

فاکتورهای کنترل کننده 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، پویکیلو توپیک، 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 رخساره‌های آهکی بصورت پراکنده و خیلی اندک است و لذا تاثیری بر کیفیت مخزنی آنها نداشته است. این امر همچنین بیانگر تاثیر شوره‌های 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 دانه‌پشتیان و پر کردن تمامی فضاهاى خالی طی تدفین کم عمق کیفیت مخزنی آنها را به شدت کاهش داده است. اما از طرفی با توجه به انحلال‌پذیری این نوع سیمان، در مراحل بعدی دیاژنزی 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، شوره‌های غنی از سولفات، کیفیت مخزنی، دیاژنزی، انحلال، شکستگی

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 متأثر از فرآیندهای مختلف دیاژنزی در طول زمان است (Zeigler 2001; Rahimpour-Bonab et al 2010). از جمله مهمترین این فرآیندها تشکیل سیمان انیدریت در مخزن است. طبیعتاً گسترش انیدریت بویژه بصورت سیمان پرکننده حفرات بر کیفیت مخزنی تاثیرگذار است. 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; Esrafil-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 (شکل ۲)، 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^۱ (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 آلزارین قرمز^۲ رنگ آمیزی شدند. به منظور تعیین درصد انیدریت در هر مقطع نازک از روش شمارش نقطه‌ای^۳ با استفاده از نرم افزار تحلیل تصاویر^۴ استفاده شد. در این مطالعه تقسیم‌بندی بافتهای انیدریت بر اساس لوسیا^۵ (۱۹۹۹) و با تغییراتی جزئی انجام شده است

¹ - Dunham

² - Alizarin Red-S

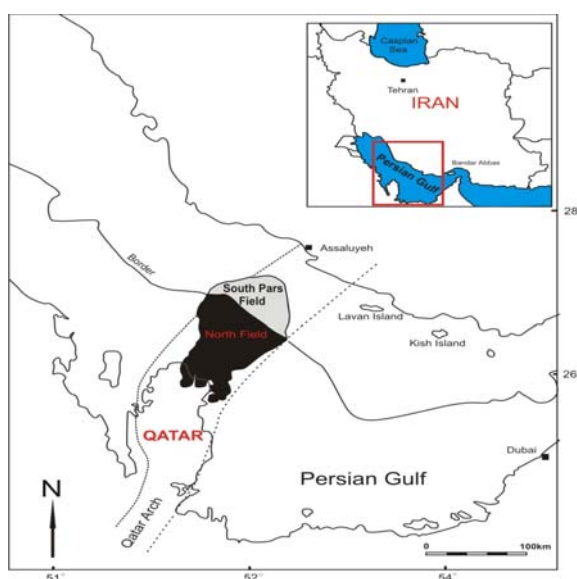
³ - Point-Counting

⁴ - Image Analysis

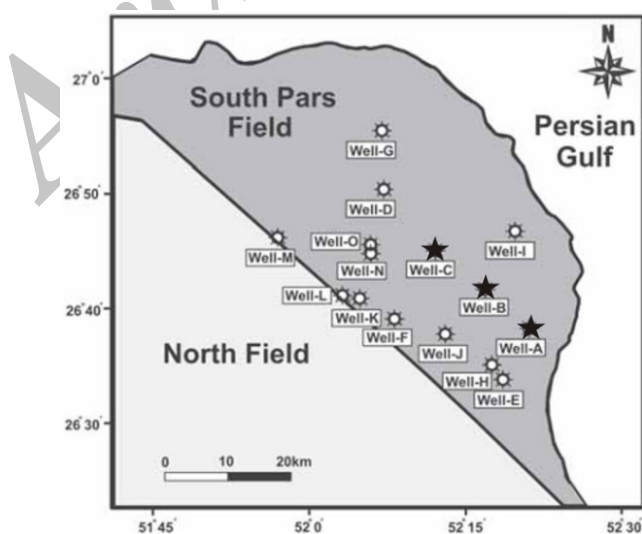
⁵ - Lucia

تخلخل و تراوایی مغزه یکی از چاهها (شماره ۹) که اطلاعات آن در دسترس بود استفاده شد.

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



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 علائم 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 رخساره‌های میکروسکوپی^۱ موجود در مخزن پرداخته می‌شود. همچنین این رخساره‌های میکروسکوپی همراه با مشخصه‌های 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 خرده‌های فسیلی (دوکفه‌ای، خارپوست و بریوزوئر) تشکیل شده است. جورشدگی خوب و گسترش فراوان سیمان دریایی اطراف دانه‌ها به صورت سیمان هم ضخامت^۲ و تیغه‌ای^۳ از ویژگی‌های این رخساره است (شکل ۳ الف). این رخساره عمدتاً در بخش‌های مخزنی K2 و K4 مخازن مورد مطالعه گسترش دارد (شکل ۴). محیط تشکیل این رخساره به صورت یک محیط پرانرژی و مربوط به بخش روبه دریا و مرکز پشته‌های اوئیدی-بایوکلستی^۴ تفسیر می‌شود. بنابراین این رخساره معادل کمر بند 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 (شکل ۴). دولومیتی شدن عمدتاً بصورت انتخاب کننده فابریک و ریزبلور است اما در مواردی که بصورت تخریب کننده 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 گسترش نیافته و با ضخامت کم است (شکل ۳ ب). این رخساره عمدتاً در بخش‌های مخزنی K3 و K4 مخازن مورد مطالعه گسترش دارد (شکل ۴). با توجه 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 شسته شده^۵ از پشته‌های سدی به سمت لاگون در نظر گرفته شود. این رخساره معادل کمر بند رخساره ای 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 (شکل ۳ پ، ت). در این رخساره پلت و اجزاء اسکلتی مانند جلبک، گاستروپود، آنکوئید و دوکفه‌ای در زمینه‌ای از گل آهکی قرار دارند. جورشدگی اجزاء کم بوده و عمدتاً میکرایتی هستند. در مواردی شواهدی از آشفستگی زیستی^۶ در این رخساره

¹ - Microfacies

² - Isopachous

³ - bladed

⁴ - Oolitic-Bioclastic Shoals

⁵ - Spill over Fan

⁶ - Bioturbation

مشاهده می‌شود. این رخساره نیز عمدتاً در واحدهای مخزنی K3 و K4 مشاهده می‌شود (شکل ۴). بر اساس شواهد بافتی و فسیل‌شناسی 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 جانیشینی اجزاء و ماتریکس همراه با ایجاد بلورهای ریز (کمتر از ۲۰ میکرون) بوده است. گسترش انیدریت نیز با جانیشینی اجزاء و بصورت پراکنده و کومه‌ای در این رخساره عمل نموده است (شکل ۳ 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 (شکل ۳ ث، ح). جلبکهای سبز-آبی یا سیانوباکتیریا 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 صرفاً در ابتدای واحد مخزنی K2 وجود دارد (شکل ۴). محیط تشکیل آن در ارتباط با پهنه بین جزرومدی تا لاگون بوده و معادل کمربند رخساره‌ای ۷ و ۸ ویلسون و ۱ باکستون و پدلی است. این رخساره به عنوان یک افق کلیدی^۱ 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 می‌شوند.

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 (شکل ۳ 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 (شکل ۱۰ الف و ب). در مواردی آثاری از بلورهای پراکنده تبخیری (ژپیس و انیدریت) و ترکهای پر شده با سیمان تبخیری در این رخساره مشاهده می‌شود (شکل ۳ چ). این رخساره در تمام واحدهای مخزنی بویژه K1 و K3 گسترش دارد (شکل ۴). 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 ژپیس و عمدتاً 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 می‌شوند. این ندولها در نتیجه تراکم و بهم چسبیدن، ساختارهای ویژه‌ای به نام ساختمان قفس مرغی^۲ را بوجود می‌آورند (شکل ۳ ه) و در نهایت به لایه انیدریت در محیط سبخا تبدیل می‌شوند. این رخساره در ادامه رخساره قبلی قرار دارد و تقریباً در تمام واحدهای مخزنی مشاهده می‌شود (شکل ۴). این رخساره معادل کمربند رخساره‌ای ۱ باکستون و پدلی و ۸ و ۹ ویلسون است.

¹ - Key Bed

² - Chickenwire Structure

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

۷- لایه انیدریت: در این رخساره بلورهای انیدریت بصورت بافت درهم فشرده و بلورین قابل تشخیص است (شکل ۳ 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 می‌شود (شکل ۴). 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 تبخیرها گسترش یافته‌اند. این تبخیرها عمدتاً بصورت ژپس و در شرایط شوری و دمای بالا بصورت انیدریت نیز ته نشین می‌شوند. همچنین لایه‌های ژپس اولیه می‌توانند در طول تدفین و افزایش دما در نتیجه آزدایی به ژپس تبدیل شوند. این رخساره معادل کمر بند رخساره ای ۱ باکستون و پدلی و ۹ ویلسون است که در یک محیط فوق جزرومدی (سبخا) گسترش یافته است.

چنانچه مشخص است بطور کلی انواع رخساره‌های شناسایی شده در مخزن در ارتباط با زیرمحیطهای پشته سدی (گرینستون/دولوگرینستون تا پکستون اوئیدی- بایوکلستی)، لاگون (وکستون/دولووکستون پلوتیدی- بایوکلستی) و پهنه بین جزر و مدی^۱ و بالای جزرومدی^۲ (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 خیلی کم شبیه به یک محیط رمپ کربناته هم شیب^۳ است. از طرفی گسترش تبخیرها 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. شکل ۴ توالی انواع رخساره‌های شناسایی شده در مخازن دالان بالایی و کنگان را به همراه داده‌های 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 بطور کلی 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.

۱ - Intertidal
۲ - Supratidal

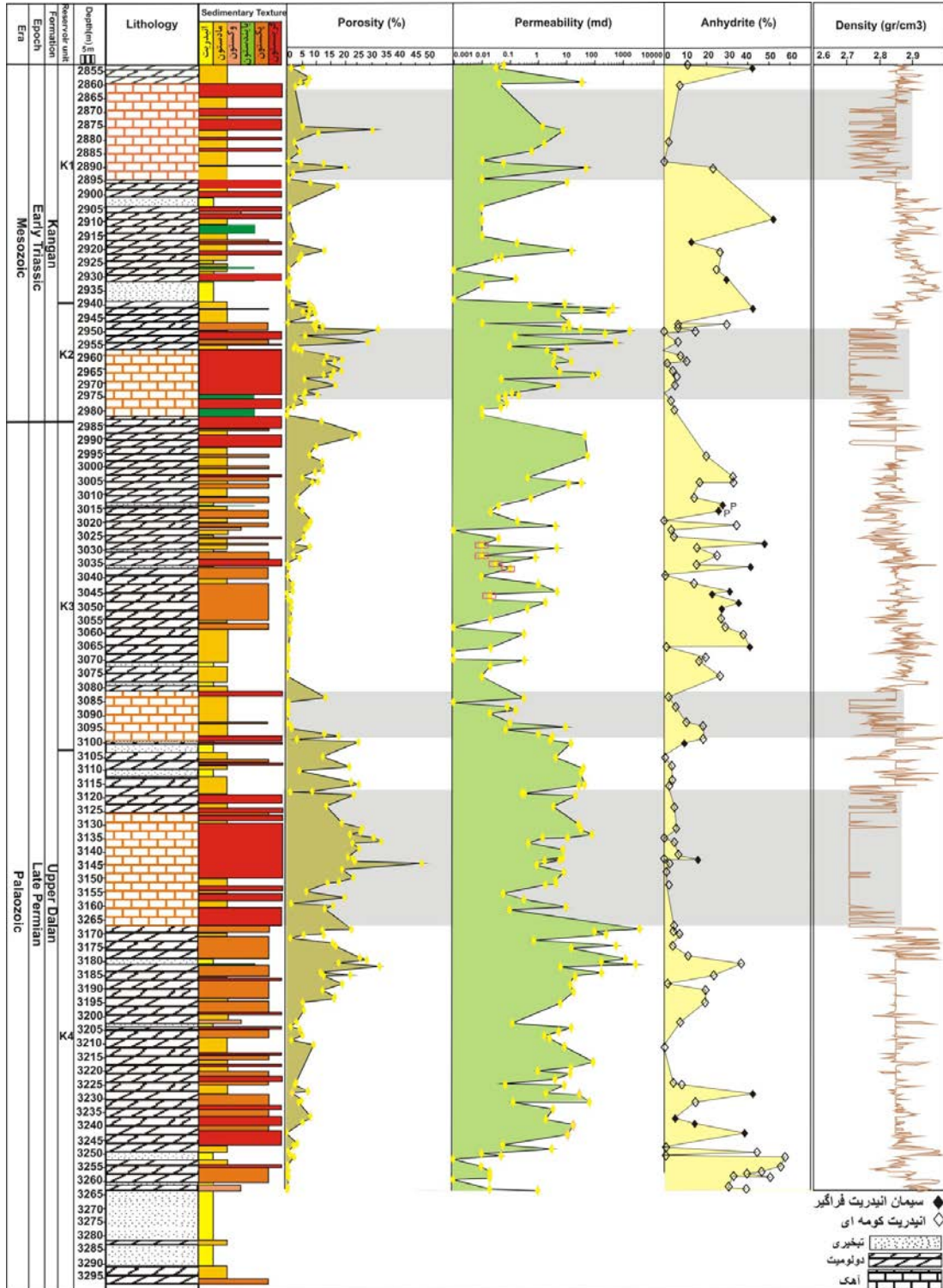
³ - Homoclinal Ramp



شکل ۳- رخساره های شناسایی شده در مخازن مورد مطالعه. الف) رخساره گریستون اوئیدی- بایوکستی با سیمان تیغه ای در اطراف اجزاء ب) رخساره گریستون تا پکستون اوئیدی-پلوئیدی با سیمان نازک در اطراف اجزاء پ) رخساره پکستون پلوئیدی - بایوکستی ت) رخساره پکستون پلوئیدی ث) رخساره استروماتولیت با بافت لامینه ای ح) رخساره ترومبولیت با بافت لخته ای ج) رخساره مادستون تا وکستون بایوکستی چ) رخساره مادستون دولومیتی با ترکهای پر شده با بلورهای تبخیری ه) رخساره مادستون ندولی با ساختمان قفس مرغی و) رخساره انیدریت با بلورهای کشیده و درهم بافته.

جدول ۱ - مشخصه‌های کلی بافتی و کانی‌شناسی رخساره‌های میکروسکوپی شناسایی شده در مخازن مورد مطالعه

نام رخساره میکروسکوپی	شواهد بافتی و کانی‌شناسی	اجزاء تشکیل دهنده غالب	اندازه دانه و جورشدگی	محیط رسوبی	کمر بند رخساره ای	فرآیند دیاژنزی غالب
گرینستون/دولوگرینستون اوئیدی - بایوکلستی	دانه غالب و دانه پشتیبان، آهک و دولومیت	اوئید، دوکفه‌ای، بریوزوآ	دانه درشت، جورشدگی خوب	قسمت روبه دریا و مرکز پشته‌های سدی	۶ ویلسون و ۳ باکستون و پدلی	گسترش خوب سیمان دور دانه‌ای (تیغه‌ای) 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 دوردانه‌ای 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، آشفستگی زیستی
استروماتولیت - ترومولیت	لامیناسیون موجی تا نواری و یا بافت لخته‌ای 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 چشم‌پرنده‌ای، بلورهای پراکنده تبخیری، دولومیتی شدن
مادستون - دولومادستون-و کستون	گل غالب، آهک و دولومیت	آثار پراکنده‌ای از میلیولید و استراکود	دانه ریز	پهنه بین جزر و مدی	۸ ویلسون و 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 و ۹ ویلسون و ۱ باکستون و پدلی	انحلال، شکستگی
لایه انیدریت	بافت متراکم، انیدریت	—	بلورین	محیط بالای بین جزرومدی (سبخا)	۹ ویلسون و ۱ باکستون و پدلی	انحلال



شکل ۴- توالی رسوبی مخازن دالان بالایی و کنگان در چاه شماره ۹ میدان پارس جنوبی به همراه داده های تخلخل و تراوایی مغزه، درصد حجمی انیدریت و داده های چگالی. فلش ها روند کلی کم عمق شوندگی به سمت بالا را در بخشهایی از مخزن نشان می دهند.

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 پویکیلو توپیک و انیدریت ندولی و نیز انواع با اهمیت کمتر شامل بلورهای تبخیری پراکنده و منفرد، سیمان انیدریت پرکننده شکستگی، - رگچه‌های تبخیری و ندولهای انیدریت دفنی است.

الف) انیدریت لایه‌ای^۱: همانطور که قبلاً 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 (شکل ۳و، ۵ الف و ب). این نوع انیدریت احتمالاً به صورت ژپس اولیه در شورابه‌های سبخایی ته نشین شده و سپس در نتیجه آزدایی و تدفین به انیدریت تبدیل شده است. لایه انیدریت معمولاً به عنوان یک سد یا پوش سنگ برای مخازن عمل می‌نماید (Lucia 1999).

ب) سیمان انیدریت پرکننده تخلخل و فراگیر^۲:

این سیمان بصورت بلورهای بزرگ و عمدتاً پرکننده تخلخل بین دانه‌ای در دولوگریستونها و نیز دولوپکستونهای

دانه‌غالب^۳ گسترش یافته است. همچنین در مواردی به صورت جانثینی 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 سیمان بصورت مجموعه‌ای از بلورهای بزرگ، یکنواخت و پیوسته فضای تخلخل بین دانه‌ها را پر نموده‌اند. در مواردی تشکیل مرز سه‌گانه^۴ را در سطوح تماس بین بلورهای درشت این سیمان می‌توان مشاهده کرد (شکل ۶ 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 کم عمق در نظر

³ - Grain-dominated

⁴ - Triple-Junction

¹ - Layered Anhydrite

² - Pore-filling and Pervasive Anhydrite Cement

غالب و دانه درشت 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.

گرفت (شکل ۶ 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-



شکل ۵ الف) تصویر میکروسکوپی از انیدریت لایه‌ای با بافت متراکم و درهم فشرده (واحد مخزنی K4- عمق ۳۲۶۰/۷۰). ب) تصویر مغزه از لایه انیدریت.

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 (شکل ۷ الف). اما برخی شواهد از قبیل وجود ادخالهای دولومیت (شکل ۷ ب) یا سیمانهای مراحل قبلی درون این نوع سیمان، همراهی آن با سیمانهای مراحل دفنی، تشکیل این سیمان بعد از تراکم (دربرگیرنده آلومک‌های دارای

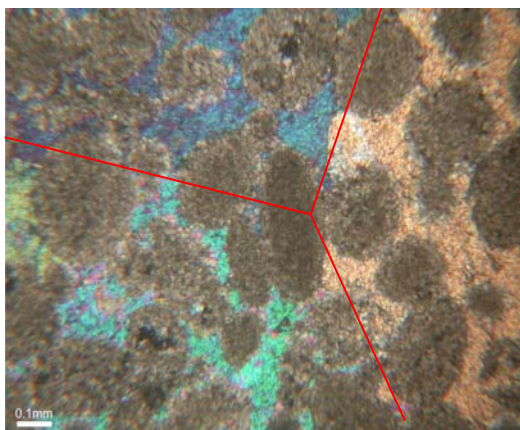
ج) انیدریت پوکیلو تویپیک^۱: این نوع انیدریت به صورت تجمعی از بلورهای بزرگ با گسترش پراکنده و نامنظم، در مواردی همراه با ادخالهای دولومیت و یا ماتریکس آهکی درون مخزن وجود دارد. در انواع رخساره‌های مخزنی مانند دولوپکستونهای گل‌پشتیان، دولومادستونها، دولوستونها و نیز گرینستونها طی مراحل مختلف دیاژنزی تشکیل شده است. بیشتر بصورت جانشینی

^۱ - Poikiloplastic Anhydrite

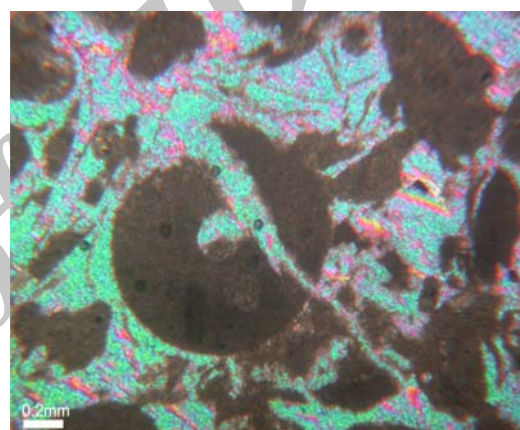
تخلخل بهم مرتبط بوده که از دیدگاه مخزنی حائز اهمیت است (Lonoy 2006).

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).

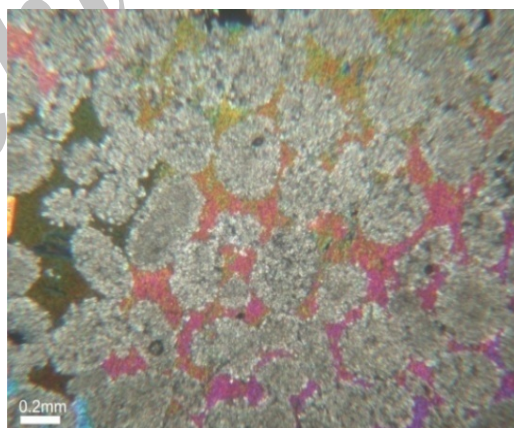
اثرات تراکم (شکل ۷ ج)، تشکیل آن بصورت بلورهای بزرگ و نیز با رخ مشخص (شکل ۷ د، ه) و آغستگی این سیمان با مواد بیتومینی (شکل ۷ و) بیانگر تشکیل آن طی مراحل دیاژنز تدفینی می‌باشد. البته باید توجه داشت در مواردی انحلال انیدریت فراگیر بصورت بخشی آن را بصورت کومه‌ای و پراکنده نمایان می‌سازد (شکل ۷ ز). در این حالت انحلال این سیمان همراه با ایجاد فضاهای



(الف)

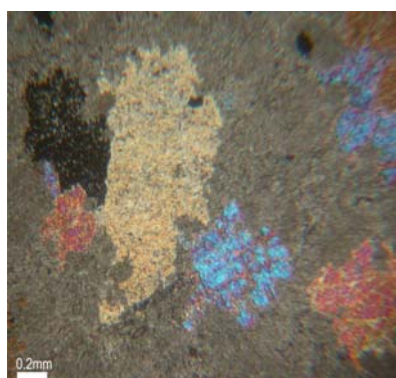


(ب)

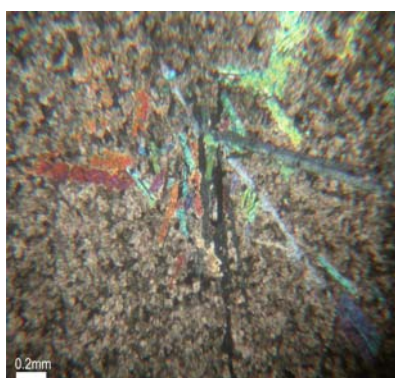


(ج)

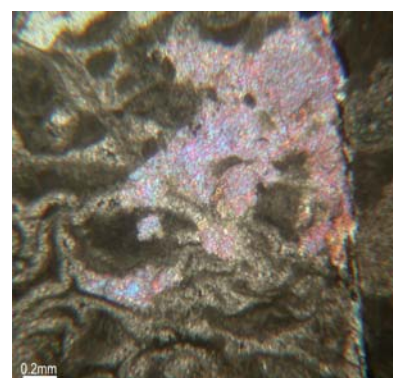
شکل ۶- الف) تصویر میکروسکوپی از سیمان انیدریت فراگیر در یک دولوگریستون (سازند دالان بالایی - بخش مخزنی K4) متشکل از بلورهای بزرگ به همراه مرز سه‌گانه (Triple Junction) در محل تماس آنها که توسط خطوطی مشخص شده است. ب) سیمان انیدریت فراگیر به صورت سیمان جوش و پرکننده شکستگی ج) سیمان انیدریت به صورت فراگیر و پرکننده تخلخل بین دانه‌ای. فضای باز بین اوئیدها بیانگر این است که رخساره قبل از تشکیل این سیمان تدفین قابل ملاحظه‌ای تحمل نکرده است.



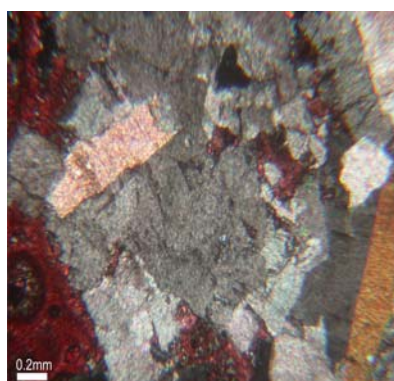
(الف)



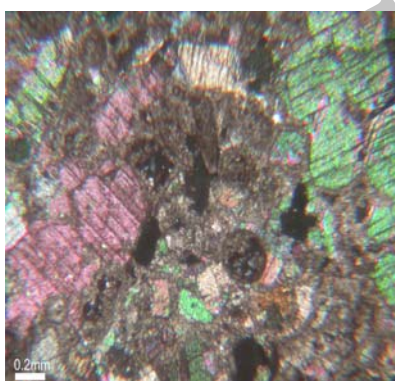
(ب)



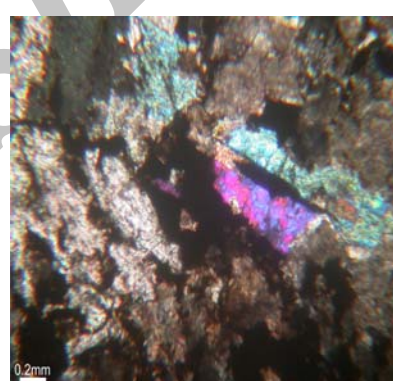
(ج)



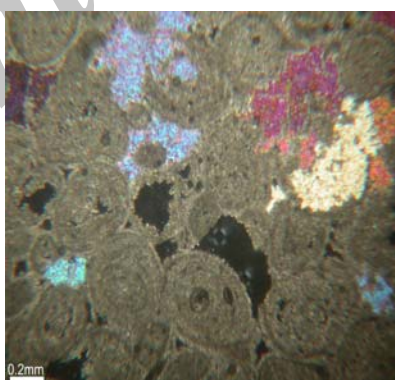
(د)



(ه)



(و)



(ز)

شکل ۷- اشکال مختلف سیمان انیدریت پویکیلتوپیک در مخزن. الف) انیدریت به صورت کومه‌های پراکنده و جانشینی ماتریکس. ب) سیمان انیدریت پویکیلتوپیک 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 رخ‌های 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.

از طرفی قطع شدن این نوع انیدریت با شکستگیها و نیز استیلولیتها که نشان دهنده تشکیل آن قبل از فرآیندهای فوق می باشد و نیز همراهی ندولها با رگچه های تبخیری حاصل از تراکم و آب زدایی ژیبس اولیه، موضوع تشکیل و گسترش آنها را طی دیاژنز اولیه تقویت می نماید.

ه) ندولهای انیدریت دفنی^۷: ندولهای انیدریت می توانند 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 رخساره های دانه غالب و همچنین در امتداد استیلولیت تشکیل شده اند و برخلاف ندولهای مراحل اولیه دیاژنز شواهدی از فرآیند آب زدایی، شکستگی و همراهی با رگچه های تبخیری را نشان نمی دهند (شکل ۹ الف و ب) که بیانگر تشکیل این ندولها طی مراحل دیاژنز تدفینی است.

و) بلورهای تبخیری پراکنده و منفرد^۸: این بلورها در اشکال و اندازه های مختلف و به صورت پراکنده در رخساره های مادستونی و دولومادستونی گسترش یافته اند. در مواردی به صورت پراکنده ترکها و حفرات روزنه ای^۹ و به صورت فابریک چشم پرنده ای درون رسوبات دیده می شوند. شکل بلورها به فرم لوزوجهی، هم بعد و در مواردی به فرم چند بلوری است (شکل ۱۰ الف، ب، ج). در مواردی در اثر رخنمون تحت الجوی و انحلال این بلورها، قالب های آنها به صورت تخلخل های مجزا درون رسوبات باقی مانده است و یا توسط سیمان های کلسیتی پر شده است. این تبخیرها بیشتر در رخساره های بالای پهنه بین جزر و مدی تا ابتدای سیخا طی مراحل اولیه دیاژنز تشکیل شده اند.

ز) سیمان انیدریت پراکنده شکستگیها^{۱۰}: این نوع انیدریت بصورت بلورهای درشت و پراکنده شکستگیها در

(د) انیدریت ندولی^۱: این نوع انیدریت به صورت مجموعه ای از بلورهای ریز و درهم بافته با جهت گیری تصادفی می باشد که اصطلاح فابریک نمدی^۲ را برای آن بکار می برند. اندازه این ندولها در حد چند میلی متر تا سانتی متر 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 محیط های سیخایی و در رسوبات دانه ریز مانند دولومادستونها تشکیل می شوند (Machel 1992; Hovorka 1991; Kasprzyk and Orti 1998; Gundogan and Burton 2005). این ندولها در مواردی بصورت ژیبس اولیه تشکیل شده و سپس در اثر آب زدایی به انیدریت تبدیل می شوند. به سمت قسمتهای فوقانی منطقه بالای جزر و مدی^۳ یا سیخا با افزایش شوری بتدریج بر تعداد و بزرگی ندولها افزوده شده و ساخت قفس مرغی^۴ ایجاد شده است (Porthero and Schwab 1996; Warren 2006) (شکل - ۸ ج). فرآیند رشد ندولها و همچنین بلورهای پراکنده ای از تبخیرها بصورت جایگیری^۵ و جانشینی^۶ درون رسوبات کربناته تقریباً همزمان با دولومیتی شدن آنهاست (Alsharhan and Whittle 1995; Pomoni- Pappaioannou and Karakitsios 2002). این نوع بافت انیدریت از فراوانی کمتری نسبت به انواع پویکیلوتوپیک و سیمان انیدریت فراگیر و پراکنده تخلخل برخوردار است. این نوع انیدریت به علت همراهی با رخساره های- استروماتولیتی و دولومادستونی (بلورهای کوچکتر از ۲۰ میکرون) در مراحل اولیه دیاژنز تشکیل شده است (Rahimpour-Bonab et al. 2010).

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

گسترش این نوع تبخیرها در ارتباط تنگاتنگی با دولومیتی شدن اولیه رسوبات و تشکیل دولومیت‌های ریزبلورین و نیمه پایدار^۲ در این محیط‌هاست. بافتهای دیگر انیدریت مانند سیمان انیدریت فراگیر، بخش عمده سیمان انیدریت پویکیلو توپیک و انیدریت پرکننده شکستگیها طی مراحل دیاژنز تدفینی و با نفوذ شورا به‌های تبخیری بدرون رخساره-ها 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 پویکیلو توپیک 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 می‌تواند در ارتباط با بافتهای مختلف انیدریت، تنوع رخساره‌های دارای سیمان انیدریتی و تاثیر انحلال و شکستگی در مخازن باشد.

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).

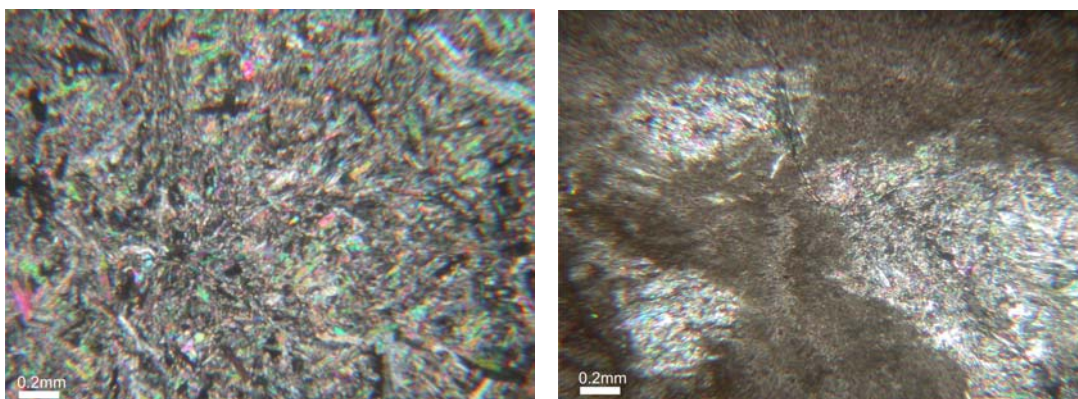
ح) رگچه‌های تبخیری^۱: این رگچه‌ها بصورت نازک و با حاشیه نامنظم همراه با ندولهای انیدریت بوده و از آنها منشعب می‌شوند (شکل ۱۲ الف و ب). احتمالاً در نتیجه آزدایی ژپس اولیه و تبدیل آن به انیدریت، آب حاصل از این فرآیند بصورت رگچه‌ها و نیز شکستگیهایی که بیشتر از ژپس هستند درون رسوبات دانه‌ریز دولومادستونی 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 شاهدهی بر تشکیل آنها طی مراحل دیاژنز تدفینی باشد. این رگچه‌ها و نیز شکستگیها خود می‌توانند به عنوان مجرای 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.

² - Metastable

¹ - Evaporite Veins



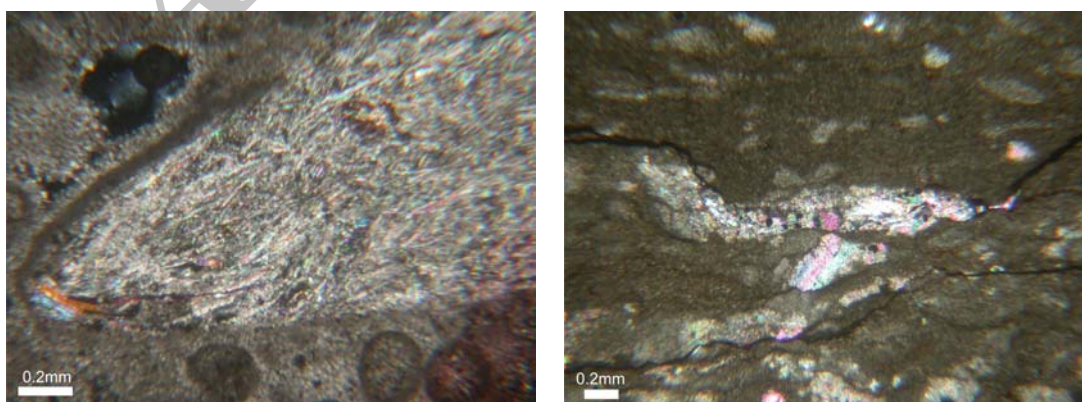
(الف)

(ب)



(ج)

شکل ۸- الف) تصویر میکروسکوپی از ندول انیدریت با بلورهای ریز، درهم بافته و با جهت گیری نامشخص (فابریک نمدی). ب) ندولهای انیدریت پراکنده در متن ماتریکس. ج) تصویر مغزه از ندولهای انیدریت بهم پیوسته که تشکیل (ساخت قفس مرغی).



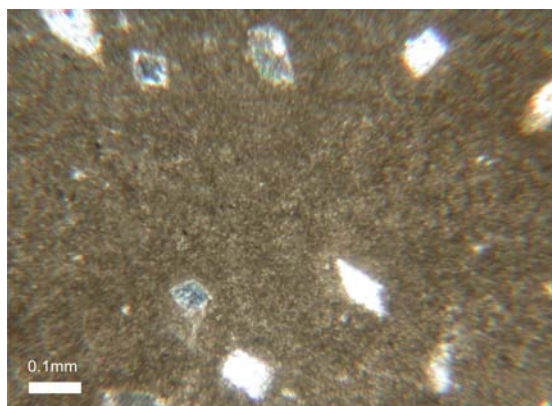
(الف)

(ب)

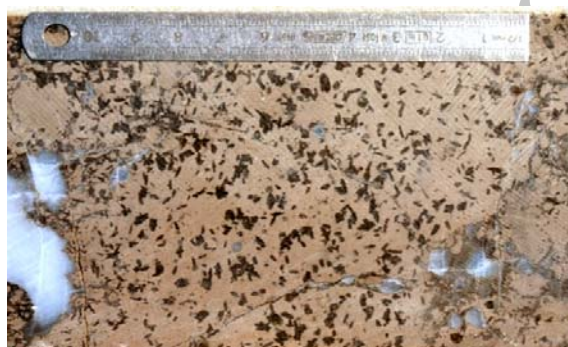
شکل ۹- الف) ندول انیدریت دفنی به صورت پراکنده تخلخل قالبی در یک گرینستون. ب) ندولهای انیدریت در امتداد استیلولیت که بیانگر تشکیل آنها طی دیاژنز دفنی است.



(الف)

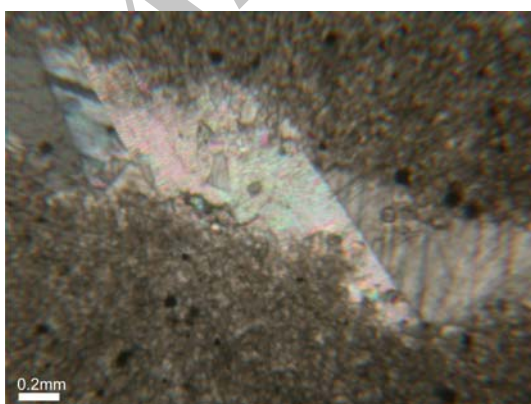


(ب)

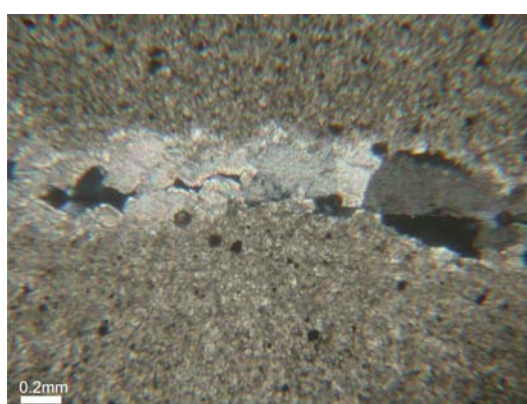


(ج)

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 ژیبس 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.

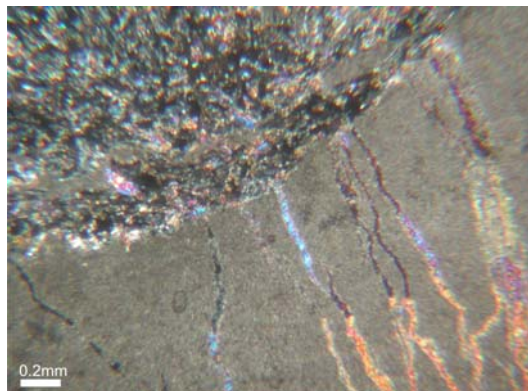


(الف)

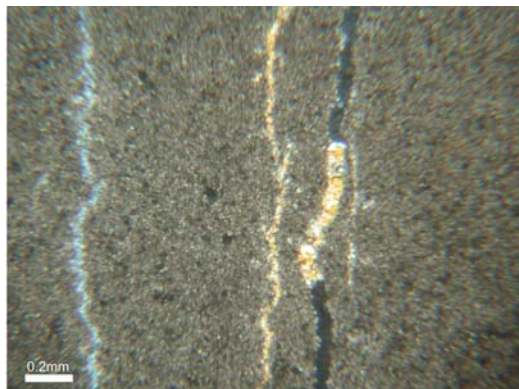


(ب)

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



(الف)



(ب)



(ج)

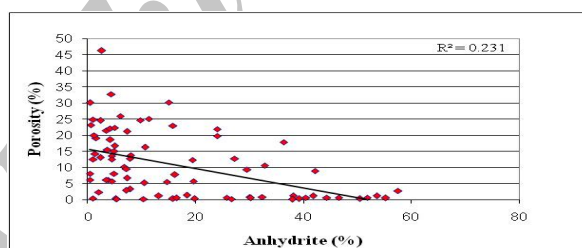
شکل ۱۲- الف) رگچه‌های تبخیری همراه با ندول انیدریت. ب) رگچه‌های تبخیری با حاشیه مضرس. این رگچه‌ها عمدتاً ژپسی است. ج) تصویر مغزه از ندول انیدریت همراه با رگچه‌های تبخیری.

وقایع دیاژنتیکی متداول کمتر متداول	محیط های دیاژنتزی			توضیحات
	محیط دیاژنتز سطحی	تدفین کم عمق	تدفین عمیق	
بلورهای تبخیری پراکنده	—————			ژپس و انیدریت که عمدتاً در ارتباط با پهنه جزرومدی است بیشتر در ارتباط با محیط های سیخایی و تحت تاثیر شوره های منفذی درون رسوبات تشکیل شده است و می-تواند بصورت ژپس اولیه تشکیل شده باشد
انیدریت ندولی	—————	—————		
انیدریت لایه ای	—————			درون شوره های سیخایی و احتمالاً بصورت ژپس اولیه ته نشین شده است
رگچه های تبخیری		—————		در نتیجه آب زدایی ندولهای ژپس اولیه تشکیل شده اند
انیدریت پویکیلو توپیک	—————	—————		بصورت پرکننده تخلخل و جانشینی در مواردی همراه با اذخالیهای دولومیت است فراوانترین نوع بافت انیدریت موجود در مخزن می باشد
انیدریت فراگیر		—————		مشکل از بلورهای درشت و با گسترش یکنواخت است که کل منافذ موجود در رخساره های دانه پشتیبان را پر کرده است
انیدریت پر کننده شکستگی		—————		به صورت بلورهای درشت و عمدتاً درون شکستگیهای موجود در دولومادستونها گسترش دارد
		افزایش عمق و پیشرفت زمان		

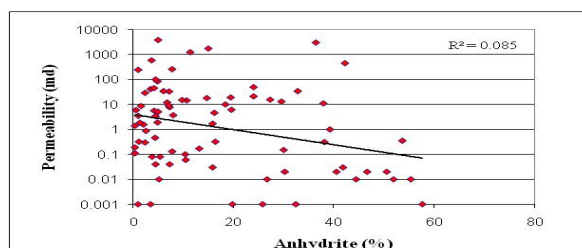
شکل ۱۳- توالی پاراژنتیکی انواع بافتهای انیدریت در مخازن مورد

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 می‌یابد. 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 داده‌های 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 (شکل ۱۵) که منطبق بر مطالعات پیشین کرناتهای پریمین-تریاس در این ناحیه است (Rahimpour et al. 2010).

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

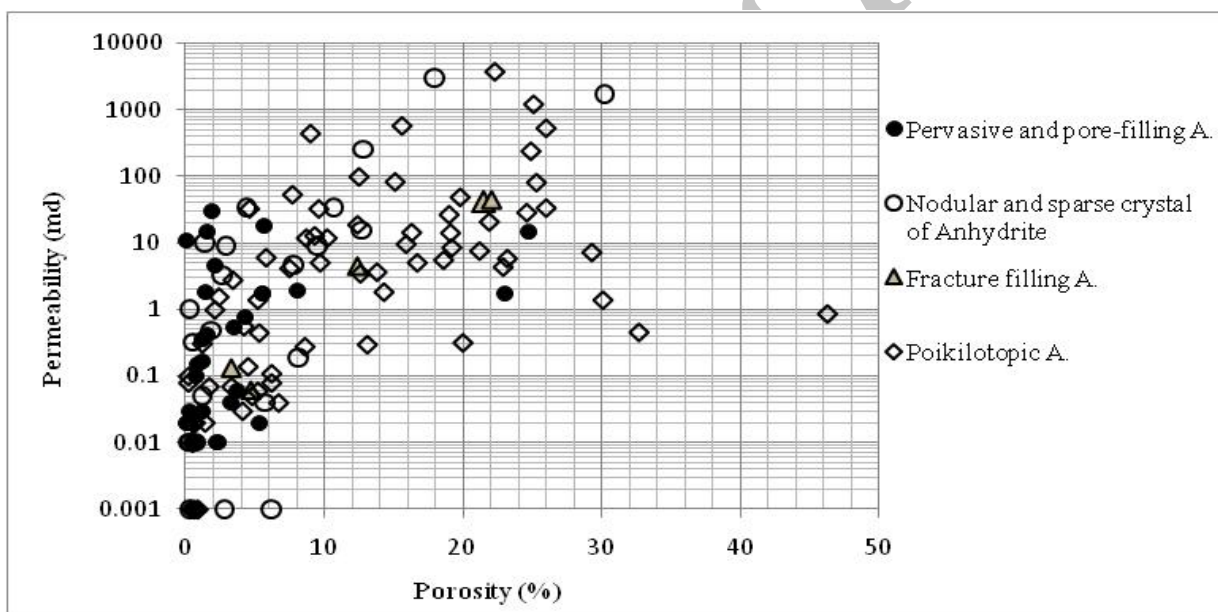
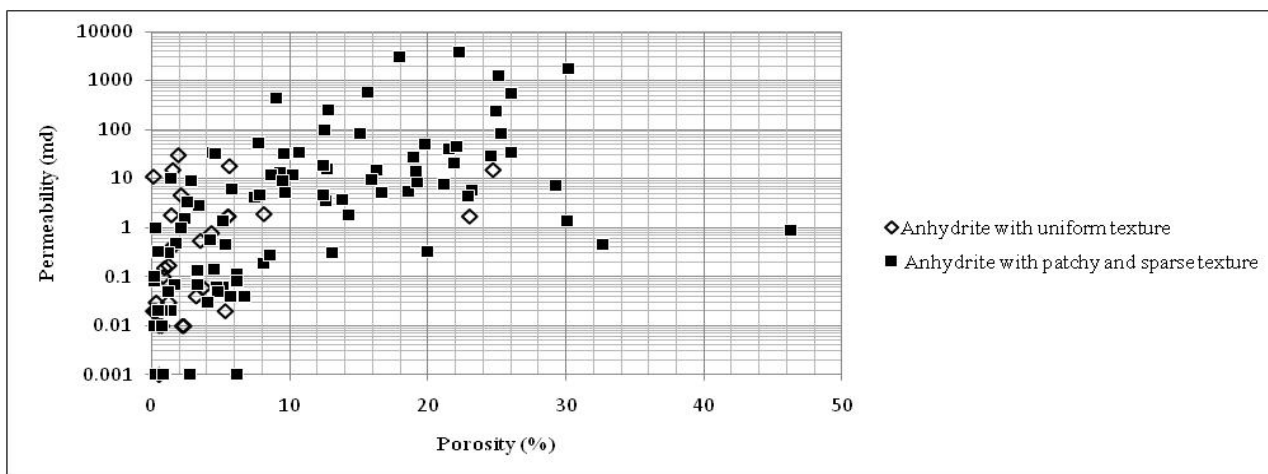


(الف)



(ب)

شکل ۱۴- نمودار درصد حجمی انیدریت در برابر تخلخل (الف) و تراوایی (ب)



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

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 کاهشده کیفیت مخزنی هستند به صورت دوگانه است. این دوگانگی اساساً

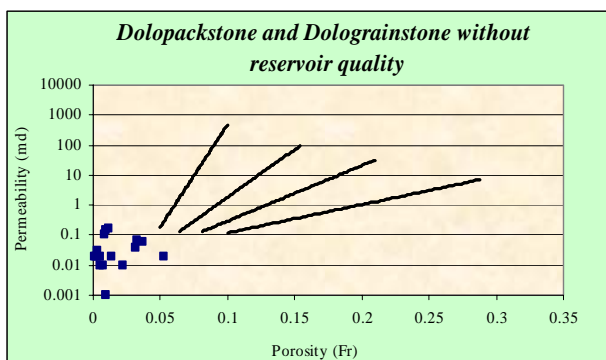
تاثیر دوگانه سیمان انیدریت پرکننده تخلخل و فراگیر بر کیفیت مخزنی

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

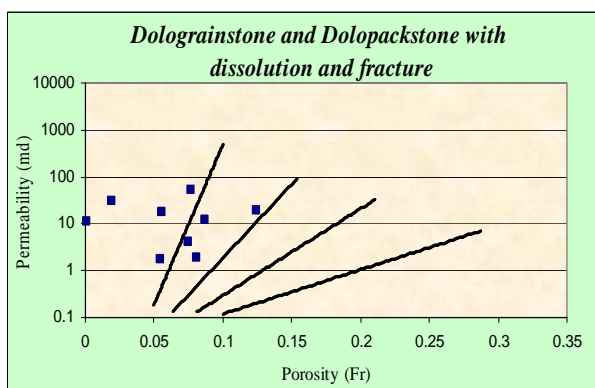
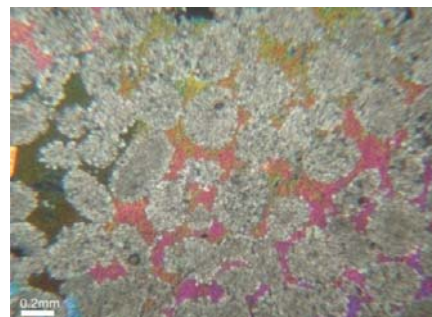
شکستگی را نیز در مراحل بعدی دیاژنز در نظر گرفت. همچنین چنانچه در شکل ۱۶ ب مشخص است ترسیم داده-های تخلخل و تراوایی مغزه در رخساره‌های دانه پش‌تیبان با سیمان انیدریت فراگیر و پرکننده تخلخل که در مراحل بعدی تحت تاثیر انحلال و شکستگی قرار گرفته‌اند نشان می‌دهد که این رخساره‌ها از موقعیت با کیفیت مخزنی پایین 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 شورابه‌های 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 عمدتاً 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 (شکل ۱۶ الف). از طرفی انحلال بعدی این سیمان طی مراحل بعدی دیاژنز به عنوان عامل مهمی در بهبود کیفیت مخزنی آنها عمل نموده است (شکل ۱۶ ب).

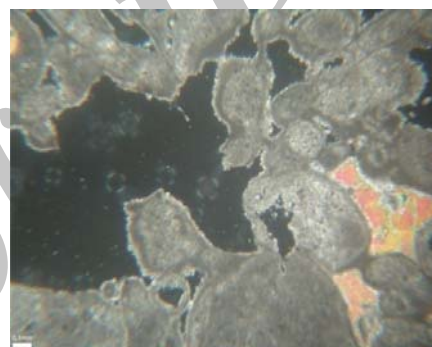
می‌تواند مرتبط با انحلال‌پذیری بیشتر این سیمان نسبت به سیمانهای کلسیتی و دولومیتی باشد. انیدریت به علت حساسیت زیاد می‌تواند به راحتی و بصورت کامل یا بخشی انحلال یابد (Gareth and Xiao 2005). بطور کلی این سیمان با گسترش در بین رخساره‌های دولوگرینستونی و دولوپکستونی مخازن مورد مطالعه باعث از بین رفتن کیفیت 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 کم عمق و در نتیجه اشغال بخش عمده فضاهای خالی سنگ از تراکم بیشتر آن طی مراحل تدفین عمیق‌تر جلوگیری می‌نماید. سپس طی مراحل بعدی در جاهایی که این رخساره‌ها 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



(الف)



(ب)



شکل ۱۶- 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 رخساره‌ها باعث بهبود کیفیت مخزنی شده است.

جدول ۲ انواع بافت‌های انیدریت موجود در مخزن و ارتباط آنها با

تأثیر روی کیفیت مخزنی	تأثیر روی تراوایی	تأثیر روی تخلخل	رخساره مرتبط	فراوانی (%)	بافت انیدریت
به طور کلی منفی اما بستگی به مراحل بعدی دیپازن نیز دارد	منفی	منفی	دولوپکستون و دولوگرینستون	۲۰/۶۳	سیمان فراگیر و پرکننده تخلخل
ناچیز	ناچیز	منفی	متغیر	۵۹/۵	پویکلوئوپیک
تا حدودی می‌تواند موثر باشد	می‌تواند مثبت باشد	ناچیز	عمدتاً دولومادستون	۶/۳	نودول انیدریت
ناچیز	ندارد	ناچیز	دولومادستون	۷/۱	بلورهای پراکنده تبخیری
ناچیز	ناچیز	ناچیز	دولومادستون	۳/۹۶	انیدریت پرکننده شکستگی
ناچیز	می‌تواند موثر باشد	ندارد	دولومادستون	۲/۳۸	رگچه‌های تبخیری

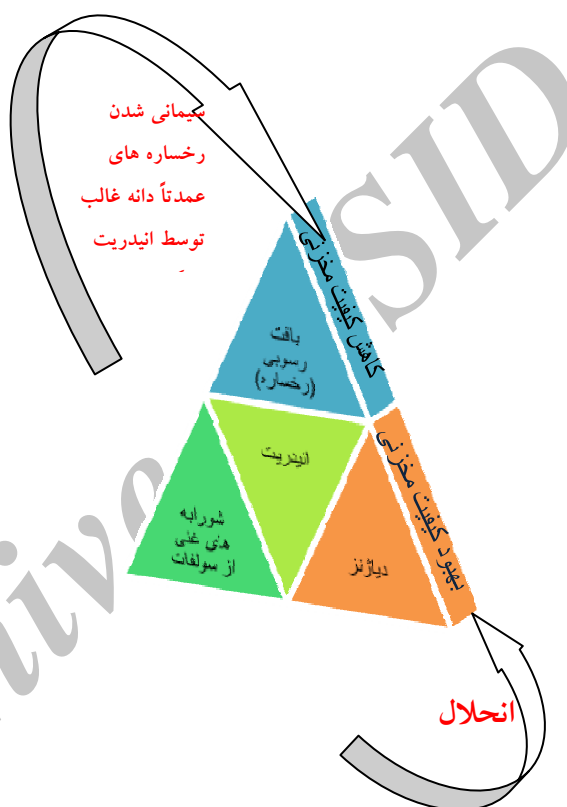
فرآیند دولومیتی شدن و ارتباط آن با تبخیرها در مخازن مورد مطالعه

چنانچه قبلاً نیز ذکر شد بخش عمده تبخیرها 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). بطور کلی فرآیند دولومیتی شدن به دو صورت 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. دولومیت‌های جانشینی با حفظ فابریک اولیه، که بخش عمده دولومیت‌ها را شامل می‌شوند همراه با انیدریت و در طول مراحل اولیه دیاژنز (دولومادستونها) تا تدفین کم عمق (دولوگریستونها و دولوپکستونها) تشکیل شده‌اند. این دولومیتها عمدتاً ریزبلورین بوده و توسط عوارض دیاژنزی بعدی (استیلولیت و شکستگی) قطع شده‌اند. 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 شبج‌هایی از استیلولیت درون این دولومیت‌های پراکنده تشکیل آنها در نتیجه تبلور دوباره دولومیت‌های اولیه طی مراحل دیاژنز تدفینی- است (Rahimpour-Bonab et al. 2010). اما در اینجا باید توجه داشت که تاثیر شورابه‌های تبخیری در فرآیند دولومیتی شدن متفاوت است. بخشی در ارتباط با محیط رسوبی (محیط سبخایی و شورابه‌های لاگونی) و طی مراحل دیاژنز آغازین است. چنانچه گسترش ندولها و بلورهای پراکنده تبخیری (ژیپس و انیدریت) درون رخساره‌های دانه ریز دولومادستونی و دولوکستونی مثالی از این حالت است که طی آن در نتیجه تبخیر سطحی و تغلیظ و ته نشست تبخیرها، نسبت Mg/Ca در محیط بالا رفته و

باعث دولومیتی شدن رسوبات آهکی اولیه شده است. در این حالت فرآیند دولومیتی شدن و تشکیل تبخیرها تقریباً همزمان صورت گرفته است. اما بخشی از فرآیند دولومیتی- شدن در ارتباط با جریان و نفوذ شورابه‌های حاصل از انحلال تبخیرهای 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 دولومیت‌های دیاژنزی اولیه تشکیل شده‌اند. این موضوع بویژه در مورد سیمان انیدریت فراگیر و پرکننده تخلخل درون رخساره- های دانه غالب و دانه درشت مخزن (دولوگریستونها و دولوپکستونها) 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 تبخیرها، منطبق بر نتایج کارهای قبلی در مخازن مورد مطالعه و معادل آنها است که دومکانیسم تبخیر

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.

سطحی (سبخا) و نشت شورابه‌ای را مدنظر قرار داده اند (Ehrenberg 2006; Alsharhan 2006; Insalaco et al. 2010; Rahimpour-Bonab et al. 2006) ذکر این نکته نیز ضروری است که در برخی رخساره‌های دانه‌غالب مخزن که بدلائل مختلف از دسترس شورابه‌ها مصون مانده‌اند



شکل ۱۷- سه فاکتور اصلی کنترل کننده گسترش انیدریت و تاثیر آن بر کیفیت مخزنی در مخازن مورد مطالعه

نتیجه گیری

تبخیری، سیمان انیدریت پرکننده شکستگی و رگچه‌های تبخیری است. این بافتها طی مراحل مختلف دیازنز و به درجات متفاوت، انواع رخساره‌های مخزن رامناثر 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

گسترش انیدریت به صورت بافتها و اشکال مختلف در مخزن از جمله مهمترین فرآیندهای دیازنزی در مخازن کربناته دالان بالایی و کنگان است. این بافتها شامل انیدریت لایه‌ای، سیمان انیدریت پرکننده تخلخل و فراگیر، انیدریت پویکیلو توپیک، ندول‌ها و بلورهای پراکنده

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, Memoir 1, p. 108-121.

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

9- Esrafil-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 pseudomorphs after gypsum in bedded anhydrite

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؛ قوبدل سیوکی، محمد، ۱۳۸۲، بررسی رخساره‌های 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

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 stratigraphy*. In: New York: W.H. Freeman & Co. pp. 575.

24- Rahimpour-Bonab, H., B. Esrafil-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 geothermal 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, Palaeogeographic 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 Saskatchewan: *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