

## بررسی تاثیر محیط‌رسوبی و دیاژنز در پتانسیل توسعه کارست در سازند تیرگان در باختر کپه‌داغ (شمال‌خاور بجنورد)

فیروز شکیب<sup>۱\*</sup>، غلامحسین گرمی<sup>۲</sup> و عزیزالله طاهری<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکترا هیدروژئولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

۲- دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

۳- استاد گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

نویسنده مسئول: f.shakiba1348@gmail.com

دریافت: ۹۹/۵/۵ پذیرش: ۹۹/۱۰/۲۰

نوع مقاله: پژوهشی

### چکیده

سازند تیرگان در بخش ساختاری کپه‌داغ از مهم‌ترین سازندهای کارستی بوده و حاوی منابع آب مهمی است. چاه‌های آب حفر شده در این سازند آبدهی بسیار متفاوتی دارند. با بررسی‌های لیتولوژی، ۹۰ برش نازک سنگ، لاگ‌های ژئوفیزیکی، تغییرات آبدهی و افت سطح آب چاه‌ها، سیمای مرفولوژیکی، پتانسیل توسعه کارست سازند تیرگان در شمال‌خاور شهر بجنورد مورد بررسی قرار گرفته است. توسعه کارست در هر واحد سنگی وابسته به محیط‌رسوبی و فرایندهای دیاژنز بعدی آن می‌باشد. در این منطقه تیرگان به سه واحد سنگی آهکی و دو واحد آهکی-مارنی قابل جدایش است. این سازند در یک رمپ هموکلینال و چهار کمر بند رخساره‌ای جزرومدی، لاگون، سد تا دریای باز نهشته شده و در آن ۱۲ ریزرخساره شناسایی شد. فشردگی، استیلولیتی شدن به عنوان عوامل موثر دیاژنیتیکی از پایین به بالای سازند به طور چشمگیری کاهش یافته است. ورود ذرات تخریبی مانند کوارتز به محیط‌رسوبی از پایین به بالا کاهش یافته است. لاگ‌های گاما کاهش مقدار شیل به سمت بالای سازند و افزایش خلوص آهک در لایه بالایی را نشان می‌دهد. از طرفی آهنگ تولید کربنات و گوناگونی آلومک‌ها نیز بیش‌تر شده است. این رخدادها اصولاً پتانسیل توسعه کارست را به نحو چشمگیری افزایش داده است. سیمای مرفولوژیکی کارست توسعه یافته مانند فروچاله، دره‌های خشک از نشانه‌های این توسعه است. نشانه مهم دیگر توسعه کارست از پایین به بالا، در افزایش چشمگیر آبدهی چاه‌ها، از ۲۵ به ۶۰ لیتر در ثانیه، افزایش مقدار قابلیت انتقال از ۱۳۴ به ۱۰۳۷ متر مربع در روز دیده می‌شود. از سویی کاهش میزان آبدهی چاه‌ها طی بیست سال به سمت بالای سازند بسیار کم (کمتر از ۲۰ درصد) مشاهده می‌شود در حالی که کاهش آبدهی چاه‌های حفر شده در بخش‌های میانی به بیش از ۵۰ درصد می‌رسد.

واژگان کلیدی: سازند تیرگان، ریزرخساره، توسعه کارست، قابلیت انتقال

### ۱- پیشگفتار

۱۳۸۹؛ شامیر، ۱۳۹۴؛ غیاثوند و همکاران، ۱۳۹۷؛ و بسیاری دیگر). از مجموع این پژوهش‌ها نتیجه شده که سازند تیرگان در چهار کمر بند رخساره‌ای و یک رمپ هموکلینال رسوب نموده است. گرچه در هر منطقه از کپه‌داغ شرایط رسوب‌گذاری شامل: آهنگ رسوب‌گذاری، ورود مواد تخریبی، رخداددهای بعدی دیاژنژی (مانند فشردگی، سیمانی‌شدن و سیلیسی‌شدن یا دولومیتی شدن و انحلال و...) متفاوت عمل کرده است. این عوامل بر پتانسیل توسعه کارست تاثیر بسزایی دارند. از سوی دیگر در توسعه کارست، عوامل مختلف دیگری نیز نقش دارند که عموماً به صورت تلفیقی عمل می‌کنند.

حوضه رسوبی کپه‌داغ یکی از مهم‌ترین حوضه‌های کارستی در شمال‌خاور کشور است. در بخش باختری این پهنه، سازند کربناته تیرگان به همراه سازند مزدوران مهم‌ترین سازندهای کارستی هستند. این سازند در دهه اخیر به سبب دربرداشتن منابع آب کارستی بسیار مورد توجه واقع گردیده است. مطالعات چینه‌شناسی متعددی در این منطقه بر روی سازند تیرگان انجام شده و بررسی محیط‌رسوبی سازند تیرگان نیز مورد توجه پژوهشگران زیادی قرار گرفته است (آقاداشی‌ابهری، ۱۳۸۰؛ موسوی‌زاده و همکاران، ۱۳۸۷؛ ریوندی و همکاران،

مشابه نشان می‌دهد، در واحدهای سنگی که در معرض آب‌های جوی قرار گرفته‌اند کارست توسعه داشته است (بوکینگ، وانگ، احسان، ۲۰۰۲). شناخت این تاثیرات اولین قدم‌ها در مطالعات هیدروژئولوژی کارست است. با کنار هم قراردادن سایر شواهد گفته شده مدل توسعه کارست هر منطقه به دست می‌آید. در این مطالعه سعی شده با بازسازی محیط‌رسوبی حاکم بر نهشته‌شدن سازند کربناته تیرگان روشن شود که در این منطقه کدام بخش‌های این سازند استعداد کارستی شدن داشته است.

## ۲- زمین‌شناسی کپه‌داغ

بخش ساختاری کپه‌داغ در شمال‌خاور ایران و در جنوب جمهوری ترکمنستان با وسعتی در حدود ۵۵۰۰۰ کیلومتر مربع واقع شده است و شامل حدود ۶۰۰۰ متر سنگ‌های رسوبی است. این حوضه پس از بسته شدن اقیانوس پالئوتتیس در اثر کوهزایی سیمیرین پیشین و در زمان تریاس پیشین ایجاد شده است. رسوب‌گذاری در این حوضه از ژوراسیک تا ابتدای الیگوسن تقریباً پیوسته و مداوم صورت گرفته است. در این حوضه سنگ‌های رسوبی کرتاسه از توسعه و گسترش زیادی برخوردار هستند (افشارحرب، ۱۳۷۳). کرتاسه زیرین در کپه‌داغ شامل سازندهای شوربجه، تیرگان، سرچشمه و سنگانه است. نام سازند تیرگان از روستای تیرگان واقع در ۳۹ کیلومتری جنوب‌خاور شهر دره‌گز گرفته شده است. سازند تیرگان از سنگ‌آهک‌های الییتی و زیست‌آواری و لایه‌های جزئی سنگ‌آهک‌های مارنی، مارن و شیل‌آهکی تشکیل شده است. در تمام رخنمون‌های سازند، لایه‌هایی از سنگ‌آهک‌های آربیتولین‌دار وجود دارد (افشارحرب، ۱۳۷۳). ضخامت سازند از خاور کپه‌داغ در برش شوراب (کمترین ضخامت ۲۰ متر) به سمت باختر، افزایش می‌یابد (آقانباتی، ۱۳۸۵). سازند تیرگان بر روی سازند شوربجه قرار دارد و توسط سازند مارنی با رنگ خاکستری روشن مربوط به آپسین بالایی به نام سازند سرچشمه پوشانده شده است. سازند تیرگان توسط جوانبخت و همکاران (۲۰۱۸) به صورت غیررسمی در بخشی از کپه‌داغ به زیر بخش‌های آهکی و مارنی-شیلی-آهکی تقسیم شده است. در فاصله حدود ۷ کیلومتری شمال خاور شهر بجنورد برای این مطالعه یک برش چینه‌شناسی با نام برش باباموسی اندازه‌گیری شده است.

از نظر فورده و ویلیامز (۲۰۰۷) عواملی که در توسعه کارست تأثیر دارند عبارتند از: میزان بارندگی، دما، میزان گاز دی‌اکسیدکربن، شرایط زمین‌ساختی، ضخامت سنگ‌های با قابلیت انحلال، ویژگی‌های سنگ‌شناسی و چینه‌شناسی و زمین‌ریخت‌شناسی منطقه. در مقابل برخی ناخالصی‌های سنگ‌آهک بر کاهش انحلال نقش مهمی بر عهده دارند.

کانی‌های رسی و سیلیس از عمده‌ترین ناخالصی‌های سنگ‌آهک هستند. مناسب‌ترین سنگ‌های آهکی آن‌هایی هستند که بیش از ۷۰ درصد کربنات دارند (فورده و ویلیامز، ۲۰۰۷). هرچه اندازه دانه‌ها ریزتر باشد انحلال سنگ‌آهک بیش‌تر است چون سطح تماس بالاتر می‌رود. مطالعات زیادی نشان می‌دهد که حلالیت میکرایت یا بیومیکرایت از اسپارایت بیش‌تر است در حالی که اگر سیمان اسپارایتی بیش از ۴۰ تا ۵۰ درصد باشد انحلال کاهش می‌یابد (مایر، ۱۹۹۰؛ سویتینگ، ۱۹۶۹). از طرفی هرچه در اندازه دانه‌ها تفاوت بیش‌تر باشد فرایند انحلال سریع‌تر رخ می‌دهد و هرچه نامنظمی سطحی ناشی از انحلال بیش‌تر شود، باعث افزایش انحلال بعدی می‌گردد. مثلاً بیومیکرایت از میکرایت خالص سریع‌تر دچار انحلال می‌شود زیرا خرده‌فسیل‌ها سطوح ناصافی ایجاد می‌کنند. به عنوان مثال ایجاد کارن‌ها که از لحاظ مورفولوژیکی کوچک‌اند ناشی از بافت سنگ هستند.

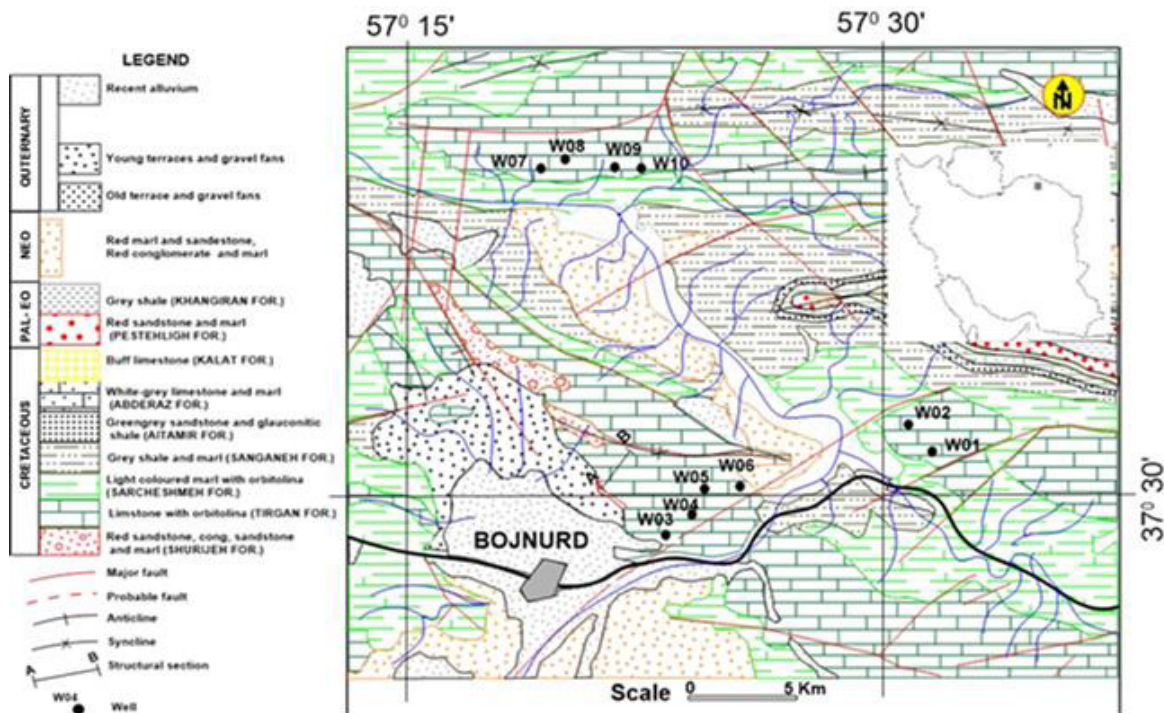
نتیجه عمل کارستی‌شدن ایجاد ریخت‌شناسی ویژه‌ای است که مناطق کارستی را از نواحی غیرکارستی متمایز می‌کند. از آن‌جا که سیمای کارستی و تکامل تدریجی آن‌ها نتیجه مستقیم عمل انحلال آب در محیط‌های انحلال‌پذیر کربناته است، درک کامل ریخت‌شناسی آن‌ها پیش‌نیازی برای حل دسته‌ای از مسایل آب‌شناسی است (میلانویچ، ۲۰۰۴). پتانسیل توسعه کارست در واحدهای سنگی آهکی از محیط‌رسوبی شروع می‌شود و تغییرات ایجاد شده طی دیاژنز تأثیر مهمی هم در جهت افزایش و هم کاهش ظرفیت توسعه کارست در واحدهای آهکی برجای می‌گذارد. البته باید در نظر داشت گرچه محیط رسوبی، فرایندهای دیاژنیتیکی، نفوذ آب بارندگی، دولومیتی شدن و سیمانی شدن، توسعه مخازن کارستی را کنترل می‌کنند، اما بایستی سازند کربناته در سطح نیز رخنمون شود تا در معرض بارندگی قرار گیرد. بررسی نمونه‌های با پتروگرافی، تخلخل و خصوصیات ژئوشیمیایی

خاکستری کم‌رنگ تا کرم کم‌رنگ و با ضخامت ۸ تا ۱۵ متر است. بخش آهکی مارنی بالایی ( $D = \text{Up M-Limt}$ ) حدود ۸۵ متر ضخامت داشته و شامل لایه مارنی، مارنی‌آهکی و میان‌لایه‌های آهکی آریتولین‌دار با ضخامت ۱/۵ تا ۱۴ متر است. این بخش نیز در انتها حاوی لایه‌های شیلی است. بخش آهکی بالایی ( $E = \text{Up-Limt}$ ) حدود ۱۷۰ متر ضخامت دارد و آهک کرم‌رنگ در قسمت پایینی با لایه‌هایی به ضخامت ۸ تا ۱۳ متر، در قسمت میانی متشکل از آهک‌آییدی خاکستری تیره و در قسمت بالایی از آهک خاکستری حاوی آریتولین تشکیل شده که به طور هم‌شیب در زیر سازند مارنی سرچشمه قرار دارد.

### ۳- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در بخش شمال‌خاور شهر بجنورد (مرکز استان خراسان شمالی) قرار دارد که بخشی از کپه‌داغ باختری است. ده حلقه چاه در منطقه حفاری شده و برای آشامیدن و صنعت مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند و از ۱۳۹ تا ۲۵۰ متر عمق دارند که در بخش‌های مختلف سازند تیرگان حفاری شده‌اند (شکل ۱).

در این برش سازند تیرگان ۵۱۰ متر ضخامت دارد. بر پایه ویژگی‌های سنگ‌شناسی می‌توان در این محل سازند تیرگان را به پنج بخش تقسیم نمود. مشابه این تقسیم‌بندی در برش گلیان (در حدود ۵۵ کیلومتری جنوب‌خاور این برش) نیز انجام شده است (پورسلطانی، ۱۳۹۸). با این تفاوت که ضخامت هریک از واحدها در برش گلیان بسیار کمتر است. بخش آهکی پایینی ( $A = \text{L-Limt}$ ) شامل حدود ۱۱۵ متر آهک‌آییدی و آهک ماسه‌ای بسیار ضخیم است که در پایین قرمز رنگ و به سمت بالا خاکستری تیره‌رنگ می‌شود. ضخامت لایه‌های آهکی این بخش بین ۷ تا ۳۱ متر می‌باشند که دارای فسیل فراوان دوکفه‌ای است. بخش آهکی مارنی پایینی ( $B = \text{L M-Limt}$ ) حدود ۹۰ متر ضخامت دارد و شامل لایه‌های مارنی زیتونی رنگ روشن با میان‌لایه‌های آهکی مارنی است که در انتها شیلی می‌شود. ضخامت این میان‌لایه‌ها از ۵ تا ۱۸ متر است. به سبب لیتولوژی این واحد نقش لایه نفوذناپذیر را بر عهده دارد. بخش سوم سازند تیرگان از آهک حاوی آریتولین تشکیل شده است. این بخش واحد آهکی میانی ( $C = \text{M-Limt}$ ) است که ۵۰ متر ضخامت دارد و حاوی لایه‌های آهکی به رنگ



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه؛ نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ زمین‌شناسی چهارگوش بجنورد انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور (توسط افشارحرب و همکاران، ۱۳۶۳). محل حفر ده حلقه چاه آب در حال بهره‌برداری در سازند تیرگان و محل برش چینه‌شناسی (A-B) باماموسی در شمال‌خاور نیز نشان داده شده است.

## ۴- روش مطالعه

برای بررسی پتانسیل توسعه کارست، بخش‌های سازند تیرگان از دیدگاه چینه‌شناسی، شامل لیتولوژی، ضخامت لایه‌ها، ساخت‌های رسوبی و محتوی فسیلی مورد مطالعه قرار گرفته است. برای شناسایی ریزرخساره‌ها و بررسی دیاژنز، یک برش چینه‌شناسی در شمال‌خاور شهر بجنورد در کوه باباموسی انتخاب و ۹۰ نمونه سنگ برداشت شده و از آن‌ها برش‌نازک میکروسکوپی تهیه و مورد مطالعه قرار گرفته است. ریزرخساره‌ها بر پایه تفاوت‌های بافتی، نوع و میزان فراوانی دانه‌های اسکلتی و غیراسکلتی، فراوانی خمیره و سیمان نمونه‌ها شناسایی و بر پایه روش دانهام (۱۹۶۲) نام‌گذاری شده‌اند. به منظور کنترل لیتولوژی از داده لاگ حفاری (کاتینگ)، داده‌های لاگینگ شامل لاگ پتانسیل خودزا (SP)، لاگ مقاومت الکتریکی (R)، لاگ گامای طبیعی (γ)، به‌خصوص برای بررسی توسعه شیل در توالی سازند استفاده شده است. از سایر داده‌ها مانند آبدی‌چاه‌های حفر شده، آزمایش پمپاژ کوتاه‌مدت و بلندمدت آن‌ها برای تایید توسعه کارست بهره گرفته شد. در انتها با تلفیق داده‌های یاد شده و بررسی سیمای کارست مناسب‌ترین واحد سنگی که در آن کارست پتانسیل توسعه داشته و در مراحل بعدی زمین‌شناسی توسعه یافته، نشان داده شده است.

## ۵- رخصاره‌ها و محیط‌رسوبی سازند تیرگان

رخصاره‌های رسوبی در سنگ‌های به ویژه کربناته، ابزار مهمی برای شناسایی محیط‌رسوبی و فرایندهای موثر بر آن هستند. داده‌های سنگ‌شناسی شامل مطالعات صحرایی، پتروگرافی و یا آنالیز شیمیایی اصلی‌ترین داده‌ها و اطلاعات را به دست می‌دهند (فلوگل، ۲۰۱۰). توالی رخصاره‌ها و نحوه جایگیری آن‌ها تغییرات بزرگ و کوچک در متغیرهای محیطی از جمله آب و هوا، شدت جریان آب و یا تغییرات نسبی سطح دریا را نشان می‌دهد (بچمن و هیریش، ۲۰۰۶).

در این پژوهش بررسی‌های میکروسکوپی نمونه‌های برداشت شده از سازند تیرگان در برش باباموسی نشان می‌دهد که این سازند در کمربندهای رخصاره‌ای شامل پهنه جزرومدی (A) لاگون (B) سد (C) دریای باز کم عمق (D) برجای گذاشته شده است. نام‌گذاری ریزرخساره‌ها براساس روش دانهام (۱۹۶۹) و مقایسه با

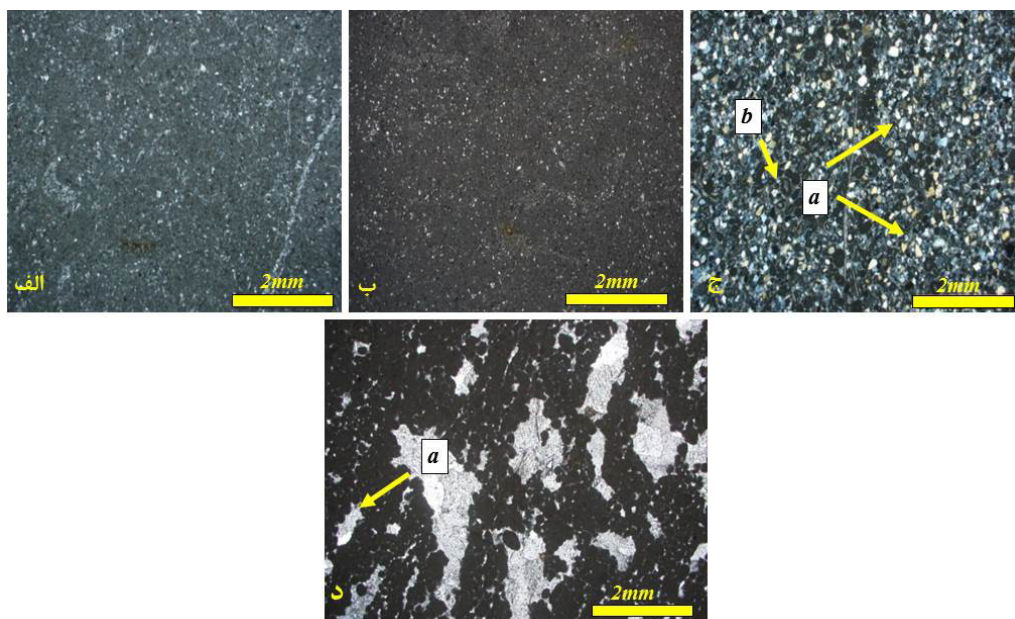
محیط‌رسوبی بر اساس روش فلوگل (۲۰۱۰) صورت گرفته است البته سازند شوربجه در محیط‌رسوبی قاره‌ای نهشته شده و ساحل دریای نئوکومین را تشکیل می‌دهد است. بنابراین برخی از قسمت‌های پایینی سازند تیرگان حاوی تخریبی‌های سازند شوربجه است. رخصاره‌های شناسایی شده در سازند شامل رخصاره‌های زیر می‌باشد:

## ۵-۱- کمربند رخصاره‌ای پهنه جزومدی

**الف) مادستون بیوکلاست‌دار/کوارتزدار:** این رخصاره اغلب از گل میکرایتی تشکیل شده و در برخی نمونه‌ها حاوی بیوکلاست و در برخی حاوی کوارتز است. بیوکلاست‌ها شامل خرده‌های صدف و خرده‌های جلبک است. ذرات کوارتز در حد سیلت بوده که از ساحل حمل شده‌اند. این رخصاره در بخش‌های پایینی سازند تیرگان دیده می‌شود. لایه آهکی این ریزرخساره یکدست کرم تیره‌رنگ، در سطح تازه خاکستری و بدون ساختمان رسوبی است (شکل ۲ الف و ب).

**ب) بیوکلاست الیید ماسه‌ای پکستون:** این رخصاره زمینه تیره میکرایتی دارد و حاوی ۳۰ درصد دانه‌های کوارتز در حد ماسه و سیلت است. هسته بیش‌تر الییدها را دانه‌های کوارتز تشکیل می‌دهد. دانه‌های کوارتز گردش‌گی خوبی ندارند. بیوکلاست شامل خرده‌های جلبک و صدف دوکفه‌ای‌ها می‌باشند که گاهی دارای جهت‌یافتگی هستند. در صحرا به صورت آهک‌های قرمز رنگ متوسط تا ضخیم لایه با ساخت رسوبی چینه‌بندی متقاطع دیده می‌شوند. لایه‌های حاوی این رخصاره در بخش‌های زیرین سازند تیرگان بیش‌تر دیده می‌شوند (شکل ۲ ج).

**ج) پلویید پکستون:** این رخصاره گل‌پشتیبان بوده و بافت چشم پرنده‌ای در آن دیده می‌شود. بدون فسیل است و لامیناسیون در آن دیده نمی‌شود. آهک مارنی بدون ساخت رسوبی به رنگ خاکستری تیره در سطح تازه کرم روشن که در بخش‌های پایینی و میانی سازند تیرگان دیده می‌شود. در بخش میانی نیز این رخصاره در لایه آهکی به رنگ خاکستری تیره با لایه‌بندی ۱۰ تا ۵۰ سانتی‌متر دیده می‌شود. وجود بافت فنسترال و نبود آثار فسیلی نشانه خروج مداوم این رسوبات از آب می‌باشد که ویژگی محیط پهنه کشندی است (فلوگل، ۲۰۱۰) (شکل ۲ د).



شکل ۲. ریزرخساره‌های ساحلی یا پهنه جزرومدی، الف) (نمونه C2) مادستون بیوکلاست‌دار، ب) (نمونه D15) مادستون کوارتزدار، ج) (نمونه D31) بیوکلاست‌آئید ماسه‌ای پکستون. اجزای اصلی این ریزرخساره گل میکرایتی و خرده‌های اسکلتی و آئید اولیه (b) است. نمونه‌ها شامل کوارتز (a) ۱۵ تا ۳۰ درصد که در برخی برش‌ها هسته آئید هستند. د) (نمونه C11) پلوئید پکستون. فابریک چشم‌پرنده‌ای (a) (نمونه‌ها از برش چینه‌شناسی باموسی، شکل ۷)

شعاعی و کوچک هستند. فشردگی در دانه‌ها دیده نمی‌شود. کمی ذرات تخریبی کوارتز در متن دیده می‌شود. در صحرا متشکل از تناوب لایه‌های آهکی خاکستری به همراه مارن خاکستری تا سبز زیتونی، است لایه آهکی بین ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر و لایه مارنی ۲۰ تا ۵۰ سانتی‌متر ضخامت دارد (شکل ۳ ب).

ج) بیوکلاست آریتولینا وکستون: در این رخساره بیوکلاست‌ها عمده آریتولین مخروطی می‌باشند. در برخی نمونه‌ها تعداد کمی آئید دیده می‌شود که به نظر می‌رسد از محل سد حمل شده باشند. رخساره گل‌پشتیبان و حضور آریتولین مخروطی معرف محیط لاگون است. این ریزرخساره در بخش‌های آهکی-مارنی سازند تیرگان به فراوانی دیده می‌شود (شکل ۳ ج).

د) بیوکلاست آریتولینا پلوئید پکستون: در این رخساره علاوه بر آریتولین پلوئید نیز اضافه می‌شود که تا ۶۰ درصد متن را در بر می‌گیرد. خمیره میکرایتی که در آن آریتولین‌ها، خرده‌های بریوزوئر، کرینویید، دوکف‌ای و فرامینفر (میلیولیده) به همراه پلوئید قرار دارند. در صحرا از لایه آهک مارنی کرم تیره ضخیم لایه در سطح هوازده خاکستری روشن تشکیل شده است. این رخساره در

از ویژگی‌های رخساره‌های این محیط حضور مواد تخریبی مانند کوارتز می‌باشد که از خشکی حمل شده‌اند. همچنین آثار خروج از آب در بافت چشم‌پرنده‌ای به چشم می‌خورد. بیوکلاست‌ها کم و بدون تنوع هستند. آئیدها نیز دارای هسته کواتز می‌باشند. این رخساره در بخش پایینی سازند تیرگان بیش‌تر دیده می‌شود.

#### ۵-۲- کمر بند رخساره‌ای لاگون<sup>۱</sup>

الف) اینتراکلاست بیوکلاست آریتولینا گرینستون: این رخساره دارای بیوکلاست، آریتولین، بریوزوئر، شکم‌پا، خرده کرینویید است. دانه‌های تشکیل‌دهنده این ریزرخساره در سیمان اسپارایتی قرار دارند. دانه‌ها در تماس با یکدیگر بوده و بدون آثار فشردگی هستند. در آهک‌ها فسیل آریتولین با چشم غیرمسلح دیده می‌شوند. آهک‌ها کرم‌رنگ با میان لایه شیلی هستند. این رخساره در بخش میانی و پایانی سازند تیرگان به چشم می‌خورد و از ویژگی آن حضور آریتولین است (شکل ۳ الف).

ب) اینتراکلاست بیوکلاست آئید گرینستون: بیوکلاست‌ها شامل جلبک‌های سبز، خرده صدف دوکف‌ای‌ها و کرینوییدهاست. آئیدها دارای ساختمان

<sup>۱</sup> Lagoon

بریزوئرها و کرینوییدها که گردشگی خوبی دارند نشان از انرژی بالای محیط‌رسوبی و ارتباط شول با دریای باز دارد (فلوگل، ۲۰۱۰؛ ویلسون، ۱۹۷۵). در این رخساره فشردگی دیده نمی‌شود و دانه‌ها در تماس با هم هستند (شکل ۴ ج).

#### ۵-۴- دریای باز<sup>۳</sup>

**الف) بیوکلاست بریزوئری پکستون:** در این رخساره وجود بریزوئری فراوان حکایت از تشکیل این ریزرخساره در دریای باز دارد. در صحرا این رخساره در لایه آهکی نازک لایه کرم‌رنگ با میان لایه‌های نازک شیل دیده می‌شود (شکل ۵).

#### ۶- فرایندهای دیاژنژی در سازند تیرگان

فرایندهای دیاژنژی عمده در سازند تیرگان در منطقه مورد مطالعه شامل سیمانی شدن، انحلال، تراکم، شکستگی، استیلولیتی شدن می‌باشند. البته در این بررسی فشردگی، استیلولیتی شدن و انحلال مورد تاکید قرار گرفته‌اند و سعی شده روند هر یک در ضخامت سازند و از پایین به بالا مورد بررسی قرار گیرد. تاثیرات ناشی از انحلال و شکستگی در تراوایی نهایی سازند نقش ایفا کرده‌اند. گرچه بیش‌تر لیتولوژی سازند شوربچه از سنگ‌های آواری تشکیل شده است اما در بخش‌هایی از سازند تیرگان نیز حضور دانه‌های آواری قابل توجه است که مورد بررسی قرار گرفته است.

**سیمانی شدن:** در این مطالعه شش سیمان مورد شناسایی قرار گرفته است که شامل: سیمان رشته‌ای، سیمان موزاییک هم‌بعد، سیمان دروزی، سیمان پویکیکولوتاپیک، سیمان بلوکی، سیمان رورشدی هستند. سیمانی شدن از مهم‌ترین، متنوع‌ترین و تاثیرگذارترین فرایندهای دیاژنژی است (شکل ۶).

**انحلال:** انحلال باعث ایجاد تخلخل‌های کانالی و انحلالی بین دانه‌ها می‌گردد. در امتداد استیلولیت‌ها و درزه‌های ایجاد شده این فرایند به صورت سیمان اسپارایتی صورت می‌گیرد. سیال منفذی نسبت به کربنات تحت‌اشباع است که باعث انحلال می‌شود (فلوگل، ۱۹۹۰؛ تاکر، ۲۰۰۱). انحلال به‌خصوص در محیط کم ژرفا نزدیک سطح زمین، عمیق دریایی، که آب دریا نسبت به آراگونیت و کلسیت

بخش‌های پایینی و میانی سازند تیرگان دیده می‌شود (شکل ۳ د).

**ح) داسی‌کلاداسه آبیوکلاست پکستون:** در این رخساره جلبک‌سبز داسی‌کلاداسه آبی‌ترین فراوانی را دارد. برش طولی و عرضی جلبک به همراه بافت ژئوپتال دیده می‌شود. رخساره‌ها عمدتاً گل‌پشتیبان هستند. فشردگی در ذرات دیده نمی‌شود و حضور کمی الیید نشان می‌دهد که از محیط سد به لاگون حمل شده‌اند. از طرفی وجود برخی بیوکلاست‌های استنوهالین نشان می‌دهد که لاگون با دریای باز ارتباط دارد. این رخساره در بخش‌های آهک پایینی و بخش بالایی آهک میانی دیده می‌شود. آهک ضخیم لایه بوده و به رنگ خاکستری تیره در سطح تازه به رنگ کرم روشن است (شکل ۳ ح).

#### ۵-۳- کمر بند رخساره‌ای سد<sup>۲</sup>

**الف) اینتراکلاست بیوکلاست گرینستون:** این رخساره حاوی سیمان اسپارایتی است. بیوکلاست‌ها شامل خرده صدف شکم‌پایان، دوکفه‌ای‌ها، بریزوئری و خارپوستان می‌باشد. اینتراکلاست لبه کاملاً گرد شده دارند. حضور میکروفسیل‌های استنوهالین نشان از تماس سد با دریای باز از طریق کانال دارد. لایه آهکی توده‌ای خاکستری با میان لایه مارنی نازک سبز روشن ویژگی این ریزرخساره در صحرا است (شکل ۴ الف).

**ب) بیوکلاست گرینستون:** در این رخساره مجموعه‌ای از بیوکلاست‌ها شامل خرده صدف، بریزوئری، خرده خارپوست در یک سیمان اسپارایتی است. ذرات کوارتز حضور ندارند. این رخساره در بخش‌های بالایی سازند تیرگان به فراوانی دیده می‌شود. لایه آهکی در صحرا به رنگ خاکستری تیره با سطح تازه خاکستری روشن است. ضخامت لایه‌های آهکی از ۱/۵ تا ۳ متر بوده و حاوی میان لایه‌های نازک مارنی سبز روشن است (شکل ۴ ب).

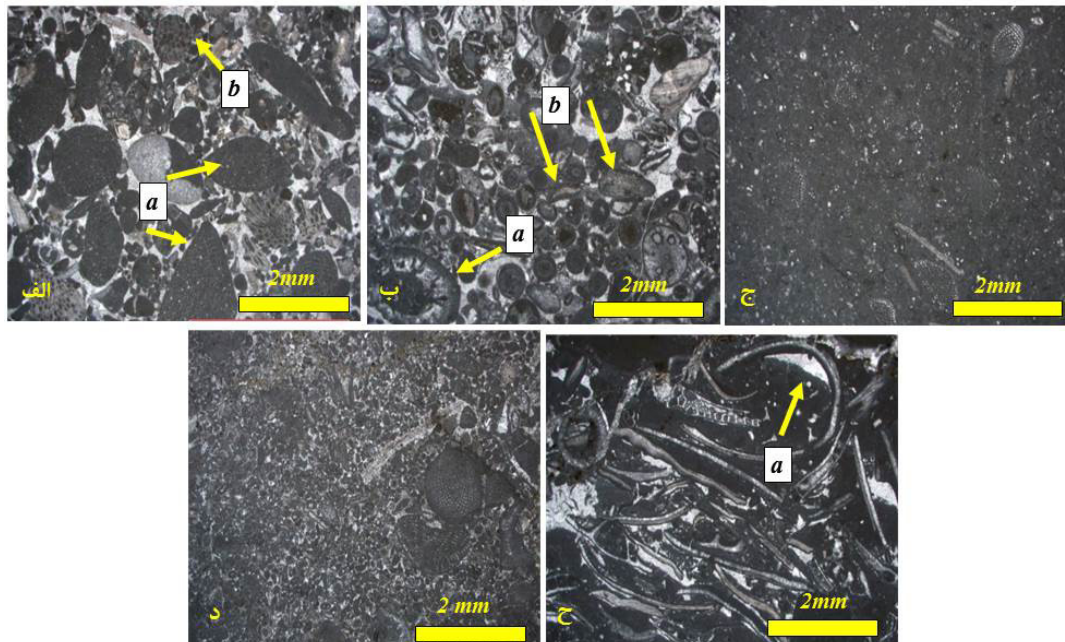
**ج) الیید اینتراکلاست گرینستون:** این رخساره کاملاً پهنه سد را نشان می‌دهد. الییدها دارای جورشدگی و اندازه یکسان هستند. کمی ذرات اینتراکلاست دیده می‌شود که آن‌ها هم دارای گردشگی و جورشدگی مناسبی هستند. آهک‌های تشکیل‌دهنده این ریزرخساره دارای ساختمان چینه‌بندی متقاطع و دارای درز و شکستگی هستند (شکل ۴ ج).

<sup>3</sup> Open marine

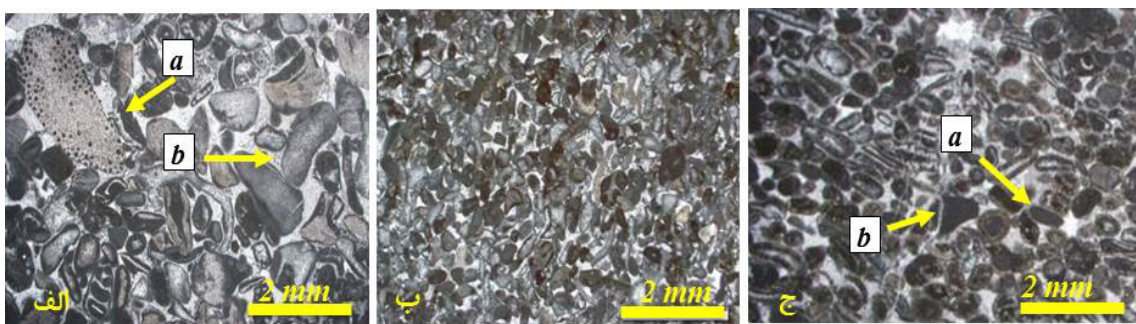
<sup>2</sup> Shoal

سازند در هر دو رخساره گل و دانه‌پشتیبان دیده می‌شود. نتیجه انحلال در این سازند در آن بخش که به تراوایی مربوط می‌شود در میزان آبدهی چاه‌ها منعکس شده است.

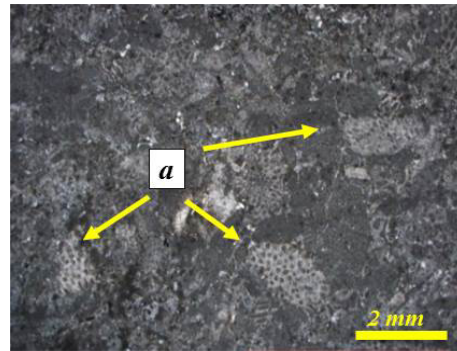
منیزمدار تحت اشباع است موثرتر صورت می‌گیرد، اما در هنگام بالآمدگی هم این فرایند رخ می‌دهد (بریگاد و همکاران، ۲۰۰۹). فرایند انحلال در سازند تیرگان وابسته به محیط‌های آب و هواشناسی است. انحلال در این



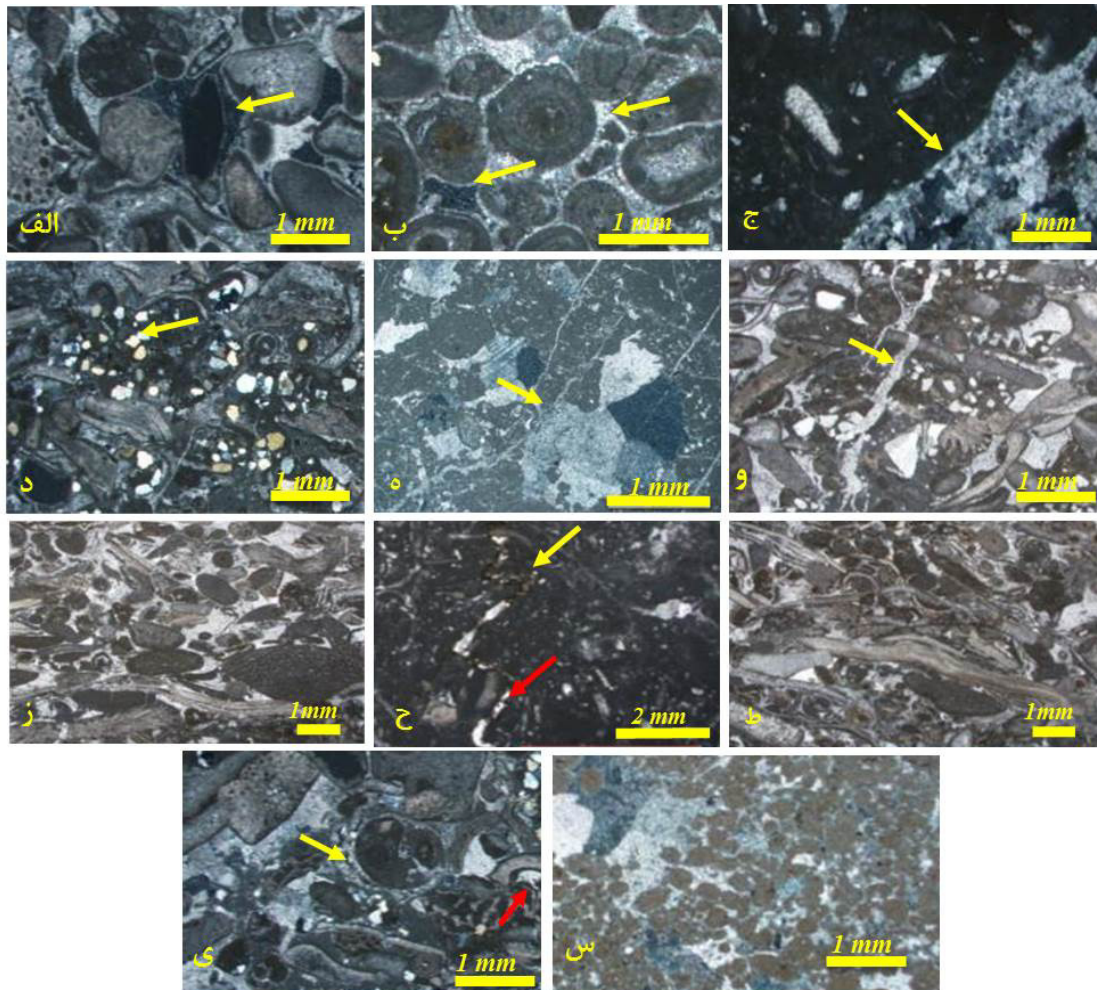
شکل ۳. ریزرخساره‌های لاگون، الف) (نمونه B2) اینتراکلاست بیوکلاست آریبتولینا گرینستون، بیوکلاست‌ها شامل آریبتولین (a) بریوزوئر (b) خرده کرینوبیدها، صدف شکم‌پا، ب) (نمونه C17) اینتراکلاست بیوکلاست ایید گرینستون، بیوکلاست‌ها شامل جلبک (a) خرده صدف دوکفه‌ای‌ها، کرینوبیدهاست، b). اییدها دارای ساختمان متحدالمرکز و کوچک هستند. ج) (نمونه C28) بیوکلاست آریبتولینا وکستون، عمده بیوکلاست آریبتولین است که در رخساره گل میکرایتی شناور هستند. د) (نمونه B6) بیوکلاست آریبتولینا پلویید پکستون، در این رخساره نیز عمده بیوکلاست آریبتولین بوده و به همراه پلویید دیده می‌شود. خرده کرینوبیدها و میلوییدها نیز کمتر از ۵ درصد است. ح) (نمونه C17) داسی‌کلاداسه آ بیوکلاست پکستون، عمده بیوکلاست جلبک است با برش طولی و عرضی، بافت ژئوپتال در آن دیده می‌شود. ا)، رخساره گل پشتیبان است. بر اساس مشاهدات صحرایی شامل سنگ‌آهک متوسط تا ضخیم لایه می‌باشند. (نمونه‌ها از برش چینه‌شناسی باموسی، شکل ۷)



شکل ۴. ریزرخساره‌های سد، الف) (نمونه C5) اینتراکلاست بیوکلاست گرینستون، بیوکلاست شامل بریوزوئر (a) خرده کرینوبیدها (b) اینتراکلاست لبه گردشده دارند. ب) (نمونه C28) بیوکلاست گرینستون، بیوکلاست بیش تر خرده‌های صدف، بریوزوئر. ج) (نمونه C31) ایید اینتراکلاست گرینستون. این رخساره با حضور ایید (a)، هسته اییدها شامل اینتراکلاست و بیوکلاست، گردشگی بیوکلاست‌ها (b) و سایر ذرات سازنده، سیمان اسپرایت نشانگر محیط پرانرژی است. در مشاهدات صحرایی آهک‌های این رخساره متوسط تا ضخیم لایه دارای ساختمان چینه‌بندی متقاطع هستند بیوکلاست‌ها دارای تنوع بالا از خرده‌های فرامینیفرها، خرده کرینوبیدها، شکم‌پایان و بریوزوئر حضور دارند. (نمونه‌ها از برش چینه‌شناسی باموسی، شکل ۷)



شکل ۵. رخساره دریای باز، الف) (نمونه B9) بیوکلاست بریوزوئر پکستون، بیوکلاست شامل بریوزوئر فراوان، (نمونه از برش چینه‌شناسی باباموسی، شکل ۷)



شکل ۶. سیمان و فرایندهای دیازتزی، الف) (نمونه B3) سیمان رورشدی در اطراف خار خار پوست (فلش زرد، ب) (نمونه C9) سیمان حاشیه‌ای در اطراف ایید، ج) (نمونه C33) سیمان هم‌بعد که داخل فضا را پر کرده است. د) (نمونه D25) فشردگی بالا در ذرات آلومک به همراه ذرات ماسه کوارتزی، مربوط به واحدهای سنگی پایینی سازند تیرگان که ذرات کواتز در حد ماسه در متن و داخل ذرات دیده می‌شود (فلش زرد، ه) (نمونه C11) سیمان بلوکی، بلورهای نیمه‌شکل‌دار با لبه مشخص، و) (نمونه D25) سیمان پرکننده شکستگی (فلش زرد، ز) (نمونه B2) سیمان تشکیل‌دهنده اسپارایتی اما فشردگی ندارد. ح) (نمونه D9) استیلولیت (فلش زرد) در یک پکستون مربوط به آهک میانی در طول آن انحلال شکل گرفته است (فلش قرمز، ط) (نمونه C31) مربوط به بخش‌های پایینی سازند تیرگان، فشردگی بالا ذرات و شکسته شده ایید، ی) (نمونه D22) سیمان دروزی که حاشیه برش عرضی یک شکم‌پا رشد کرده است. فابریک ژئوپتال (فلش قرمز، س) (نمونه D10) سیمان پویکیلو تاپیک.



مختلف مقادیر متفاوتی از کارستی‌شدن را نشان می‌دهند. ناهمگنی این بافت‌ها با توجه به تغییر در شرایط محیطی و دیاژنزی در محیط‌های آب و هوایی و تدفینی تغییر می‌کند. نوع رخساره در نوع و شدت تأثیر پدیده‌های دیاژنتیکی بسیار اثرگذار است. نوع محیط و موقعیت آن در حوضه رسوبی نیز در تغییرات ویژگی‌های کارستی‌شدن موثر می‌باشد به طوری که رخساره‌های نزدیک به ساحل به دلیل مجاورت خشکی و دارا بودن ذرات تخریبی فرایندهای دیاژنزی متفاوتی را متحمل شده‌اند و در نتیجه کارستی‌شدن آن‌ها نیز متفاوت است. آهک، مارن، آهک‌مارنی و آهک‌ماسه‌ای، چهار لیتولوژی غالب شناسایی شده در سازند تیرگان براساس مطالعات پتروگرافی (برش‌نازک) و مطالعات صحرایی هستند. مقایسه مقادیر تخلخل و تراوایی برای لیتولوژی‌های آهکی، مارن، آهک‌مارنی و آهک‌ماسه‌ای، بیان‌کننده یک ارتباط بارز بین لیتولوژی و کیفیت تخلخل و تراوایی است. به طور کلی توالی‌های آهکی مقادیر تخلخل و تراوایی بیش‌تری نسبت به لیتولوژی‌های دیگر دارند. بررسی توسعه کارست برای ریزرخساره‌های شناسایی شده در توالی بررسی شده از سازند تیرگان نشان می‌دهد به لحاظ تفاوت در محیط رسوبی اولیه و تأثیر فرایندهای دیاژنزی بر این رخساره‌ها، هر ریزرخساره مشخصات متفاوتی دارد و توسعه کارست در آن‌ها متفاوت است. بیش‌تر انواع تخلخل‌های اولیه و ثانویه‌ای که در این نمونه‌ها مشاهده شد طی فازهای مختلف سیمانی شدن، با سیمان پر شده‌اند.

در سازند تیرگان، سیمان‌رشته‌ای هم‌ضخامت در ریزرخساره‌های مرتبط با زیر محیط سد کربناته مشاهده می‌شود. از نظر اهمیت، این سیمان موجب حفظ فابریک اولیه سنگ و مقاومت آن در برابر فشارهای تراکمی بعدی و جلوگیری از کاهش تخلخل شده است؛ به طوری که در رخساره‌های گرینستونی که با این سیمان، سیمانی شده‌اند، کمترین کاهش تخلخل مشاهده می‌شود. سیمان‌های بلوکی و دروزی در توالی بررسی شده، تخلخل‌های بین‌دانه‌ای، حفره‌ای و شکستگی‌های موجود در ریزرخساره‌های محیط لاگون و سد کربناته را به طور کامل و ناقص پر کرده و سبب کاهش تخلخل این ریزرخساره‌ها شده‌اند.

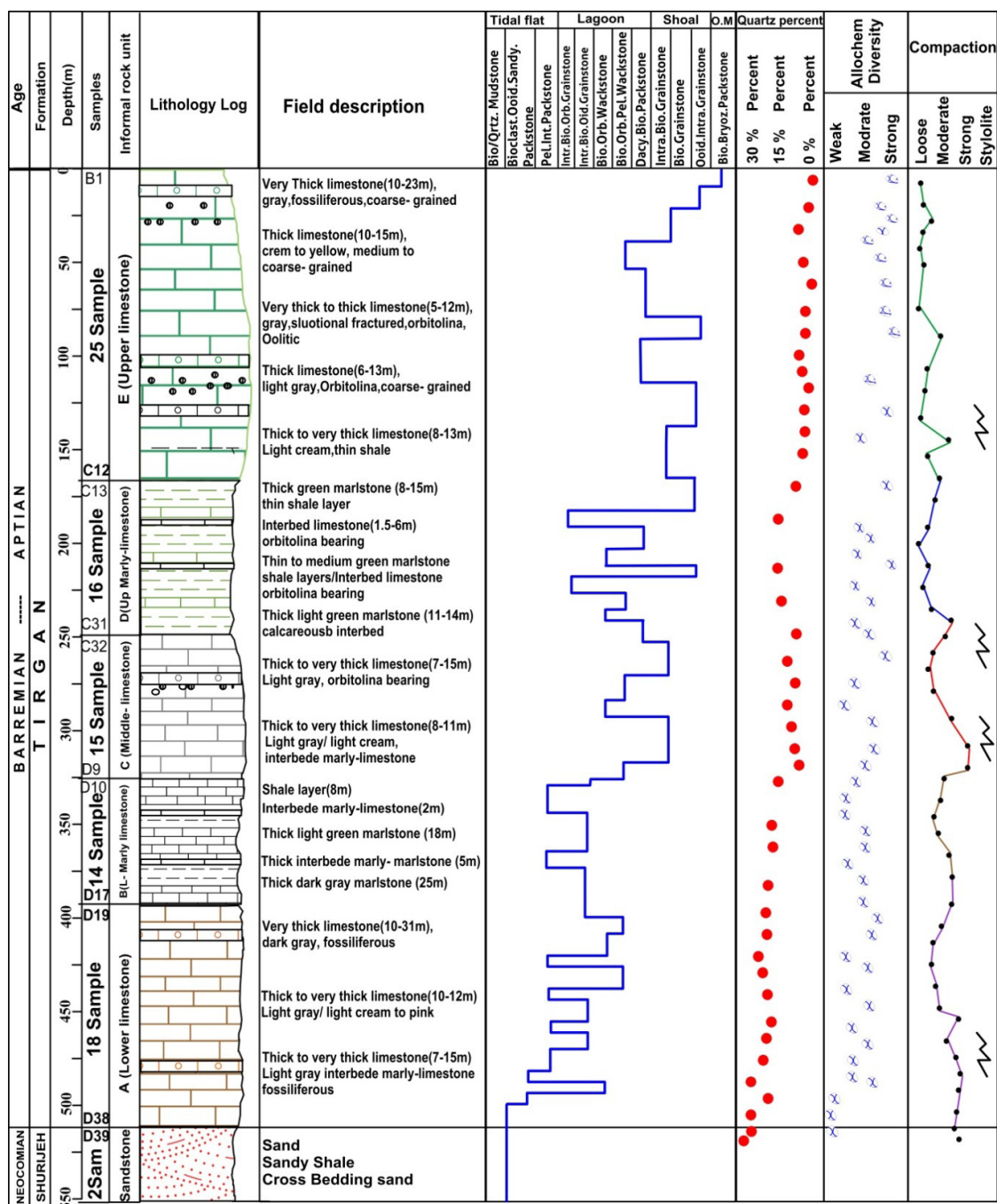
**تراکم:** فشردگی فیزیکی باعث در هم فرورفتن، شکسته شدن آلوکم‌های شکننده مانند ائیدها، صدف دوکفه‌ای‌ها و تغییر شکل آلوکم‌های نرم مانند پلوئیدها می‌شود. فشردگی به صورت همبری نقطه‌ای، طولی، محدب-مقعر و دندانه‌دندانه دیده می‌شود. در ریزرخساره‌های مطالعه شده به صورت تراکم کم، تراکم متوسط، تراکم قوی و در انتها استیلولیتی‌شدن مورد بررسی قرار گرفته است. در تراکم کم دانه‌ها در تماس با یکدیگر نیستند و اکثر آن‌ها حالت خود را حفظ کرده‌اند. در تراکم متوسط دانه‌ها در تماس با یکدیگر هستند و کمی هم ممکن است در هم فرو رفته باشند اما حالت خود را حفظ کرده‌اند. در تراکم قوی دانه‌ها در هم فشرد شده حالت محدب-مقعر، شکسته شده دارند. این توصیف در طول ستون چینه‌شناسی نشان داده شده است (شکل ۷). فشردگی شیمیایی نیاز به ژرفای بیش‌تری دارد بیش‌تر از چند صد متر (تا کر، ۲۰۰۱). ایجاد استیلولیت و درزه‌های انحلالی مهم‌ترین پدیده‌های ناشی از فشردگی شیمیایی هستند. یکی از نشانه‌های دیاژنژ دفنی استیلولیت است (چاکت و جیمز، ۱۹۸۷). در ریزرخساره‌های سازند تیرگان گرچه استیلولیت فراوان دیده می‌شود اما در بخش‌های بالایی به شدت کمتر شده است (شکل‌های ۶ و ۷).

**شکستگی:** این فرایند حاصل افزایش فشار غیرعادی قبل از سیمان‌شدن، چین‌خوردگی، گسل‌خوردگی، انحلال نمک یا فشار غیرعادی سیالات است. شکستگی‌ها عمده‌ترین نوع تخلخل در بسیاری از سنگ‌های کارستی هستند و تأثیر زیادی در ایجاد تخلخل ثانویه و افزایش تراوایی دارند. برخی شکستگی‌ها در هر دو رخساره گل‌پشتیبان و دانه‌پشتیبان در مطالعات سازند تیرگان توسط سیمان پر شده‌اند و برخی از آن‌ها باز هستند و به عنوان یک گذرگاه مناسب برای عبور سیال‌ها می‌باشند (شکل ۶ ح) لازم به ذکر است نتیجه ایجاد شکستگی‌ها که در حین و بعد از دیاژنژ رخ می‌دهد همانند انحلال در تراوایی لایه و یا کل سازند منعکس می‌شود.

#### ۷- بررسی اثر دیاژنز و ذرات تخریبی در پتانسیل

##### توسعه کارست

توسعه کارست برای بافت‌های سنگی مختلف شناسایی شده در سازند تیرگان نشان می‌دهد بافت‌های سنگی



شکل ۷. ستون چینه‌شناسی برش اندازه‌گیری شده باباموسی، لیتولوژی، ریزرخساره‌ها، درصد مواد آواری (کوارتز)، تغییرات فشرده‌گی، استیلولیتی‌شدن، تنوع آلومک‌ها از بخش‌های پایینی سازند به سمت بالا. شماره و محل نمونه‌ها در شکل مشخص شده‌اند.

پکستونی شده است. هم‌چنین کاهش ضخامت و از دست دادن تخلخل اولیه رخساره‌های مادستونی از نتایج آن می‌باشد. در رخساره‌های گرینستونی تراکم فیزیکی نسبتاً کم بوده است ولی در مواردی که فضای بین‌دانه‌ای بدون سیمان بوده، تماس دانه به دانه ایجاد شده و نیز شکل دانه‌ها تغییر یافته است.

در سازند تیرگان تراکم فیزیکی و شیمیایی تأثیر نسبتاً زیادی داشته است که می‌توان نتایج حاصل از این دو فرایند را در رخساره‌های مختلف مشاهده نمود. تراکم فیزیکوشیمیایی باعث ایجاد شرایط انحلال فشاری در رخساره‌های مورد مطالعه شده به طوری که موجب تشکیل استیلولیت‌ها و رگه‌های انحلالی در رخساره‌های

ته‌نشست کربنات‌ها وارد حوضه شده‌اند. با بالا آمدن سطح آب دریا ورود مواد تخریبی کاهش پیدا کرده است. با کاهش ورود مواد تخریبی، در بخش بالایی سازند تیرگان با ته‌نشست ریزرخساره‌های سد و حاشیه سد میزان رسوب‌گذاری آهک بسیار بیش‌تر شده و سبب تشکیل آهک‌های ضخیم لایه شده است (شکل‌های ۷ و ۱۰). در توسعه کارست یکی از شرایط مهم این است که سنگ‌های آهکی از ضخامت کافی برخوردار باشند. در منطقه مورد نظر، لایه‌های بخش بالایی سازند تیرگان که در محیط پراترزی سد نهشته شده‌اند، حالت توده‌ای داشته و وجود درزه‌ها شرایط مناسب را جهت نفوذ آب در لایه‌های سنگ‌ها فراهم می‌کنند و آب‌های ناشی از بارش می‌توانند از این درزه‌ها و شکاف‌ها استفاده نموده و عمل انحلال را بهتر و سریع‌تر انجام دهند. ضخامت زیاد سنگ‌آهک‌های بخش بالایی توالی که حالت ضخیم‌لایه داشته عاملی مثبت در جهت توسعه اشکال کارستی می‌باشد.

#### ۸- تخلخل و تراوایی

بررسی سنگ‌های آهکی در صنعت نفت و از دیدگاه گوناگونی تخلخل بسیار حائز اهمیت است. اما وقتی سیال آب باشد و به سبب ویژگی‌های آن شامل نیروهای چسبندگی بین سیال و محیط، تنها تخلخل و تراوایی ناشی از آن با اهمیت است که امکان عبور سیالی مانند آب را داشته باشد. بنابراین تخلخل ثانویه یا بعد از دیاژنز هست که اهمیت بیش‌تری دارد. اما مسئله مهم در این بررسی پتانسیل لایه‌های آهکی سازند تیرگان برای آمادگی امکان انحلال مدنظر قرار دارد. در واقع چون تمام لایه‌های سازند تیرگان در منطقه در معرض یک نوع شرایط آب و هوایی و تکتونیک قرار گرفته‌اند آن لایه‌هایی که پتانسیل بیش‌تری به انحلال نشان داده‌اند مهم هستند. مجموع تخلخل و پیامد مثبت آن یعنی تراوایی در این پژوهش در نتایج آزمایش پمپاژ مورد بررسی قرار می‌گیرد.

#### ۹- بررسی اشکال مورفولوژیکی کارست در سازند

##### تیرگان

از میان سیمای مهم مورفولوژیکی کارست در منطقه مورد مطالعه می‌توان از کارن‌ها، گرایک‌ها، غارها،

در توالی بررسی شده، تراکم فیزیکی سبب کاهش تخلخل و سخت شدن رسوبات اولیه شده است. از سویی شکستگی‌های ایجاد شده باعث ارتباط تخلخل‌های مختلف و افزایش تراوایی و گسترش کارست شده است. در مقایسه با دیگر فرایندهای دیاژنزی، تأثیر این فرایند بر تخلخل و تراوایی تا حد زیادی به محیط رسوب‌گذاری و فرایند دیاژنز سطحی وابسته است. تراکم شیمیایی با انحلال‌فشاری سبب تشکیل استیلولیت و رگچه‌های انحلالی در زمینه سنگ یا مرز بین‌دانه‌ها شده است. یکی از دلایل افزایش میزان تراوایی در بعضی رخساره‌های لاگونی، گسترش استیلولیت در آن‌هاست. آثار اکسیدهای آهن در لابلای استیلولیت‌ها، شواهدی برای توجیه نقش آن‌ها در عبور سیالات دیاژنزی و تدفینی است. فرایند انحلال به تشکیل انواع تخلخل‌های ثانویه کانالی، حفرات مرتبط به هم و استیلولیتی در ریزرخساره‌های مختلف از توالی مطالعه شده منجر شده است؛ بنابراین انحلال از فرایندهای افزایش‌دهنده تخلخل و کارست در سازند تیرگان است. وجود درصد کمی از تشکیل‌دهنده‌های غیرقابل حل، مانند کانی‌های رسی و سیلیکاته به میزان قابل‌ملاحظه‌ای قابلیت کارستی شدن سنگ‌های کربناته را کاهش می‌دهد. اگر میزان رس و سیلت بیش‌تر از ۲۰ تا ۳۰ درصد باشد، از توسعه کارست جلوگیری می‌کند. کربنات‌های با خلوص بیش‌تر از ۷۰ درصد مناسب‌ترین سنگ‌ها برای توسعه کارست می‌باشند (فورد، ویلیامز، راش ۲۰۰۷؛ جیمز و چاکت، ۱۹۸۴) بررسی تأثیر ویژگی‌های سنگ‌شناسی بر توسعه سیمای کارستی در واحدهای سنگی سازند تیرگان نشان می‌دهد که میزان ناخالصی ریزرخساره‌های ساحل زیاد بوده و کربنات‌ها دارای خلوص نسبتاً بالایی از نظر میزان کربنات کلسیم نمی‌باشند بنابراین شرایط مناسب ترکیب سنگی برای انحلال و توسعه فرایندهای کارستی در این ریزرخساره‌ها وجود ندارد. با بررسی ریزرخساره‌ها به وضوح از میزان دانه‌های تخریبی سازند تیرگان از پایین به بالا کاسته می‌شود. درصد وجود کوارتز بین ۱۰ تا ۳۰ درصد در بخش‌های پایینی سازند تخمین زده شده است. چینه‌بندی مورب در سازند شورچیج و بخش پایینی سازند تیرگان (ماسه‌سنگ اید گرینستون) و رخساره گرینستونی با حضور هسته کوارتز در ایدها و متن سنگ نشان از آن دارد که مواد تخریبی در زمان

مطالعه این مورفولوژیکی بیش‌تر دیده می‌شود پرآب‌ترین چاه‌ها نیز در انتهای دره‌های خشک حفاری شده‌اند. غارهای بزرگ، فروچاله‌ها، کارن و گرایک و حفرات انحلالی مهم‌ترین این اشکال در اطراف این چاه‌ها هستند (شکل ۸).

سینک‌هول و دره‌های خشک و حفرات بزرگ انحلالی لایه‌های ضخیم آهک نام برد. بیش‌تر سیمای مورفولوژیکی کارست در بخش بالایی سازند تیرگان بوجود آمده است که به سبب ضخامت بالای لایه آهکی بوده است (شکل ۸). در سمت شمال‌خاور منطقه مورد



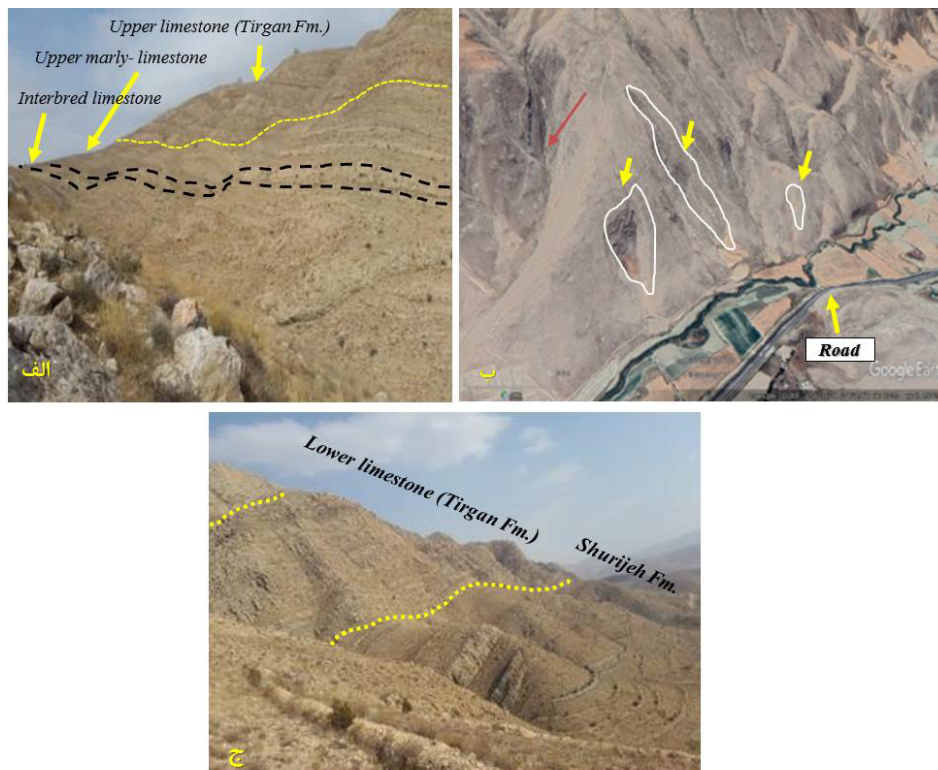
شکل ۸. اشکال مورفولوژی کارست در واحد سنگی آهکی بالایی (E= UP- Lmst) سازند تیرگان، الف) دره خشک در شمال چاه پرآب شماره W09 عمق دره تا ۷۰ متر نیز می‌رسد. حفرات انحلالی و غار (Cave) در بین سطوح لایه‌بندی دیده می‌شود (فلش زرد، ب) شکاف‌های عمود بر سطح چینه‌بندی که تا سطح لایه بعدی امتداد دارند و محل عبور آب هستند. ج) کارن ناشی از فرسایش باران که فقط در لایه آهک بالایی دیده می‌شوند. د) ریل کارن و گرایک، که سطح بالایی لایه‌ها در محل چاه‌های منطقه مشاهده می‌شوند. ه) لایه‌بندی ضخیم آهک در منطقه در بخش بالایی تیرگان، ط) حفرات انحلالی بزرگ در لایه آهکی بالایی سازند تیرگان.

سطح لایه‌های آهکی به چشم می‌خورند (شکل ۹). گرچه واحد سنگی آهک بالایی دارای مورفولوژی کارست نسبتاً پیشرفته است، اما سایر واحدهای سنگی آهکی سازند تیرگان با اینکه ویژگی‌های واحد آهک بالایی را ندارند مانند ضخامت بالا، خلوص بالاتر، فشردگی کمتر و... اما چون تنها واحد آهک بالایی به سبب موقعیت چینه‌شناسی در برابر انحلال قرار گرفته در آن کارست

وجود فروچاله‌های نسبتاً بزرگ به همراه دره‌های خشک به عنوان سیمای مورفولوژیکی کارست به ویژه در لایه‌های آهکی ضخیم لایه قابل توجه است. در شمال‌خاور منطقه مورد مطالعه و خاور برش مطالعه شده دره‌های عمیق به فراوانی دیده می‌شوند که عمق برخی تا ۷۰ متر نیز می‌رسد. فروچاله‌ها در جنوب و جنوب‌خاور منطقه به وضوح قابل رویت هستند. این فروچاله‌ها در

می‌رسد واحد آهک میانی هم شرایط مناسبی داشته باشد اما واحد سنگی آهکی پایینی به سبب وجود بیش‌تر ذرات آواری در رتبه سوم قرار می‌گیرد. این نکته در پی‌جویی منابع آب در هر یک از قسمت‌های سازند تیرگان می‌تواند بسیار حائز اهمیت باشد.

بیش‌تر توسعه یافته است. سایر واحدهای آهکی سازند تیرگان اساساً به سبب موقعیت چینه‌شناسی در بین لایه‌های مارنی غیرقابل نفوذ قرار گرفته و در برابر انحلال طولاتی قرار نداشته‌اند. به دیگر سخن اینکه اگر سایر واحدهای سنگی آهکی تیرگان در رابطه با حساسیت به انحلال (پتانسیل توسعه کارست) بررسی گردد به نظر

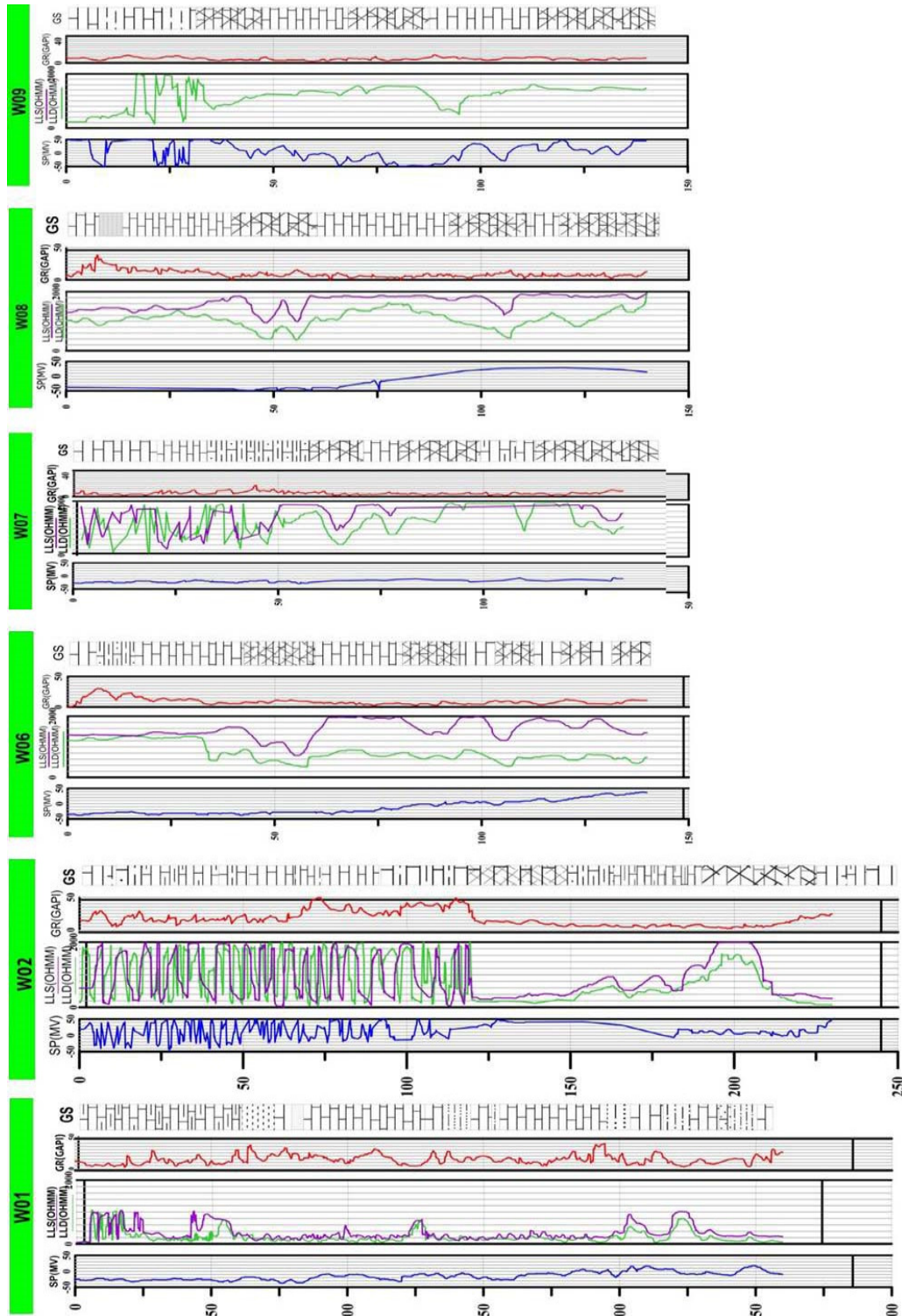


شکل ۹. عوارض مورفولوژیکی کارست، الف) لایه‌بندی ضخیم در واحد سنگی آهک بالایی، لایه مارنی آهکی بالایی، و میان لایه نازک آهکی، ب) فروچاله‌های بزرگ در واحد آهکی بالایی به اندازه فروچاله (فلش زرد) و جاده توجه شود و دره‌های خشک (فلش قرمز)، ج) واحد آهکی پایینی در تماس با سازند شوربجه، این واحد سنگی هم ضخیم لایه و توده‌ای است.

هم‌راستا با لاگ مقاومت داندانه‌های متعددی به سمت راست نمودار دارد. تلفیق همزمان لاگ‌ها نشان می‌دهد لایه‌های حاوی شیل و مارن در ستون چینه‌شناسی حضور بیش‌تری دارند. با توجه به محل حفر چاه‌های W01 و W02 در بخش پایینی واحد سنگی آهکی بالایی (E) و ابتدای واحد سنگی مارنی آهکی بالایی (D) نشان می‌دهد پتانسیل توسعه کارست در این بخش از دو واحد سنگی به سبب حضور لایه‌های مارنی و شیلی پایین می‌باشد. هم‌چنین شیب حفاری چاه تا حد زیادی در جهت شیب لایه‌بندی است و طبیعتاً نمی‌تواند حاوی تغییرات زیادی باشد (شکل ۱۰).

#### ۱۰- بررسی لاگ حفاری چاه‌ها و آبدهی آن‌ها

۱۰-۱- لاگینگ‌ها: از ده حلقه چاه حفاری شده و در حال بهره‌برداری ۷ حلقه دارای لاگ‌های الکتریکی، پتانسیل خودزا (SP) مقاومت الکتریکی (R)، گامای طبیعی (Y)، هستند. چاه شماره W01 و W02 در منطقه سایت پتروشیمی حفر شده‌اند. عمق هر یک به ترتیب ۲۵۰ و ۲۳۰ متر است. بررسی لاگ مقاومت و انحراف آن به سمت راست نشان از کاهش مقاومت تا عمق ۲۵ متری و در اعماق ۵۰، ۱۲۵، ۲۰۰ و ۲۳۰ متری دارد. هم‌زمان کل منحنی پتانسیل خودزا به سمت خط شیل انحراف بیش‌تری دارد. هم‌چنین لاگ گامای طبیعی تا حدی



شکل ۱۰. لاگ حفاری و الکتریکی چاه‌های منطقه، چاه‌های W01 و W02 با عمق ۲۵۰ و ۲۳۰ متر در بخش پایین از واحد آهک بالایی و ابتدای لایه آهکی مارتنی بالایی حفاری شده‌اند حضور شیل توسط لاگ گامای طبیعی و مقاومت در کل چاه W01 در چاه W02 تا عمق ۱۲۵متری قابل مشاهده است. در چاه W06 بجز ۲۵ متر بالایی میزان شیل کاهش می‌یابد و افزایش و کاهش مقاومت نشان از آهک خرد شده دارد. در چاه W07 نیز تا عمق ۵۰ متر کاهش شیل همراه با تغییرات مقاومت می‌باشد که نشان از خردشدگی نسبی آهک متراکم دارد، این وضعیت در چاه W08 بهتر قابل مشاهده است. کاهش مقاومت‌ها منطبق بر شکستگی‌های آهک متراکم هستند. در چاه‌های W09 و W10 کاهش شیل و افزایش نسبی مقاومت حاکی از آهک متراکم است که درز و شکستگی کمتری نسبت به چاه‌های W07 و W08 دارد. پنج حلقه چاه W06, W07, W08, W09, W10 به دلیل حفاری در واحد سنگی آهک بالایی کم‌ترین میزان شیل را نشان می‌دهند.

مختلف این سازند حفاری شده‌اند. آبدهی هرچاه به عواملی از جمله جانمایی چاه و ارتباط آن با شیب لایه‌بندی سازند، عمق حفاری، عبور از بخش گسلی، سطح اساس فرسایش و سایر عوامل زمین‌شناسی و از طرفی رعایت اصول حفاری در سازند سخت بستگی دارد. در این پژوهش ابتدا محل حفر هرچاه در هر واحد سنگی مشخص گردید و سپس در بررسی چاه‌های آب منطقه در سه بخش میزان آبدهی فعلی، افت ناشی از پمپاژ کوتاه مدت، افت ناشی از برداشت‌های بلند مدت مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آن در جدول شماره (۱) آمده است. با توجه به جدول و توجه به محل حفر چاه در ارتباط با واحد سنگی آهکی مشخص می‌شود که شرایط آبدهی چاه‌هایی که با واحد آهک بالایی در ارتباط بوده‌اند و شرایط فنی حفاری را رعایت کرده‌اند بهتر است، که شامل چاه‌های شماره W05، W06، W07، W08 می‌شوند. اما دو حلقه چاه W01 و W02 گرچه در بخشی از آهک بالایی حفر شده‌اند اما به سبب عدم رعایت شیب حفاری و شیب لایه، دارای آبدهی کم، افت بالا در کوتاه مدت و بلند مدت می‌باشند.

چاه‌های W06، W07، W08، W09، W10 همه در لایه آهکی بالایی حفاری شده‌اند. عمق آن‌ها از ۱۵۰ متر تجاوز نمی‌کند. با مقایسه لاگ‌های مقاومت و گاما مشاهده می‌شود که انحراف آن‌ها به سمت افزایش میزان شیل بسیار کم می‌باشد. لاگ مقاومت نیز تا حد زیادی مسئله را تایید می‌نماید. از طرفی کاهش مقاومت لاگ مقاومت در مقابل ثابت بودن لاگ گاما نشان از آهک خرد شده دارد که بعضاً حاوی آب هستند. در برخی عمق‌ها نیز وجود میان لایه‌های مارنی هم سبب افزایش گامای طبیعی شده و هم مقاومت را کاهش داده است.

بررسی لاگ‌های برداشت شده از سازند تیرگان نشان از کاهش میزان شیل در بخش آهکی بالایی نسبت به بخش پایینی و تا حدی میانی دارد. بنابراین عدم وجود شیل در این بخش آن را در مقابل انحلال مستعد نموده است. در حالی که به سبب وجود لایه‌های مارنی و شیلی در بخش‌های پایینی سازند گردش آب را بسیار محدود کرده است (شکل ۱۰).

۱۰-۲- آبدهی چاه‌ها: چاه‌های آبی که در سازند تیرگان مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند در واحدهای سنگی آهکی

جدول ۱. ویژگی آبدهی، محل حفر، تغییرات افت آبدهی لحظه‌ای و بلندمدت چاه‌های حفر شده در سازند تیرگان، افت بلندمدت سطح آب - بالا (بیش از ۵۰ درصد)، متوسط (بین ۳۰ تا ۵۰ درصد)، کم (بین ۳۰ تا ۲۰ درصد)، بسیار کم (کمتر از ۲۰ درصد)

شماره چاه	ضریب قابلیت انتقال T (m <sup>2</sup> /d)	آبدهی اولیه (l/sec)	آبدهی بعد از ۲۰ سال (۹۴-۱۳۷۴)	درصد کاهش آبدهی ۲۰ ساله (۹۴-۱۳۷۴)	افت (حین پمپاژ) m	افت آبدهی بلندمدت (۲۰سال)	محل حفر چاه در ستون چینه‌شناسی سازند تیرگان
W01	۱۳۴	۲۵	۱۲	۵۲٪	۱۳/۱۹	بالا	بخش پایین لایه آهک بالایی E و قسمتی از ابتدای لایه D اما در جهت شیب لایه‌بندی
W02	۱۴۵	۲۵	۱۳	۵۲٪	۱۹/۵۰	بالا	بخش پایین لایه آهک بالایی E و قسمتی از ابتدای لایه D اما در جهت شیب لایه‌بندی
W03	-	۳۰	۲۰	۳۳٪	-	متوسط	بخشی پایینی از لایه آهک میانی C-
W04	۴۸۰	۳۰	۲۵	۱۶٪	۴/۶۸	کم	بخشی پایینی از لایه آهک میانی C-
W05	۵۶۵	۳۵	۲۵	۲۸٪	۵/۴۰	کم	لایه آهک بالایی E-
W06	-	۴۰	۳۸	۰/۱۰۵٪	-	بسیار کم	لایه آهک بالایی E-
W07	۹۵۲	۶۰	۶۰	۰	۴/۳۵	بسیار کم	لایه آهک بالایی E-
W08	۱۰۳۸	۶۰	۶۰	۰	۲/۸۴	بسیار کم	لایه آهک بالایی E-
W09	۱۹۴	۲۷	۲۳	۱۴٪	۳۲/۲۵	بسیار کم	لایه آهک بالایی E- عدم برخورد به بخش آبدار کارستی
W10	-	۲۶	۲۲	۱۵٪	-	بسیار کم	لایه آهک بالایی E- عدم برخورد به بخش آبدار کارستی

افزایش پتانسیل انحلال کمک کرده است. در مراحل بعدی مجموعه عوامل موثر بر کل سازند تیرگان مانند رخدادهای تکتونیکی و بارندگی یکسان است، اما به سبب ایجاد پتانسیل بالای واحد آهکی بالایی توسعه کارست در آن مناسب بوده و اشکال مورفولوژیکی مهمی چون فروچاله‌ها و دره‌های خشک و درز و شکاف‌های انحلالی را سبب شده است. علاوه بر سیمای کارستی میزان آبدهی چاه‌های حفر شده در واحد آهک بالایی به مراتب از سایر چاه‌ها بالاتر بوده و افت ۲۰ ساله آن‌ها نیز کم و بسیار کم بوده است. هم‌چنین بیش‌ترین مقدار قابلیت انتقال در چاه حفر شده در لایه آهک بالایی بدست آمده است. در مقابل آن دسته از چاه‌هایی که در سایر واحدهای سنگی و به طریق نامناسب حفاری شده‌اند دارای آبدهی کم و افت ۲۰ ساله بالا هستند. بنابراین برای حفر چاه‌های موفق ضروریست به تاریخچه محیط‌رسوبی، وقایع بعدی دیاژنز و سیمای کارستی سازند تیرگان به طور هم‌زمان توجه شود.

#### منابع

- آقابیاتی، ع (۱۳۸۵) زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۶ ص.
- افشارحرب، ع (۱۳۷۳) زمین‌شناسی کپه‌داغ، طرح تدوین کتاب زمین‌شناسی ایران، شماره ۱۱، سازمان زمین‌شناسی ایران ۲۷۵ ص.
- رحیم‌پوربناب، ح (۱۳۸۹) سنگ‌شناسی کربناته (ارتباط دیاژنز و تکامل تخریل)، انتشارات دانشگاه تهران، ۴۸۷ ص.
- پورسلطانی، م. ر.، کرمانشاهی، ح.، جوانبخت، م (۱۳۹۶) تفسیر محیط‌رسوبی، دیاژنز و کیفیت مخزنی سازند تیرگان به عنوان سنگ‌مخزن احتمالی در خاور حوضه رسوبی کپه‌داغ، نشریه رسوب‌شناسی کاربردی، دوره ۵، شماره ۱۰، ص ۱۲۷-۱۵۱.
- ریوندی، ب. و همکاران (۱۳۸۹) نشریه رخساره‌های رسوبی و چینه‌نگاری سکانشی سازند تیرگان در شرق حوضه کپه‌داغ (دره خور، شمال‌شرق مشهد)، جلد ۳، ص ۲۳-۲۴.
- موسوی‌زاده، و همکاران (۱۳۸۷) رخساره‌های رسوبی و چینه‌نگاری سازند تیرگان در برش‌های جوزک و چمن‌بید در غرب حوضه رسوبی کپه‌داغ و انطباق با نواحی شرق حوضه، مجله پژوهشی دانشگاه اصفهان (علوم پایه)، جلد ۳۲، شماره ۳، ص ۵۶-۳۳.

از سویی دیگر دو حلقه چاه W09 و W10 گرچه هم در جهت شیب درست آهک بالایی حفاری شده‌اند، اما هم آبدهی پایینی دارند و هم افت کوتاه مدت بالا. اما نکته قابل توجه اینکه افت بلندمدت آن‌ها کم می‌باشد. آبدهی پایین چاه نشان می‌دهد محل حفاری چاه، مستقیماً به بخش آبدار کارستی (با وجود برخورد به درز و شکاف) برخورد نکرده است. اما افت کم در بلندمدت نشان می‌دهد منبعی بزرگ در نزدیکی این چاه‌ها قرار دارد که طی مدت ۲۰ سال آب آن‌ها را تامین می‌کرده و افت زیادی نداشته‌اند. سایر چاه‌ها (W03, W04) به سبب حفاری در واحدهایی که توسعه کارست کمتری داشته‌اند حفاری شده که هم آبدهی کمتری داشته‌اند و افت بلند مدت آن‌ها نیز بیش‌تر بوده است.

#### نتیجه‌گیری

با بررسی لیتولوژی سازند تیرگان، برش‌نازک از نمونه سنگ، محیط‌رسوبی سازند بازسازی گردید. مشخص شد که این سازند در یک رمپ هموکلینال با شیب کم و در چهار کمر بند رخساره‌ای جزرومدی، لاگون، سدی یا شول و دریای باز نهشته شده است. وجود موجودات استنوهالین در غیر از جای خود مانند سد و لاگون نشان می‌دهد دریای باز از طریق کانال سد را قطع نموده و با لاگون در ارتباط بوده است. سازند شوربیجه به عنوان ساحل دریای کرتاسه منبع ورود مواد آواری به دریا بوده است. سازند تیرگان قابل تقسیم به سه واحد آهکی و دو واحد آهکی- ماری می‌باشد. ۱۲ ریزرخساره شناسایی شدند. مهم‌ترین رخدادهای دیاژنزی شامل سیمانی شدن، انحلال، تراکم، شکستگی، استیلولیتی شدن می‌باشند. از بین این رخدادهای فشردگی، استیلولیتی شدن، به سمت بالای سازند تغییر محسوسی نموده و کاهش یافته که باعث ایجاد شرایط مناسب برای توسعه کارست در مراحل بعدی شده است. هم‌چنین تنوع آلوکم‌ها به سمت بالا نشان از رشد آهنگ رسوب کربنات دارد که باعث ضخامت گرفتن واحدهای بالایی شده است. فرایند انحلال نیز در نهایت به افزایش تراوایی انجامیده که در ضرایب هیدرودینامیکی نمایش داده شده است. از طرفی به گواه لاگ‌های ژئوفیزیکی و بررسی ریزرخساره‌ها به سمت واحدهای جوان‌تر مواد تخریبی از جمله کوارتز و شیل کاهش یافته است. کاهش این مواد تخریبی مستقیماً به



- environment. *Geoscience, Canada*, 11: 161–194.
- Javanbakht, M., Ghazi, S., Moussavi-Harami, R., Mahboubi, A (2013) Depositional history and sequence stratigraphy of Tirgan formation (Barremian-Aptian) in central Kopet Dag, NE Iran. *Journal of Geological Society of India* 82, 701-711.
- Javanbakht, M., et al (2018) Carbonate diagenesis in the Barremian-Aptian Tirgan Formation (Kopet- Dag Basin, NE Iran): Petrographic, geochemical and reservoir quality constraints. *Journal of African Earth Sciences*.
- Rauch, H. W., & White, B. W (1970) Lithologic controls on the development of solution porosity in Carbonate aquifers. *Water Resources Research*, 6: 1175–1192.
- Sweeting, M. M., & Sweeting, G. S (1969) Some aspects of the Carboniferous limestone in relation to its landforms with particular reference to N.W. Yorkshire and County Clare. *Research Mediterranean*, 7: 201–208.
- آقاداتاشی ابهری، هاشمی، م، آقانیاتی، ع (۱۳۸۰) بررسی و مطالعه بیوفاسیس و لیتوفاسیس سازند تیرگان در بخش خاوری کپه‌داغ، بیستمین گردهمایی علوم‌زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ص ۳۷۶.
- شامیر، م (۱۳۹۴) لیتواستراتیگرافی و بیواستراتیگرافی سازند تیرگان در برش‌های چینه‌شناسی بیگان و باغچق (کپه‌داغ غربی) دانشگاه شهید بهشتی، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد.
- Flügel, E (2010) *Microfacies of carbonate rocks, analysis interpretation and application*, Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, Berlin, 976 p.
- Ford, D. C. & Williams, P. W (2007) *Karst hydrogeology and Geomorphology*. John Wiley & Sons Ltd., 562 P.
- Maire, R (1990) La haute Montagne calcaire. *Karstologia Mem*, 3: 731p.
- Milanović, P. T (2004) *Water resources engineering in karst*, CRC Press, Florida, USA. 312p.
- Tucker, M. E. and Wright, V. P (1990) *Carbonate Sedimentology*. Blackwell Science, Inc. 482p.
- Tucker, M. E. and Bathurst, R. G (1990) *Carbonate Diagenesis*. Int. Ass. Sediment. Reprint series, 1: 312 p.
- Tucker, M. E (2001) *Sedimentary Petrology*, Third edition, Blackwell's, Oxford, 260 p.
- Wilson, J. L (1975) *Carbonate facies in geologic history*: New York, Springer-Verlag, 471 p.
- Baoqing Wang, Ihsan S (2002) Al-Aasm Karst Controlled Diagenesis and Reservoir Development: Example from the Ordovician Main-Reservoir Carbonate Rocks on the Eastern Margin of the Ordos Basin, China, *AAPG Bulletin*, 86 (9): 16-39.
- Brigaud, B. Durllet, C. Deconinck, J. F. Vincent, B. Thierry, J. and A. Trouiller (2009) The origin and timing of multiphase cementation in carbonate: Impact of regional scale geodynamic events on the Middle Jurassic Limestones diagenesis (Paris Basin, France). *Sedimentary geology*, 222(3-4): 161-180.
- Carvalho, M. V. F., Ros, L. F. D., & Gomes, N. S (2006) Carbonate cementation patterns and diagenetic Reservoir facies in the Campos Basin Cretaceous turbidities, offshore eastern Brazil. *Marine and Petrol. Geol.*, 12 (7): 741-758.
- Choquette, P. W. and N. P. James (1987) Diagenesis in Limestones–The Deep Burial Environment. *Geoscience Canada*, 14: 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: 108-121.
- James, N. P. & Choquette, P. W (1984) Diagenesis in limestones-the meteoric diagenetic