پژوهشهای چینه نگاری و رسوب شناسی
سال بیست و هفتم، شماره پیاپی۴۲، شماره اول، بهار ۱۳۹۰
تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۶/۷ تاریخ پذیرش:۱۳۹۰/۳/۲۳
صص ۲۶-۱

فاکتورهای کنترل‌کننده گسترش بافت‌های مختلف سیمان انیدریت و ارتباط آن با کیفیت مخزنی در مخازن کربناته دالان بالایی و کنگان- میدان پارس جنوبی

رحیم کدخدائی ایلخچی، *دانشجوی دکتری دانشگاه فردوسی مشهد* *
حسین رحیم پور بناب، *استاد، گروه زمین شناسی دانشگاه تهران*
سید رضا موسوی حرمی، *استاد، گروه زمین شناسی دانشگاه فردوسی مشهد*
علی کدخدائی ایلخچی، *استادیار، گروه زمین شناسی دانشگاه تبریز*

چکیده

فرآیندهای دیاژنزی مختلفی کیفیت مخازن کربناته دالان بالایی و کنگان در میدان پارس جنوبی را تحت تاثیر قرار داده است. از جمله مهمترین این فرآیندها تشکیل سیمان انیدریت است که بصورت لایه‌ای، پویکیلوتوپیک، پرکننده تخلخل و فراگیر، ندولی و بلورهای پراکنده، پرکننده شکستگی و رگچه‌ای گسترش یافته است. این بافتها طی مراحل مختلف دیاژنزی بصورت جانشینی و نیز پرکننده تخلخل انواع رخساره‌ها را به درجات متفاوتی متاثر ساخته‌اند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که سیمان انیدریت عمدتاً در رخساره‌های دولومیتی تشکیل شده و در رخساره های آهکی بصورت پراکنده و خیلی اندک است و لذا تاثیری بر کیفیت مخزنی آنها نداشته است. این امر همچنین بیانگر تاثیر شورابه‌های غنی از سولفات در فرآیند دولومیتی شدن می‌باشد.از بین بافتهای مختلف انیدریت، نوع پرکننده تخلخل و فراگیر بیشترین تاثیر را بر کیفیت مخزنی داشته است و با گسترش در رخساره‌های دولوگرینستونی و دولوپکستونی دانه‌پشتیبان و پرکردن تمامی فضاهای خالی طی تدفین کم‌عمق کیفیت مخزنی آنها را به شدت کاهش داده است. اما از طرفی با توجه به انحلال‌پذیری این نوع سیمان، در مراحل بعدی دیاژنز و ایجاد تخلخل ثانویه، کیفیت مخزنی آنها بهبود یافته است. بطور کلی گسترش سیمان انیدریت بصورت بافت‌های مختلف توسط سه عامل بافت رسوبی اولیه، حضور سیالات شور غنی از سولفات و فرآیندهای دیاژنزی بعدی(انحلال و شکستگی) کیفیت مخازن کربناته دالان بالایی و کنگان را کنترل نموده است.

واژه‌های کلیدی: سازند دالان بالایی و کنگان، بافتهای مختلف انیدریت، شورابه‌های غنی از سولفات، کیفیت مخزنی، دیاژنز، انحلال، شکستگی

* نویسنده مسئول: ۰۹۳۵۲۸۵۷۳۱۰ Email: rahimkadkhodaee2005@yahoo.com

مقدمه

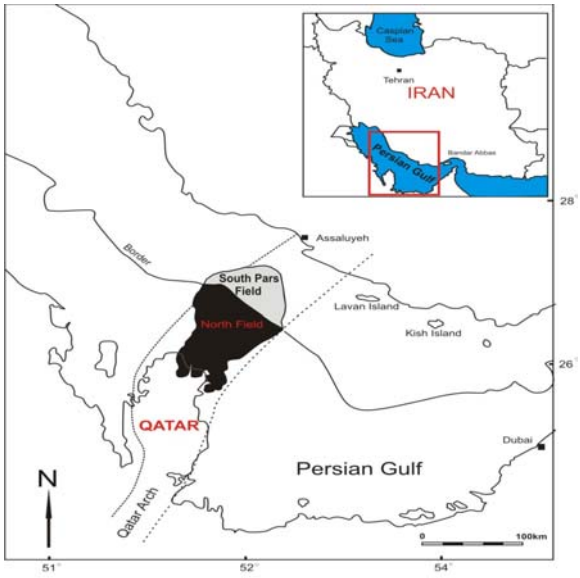
فرآیندهای دیاژنزی از جمله مهمترین عواملی هستند که در کنترل کیفیت مخزنی مخازن کربناته می‌توانند موثر باشند(Flugel 2004; Cai-neng et al. 2008). تاثیر عمده این فرآیندها در افزایش یا کاهش کیفیت مخزنی با توجه به نوع رخساره‌ها و نیز نوع و شدت این فرآیندها می‌تواند متفاوت باشد. میدان پارس جنوبی که در آبهای خلیج فارس واقع است به عنوان بخشی از بزرگترین میدان گازی جهان در فصل مشترک ایران و قطر است(شکل ۱). مخازن کربناته دالان بالایی و کنگان با سن پرمین - تریاس به عنوان سنگ مخزن این میدان، متشکل از توالیهای کربناته- تبخیری هستند که کیفیت مخزنی آنها متاثر از فرآیندهای مختلف دیاژنزی در طول زمان است (Zeigler 2001; Rahimpour-Bonab et al 2010). از جمله مهمترین این فرآیندهاتشکیل سیمان انیدریت در مخزن است. طبیعتاً گسترش انیدریت بویژه بصورت سیمان پرکننده حفرات بر کیفیت مخزنی تاثیرگذاراست. از طرفی انحلال پذیری بیشتر این سیمان نسبت به سایر سیمانها (کلسیتی و دولومیتی) و نیز گسترش آن بصورت بافتها و اشکال مختلف در مخزن، تفسیر اثرات این سیمان را بر کیفیت مخزنی انواع رخساره‌های مخزنی پیچیده می‌سازد. این موضوع اهمیت بررسی تاثیر این سیمان و نیز بافتهای مختلف آن را بر کیفیت مخزنی مشخص می‌نماید. مطالعات مختلفی در ارتباط با مخازن مورد مطالعه و معادل آنها در کشورهای همسایه صورت گرفته است (Ehrenberg 2006; Esrafili-Dizaji and Rahimpour-Bonab 2009; Rahimpour-Bonab et al. 2010). به لحاظ مخزنی توالیهای کربناته و تبخیری را در سازندهای دالان بالایی و کنگان به ۴ بخش تقسیم نموده اند. واحدهای مخزنی K1 و K2 برای سازند کنگان و K3 و K4 برای سازند دالان بالایی در نظر گرفته می‌شود. هدف از این مطالعه شناسایی انواع بافتهای مختلف سیمان انیدریت در مخزن با استفاده از مطالعات میکروسکوپی، تعیین فاکتورهای مهم کنترل کننده گسترش این سیمان و اثرات آن بر کیفیت مخزنی انواع رخساره‌های مخزن است.

روش مطالعه

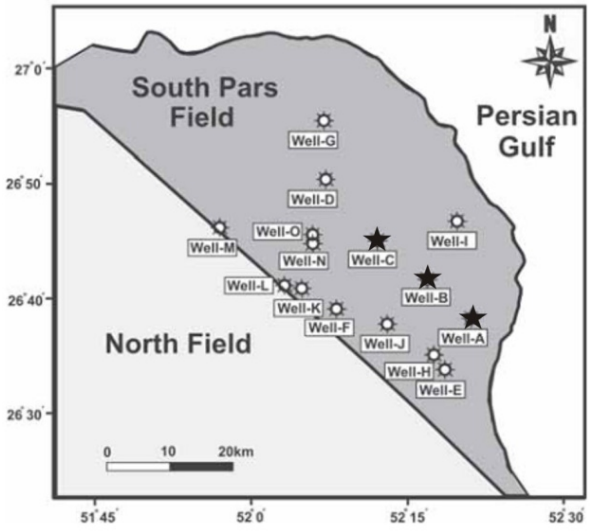
در این مطالعه که بر روی چاههای شماره ۹، ۱۰ و ۱۱ میدان پارس جنوبی صورت گرفته است(شکل۲)، شناسایی انواع رخساره‌ها و فرآیندهای دیاژنزی حاکم بر آنها با استفاده از مطالعات مقاطع نازک میکروسکوپی(بیش از ۸۰۰ مقطع) انجام شده است. انواع رخساره‌های میکروسکوپی بر اساس روش دانهام[1](۱۹۶۲) و با تغییراتی نامگذاری شدند. بدین صورت در تعیین محیط رسوبی انواع رخساره‌های میکروسکوپی از طبقه بندی ویلسون (Wilson 1975) و باکستون و پدلی (Buxton and Pedley 1989) استفاده شد. به منظور تفکیک رخساره‌های آهکی از دولومیتی کلیه مقاطع نازک با محلول آلیزارین قرمز[2] رنگ‌آمیزی شدند. به منظور تعیین درصد انیدریت در هر مقطع نازک از روش شمارش نقطه‌ای[3] با استفاده از نرم افزار تحلیل تصاویر[4] استفاده شد. در این مطالعه تقسیم‌بندی بافتهای انیدریت بر اساس لوسیا[5] (۱۹۹۹) و با تغییراتی جزئی انجام شده است

[1] - Dunham
[2] - Alizarin Red-S
[3] - Point-Counting
[4] - Image Analysis
[5] - Lucia

و علاوه بر بافتهای اصلی معرفی شده توسط لوسیا تعدادی بافتهای فرعی و با اهمیت کمتر نیز در مخزن شناسایی و معرفی گردید. در بررسی ویژگیهای مخزنی انواع رخساره-ها، از نمودار پتروفیزیکی لوسیا(۱۹۹۹)، بر اساس داده‌های تخلخل و تراوایی مغزه یکی از چاهها(شماره ۹) که اطلاعات آن در دسترس بود استفاده شد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی میدان پارس جنوبی که در آبهای خلیج فارس و در امتداد میدان شمال قطر قرار گرفته است (Aali et al. 2006).



شکل ۲- موقعیت چاههای مورد مطالعه که با علایم ستاره‌های توپر پر مشخص شده است (Rahimpour-Bonab et al. 2010).

رخساره ها و محیط رسوبی

پیش از بررسی انواع بافتهای انیدریت و تاثیر آنها بر کیفیت مخزنی ابتدا به شرح مختصری در ارتباط با انواع رخساره-های میکروسکوپی[1] موجود در مخزن پرداخته می شود. همچنین این رخساره‌های میکروسکوپی همراه با مشخصه-های بافتی و دیاژنزی آنها بصورت خلاصه در جدول ۱ مشخص شده‌اند.

۱- رخساره میکروسکوپی گرینستون تا دولوگرینستون اوئیدی - بایوکلستی: این رخساره از دانه‌های اوئید، اینتراکلست و خرده های فسیلی (دوکفه ای، خارپوست و بریوزوئر) تشکیل شده است. جورشدگی خوب و گسترش فراوان سیمان دریایی اطراف دانه‌ها به صورت سیمان هم ضخامت[2] و تیغه‌ای[3] از ویژگیهای این رخساره است (شکل ۳ الف). این رخساره عمدتا در بخشهای مخزنی K2 و K4 مخازن مورد مطالعه گسترش دارد(شکل۴). محیط تشکیل این رخساره به صورت یک محیط پرانرژی و مربوط به بخش روبه دریا و مرکز پشته‌های اوئیدی- بایوکلستی[4] تفسیر می‌شود. بنابراین این رخساره معادل کمربند رخساره ای ۶ ویلسون و ۳ باکستون و پدلی است. در انواع دولومیتی این رخساره، دولومیتی شدن همراه با گسترش سیمان تبخیری فراگیر و پرکننده تخلخل در بین دانه‌ها است(شکل۴). دولومیتی شدن عمدتا بصورت انتخاب کننده فابریک و ریزبلور است اما در مواردی که بصورت تخریب‌کننده فابریک عمل نموده است همراه با ایجاد بلورهای درشت(بزرگتر از ۱۰۰ میکرون) بوده است.

۲- رخساره میکروسکوپی پلوئید، اوئید، بایوکلست گرینستون تا پکستون دانه غالب: این رخساره بصورت مخلوطی ناهمگن از دانه‌های پرانرژی و کم انرژی شامل اوئید، پلوئید، اینتراکلست و اجزاء اسکلتی است که در برخی قسمتها مقداری گل آهکی در بین اجزاء وجود دارد. سیمان دریایی در این رخساره به خوبی گسترش‌نیافته و با ضخامت کم است(شکل ۳ ب). این رخساره عمدتا در بخشهای مخزنی K3 و K4 مخازن مورد مطالعه گسترش دارد(شکل۴). باتوجه به مشخصه‌های بافتی(اندازه دانه و جورشدگی ضعیف) و موقعیت این رخساره در توالی رخساره‌ها محیط تشکیل آن حدواسط رخساره پرانرژی پشته سدی و رخساره کم انرژی لاگون است. در مواردی وجود برخی اجزاء پرانرژی مربوط به محیط پشته سدی همراه با رخساره‌های کم انرژی محیط لاگون می‌تواند بصورت مخروط‌های شسته‌شده[5] از پشته‌های سدی به سمت لاگون در نظر گرفته شود. این رخساره معادل کمربند رخساره‌ای ۶ ویلسون و ۳ باکستون و پدلی است. فرآیند دولومیتی شدن در این رخساره نیز حالتی مشابه رخساره قبلی را دارد و همراه با گسترش سیمان تبخیری پرکننده تخلخل و فراگیر در بین دانه هاست.

۳-رخساره پلوئیدال- بایوکلستیک پکستون گل غالب: این رخساره ترکیبی از اجزاء کم انرژی و دانه ریزتر نسبت به رخساره پشته سدی می‌باشد(شکل۳ پ،ت). در این رخساره پلت و اجزاء اسکلتی مانند جلبک، گاستروپود، آنکوئید و دوکفه‌ای در زمینه‌ای از گل آهکی قرار دارند. جورشدگی اجزاءکم بوده و عمدتا میکرایتی هستند. در مواردی شواهدی از آشفتگی زیستی[6] در این رخساره

[1] - Microfacies
[2] - Isopachous
[3] - bladed
[4] - Oolitic-Bioclastic Shoals

[5] - Spill over Fan
[6] - Bioturbation

مشاهده می‌شود. این رخساره نیز عمدتا در واحدهای مخزنی K3 و K4 مشاهده می‌شود(شکل۴). بر اساس شواهد بافتی و فسیل شناسی مذکور، این رخساره به یک محیط نیمه بسته و کم انرژی مانند لاگون پشت سد نسبت داده می‌شود. این رخساره معادل کمربند رخساره‌ای ۷ و ۸ ویلسون و ۲ باکستون و پدلی می‌باشد. در انواع دولومیتی این رخساره نیز دولومیتی شدن بصورت جانشینی اجزاء و ماتریکس همراه با ایجاد بلورهای ریز (کمتر از ۲۰ میکرون) بوده است. گسترش انیدریت نیز با جانشینی اجزاء و بصورت پراکنده و کومه‌ای در این رخساره عمل نموده است(شکل۳ پ).

۴- رخساره میکروسکوپی استروماتولیت-ترومبولیت: این رخساره بصورت ساختارهایی با لامیناسیون نواری و مشخص (استروماتولیت) یا بدون لامیناسیون و با بافت لخته‌ای (ترومبولیت) است (شکل۳ ث،ح). جلبکهای سبز-آبی یا سیانوباکتریا به عنوان سازندگان اصلی این رخساره محسوب می‌شوند که نقش مهمی در بدام انداختن رسوبات در پهنه‌های جزرومدی را دارند. استروماتولیت در واحدهای مخزنی K1 و K2 دیده می‌شود. اما ترومبولیت همراه این استروماتولیت صرفا در ابتدای واحد مخزنی K2 وجود دارد(شکل۴). محیط تشکیل آن در ارتباط با پهنه بین جزرومدی تا لاگون بوده و معادل کمربند رخساره ای ۷ و ۸ ویلسون و ۱ باکستون و پدلی است. این رخساره به عنوان یک افق کلیدی[1] چینه‌شناسی در مرز پرمین- تریاس است که در ابتدای سازند کنگان قرار دارد (لطف پور و همکاران ۱۳۸۲). در این رخساره نیز بلورهای تبخیری بصورت پراکنده و یا پرکننده حفرات(بافت چشم پرنده‌ای) دیده می شوند.

۵-رخساره میکروسکوپی مادستون و دولومادستون تا وکستون:

این رخساره بصورت گل غالب بوده و در مواردی حاوی اجزاء فسیلی پراکنده‌ای مانند میلیولید و استراکود در یک زمینه گلی است(شکل۳ ج). این رخساره از تنوع و فراوانی بالایی در مخزن مورد مطالعه برخوردار است. در انواع دولومیتی این رخساره، دولومیتی شدن عمدتاً با ایجاد بلورهای ریز (کوچکتر از ۲۰ میکرون) و بصورت کامل یا جزئی صورت گرفته است(شکل۱۰ الف و ب). در مواردی آثاری از بلورهای پراکنده تبخیری (ژیپس و انیدریت) و ترکهای پرشده با سیمان تبخیری در این رخساره مشاهده می‌شود (شکل۳ چ). این رخساره در تمام واحدهای مخزنی بویژه **K1** و **K3** گسترش دارد(شکل۴). این رخساره در ارتباط با محیط بین جزرومدی و معادل کمربند رخساره‌ای ۱ باکستون و پدلی و ۸ ویلسون است.

۶-رخساره میکروسکوپی دولومادستون همراه با ندول انیدریت: این رخساره بصورت گل غالب و همراه با بلورها و ندولهای پراکنده‌ای از تبخیری‌ها مانند ژیپس و عمدتا انیدریت است. این رخساره مربوط به قسمتهای فوقانی محیط بین جزرومدی تا محیط فوق جزرومدی است که در آن بلورهای تبخیری پراکنده در متن ماتریکس بتدریج و به سمت قسمتهای فوقانی پهنه جزرومدی به ندولهای انیدریت تبدیل می شوند. این ندولها در نتیجه تراکم و بهم چسبیدن، ساختارهای ویژه‌ای به نام ساختمان قفس مرغی[2] را بوجود می‌آورن(شکل۳ ه) و در نهایت به لایه انیدریت در محیط سبخا تبدیل می‌شوند. این رخساره در ادامه رخساره قبلی قرار دارد و تقریبا در تمام واحدهای مخزنی مشاهده می‌شود(شکل۴). این رخساره معادل کمربند رخساره‌ای ۱ باکستون و پدلی و ۸ و۹ ویلسون است.

[1] - Key Bed

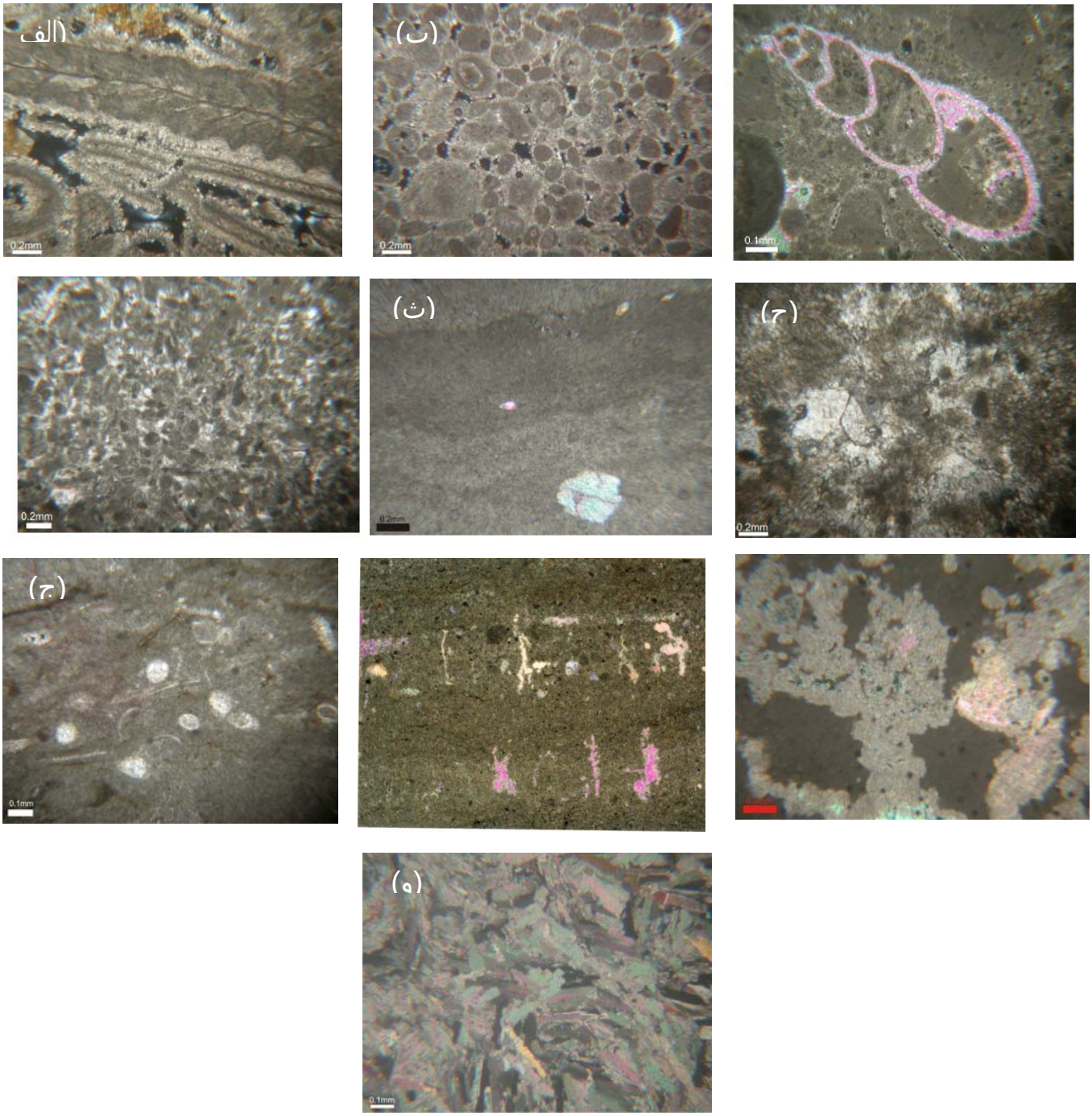
[2] - Chickenwire Structure

دولومیتی شدن جانشینی در این رخساره بصورت یکنواخت و عمدتا همراه با بلورهای ریز (کوچکتر از ۲۰ میکرون) است (شکل ۸ الف و ب). در مواردی این بلورها در نتیجه تبلور مجدد دانه درشت‌تر شده اند.

۷-لایه انیدریت: در این رخساره بلورهای انیدریت بصورت بافت درهم فشرده و بلورین قابل تشخیص است(شکل۳ و ، ۵ الف). این رخساره به عنوان آخرین بخش توالی رخساره‌ها در یک روند کم عمق شوندگی به سمت بالا محسوب می‌شود و همراه با رخساره‌های دولومادستونی ریزبلور در تمام واحدهای مخزنی مشاهده می شود(شکل۴). وجود این رخساره در مخزن مورد مطالعه حاکی از وجود یک سری حوضچه‌های تبخیری در محیط رسوبگذاری است که در آنها در نتیجه شرایط حاکم بر حوضه و تحت شرایط تبخیر سطحی تبخیریها گسترش یافته‌اند. این تبخیریها عمدتا بصورت ژیپس و در شرایط شوری و دمای بالا بصورت انیدریت نیز ته نشین می شوند. همچنین لایه های ژیپس اولیه می توانند در طول تدفین و افزایش دما در نتیجه آبزدایی به ژیپس تبدیل شوند. این رخساره معادل کمربند رخساره ای ۱ باکستون و پدلی و ۹ ویلسون است که در یک محیط فوق جزرومدی (سبخا) گسترش یافته است.

چنانچه مشخص است بطورکلی انواع رخساره‌های شناسایی شده در مخزن در ارتباط با زیرمحیطهای پشته سدی (گرینستون/دولوگرینستون تا پکستون اوئیدی-بایوکلستی)،لاگون(وکستون/دولووکستون پلوئیدی-بایوکلستی) و پهنه بین جزر و مدی[1] وبالای جزرومدی[2](دولومادستون/وکستون،ترومبولیت/ استروماتولیت و انیدریت) هستند. تنوع کم این رخساره‌ها، تغییرات تدریجی آنها در توالی رسوبی و نیز نبود اجزاء موجودات ریف‌ساز مهم در آنها بیانگر تشکیل آنها در یک محیط کربناته وسیع و با شیب خیلی‌کم شبیه به یک محیط رمپ کربناته هم شیب[3] است. از طرفی گسترش تبخیریها بصورت بافتها و اشکال مختلف در این رخساره‌ها که در ادامه بیشتر توضیح داده می‌شود بیانگر تشکیل آنها در یک آب و هوای گرم و خشک است که این موضوع همچنین با آب و هوای دیرینه آن زمان (پرمین-تریاس) مطابقت دارد(Insalaco et al. 2006). این رخساره‌ها تحت تاثیر فرآیندهای دیاژنزی مختلفی قرار گرفته‌اند که از جمله مهمترین آنها دولومیتی شدن، انحلال، سیمانی-شدن و گسترش انیدریت می‌باشد. شکل۴ توالی انواع رخساره‌های شناسایی شده در مخازن دالان بالایی و کنگان را به همراه داده های تخلخل و تراوایی مغزه، درصد حجمی انیدریت و داده‌های چگالی در یکی از چاههای مورد بررسی نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل مشخص است این رخساره‌ها دارای سنگ شناسی کربناته و تبخیری بوده و بطورکلی یک روند کم عمق شوندگی به سمت بالا را نشان می‌دهند. این روند از رخساره‌های دانه غالب گرینستونی و پکستونی پشته سدی شروع شده و به سمت لاگون و پهنه جزرومدی و در نهایت رخساره‌های تبخیری در محیط سبخایی می‌رسد. در شکل ۴ این روند توسط فلش‌هایی مشخص شده است.

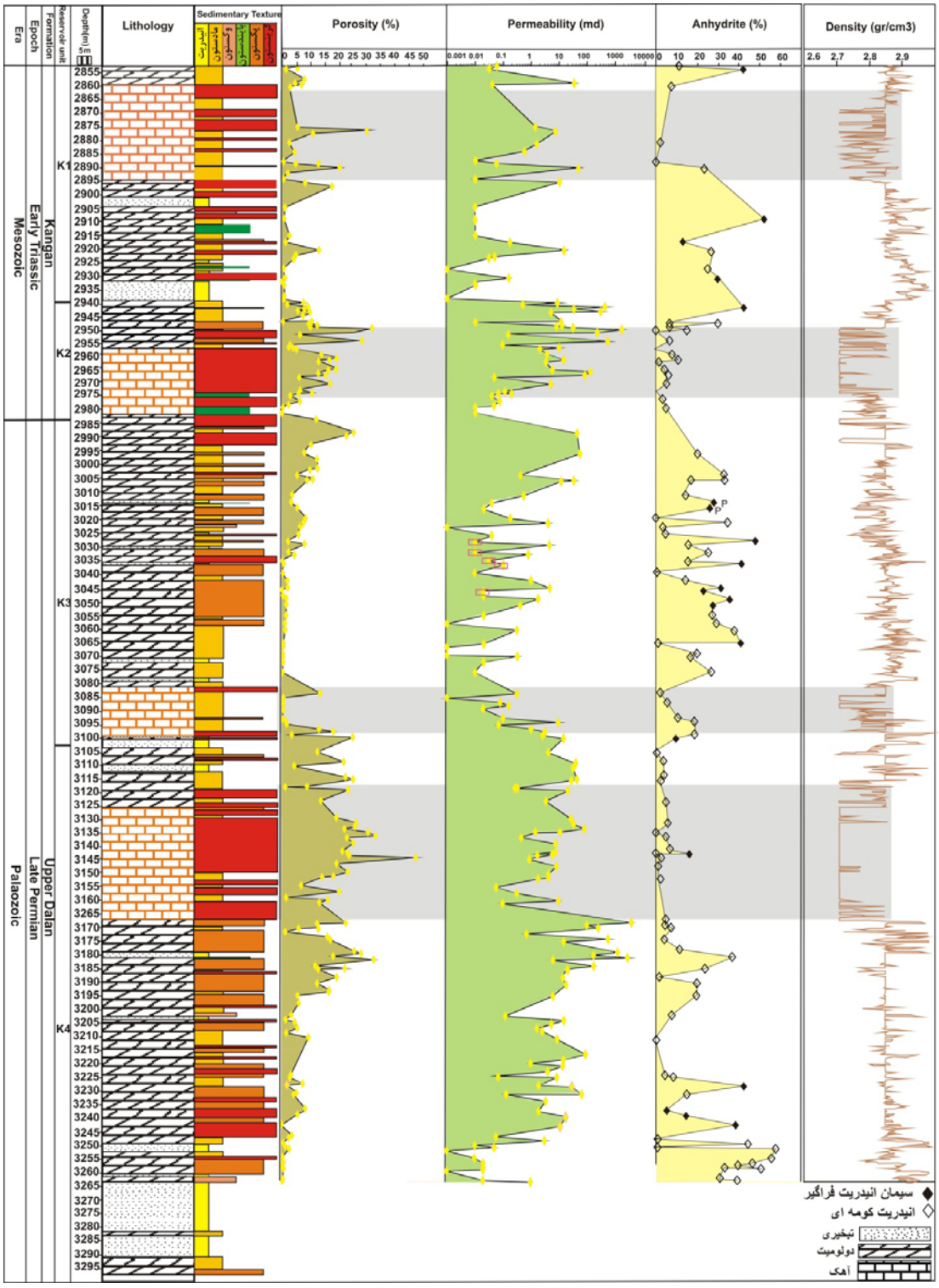
[1] - Intertidal
[2] - Supratidal
[3] - Homoclinal Ramp



شکل۳- رخساره های شناسایی شده در مخازن مورد مطالعه. الف) رخساره گرینستون اوئیدی- بایوکلستی با سیمان تیغه ای در اطراف اجزاء ب) رخساره گرینستون تا پکستون اوئیدی-پلوئیدی با سیمان نازک در اطراف اجزاء پ) رخساره پکستون پلوئیدی – بایوکلستی ت) رخساره پکستون پلوئیدی ث) رخساره استروماتولیت با بافت لامینه ای ح) رخساره ترومبولیت با بافت لخته ای ج) رخساره مادستون تا وکستون بایوکلستی چ) رخساره مادستون دولومیتی با ترکهای پرشده با بلورهای تبخیری ه) رخساره مادستون ندولی با ساختمان قفس مرغی و) رخساره انیدریت با بلورهای کشیده و درهم بافته.

جدول۱ - مشخصه های کلی بافتی و کانی شناسی رخساره های میکروسکوپی شناسایی شده در مخازن مورد مطالعه

نام رخساره میکروسکوپی	شواهد بافتی و کانی شناسی	اجزاء تشکیل دهنده غالب	اندازه دانه و جورشدگی	محیط رسوبی	کمربند رخساره ای	فرآیند دیاژنزی غالب
گرینستون/دولوگریستون اوئیدی- بایوکلستی	دانه غالب و دانه پشتیبان، آهک و دولومیت	اوئید، دوکفه ای، بریوزوآ	دانه درشت، جورشدگی خوب	قسمت روبه دریا و مرکز پشته های سدی	۶ویلسون و ۳ باکستون و پدلی	گسترش خوب سیمان دور دانه‌ای(تیغه ای) و در مواردی دولومیتی شدن
پلوئید- اوئید - بایوکلست گرینستون/پکستون	دانه غالب همراه مقدار کمی گل، آهک و دولومیت	اوئید، پلوئید و مقادیر کمی بایوکلست	دانه متوسط تا دانه ریز، جورشدگی متوسط تا ضعیف	حدواسط رخساره پرانرژی پشته سدی تا لاگون	۶ ویلسون و ۳ باکستون و پدلی	گسترش سیمان دوردانه ای با ضخامت و وسعت کم و در مواردی میکرایتی شدن
پلوئیدال-بایوکلستیک پکستون	گل غالب، آهک و دولومیت	پلت،جلبک، گاستروپود،	دانه ریز، جورشدگی ضعیف	لاگون پشت سد	۷ و ۸ ویلسون و ۲ باکستون و پدلی	میکرایتی شدن، آشفتگی زیستی
استروماتولیت - ترومبولیت	لامیناسیون موجی تا نواری و یا بافت لخته ای و درهم، آهک و دولومیت	جلبکهای سبز-آبی	—	پهنه بین جزرومدی تا لاگون	۷ و ۸ ویلسون و ۱ باکستون و پدلی	سیمانی شدن حفرات بصورت چشم پرنده ای، بلورهای پراکنده تبخیری، دولومیتی شدن
مادستون- دولومادستون-وکستون	گل غالب، آهک و دولومیت	آثار پراکنده ای از میلیولید و استراکود	دانه‌ریز	پهنه بین جزر و مدی	۸ ویلسون ۱ باکستون و پدلی	بلورهای پراکنده تبخیری، ترکهای پر شده با سیمان، دولومیتی شدن
دولومادستون با ندولهای انیدریت	گل غالب با ساخت قفس مرغی، آهک دولومیت و انیدریت	—	دانه ریز ، جورشدگی خوب	محیط بالای بین جزر مدی (سبخا)	۸ و۹ ویلسون ۱ باکستون و پدلی	انحلال ، شکستگی
لایه انیدریت	بافت متراکم، انیدریت	—	بلورین	محیط بالای بین جزرومدی(سبخا)	۹ ویلسون ۱ باکستون و پدلی	انحلال



شکل ٤- توالی رسوبی مخازن دالان بالایی و کنگان در چاه شماره ۹ میدان پارس جنوبی به همراه داده‌های تخلخل و تراوایی مغزه، درصد حجمی انیدریت و داده‌های چگالی. فلش ها روند کلی کم عمق شوندگی به سمت بالا را در بخشهایی از مخزن نشان می‌دهند.

انواع بافتهای انیدریت موجود در مخزن مورد مطالعه

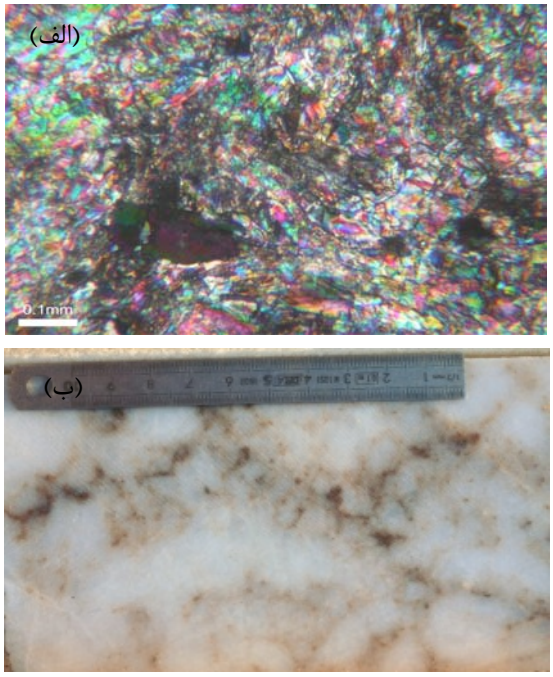
در این بخش بافتهای مختلف انیدریت موجود در مخزن بطور جداگانه توصیف می‌شوند. این بافتها شامل انواع با اهمیت و گسترش بیشتر در مخزن شامل انیدریت لایه‌ای، انیدریت پویکیلوتوپیک و انیدریت ندولی و نیز انواع با اهمیت کمتر شامل بلورهای تبخیری پراکنده و منفرد، سیمان انیدریت پرکننده‌شکستگی، - رگچه‌های تبخیری و ندولهای انیدریت دفنی است.

الف) انیدریت لایه‌ای[1]: همانطور که قبلا نیز در توصیف رخساره‌های مخزن اشاره شد لایه انیدریت همراه با رخساره‌های ریز بلورین دولومادستونی و بصورت متناوب با آنها در بخشهای مختلف سازندهای دالان بالایی و کنگان مشاهده می‌شود. ضخامت این لایه‌ها در حد کمتر از یک متر تا چندین ده متر متغیر است. در مطالعات میکروسکوپی، لایه انیدریت شامل ترکیب فشرده‌ای از بلورهای هم بعد یا توفالهای کشیده و درهم‌بافته با جهت-گیری نیمه موازی یا نامنظم و تصادفی است(شکل۳و، ۵ الف و ب). این نوع انیدریت احتمالاً به صورت ژیپس اولیه در شورابه‌های سبخایی ته نشین شده و سپس در نتیجه آبزدایی و تدفین به انیدریت تبدیل شده است. لایه انیدریت معمولا به عنوان یک سد یا پوش‌سنگ برای مخازن عمل می‌نماید(Lucia 1999).

ب) سیمان انیدریت پرکننده تخلخل و فراگیر[2]: این سیمان بصورت بلورهای بزرگ و عمدتاً پرکننده تخلخل بین‌دانه‌ای در دولوگرینستونها و نیز دولوپکستونهای دانه‌غالب[3] گسترش یافته است. همچنین در مواردی به صورت جانشینی در اوئیدها و فسیل‌ها مشاهده می‌گردد. همراهی این سیمان با رخساره‌های دانه غالب دولومیتی بیانگر تاثیر شورابه‌های تبخیری در فرآیند دولومیتی شدن است. در تفسیر روند دولومیتی شدن و گسترش سیمان انیدریت همراه آن می‌توان گفت که دولومیتی شدن همراه با ایجاد سیالات فقیر از منیزیم و غنی از کلسیم است. این امر ارتباط بین دولومیتی شدن و ته نشینی انیدریت را در جایی که سولفات کافی موجود باشد نشان می‌دهد که می‌تواند بطور قابل ملاحظه‌ای باعث کاهش تخلخل شود (Kendall and Walter 1977; Wilson et al. 2001). در زیر میکروسکوپ این سیمان‌بصورت مجموعه‌ای‌از بلورهای بزرگ، یکنواخت و پیوسته فضای تخلخل بین دانه ها را پر نموده‌اند. در مواردی تشکیل مرز سه‌گانه[4] را در سطوح تماس بین بلورهای درشت این سیمان می‌توان مشاهده کرد(شکل۶ الف و ب). اندازه درشت بلورهای سیمان، نبود آن در سطح تماس بین دانه‌ها، تشکیل آن بعد از سیمانهای کلسیتی مراحل اولیه دیاژنز و همچنین تشکیل آن بصورت سیمان جوش درون شکستگیها و اجزاء شکسته بیانگر تشکیل آن طی مراحل دیاژنز دفنی است. اما از طرفی فضای باز بین دانه‌ها که امکان حرکت شورابه‌های تبخیری را در بین آنها تسهیل نموده نشان می‌دهد که رخساره‌های دارای این نوع سیمان قبل از تشکیل آن تدفین قابل ملاحظه‌ای را متحمل نشده‌اند وضعیتی که در مخازن کربناته پرمین غرب تگزاس نیز گزارش شده است(Saller and Henderson 1998). بر اساس این شواهد می‌توان محیط تشکیل آن را یک محیط دیاژنز تدفین کم‌عمق در نظر

[1]- Layered Anhydrite
[2]- Pore-filling and Pervasive Ahydrite Cement
[3] - Grain-dominated
[4] - Triple-Junction

گرفت(شکل۶ ج). این سیمان در مخزن مورد مطالعه تمام منافذ بین بلوری و بین دانه‌ای و حتی ریزتخلخل‌ها را اشغال نموده بنابراین از این نظر در بررسیهای کیفیت مخزنی حائز اهمیت است. تشکیل این نوع سیمان در رخساره‌های دانه-غالب و دانه‌درشت و عدم تشکیل آن در رخساره‌های گل-غالب و همچنین در رخساره‌های متراکم شده و دارای استیلولیت بیانگر کنترل هر دو عامل رخساره و دیاژنز در تشکیل این سیمان است.



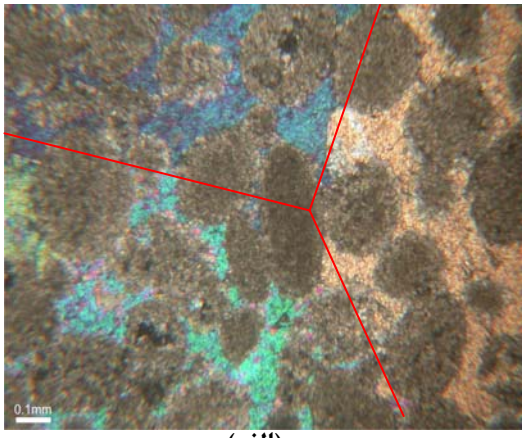
شکل۵ الف) تصویر میکروسکوپی از انیدریت لایه‌ای با بافت متراکم و درهم فشرده(واحد مخزنی K4- عمق ۳۲۶۰/۷۰). ب) تصویر مغزه از لایه انیدریت.

ج) انیدریت پویکیلوتوپیک[1]: این نوع انیدریت به صورت تجمعی از بلورهای بزرگ با گسترش پراکنده و نامنظم، در مواردی همراه با ادخالهای دولومیت و یا ماتریکس آهکی درون مخزن وجود دارد. در انواع رخساره‌های مخزنی مانند دولوپکستونهای گل‌پشتیبان، دولومادستونها، دولوستون‌ها و نیز گرینستونها طی مراحل مختلف دیاژنزی تشکیل شده است. بیشتر بصورت جانشینی ماتریکس، دانه‌ها و نیز سیمانهای مراحل قبلی و در مواردی به صورت پرکننده تخلخل می‌باشد. در دولومادستونها این نوع سیمان به شکل جانشینی و در مواردی همراه با ندولهای انیدریت طی مراحل اولیه دیاژنز تشکیل شده است(شکل۷ الف). اما برخی شواهد از قبیل وجود ادخالهای دولومیت(شکل۷ ب) یا سیمانهای مراحل قبلی درون این نوع سیمان، همراهی آن با سیمانهای مراحل دفنی، تشکیل این سیمان بعد از تراکم(دربرگیرنده آلوکم‌های دارای

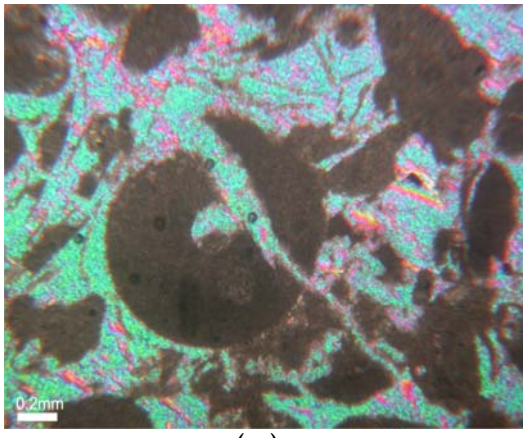
[1] - Poikilotopic Anhydrite

اثرات تراکم) (شکل ۷ ج)، تشکیل آن بصورت بلورهای بزرگ و نیز با رخ مشخص(شکل ۷ د ، ه) و آغشتگی این سیمان با مواد بیتومینی(شکل ۷ و) بیانگر تشکیل آن طی مراحل دیاژنز تدفینی می‌باشد. البته باید توجه داشت در مواردی انحلال انیدریت فراگیر بصورت بخشی آن را بصورت کومه‌ای و پراکنده نمایان می سازد(شکل ۷ ز).در این حالت انحلال این سیمان همراه با ایجاد فضاهای تخلخل بهم‌مرتبط بوده که از دیدگاه مخزنی حائز اهمیت است(Lonoy 2006).

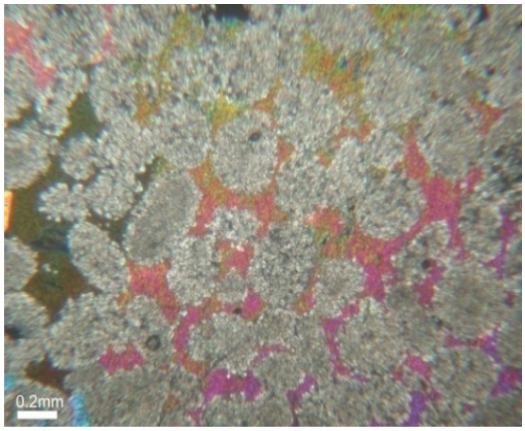
سیمان انیدریت پویکیلوتوپیک از انواع بافتهای انیدریت کومه‌ای و به عنوان فراوانترین بافت انیدریت موجود در مخزن مورد مطالعه است (شکل ۴). چنانچه در مخازن دولومیتی پرمین غرب تگزاس نیز به عنوان معمول‌ترین فرم انیدریت معرفی شده است(Lucia 2007).



(الف)

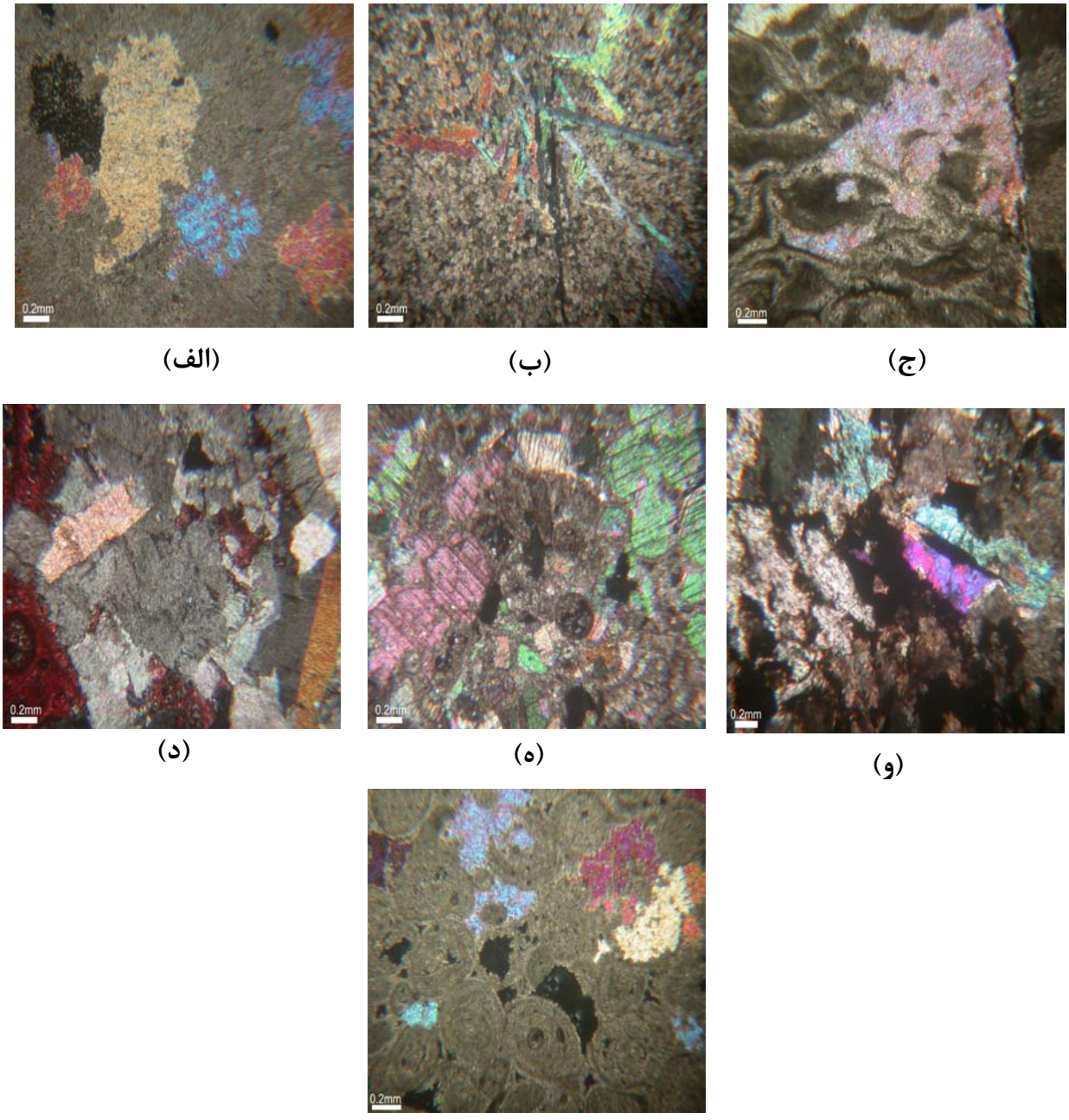


(ب)



(ج)

شکل٦- الف) تصویر میکروسکوپی از سیمان انیدریت فراگیر در یک دولوگرینستون (سازند دالان بالایی- بخش مخزنی K4) متشکل از بلورهای بزرگ به همراه مرز سه‌گانه (Triple Junction) در محل تماس آنها که توسط خطوطی مشخص شده است. ب) سیمان انیدریت فراگیر به صورت سیمان جوش و پرکننده شکستگی ج) سیمان انیدریت به صورت فراگیر و پرکننده تخلخل بین‌دانه‌ای. فضای باز بین اوئیدها بیانگر این است که رخساره قبل از تشکیل این سیمان تدفین قابل ملاحظه‌ای تحمل نکرده است.



شکل ۷- اشکال مختلف سیمان انیدریت پویکیلوتوپیک در مخزن. الف) انیدریت به صورت کومه‌های پراکنده و جانشینی ماتریکس. ب) سیمان انیدریت پویکیلوتوپیک به صورت کومه‌ای با ادخال‌های دولومیت. ج) انیدریت کومه‌ای که بعد از تراکم دانه‌ها و به صورت جانشینی تشکیل شده است. د) سیمان انیدریت کومه‌ای به صورت بلورهای درشت و جانشینی. ه) سیمان انیدریت دفنی با رخ های مشخص و بلورهای درشت. و) سیمان انیدریت کومه‌ای همراه با ماده آلی (بیتومین). ز) سیمان انیدریت کومه‌ای. انحلال سیمان انیدریت فراگیر آن را به صورت کومه‌ای و پراکنده نمایان ساخته است.

د) انیدریت ندولی[1]: این نوع انیدریت به صورت مجموعه‌ای از بلورهای ریز و درهم بافته با جهت گیری تصادفی می‌باشد که اصطلاح فابریک نمدی[2] را برای آن بکار می‌برند. اندازه این ندول‌ها در حد چند میلی‌متر تا سانتی‌متر و حتی بزرگتر است (شکل ۸ الف و ب). در مواردی در نتیجه تبلور دوباره، این بلورها رشد کرده است. ندولهای انیدریت معمولاً طی مراحل اولیه دیاژنز در محیط‌های سبخایی و در رسوبات دانه‌ریز مانند دولومادستونها تشکیل می‌شوند(Hovorka1992; Machel 1991; Kasprzyk and Orti 1998; Gundogan and Burton 2005). این ندول ها در مواردی بصورت ژیپس اولیه تشکیل شده و سپس در اثر آب زدایی به انیدریت تبدیل می‌شوند. به سمت قسمتهای فوقانی منطقه بالای جزر و مدی[3] یا سبخا با افزایش شوری بتدریج بر تعداد و بزرگی ندولها افزوده شده و ساخت قفس مرغی[4] ایجاد شده است(Porthero and Schwab 1996; Warren 2006) (شکل-۸ ج). فرآیند رشد ندولها و همچنین بلورهای پراکنده‌ای از تبخیریها بصورت جایگیری[5] و جانشینی[6] درون رسوبات کربناته تقریباً همزمان با دولومیتی شدن آنهاست(Alsharhan and Whittle 1995; Pomoni-Papaioannou and Karakitsios 2002). این نوع بافت انیدریت از فراوانی کمتری نسبت به انواع پویکیلوتوپیک و سیمان انیدریت فراگیر و پرکننده تخلخل برخوردار است. این نوع انیدریت به علت همراهی‌بارخساره‌های-استروماتولیتی و دولومادستونی (بلورهای‌کوچکتر از ۲۰ میکرون) در مراحل اولیه دیاژنز تشکیل شده است(Rahimpour-Bonab et al. 2010).

از طرفی قطع شدن این نوع انیدریت با شکستگیها و نیز استیلولیت‌ها که نشان‌دهنده تشکیل آن قبل از فرآیندهای فوق می‌باشد و نیز همراهی ندول‌ها با رگچه‌های تبخیری حاصل از تراکم و آب زدایی ژیپس اولیه، موضوع تشکیل و گسترش آنها را طی دیاژنز اولیه تقویت می‌نماید.

ه) ندول‌های انیدریت دفنی[7]: ندول‌های انیدریت می‌توانند از عمق صفر تا چند هزار متر تشکیل شوند(Machel 1993). در مخزن مورد مطالعه ندولهای دفنی از فراوانی کمتری نسبت به ندولهای مراحل اولیه دیاژنز برخوردارند. این ندولها درون رخساره‌های دانه غالب و همچنین در امتداد استیلولیت تشکیل شده‌اند و برخلاف ندولهای مراحل اولیه دیاژنز شواهدی از فرآیند آب‌زدایی، شکستگی و همراهی با رگچه‌های تبخیری را نشان نمی‌دهند(شکل۹ الف و ب) که بیانگر تشکیل این ندولها طی مراحل دیاژنز تدفینی است.

و) بلورهای تبخیری پراکنده و منفرد[8]: این بلورها در اشکال و اندازه‌های مختلف و به صورت پراکنده در رخساره‌های مادستونی و دولومادستونی گسترش یافته‌اند. در مواردی به صورت پرکننده ترک‌ها و حفرات روزنه‌ای[9] و به صورت فابریک چشم پرنده‌ای درون رسوبات دیده می‌شوند. شکل بلورها به فرم لوزوجهی، هم‌بعد و در مواردی به فرم چند بلوری است(شکل۱۰ الف،ب،ج). در مواردی در اثر رخنمون تحت الجوی و انحلال این بلورها، قالب‌های آنها به صورت تخلخل‌های مجزا درون رسوبات باقی مانده است و یا توسط سیمان‌های کلسیتی پرشده است. این تبخیریها بیشتر در رخساره‌های بالای پهنه بین جزر و مدی تا ابتدای سبخا طی مراحل اولیه دیاژنز تشکیل شده‌اند.

ز) سیمان انیدریت پرکننده شکستگیها[10]: این نوع انیدریت بصورت بلورهای درشت و پرکننده شکستگیها در

[1] - Nodular Anhydrite
[2] - Felted Fabric
[3] - Supratidal
[4] - Chickenwire Structure
[5] - Displacement
[6] - Replacement

7 - Burial Anhydrite Nodules
[8] - Sparse and isolated evaporate crystals
[9] -Fenestral
[10] - Fracture Filling Anhydrite

رخساره‌های دانه‌ریز دولومادستونی مشاهده می‌شود. معمولاً بصورت یک سیمان دیاژنز تدفینی و همراه با سایر سیمانهای دفنی یافت می‌شود. در مواردی اثراتی از انحلال و جانشینی آن با کلسیت دیده می‌شود. این نوع انیدریت به مقدار کمی در مخزن مورد مطالعه وجود دارد (شکل ۱۱ الف و ب).

ح) رگچه‌های تبخیری[1] : این رگچه‌ها بصورت نازک و با با حاشیه نامنظم همراه با ندولهای انیدریت بوده و از آنها منشعب می‌شوند(شکل۱۲ الف‌وب). احتمالاً در نتیجه آبزدایی ژیپس اولیه و تبدیل آن به انیدریت، آب حاصل از این فرآیند بصورت رگچه‌ها و نیز شکستگیهایی که بیشتر از ژیپس هستند درون رسوبات دانه‌ریز دولومادستونی گسترش می‌یابد. این رگچه‌ها در مواردی همراه با استیلولیت بوده و به آن ختم می‌شوند، به عبارت دیگر در طول مسیر خود در نهایت توسط استیلولیت قطع می‌شوند که می‌تواند به عنوان شاهدی بر تشکیل آنها طی مراحل دیاژنز تدفینی باشد. این رگچه‌ها و نیز شکستگیها خود می‌توانند به عنوان مجرایی برای سیالات عمل نموده و تا حدودی در افزایش تراوایی رخساره‌های دانه‌ریز و ناتراوا موثر باشند.

توالی دیاژنتیکی تشکیل انواع بافتهای انیدریت در مخزن

انواع بافتهای مختلف انیدریت در مخازن مورد مطالعه طی مراحل مختلف از محیط دیاژنز سطحی تا محیط تدفین کم‌عمق و عمیق تشکیل شده‌اند. بر این اساس گسترش لایه‌ها و نیز بلورها و ندولهای پراکنده تبخیری در پهنه جزر و مدی و سبخایی بصورت تقریباً همزمان با رسوبگذاری یا تحت تاثیر دیاژنز اولیه قابل تفسیر است.

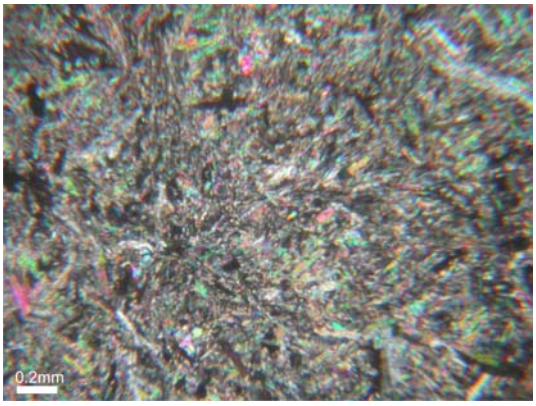
گسترش این نوع تبخیریها در ارتباط تنگاتنگی با دولومیتی شدن اولیه رسوبات و تشکیل دولومیتهای ریزبلورین و نیمه پایدار[2] در این محیط‌هاست. بافتهای دیگر انیدریت مانند سیمان انیدریت فراگیر، بخش عمده سیمان انیدریت پویکیلوتوپیک و انیدریت پرکننده شکستگیها طی مراحل دیاژنز تدفینی و با نفوذ شورابه‌های‌تبخیری بدرون رخساره‌ها تشکیل شده‌اند. شکل ۱۳ بطور خلاصه توالی دیاژنزی تشکیل این بافتها را در مخازن مورد مطالعه نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشخص است سیمان انیدریت پویکیلوتوپیک گستره‌ی دیاژنزی وسیعی را شامل می‌شود و همچنین فراوانترین بافت انیدریت شناخته‌شده در مخازن مورد مطالعه است.

ارزیابی کیفیت مخزنی

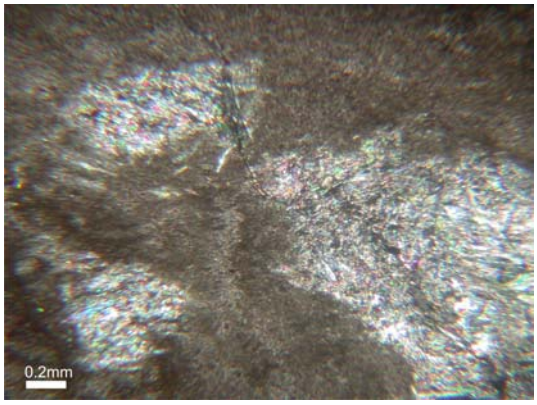
چنانچه در مقدمه نیز اشاره گردید سیمان انیدریت به عنوان یکی از مهمترین و معمولترین سیمانهای موجود در مخازن کربناته دالان بالایی و کنگان است که به اشکال و بافتهای متفاوت در انواع رخساره‌های مخزن تشکیل شده است. ترسیم داده‌های تخلخل و تراوایی مغزه در مقابل درصد فراوانی انیدریت در انواع رخساره های مخزن ارتباط معمول(معکوس) و مشخصی را که پیش‌بینی می‌شود نشان نمی‌دهد(شکل ۱۴ الف و ب). این مسئله می تواند در ارتباط با بافتهای مختلف انیدریت، تنوع رخساره‌های دارای سیمان انیدریتی و تاثیر انحلال و شکستگی در مخازن باشد.

[1] - Evaporite Veins

[2] - Metastable



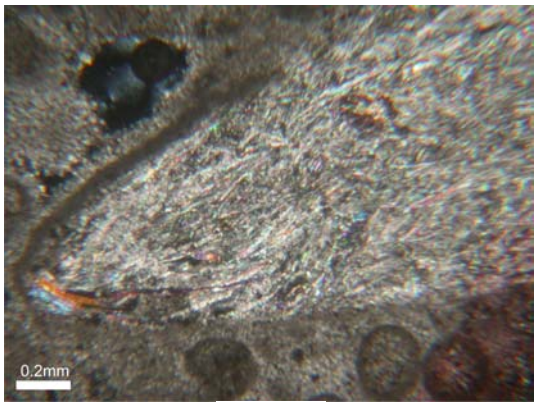
(الف)



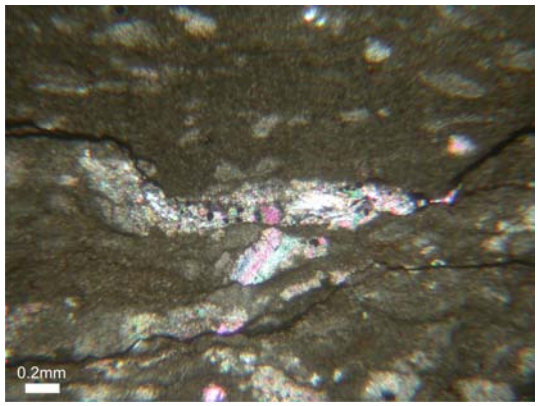
(ب)

(ج)

شکل۸- الف) تصویر میکروسکوپی از ندول انیدریت با بلورهای ریز، درهم بافته و با جهت‌گیری نامشخص (فابریک نمدی). ب) ندول‌های انیدریت پراکنده در متن ماتریکس. ج) تصویر مغزه از ندولهای انیدریت بهم پیوسته که تشکیل (ساخت قفس مرغی).

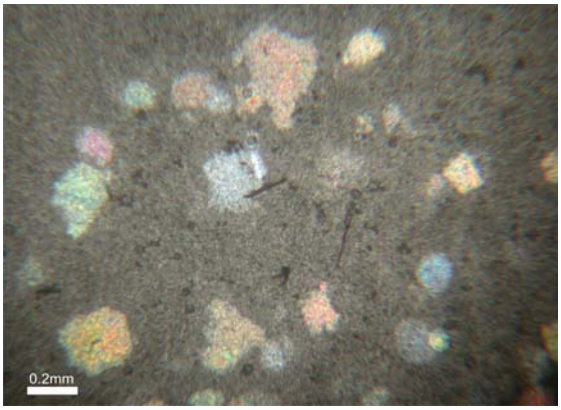


(الف)

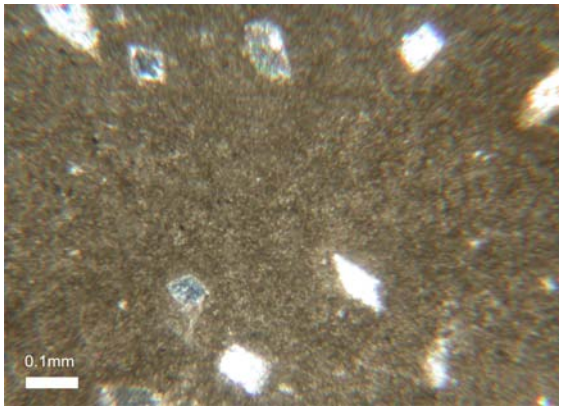


(ب)

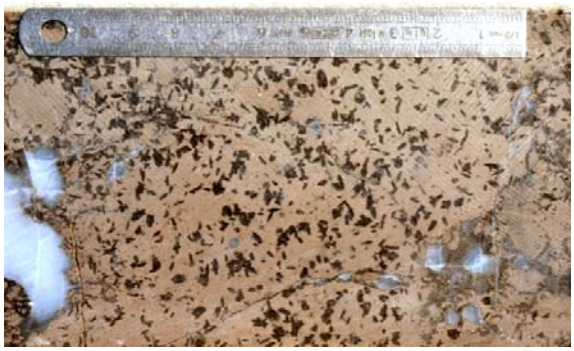
شکل۹- الف) ندول انیدریت دفنی به صورت پرکننده تخلخل قالبی در یک گرینستون. ب) ندول‌های انیدریت در امتداد استیلولیت که بیانگر تشکیل آنها طی دیاژنز دفنی است.



(الف)

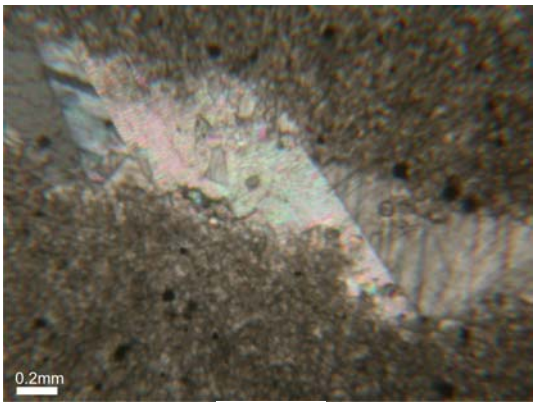


(ب)

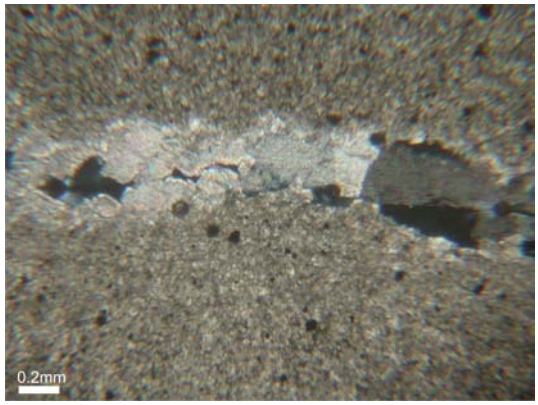


(ج)

شکل ۱۰- الف) بلورهای پراکنده تبخیری در متن ماتریکس. این تبخیری‌ها مربوط به قسمت فوقانی پهنه جزر و مدی تا محیط سبخایی است ب) بلورهای لوزی شکل ژیپس به صورت پراکنده در متن ماتریکس. این رخساره مربوط به پهنه جزر و مدی است. ج) تصویر مغزه از بلورهای پراکنده تبخیری در پهنه جزر و مدی.

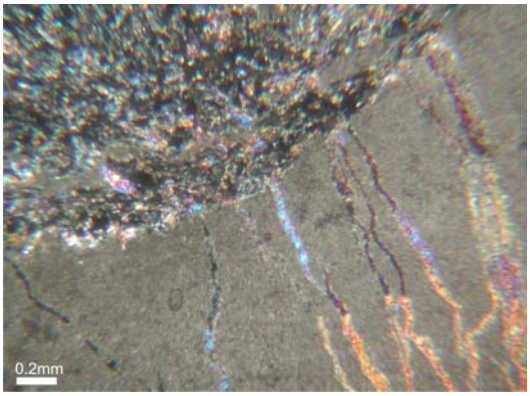


(الف)

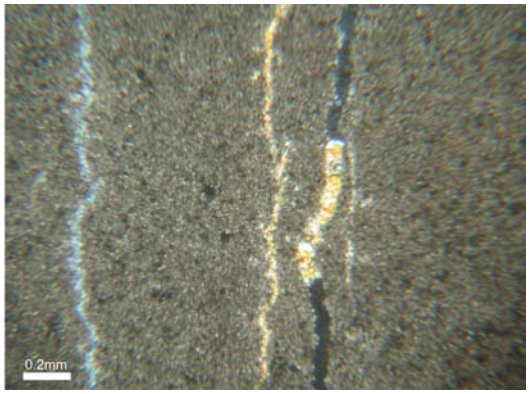


(ب)

شکل ۱۱- الف) سیمان انیدریت پرکننده شکستگی ب) سیمان انیدریت پرکننده شکستگی که انحلال



(الف)



(ب)

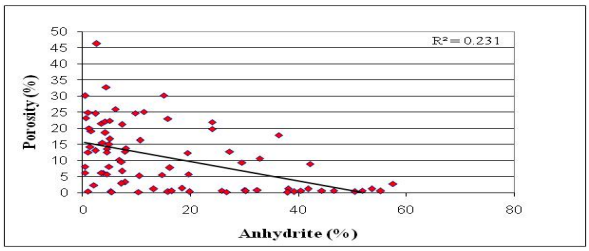
(ج)

شکل ۱۲- الف) رگچه‌های تبخیری همراه با ندول انیدریت. ب) رگچه‌های تبخیری با حاشیه مضرس. این رگچه‌ها عمدتاً ژیپسی است. ج) تصویر مغزه از ندول انیدریت همراه با رگچه‌های تبخیری.

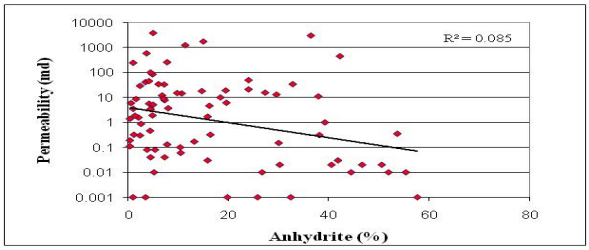
توضیحات	محیط های دیاژنزی			وقایع دیاژنتیکی
	تدفین عمیق	تدفین کم عمق	محیط دیاژنز سطحی	متداول / کمتر متداول
ژیپس و انیدریت که عمدتا در ارتباط با پهنه جزرومدی است				بلورهای تبخیری پراکنده
بیشتر در ارتباط با محیط های سبخایی و تحت تاثیر شورابه های منفذی درون رسوبات تشکیل شده است و می-تواند بصورت ژیپس اولیه تشکیل شده باشد				انیدریت ندولی
درون شورابه های سبخایی و احتمالا بصورت ژیپس اولیه ته نشین شده است				انیدریت لایه ای
در نتیجه آب زدایی ندولهای ژیپس اولیه تشکیل شده اند				رگچه های تبخیری
بصورت پرکننده تخلخل و جانشینی در مواردی همراه با ادخالهای دولومیت است فراوانترین نوع بافت انیدریت موجود در مخزن می باشد				انیدریت پویکیلوتوپیک
متشکل از بلورهای درشت و با گسترش یکنواخت است که کل منافذ موجود در رخساره های دانه پشتیبان را پر کرده است				انیدریت فراگیر
به صورت بلورهای درشت و عمدتا درون شکستگیهای موجود دردولومادستونها گسترش دارد				انیدریت پر کننده شکستگی
			افزایش عمق و پیشرفت زمان	

شکل۱۳- توالی پاراژنتیکی انواع بافتهای انیدریت در مخازن مورد

به منظور بدست آوردن یک ارتباط مناسب و منطقی در تاثیر سیمان انیدریت بر کیفیت مخزنی، نمودار ترکیبی چاه‌پیمایی در یکی از چاههای مورد مطالعه (بافت رسوبی در کنار داده‌های تخلخل و تراوایی مغزه، درصد حجمی انیدریت و چگالی) بررسی شده است(به شکل ۴ رجوع شود). انطباق این داده‌ها نشان می‌دهد که انیدریت درصد کمی را در رخساره‌های آهکی شامل می‌شود بطوریکه در مطالعات پتروگرافی نیز در رخساره‌های آهکی، انیدریت بصورت پراکنده و اندک مشاهده می‌شود. بنابراین انیدریت بر کیفیت مخزنی این رخساره‌ها تاثیری نداشته است. فراوانی انیدریت عمدتاً در ارتباط با گسترش سیمان انیدریت پرکننده تخلخل و فراگیر درون رخساره‌های دانه-غالب (دولوپکستون دانه‌غالب و دولوگرینستون) مخزن است که باعث کاهش شدید تخلخل و تراوایی آنها شده است. بنابراین بیشترین تاثیر را این نوع بافت انیدریت بر کیفیت مخزنی داشته است. اختلاف در اندازه پیک‌ها در مورد این سیمان در ارتباط با اندازه دانه و جورشدگی در رخساره‌های دانه غالب است. علاوه بر این انطباق قابل ملاحظه‌ای بین درصد حجمی انیدریت و چگالی مشاهده می‌شود. به طوری که در قسمتهای با انیدریت بالا، چگالی افزایش و در بخشهای با انیدریت پایین چگالی کاهش می-یابد. متوسط چگالی در رخساره‌های کلسیتی ۲/۷۴ و در رخساره‌های دولومیتی با سیمان انیدریت فراگیر ۲/۸۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب محاسبه شد.از سوی دیگر نمودار داده-های تخلخل و تراوایی مغزه برای انواع رخساره‌های مخزن متاثر از سیمان انیدریت نشان می‌دهد که بطور کلی رخساره‌های دارای انیدریت با گسترش پراکنده و کومه‌ای نسبت به انواع با سیمان انیدریت فراگیر از کیفیت مخزنی بهتری برخوردارند(شکل۱۵) که منطبق بر مطالعات پیشین کربناتهای پرمین-تریاس در این ناحیه است(Rahimpour et al. 2010).

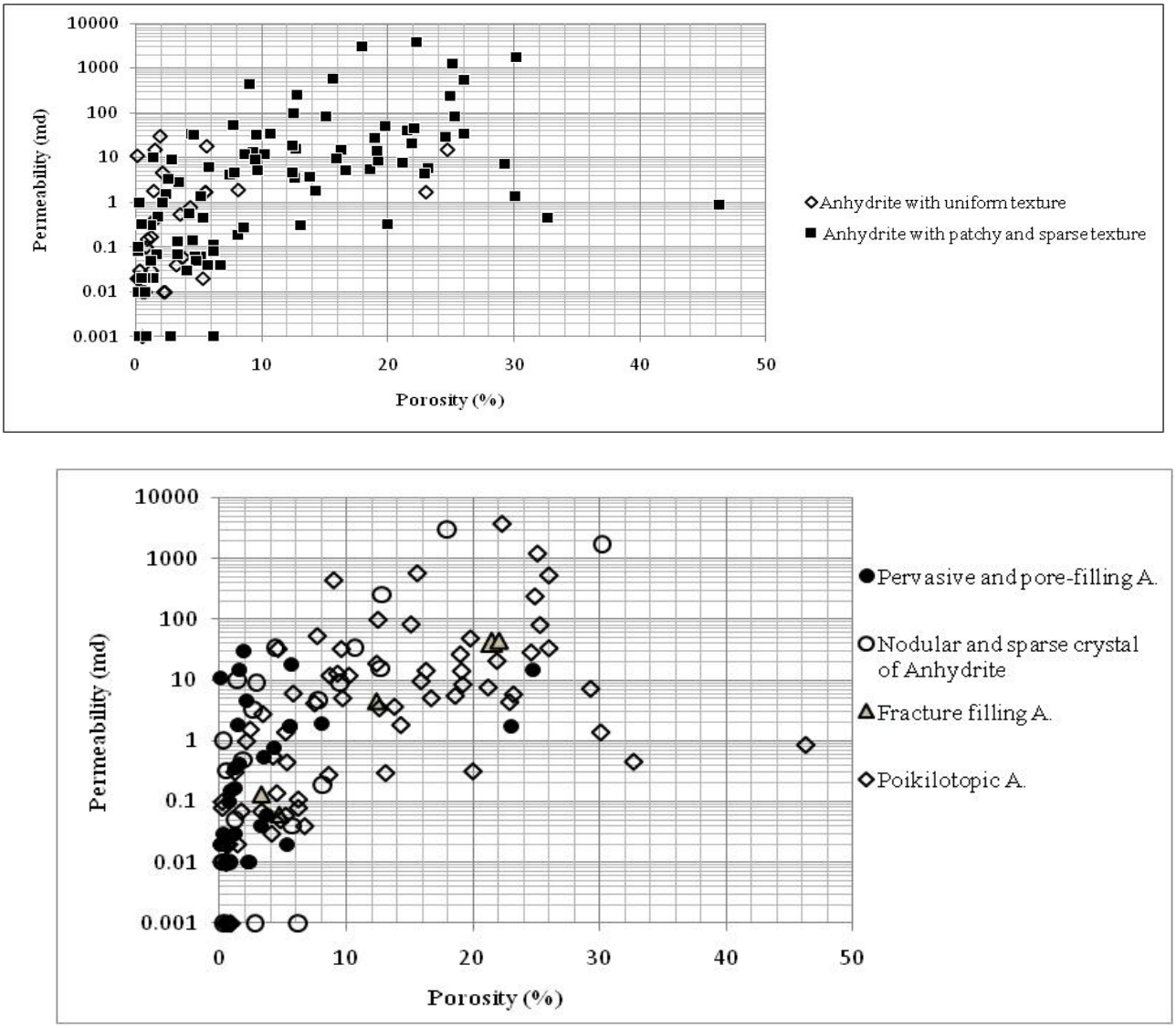


(الف)



(ب)

شکل ١٤- نمودار درصد حجمی انیدریت در برابر تخلخل (الف) و تراوایی (ب)



شکل ۱۵- نمودار داده‌های تخلخل و تراوایی مغزه در انواع رخساره‌های مخزن متاثر از سیمان انیدریت. الف) انیدریت با گسترش یکنواخت و کومه‌ای ب) انواع بافتهای مختلف انیدریت.

تاثیر دوگانه سیمان انیدریت پرکننده تخلخل و فراگیر بر کیفیت مخزنی

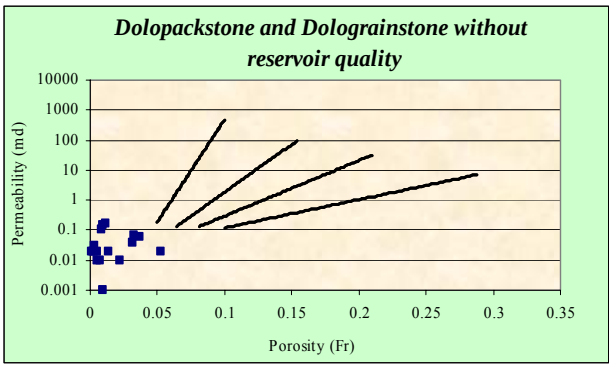
پرکننده تخلخل و فراگیر قرار گرفته‌اند نشان می‌دهد که تاثیر این نوع سیمان بر کیفیت مخزنی آنها بر خلاف سایر

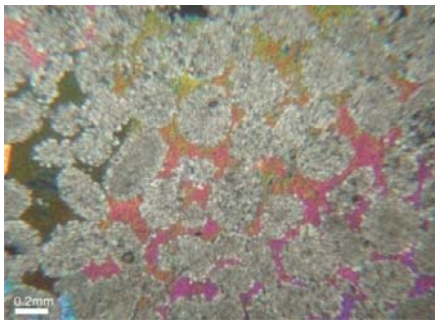
بررسیهای میکروسکوپی و داده‌های تخلخل و تراوایی مغزه در رخساره‌های دانه غالب مخزن(دولوگرینستون و دولوپکستون دانه غالب) که تحت تاثیر سیمان انیدریت

سیمانها (کلسیتی و دولومیتی) که عمدتاً کاهنده کیفیت مخزنی هستند به صورت دوگانه است. این دوگانگی اساساً

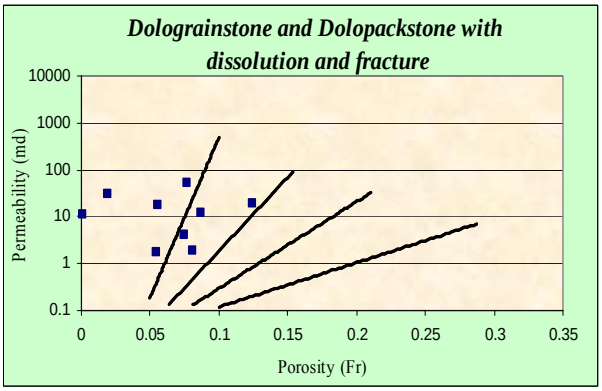
می‌تواند مرتبط با انحلال‌پذیری بیشتر این سیمان نسبت به سیمانهای کلسیتی و دولومیتی باشد. انیدریت به علت حساسیت زیاد می‌تواند به راحتی و بصورت کامل یا بخشی انحلال یابد(Gareth and Xiao 2005). بطور کلی این‌سیمان با گسترش در بین رخساره‌های دولوگرینستونی و دولوپکستونی مخازن مورد مطالعه باعث از بین رفتن کیفیت مخزنی آنها شده است. این موضوع با ترسیم داده-های تخلخل و تراوایی مغزه در این رخساره‌ها بر روی نمودار پتروفیزیکی لوسیا (۱۹۹۹) بخوبی نشان داده شده است(شکل ۱۶ الف). لذا به عنوان یک عامل مهم کاهنده کیفیت مخزنی در این رخساره‌ها محسوب می‌شود. اما تاثیر مثبت این سیمان بدین صورت است که با گسترش در بین اجزاء کربناته و سیمانی کردن کامل آن طی تدفین کم‌عمق و در نتیجه اشغال بخش عمده فضاهای خالی سنگ از تراکم بیشتر آن طی مراحل تدفین عمیق‌تر جلوگیری می-نماید. سپس طی مراحل بعدی در جاهایی که این رخساره-ها در نتیجه عملکرد سیالات تحت اشباع از سولفات، تحت تاثیر فرآیند انحلال واقع شده‌اند کیفیت مخزنی آنها بهبود یافته است. در برخی موارد بدلیل انحلال بخشی سیمان انیدریت در این رخساره‌ها، حفرات تخلخل بصورت پراکنده و غیریکنواخت ایجاد می‌شود که نسبت به نوع با توزیع یکنواخت تراوایی بالاتری دارد. زیرا در این حالت سیستم فضاهای خالی در نتیجه انحلال ثانویه ارتباط بهتری با هم داشته و در واقع از نوع فضاهای تخلخل موثر است-(Lonoy 2006). از طرفی سیمانی شدن کامل رخساره‌های دانه غالب توسط این انیدریت فراگیر احتمالاً باعث افزایش شکنندگی آنها شده است. بنابراین به منظور بررسی کیفیت مخزن در مخازنی که تحت تاثیر این سیمان واقع شده‌اند باید تاثیر فرآیندهای دیاژنزی دیگری همچون انحلال و شکستگی را نیز در مراحل بعدی دیاژنز در نظر گرفت. همچنین چنانچه در شکل۱۶ب مشخص است ترسیم داده-های تخلخل و تراوایی مغزه در رخساره‌های دانه پشتیبان با سیمان انیدریت فراگیر و پرکننده تخلخل که در مراحل بعدی تحت تاثیر انحلال و شکستگی قرار گرفته‌اند نشان می‌دهد که این رخساره‌ها از موقعیت با کیفیت مخزنی پایین به سمت گروه پتروفیزیکی ۱ لوسیا جابجایی پیدا کرده و کیفیت مخزنی آنها بهبود یافته است. جدول ۲ بطور خلاصه انواع بافتهای انیدریت را در ارتباط با رخساره‌های مختلف مخزن و کیفیت مخزنی آنها نشان می‌دهد.

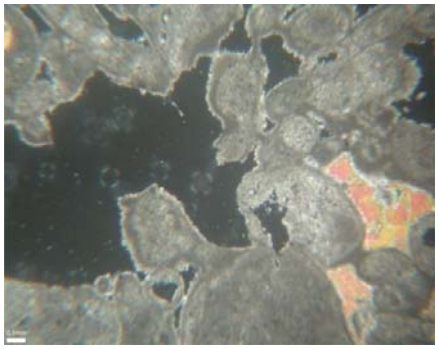
شکل ۱۷ بصورت شماتیک عوامل اصلی کنترل‌کننده گسترش انیدریت و تاثیر آن بر کیفیت مخزنی را در مخازن مورد مطالعه نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشخص است تشکیل این سیمان و تاثیر آن بر کیفیت مخزنی متاثر از سه عامل اصلی حضور شورابه های غنی از سولفات در محیط، بافت رسوبی و تاثیر فرآیند انحلال در مراحل بعدی دیاژنز و ارتباط متقابل بین آنهاست. چنانچه حضور شورابه‌های سولفاته حاصل از انحلال لایه‌های تبخیری و نفوذ آن به داخل رخساره‌های عمدتا نفوذپذیر و دانه غالب مخزن(گرینستون‌ها و پکستون‌های دانه غالب) عاملی است که ضمن دولومیتی کردن این رخساره‌ها، با ته نشست سیمان انیدریت بصورت پرکننده تخلخل بین دانه‌ای و فراگیر، باعث از بین رفتن کیفیت مخزنی در آنها شده است (شکل۱۶الف). از طرفی انحلال بعدی این سیمان طی مراحل بعدی دیاژنز به عنوان عامل مهمی در بهبود کیفیت مخزنی آنها عمل نموده است (شکل ۱۶ب).





الف)





ب)

شکل۱۶- الف) موقعیت دولوگرینستون‌ها و دولوپکستون‌های کامل سیمانی شده با سیمان انیدریت فراگیر در نمودار پتروفیزیکی لوسیا(۱۹۹۹). همانطور که مشخص است این سیمان باعث کاهش هم تخلخل و هم تراوایی در این رخساره‌ها شده است. ب) موقعیت دولوگرینستون‌ها و دولوپکستونهای همراه با شکستگی و انحلال سیمان انیدریت فراگیر در ارتباط با نمودار پتروفیزیکی لوسیا(۱۹۹۹). انحلال در این رخساره ها باعث بهبود کیفیت مخزنی شده است.

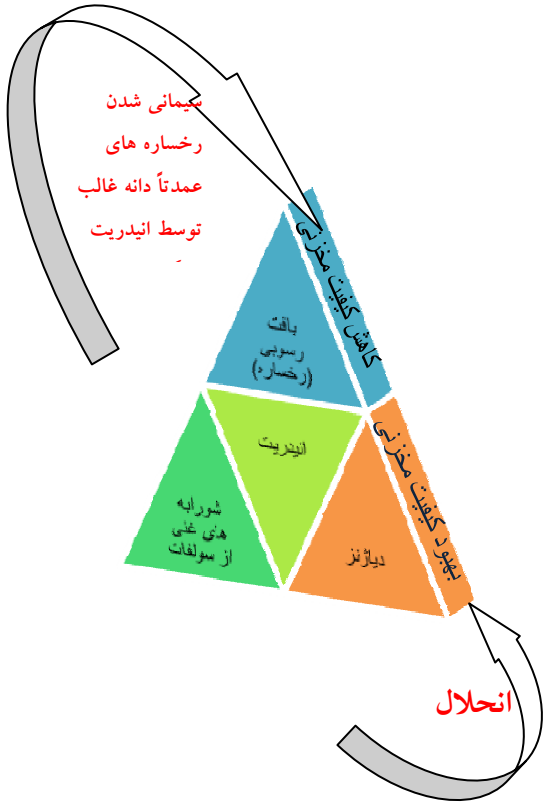
جدول۲ انواع بافتهای انیدریت موجود در مخزن و ارتباط آنها با

بافت انیدریت	فراوانی(%)	رخساره مرتبط	تاثیر روی تخلخل	تاثیر روی تراوایی	تاثیر روی کیفیت مخزنی
سیمان فراگیروپرکننده تخلخل	۲۰/۶۳	دولوپکستون ودولوگرینستون	منفی	منفی	به طور کلی منفی اما بستگی به مراحل بعدی دیاژنزنیزدارد
پویکیلوتوپیک	۵۹/۵	متغیر	منفی	ناچیز	ناچیز
نودول انیدریت	۶/۳	عمدتا دولومادستون	ناچیز	می تواند مثبت باشد	تا حدودی می تواند موثر باشد
بلورهای پراکنده تبخیری	۷/۱	دولومادستون	ناچیز	ندارد	ناچیز
انیدریت پرکننده شکستگی	۳/۹۶	دولومادستون	ناچیز	ناچیز	ناچیز
رگچه های تبخیری	۲/۳۸	دولومادستون	ندارد	می تواند موثر باشد	ناچیز

فرآیند دولومیتی شدن و ارتباط آن با تبخیریها در مخازن مورد مطالعه

چنانچه قبلاً نیز ذکر شد بخش عمده تبخیریها و از جمله انیدریت موجود در مخازن مورد مطالعه درون رخساره‌های دولومیتی بصورت جانشینی، جایگیری و بویژه پرکننده حفرات تخلخل تشکیل شده است که خود تاییدی بر تاثیر شورابه‌های تبخیری در فرآیند دولومیتی شدن است(Ehrenberg 2006). بطورکلی فرآیند دولومیتی شدن به دوصورت جانشینی(حفظ کننده و تخریب کننده فابریک)و سیمان دولومیتی در مخزن عمل نموده است که بر اساس شواهد بافتی و مطالعات میکروسکوپ الکترونی قابل تفکیک است. دولومیت های جانشینی با حفظ فابریک اولیه، که بخش عمده دولومیت‌ها را شامل می‌شوند همراه با انیدریت و در طول مراحل‌اولیه‌دیاژنز (دولومادستونها) تا تدفین کم‌عمق(دولوگرینستونها و دولوپکستونها) تشکیل شده‌اند. این دولومیتها عمدتاً ریزبلورین بوده و توسط عوارض دیاژنزی بعدی(استیلولیت و شکستگی) قطع‌شده‌اند. دولومیتی شدن با تخریب فابریک اولیه همراه با ایجاد بلورهای درشت تری نسبت به نوع حفظ کننده فابریک است و شواهد بافتی از قبیل وجود شبح‌هایی از استیلولیت درون این دولومیت هابیانگر تشکیل آنها در نتیجه تبلور دوباره دولومیتهای اولیه طی مراحل دیاژنز تدفینی‌است(Rahimpour-Bonab et al. 2010). اما در اینجا باید توجه داشت که تاثیر شورابه‌های تبخیری در فرآیند دولومیتی‌شدن متفاوت است. بخشی در ارتباط با محیط رسوبی (محیط سبخایی و شورابه های لاگونی) و طی مراحل دیازنز آغازین است. چنانچه گسترس ندولها و بلورهای پراکنده تبخیری(ژیپس و انیدریت) درون رخساره‌های‌دانه‌ریز دولومادستونی و دولووکستونی مثالی از این حالت است که طی آن در نتیجه تبخیر سطحی و تغلیظ و ته نشست تبخیریها، نسبت Mg/Ca در محیط بالا رفته و باعث دولومیتی شدن رسوبات آهکی اولیه شده است. در این حالت فرآیند دولومیتی شدن و تشکیل تبخیریها تقریباً همزمان صورت گرفته است.اما بخشی از فرآیند دولومیتی‌شدن در ارتباط با جریان و نفوذ شورابه‌های حاصل ار انحلال تبخیریهای اولیه به درون رسوبات عمدتاً متخلخل و نفوذپذیر مخزن و همراه با گسترش سیمان انیدریت درون این رخساره‌ها می‌باشد. بنابراین در این صورت این دولومیت‌ها طی دیاژنز بعدی و بعد از دولومیت های دیاژنزی اولیه تشکیل شده‌اند. این موضوع بویژه در مورد سیمان انیدریت فراگیر و پرکننده تخلخل درون رخساره‌های دانه‌غالب و دانه‌درشت مخزن (دولوگرینستونها و دولوپکستونهای دانه‌غالب) بخوبی مشهود است.فرآیند گسترش سیمان انیدریت در این رخساره‌ها (که قبلاً کلسیتی بوده) دولومیتی شدن آنها را می‌توان به نفوذ شورابه‌های حاصل از انحلال تبخیری‌های اولیه بدرون این رخساره‌ها طی تدفین کم عمق نسبت داد که فضای باز بین دانه‌های کربناته امکان جریان و حرکت شورابه‌ها را درون آنها تسهیل نموده است. این وضعیت همچنین در مخازن دولومیتی پرمین غرب تگزاس گزارش شده است(Saller and Henderson 1998).این شورابه‌ها غنی از یونهای منیزیم و بویژه سولفات بوده لذا با عبور از میان رخساره‌های دانه غالب مخزن و تبادلات یونی با آنها، منیزیم جانشین بخشی از کلسیم آنها شده و ضمن فرآیند دولومیتی شدن، یون کلسیم آزاد شده با یون سولفات ترکیب یافته و آن را بصورت سیمان انیدریت در فضای باز درون این رخساره‌ها ته نشست داده است. لذا فرآیند گسترش سیمان انیدریت در این رخساره‌ها نیز تقریباً همزمان با دولومیتی شدن آنها یا اندکی پس از آن صورت گرفته است. بطور کلی نتایج این مطالعه در خصوص فرآیند دولومیتی شدن و ارتباط آن با تبخیریها، منطبق بر نتایج کارهای قبلی در مخازن مورد مطالعه و معادل آنها است که دومکانیسم تبخیر

سطحی(سبخا)و نشت شورابه‌ای را مدنظر قرار داده اند(Ehrenberg 2006; Alsharhan 2006; Insalaco et al. 2006; Rahimpour-Bonab et al. 2010) ذکر این نکته نیز ضروری است که در برخی رخساره‌های دانه‌غالب مخزن که بدلایل مختلف از دسترس شورابه‌ها مصون مانده‌اند انیدریت تشکیل نشده و یا بصورت پراکنده است لذا این رخساره‌ها بصورت کلسیتی باقی مانده‌اند. بنابراین در بررسی تاثیر سیمان انیدریت بر کیفیت مخزنی در مخازن مورد مطالعه باید به این نکته توجه داشت که این سیمان عمدتاً بر رخساره‌های دولومیتی موثر بوده است.



شکل۱۷- سه فاکتور اصلی کنترل کننده گسترش انیدریت و تاثیر آن بر کیفیت مخزنی در مخازن مورد مطالعه

نتیجه‌گیری

گسترش انیدریت به صورت بافتها و اشکال مختلف در مخزن از جمله مهمترین فرآیندهای دیاژنزی در مخازن کربناته دالان بالایی و کنگان است. این بافتها شامل انیدریت لایه‌ای، سیمان انیدریت پرکننده تخلخل و فراگیر، انیدریت پویکیلوتوپیک، ندولها و بلورهای پراکنده تبخیری، سیمان انیدریت پرکننده شکستگی و رگچه‌های تبخیری است. این بافتها طی مراحل مختلف دیاژنز و به درجات متفات، انواع رخساره‌های مخزن رامتاثر ساخته‌اند. حضور سیمان انیدریت در رخساره‌های دولومیتی و عدم حضور و یا مقدار بسیار ناچیز آن در رخساره‌های آهکی بیانگر تاثیر شورابه‌های غنی از سولفات و منیزیم در فرآیند

دولومیتی شدن است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که سیمان انیدریت پرکننده تخلخل و فراگیر نسبت به دیگر انواع بافتهای انیدریت بیشترین تاثیر را بر کیفیت مخزنی داشته است و با گسترش در بین رخساره‌های دانه غالب مخزن طی مراحل تدفین کم‌عمق، تخلخل و تراوایی آنها را به شدت کاهش داده است. اما از طرف دیگر تاثیر فرآیندهای دیگری مانند شکستگی و بویژه انحلال را در این رخساره‌ها طی مراحل بعدی دیاژنز باید در بررسیهای مخزنی مد نظر داشت. بنابراین گسترش انیدریت و بافتهای مختلف آن و ارتباط آنها با کیفیت مخزنی تحت کنترل سه عامل بافت رسوبی اولیه، حضور شورابه‌های غنی از سولفات در محیط و در نهایت تاثیر فرآیندهای دیاژنزی دیگری مانند انحلال و شکستگی طی مراحل بعدی می‌باشد.

منابع

۱-لطف پور، مسعود؛ آدابی، محمد حسین؛ قویدل سیوکی، محمد، ۱۳۸۲، بررسی رخساره های میکروبی (استروماتولیتی و ترومبولیتی) قاعده سازند کنگان با نگرش ویژه بر گذر پرمو-تریاس در ناحیه زاگرس. مجله علوم دانشگاه تهران، جلد سی ام، شماره ۲ (۳۶۵-۳۴۱).

2- Aali, J., H. Rahimpour-Bonab, and M.R. Kamali, 2006, Geochemistry and origin of the world largest gas field from Persian Gulf, Iran: Journal of Petroleum Science and Engineering, **v.** 50, p. 161-175.

3- Alsharhan, A.S., 2006, Sedimentological character and hydrocarbon parameters of the middle Permian to Early Triassic Khuff Formation: United Arab Emirates, GeoArabia, **v.**11, 121–158.

4- Alsharhan, A.S., and G.L. Whittle, 1995, Carbonate – evaporite sequences of the Late Jurassic, Southern and Southwestern Arabian Gulf: AAPG Bulletin, **v.** 79, No**.** 11, p. 1608.

5- Buxton, M.W.N. and M.H. Pedley, 1989, A standardized model for Tethyan carbonates ramps: J. Geol. Soc. London, 146: 746-748.

6- Cai-neng, Z., T. Shi-zhen, Z. Hui, Z. Xiang-xiang, H. Dong-bo, Z. Chuan-min, W. Lan, W. Xue-song, L. Fu-heng, Z. Ru-kai, L. Ping, Y. Xuan-jun, X. Chun-chun, and Y. Hua, 2008, Genesis, classification, and evaluation method of diagenetic facies. In: Petroleum Exploration and Development, **v.** 35, No. 5, p. 526-540.

7- Dunham, R.J., 1962, Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: AAPG Bulletin, Memoir1, p. 108–121.

8- Ehrenberg, S.N., 2006, Porosity destruction in carbonate platforms: Journal of Petroleum Geology, **v.** 29 (1), pp. 41-52.

9- Esrafili-Dizaji, B., and H. Rahimpour-Bonab, 2009, Effects of depositional and diagenetic characteristics on carbonate reservoir quality: a case study from the South Pars gas field in the Persian Gulf. In: Petroleum Geoscience, **v.** 15, pp. 1–22.

10- Flugel, E., 2004, Microfacies of Carbonate Rocks: Analysis, Interpretation and Application. In Springer Verlag, New York, 996 pp.

11- Gareth, D.J., and Y. Xiao, 2005, Dolomitization, anhydrite cementation and porosity evolution in a reflux system: insights from reactive transport models. In: AAPG Bulletin, **v.** 89, No. 5, p. 577-601.

12- Gundogan, I., O. Mehmet., and D. Tolga., 2005, Sedimentology, petrography and diagenesis of Eocene–Oligocene evaporites: the Tuzhisar Formation, SW Sivas Basin, Turkey. In: Journal of Asian Earth Sciences, **v.** 25, p.791–803.

13- Hovorka, S.D., 1992, Halite pseudomorphes after gypsum in bedded anhydrite

carbonate unit in central-western Crete (Greece): an evaporite formation transformed into solution-collapse breccias. In: Sedimentology, **v.** 49, No. 5, p. 1113-1132.

23- Prothero, D.R., and F. Schwab, 1996, Sedimentary Geology: An introduction to sedimentary rocks and staratigraphy. In: New York: W.H. Freeman & Co. pp. 575.

24- Rahimpour-Bonab, H., B. Esrafili-Dizaji, and V. Tavakoli, 2010, Dolomitization and anhydrite precipitation in Permo-Triassic carbonates at the South Pars gasfield, offshore Iran: Controls on reservoir quality. In: Journal of Petroleum Geology, **v.** 33(2), pp. 1-24.

25- Saller, A.H., and N. Henderson, 1998, Distribution of porosity and permeability in platform dolomites: Insight from the Permian of West Texas. In: AAPG Bulletin, **v.** 82, No**.** 8, p. 1528-1550.

26- Warren, J.K., 2006, Evaporites: Sediments, Resources and Hydrocarbons. In: Springer--Verlag, Brunei, pp.1035.

27- Wilson, A., W. Sanford, F. Whitaker, and P. Smart, 2001, Spatial patterns of diagenesis during geotherrmal circulation in carbonate platforms: American Journal of Science, **v.** 301, p. 727–752**.**

28- Wilson, J.L., 1975, Carbonate Facies in Geologic History: Springer-Verlag, New York, N.Y., 471 pp.

29- Zeigler, M.A., 2001, Late Permian to Holocene paleofacies evolution of the Arabian plate and its hydrocarbon occurrences: GeoArabia, Gulf Petrolink, Bahrain, **v.** 6, No. 3, p. 445 – 504.

– clue to gypsum – anhydrite relationships: Journal of Sedimentary Petrology, **v.** 62, No. 6, p. 1098 – 1111.

14- Insalaco, E., A. Virgone, B. Courme, J. Gaillot, M.R. Kamali, A. Moallemi, M. Lotfpour, and S. Monibi, 2006, Upper Dalan and Kangan formation between the Zagros Mountains and offshore Fars, Iran: depositional system, biostratigraphy and stratigraphic architecture. In: GeoArabia, Gulf PetroLink, Bahrain **v.** 11, No. 2.

15- Kasprzyk, A., and F.Otri, 1998, Palaogeographic and burial controls on anhydrite genesis: the Badenian basin in the Carpathian Fore deep (southern Poland, western Ukraine). In: Sedimentology **v.** 45, 889-907.

16- Kendall, A. C., and K.L.Walters, 1977, The age of metasomatic anhydrite in Mississippian reservoir carbonates, southeastern Sasketchewan: Canadian Journal of Earth Sciences, **v.** 15, p. 424-430.

17- Lonoy, A., 2006, Making sense of carbonate pore systems: AAPG Bulletin, **v.** 90, No. 9, p. 1381-1405.

18- Lucia, F.J., 1999, Carbonate Reservoir Characterization: New York, Springer-Verlag, 226 pp.

19- Lucia, F.J., 2007, Carbonate Reservoir Characterization. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp. 331.

20- Machel, H.G., and E.A.Burton, 1991, Burial – diagenetic sabkha – like gypsum and anhydrite nodules: Sedimentary Geology, **v.** 61, No. 3, p. 394-405.

21- Machel, H.G., 1993, Anhydrite nodules formed during deep burial. Journal of Sedimentary Petrology, **v.** 63, No. 4, p. 659-662.

22- Pomoni-Papaioannou, F., and V. Karakitsios, 2002, Facies analysis of the Trypali