

مدل دولومیتی شدن سازند سلطانیه در جنوب باختر زنجان

افشین زهدی^۱، فرهاد عاصمی^۲ و علی لکیروحانی^۲

استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
 دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران- ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
 استادیار، گروه مهندسی عمران- ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
 تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۶/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۹/۲۰

چکیده

در این پژوهش، به منظور تعیین مدل دولومیتی شدن سازند سلطانیه، از یک رخنمون مناسب در ۳۵ کیلومتری جنوب باختر شهر زنجان استفاده شده است. سازند سلطانیه در برش مورد مطالعه، ۹۸۵ متر ستبراً دارد که به‌طور همشیب و مشخص روی شیل‌ها و ماسه‌سنگ‌های سازند بایندر قرار گرفته است و در بالا نیز توسط شیل‌ها و ماسه‌سنگ‌های سرخ رنگ سازند باروت پوشیده شده است. توزیع و گسترش دولومیت‌های سازند سلطانیه، موازی با رده‌بندی و لایه‌های رسوبی و دارای گسترش جانبی قابل ملاحظه‌ای است. درون لایه‌های دولومیتی آثار جلبک‌های سبز-آبی (استروماتولیت‌ها) و همچنین گرهک و نوارهای چرت به فراوانی شناسایی شده است. بر پایه شواهد صحرایی، سنگ‌نگاری و ژئوشیمیایی (XRD و ICP-OES)، چهار نوع دولومیت، در سازند سلطانیه تشخیص داده شده است، که عبارتند از دولومیت‌های ریزبلور یا دولومیکریت، دولومیت‌های متوسط‌بلور متراکم و نیمه‌شکل‌دار، دولومیت‌های درشت‌بلور نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل و در پایان سیمان دولومیتی پرکننده حفرات سنگ. در این دولومیت‌ها، شواهدی از وجود بلورهای دولومیت زین‌اسبی یا سدل دیده نشده است. نتایج این پژوهش بیانگر تشکیل این دولومیت‌ها در یک محیط دیاژنزی دغنی کم‌رُفا تا به نسبت ژرف توسط سیال‌های دریایی با شوری متوسط (میانگین سدیم ۳۲۵ پی‌پی‌ام)، در اثر تراوش آب دریایی تبخیر شده به درون سکوی کربناته سازند سلطانیه در منطقه مورد مطالعه است. مقادیر پایین استرانسیم (میانگین ۴۷ پی‌پی‌ام) و به نسبت بالاتر آهن (میانگین ۳۰۸۸ پی‌پی‌ام) و منگنز (میانگین ۴۵۳ پی‌پی‌ام) در دولومیت‌های درشت‌بلورتر، احتمالاً بیانگر افزایش اندازه بلورهای دولومیت و تبلور دوباره بلورهای دولومیت در طی تدفین است. مقادیر ناچیز باریم (میانگین ۱۲ پی‌پی‌ام) و نبود دولومیت‌های زین‌اسبی درون توالی دولومیتی سازند سلطانیه نیز احتمالاً بیانگر دخالت نداشتن محلول‌ها و سیال‌های گرمایی در طی فرایند دولومیتی شدن کربنات‌های سازند سلطانیه در منطقه مورد مطالعه است.

کلیدواژه‌ها: دولومیتی شدن، مدل تراوش، تبلور دوباره، سازند سلطانیه، زنجان.

*نویسنده مسئول: افشین زهدی

E-mail: afshin.zohdi@znu.ac.ir

۱- پیش‌نوشتار

رسوبات منسوب به سازند سلطانیه به سن پرکامبرین پسین - کامبرین پیشین در حوضه رسوبی البرز و به‌ویژه در منطقه جنوب زنجان رخنمون‌های گسترده‌ای دارد. این سازند از دید سنگ‌شناسی بیشتر از دولومیت و شیل تشکیل شده و در بخش‌های شیلی دارای کانه‌زایی فسفات است. اقیانوس‌های فسفاته سازند سلطانیه گسترش جانبی قابل ملاحظه‌ای دارد و از دیرباز مورد توجه محققین بوده است (شریفی، ۱۳۸۴ و ۱۳۸۵؛ موسوی‌مطلق، ۱۳۸۵؛ چشمه‌سری و همکاران، ۱۳۹۱؛ زهدی و ممینی، ۱۳۹۵). سازند سلطانیه در برگرنده مرز پرکامبرین پسین - کامبرین پیشین است و از این نظر نیز در مناطق مختلف حوضه رسوبی البرز، مورد مطالعه دقیق فسیل‌شناسی و ژئوشیمیایی قرار گرفته است (حمدی، ۱۳۷۴؛ شبستری و آدابی، ۱۳۸۰؛ ثاب قدسی، ۱۳۸۵؛ ثاب قدسی و همکاران، ۱۳۸۵؛ شاهنده و همکاران، ۱۳۸۶؛ تشیعی و همکاران، ۱۳۹۱). روی بخش‌های کربناته و دولومیتی این سازند که به شدت تحت تأثیر فرایندهای دیاژنزی همچون سیلیسی شدن (گرهک‌ها و نوارهای چرت) و دولومیتی شدن قرار گرفته؛ مطالعات محدودتری انجام شده است (شبستری و آدابی، ۱۳۸۱؛ ثاب قدسی، ۱۳۸۵). بنابراین با توجه به اطلاعات و شناخت کم از بخش‌های دولومیتی و چگونگی تشکیل دولومیت‌های سازند سلطانیه، در این پژوهش به مطالعه دقیق دولومیت‌های سازند سلطانیه در منطقه زنجان پرداخته شده است. بررسی این دولومیت‌ها از دید صحرایی، سنگ‌نگاری و ژئوشیمی می‌تواند به درک درست منشأ و فرایند دولومیتی شدن در طی زمان پرکامبرین پسین - کامبرین پیشین کمک قابل توجهی کند. بنابراین در این پژوهش، یکی از رخنمون‌های مناسب سازند سلطانیه در ۳۵ کیلومتری جنوب باختر شهر زنجان، در نزدیکی روستای جشن‌سرا و به مختصات جغرافیایی "۴۵° ۱۳' ۴۸" خاوری و "۳۶° ۳۶' ۳۶" شمالی مورد مطالعه قرار گرفته است. همان‌گونه که پیش‌تر نیز اشاره شده است؛ هدف اصلی این نوشتار، تشخیص انواع دولومیت و ارائه مدل دولومیتی شدن سازند سلطانیه با

استفاده از داده‌های صحرایی، سنگ‌نگاری و ژئوشیمی (XRD و ICP-OES) و تفسیر سازوکار مناسب برای تشکیل دولومیت‌ها در این سازند است. شکل ۱، بهترین مسیر دسترسی به برش مورد مطالعه را نمایش می‌دهد.

۲- زمین‌شناسی و چینه‌شناسی منطقه مورد مطالعه

در منطقه مورد مطالعه، واحدهای زمین‌شناسی بیشتر متعلق به پرکامبرین پسین - کامبرین پیشین و از قدیم به جدید شامل شیل‌های اسلیتی رسی میکادار سازند کهر، شیل‌ها و ماسه‌سنگ‌های سرخ رنگ سازند بایندر، دولومیت‌ها و شیل‌های سبز رنگ سازند سلطانیه، شیل‌ها و ماسه‌سنگ‌های سازند باروت، ماسه‌سنگ‌های سرخ رنگ سازند لالون، واحد کوآرتزی سفیدرنگ (کوآرتزیت بالایی)، سنگ‌های آهکی سازند میلا و در پایان ماسه‌سنگ‌های سازند درورد است. به دلیل فعالیت زیاد فرایندهای زمین‌ساختی در منطقه مورد مطالعه، همراه با این سازندها، رخنمون‌هایی از ته‌نشست‌های جوان‌تر مانند سازندهای کرج و فجن نیز به میزان کمتر در منطقه برونزد دارد (شکل ۲).

سازند سلطانیه به سن پرکامبرین پسین - کامبرین پیشین در حوضه رسوبی البرز (به ویژه در بخش‌های باختری و مرکزی آن) در حدود ۵۰۰ کیلومتر گسترش یافته است و از دیرباز به دلیل در برگرفتن مرز پرکامبرین پسین - کامبرین پیشین مورد توجه پژوهشگران ایرانی (برای نمونه ثاب قدسی، ۱۳۸۵) و بین‌المللی (Kimura et al., 1997) بوده است. Stöcklin et al. (1964) ابتدا سازند سلطانیه را در برش الگو در جنوب خاور زنجان به سه بخش دولومیت زیرین، شیل چقلو و دولومیت بالایی تقسیم کردند؛ سپس Hamdi (1989) ناحیه دلیر با ایجاد تقسیماتی جدید، سازند سلطانیه را به پنج بخش یعنی دولومیت زیرین، شیل زیرین (شیل چقلو)، دولومیت میانی، شیل بالایی و بالاخره دولومیت بالایی تقسیم کرد.

۴- مطالعات صحرایی

در منطقه مورد مطالعه افق‌های دولومیتی سازند سلطانیه به رنگ خاکستری روشن تا تیره به لایه‌بندی متوسط، ستر و حتی توده‌ای مشخص می‌شوند. در این افق‌ها به فراوانی مواد ارگانیک مربوط به جلبک‌های سبز-آبی (استروماتولیت‌ها) قابل تشخیص و شناسایی است. چرت نیز به دو صورت گرهکی و نواری درون افق‌های دولومیتی به میزان قابل ملاحظه‌ای دیده می‌شود (شکل ۴- c). در میان لایه‌های دولومیت اثری از رسوبات تبخیری (ژیپس و انیدریت) دیده نمی‌شود. توزیع دولومیت‌های سازند سلطانیه موازی با لایه‌بندی و لایه‌های رسوبی است؛ به گونه‌ای که دولومیتی شدن در سوی جانبی و در امتداد لایه‌های رسوبی به صورت همگن کل لایه رسوبی را تحت تأثیر قرار داده است (شکل ۴- b). این دولومیت‌ها در طول گسل خوردگی‌ها و خطوط گسلی گسترش ندارند. درون دولومیت‌ها و در طی مطالعات صحرایی هیچ گونه حفره انحلالی (تخلخل) و سطوح کارستی شناسایی نشده است.

۵- مطالعات سنگ‌نگاری

دولومیت در اشکال و انواع مختلف یکی از مهم‌ترین کانی‌های تشکیل‌دهنده سازند سلطانیه در منطقه مورد مطالعه به شمار می‌رود. دولومیت‌های سازند سلطانیه بر پایه فابریک، اندازه بلورها، توزیع اندازه بلورها (یونی مدال و پلی مدال) و شکل مرز بلورها به چهار گروه مختلف به شرح زیر تقسیم شده‌اند (شکل ۵):

دولومیت‌های نوع ۱ (دولومیت‌های ریزبلور): دولومیت‌های نوع اول سازند سلطانیه از بلورهای خیلی ریز تا ریز بی‌شکل با مرزهای میان‌بلوری غیر مسطح (Non-planer) تشکیل شده‌اند (شکل‌های ۵- a و b؛ جدول ۱). اندازه بلورهای دولومیت در این گروه کوچک‌تر از ۲۰ میکرون (میانگین ۱۲ میکرون) و توزیع اندازه بلور در آنها یکنواخت است. حدود ۲۵ درصد از دولومیت‌های سازند سلطانیه را دولومیت‌های ریزبلور تشکیل می‌دهد. این گروه از دولومیت‌ها، معمولاً متراکم هستند و به رنگ خاکستری تیره دیده می‌شوند. این نوع از دولومیت‌ها تخلخل ناچیز (میانگین ۳ درصد) دارند و در مواردی بلورهای ریز کوارتز و کلسیت به‌طور پراکنده و با فراوانی کمتر از ۵ درصد در آنها دیده می‌شود. این گروه از دولومیت‌ها را با توجه به اندازه ریز بلورهایشان می‌توان دولومیکرایت نیز نام‌گذاری کرد. این نوع بافت معادل بافت غیر صفحه‌ای (Mazzullo, 1992) و زئوتاپیک (Xenotopic) (Gregg and Sibley, 1984) است. این گروه از دولومیت‌ها جانشین سنگ‌آهک پیشین سازند سلطانیه شده‌اند و در آنها آثاری از بافت اولیه سنگ‌آهک مانند استروماتولیت‌ها، پلوییدها و خرده‌های فسیلی دیده و تشخیص داده می‌شود. دولومیت‌های ریزبلور بیشتر در بخش‌های میانی سازند سلطانیه و درون لایه‌های دولومیتی و سنگ‌آهک‌های دولومیتی دارای استروماتولیت دیده شده‌اند.

دولومیت‌های نوع ۲ (دولومیت متوسط بلور): دولومیت‌های نوع دوم بیشتر از بلورهای متراکم و نیمه‌شکل‌دار با مرزهای میان‌بلوری صفحه‌ای-s تشکیل شده است (شکل‌های ۵- c و d؛ جدول ۱). اندازه بلورها در دولومیت‌های نوع ۲ سازند سلطانیه، میان ۲۰ تا ۱۰۰ میکرون (میانگین ۵۴ میکرون) متغیر است. این نوع دولومیت را می‌توان تحت عنوان دولومیکرواسپاریت نیز نام‌گذاری کرد. این نوع بافت معادل هایپیدئوتاپیک (Hypidiotopic) (Gregg and Sibley, 1984) و صفحه‌ای-s (Mazzullo, 1992) است. این گروه از دولومیت‌ها بیشتر از تبلور دوباره دولومیکرایت‌ها و دولومیت‌های نوع ۱ سازند سلطانیه به وجود آمده‌اند. فرایند تبلور دوباره ممکن است به‌صورت ناقص یا کامل صورت بگیرد. بر پایه نظریه Sibley and Gregg (1987) فابریک مسطح-s که در دولومیت‌های این گروه بیشتر دیده می‌شود؛ می‌تواند در نتیجه رشد آهسته بلورها تحت جریان پیوسته‌ای از سیال‌های دولومیت‌ساز در دماهای پایین تشکیل شود. بنابراین این گروه از دولومیت‌ها بیانگر تبلور دوباره دولومیت‌های تشکیل شده اولیه (دولومیت‌های ریزبلور) در زیر دمای بحرانی هستند. این نوع دولومیت حدود ۲۵

Hamdi (1989) ضمن معرفی پنج زیست‌زون در سازند سلطانیه، بر پایه اثر فسیل *Trichophycus pedum* مرز پر کامبرین- کامبرین را در بالاترین افق از بخش شیل زیرین و پیش از بخش دولومیت میانی مشخص کرده است.

در منطقه مورد مطالعه نیز، سازند سلطانیه به‌طور مشخص و ناگهانی روی شیل‌ها و ماسه‌سنگ‌های سرخ رنگ سازند بایندور قرار گرفته است و در بالا نیز به‌صورت تدریجی به شیل‌ها و ماسه‌سنگ‌های سازند باروت می‌رسد. سازند سلطانیه در برش مورد مطالعه ۹۸۵ متر ستبرای دارد؛ که از دید ترکیب سنگی بیشتر از لایه‌های متوسط تا ستر دولومیت به رنگ خاکستری روشن تا تیره و لایه‌های نازک شیل سبز رنگ تشکیل شده است (شکل‌های ۳ و ۴). افزون بر دولومیت و شیل در این سازند، می‌توان به‌صورت میان‌لایه‌ای، لایه‌هایی از سنگ‌آهک دولومیتی و حتی سنگ‌آهک، ماسه‌سنگ دانه‌متوسط و شیل آهکی شناسایی کرد (شکل‌های ۳ و ۴). بر این اساس، سازند سلطانیه در برش مورد مطالعه به ۷ بخش مختلف قابل تقسیم است (شکل ۳ و ۴- a). این بخش‌ها از پایین به بالا عبارتند از: ۱) بخش دولومیتی با ستبرای در حدود ۷۰ متر که به‌صورت ناگهانی روی شیل‌ها و ماسه‌سنگ‌های سرخ رنگ سازند بایندور قرار گرفته و غنی از نوارهای چرتی است؛ ۲) شیل‌های نازک‌لایه سبز رنگ همراه با میان‌لایه‌های سنگ‌آهک دولومیتی با ستبرای در حدود ۱۳۰ متر؛ ۳) بخش دولومیتی با ستبرای در حدود ۱۵۰ متر که از دولومیت‌های متراکم خاکستری رنگ همراه با نوارهای چرتی به میزان فراوان تشکیل شده است (شکل‌های ۴- b و c)؛ ۴) شیل‌های نازک‌لایه سبز رنگ با ستبرای در حدود ۱۲۰ متر که به‌صورت میان‌لایه‌ای دارای ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک است. این بخش به میزان قابل ملاحظه‌ای نیز کانه‌زایی فسفات دارد؛ ۵) دولومیت‌های توده‌ای تا سنگ‌آهک دولومیتی ستبرالایه با ستبرای در حدود ۱۴۵ متر که از لایه‌های غنی از جلبک سبز-آبی (استروماتولیت) تشکیل شده است؛ ۶) شیل آهکی سبز رنگ با لایه‌بندی نازک (۵۰ متر)؛ ۷) دولومیت‌های ستبرالایه با ستبرای در حدود ۳۲۰ متر که غنی از نوارهای چرتی و جلبک سبز-آبی (استروماتولیت) هستند (شکل ۴- f). لازم به توضیح است که در منطقه مورد مطالعه نیز، همانند همه مطالعات پیشین که در بخش مقدمه به شماری از آنها اشاره شد؛ به احتمال زیاد مرز پر کامبرین-پسین- کامبرین پیشین روی آخرین لایه‌های شیل سبز رنگ زیرین و پیش از افق دولومیتی قرار گرفته است، که البته تأیید آن نیاز به بررسی‌ها و مطالعات دقیق بیواستراتیگرافی و انجام مطالعات ایزوتوپی (مانند ایزوتوپ کربن) دارد. در این مطالعه از دولومیت‌های متعلق به بخش‌های میانی و بالایی سازند سلطانیه استفاده شده است که به احتمال زیاد متعلق به زمان کامبرین پیشین هستند.

۳- روش مطالعه

در این پژوهش برای دستیابی به اهداف مورد نظر، روش‌های مختلف گردآوری از اطلاعات صحرایی و آزمایشگاهی استفاده شد و در پایان این اطلاعات با یکدیگر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. پس از مطالعه نقشه‌های زمین‌شناسی قابل دسترس (نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ زنجان، حاجیان و زاهدی، ۱۳۸۳)، منطقه مورد مطالعه مورد پیمایش قرار گرفت و بهترین رخنمون برای نمونه‌برداری انتخاب شد. در طی عملیات صحرایی به لایه‌بندی‌ها و مرز میان بخش‌های مختلف سازند سلطانیه توجه شد. در این پژوهش، ۵۷ نمونه دستی از واحدهای سنگی مربوط به کامبرین زیرین برداشت و از همه نمونه‌های دستی برداشت شده مقطع نازک تهیه شد. همه مقاطع نازک به منظور تشخیص کانی کلسیت از دولومیت توسط محلول آلزاین سرخ (Red-S) به روش Dickson (1965) رنگ‌آمیزی شد. در بررسی‌های سنگ‌نگاری، از روش Sibley and Gregg (1987)، Gregg and Sibley (1984) و Mazzullo (1992) برای تعیین رده‌بندی دولومیت‌ها استفاده شد. پس از انجام مطالعات سنگ‌نگاری، برای تعیین مقادیر عناصر اصلی و فرعی ۱۰ نمونه به روش (ICP-OES) و همچنین برای تعیین کانی‌های اصلی و فرعی تشکیل‌دهنده بخش‌های دولومیتی شده سازند سلطانیه و ۴ نمونه به روش پراش پرتو ایکس (XRD) در شرکت مطالعات معدنی زرآرما تجزیه شد.

سلطانیه نسبت به مقدار آن در دولومیت‌های عهد حاضر، که به میزان ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ پی‌پی‌ام گزارش شده (Behrens and Land, 1972; Last et al., 2012) کمتر است.

– **سدیم (Na):** سدیم فراوان‌ترین کاتیون موجود در آب دریاست و تمرکز آن در دولومیت‌ها، درجه شوری سیال دولومیت‌ساز را تعیین خواهد کرد (Warren, 2000; Suzuki et al., 2006). مقدار سدیم در دولومیت‌های عهد حاضر از ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ پی‌پی‌ام متغیر است (Land and Hoops, 1973; Rivers et al., 2012). در دولومیت‌های سازند سلطانیه میزان سدیم میان ۲۴۵ تا ۳۶۸ پی‌پی‌ام (میانگین ۳۲۵/۸ پی‌پی‌ام) در نوسان است (جدول ۳). میزان سدیم در هر یک از انواع دولومیت‌های نوع ۱ تا ۳ سازند سلطانیه نیز به‌طور میانگین و به ترتیب ۲۹۶/۷، ۳۴۰ و ۳۳۶ پی‌پی‌ام است.

– **منگنز و آهن (Fe و Mn):** منگنز و آهن بر خلاف سدیم و استرانسیم در طی دیاژنز به سنگ افزوده می‌شوند و رابطه نزدیکی با هم دارند (Burns and Baker, 1987; Tucker and Wright, 1990). آب‌های جوی در طی فرایند دیاژنز و دولومیتی شدن سبب غنی شدن بلور دولومیت از منگنز می‌شوند؛ به‌طوری که دولومیت‌هایی که توسط سیال‌های جوی تشکیل می‌شوند، تا میزان ۳۴۰۰۰ پی‌پی‌ام منگنز در شبکه بلوری خود جای می‌دهند (Driese and Mora, 1993; Jiang et al., 2013). دامنه تغییرات منگنز در دولومیت‌های سازند سلطانیه میان ۱۹۷ تا ۱۴۳۵ پی‌پی‌ام (میانگین ۴۵۳/۷ پی‌پی‌ام) متغیر است (جدول ۳). میزان منگنز در هر یک از انواع دولومیت‌های نوع ۱ تا ۳ سازند سلطانیه، به‌طور میانگین و به ترتیب ۲۵۴/۷، ۶۵۴/۲۵ و ۴۴۵/۳ پی‌پی‌ام است. میزان آهن دولومیت‌های سازند سلطانیه نیز از ۱۶۹۵ تا ۶۶۱۴ پی‌پی‌ام (میانگین ۳۰۸۸ پی‌پی‌ام) متغیر است. این میزان در هر یک از انواع دولومیت‌های نوع ۱ تا ۳ سازند سلطانیه، به‌طور میانگین و به ترتیب ۲۷۹۳/۳، ۳۹۵۷/۷۵ و ۲۷۹۳ پی‌پی‌ام است. مقادیر منگنز و آهن در دولومیت‌های سازند سلطانیه نسبت به مقادیر آن در دولومیت‌های عهد حاضر بیشتر است؛ که به ترتیب به میزان ۳ تا ۵۰ پی‌پی‌ام و ۱ پی‌پی‌ام گزارش شده است (Veizer, 1983). این مقادیر احتمالاً بیانگر تأثیر فرایندهای دیاژنزی در هنگام تدفین و همچنین شرایط نیمه‌احیایی تا احیایی در هنگام تشکیل دولومیت‌های سازند سلطانیه است.

– **باریم (Ba):** تمرکز باریم در دولومیت‌های دریایی عادی معمولاً پایین است و در دولومیت‌های که تحت تأثیر سیال‌های گرمایی تشکیل شده‌اند؛ مقادیر بالاتری را نمایش می‌دهد (Zhu et al., 2015). در دولومیت‌های مورد مطالعه از سازند سلطانیه نیز مقدار باریم میان ۶ تا ۱۸ و میانگین ۱۲/۱ پی‌پی‌ام متغیر است (جدول ۳). میزان باریم در هر یک از انواع دولومیت‌های نوع ۱ تا ۳ سازند سلطانیه نیز به‌طور میانگین و به ترتیب ۱۰/۷، ۱۳/۷۵ و ۱۱/۳ پی‌پی‌ام است.

۸- مدل دولومیتی شدن

کربنات‌ها و شیل‌های پرکامبرین پسین تا کامبرین پیشین سازند سلطانیه در جنوب منطقه زنجان در یک محیط دریایی کم‌ژرفا (از پهنه‌های کشتندی تا بخش‌های ابتدایی دریای باز) رسوب‌گذاری کرده است (ثیاب قدسی، ۱۳۸۵). این محیط رسوبی بخش کوچکی از دریای اپیریک و گسترده زمان‌های پرکامبرین پسین-کامبرین پیشین است؛ که نواحی گسترده‌ای از حوضه رسوبی البرز و دیگر بخش‌های ایران را در بر گرفته بود (آقاناتی، ۱۳۸۳). بخش‌های دولومیتی شده سازند سلطانیه بیشتر از لایه‌های تیره و روشن استروماتولیت‌ها تشکیل شده است، به‌گونه‌ای که در برخی از افق‌های دولومیتی شده، این موجودات تشکیل ریف‌های استروماتولیتی (بایندستون استروماتولیتی) قابل مشخصی را داده‌اند (شکل‌های ۴-د). مواد ارگانیکی حفظ شده (مانند استروماتولیت‌ها) در بخش‌های دولومیتی ممکن است که سبب ایجاد یک سطح بستر پایدار و همچنین شرایط ژئوشیمیایی مناسب برای شروع فرایند دولومیتی شدن در نظر گرفته شود. نقش مواد ارگانیکی (لایه‌های استروماتولیتی) در تشکیل بلورهای دانه‌ریز دولومیت در بسیاری از نهشته‌های کامبرین آغازین توسط پژوهشگران مختلفی (Sanchez-Roman et al., 2008; You et al., 2013 and 2014) در نظر گرفته شده است.

درصد کل دولومیت‌های سازند سلطانیه را در منطقه مورد مطالعه تشکیل می‌دهد و بیشتر همراه با گرهک‌ها و نوارهای چرت در سازند سلطانیه دیده می‌شود.

– **دولومیت‌های نوع ۳ (دولومیت درشت‌بلور):** دولومیت‌های نوع سوم دارای بلورهای میان ۱۰۰ تا ۵۰۰ میکرون (میانگین ۱۱۰ میکرون) هستند. این دولومیت‌ها را با توجه به اندازه آنها دولواسپارایت نیز می‌توان نامید. در سازند سلطانیه، این نوع دولومیت از موزاییک‌های درشت‌بلور متراکم (میانگین تخلخل ۲ درصد)، نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل و دارای توزیع اندازه غیریکنواخت تشکیل شده است. این دولومیت‌ها بیشتر از تبلور دوباره دولومیت‌های متوسط‌بلور تشکیل شده‌اند و همراه آنها دولومیت‌های نسل اول و دوم نیز دیده می‌شوند. بافت این نوع دولومیت، معادل با بافت هایپیدئوتاپیک (Hypidiotopic) تا زئوتاپیک (Xenotopic) (Gregg and Sibley, 1984) و صفحه‌ای s- تا غیرصفحه‌ای (Mazzullo, 1992) است (شکل‌های ۵-e و f؛ جدول ۱). دولومیت نوع سوم از فراوان‌ترین انواع دولومیت شناسایی شده در سازند سلطانیه است و حدود ۴۵ درصد کل دولومیت‌ها را تشکیل می‌دهد.

– **دولومیت‌های نوع ۴ (سیمان دولومیتی پرکننده حفرات):** این گروه از دولومیت‌ها در نمونه‌های دستی نسبت به دولومیت‌های دیگر روشن‌تر هستند؛ از بلورهای درشت و بیشتر بی‌شکل تا نیمه‌شکل‌دار با مرزهای غیر صفحه‌ای تشکیل شده و بیشتر به‌صورت سیمان فضاها و شکستگی‌های سنگ را پر کرده‌اند. اندازه بلورهای این سیمان دولومیتی میان ۱۰۰ تا ۲۰۰ میکرون متغیر است و بیشتر بستگی به اندازه فضاها موجود در سنگ دارد. این گروه حدود ۵ درصد دولومیت‌های سازند سلطانیه را تشکیل می‌دهد (شکل‌های ۵-g و h؛ جدول ۱).

۶- تجزیه پراش پرتو ایکس (XRD)

پس از انجام مطالعات سنگ‌نگاری، برای تجزیه فازهای تشکیل‌دهنده نمونه‌ها توسط دستگاه پراش پرتو ایکس (XRD)، از نمونه‌های دولومیتی سازند سلطانیه ۴ نمونه انتخاب شد. در شکل ۶ و جدول ۲ نتایج تجزیه XRD برای دولومیت‌های نوع ۱ تا ۳ آورده شده است؛ همان‌گونه که از نتایج مشخص است، در نمونه‌های دولومیتی، فراوان‌ترین کانی موجود دولومیت است و کانی‌های کلسیت و کوارتز به عنوان فازهای فرعی و جزئی در سنگ‌های مورد مطالعه وجود دارند. نتایج این تجزیه، با نتایج مطالعات صحرایی، سنگ‌نگاری و ژئوشیمی همخوانی دارد.

۷- تجزیه عنصری

ترکیب داده‌های ژئوشیمیایی با اطلاعات سنگ‌نگاری می‌تواند درک بهتری از منشأ، زمان تشکیل، ترکیب سیال دولومیت‌ساز، مدل دولومیتی شدن و روند دیاژنز فراهم کند (Azmy et al., 2001; Swart et al., 2005; Navarro-Ciurana et al., 2016). داده‌های حاصل از آزمایش‌های ژئوشیمیایی ICP-OES نمونه‌های دولومیت در برش مورد مطالعه در جدول ۳ ارائه شده است. تجزیه‌های ژئوشیمیایی روی دولومیت‌های نوع اول تا سوم (جایگزین ماتریکس) انجام شده ولی روی سیمان دولومیتی پرکننده حفرات صورت نگرفته است.

– **استرانسیم (Sr):** از میان عناصر فرعی موجود در دولومیت‌ها استرانسیم اهمیت بیشتری دارد و برای تعیین نوع سیال دولومیت‌ساز به کار برده می‌شود. بلورهای دولومیتی که توسط آب دریا و مراحل اولیه دیاژنز تشکیل می‌شوند، در مقایسه با دولومیت‌های تدفینی مقادیر بیشتر استرانسیم در شبکه بلوری خود دارند (Veizer, 1983; Land, 1985; Warren, 2000). پیشرفت و گسترش فرایند دولومیتی شدن به‌طور کلی سبب کاهش میزان عنصر استرانسیم در شبکه بلورها می‌شود (Hou et al., 2016). میزان استرانسیم در دولومیت‌های مورد مطالعه به‌طور کلی میان ۳۲ تا ۷۷ پی‌پی‌ام (میانگین ۴۷/۵ پی‌پی‌ام) تغییر می‌کند (جدول ۳). میزان استرانسیم در هر یک از انواع دولومیت‌های نوع ۱ تا ۳ سازند سلطانیه، به‌طور میانگین و به ترتیب ۵۰/۳ و ۴۷/۵ و ۴۴ پی‌پی‌ام است. مقدار استرانسیم در دولومیت‌های سازند

احیایی است. Li et al. (2016) همچنین روندی را دولومیت‌های کامبرین پیشین حوضه تاریم در شمال باختر چین گزارش کرده‌اند. میزان سدیم نیز در دولومیت‌های سازند سلطانیه به‌طور میانگین در حدود ۳۲۵ پی‌پی‌ام است؛ که این مقدار تا حدی بالاتر از مقادیری است که در دولومیت‌های دریایی (به‌طور میانگین در حدود ۱۶۰ پی‌پی‌ام) گزارش شده است (Veizer, 1983). مقادیر بالاتر سدیم در دولومیت‌های سازند سلطانیه (به‌طور میانگین ۳۲۵ پی‌پی‌ام) می‌تواند به دلیل تحت تأثیر قرار گرفتن کربنات‌های سازند سلطانیه توسط آب دریایی به نسبت شور و یا سیال‌های شور حوضه‌ای در طی دیاژنز و تبلور دوباره بلورهای دولومیت در نظر گرفته شود.

در دولومیت‌های سازند سلطانیه رسم مقادیر عناصر فرعی در برابر یکدیگر به روشنی نشان می‌دهد که میان این عناصر رابطه به نسبت خطی دیده می‌شود (شکل ۷) و از سوی دیگر مقادیر عناصر فرعی در دولومیت‌های نوع سوم (درشت‌بلور) در مقایسه با دولومیت‌های ریزبلور تغییرات ناچیزی را نمایش می‌دهد. روند به نسبت خطی میان عناصر فرعی و به‌ویژه میان عناصر آهن و منگنز در دولومیت‌های سازند سلطانیه (شکل ۷) می‌تواند به دلیل قرار گرفتن این دولومیت‌ها تحت شرایط دین به نسبت ژرف باشد. از سوی دیگر، در انواع مختلف دولومیت‌های سازند سلطانیه تمرکز به نسبت بالای آهن (میانگین ۳۰۸۸ پی‌پی‌ام) و منگنز (میانگین ۴۵۳ پی‌پی‌ام) نشان‌دهنده شرایط نیمه‌احیایی تا احیایی در طی فرایند تشکیل دولومیت‌های سازند سلطانیه است. یکسان نبودن مقادیر آهن و دیگر عناصر فرعی در انواع مختلف دولومیت‌های شناسایی شده نیز به دلیل ترکیب به نسبت متفاوت سیال‌های تشکیل‌دهنده دولومیت‌هاست.

مطالعات صحرایی، سنگ‌نگاری و ژئوشیمیایی دولومیت‌های کامبرین پیشین سازند سلطانیه بیانگر تشکیل این دولومیت‌ها در یک محیط دریایی با شوری متوسط، در اثر تراوش آب دریایی تبخیر شده به درون رسوبات محیط‌های کم‌ژرفاست. در مدل تراوش (Reflux model)، بلورهای دولومیت به میزان گسترده جانشین ماتریکس میکربیتی و قطعات اسکلتی می‌شوند (Al-Helal et al., 2012; Vandeginste et al., 2013). همانند چنین فرایندی به فراوانی در دولومیت‌های مورد مطالعه از سازند سلطانیه دیده شده است.

اندازه ریز تا متوسط بلورهای دولومیت در سازند سلطانیه و گسترش جانبی قابل ملاحظه این دولومیت‌ها در بخش‌های بالایی سکوی کربناته سازند سلطانیه، بهترین دلیل برای ارائه مدل تراوش برای تشکیل دولومیت‌های سازند سلطانیه از آب دریایی تبخیر شده (Evaporated seawater)، تحت تأثیر مدل تراوش است (شکل ۸). لازم به توضیح است که این دولومیت‌ها به‌صورت لایه‌ای و با ستبراهای در حد چند متر (Meter-thick beds of stratabound dolomite) در طول توالی کربناته سازند سلطانیه دیده می‌شوند. به عبارت دیگر، گسترش انواع مختلف دولومیت‌های سازند سلطانیه، توسط چینه‌های رسوبی کنترل شده‌اند (Strata-controlled). نبود رسوبات تبخیری (لایه‌های ژیس و انیدریت) همراه با دولومیت‌های سازند سلطانیه، نشان می‌دهد که شوری آب دریا به حدی نرسیده است که سبب ته‌نشست لایه‌های تبخیری و ژیس شود. این شرایط با مدل ارائه شده (Simms, 1984) (72 to 199% Penesaline dolomitization) توسط Rott and Qing (2013) و Qing et al. (2001) هم‌خوانی قابل ملاحظه‌ای دارد. در این مدل، آب دریایی تبخیر شده که شوری آن به نسبت افزایش یافته است، به درون رسوبات کربناته زیرین نفوذ می‌کند و به دلیل غنی بودن از منیزیم سبب جانشینی دولومیت به جای سنگ‌آهک‌های اولیه می‌شود (شکل ۸). از سوی دیگر، سیستم آب‌شناختی و شرایط آب‌وهوایی زمان کامبرین پیشین در حوضه رسوبی البرز نیز تشکیل شدن این دولومیت‌ها در نتیجه مدل تراوش (Reflux model) و تبخیر آب دریا را تأیید می‌کند؛ زیرا در مناطق سربندان (خاور دماوند) و شه‌میرزاد (شمال سمنان) همراه با توالی‌های دولومیتی کامبرین پیشین، لایه‌های نازک و قالب‌های بلور تبخیری‌ها شناسایی شده است (شبستری، ۱۳۷۳). به سوی نواحی جنوبی‌تر حوضه رسوبی البرز، بخش‌های بالایی سازند سلطانیه (کامبرین پیشین) تغییر رخساره می‌دهند و به رخساره‌های ساحلی تر (تبخیری‌ها و دولومیت‌های سازند دزو) تبدیل

دولومیت‌های سازند سلطانیه توسط بافت‌های رسوبی کنترل می‌شوند؛ همان‌گونه که دارای توزیع تقریباً موازی با چینه‌بندی و لایه‌های رسوبی هستند (Stratigraphic dolomite). به عبارت دیگر، توزیع و گسترش دولومیت‌های سازند سلطانیه، توسط چینه‌های رسوبی کنترل شده‌اند (Strata-controlled) ولی توسط گسل‌خوردگی (Fault-controlled) و فرایندهای زمین‌ساختی کنترل نمی‌شوند. به‌طور خاص، هیچ یک از انواع دولومیت‌های سازند سلطانیه در امتداد شکستگی‌ها و خطوط گسل (Fractures and fault conduits) گسترش ندارند. به نظر می‌رسد که دولومیت‌های سازند سلطانیه در مراحل اولیه دیاژنز و پیش از فشردگی شیمیایی و تشکیل استیلولیت‌ها تشکیل شده‌اند. جانشینی سنگ‌آهک‌های سازند سلطانیه توسط بلورهای دولومیت در دماهای کم تا متوسط، زیر دمای بحرانی (Critical roughening temperature) صورت گرفته است؛ که این فرایند سبب تشکیل بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار دولومیت در مرحله اول در زمینه و ماتریکس سنگ، و در مرحله بعدی در ذرات و آلوکم‌های تشکیل‌دهنده سنگ‌آهک اولیه است.

بر پایه مطالعات صحرایی و سنگ‌نگاری، دولومیت‌های کامبرین پیشین سازند سلطانیه بیشتر از بلورهای ریز تا به نسبت درشت تشکیل شده‌اند و در این دولومیت‌ها شواهدی از وجود بلورهای دولومیت زین‌اسبی یا سدل دیده نشده است. در نتیجه فرایند دولومیتی شدن و تبلور دوباره بلورها، بافت اولیه سنگ کربناته اولیه در خیلی از موارد در طی فرایندهای دیاژنزی و تأثیر سیال‌های فراوان دیاژنزی از بین رفته است. میزان تخلخل اولیه و ثانویه (میان‌بلوری) در میان بلورهای دولومیت سازند سلطانیه بسیار پایین و ناچیز است (به‌طور میانگین کمتر از ۴ درصد)، که این میزان تخلخل پایین و نبود عوارض کارستی احتمالاً به دلیل تحت تأثیر قرار نگرفتن کربنات‌های سازند سلطانیه توسط سیال‌های جوی و گرمایی در طی فرایندهای دیاژنز است. از سوی دیگر مقادیر باریم (Ba) در دولومیت‌های مطالعه شده از سازند سلطانیه به‌طور میانگین در حدود ۱۲/۱ پی‌پی‌ام است. این مقدار پایین باریم، بیانگر نقش نداشتن سیال‌های گرمایی در طی فرایند دولومیتی شدن کربنات‌های مورد مطالعه است. تمرکز باریم در دولومیت‌های دریایی معمولاً پایین است؛ زیرا اندازه شعاع یونی عنصر باریم زیاد است و نمی‌تواند به درون شبکه بلورهای دولومیت وارد شود. ولی بلورهای دولومیتی که تحت شرایط و سیال‌های گرمایی تشکیل می‌شوند؛ ممکن است که محتوای باریم بالایی را نمایش دهند، زیرا سیال‌های گرمایی در برگرفته مقادیر قابل ملاحظه‌ای باریم هستند و در دماهای بالا این عنصر راحت‌تر وارد شبکه کانی دولومیت می‌شود (Cai et al., 2008; Zhu et al., 2015). از سوی دیگر نبود کانی‌های سولفیدی همانند پیریت همراه با دولومیت‌های درشت‌بلور می‌تواند دلیلی بر دخالت نداشتن محلول‌ها و سیالات گرمایی در طی فرایند دولومیتی شدن کربنات‌های سازند سلطانیه در نظر گرفته شود.

تمرکز استرانسیم به‌طور میانگین در دولومیت‌هایی که در محیط‌های تبخیری و یا مستقیماً از آب دریا تشکیل می‌شوند؛ به ترتیب ۶۰۰ و ۴۰۰ پی‌پی‌ام است (Veizer, 1983; Land, 1991; Geske et al., 2012). مقادیر پایین استرانسیم در دولومیت‌های سازند سلطانیه می‌تواند به دلیل تأثیر فرایند تبلور دوباره بلورهای دولومیت در طی تدفین باشد که سبب کاهش مقادیر استرانسیم در این دولومیت‌ها شده است. همانند چنین روند کاهش در دولومیت‌های تشکیل شده در نهشته‌های کرتاسه منطقه پونتیداس، ترکیب نیز گزارش شده است (Kirmaci and Akdag, 2005). این تفسیر با نتایج سنگ‌نگاری نیز هماهنگ است؛ از آنجا که که فابریک سنگ‌آهک اولیه در بیشتر اوقات حفظ نشده و در طی فرایند دولومیتی شدن به‌طور کامل از میان رفته است. مقادیر آهن و منگنز در دولومیت‌هایی که از آب دریا مستقیماً تشکیل می‌شوند به‌طور میانگین و به ترتیب در حدود ۳ تا ۵۰ پی‌پی‌ام و ۱ پی‌پی‌ام در نوسان است (Veizer, 1983). مقادیر به نسبت بالاتر آهن و منگنز در دولومیت‌های سازند سلطانیه در مقایسه با دولومیت‌های دریایی بیانگر تحت تأثیر قرار گرفتن دولومیت‌ها توسط سیال‌های غنی از منگنز تحت شرایط

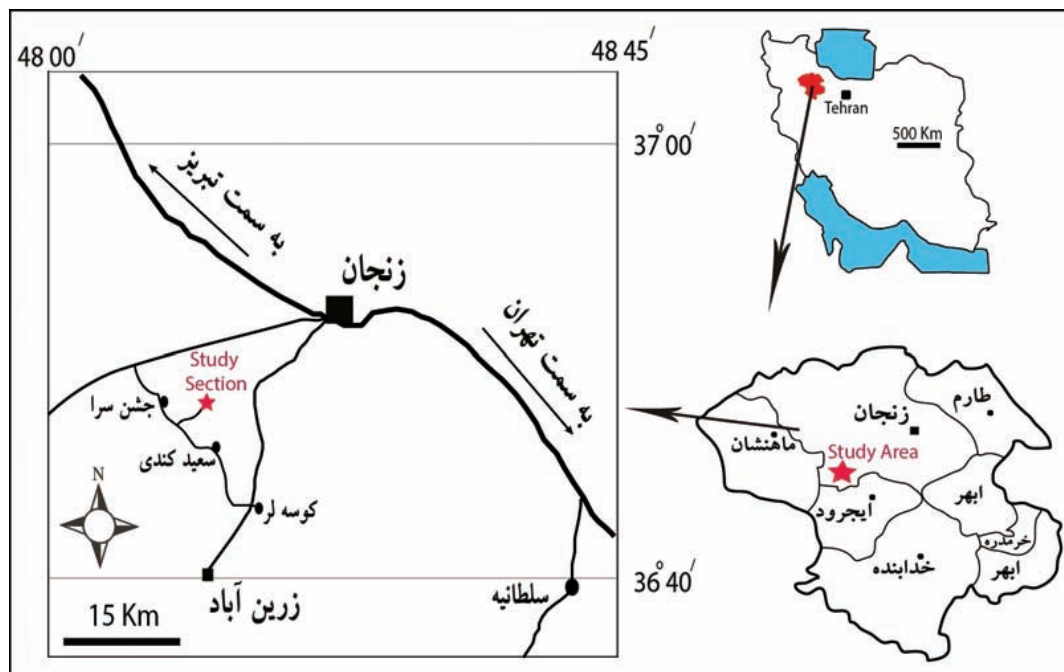
است. لایه‌های دولومیتی سازند سلطانیه از استروماتولیت، گرهک‌ها و نوارهای چرتی بسیاری تشکیل شده است. لایه‌های شیلی این سازند نیز غنی از کانی‌سازی فسفات به میزان قابل توجهی است. در طی مطالعات صحرایی، در میان لایه‌های دولومیت اثری از رسوبات تبخیری دیده نشده است. بر پایه درجه دولومیتی شدن سنگ‌آهک اولیه، اندازه، شکل بلورهای دولومیت (از حالت بی‌شکل تا لوزی‌های خودشکل) و در پایان ویژگی‌ها و بافت آلوم‌ها، چهار نوع دولومیت در سازند سلطانیه متمایز و شناسایی شده است. این دولومیت‌ها دیاژنزی هستند و دولومیت‌های همزمان با رسوب‌گذاری و در شرایط نزدیک سطح زمین در محیط‌های کشتندی شناسایی و دیده نشده است. نمونه‌های دولومیتی سازند سلطانیه، در مقایسه با نمونه‌های دولومیتی دریایی معادل خود، کاهش در مقدار استرانسیم و افزایش در مقادیر سدیم، آهن و منگنز نشان می‌دهند؛ که نشان‌دهنده تأثیر فرایند تبلور دوباره بلورهای دولومیت در طی تدفین بر دولومیت‌های ریزبلور است. در تشکیل دولومیت‌های سازند سلطانیه آب‌های دریایی تبخیر شده (Evaporated seawater) نقش عمده‌ای داشته‌اند. با افزایش ژرفای تدفین، اندازه بلورهای دولومیت افزایش یافته است و دولومیت‌های درشت‌بلور (نوع دوم و سوم) با مرزهای بلوری نامنظم (Nonplanar crystal boundaries) از آب دریا تشکیل شده‌اند که در طی تدفین دستخوش تغییراتی شده و میزان شوری آن افزایش یافته است (شورابه حوضه‌ای). مقادیر پایین باریم (میانگین ۱۲ پی‌پی‌ام)، نیز مؤید نقش سیال‌های دریایی در طی فرایند دولومیتی شدن سازند سلطانیه در زمان تدفین است.

می‌شوند (آقاباتی، ۱۳۸۳)؛ به‌گونه‌ای که بخش‌های دریای باز سکوی اپریک کامبرین پیشین به سوی شمال و در حوضه رسوبی البرز و منطقه مورد مطالعه قرار داشته است که محل مناسبی را برای دولومیتی شدن رسوبات کربناته سازند سلطانیه توسط آب دریا فراهم آورده است.

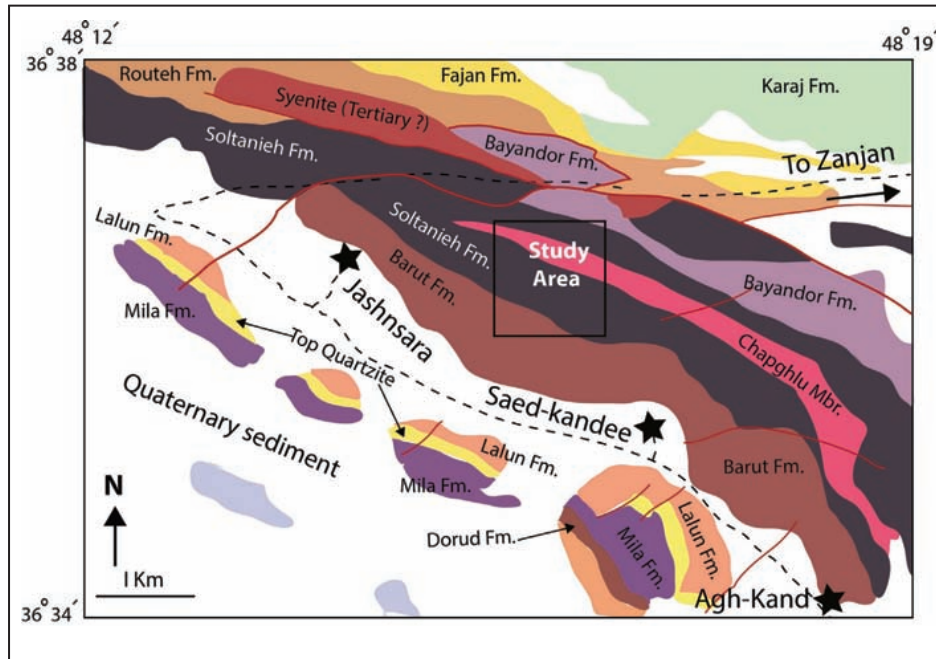
دامنه تغییرات ایزوتوپ‌های اکسیژن ($10/79$ - تا $5/12$ - پرمیل) و کربن ($9/05$ - تا $2/77$ پرمیل) دولومیت‌های سازند سلطانیه در برش نمونه در جنوب خاور زنجان (روستای چپقلو) که توسط ثیاب قدسی (۱۳۸۵) بررسی شده که بسیار همانند دولومیت‌های دریایی زمان کامبرین پیشین است و این تشابه ایزوتوپی نیز می‌تواند به عنوان تأییدی بر منشأ سیال‌های دولومیت‌ساز از آب دریا در نظر گرفته شود. دولومیت‌های درشت‌بلورتر (نوع سوم)، با توجه به شواهد سنگ‌شناختی و ژئوشیمیایی، حاصل تبلور دوباره دولومیت‌های نوع اول و دوم هستند. بررسی‌های سنگ‌نگاری و ژئوشیمیایی در این دولومیت‌ها نشان می‌دهد که با پیشرفت دولومیتی شدن و تبلور دوباره، اندازه بلورهای دولومیت درشت‌تر می‌شود (دولومیت‌های با اندازه‌های متفاوت و چند مدی) و مقادیر عناصر فرعی در این دولومیت‌ها در مقایسه با دولومیت‌های ریزبلور اولیه افزایش می‌یابد.

۹- نتیجه‌گیری

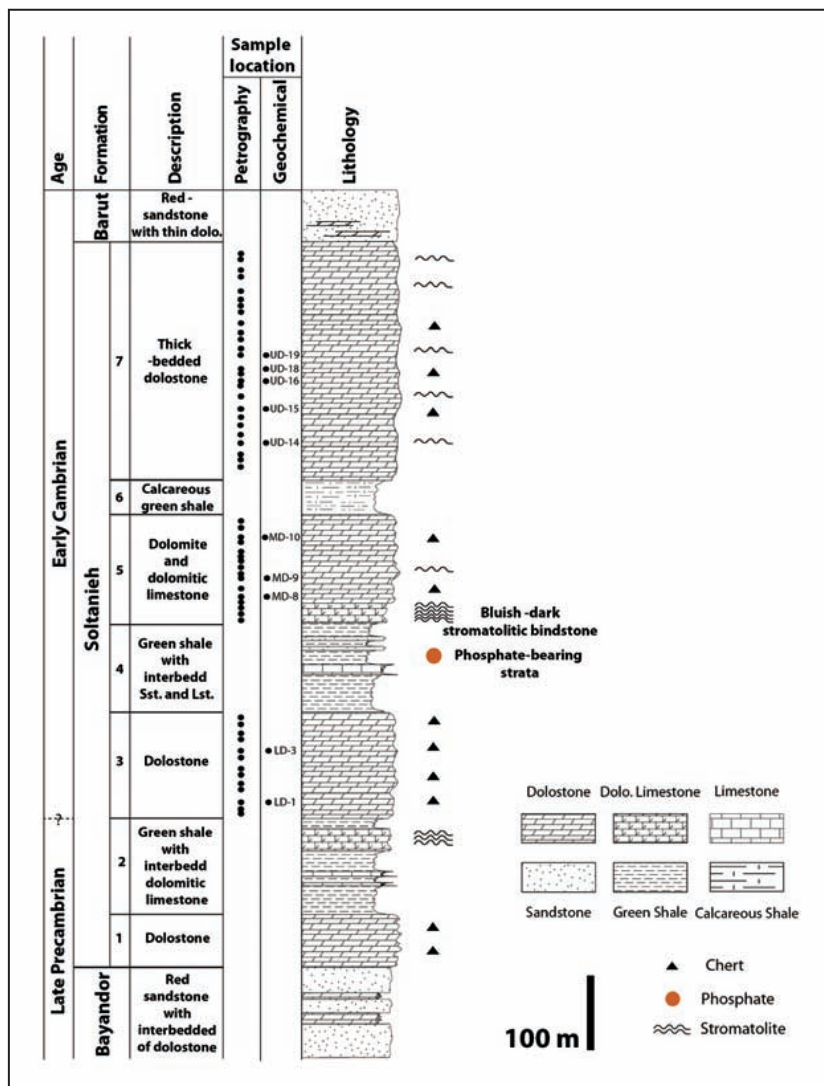
سازند سلطانیه در ۳۵ کیلومتری جنوب باختر زنجان، ۹۸۵ متر ستبراً دارد که بیشتر از لایه‌های متوسط تا ستبرالایه دولومیت و لایه‌های نازک شیل تشکیل شده



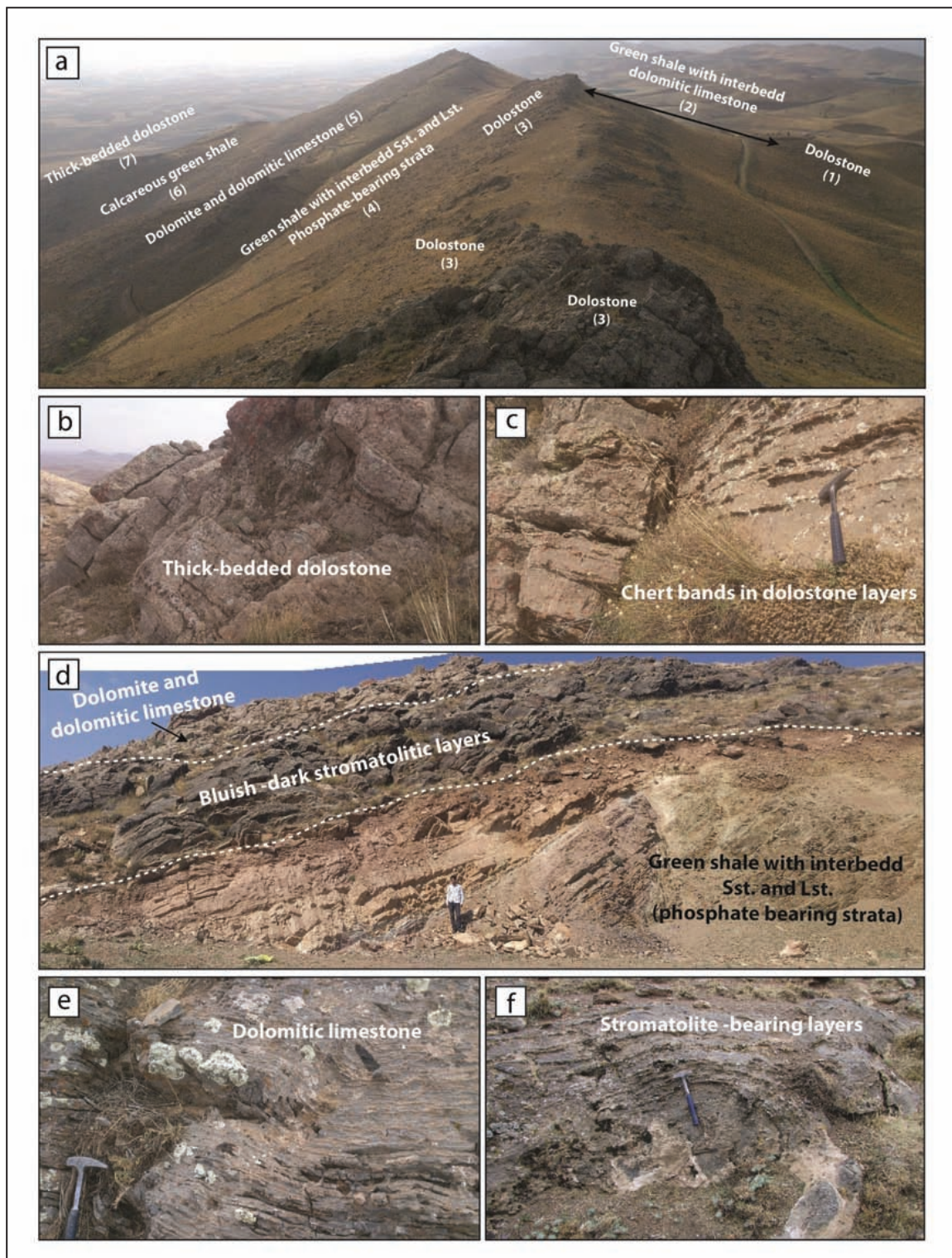
شکل ۱- مسیر دسترسی به منطقه مورد مطالعه (جنوب باختر زنجان).



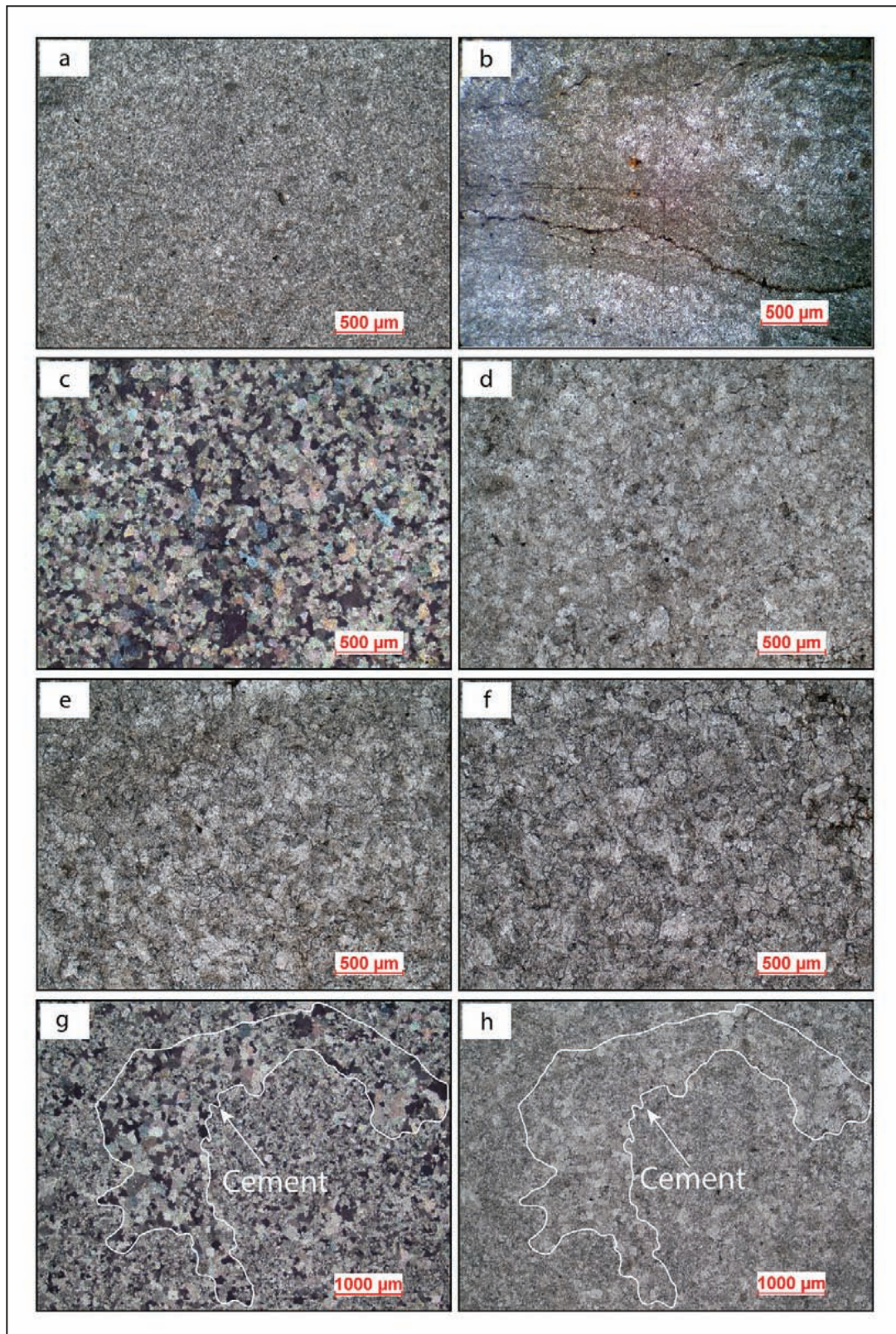
شکل ۲- بخشی از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ زنجان که محل برداشت برش مورد مطالعه در آن مشخص شده است (برگرفته با تغییراتی از حاجیان و زاهدی، ۱۳۸۳).



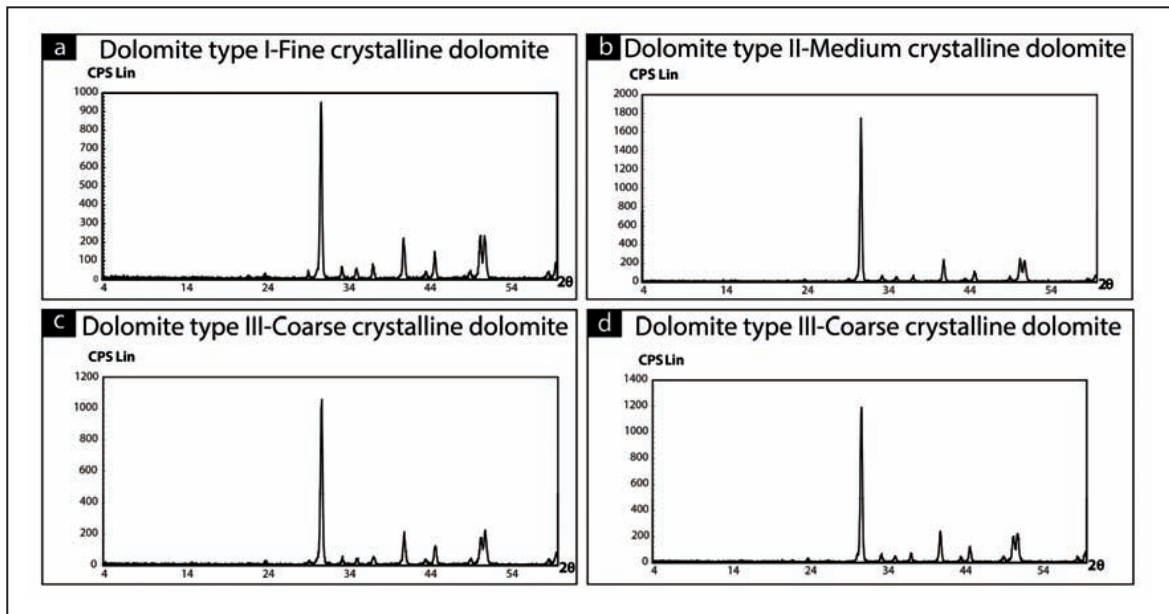
شکل ۳- ستون چینه‌شناسی سازند سلطانیه در برش مورد مطالعه (روستای جشن سرا)، جنوب باختر زنجان. محل‌های نمونه‌برداری (تهیه مقاطع نازک میکروسکوپی و تجزیه‌های ژئوشیمیایی) با دوایر توپر نشان داده شده است.



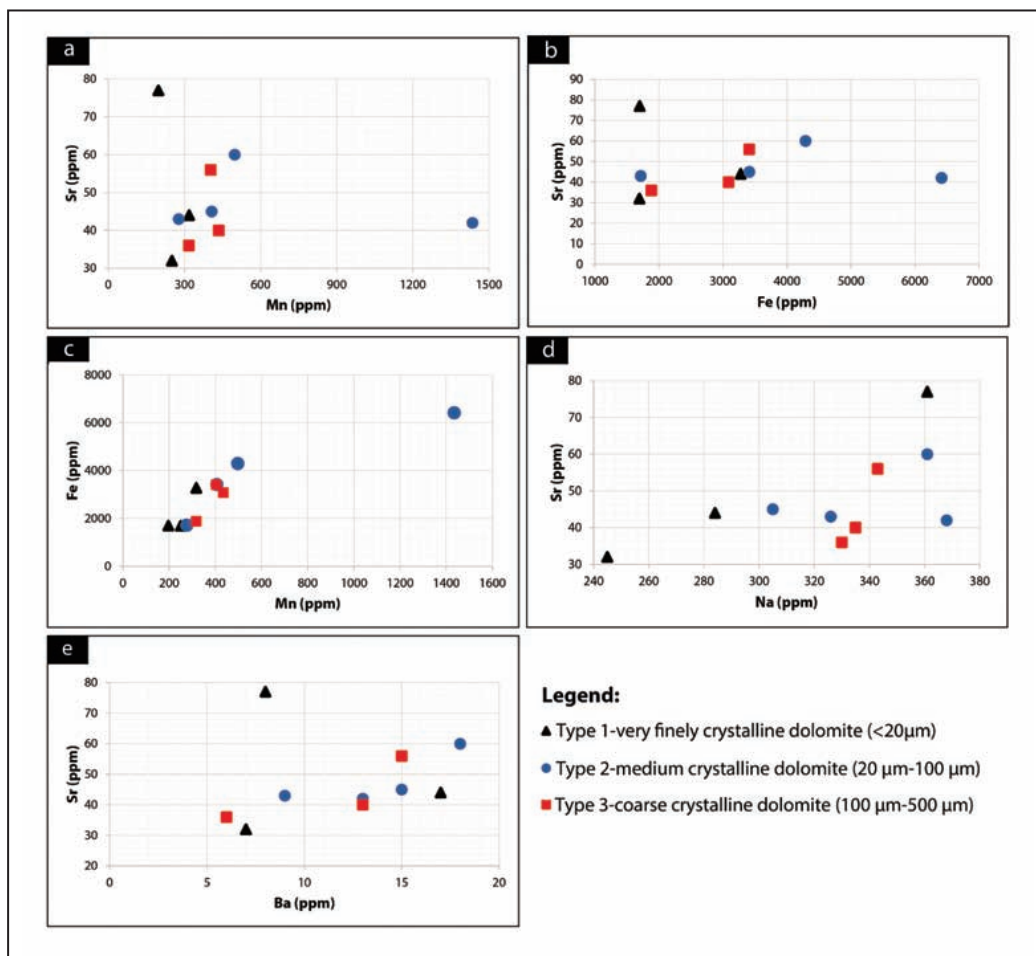
شکل ۴- سازند سلطانیه در برش جشن سرا، ۳۵ کیلومتری جنوب باختر زنجان. (a) نمای کلی از سازند سلطانیه که از دید سنگ شناسی به ۷ بخش تقسیم شده است؛ دید به سوی باختر؛ (b) دولومیت های متوسط تا ستر لایه در سومین افق سنگ شناسی سازند سلطانیه؛ (c) نمایی از نوارهای چرت در لایه های دولومیتی؛ (d) لایه های دولومیت آهکی سرشار از استروماتولیت (قاعده بخش پنجم از سازند سلطانیه) که روی شیل های نازک لایه دارای کانه زایی فسفات قرار گرفته است؛ این لایه ها به دلیل حضور استروماتولیت به رنگ تیره دیده می شود؛ (e و f) نمای نزدیک تر از بخش های سنگ آهک دولومیتی و غنی از استروماتولیت سازند سلطانیه در برش مورد مطالعه.



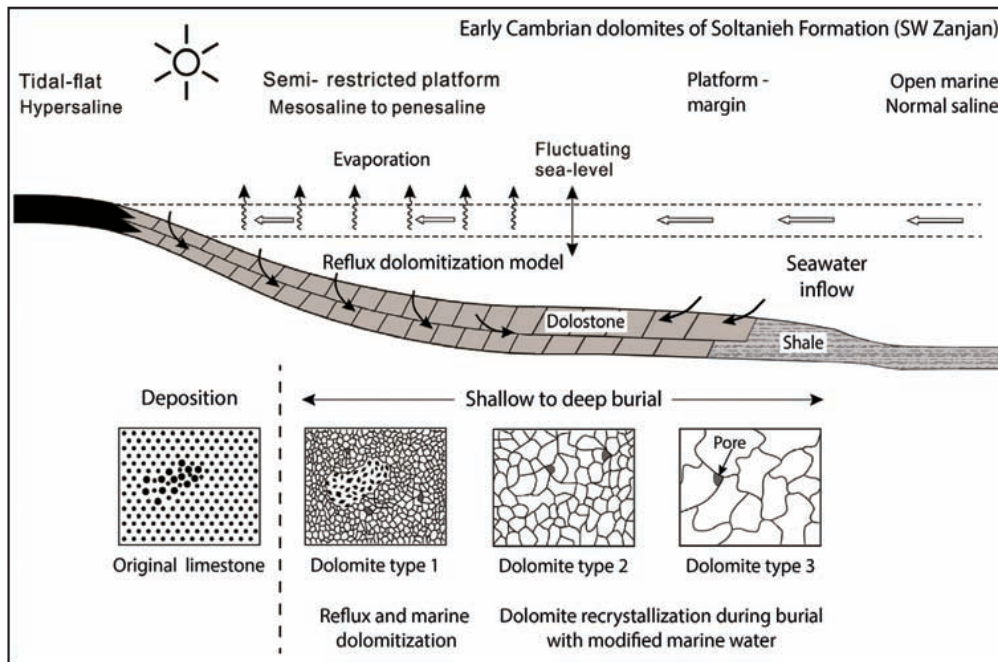
شکل ۵- انواع مختلف دولومیت‌های شناسایی شده در سازند سلطانیه در جنوب باختر زنجان. (a و b) دولومیت نوع ۱ (دولومیت ریز بلور با اندازه بلورهای کوچکتر از ۲۰ میکرون)؛ (c و d) دولومیت نوع ۲ (دولومیت متوسط بلور با اندازه بلورهای میان ۱۰۰-۲۰ μm)؛ (e و f) دولومیت نوع ۳ (دولومیت درشت بلور با اندازه بلورهای میان ۵۰۰-۱۰۰ μm)؛ (g و h) دولومیت نوع ۴ (سیمان دولومیتی پرکننده حفرات).



شکل ۶- نتایج تجزیه پراش پرتو ایکس (XRD) در سه نوع دولومیت شناسایی شده در سازند سلطانیه. (a) دولومیت نوع اول، نمونه شماره MD8؛ (b) دولومیت نوع دوم (متوسط بلور)، نمونه شماره UD16؛ (c) و (d) دولومیت درشت بلور سازند سلطانیه متعلق به نمونه های شماره UD15 و UD18. همان گونه که دیده می شود این تصاویر بیانگر کانی اصلی دولومیت در سه نوع دولومیت شناسایی شده از سازند سلطانیه در منطقه مورد مطالعه است.



شکل ۷- تغییرات عناصر فرعی در برابر یکدیگر در انواع مختلف دولومیت های سازند سلطانیه در برش جشن سرا، جنوب باختر زنجان. (a و b) تغییرات استرانسیم در برابر منگنز و آهن؛ (c) تغییرات آهن در برابر منگنز که بیانگر رابطه خطی مشخص است؛ (d و e) تغییرات استرانسیم در برابر سدیم و باریم. لازم به توضیح است که میان این عناصر (برای نمونه استرانسیم در برابر منگنز و آهن) رابطه به نسبت خطی دیده می شود که نشان دهنده محیط های دیاژنزی تدفینی ژرف باشد.



شکل ۸- مدل دولومیتی شدن بخش‌های کامبرین پیشین سکوی کربناته سازند سلطانیه در جنوب باختر زنجان. سیال مورد نیاز برای انجام فرایند دولومیتی شدن بیشتر توسط آب دریا تأمین شده است که سبب ایجاد لایه‌های دولومیتی با گسترش جانبی گسترده در منطقه مورد مطالعه شده است.

جدول ۱- توصیف ویژگی‌های سنگ‌نگاری چهار نوع دولومیت شناسایی شده در سازند سلطانیه.

نوع دولومیت	اندازه بلور	شکل مرز بلورها	فابریک	بافت	تخلخل میان‌بلوری	فراوانی حجمی (درصد)
دولومیت نوع ۱	ریز بلور ($20 \mu\text{m}$)	بی شکل	جانیشینی	بافت غیر صفحه‌ای (Mazzullo, 1992) زئوتاپیک (Xenotopic) (Gregg and Sibley, 1984)	۳ درصد	۲۵ درصد
دولومیت نوع ۲	متوسط بلور ($20 \mu\text{m}-100 \mu\text{m}$)	نیمه‌شکل دار	تلور دوباره دولومیکرایت‌ها	بافت صفحه‌ای s- (Mazzullo, 1992) هایپیدیوتاپیک (Hypidiotopic) (Gregg and Sibley, 1984)	۴ درصد	۲۵ درصد
دولومیت نوع ۳	درشت بلور ($100 \mu\text{m}-500 \mu\text{m}$)	نیمه‌شکل دار تا بی شکل	تلور دوباره	بافت صفحه‌ای s- تا غیر صفحه‌ای (Mazzullo, 1992) هایپیدیوتاپیک (Hypidiotopic) تا زئوتاپیک (Xenotopic) (Gregg and Sibley, 1984)	۲ درصد	۴۵ درصد
دولومیت نوع ۴	درشت بلور ($100 \mu\text{m}-200 \mu\text{m}$)	بی شکل تا نیمه‌شکل دار	سیمان پرکننده حفرات	بافت غیر صفحه‌ای تا صفحه‌ای s- (Mazzullo, 1992) زئوتاپیک (Xenotopic) تا هایپیدیوتاپیک (Hypidiotopic) (Gregg and Sibley, 1984)	۳ درصد	۵ درصد

جدول ۲- ترکیب کانی شناسی چهار نوع دولومیت شناسایی شده در سازند سلطانیه با استفاده از نتایج تجزیه پراش اشعه ایکس (XRD).

نوع دولومیت	کانی‌های اصلی	کانی‌های فرعی	کانی‌های جزیبی
دولومیت نوع ۱- ریزبلور	دولومیت	کلسیت	-
دولومیت نوع ۲- متوسط بلور	دولومیت	کلسیت	کوارتز
دولومیت نوع ۳- درشت بلور	دولومیت	کلسیت	-

جدول ۳- نتایج تجزیه عناصر فرعی چهار نوع دولومیت شناسایی شده در سازند سلطانیه با استفاده از نتایج تجزیه ICP-OES.

Ba ppm	Mn ppm	Fe ppm	Sr ppm	Na ppm	شماره نمونه	نوع دولومیت
۱۷	۳۱۸	۳۲۷۶	۴۴	۲۸۴	LD-1	دولومیت نوع ۱- ریزبلور
۷	۲۵۰	۱۶۹۵	۳۲	۲۴۵	MD-8	
۸	۱۹۶	۱۶۹۹	۷۷	۳۶۱	MD-10	
۱۳	۱۴۳۵	۶۴۱۴	۴۲	۳۶۸	LD-3	دولومیت نوع ۲- متوسط بلور
۱۵	۴۰۷	۳۴۱۲	۴۵	۳۰۵	MD-9	
۹	۲۷۷	۱۷۱۵	۴۳	۳۲۶	UD-16	
۱۸	۴۹۸	۴۲۹۰	۶۰	۳۶۱	UD-19	دولومیت نوع ۳- درشت بلور
۱۵	۴۰۳	۳۴۱۰	۵۶	۳۴۳	UD-14	
۱۳	۴۳۵	۳۰۸۷	۴۰	۳۳۵	UD-15	
۶	۴۹۸	۱۸۸۲	۳۶	۳۳۰	UD-18	

کتابنگاری

- آفانیاتی، ع.، ۱۳۸۳- زمین شناسی ایران، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۶ ص.
- تشیعی، ر.، حمدی، ب.، وزیری، ح. و یوسف زاده، ا.، ۱۳۹۱- بیواستراتیگرافی سازند سلطانیه در برش گرماب- سرخدر براساس فسیل های ریزپوسته دار اولیه، سی و یکمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- ثیاب قدسی، ع.، ا.، ۱۳۸۵- چینه نگاری زیستی، شیمیایی و محیط رسوبی رسوبات نئوپروتروزوئیک پسین- کامبرین پیشین در شمال (البرز مرکزی) و شمال غرب ایران (جنوب شرق زنجان)، پایان نامه دکتری زمین شناسی دانشگاه شهید بهشتی تهران، ۲۰۷ ص.
- ثیاب قدسی، ع.، ا.، حمدی، ب.، آدابی، م. ح. و صادقی، ع.، ۱۳۸۵- بررسی سیستماتیک و تافونومی ایکونوفسیل تریکوفیکوس پدیوم در برش الگوی سازند سلطانیه واقع در جنوب خاوری زنجان، فصلنامه علمی- پژوهشی علوم زمین، سازمان زمین شناسی کشور، شماره ۱۶، صص. ۱۱۶ تا ۱۲۳.
- چشمه سری، م.، عابدینی، ع. و علیزاده، ا.، ۱۳۹۱- فاکتورهای کنترل کننده توزیع اورانیوم در نهشته فسفاتی دلیر، جنوب غرب چالوس، استان مازندران، سی و یکمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- حاجیان، ج. و زاهدی، م.، ۱۳۸۳- گزارش نقشه زمین شناسی زنجان، مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- حمدی، ب.، ۱۳۷۴- سنگ های رسوبی پر کامبرین- کامبرین در ایران، سازمان زمین شناسی کشور، گزارش شماره ۲۰، ۳۵۳ ص.
- زهدی، ا. و ممبئی، ک.، ۱۳۹۵- شرایط محیطی افق های فسفات سازند سلطانیه (جنوب غرب زنجان)، هشتمین همایش انجمن زمین شناسی اقتصادی ایران، دانشگاه زنجان.
- شاهنده، ز.، حمدی، ب.، شمیرانی، ا. و صادقی، ع.، ۱۳۸۶- ریز پوسته داران ابتدایی سازند سلطانیه در برش سربندان، بیست و ششمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- شبهتری، غ. م. و آدابی، م. ح.، ۱۳۸۰- تعیین مرز پر کامبرین- کامبرین در توالی سازند سلطانیه در شمال سمنان به روش چینه شناسی شیمیایی، نشریه دانشکده علوم زمین، شماره های ۴ و ۵، صص. ۸۵ تا ۹۱.
- شبهتری، غ. م. و آدابی، م. ح.، ۱۳۸۱- کاربرد اطلاعات ژئوشیمیایی در تشخیص منشأ و تعیین دمای محیط تشکیل دولومیت های سازند سلطانیه در شمال سمنان، مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران، دوره ۱۰، شماره ۱، صص. ۳ تا ۱۶.
- شبهتری، غ. م.، ۱۳۷۳- مطالعه سنگ شناسی و محیط رسوبی سنگ های هم ارز سازند سلطانیه (پر کامبرین فوقانی - کامبرین زیرین) در مناطق سربندان (شرق دماوند) و شه میرزاد (شمال سمنان)، پایان نامه کارشناسی ارشد زمین شناسی دانشگاه تربیت معلم تهران، ۱۷۶ ص.
- شریفی، ج.، ۱۳۸۴- خصوصیات سنگ شناسی فسفات های پلوئیدی و غیر پلوئیدی کامبرین سازند سلطانیه، منطقه ولی آباد (البرز مرکزی)، بیست و چهارمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- شریفی، ج.، ۱۳۸۵- مطالعه پتروگرافی و زمین شیمی فسفات های رسوبی سازند سلطانیه (کامبرین زیرین) در البرز مرکزی، دهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، انجمن زمین شناسی ایران، دانشگاه تربیت مدرس.
- موسوی مطلق، س.، ۱۳۸۵- بررسی ژئوشیمی و ژنز افق های فسفاتی سیدکندی، جنوب غرب شهرستان زنجان، پایان نامه کارشناسی ارشد زمین شناسی اقتصادی دانشگاه تبریز، ۱۴۵ ص.

References

- Al-Helal, A. B., Whitaker, F. F. and Xiao, Y., 2012- Reactive transport modeling of brine reflux: dolomitization, anhydrite precipitation, and porosity evolution. *Journal of Sedimentary Research*, 82: 196-215.
- Azmy, K., Veizer, J., Misi, A. and de Oliveira, T. F., Sanches, A. L., and Dardenne, M. A., 2001- Dolomitization and isotope stratigraphy of the Vazante formation, São Francisco Basin, Brazil. *Precambrian Research*, 112 (3): 303-329.
- Behrens, E. W. and Land, L. S., 1972- Subtidal Holocene dolomite, Baffin Bay, Texas. *Journal of Sedimentary Research*, 42(1).
- Burns, S. J. and Baker, P. A., 1987- A geochemical study of dolomite in the Monterey Formation, California. *Journal of Sedimentary Research*, 57 (1).
- Cai, C., Li, K., Li, H., and Zhang, B., 2008- Evidence for cross formational hot brine flow from integrated 87Sr/86Sr, REE and fluid inclusions of the Ordovician veins in Central Tarim, China. *Applied Geochemistry*, 23 (8), 2226-2235.
- Dickson, J. A. D., 1965- A modified staining technique for carbonate in thin section. *Nature*, 205-587.
- Driese, S. G. and Mora, C. I., 1993- Physico-chemical environment of pedogenic carbonate formation in Devonian vertic palaeosols, central Appalachians, USA. *Sedimentology*, 40(2): 199-216.

- Geske, A., Zorlu, J., Richter, D. K., Buhl, D., Niedermayr, A. and Immenhauser, A., 2012- Impact of diagenesis and low grade metamorphism on isotope ($\delta^{26}\text{Mg}$, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$ and $87\text{Sr}/86\text{Sr}$) and elemental (Ca, Mg, Mn, Fe and Sr) signatures of Triassic sabkha dolomites, *Chemical Geology*, 332-333, 45-64.
- Gregg, J. M. and Sibley, D. F., 1984- Epigenetic dolomitization and the origin of xenotopic dolomite texture. *Journal of Sedimentary Research*, 54 (3).
- Hamdi, B., 1989- Stratigraphy and Paleontology of the Late Precambrian to Early Cambrian in the Alborz Mountains Northern Iran, *Geological Survey of Iran*, 41 p.
- Hou, M. C., Jiang, W. J., Xing, F. C., Xu, S. L., Liu, X. C. and Xiao, C., 2016- Origin of dolomites in the Cambrian (upper 3rd-Furongian) formation, southeastern Sichuan Basin, China. *Geofluids*. DOI: 10.1111/gfl.12193.
- Jiang, L., Cai, C. F., Worden, R. H., Li, K. K., and Xiang, L., 2013- Reflux dolomitization of the Upper Permian Changxing Formation and the Lower Triassic Feixianguan Formation, NE Sichuan Basin, China. *Geofluids*, 13 (2): 232-245.
- Kimura, H., Matsumoto, R., Kakuwa, Y., Hamdi, B. and Zibaseresht, H., 1997- The Vendian-Cambrian $\delta^{13}\text{C}$ record, North Iran: evidence for overturning of the ocean before the Cambrian Explosion, *Earth and Planetary Science Letters*, 147, E1 - E7.
- Kirmaci, M. Z. and Akdag, K., 2005- Origin of dolomite in the Late Cretaceous-Paleocene limestone turbidites, Eastern Pontides, Turkey. *Sedimentary Geology*, 181: 39-57.
- Land, L. S. and Hoops, G. K., 1973- Sodium in carbonate sediments and rocks; a possible index to the salinity of diagenetic solutions. *Journal of Sedimentary Research*, 43 (3): 614-617.
- Land, L. S., 1985- The origin of massive dolomite. *Journal of Geological Education*, 33 (2): 112-125.
- Land, L. S., 1991- Dolomitization of the Hope Gate Formation (north Jamaica) by seawater: reassessment of mixing zone dolomite. In: Taylor, H. P., O'Neil, J. R., Kaplan, I. R. (Eds.), *Stable Isotope Geochemistry: A Tribute to Samuel Epstein*, Geochemical Society, Special Publications, 3: 121-133.
- Last, F. M., Last, W. M. and Halden, N. M., 2012- Modern and late Holocene dolomite formation: Manito Lake, Saskatchewan, Canada, *Sedimentary Geology*, 281: 222-237.
- Li, Q., Jiang, Z., Hu, W., You, X., Hao, G., Zhang, J. and Wang, X., 2016- Origin of dolomites in the Lower Cambrian Xiaoberbulak Formation in the Tarim Basin, NW China: Implications for porosity development. *Journal of Asian Earth Sciences*, 115: 557-570.
- Mazzullo, S. J., 1992- Geochemical and neomorphic alteration of dolomite: a review. *Carbonates and Evaporites* 7(1): 21-37.
- Navarro-Ciurana, D., Corbella, M., Cardellach, E., Vindel, E., Gomez-Gras, D. and Grier, A., 2016- Petrography and geochemistry of fault-controlled hydrothermal dolomites in the Riópar area (Prebetic Zone, SE Spain), *Marine and Petroleum Geology*, 71: 310-328.
- Qing, H., Bosence, D. W. J. and Rise, E. P. F., 2001- Dolomitization by penesaline sea water in Early Jurassic peritidal platform carbonates, Gibraltar, western Mediterranean. *Sedimentology*, 48: 153-163.
- Rivers, J. M., Kyser, K. and James, N. P., 2012- Salinity reflux and dolomitization of southern Australian slope sediments: the importance of low carbonate saturation levels, *Sedimentology*, 59: 445-465.
- Rott, C. M. and Qing, H., 2013- Early dolomitization and recrystallization in shallow marine carbonates, Mississippian Alida Beds, Williston Basin (Canada): evidence from petrography and isotope geochemistry. *Journal of Sedimentary Research* 83, 928-941.
- Sanchez Roman, M., Vasconcelos, C., Schmid, T., Dittrich, M., McKenzie, J. A., Zenobi, R., and Rivadeneyra, M. A., 2008- Aerobic microbial dolomite at the nanometer scale: Implications for the geologic record. *Geology*, 36: 879-882.
- Sibley, D. F., and Gregg, J. M., 1987- Classification of dolomite rock textures. *Journal of Sedimentary Research*, 57 (6).
- Simms, M., 1984- Dolomitization by groundwater-flow systems in carbonate platforms: Gulf Coast Association of Geological Societies. *Transactions*, 34: 411-420.
- Stöcklin, J., Ruttner, A. and Nabavi, M. H., 1964- New data on the Lower Paleozoic and Pre-cambrian of North Iran. No. 1. *Geological Survey of Iran*.
- Suzuki, Y., Iryu, Y., Inagaki, S., Yamada, T., Aizawa, S. and Budd, D. A., 2006- Origin of atoll dolomites distinguished by geochemistry and crystal chemistry: Kita-daito-jima, northern Philippine Sea. *Sedimentary Geology*, 183 (3): 181-202.
- Swart, P. K., Cantrell, D. L., Westphal, H., Handford, C. R. and Kendall, C. G., 2005- Origin of dolomite in the Arab-D reservoir from the Ghawar Field, Saudi Arabia: evidence from petrographic and geochemical constraints. *Journal of Sedimentary Research*, 75 (3): 476-491.
- Tucker, M. E. and Wright, V. P., 1990- *Carbonate Sedimentology Petrology*. Black Well, Oxford, 482 p.
- Vandeginste, V., John, C. M. and Manning, C., 2013- Interplay between depositional facies, diagenesis and early fractures in the Early Cretaceous Habshan Formation, Jebel Madar, Oman. *Marine and Petroleum Geology*, 43: 489-503.
- Veizer, J., 1983- Chemical diagenesis of carbonates: theory and application of trace element technique. In: Arthur, M. A., Anderson, T. F., Kaplan, I. R., Veizer, J., Land, L. S. (Eds.), *Stable Isotopes in Sedimentary Geology*, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Short Course, 10: 3-100.
- Warren, J., 2000- Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations. *Earth-Science Reviews*, 52 (1), 1-81.
- You, X., Sun, S. and Zhu, J., 2014- Significance of fossilized microbes from the Cambrian stromatolites in the Tarim Basin, Northwest China, *Science China Earth Sciences*, 57 (12): 2901-2913.
- You, X., Sun, S., Zhu, J., Li, Q., Hu, W. and Dong, H., 2013- Microbially mediated dolomite in Cambrian stromatolites from the Tarim Basin, northwest China: implications for the role of organic substrate on dolomite precipitation. *Terra Nova*, 25 (5): 387-395.
- Zhu, D., Meng, Q., Jin, Z., Liu, Q. and Hu, W., 2015- Formation mechanism of deep Cambrian dolomite reservoirs in the Tarim basin, northwestern China. *Marine and Petroleum Geology*, 59: 232-244.

Dolomitization model of the Soltanieh Formation in the south-west of Zanjan

A. Zohdi^{1*}, F. Asemi² and A. Lakirouhani³

¹Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Zanjan, Zanjan, Iran

²M.Sc. Student, Department of Civil Engineering-Geotechnic, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

³Assistant Professor, Department of Civil Engineering-Geotechnic, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

Received: 2016 August 29

Accepted: 2016 December 10

Abstract

In this study, to determine a dolomitization model for the Soltanieh Formation a suitable outcrop 35 km southwest of Zanjan city has been studied. The Soltanieh Formation with a total thickness of 985 m sharply laid on the shales and sandstones of the Bayandor Formation and was covered by shales and red-sandstones of the Barut Formation. Distribution and extension of the dolomite layers in the Soltanieh Formation, is parallel with the sedimentary layers and bedding and also has considerable lateral extension. Abundant relict of blue-green algae (stromatolites) and nodules and bands of cherts, have been recognized into the dolomitic layers of the Soltanieh Formation. Based on fieldwork, petrography and geochemistry evidences (ICP-OES and XRD), four different types of dolomite have been distinguished in Soltanieh Formation. These dolomites include: (1) fine crystalline dolomites or dolomicrite; (2) subhedral, dense and medium crystalline dolomite; (3) subhedral to anhedral coarse crystalline dolomite and finally (4) pore-filling dolomite cements. In the studied dolomites of Soltanieh Formation, saddle dolomite were not observed. The results of this research indicate that these dolomites have been formed in shallow to relatively deep diagenetic environments by moderately saline marine fluids (mean Na 435 ppm), via seepage reflux of evaporate seawater into the Soltanieh Formation platform in the study area. Low Sr values (mean 47 ppm) and relatively high Fe (mean 3088 ppm) and Mn values (mean 453 ppm) in coarse crystalline dolomites, likely indicate increase in dolomite crystal size and recrystallization process during the burial. The very low Ba concentration (mean 12 ppm) and the absence of saddle dolomite into the dolomitic sequences of the Soltanieh Formation, indicates ineffectiveness of hydrothermal fluids acting during dolomitization process of the Soltanieh Formation carbonates into the study area.

Keywords: Dolomitization, Seepage Reflux, Recrystallization, Soltanieh Formation, Zanjan.

For Persian Version see 17 to 28

*Corresponding author: A. Zohdi; E-mail: afshin.zohdi@znu.ac.ir