, 2013). افزون بر این تاکنون مطالعات مختلف برای بررسی‌های لیتواستراتیگرافی، شناسایی محیط رسوبی و چینه‌نگاری سکansı در بخش‌های مختلف حوضه کپه‌داغ بر روی این سازند صورت گرفته است (تیمورپور، ۱۳۸۲؛ هاشمیان کاخکی و آریایی، ۱۳۸۶؛ مرتضوی مهریزی، ۱۳۸۶؛ ریوندی و همکاران، ۱۳۸۶؛ موسوی زاده و همکاران، ۱۳۸۶؛ جوانبخت، ۱۳۹۰؛ باقرنژاد، ۱۳۹۱؛ مهسا شامیر، ۱۳۹۳؛ مهدیه عزیزعینی، ۱۳۹۴؛ لیلی فاتح بهاری، ۱۳۹۸؛ Saffar et al, 2010). اما مطالعات ژئوشیمیایی بر روی واحدهای کربناته این سازند توسط جوانبخت (۱۳۹۰) بر روی بخش‌های غربی و طیبان (۱۳۹۶) بر روی بخش‌های شرقی صورت گرفته است. از آنجائی که بیش‌ترین ضخامت سازند تیرگان در بخش‌های مرکزی حوضه می‌باشد و از طرفی براساس گزارش‌های غیر رسمی در این نواحی این سازند دارای پتانسیل مخزنی می‌باشد لذا در این تحقیق سعی گردیده برش‌هایی از بخش‌های مرکزی انتخاب و از دیدگاه ریزخساره‌ای، محیط رسوبی و ژئوشیمیایی بررسی و با مناطق شرقی و غربی مقایسه گردد.

حوضه رسوبی کپه داغ به صورت یک حوضه درون قاره‌ای، به دنبال بسته شدن اقیانوس پالئوتتیس بر اثر تصادم و برخورد بین دو قاره ایران و توران و بر اثر فاز کوهزایی سیمیرین پیشین شکل گرفته است و در پی تاثیر کوهزایی سیمیرین پیشین، در زمان تریاس میانی به وجود آمده است (Berberian and King, 1981). حوضه رسوبی کپه داغ در شمال شرق ایران، بین عرض جغرافیایی  $20^{\circ}$  و  $35^{\circ}$  تا  $15^{\circ}$  و  $38^{\circ}$  شمالی و طول جغرافیایی  $00^{\circ}$  و  $54^{\circ}$  تا  $13^{\circ}$  و  $61^{\circ}$  شرقی قرار دارد (افشار حرب، ۱۳۷۳). به منظور بررسی سازند تیرگان در حوضه رسوبی کپه داغ ۳ برش در ناحیه مرکزی این حوضه انتخاب و مورد مطالعه قرار گرفت، که شامل برش شیروان در ۱۰ کیلومتری جنوب شهرستان شیروان با مختصات  $38^{\circ}19'10''$  N,  $57^{\circ}35'00''$  E طول و عرض جغرافیایی، برش قوچان در ۳۸ کیلومتری شهرستان قوچان با مختصات  $37^{\circ}27'60''$  N,  $58^{\circ}42'10''$  E طول و عرض جغرافیایی و برش چناران در ۲۵ کیلومتری شمال شهرستان چناران با مختصات  $37^{\circ}11'40''$  N,  $59^{\circ}13'10''$  E طول و عرض جغرافیایی انتخاب شد (شکل ۱). سازند تیرگان به سن کرتاسه پایینی (بارمین - آپسین) بیش‌تر از سنگ آهک‌های الیتی - اوربیتولینی ساخته شده است که



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی برش‌های مورد مطالعه، برش شماره ۱: شیروان، ۲: قوچان، ۳: چناران

سنگی است که به‌طور هم شیب بر روی رسوبات سیلیسی آواری سازند شوربجه و در زیر شیل‌های سازند سرچشمه قرار گرفته‌اند. تغییرات جانبی سازند تیرگان در برش‌های مورد مطالعه در راستای شرقی - غربی بررسی گردید، که مهم‌ترین تغییر جانبی توالی‌ها، تغییر در ضخامت می‌باشد.

## منطقه مورد مطالعه

## چینه‌شناسی تیرگان در ناحیه مورد مطالعه

برش‌های مطالعه شده در بخش مرکزی کپه داغ از غرب به شرق عبارتند از شیروان قوچان و چناران که شامل نهشته‌های کربناته آهکی - شیلی بعضا با میان لایه‌های ماسه

به دلیل تغییرات محیطی یا تغییرات سطح آب دریا و یا وجود فعالیت‌های تکتونیکی که باعث تفاوت در میزان فرونشینی یا بالا آمدگی کف حوضه می‌شود را عامل اصلی در ایجاد اختلاف در میزان فضای رسوبگذاری دانست که می‌تواند نقش موثری در تغییر ضخامت برش‌ها داشته باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در هر سه برش این سازند از سه بخش کربناته زیرین، شیل و مارن میانی و کربناته بالایی تشکیل شده‌اند (شکل ۲ و ۳).

بیشترین ضخامت برداشت گردیده سازند در برش قوچان با ضخامت ۴۶۷/۴ متر می‌باشد و در کمترین ضخامت در برش چناران با ضخامت ۱۲۷/۸ متر است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که ضخامت سازند از برش قوچان به سمت غرب و شرق کاهش می‌یابد. به طوری که به سمت غرب در برش شیروان ضخامت به ۱۹۷/۷ متر کاهش می‌یابد و به سمت شرق ضخامت مربوط به برش چناران با ۱۲۷/۸ متر است. احتمالاً تغییر شرایط رسوبگذاری مانند تفاوت در نرخ تولید رسوب

The figure is a detailed geological columnar chart. It is divided into three main vertical sections: 'Upper Carbonate', 'Limestone', and 'Lower Carbonate'. Each section shows a sequence of lithological units with their respective thicknesses and fossil content. The 'Upper Carbonate' section is the topmost, followed by 'Limestone', and then 'Lower Carbonate' at the bottom. A legend at the bottom left defines the lithological symbols used in the chart, including Limestone, Dolomite, Sandstone, and various fossil types like Alveolites, Chert, and Brachiopods. The chart also includes a scale bar on the right side indicating a total height of 407.4 m.

شکل ۲: تطابق واحدهای کربناته ستون چینه‌سنگی سازند تیرگان در برش‌های مورد مطالعه. در سه برش بخش آهک زیرین، شیل میانی و آهک بالایی قابل تفکیک است.



شکل ۳: واحدهای کربناته در تصویر صحرایی سازند تیرگان در برش‌های مورد مطالعه

## مواد و روش‌ها

سازند تیرگان در این تحقیق در سه برش شیروان، قوچان و چناران مورد مطالعه قرار گرفت. جهت مطالعات پتروگرافی ۷۲۰ مقطع نازک تهیه شد که توسط میکروسکوپ پلاریزان به منظور شناسایی ریزرخساره‌های کربناته و همچنین فرایندهای دیاژنی مورد بررسی قرار گرفتند. برای جداسازی کلسیت و دولومیت آهن‌دار از نمونه‌های بدون آهن، نمونه‌ها توسط محلول فروسیانید پتاسیم به روش دیکسون (Dickson, 1996) رنگ‌آمیزی شدند. به منظور نامگذاری سنگ‌های کربناته از روش دو هام (Dunham, 1962) و سنگ‌های آواری نیز از طبقه‌بندی فولک (Folk, 1980) بهره‌گیری شد. همچنین برای تفسیر ریزرخساره‌ها و ارائه مدل رسوبی از روش فلوگل (Flugel, 2010) کمک گرفته شد. به منظور بررسی‌های ژئوشیمیایی، مقادیر عناصر اصلی و فرعی سنگ‌های آهکی در برش‌های ذکر شده، پس از بررسی دقیق سنگ‌نگاری مقاطع نازک، ۴۱ نمونه به روش ICP-OES در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران- کرج (شرکت ایمیدرو) مورد تجزیه عنصری قرار گرفت. همچنین به منظور بررسی مقدار ایزوتوپ اکسیژن و کربن تعداد ۴۱ نمونه توسط دستگاه اسپکترومتر جرمی (ICP-MS) مرکز آزمایشگاهی علوم (GG Hatch) دانشگاه Ottawa کانادا ارسال شد و توسط دستگاه اسپکترومتر جرمی (ICP-MS) اندازه‌گیری شد که در این روش، ۱۵ میلی‌گرم از پودر نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت تحت‌تاثیر اسید فسفریک ۱۰۰ درصد و در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته تا گاز CO<sub>2</sub> متصاعد شده از نمونه به کمک دستگاه اسپکترومتر جرمی اندازه‌گیری شود. خطای اندازه‌گیری

ایزوتوپی دستگاه  $\pm 0.1\%$  است. ترکیب ایزوتوپ اکسیژن و کربن نمونه‌ها به صورت دلتا و برحسب بخش در هزار است.

## بحث و نتایج

## ریزرخساره‌ها و مدل رسوبگذاری سازند تیرگان در ناحیه مورد مطالعه

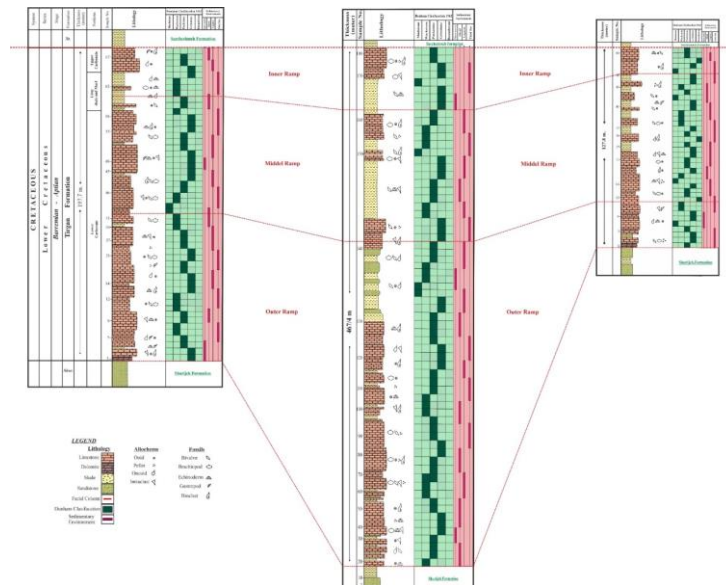
مطالعه پتروگرافی ۷۲۰ مقطع نازک در سه برش سطح الارضی از سازند تیرگان منجر به شناسایی ۱۸ رخساره میکروسکوپی کربناته شامل ۴ مجموعه رخساره ای A, B, C, D شد، که ۳ رخساره مربوط به کمربند رخساره‌ای رمپ خارجی و ۱۲ رخساره مربوط به کمربند رخساره‌ای رمپ میانی و ۱ رخساره آواری نامتجانس و ۱ رخساره آواری متجانس نیز شناسایی شد (جدول ۱ و شکل ۴). با توجه به پژوهش‌های مختلف که بر روی این سازند یا محیط‌های مشابه صورت گرفته (Tucker and Wright, 1990; Warren, 2000; Carvic, 2013; Rivandi et al, 2013; Kietzman et al, 2014; Poursoltani and Kermanshahi, 2017; Yavarmanesh et al, 2017; Bucur and Yarahmadzahi, 2018; Javanbakht et al, 2018; Najaran et al, 2018; Tabatabaee et al, 2019; Golafshani and Khaneabad, 2020). محیط رسوبی این سازند یک پلاتفرم کربناته از نوع رمپ کربناته هم شیب نسبت داد (شکل ۵). لازم به ذکر است تغییرات رخساره‌ای در این مطالعه با اطلاعات ارائه شده توسط (جوانبخت، ۱۳۹۰) بر روی بخش‌های غربی و (طیبان، ۱۳۹۶) بر روی بخش‌های شرقی مقایسه شد. بررسی‌ها شباهت کلی را نشان می‌دهد ولی رخساره‌های لاگونی به طرف غرب افزایش داشته در حالی که رخساره‌های جزرومدی به سمت شرق گسترش بیشتری دارند.

جدول ۱: ویژگی‌های رخساره‌های رسوبی سازند تیرگان در برش‌های مورد مطالعه

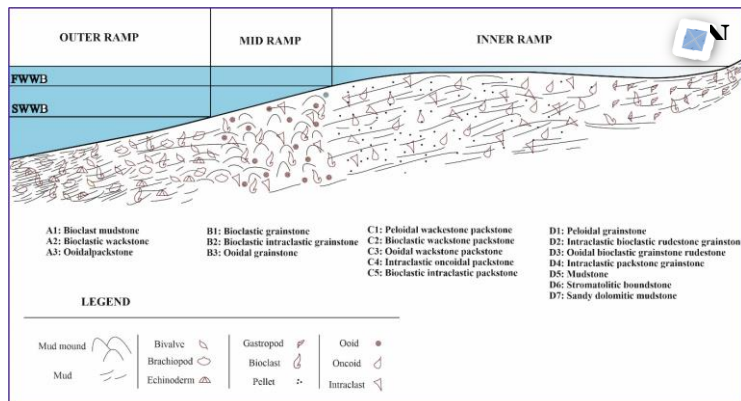
Facies code and bug number	Facies name	Mian and secondary components	Grain size	Sorting	Rounding	Water energy	Depositional environment
A1	Bioclast mudstone	Bioclast	Fine	Low to moderate	Weak	Low	Outer Ramp
A2	Bioclastic wackestone/packstone	Brachiopod, Bivalve, Orbitolin	Fine	Low to moderate	Weak	Low	Outer Ramp
A3	Ooidal packstone	Ooid, Intraclast, Oncoid	Medium	Moderate	Moderate	Medium to low	Outer Ramp
B1	Bioclastic grainstone	Intraclast, Bioclast, Bivalve	Medium to coarse	Moderate	Moderate	High to medium	Middle ramp,
B2	Bioclastic rudstone/grainstone	Bivalve, Brachiopod, Intraclast, Gastropod	Fine	Low to moderate	Weak	High	Middle ramp,
B3	Ooidal grainstone	Ooid, Intraclast, Bivalve, Gastropod	Medium	Moderate	Moderate	Medium to high	Middle ramp,
C1	Peloidal wackestone/packstone	Peloid, Stracodea	Medium	Low	Moderate	Low	Inner ramp



C2	Bioclastic wackestone/packstone	Miliolid, Green algae	Medium	Low to moderate	Weak	Low	Inner ramp
C3	Ooidal wackestone/packstone	Ooid, Gastropod, Stracodea	Medium to coarse	Low	Weak	Low	Inner ramp
C4	Intraclastic oncoidal packstone	Bivalve, Brachiopod, Gastripod, Echinoderm	Fine	Low	Weak	Medium to low	Inner ramp
C5	Bioclastic packstone	Intraclast, Gastropod	Medium	Low to moderate	Moderate	Medium to low	Inner ramp
D1	Peloidal grainstone	Peloid, Ooid	Medium	Moderate	Moderate	High to medium	Inner ramp
D2	Intraclastic rudstone/grainstone	Bioclast, Intraclast	Medium to coarse	Low	Moderate	High	Inner ramp
D3	Ooidal grainstone/rudstone	Ooid, Bioclast	Medium to coarse	Low	Moderate	High	Inner ramp
D4	Intraclast grainstone	Peloid, Intraclast, Bivalve	Medium	Moderate	Weak	High	Inner ramp
D5	Mudstone	—	Fine	Fine	Weak	Low	Inner ramp
D6	Stromatolitic boundstone	Stromatolite	Fine	Very fine	Weak	Low to medium	Inner ramp
D7	Sandy dolomitic mudstone	Dolomite, Quartz, Bioclast	Fine	Very fine	Weak	Low	Inner ramp
S1	Lime sandstone	Quartz, Chert, Brachiopod	Medium	Moderate	Moderate	High to medium	Subtidal
S2	Quartzarenite	Quartz, Chert	Fine	Very fine	Weak	High	Intratidal
S3	Sublitharenite	Quartz, Feldespar	Medium	Moderate	Moderate	Medium	Subtidal



شکل ۴: تطابق ریزرخساره‌ها و نوع محیط رسوبی سازند تیرگان در برش‌های مورد مطالعه

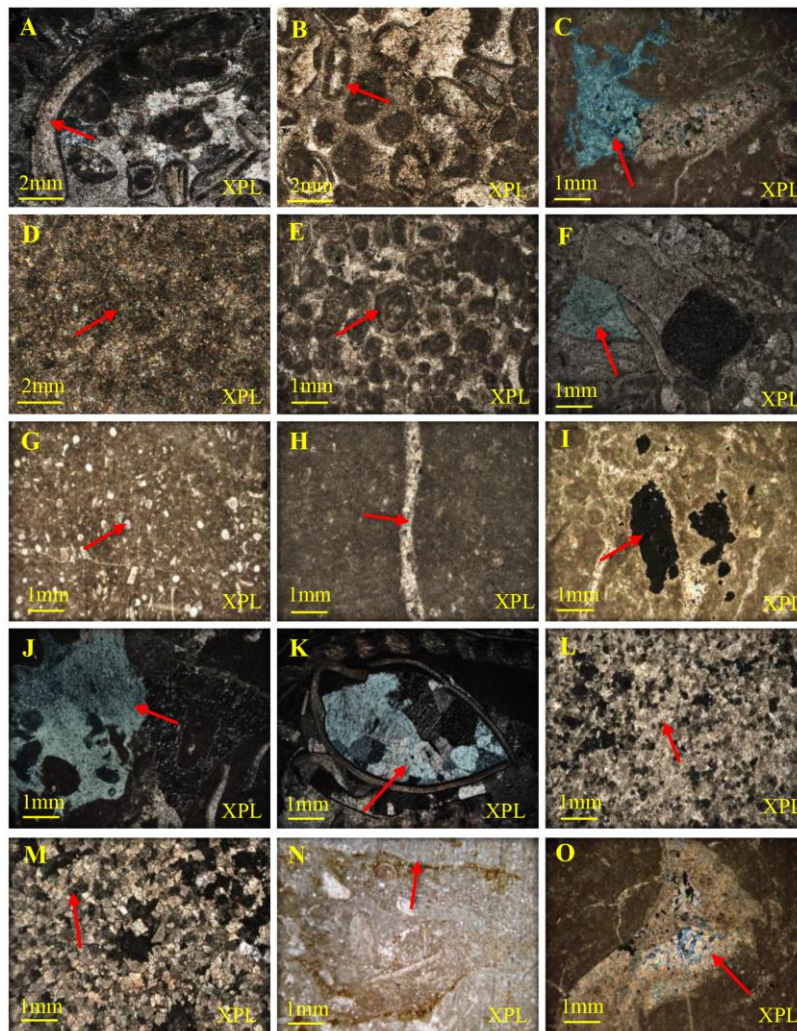


شکل ۵: مدل رسوبی سازند تیرگان در برش‌های مورد مطالعه

## فرایندهای دیاژنزی

فرایندهای فیزیکی و شیمیایی که موجب تغییر ویژگی رسوبات در زمان رسوبگذاری و حتی پس از نهشته شدن می گردد را دیاژنز گویند (عزیزعینی، ۱۳۹۴؛ پورسلطانی و همکاران، ۱۳۹۶) و (Morad et al, 2013; Haeri) و (Ardakani et al, 2014; Jafarian et al, 2017; Heidari et al, 2017; Javanbakht et al, 2018). این فرایندها در سه محیط دیاژنز دریایی، تدفینی و جوی در رسوبات تاثیرگذار است (Zara and Tanner, 2010). فرایندهای دیاژنزی متنوعی در سازند تیرگان در سه برش مورد مطالعه وجود داشته، که مهم ترین آن ها به شرح زیر می باشد. در محیط دیاژنز دریایی شامل میکریتی شدن (شکل ۶ A)، سیمان کلسیتی ایزوپکوس (شکل ۶ B)،

سیمان کلسیتی دروزی آهن دار (شکل ۶ C)، دولومیتی شدن اولیه ریزبلور (شکل ۶ D) می باشد. در محیط جوی- فریاتیک شامل سیمان کلسیتی اسپاری موزائیکی (شکل ۶ E)، سیمان هم بعد آهن دار (شکل ۶ F)، نئومورفیسم (شکل ۶ G) و در محیط متئوریکی- وادوز شامل سیمان کلسیتی شکستگی- پرشدگی (شکل ۶ H)، انحلال (شکل ۶ I) بوده است. در محیط تدفینی شامل سیمان پوئیکیلوتاپیک آهن دار (شکل ۶ J)، سیمان کلسیتی بلوکی آهن دار (شکل ۶ K)، دولومیتی شدن ثانویه متوسط بلور (شکل ۶ L)، دولومیتی شدن ثانویه درشت بلور (شکل ۶ M)، استیلولیتی شدن (شکل ۶ N)، و سیلیسی شدن (شکل ۶ O) می باشند.



شکل ۶: فرایندهای دیاژنزی در برش های مورد مطالعه. A: میکریتی شدن، B: سیمان کلسیتی ایزوپکوس، C: کلسیتی دروزی آهن دار، D: دولومیتی شدن ریزبلور، E: کلسیتی موزائیکی، F: سیمان هم بعد آهن دار، G: نئومورفیسم، H: سیمان کلسیتی، I: انحلال، J: پوئیکیلوتاپیک آهن دار، K: سیمان بلوکی آهن دار، L: دولومیتی شدن متوسط بلور، M: دولومیتی شدن درشت بلور، N: استیلولیتی شدن، O: سیلیسی شدن.

## مطالعات ژئوشیمیایی

عناصر اصلی شامل (Ca, Mg) و عناصر فرعی از قبیل (Mn, Sr, Na, Fe) اساس آنالیزهای انجام شده بر روی نمونه‌های انتخاب شده می‌باشد. در این مطالعه، آنالیزهای ژئوشیمیایی جهت شناخت کانی شناسی اولیه، سیستم دیاژنزی و تغییرات عناصر در نمونه‌های مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به تاثیرات دیاژنز بر روی سنگ‌ها و دگرسان شدن آنها تشخیص مینرالوژی اولیه کلسیتی و آراگونیتی سنگ به راحتی امکان‌پذیر نمی‌باشد (Higgins et al, 2018). به خصوص اینکه به مرور زمان آراگونیت و کلسیت پرمینیزیم به کلسیت کم منیزیم تبدیل و باعث تغییر بافت و ترکیب

اولیه سنگ می‌شوند، اگر چه مقدار Sr یا Na در سنگ آهک‌های دیرینه در طی دیاژنز متتوریک و یا تدفینی کاهش چشمگیری می‌یابد، با این وجود نسبت‌های Sr/Na در سنگ آهک‌های دیرینه می‌تواند باعث تفکیک سنگ آهک‌های با مینرالوژی اولیه آراگونیتی از معادل‌های کلسیتی باشد لذا یکی از اهداف آنالیزهای ژئوشیمیایی دسترسی به این مهم می‌باشد. بدین منظور ۴۱ نمونه از سه برش بدین منظور انتخاب (جدول ۲) و تغییرات عناصر اصلی و فرعی در نمونه‌ها با اطلاعات ارائه شده در شرق و غرب حوضه مقایسه گردید.

جدول ۲: میانگین مقدار واکاوی عنصری و ایزوتوپی سنگ‌های آهکی سازند تیرگان در برش‌های مورد مطالعه

Section Name	Static Parameter	Ca (ppm)	Fe (ppm)	Mg (ppm)	Mn (ppm)	Sr (ppm)	Na (ppm)	$\delta^{13}C$	$\delta^{18}O$	Sr/Na	Sr/Ca1000
Shirvan	Max	302400	14600	17800	489	378	7600	3.68	-2.05	0.18	1.63
	Min	153800	4300	4100	128	35	1200	2.02	-6.44	2.02	0.15
	Average	230400	8740	9560	306.2	246.2	4640	2.78	-2.24	0.07	1.081
Quchan	Max	348100	16400	22000	602	445	7600	4.1	-0.5	0.89	2.56
	Min	130000	3100	4400	120	35	500	1.2	-5.4	0.01	0.24
	Average	252715	8010	9250	333.05	245.05	2765	2.92	-2.85	0.19	0.8935
Chenaran	Max	258000	14400	17200	540	325	7500	2.93	-1.5	0.19	1.72
	Min	172000	6100	4200	280	144	1000	1.19	-5.2	0.02	0.6
	Average	203718.2	8663.63	8481.81	376.18	224	505.544	2.03	-3.59	0.05	1.11

## مقادیر عناصر اصلی و فرعی

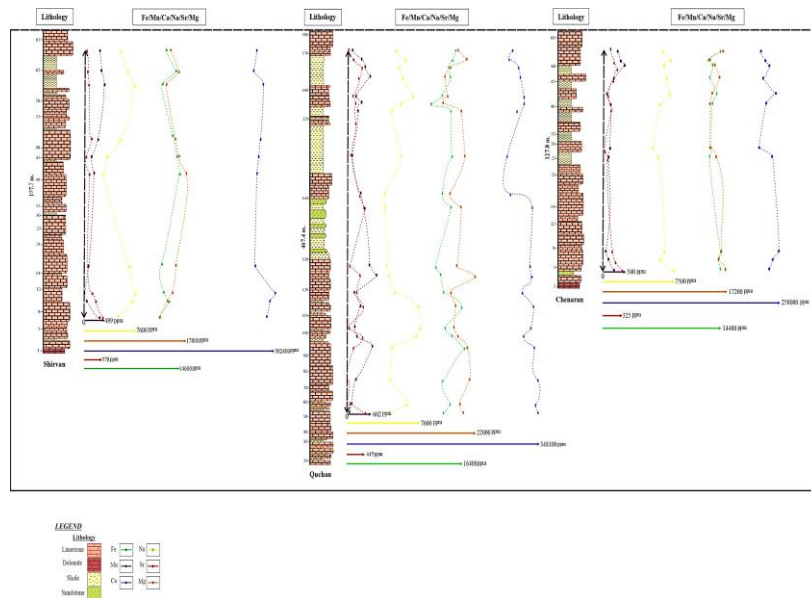
میزان استرانسیم در کربنات‌های عهد حاضر با افزایش کانی‌شناسی آراگونیتی افزایش و با افزایش کانی‌شناسی کلسیت کاهش می‌یابد (Milliman, 1974). مقدار عنصر Sr به‌طور میانگین در برش شیروان ۲۴۶/۲ پی پی ام، در برش قوچان ۲۴۵/۰۵ پی پی ام و در برش چناران ۲۲۴ پی پی ام در تغییر می‌باشد، و به‌طور کلی میانگین در نمونه‌های کربناته سه برش در حدود ۲۳۹ پی پی ام در نوسان است. این مقدار حتی پایین‌تر از مقادیر نمونه‌های کلسیتی عهد حاضر (۱۰۰۰ پی پی ام) است، که می‌تواند در طی دیاژنز کاهش یافته باشد. مقدار سدیم با افزایش شوری، عمق آب و میزان آراگونیت افزایش می‌یابد (گلستان، ۱۳۹۸). از آنجائی که تغییرات شوری و عمق با توجه به مطالعات رخساره‌ای انجام شده در برش‌ها تاثیری زیادی نداشته‌اند لذا کانی‌شناسی اولیه و فرایندهای دیاژنزی عامل کنترل‌کننده تغییرات این عنصر می‌باشند. مقدار عنصر Na به‌طور میانگین در برش شیروان حدود ۴۶۴۰ پی پی ام، در برش قوچان حدود ۲۷۶۵ پی پی ام و در برش چناران ۵۰۵۴/۵۴ پی پی ام در تغییر می‌باشد، و به‌طور کلی میانگین در نمونه‌های کربناته سه برش در حدود ۲۱۵۳ پی پی ام در نوسان است. از آنجائی که میزان سدیم در کربنات‌های کلسیتی

غیر بیوتیک عهد حاضر خیلی کمتر از این مقدار می‌باشد (۲۷۰ پی پی ام) (Rao and Adabi, 1992) می‌توان تغییرات این عنصر را به فرایندهای دیاژنزی به خصوص تاثیر واحدهای شیلی در تامین این عنصر نسبت داد (Javanbakht et al, 2018). مقدار عنصر Mn به‌طور میانگین در برش شیروان حدود ۳۰۶/۲ پی پی ام، در برش قوچان حدود ۳۳۳/۰۵ پی پی ام و در برش چناران ۳۷۶/۱۸ پی پی ام در تغییر می‌باشد و به‌طور کلی میانگین این عنصر در نمونه‌های کربناته سه برش در حدود ۳۸۳ پی پی ام در نوسان است. این عنصر در نمونه‌های کل کربناته کلسیتی مناطق معتدله عهد حاضر بیش از ۳۰۰ پی پی ام است (Rao and Adabi, 1992; Rao and Amini, 1995). میزان تمرکز منگنز در کربنات‌های دریایی به کانی‌شناسی اولیه، سرعت رسوبگذاری، شرایط اکسیداسیون و احیاء و میزان تمرکز منگنز در آب دریا وابسته است (Flugel, 2010) کاهش میزان منگنز را می‌توان به حاکمیت شرایط اکسیدان در محیط، افزایش سرعت رسوبگذاری و کانی‌شناسی آراگونیتی نسبت داد (Asadi Mehmandosti and Adabi, 2013; Li et al, 2013; Aghaei et al, 2014; Adabi et al, 2015).



دیرینه می‌تواند باعث تفکیک سنگ‌آهک‌هایی با کانی-شناسی اولیه آراگونیتی از معادل کلسیتی باشد (Veizer, 1983; Brand and Morrison, 1987; Adabi and Rao, 1991; Marshall, 1992; Winefield et al, 1996). این نتیجه به کمک نسبت استرانسیم به سدیم نیز مورد بررسی قرار گرفت تا تغییرات عنصر سدیم نیز ارزیابی گردد. مقایسه این نسبت در نمونه‌های کربناته سازند تیرگان در سه برش با محدوده سنگ‌های کربناته نواحی غربی و شرقی (جوانبخت، ۱۳۹۰) و (طیبیان، ۱۳۹۶) حوضه مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داد نمونه‌های کربناته سازند تیرگان در مرکز و شرق حوضه (طیبیان، ۱۳۹۶) کانی‌شناسی کلسیتی (کاهش نسبت) و در غرب حوضه (جوانبخت، ۱۳۹۰) کانی‌شناسی آراگونیتی (افزایش نسبت) دارند.

با توجه به مقدار منگنز در نمونه‌های سنگ‌های آهکی سازند تیرگان و نزدیکی این مقدار با نمونه‌های کلسیتی عهد حاضر (بیش از ۳۰۰ پی پی ام) و شرایط تقریباً مشابه حاکم بر محیط رسوبگذاری مینرالوژی کلسیتی را برای این سازند پیشنهاد می‌نماید. بررسی تغییرات این عناصر در برش‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که استرانسیم به سمت غرب (برش شیروان) افزایش و میزان منگنز کاهش می‌یابد. انطباق این داده‌ها با مطالعات صورت گرفته توسط سایر محققین (جوانبخت، ۱۳۹۰) و (طیبیان، ۱۳۹۶). بر روی این سازند این روند به سمت غرب نیز ادامه داشته به طوری که در نواحی غربی مینرالوژی آراگونیتی برای سازند تیرگان معرفی گردیده است (جوانبخت، ۱۳۹۰) (شکل ۷). از آنجائی که نسبت‌های استرانسیم به سدیم در سنگ آهک‌های



شکل ۷: بررسی آنالیز عنصری داده‌های ژئوشیمیایی در سه برش مورد مطالعه

می‌باشد (Rao and Adabi, 1991) مقدار میانگین Sr/Na در نمونه‌های آهکی سازند تیرگان در برش شیروان حدود ۰/۶ پی پی ام، در برش قوچان در حدود ۰/۱۹ پی پی ام و در برش چناران حدود ۰/۰۵ پی پی ام در تغییر است و مقدار میانگین Sr/Na در نمونه‌های کربناته سه برش ۰/۱۲ می‌باشد. بررسی این نسبت نیز نشان دهنده مینرالوژی کلسیتی در سه برش است اما تغییرات نشان می‌دهند این نسبت به سمت غرب افزایش یافته و احتمالاً به مینرالوژی آراگونیتی در حال تغییر است. تغییرات عنصری Sr/Na در مقابل Mn نمونه‌های کربناته سازند تیرگان در مرکز حوضه

#### نسبت استرانسیم به سدیم در برابر منگنز

نسبت استرانسیم به سدیم در برابر منگنز به عنوان ملاکی برای تشخیص کربنات‌های حاره‌ای دیرینه و عهد حاضر (کانی‌شناسی آراگونیتی) از معادل‌های غیرحاره‌ای (کانی‌شناسی کلسیتی) آنها به کار می‌رود (Adabi et al, 2010; Javanbakht et al, 2018). در سنگ آهک‌های آراگونیتی حاره‌ای عهد حاضر مقدار منگنز پایین و نسبت استرانسیم به سدیم بالا و در حدود ۳-۵ می‌باشد. در حالی که در سنگ‌های آهکی کلسیتی مناطق معتدله مقدار منگنز بالا بوده و نسبت استرانسیم به سدیم پایین و در حدود ۱-۴

دیاژنزی بستگی دارد، لذا با توجه به این موارد می‌توان کربنات‌های مناطق مختلف (حاره‌ای و غیرحاره‌ای)، نوع دیاژنز دریایی، متئوریک و تدفینی، کانی‌شناسی اولیه و همچنین دمای تشکیل را تشخیص داد (Hudson and Anderson, 1989; Rao, 1996; Bernasconi et al, 2011). تغییرات ایزوتوپ اکسیژن ۱۸ در سنگ آهک‌های سازند تیرگان در برش شیروان بین ۲/۰۵ - تا ۶/۴۴ - در هزار PDB، در برش قوچان بین ۰/۵ - تا ۵/۴ - در هزار PDB و در برش چناران بین ۱/۵ - تا ۵/۲ - در هزار PDB می‌باشد و مقدار ایزوتوپ کربن ۱۳ در برش شیروان بین ۲/۰۲ تا ۳/۶۸ در هزار PDB، در برش قوچان بین ۱/۲ تا ۴/۱ در هزار PDB و در برش چناران بین ۱/۱۹ تا ۲/۹۳ در هزار PDB در تغییر است. بسیاری از محققین (Smith and Nelson, 1996) همچنین (James and Choquette, 1987) بر این عقیده‌اند که تغییرات نسبتا وسیع در مقادیر ایزوتوپ اکسیژن ۱۸ و تغییرات ناچیز در مقادیر ایزوتوپ کربن ۱۳ در نمونه‌های کربناته می‌تواند حاکی از تاثیر دیاژنز تدفینی بر روی نمونه‌ها باشد. تغییرات ناچیز در مقادیر ایزوتوپ کربن ۱۳ (در مدل ایزوتوپی تدفینی) به این دلیل است که معمولا تاثیر فرایندهای ایزوتوپی بر روی ایزوتوپ کربن برعکس ایزوتوپ اکسیژن بسیار کم بوده و در نتیجه کربن از سنگ مادر یا کانی اولیه به کانی ثانویه یا بعدی با تغییر ناچیز انتقال می‌یابد (شکل ۸). علاوه بر این تفریق ایزوتوپی کمتری بین نسبت کربن ۱۳ به ۱۲ با افزایش دما، در مقایسه با نسبت اکسیژن ۱۸ به ۱۶ وجود دارد. به عبارتی ایزوتوپ کربن با دما تغییر زیادی نمی‌کند ولی ایزوتوپ اکسیژن ۱۸ به دما حساس می‌باشد. بررسی تغییرات ایزوتوپی سازند تیرگان در برش‌های مورد مطالعه نشان دهنده شرایط دیاژنز تدفینی است این در حالی است که در نواحی شرقی (طیبان، ۱۳۹۶) و نواحی غربی (جوانبخت، ۱۳۹۰) نیز چنین شرایطی برقرار بوده است (شکل ۹ D).

#### رسم ایزوتوپ اکسیژن در برابر منگنز

به منظور شناسایی باز یا بسته بودن محیط دیاژنزی از نمودار ایزوتوپ اکسیژن در مقابل منگنز استفاده می‌شود. روندهای دیاژنتیکی برای ترکیبات کلسیت کم منیزیم، کلسیت با منیزیم بالا، آراگونیت (A) برای تشکیل دهنده های عهد حاضر (R)، محدوده‌های برلینگتون می‌سی‌سی پی در آمریکا (CM) و سنگ‌آهک‌های ریدبی سیلورین در کانادا (CS) نشان داده شده است (Brand and Veizer, 1980).

با کربنات‌های سازند تیرگان در شرق و غرب حوضه مقایسه گردید که مطالعات به دست آمده نشان دهنده کانی‌شناسی کلسیتی در مرکز و شرق حوضه (طیبان، ۱۳۹۶) و کانی‌شناسی آراگونیتی در غرب حوضه (جوانبخت، ۱۳۹۰) حکم فرماست (شکل ۹ A).

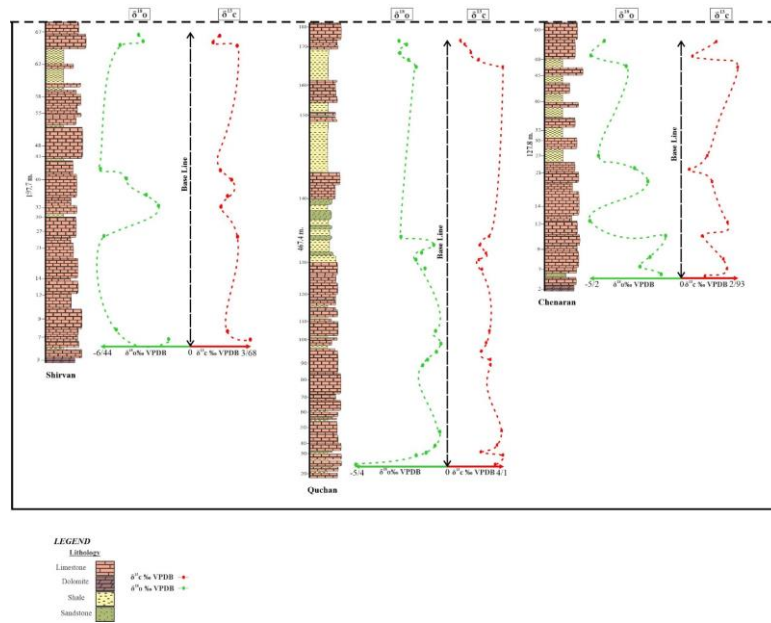
#### نسبت استرانسیم به کلسیم در مقابل منگنز

مقدار نسبت استرانسیم به کلسیم ( $Sr/Ca \times 1000$ ) به‌طور میانگین در برش شیروان حدود ۱/۰۸ پی پی ام، در برش قوچان حدود ۰/۸۹ پی پی ام و در برش چناران ۱/۱۱ پی پی ام در تغییر می‌باشد، و به‌طور کلی میانگین در نمونه‌های کربناته سه برش در حدود ۱/۰۲ پی پی ام در نوسان است. به کمک نسبت استرانسیم به کلسیم در مقابل منگنز می‌توان روند دیاژنز را در سیستم‌های کربناته بررسی نمود (Li et al, 2013) در بعضی نمودارها این تغییرات حالت مقایسه ای دارد به‌طوری که می‌توان آن را با محدوده‌های آراگونیتی (A)، کلسیت با منیزیم بالا (HMC) و کلسیت با منیزیم پایین (LMC) مقایسه نمود. بررسی این نمودار نشان می‌دهد که احتمالا نمونه‌های سازند تیرگان با محدوده کلسیت با منیزیم بالا تا کلسیت با منیزیم پایین شباهت بیشتری را نشان می‌دهد (شکل ۹ B). در سیستم دیاژنزی باز با افزایش تبدلات آب به سنگ میزان  $Sr/Ca$  کاهش یافته و در نتیجه میزان  $Sr/Ca$  فازهای دیاژنزی کمتر از ترکیبات اولیه خواهد بود (Asadi and Adabi, 2013; Adabi et al, 2015). در حالی که در سیستم‌های دیاژنتیکی نیمه بسته فعل و انفعالات آب و سنگ کم است، لذا نسبت  $Sr/Ca$  فازهای دیاژنزی تغییرات محسوسی نسبت به ترکیبات اولیه نخواهد داشت. به‌طور عمده عدم تغییر منگنز در کلسیت دیاژنتیکی نسبت به کلسیت‌های عهد حاضر (۳۰ پی پی ام) نشانگر حاکم بودن شرایط احیایی و نیمه بسته بودن سیستم دیاژنزی است (Brand and Veizer, 1980). در نمونه‌های آهکی سازند تیرگان به دلیل بالا بودن مقادیر  $Sr/Ca$  و عدم تغییر مقادیر Mn، چنین به نظر می‌رسد که این نمونه‌ها تحت تاثیر دیاژنز تدفینی (شرایط احیایی) در یک سیستم دیاژنتیکی نیمه بسته قرار گرفته‌اند (شکل ۹ C).

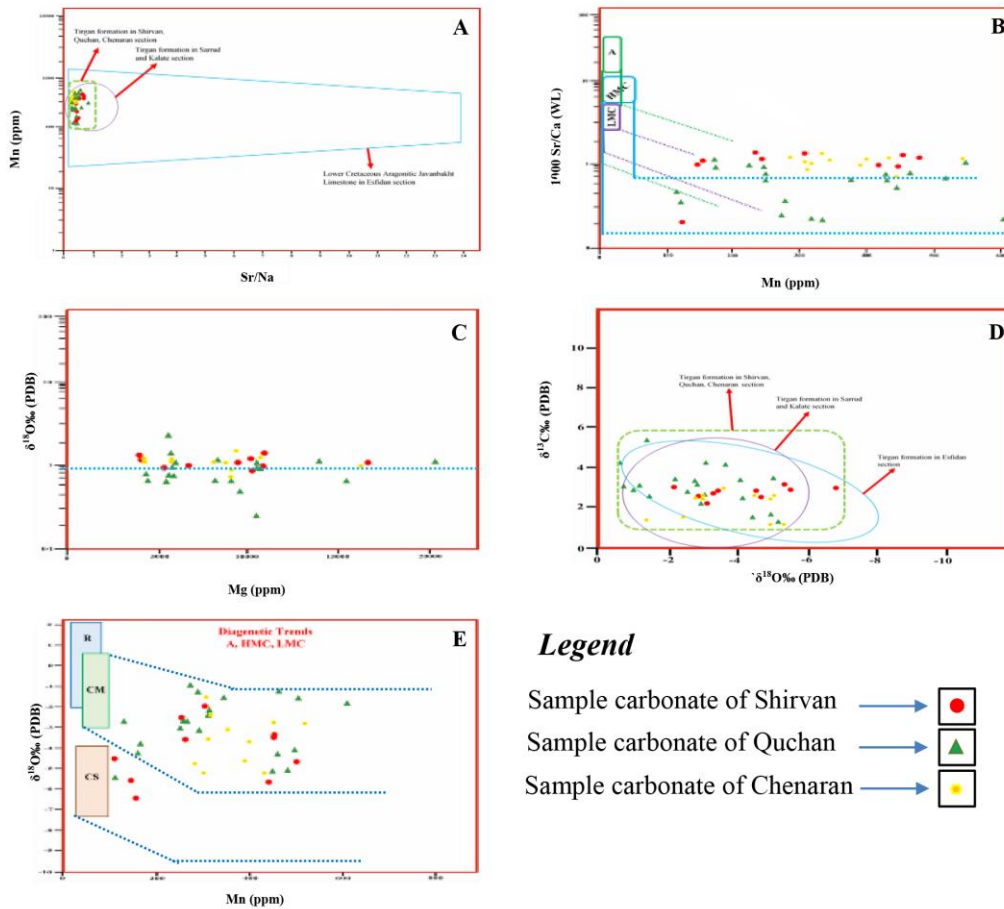
**بررسی‌های ایزوتوپی اکسیژن ۱۸ و کربن ۱۳:** تغییر در میزان ایزوتوپ‌های اکسیژن و کربن به فاکتورهای متعددی چون دمای آب دریا، کانی‌شناسی، درجه شوری، تفریق بیوشیمیایی، سرعت رسوبگذاری و محیط‌های مختلف

محدوده سیستم‌های نیمه بسته با ترکیب کلسیتی قرار گرفته است (شکل ۹ E).

۱۹۸۰). مقایسه نمونه‌های کربناته سازند تیرگان در برش های مورد مطالعه نشان می‌دهد که دیاژنز سازند تیرگان در



شکل ۸: بررسی تغییرات ایزوتوپی در سه برش مورد مطالعه



شکل ۹: نتایج آنالیزهای ژئوشیمیایی در رسوبات سازند تیرگان در برش‌های مورد مطالعه

افزایش موجودات ترشح کننده کربنات و رسوبگذاری شیل های سیاه در اقیانوس‌ها گردیده است (Bernanos et al, 2000). این دوره‌های گلخانه‌ای تنها در پلاتفرم کربناته پالئوزوئیک تحتانی و مزوزوئیک شکل گرفته است (Kwon et al, 2006). در زمان کرتاسه زیرین حوضه رسوبی کپه داغ در عرض جغرافیایی ۲۰ تا ۲۲ درجه شمالی قرار داشته و احتمالا آب و هوای گرم و تقریبا حاره‌ای ۲۵ تا ۳۰ درجه بر آن حاکم بوده است (Scotese, 2004). در زمان بارمین-آپسین (نهشته‌های سازند تیرگان) فعالیت‌های تکتونیکی در نواحی مرکزی کپه داغ بیشتر می‌باشد که احتمالا با شکستگی و پائین رفتن پی سنگ در این منطقه فضای بیشتری جهت نهشته شدن رسوبات کربناته فراهم آمده و ضخامت سازند تیرگان در این نواحی به حداکثر خود رسیده است. البته این تغییرات همزمان با تغییرات جهانی سطح آب دریا باعث پائین رفتن نسبی سطح آب دریا در این نواحی نیز شده است که وجود عدسی‌هایی از رسوبات آواری موجود در برش قوچان این امر را تایید می‌کند. افشار حرب (۱۳۷۳) معتقد است نهشته‌های کربناته تیرگان از غرب و شمال غربی به شرق و جنوب شرقی گسترش یافته است. این در حالی است که بررسی‌های چینه‌زیستی، ضخامت بیشتر نهشته‌های بارمین در برش قوچان نسبت به برش شیروان را تایید می‌نماید که می‌توان نتیجه گرفت این فرونشینی از زمان بارمین اتفاق افتاده است و فضای لازم برای نهشته شدن این رخساره‌ها با ضخامت بیشتر در این نواحی را داده است. گسترش بیشتر رخساره‌های گلی در برش شیروان را می‌توان به پایداری بیشتر شرایط تکتونیکی حاکم بر حوضه در این نواحی و یا دوری از فعالیت‌های تکتونیکی دانست. از دیدگاه محیط رسوبی در تمام برش های مورد مطالعه از قاعده به بالا عمیق شوندگی در رخساره‌های نهشته شده مشاهده می‌گردد. اجزاء موجود رخساره‌های دریای باز مانند براکیوپود، اکینودرم، بریوزوئر و مقادیر زیاد میکریت در بین آلوکم‌ها در بین رسوبات برش شیروان بیانگر تشکیل رسوبات در محیط کم انرژی و آرام‌تر نسبت به برش قوچان و چناران می‌باشند. شایان ذکر است اجزاء موجود رخساره‌های لاگونی مانند جلبک سبز، اوربیتولین و فراوانی گل و پلوئید به همراه دانه‌های آواری نشان دهنده رسوبگذاری در محیط آرام و کم انرژی بدون تاثیر امواج و جریان‌ات آب و همچنین فقدان ساختمان‌های حاصل از اثر امواج و جریان‌ها و نبود کانی تبخیری حاکی

محاسبه دمای آب دریا در زمان ته نشست سازند تیرگان از مهم‌ترین کاربردهای ایزوتوپ اکسیژن ۱۸ در کربنات‌ها، تعیین دمای تشکیل آنهاست (Morse and Mackenzie, 1990). برای این منظور باید از نمونه‌های آهکی دریایی با کمترین میزان دگرسانی و سنگین‌ترین  $\delta^{18}\text{O}$  استفاده کرد. معمولا سنگین‌ترین ایزوتوپ اکسیژن ۱۸ نشانگر دمای محیط رسوبی و سبک‌ترین آن نشانگر دمای محیط دیاژنتیکی است (Adabi, 1996). دمای آبی که کلسیت در آن نهشته شده است با استفاده از معادله (Anderson and Arthur, 1983) محاسبه می‌شود (رابطه ۱).

رابطه ۱)

$$T^{\circ}\text{C} = 16 - 4.14 * (\delta\text{c} - \delta\text{w}) + 0.13 * (\delta\text{c} - \delta\text{w})^2$$

در این رابطه T، برحسب سانتی‌گراد،  $\delta\text{C}$ ، مقدار ایزوتوپ اکسیژن ۱۸ محاسبه شده برحسب PDB توسط دستگاه طیف سنج جرمی،  $\delta\text{w}$ ، مقدار  $\delta^{18}\text{O}$  آب دریا در زمان تشکیل کلسیت برحسب SMOW است. مقدار برای دوره زمین‌شناسی کرتاسه SMOW ۱% - در نظر گرفته می‌شود (Vaizer et al, 1999; Grock et al, 2003). دمای آب دریا در زمان ته‌نشست سازند تیرگان یا به عبارتی دمای اولیه دیاژنتیکی با استفاده از سنگین‌ترین ایزوتوپ اکسیژن ۱۸ در برش شیروان (PDB % -۲/۰۵)، ۲۲/۵۹ درجه سانتی‌گراد و در برش قوچان (PDB % -۰/۵)، ۱۳/۹۶ درجه سانتی‌گراد و در برش چناران (PDB % -۱/۵)، ۱۸/۱۰ محاسبه شده است، که به‌طور میانگین دمای اولیه دیاژنتیکی ۱۸/۲۱ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

#### بحث

در بارمین آغازین، بالا آمدن سطح دریا در مقیاس جهانی زمینه پیشروی وسیع دریا را فراهم کرده است (Haq et al, 1987). این پیشروی که باعث نهشته شدن رسوبات کربناته آئیدی و بیوکلسیتی در محیط کم‌عمق دریایی گردیده است از شمال غرب حوضه شروع و به سمت جنوب شرقی آن ادامه داشته است (افشار حرب، ۱۳۷۳). پس از آن سازند سرچشمه در محیطی آرام‌تر و با فرونشینی بیشتر نهشته شده است. در طی بارمین-آپسین پسین سطح آب دریا بیشتر بالا آمده است (Raisossadat, 2000; Moussavi-Harami, 2000). در کرتاسه زیرین آب و هوای گلخانه‌ای حاکم است که توسط اقیانوس‌های گرم، مقادیر بالای  $\text{CO}_2$  اتمسفر و سطح بالای دریا در مقیاس جهانی مشخص می‌شود. عوامل فوق موجب ایجاد مقادیر بالای تولیدات آلی،

آب شیرین در محیط‌های ساحلی، وجود کانی تبخیری نشانگر چرخش محدود آب و شرایط بالای جذر و مدی را نشان می‌دهد. از دیدگاه ژئوشیمیایی نیز بررسی‌ها نشان دهنده تغییراتی در محتوای عنصری و ایزوتوپی است به طوری که تغییرات عنصری و ایزوتوپی در برش شیروان به علت بالا بودن میزان گل‌های کربناته در طی دیاژنز کمتر و به مقدار کلسیت‌های عهد حاضر نزدیک‌تر می‌باشد در حالی که به سمت شرق به علت عمق کمتر محیط تشکیل نهشته‌ها این تغییرات بیشتر می‌باشد. از طرفی دمای محیط نیز در برش شیروان کمترین و قوچان بیشترین میزان را دارا می‌باشد که البته با دمای جغرافیای دیرینه زمان تشکیل مطابقت دارد و حاکی از تاثیر بیشتر ایزوتوپ اکسیژن از محیط رسوبگذاری در این برش‌ها است. به طور کلی روند تغییرات کانی‌شناسی اولیه از شرق به غرب حوضه از کلسیت به آراگونیت تغییر یافته که در طی بررسی برش-ها در مناطق مرکزی نیز این تغییرات قابل بررسی می‌باشد. در انتها با توجه به اطلاعات ارائه شده تغییرات چینه‌سنگی، ریزرخساره‌ای و ژئوشیمیایی سازند تیرگان در نواحی مرکزی موید تغییرات تکتونیکی از غرب به شرق و به دنبال تغییرات محتوای سنگی، رخساره‌ای و ژئوشیمیایی است.

### نتیجه‌گیری

به منظور بررسی سازند تیرگان سه برش در بخش مرکزی حوضه انتخاب شد. برش شیروان به ضخامت ۱۹۷/۷ متر، برش قوچان به ضخامت ۴۶۷/۴ متر و در برش چناران به ضخامت ۱۲۷/۸ متر برداشت گردیدند. بررسی‌های سنگ نگاری و بررسی بافت رسوبی بر روی برش‌های نازک سازند تیرگان منجر به شناسایی ۱۸ ریزرخساره شده است که بیانگر رسوبگذاری در ۴ زیر محیط دریای باز، پشته، لاگون و پهنه جذر و مدی است. با توجه به ویژگی‌های رخساره‌ای سازند تیرگان و بررسی تغییرات عمودی و جانبی این رخساره‌ها، محیط رسوبی رسوبات سازند تیرگان در مناطق مورد بررسی را می‌توان به صورت یک رمپ کربناته هموکلینال یا پشته سدی تفسیر کرد. مهم‌ترین فرایندهای دیاژنزی شناسایی شده در سازند تیرگان عبارتند از سیمانی شدن، میکریتی شدن، انحلال، فشردگی، دولومیتی شدن، نئومورفیسم، استیلولیتی شدن و سیلیسی شدن می‌باشد. بررسی عناصر اصلی و فرعی سنگ آهک‌های سازند تیرگان

از ته نشست رسوبات در برش شیروان در شرایط محیطی کم انرژی و زیر خط اثر امواج طوفانی SWB نسبت به دو برش دیگر می‌باشد. ساختمان‌های رسوبی مانند طبقه‌بندی مورب مسطح، تراف و ریپل مارک جریان‌ی نشان دهنده این مطلب است که رخساره‌های آواری در بخش‌های میانی برش قوچان و چناران در محیط ساحلی و کانال‌های جذر و مدی موجود، تحت جریان‌های پراثرژی در پلاتفرم کربناته تیرگان نهشته شده‌اند. رخساره‌های شیلی ابتدای برش‌ها در تناوب با رخساره‌های ماسه‌ای ریز تا متوسط می‌باشند، در محیط‌های لاگونی آرام که رسوبات گلی فراوان‌تر دارند نهشته می‌شوند و جریان‌ات جذر و مدی و فعالیت امواج باعث ورود ماسه به این محیط شده که باعث تشکیل تناوب رخساره شیلی و رخساره ماسه‌ای شده است. اما رخساره-های شیلی انتهای برش‌ها حاوی خرده‌های سالم براکیوپود، اکینودرم و اوربیتولین می‌باشند که احتمالاً در جلوی سد و زیر خط اثر امواج نهشته شده‌اند. در تمام برش‌ها بخش‌های ابتدایی با رخساره‌های دولومیتی یا آواری پهنه جذر و مدی آغاز و با رخساره‌های ابتدایی رمپ خارجی (دریای باز) خاتمه می‌یابد. وجود رخساره‌های رمپ داخلی با ضخامت زیاد در برش قوچان و چناران نسبت به برش شیروان موید افزایش رسوبگذاری در محل این برش‌ها در زمان نهشته شدن این رخساره‌هاست، که می‌تواند به علت فرونشینی کف حوضه ایجاد گردد. نبود رخساره‌های ماسه‌سنگ نامتجانس در بخش‌های ابتدایی برش شیروان در مقایسه با برش‌های دیگر را می‌توان یکی دیگر از شواهد شرایط کم-انرژی محیط رسوبگذاری در محل این برش نسبت به دو برش دیگر دانست. از مجموعه شواهد ارائه شده می‌توان نتیجه گرفت که شرایط رسوبگذاری در برش شیروان احتمالاً مربوط به محیط نسبتاً آرام و با گسترش لاگون نیمه محصور بوده که حاکی از وجود پشته‌های کربناته نسبتاً گسترده در این منطقه است که باعث نهشته شدن رخساره‌های محیط لاگونی در شرایط کم انرژی شده است. اما برش چناران شرایط حاشیه پراثرژی به‌طور متناوب با ورود مواد آواری تغذیه می‌شده است را نشان می‌دهند. وجود رخساره‌های جذر و مدی به خصوص گرینستون ائیدی این پهنه عدسی‌های ماسه‌ای و ساختمان‌های رسوبی شناسائی شده در این برش‌ها این موضوع را تأیید می‌کند. وجود مواد سیلیسی آواری بالا نشان دهنده تاثیر



ارائه شده از نواحی شرقی و غربی نشان دهنده افزایش دما و در نتیجه افزایش استرانسیم به سمت غرب می‌باشد که حاکی از تغییر ترکیب کانی‌شناسی از کلسیتی به آراگونیتی از سمت شرق به غرب حوضه می‌باشد.

### سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از هیچ سازمان یا ارگانی کمک مالی دریافت نکرده است.

و نسبت آنها نیز نشان دهنده چنین محیط دیاژنزی تدفینی است. پایین بودن نسبت  $Str/Na$  کمتر از یک، نیز دلیل دیگری بر تائید کانی‌شناسی اولیه کلسیتی است. رسم مقدار منگنز و منیزیم در برابر استرانسیم به کلسیم و همچنین رسم منگنز در برابر ایزوتوپ اکسیژن ۱۸ نشان دهنده یک محیط دیاژنزی نیمه بسته همراه با تبادل پایین آب به سنگ در سازند سازند تیرگان است. بررسی مقدار عنصری و ایزوتوپی نشان دهنده محیط دیاژنزی تدفینی است. مقایسه اطلاعات به دست آمده از سه برش مورد مطالعه و اطلاعات

### منابع (References)

- Adabi, M.H. and Rao, C.P., 1991. Petrographic and geochemical evidence for original aragonitic mineralogy of Upper Jurassic carbonate (Mozdoran Formation), Sarakhs area, Iran: *Sedimentary Geology*, v. 72, p. 253-267.
- Adabi, M.H., 1996. Sedimentology and geochemistry of carbonates from Iran and Tasmania, Ph. D. thesis (Unpublished), University of Tasmania Australia, 470 p.
- Adabi, M.H., Salehi, M.A. and Ghabeshavi, A., 2010. Depositional environment, Sequence Stratigraphy and geochemistry of lower Cretaceous carbonates (Fahliyan Formation), south-west Iran, *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 39, p. 148-160.
- Adabi, M.H., Kakemem, U. and Sadeghi, A., 2015. Sedimentary facies, depositional environment, and sequence stratigraphy of Oligocene-Miocene shallow water carbonate from the Rig Mountain, Zagros basin (SW Iran): *Carbonates and Evaporites*, v. 23 (2), p. 1-17.
- Afsharharb, A., 1994. Geology of Kope Dagh, book compilation plan of the Geological Organization of the country, 275 p (in Persian).
- Aghaei, A., Mahboubi, A., Moussavi Harami, R., Najafi, M. and Chakarpani, G.J., 2014. Carbonate Diagenesis of the Upper Jurassic Successions in the West of Binalud-Eastern Alborz (NE Iran), *Jurnal Geological Society of India*, v. 83, p. 311-328.
- Anderson, T.F. and Arthur, M.A., 1983. Stable isotopes of oxygen and carbon and their application to sedimentologic and paleoenvironmental problems, In: *Stable Isotopes in Sedimentary Geology* (eds. M. A. Arthur, T. F. Anderson, I. R. Kaplan, J. Veizer and L. S. Land). *SEPM Short Course*, v. 10, p. 1-151.
- Asadi Mehmandosti, E., Adabi, M.H. and Woods, A.D., 2013. Microfacies and geochemistry of the Middle Cretaceous Sarvak Formation in Zagros Basin, Izeh, Zone, SW, Iran, *Sedimentary Geology*, v. 293, p. 9-20.
- Aziz Aini, M., 2015. Sequence stratigraphy and diagenesis of Tirgan formation located in Shorab floodplain, Master thesis, Ferdowsi University of Mashhad, 185 p (in Persian).
- Berberian, M. and King, G.C.P., 1981. Toward a paleogeography and tectonic evolution of Iran, *Canadian Journal Earth Sciences*, v. 18, p. 210-265.
- Bernasconi, S.M., Schmid, T.W., Grauel, A. and Mutterlose, J., 2011. Clumped-Isotope Geochemistry of carbonates: A new tool for the reconstruction of temperature and oxygen isotope composition of seawater, *Applied Geochemistry*, v. 26, p. 279-280.
- Brand, U. and Veizer, J., 1980. Chemical diagenesis of multicomponent carbonate system-1: trace elements: *Jour. Sed. Petrology*, v. 50, p. 1219-1236.
- Brand, U. and Morrison, J.O., 1987. Biogeochemistry of fossil marine invertebrates: *Geosci. Canada*, v. 14, p. 85-107.
- Brand, U. and Veizer, J., 1980. Chemical diagenesis of multicomponent carbonate system -1: trace elements: *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 50, p. 1219-1236.
- Bucur, I. and Yarahmadzahi, H., 2018. The Lower Cretaceous Tirgan Formation in the Gelian section (Kopet-Dagh, North Iran): microfacies, microfossils, and their biostratigraphic significance, 476 p.
- Carevic, I., 2013. Comparisons between the Urganian platform carbonates from eastern Serbia (Carpatho-Balkanides) and northeast

- Iran (Kopet-Dagh Basin), Depositional facies, v. 16, p. 45-67.
- Choquette, P.W. and James, N.P., 1987. Diagenesis in Limestones –The Deep Burial Environment, *Geoscience Canada*, v. 14, p. 3-35.
- Dunham, R.J., 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: Ham, W. E. (Ed.), *Classification of Carbonate Rocks*. American Association of Petroleum Geologists Memoir 1, Tulsa, p. 108-121.
- Fateh Behari, L., 2019. Sedimentology and geochemistry of Zard and Tirgan formations in the west of Kope Dagh basin, Master's thesis, Tehran University Science Journal, 287 p (in Persian).
- Folk, R.L., 1980. *Petrology of Sedimentary Rocks*, Hemphill Publishing Co. Austin, Texas, 182 p.
- Flügel, E., 2010. *Microfacies Analysis of Carbonate Rocks, Analysis, Interpretation and Application*, Springer Verlag, Berlin, 976 p.
- Golafshan, T. and Kheneabad, M., 2020. Carbonate platform evolution of the Tirgan Formation during Early Cretaceous in the eastern Kopet-Dagh, northeast Iran, p. 876-1021.
- Golestan, Y., Kakmem, A., Adabi, M. and Deh Yadgari, A., 2019. Diagenesis processes and early mineralogical identification of carbonates of the Asmari formation in the Karanj oil field (Dezful depression, southwest of Iran), end Doctoral thesis of Azad University, North Tehran branch, 208 p (in Persian).
- Haeri Ardakani, O., Sanei, H., Lavoie, D., Chen, Z. and Mechti, N., 2014. Thermal Maturity and Organic Petrology of the Upper Ordovician Utica and Lorraine shales, Southern Quebec, Canada, *Geo Convention*, Calgary, Alberta, Canada, v. 20, p. 45-55.
- Hashemian Kakhki, N. and Aryai, A.A., 2007. Introduction of species of echinoderms from the Tirgan formation, *Proceedings of the first conference of the Iranian Paleontological Society*, p. 158-154 (in Persian).
- Haq, B.U., Hrdenbol, J. and Vial, P.R., 1987. Chronology of fluctuating sea-level, *science*, v. 235, p. 1156-1167.
- Heidari, A., Mahboubi, A., Moussavi-Harami, R., Gonzalez, L. and Moalemi, S.A., 2017. Biostratigraphy, sequence stratigraphy, and paleoecology of the Lower–Middle Miocene of Northern Bandar Abbas, Southeast Zagros basin in south of Iran. *Arab. J. Geosci*, v. 7(5), p. 1829-1855.
- Higgins, J.A., Blattler, C.L., Lundstrom, E.A., Santiago-Ramos, D.P., Akhtar, A.A., Ahm, A.C., Bialik, O., Holmden, C., Bradbury, H., Murray, S.T. and Swart, P.K., 2018. Mineralogy, early marine diagenesis, and the chemistry of shallow-water carbonate sediments, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 220, p. 512- 534.
- Hudson, J.D. and Anderson, T.F., 1989. Ocean temperatures and isotopic compositions through time: *trans. Roy. Soc. Edinberg, Earth Sci.*, v. 80, p. 183-192.
- Jafarian, A., Fallah-Baghtash, R., Mattern, F. and Heubeck, Ch., 2017. Reservoir Quality along a homoclinal carbonate ramp deposit: The Permian Upper Dalan Formation, South Pars Field, Persian Gulf Basin, *Marine and Petroleum Geology*, v. 88, p. 587-604.
- Javanbakht, M., Ghazi, S., Moussavi-Harami, R. and Mahboubi, A., 2013. Depositional History and Sequence Stratigraphy of Tirgan Formation (Barremian-Aptian), in *Central Kopet - Dagh, NE Iran*, *Journal Geological Society of India*, v. 82, p. 701-711.
- Javanbakht, M., Wanas, H.A., Jafarian, A., Shahsavan, N. and Sahraeyan, M., 2018. Carbonate diagenesis in the Barremian-Aptian Tirgan Formation (Kopet-Dagh Basin, NE Iran): Petrographic, geochemical and reservoir quality constraints, *Journal of African Earth Sciences*, v. 144, p. 122-135.
- Jabanakhet, M., 2011. History of sedimentation and post-sedimentation of Tirgan Formation in the central and western areas of the Kope Dagh sedimentary basin, PhD thesis, Islamic Azad University, Tehran Research Sciences Branch (in Persian).
- Kwon, Y.K., Chough, S.K., Choa, D.K. and Lee, D.J., 2006. Sequence stratigraphy of the Taebak Group (Cambrian-Ordovician), Mideast Korea. *Sedimentary Geology*, v. 149, p. 219-235.
- Kietzmann, D.A., Palma, R.M., Riccardi, A.C., Martin-Chivelet, J. and Lopez-Gomez, J., 2014. Sedimentology and sequence stratigraphy of a Tithonian – Valanginian carbonate ramp (VacaMuerta Formation): Amisunderstood exceptional source rock in the Southern Mendoza area of the Neuquen Basin, Argentina, *Sedimentary Geology*, v. 203, p. 64-86.

- Li, F., Yan, J., Algeo, T. and Wu, W., 2013. Paleooceanographic conditions following the End-Permian mass extinction recorded by giant ooids (Moyang, South china), *Global and Planetary change*, v. 105, p. 102-120.
- Marshall, J.D., 1992. Climatic and oceanographic isotopic signals from the carbonate rock record and their preservation: *Geol. Magazine*, v. 129, p. 143-160.
- Milliman, J.D., 1974. *Marine Carbonates*: New York, Spinger-Verlag, 375 p.
- Morad, S., Ketzer, M. and Deros, L.F., 2013. Linking Diagenesis to sequence Stratigraphy (Morad/Linking diagenesis to Sequence Stratigraphy), *Geochemical Evidence for Meteoric Diagenesis and Cryptic Surfaces of Subaerial Exposure in Upper Ordovician Peritidal carbonates from the Nashville Dome, Central Tennessee, and USA*. *Osmania Journal of Social Sceinces*, Doi: 10.102/9781118485347, 257-269.
- Morse, J.W. and Mackenzie, F.T., 1990. *Geochemistry of Sedimentary carbonate*, *Developments in Sedimentology* 48, Elsevier, New York, 707 p.
- Mortazavi Mehrizi, M., 2007. Sequence stratigraphy of Shourijeh and Tirgan formations (Lower Cretaceous) in the Sefidsang area northeast of Freeman, Master's thesis, Ferdowsi University of Mashhad, 310 p (in Persian).
- Mousavizadeh, M.A., Mehboubi, A., Mousavi Harami, R. and Najafi, M., 2007. Sedimentation history and sequence stratigraphy of the Tirgan Formation in the southwest of Jozak and Chaman Bid villages in the west of the Kope Dagh sedimentary basin of the collection Papers of the 11th Iranian Geological Society, p. 705-709 (in Persian).
- Najaran, N., Ariyaie, A. and Ashori, A., 2018. The study of microfacies and sedimentary environments of Tirgan Formation southeast of Ghochan (Dodanlu section), p. 367-507.
- Nelson, C.S. and Smith, A.M., 1996. Stable oxygen and carbon isotope compositional fields for skeletal and diagenetic components in New Zealand Cenozoic nontropical carbonate sediments and limestones: a synthesise and review: *New Zealand Jour, Geology, Geophysics*, v. 39, p. 93-107.
- Poursoltani, M., Kermanshahi, H. and Jabanakhet, M., 2017. Interpretation of the sedimentary environment, diagenesis and reservoir quality of the Tirgan formation as a possible reservoir rock in the east of the Kepe Dagh sedimentary basin, *Two Quarterly Journal of Applied Sedimentology*, v. 10, p. 127-151 (in Persian).
- Poursoltani, M.R. and Kermanshahi, H., 2017. The interpretation of depositional environment, diagenesis and reservoir quality of Tirgan Formation, a possible reservoir rock in the eastern of Kopet-Dagh Basin, v. 10, p. 99-145.
- Rao, C.P. and Adabi, M.H., 1992. Carbonate minerals, major and minor elements and oxygen and carbon isotopes and their variation with water depth in cool, temperate carbonates, western Tasmania, Australia: *Mar. Geology*, v. 103, p. 249-272.
- Roa, C.P. and Amini, Z., 1995. Faunal relationship to grain-size, mineralogy and geochemistry in recent temperate shelf carbonate, Western Tasmania, Australia, *Carbonates and Evaporites*, v. 10, p. 114-123.
- Rao, C.P., 1996. Elemental composition of marine calcite from modern temperate shelf brachiopods, bryozoans and bulk carbonates, eastern Tasmania, Australia, *Carbonates and Evaporites*, 11 p.
- Raisossadat, N. and Moussavi-Harami, R., 2000. Lithostigraphic and facies analysis of sarcheshmeFirmation (Lower Certaceous) in the eastern Kopet-Dagh Basin, NE Iran, *Cretaceous Research*, v. 19, p. 197-223.
- Rivandi, B., Vahidinia, M., Najafi, M. and Mahboubi, A., 2013. Sequence and Biostratigraphy of Lower Cenozoic Succession in the Kopet- Dagh Basin, NE of Iran, 356-398 p.
- Rivandi, B., Najafi, M., Mousavi Harami, R., Mehboubi, A., Vahidinia, M. and Mousavizadeh, M., 2007. Biological and sequence stratigraphy of the Tirgan formation in Khor alluvium in the northeast of Mashhad, *Proceedings of the 11th Geological Society of Iran*, 175 p (in Persian).
- Scotese, C.R., 2004. A Continental Drift Flibook, *Journal of Geology*, v. 112, p. 729-741.
- Saffar, A., Mousavi, M.J., Torshizian, H. and Javanbakht, M., 2010. The investigation of Diagenetic processes and interpretation of paragenetic sequence of Tirgan Formation, Zavin section, NE of Iran, the 1 st International Applied Geological Congress, Department of Geology, Islamic Azad University-Mashhad Branch, Iran, p. 26-28.
- Tabatabaee, P., Lasemi, Y. and Jahani, D., 2019. Facies variability of a lower Aptian Carbonate platform succession, Tirgan

- Formation, eastern Kopet-Dagh Basin northeast Iran, v. 78, p. 120-234.
- Tayban, A., 2017. Investigating the geochemistry and sedimentary environment of the Tirgan Formation deposits in the eastern areas of the Kope Dagh sedimentary basin, northeastern Iran, master's thesis, Islamic Azad University of Mashhad, 148 p (in Persian).
- Timorpur, Kh., 2003. Lithostratigraphy and sedimentation history of Tirgan Formation in the east of Kepe Dagh sedimentary basin, Ferdowsi University of Mashhad master's thesis, 167 p.
- Tucker, M.E. and Wright, V.P., 1990. Carbonate Sedimentology, Blackwell Science, Inc, 482 p.
- Veizer, j., 1983. Trace elements and isotopes in sedimentary carbonates, Reviews in mineralogy and Geochemistry, v. 11, p. 265-299.
- Veizer, J., Ala, D., Azmy, K., Bruckschen, P., Buhl, D., Bruhn, F., Carden, G.A.F., Diener, A., Ebneith, S., Goddris, Y., Jasper, T., Korte, C., Pawellek, F., Podlaha, O.G. and Strauss, H., 1999.  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ,  $\text{C}^{13}$  and  $\text{O}^{18}$  evolution of Phanerozoic seawater, Chemical Geology, v. 161, p. 59-88.
- Winefield, P.R., Nelson, C.S. and Hoddar, A.P.W., 1996. Discriminating temperate carbonates and their diagenetic environments using bulk elemental geochemistry: a reconnaissance study based on New Zealand Cenozoic Limestones: Carbonates and Evaporites, v. 11, p. 19-31.
- Warren, W.J., 2000. Dolomite Occurrence, evolution and economically important association, Earth science review, v. 52, p. 1-81.
- Yavarmanesh, H., Vaziri, Sh. and Aryaei, A.A., 2017. Microfacies and Morphotectonic of the Tirgan Formation in syncline (North of Chenaran), p. 210-287.
- Zara, A.M. and Tanner, L.H., 2010. Carbonates in Continental Settings Geochemistry, Diagenesis an Applications, Elsevier, 319 p.