

زونبندی مخزن با استفاده از روش تفکیک تخلخل مفید و غیرمفید در یکی از میادین نفتی جنوب غرب ایران؛ با نگرش ویژه به نمودارهای مقاومت

جواد هنرمند^{۱*}، ژیلا رضائیان دلویی^۲، و ارسلان زینل‌زاده^۳

^۱ استادیار پردیس پژوهش و توسعه صنایع بالادستی، پژوهشگاه صنعت نفت

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال

^۳ مربی پژوهشی گروه پژوهش ژئوشیمی نفت، پژوهشگاه صنعت نفت

(دریافت: تیر ۱۳۹۲، پذیرش: تیر ۱۳۹۳)

Honarmandj@ripi.ir

چکیده

در این مقاله نمونه‌های مغزه از بخش کربناته بالایی (به سن میوسن) سازند آسماری متعلق به یکی از میادین نفتی جنوب غرب ایران مورد مطالعات ماکروسکوپی و میکروسکوپی قرار گرفت. سپس نتایج مطالعات بر روی نمونه‌های مغزه و مقاطع نازک با داده‌های تخلخل و تراوایی مغزه و نمودارهای پتروفیزیکی، به ویژه نمودارهای مقاومت، مقایسه گردید. تنوع بافت (مادستون تا گرینستون) و پدیده‌های دیاژنزی (دولومیتی شدن، انحلال و گسترش سیمانهای کلسیتی و انیدریتی) باعث تغییرات زیادی در مقدار و نوع تخلخل در این سازند گردیده است. این مطالعه نشان داد که نمودارهای مقاومت می‌توانند به عنوان ابزاری کارآمد در تفکیک زونهای دارای تخلخل‌های مفید و غیرمفید مورد استفاده قرار گیرند. بازه‌های عمقی با تراوایی بالا از مقادیر نسبتاً بالای مقاومت عمیق یا مقاومت منطقه دست‌نخورده و جدایش خوب بین لاگهای مقاومت این منطقه و منطقه کم‌عمق یا شسته‌شده برخوردارند در حالیکه در بازه‌های عمقی غیرمخزنی مقاومت پایین بوده و جدایش بین لاگهای مقاومت این دو بخش کم است. بر این اساس توالی کربناته مورد مطالعه از سازند آسماری به ۱۳ زون تفکیک گردید. با استفاده از جدایش لاگهای مقاومت کم عمق و عمیق می‌توان این واحدهای جریان را در سراسر میدان مورد مطالعه با یکدیگر انطباق داد.

کلمات کلیدی: سازند آسماری، تخلخل مفید، نمودار مقاومت، زونبندی مخزنی.

۱. مقدمه

در مخازن کربناته، ارتباط بین تخلخل و تراوایی از پیچیدگی زیادی برخوردار است. این پیچیدگی به دلیل مکانیسم‌های مختلف تشکیل و گسترش انواع تخلخل (شامل مکانیسم‌های رسوبی و دیاژنزی) در این سنگهاست. به این ترتیب، پیش‌بینی عملکرد یک مخزن کربناته هتروژن و برآورد مقدار ذخیره و تولید آن نیازمند درک صحیح و دقیقی از ویژگیهای پتروفیزیکی این مخازن است. اندازه‌گیری و یا تخمین پارامترهای پتروفیزیکی مخزن نظیر تخلخل، تراوایی، فشار موئینه و ناهمگنی مخزن^۶ مستلزم استفاده از روش‌های آزمایشگاهی و مطالعاتی است. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش‌های آنالیز مغزه (معمولی و ویژه)، تلفیق روش‌های پتروگرافی و آنالیز تصویری و استفاده از نمودارهای پتروفیزیکی اشاره نمود (Moore, 2001; Ehrenberg et al., 2006; Lucia, 2007; Ahr, 2008; Honarmand and Amini, 2012).

با استفاده از نمودارهای پتروفیزیکی نظیر نمودارهای چگالی، صوتی و نوترون، اگرچه می‌توان مقدار کل تخلخل و همچنین درصد تخلخل ثانویه یا حفرات بزرگ غیرمرتبط (تفاضل تخلخل حاصل از لاگهای صوتی و چگالی) را تعیین نمود اما از آنجا که فضاهای خالی بین دانه‌های^۷، فضاهای خالی قالبی و حفره‌های^۸ و ریزتخلخل^۹ تأثیر مشابهی روی لاگهای چگالی و نوترون داشته و لاگ صوتی نیز عمدتاً فضاهای خالی ثانویه (از نوع انحلالی) را نشان نمی‌دهد (Anselmetti, and Eberli, 1993; Weger et al., 2009)، بنابراین تمام تخلخل غیرمفید که شامل انواع حفره‌های غیرمرتبط (قالبی و حفره‌ای) و ریزتخلخل (ریزتخلخل موجود در آهکهای با بافت گل‌پشتیبان و ریزتخلخل بین بلوری در دولستون‌های ریزیلور) می‌باشد با استفاده از نمودارهای تخلخل از تخلخل‌های مفید قابل تفکیک نمی‌باشد (Serra, 1986; Ellis and Singer, 2008).

باتوجه به تأثیر تخلخل و بویژه تراوایی بر الگوی تغییرات مقاومت در سازندهای نفت‌دار، در این مطالعه به منظور تفکیک انواع تخلخل مفید از غیرمفید از نمودارهای مقاومت مخصوص^{۱۰} استفاده گردید. در ادامه، تغییرات مقدار مقاومت با نتایج مطالعات ماکروسکوپی و میکروسکوپی زمین‌شناسی مقایسه و زون‌بندی مخزنی ارائه گردید.

۲. موقعیت جغرافیایی

میدان مارون در بخش شرقی فروافتادگی دزفول، در شمال‌شرقی شهر اهواز و در مجاورت میداین کوپال از شمال و آغاچاری از شرق قرار دارد (شکل ۱). میدان مورد مطالعه با روند شمال غربی-جنوب شرقی در قسمت غربی تا مرکزی و روند شمال شرقی-جنوب غربی در قسمت انتهایی شرقی امتداد یافته و دارای ۶۵ کیلومتر طول و بطور متوسط ۷ کیلومتر عرض می‌باشد.

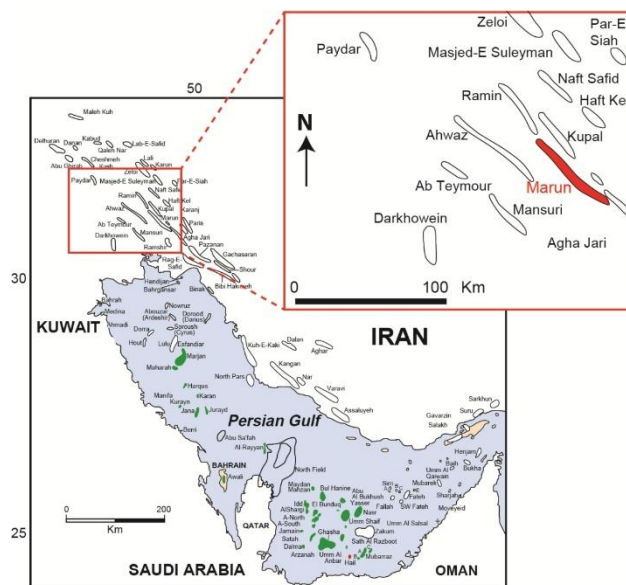
^۶ Reservoir heterogeneity

^۷ Interparticle Pores

^۸ Moldic and Vuggy Pores

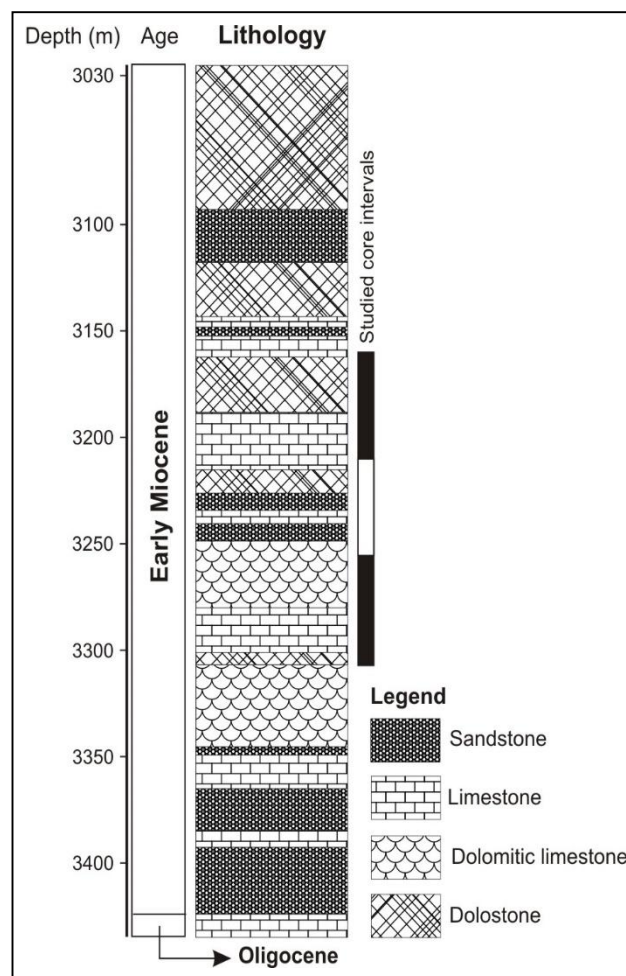
^۹ Microporosity

^{۱۰} Resistivity Logs



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی میدان مورد مطالعه

سازند آسماری در این میدان از یک توالی مخلوط کربناته- آواری تشکیل شده است (شکل ۲). در توالی‌های کربناته این سازند به دلیل تأثیر فرآیندهای دیازنزنی متنوع، به ویژه دولومیتی شدن و انحلال، افزون بر تخلخل‌های بین‌دانه‌ای و درون‌دانه‌ای اولیه، انواع تخلخل ثانویه مانند بین‌بلوری، قالبی و حفره‌ای به فراوانی مشاهده می‌شود.



شکل ۲: ستون سنگ‌شناسی سازند آسماری در چاه مورد مطالعه در میدان مارون

۳. روش مطالعه

در این مطالعه حدود ۱۰۰ متر نمونه مغزه از بخش کربناته سازند آسماری در میدان نفتی مارون مورد مطالعه قرار گرفت (شکل ۲). در مطالعه ماکروسکوپی پارامترهایی همچون سنگ‌شناسی، آغستگی به نفت، نوع و مقدار تخلخل قابل رویت برداشت شد. به منظور استفاده از پارامترهای کوچک مقیاس، تعداد ۳۰۰ مقطع نازک از نمونه‌های مغزه تهیه و با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان مورد مطالعه قرار گرفت. در این مطالعات پارامترهای سنگ‌شناسی، بافت، اندازه دانه‌ها و بلورها، تعیین دقیق‌تر مقدار تخلخل و نوع تخلخل توصیف گردیدند (Choquette and Pray, 1970).

در ادامه با استفاده از روش‌های تخلخل هلیم^{۱۱} و تراوایی نسبت به هوا^{۱۲}، به ترتیب، مقادیر تخلخل و تراوایی تعداد ۳۰۰ نمونه پلاگ اندازه‌گیری شد. این داده‌ها در طی این تحقیق با داده‌های تخلخل حاصل از مطالعات پتروگرافی و نمودارهای پتروفیزیکی مقایسه گردیدند (Lucia, 2007).

به منظور تعیین درصد تخلخل و نوع آن (اولیه یا ثانویه) می‌توان از نمودارهای اندازه‌گیری تخلخل مانند نمودار وزن مخصوص یا چگالی^{۱۳}، صوتی^{۱۴}، نوترون^{۱۵} و تلفیق آنها استفاده نمود (Serra, 1986; Ellis and Singer, 2008). مبنای اندازه‌گیری تخلخل در نمودارهای مذکور با یکدیگر متفاوت است. اما هیچکدام از نمودارهای تخلخل به منظور تفکیک تخلخل مفید از غیرمفید به طور کامل قابل استفاده نیستند. نمودارهای چگالی و نوترون مجموع انواع تخلخل اعم از تخلخل بین دانه‌ای، قالبی، حفره‌ای و ریزتخلخل را اندازه‌گیری می‌نمایند که در واقع مجموع انواع تخلخل مفید و غیرمفید می‌باشد (Asquith, 1985; Serra, 1986). موج تراکمی قابلیت عبور از محیط سیال را ندارد، لذا در صورت وجود فضاهای خالی از نوع حفره‌ای، قالبی و شکستگی در سازند، موج صوتی تمایل به نادیده گرفتن آنها را داشته و این گونه فضاها را در محاسبه مقدار تخلخل در نظر نمی‌گیرد (Anselmetti, and Eberli, 1993; Lucia, 2007; Ellis and Singer, 2008; Weger et al., 2009). بنابراین تخلخل حاصل از نمودار صوتی تخلخل سازند بدون در نظر گرفتن تخلخل ثانویه می‌باشد. بنابراین با کم کردن مقدار تخلخل حاصل از نمودار صوتی از تخلخل بدست آمده از هر یک از نمودارهای چگالی یا نوترون می‌توان مقدار تخلخل ثانویه (بخشی از تخلخل غیرمفید) را محاسبه کرد (رابطه ۱). در صورتیکه تخلخل غیرمفید علاوه بر انواع ثانویه، ریزتخلخل موجود در ماتریکس را نیز شامل می‌شود که با استفاده از نمودارهای تخلخل قابل محاسبه و اندازه‌گیری نمی‌باشد.

$$\phi_{\text{secondary}} = \phi_{\text{Density}} (\text{or } \phi_{\text{Neutron}}) - \phi_{\text{Sonic}} \quad (1)$$

چرخش گل حفاری و سپس نفوذ آن به درون سازند باعث زون‌بندی دیواره چاه نسبت به میزان نفوذ گل می‌گردد. بطور کلی در نتیجه این نفوذ در دیواره چاه سه منطقه قابل تفکیک می‌باشد که از دیواره چاه به داخل سازند عبارتند از: (۱) منطقه اشغالی یا شسته‌شده^{۱۶}، (۲) منطقه عبوری^{۱۷} و (۳) منطقه دست‌نخورده یا بکر^{۱۸} (Serra, 1986).

¹¹ Helium Porosity

¹² Air Permeability

¹³ Density

¹⁴ Sonic

¹⁵ Neutron

¹⁶ Flashed Zone

¹⁷ Transition Zone

¹⁸ Uninvaded Zone

مقدار نفوذ گل به داخل سازند یا ضخامت هر یک از بخش‌های سه‌گانه فوق تابع تخلخل و تراوایی سازند و ویژگی‌های سیال سازندی می‌باشد، بطوریکه در سازندهای متخلخل و تراوا به دلیل ضخامت زیاد اندود گل^{۱۹} در مقابل سازند، عمق نفوذ گل کمتر می‌شود. بطور معمول ضخامت ناحیه اشغالی حدود ۳۰ تا ۷۰ سانتیمتر می‌باشد. در صورتیکه سازند دارای هیدروکربن باشد مقداری از هیدروکربن توسط تراویده گل^{۲۰} به عقب رانده خواهد شد. اشباع هیدروکربن باقی مانده معمولاً بین ۱۰ تا ۴۰ درصد (برحسب نوع تخلخل یا تراوایی سازند) خواهد بود (Smith et al., 2003; Ellis and Singer, 2008; Verwer et al., 2011).

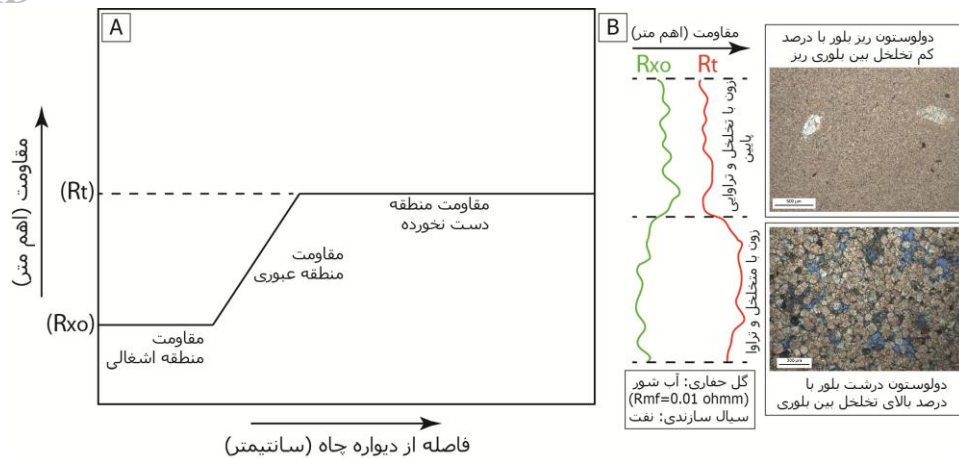
نمودارهای مقاومت الکتریکی مقدار مقاومت بخش‌های مختلف دیواره چاه را بر مبنای میزان اشباع‌شدگی آنها از آب و یا هیدروکربن اندازه‌گیری می‌نماید. بنابراین با توجه به: (۱) مقاومت گل حفاری (تابع نوع گل‌های حفاری: نوع نفتی، آب شیرین یا آب شور)، (۲) مقاومت سیال درون‌سازندی (تابع نوع سیال سازندی: آب، نفت یا گاز) و (۳) درصد و نوع تخلخل سازندی، نمودار تغییرات مقاومت سازندی در نواحی سه‌گانه دیواره چاه متفاوت خواهد بود (Asquith, 1985; Smith et al., 2003; Verwer et al., 2011). از آنجا که در این مطالعه گل حفاری آب شور ($R_{mf}=0.01 \text{ ohm m}$) و سیال سازندی نفت می‌باشد، بنظر می‌رسد ضمن اینکه مقاومت منطقه شسته‌شده (R_{xo}) یا کم‌عمق بایستی کمتر از مقاومت منطقه دست‌نخورده (R_t) یا عمیق باشد (شکل ۳)، مقادیر مقاومت در این دو بخش و اختلاف آنها با یکدیگر در بازه‌های عمقی مختلف دیواره چاه نشان‌دهنده تغییر در درصد و نوع تخلخل سازند است. بطوریکه در بخش‌های گل-پشتیبان^{۲۱} که تخلخل عمدتاً از نوع ریزتخلخل ماتریکس و یا ریزتخلخل بین ریزبلورهای دولومیت است، فیلتره گل حفاری قابلیت حرکت در این فضاهای خالی کوچک را نداشته و لذا نفوذ خیلی کم فیلتره گل حفاری در این سازند باعث می‌شود که R_t به دلیل وجود نفت در فضاهای خالی منطقه دست‌نخورده بالا بوده و R_{xo} نیز همچنان بالا باقی بماند. برعکس در زون‌های حاوی تخلخل‌های مفید بین‌دانه‌ای و بین‌بلوری که ارتباط فضاها با یکدیگر مناسب می‌باشد، نفوذ فیلتره گل به این بخش سازند خوب بوده و مقاومت منطقه شسته‌شده نسبت به منطقه دست‌نخورده کمتر خواهد بود. بعبارت دیگر در زون‌های دانه ریز با تراوایی کم، ضمن بالابودن مقادیر R_t و R_{xo} ، اختلاف مقدار این دو مقاومت کم است، در صورتیکه در زون‌های تراوا با تخلخل مفید بالا، مقادیر R_t زیاد و R_{xo} کم بوده بنابراین اختلاف این دو مقدار مقاومت بالا است (Smith et al, 2003). البته وجود شکستگی‌ها در زون‌های با تخلخل و تراوایی پایین باعث می‌شود که مقدار مقاومت، به ویژه در منطقه عمیق (R_t)، به شکل غیرقابل انتظاری افزایش یابد که این موضوع در زونبندی مخازن شکاف‌دار^{۲۲} بایستی مورد توجه قرار گیرد. در این مطالعه باتوجه به این ویژگی زون‌های متشکل از انواع تخلخل مفید و غیر مفید از یکدیگر متمایز گردیدند (Smith et al., 2003; Verwer et al., 2011).

¹⁹ Mud Cake

²⁰ Mud Filtrate

²¹ Mud-dominated

²² Fractured Reservoirs

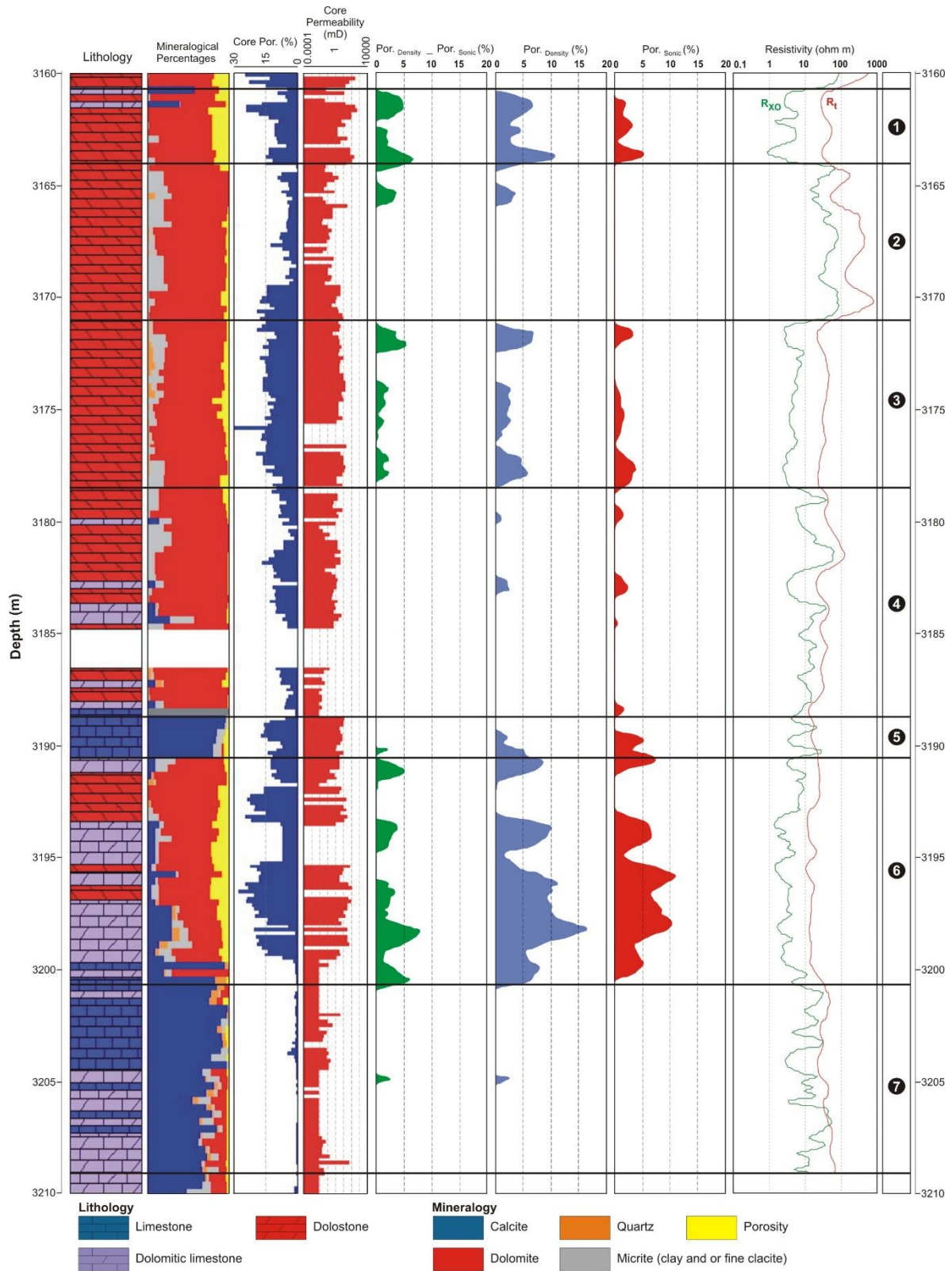


شکل ۳: (A) نمودار شماتیک مقدار مقاومت در مناطق یا زون‌های سه‌گانه اشغالی، عبوری و دست‌نخورده (در حالتی که مقاومت فیلتره گل حفاری به مراتب کمتر از سیال سازندی است) و (B) تغییرات مقدار نمودار مقاومت مناطق کم‌عمق و عمیق، مقدار جدایش آنها و ارتباط آن با کیفیت مخزنی.

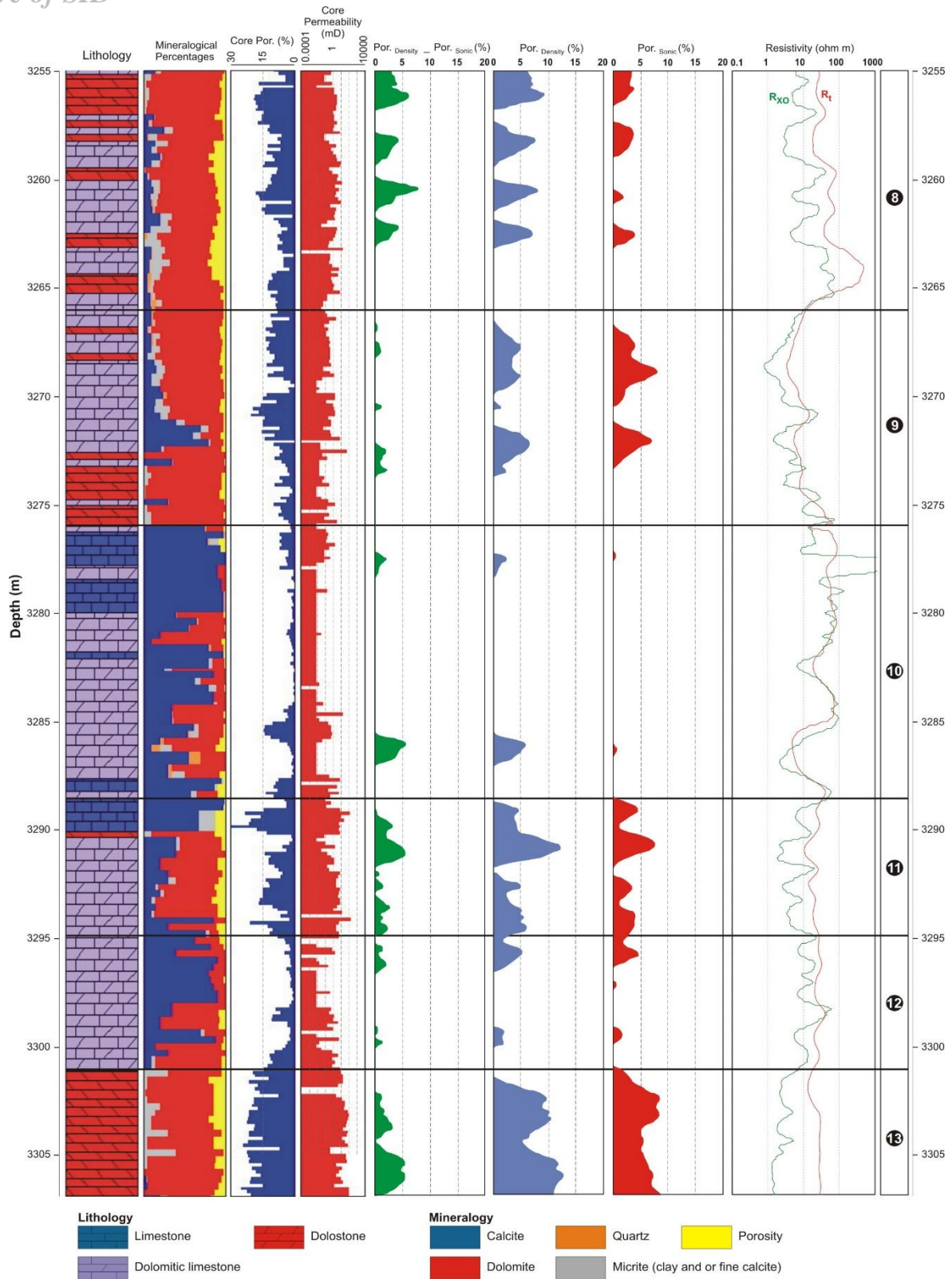
۴. زون‌بندی افق کربناته مورد مطالعه

پس از انجام مطالعات زمین‌شناسی، نتایج این مطالعات در مقابل ویژگی‌های پتروفیزیکی افق مورد مطالعه ترسیم گردید (شکل‌های ۴ و ۵). در این شکل‌ها، تغییرات سنگ‌شناسی، درصد کانی‌های تشکیل‌دهنده، مقادیر تخلخل و تراوایی مغزه، تخلخل حاصل از نمودارهای پتروفیزیکی و نمودار مقاومت در بخش‌های شسته‌شده (R_{xo}) و دست‌نخورده (R_t) به تصویر کشیده شد.

نمودارهای تخلخل چگالی، صوتی و اختلاف تخلخل چگالی و صوتی که معرف درصد فضاهای خالی بزرگ غیرمرتبط ۲۳ می‌باشد، در شکل‌های مذکور، نشان داده شده است. همانطور که در بخش روش مطالعه اشاره گردید، نمودار تغییرات اختلاف تخلخل چگالی و صوتی، فراوانی بخشی از تخلخل غیرمفید (انواع قالبی، حفره‌ای و شکستگی) مخزن را نشان می‌دهد. در صورتی که ریزتخلخل موجود در ماتریکس سنگ آهک یا بین بلورهای ریز دولومیت، بویژه در بافت‌های گل-پشتیبان نیز بخش دیگری از تخلخل غیرمفید (غیرمرتبط) در مخزن به شمار می‌رود که با مقایسه مقادیر مقاومت در دو بخش شسته‌شده و دست‌نخورده قابل شناسایی می‌باشد (Smith et al., 2003; Lucia, 2007; Verwer et al., 2011). بنابراین مقادیر مقاومت در این دو بخش می‌تواند مبنایی برای تفکیک زون‌های تراوا و ناتراوا یا شناخت انواع تخلخل (مفید و غیرمفید) در مخزن باشد. در این مطالعه نیز براساس مقادیر این مقاومت‌ها و میزان جدایش نمودار تغییرات آنها (شکل‌های ۴ و ۵) و تلفیق آنها با مقادیر تخلخل و تراوایی مغزه و نمودارهای پتروفیزیکی و مطالعات زمین‌شناسی، تعداد ۱۳ زون مخزنی شناسایی گردید (جدول ۱). در ادامه ویژگی‌های زمین‌شناسی و پتروفیزیکی هر یک از این زون‌ها ارائه می‌گردد.



شکل ۴: ستون لیتولوژی، کانی‌شناسی، تخلخل-تراوایی مغزه و لاگ و مقادیر مقاومت در بازه های ۱-۷



شکل ۵: ستون لیتولوژی، کانی شناسی، تخلخل-تراوایی مغزه و لاگ و مقادیر مقاومت در بازه های ۸-۱۳

جدول ۱: متوسط مقادیر تخلخل، تراوایی، مقاومت، لیتولوژی و انواع تخلخل در بازه های مورد مطالعه

وضعیت مخزنی	انواع تخلخل	متوسط تخلخل قابل روئیت (%)	متوسط تراوایی مغزه (mD)	متوسط درصد تخلخل مغزه	$R_t - R_{x0}$	R_t	R_{x0}	لیتولوژی	بازه
زون تراوای مخزنی	بین بلوری، قالبی و حفره‌ای	17.90	106.90	13.61	34.43	37.90	3.47	دولستون	1
زون ناتراوا	ریز تخلخل بین بلوری	3.95	13.14	7.60	209.46	256.5	47.09	دولستون	2
زون تراوای مخزنی	بین بلوری، قالبی و حفره‌ای	7.94	6.45	15.75	27.54	32.02	4.48	دولستون	3
زون ناتراوا	بین بلوری	1.57	1.94	8.42	24.62	39.82	15.20	دولستون	4
زون ناتراوا	ریز تخلخل ماتریکس	5.40	5.45	12.11	8.57	17.82	13.38	سنگ آهک	5
زون تراوای مخزنی	بین بلوری، قالبی و حفره‌ای	21.20	11.70	14.90	12.47	16.24	3.77	دولستون	6
زون ناتراوا	ریز تخلخل ماتریکس	2.10	1.28	1.04	23.22	37.99	17.32	سنگ آهک	7
زون تراوای مخزنی	بین بلوری، قالبی و حفره‌ای	10.50	2.64	10.60	72.36	90.13	20.30	دولستون	8
زون ناتراوا	ریز تخلخل بین بلوری	4.46	0.53	9.50	3.10	6.40	3.30	دولستون	9
زون ناتراوا	ریز تخلخل بین بلوری و ریز تخلخل ماتریکس	2.40	1.10	5.10	14.89	35.32	32.56	سنگ آهک دولومیتی، سنگ آهک و دولوستون	10
زون تراوای مخزنی	بین بلوری، قالبی و حفره‌ای	9.10	12.70	11.90	12.86	20.20	7.82	دولوستون آهکی	11
زون ناتراوا	ریز تخلخل بین بلوری	2.80	1.10	4.88	12.58	26.14	15.25	سنگ آهک دولومیتی و دولوستون آهکی	12
زون تراوای مخزنی	بین بلوری، قالبی و حفره‌ای	12.95	40.00	19.47	22.38	24.77	2.40	دولستون	13

مطالعه نمونه‌های مغزه و مقاطع نازک متعلق به زون‌های ۱، ۳ و ۶، نشان می‌دهد که این زون‌ها عمدتاً از دولستون تشکیل شده و فضاهای خالی ثانویه شامل انواع قالبی و حفره‌ای موجود در آنها از طریق تخلخل‌های اولیه از نوع بین بلوری^{۱۹} (شکل‌های ۶-A و ۶-B) (تا ۵ درصد) به یکدیگر مرتبط شده‌اند. در این زون‌ها بدلیل اینکه فضاهای خالی ثانویه تا حدودی توسط فضاهای خالی بین بلوری با یکدیگر ارتباط پیدا نموده‌اند، تخلخل و تراوایی مخزن افزایش یافته است (جدول ۱). شکل ۴ نیز اختلاف مقادیر R_t و R_{x0} را در این سه بازه عمقی، که مؤید نفوذپذیری بیشتر این بخش‌ها در مخزن می‌باشد، را نشان می‌دهد. نمودارهای صوتی و چگالی نشان می‌دهد که بخشی از فضاهای خالی در این دولستون‌ها از نوع ثانویه (حفره‌ای و قالبی) می‌باشد (شکل‌های ۶-C و ۶-D) که توسط فضاهای خالی بین بلوری با هم ارتباط دارند.

¹⁹ Intercrystalline Porosity

مطالعه مقاطع نازک تهیه شده از نمونه‌های متعلق به این سه بازه (شکل ۴) نیز نشان می‌دهد که: (۱) تخلخل در این نمونه‌های دولومیتی از انواع بین‌دانه‌ای، بین‌بلوری، حفره‌ای و قالبی بوده و (۲) مقدار متوسط تخلخل قابل روئیت در زون‌های ۱، ۳ و ۶، به ترتیب، ۱۷/۹، ۷/۹۴ و ۲۱/۲ درصد می‌باشد.

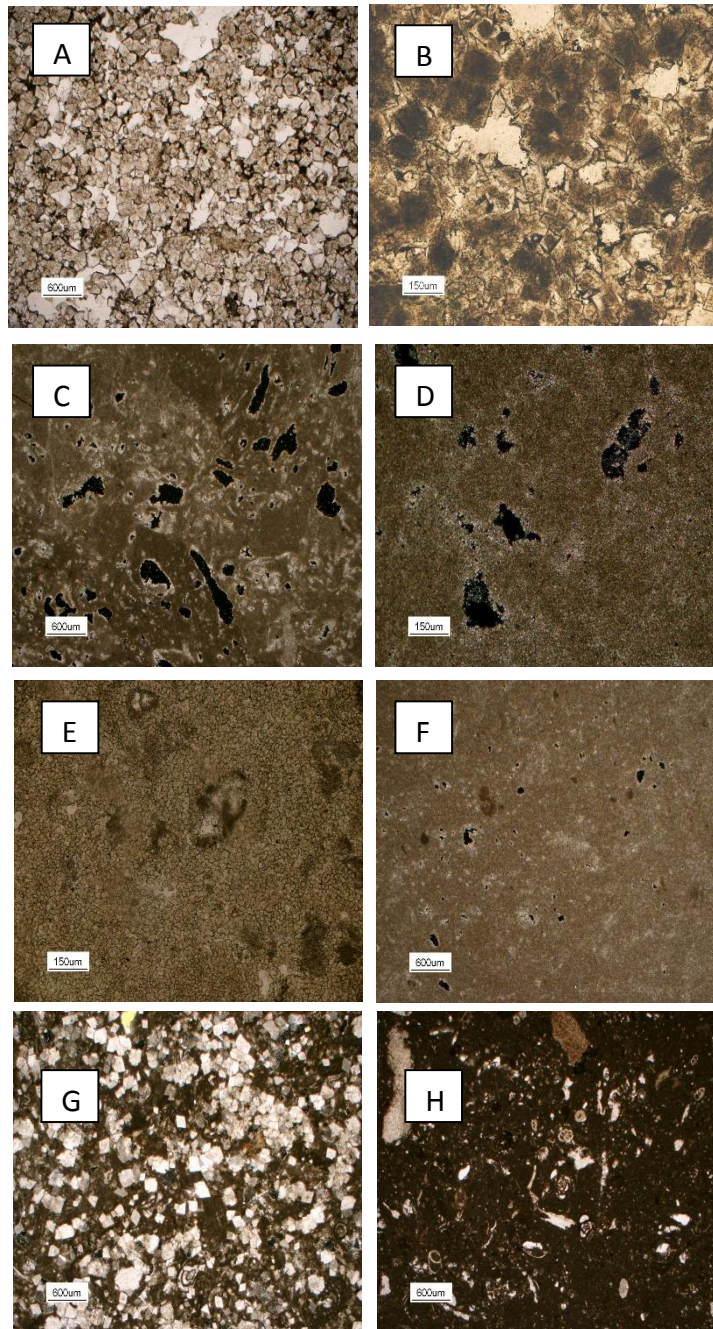
زون‌های دولومیتی ۲ و ۴ مقادیر تخلخل و تراوایی مغزه کمتری را نشان می‌دهند. از طرفی مقادیر R_{x0} ، R_t و اختلاف کم این دو مقاومت در این دو بازه عمقی حاکی از این است که تخلخل کم موجود در این زون‌ها از نوع ریزتخلخل بین بلوری بوده که تراوایی کمی به سنگ می‌دهد. شکل ۴ نیز نشان می‌دهد که در این زون‌ها تخلخل حاصل از لاگ که مقدار آن کمتر از ۲ درصد می‌باشد از نوع ریزتخلخل بین بلوری است. مطالعه مقاطع نازک تهیه شده از این زون‌ها (شکل ۶-E) نیز مؤید همین موضوع است، به طوری که متوسط درصد تخلخل قابل روئیت در بازه ۲ و ۴، به ترتیب، ۳/۹۵ و ۱/۵۷ درصد می‌باشد. نمونه‌های مغزه از زون ۲ نشان داد که بالا بودن خیلی زیاد مقدار R_t در این زون به دلیل وجود شکستگی‌ها در دولومیت‌های ریزبلور آن می‌باشد. بنابراین بایستی نقش شکستگی‌ها را در ایجاد عدم انطباق بین مقدار تراوایی ماتریکس سنگ با مقدار R_t مورد توجه قرار داد.

زون‌های ۵ و ۷ که متشکل از آهک‌های اسکلتی با بافت پکستون می‌باشند (شکل ۶-G) مقادیر تخلخل و تراوایی مغزه پائینی را نشان می‌دهند. مقادیر مقاومت R_{x0} ، R_t و اختلاف کم آنها در این دو بازه حکایت از این دارد که سنگ فاقد تخلخل مفید بوده و تخلخل‌های کم موجود عمدتاً از نوع ریزتخلخل می‌باشند. بنابراین زون‌های آهکی مذکور به عنوان زون‌های ناتراوا در مخزن محسوب می‌شوند. مطالعه مقاطع نازک تهیه شده از نمونه‌ها (شکل ۶-G) نشان می‌دهد که مقدار متوسط ریزتخلخل موجود در نمونه‌های متعلق به زون‌های ۵ و ۷، به ترتیب، ۵/۴ و ۲/۱ درصد می‌باشد.

زون‌های ۸، ۱۱ و ۱۳ (شکل ۵) که متشکل از دولستون‌ها و دولستون‌های آهکی با بافت گل-پشتیبان می‌باشند اختلاف نسبتاً زیادی بین مقادیر R_{x0} و R_t نشان می‌دهند. بعلاوه مقدار متوسط تخلخل مغزه در بازه ۸، ۱۱ و ۱۳، به ترتیب، ۱۰/۶، ۱۱/۹ و ۱۹/۴۷ درصد و مقدار متوسط تراوایی مغزه، به ترتیب، ۲/۶۴، ۱۲/۷ و ۴۰ میلی‌داری می‌باشد. شکل ۵ نشان می‌دهد که از مجموع تخلخل لاگ موجود در زون‌های مذکور (تا ۱۲ درصد)، تخلخل نوع بین بلوری و ثانویه نوع حفره‌ای و قالبی، به ترتیب، تا ۸ و ۵ درصد را تشکیل می‌دهند. در این زون‌ها، فضاهای خالی بین بلوری ارتباط نسبتاً مناسبی بین حفرات ثانویه موجود ایجاد کرده که باعث افزایش نسبی تراوایی در این مناطق گردیده است. شکل ۶ تصاویر مربوط به مقاطع نازکی که از نمونه‌های مربوط به این زون‌ها تهیه شده را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود تخلخل غالباً از نوع بین بلوری، حفره‌ای و قالبی می‌باشد. متوسط مقدار تخلخل قابل روئیت در زون‌های ۸، ۱۱ و ۱۳، به ترتیب، ۱۰/۵، ۹/۱ و ۱۲/۹۵ درصد می‌باشد. در زون ۹ که یک مادستون دولومیتی می‌باشد مقاومت R_{x0} و R_t افت شدید یافته، بعلاوه اختلاف مقادیر مقاومت نیز کاهش می‌یابد. با توجه به نحوه تغییرات مقادیر مقاومت در این زون مادستون دولومیتی به نظر می‌رسد که تخلخل عمدتاً از نوع ریزتخلخل بین بلوری بوده که ارتباط چندان خوبی نداشته و نهایتاً با یک زون ناتراوای غیرمخزنی مواجه باشیم. شکل ۴ نشان می‌دهد که تخلخل نمودار صوتی که از نوع بین بلوری است کمتر از ۷ درصد بوده و تخلخل‌های ثانویه از نوع حفره‌ای نیز در محدوده ۱-۰ درصد تغییر می‌کند. مطالعات میکروسکوپی مقاطع نازک نیز نشان‌دهنده درصد کم تخلخل (متوسط تخلخل کمتر از ۴/۵ درصد) از نوع ریزتخلخل بین بلوری و بسیار کم از نوع حفره‌ای می‌باشد.

در زون ۱۰ که از قاعده به سمت بالا متشکل از دولستون‌های آهکی، آهک و دولستون می‌باشد اختلاف خیلی کم مقادیر مقاومت R_{x0} و R_t نشان‌دهنده تخلخل ناچیز موجود در این بازه از نوع ریزتخلخل می‌باشد. بنابراین این زون به عنوان یک بازه ناتراوای غیرمخزنی محسوب می‌شود. شکل ۵ نشان می‌دهد که در زون ۱۰ فضاهای خالی موجود از نوع ریزتخلخل

مقدار بسیار کم حفره‌ای می‌باشد. تصاویر میکروسکوپی تهیه‌شده از نمونه‌های متعلق به زون ۱۰ (شکل H-۶) نیز نشان می‌دهد که تخلخل در این رخساره‌های پکستونی دانه افزون^{۲۰} بسیار کم (با متوسط تخلخل قابل روئیت ۲,۴ درصد) و از نوع ریزتخلخل می‌باشد.



شکل ۶: تصویر مربوط به مقاطع نازک تهیه شده از نمونه‌های مورد مطالعه. (A) دولستون با بلورهای درشت (زون‌های ۱ و ۱۳). تخلخل و تراوایی مغزه، به ترتیب ۱۴/۵ درصد و ۷۵/۷ میلی‌داری؛ (B) نمایی نزدیک‌تر از نمونه دولستون شکل A؛ (C) دولستون با بافت وکستون اسکلتی (زون ۶)؛ درصد بالایی از تخلخل آن از نوع قالبی و حفره‌ای است. تخلخل و تراوایی، به ترتیب، ۱۰/۶ درصد و ۱۷/۳۲ میلی‌داری؛ (D) نمایی نزدیک‌تر از نمونه دولستون شکل C؛ (E) دولستون با بلورهای ریز دولومیت و بافت وکستون اسکلتی (زون‌های ۲، ۴ و ۹). در این نمونه‌ها بدلیل ارتباط ضعیف فضا‌های ریز بین بلوری تراوایی نیز کم می‌باشد.

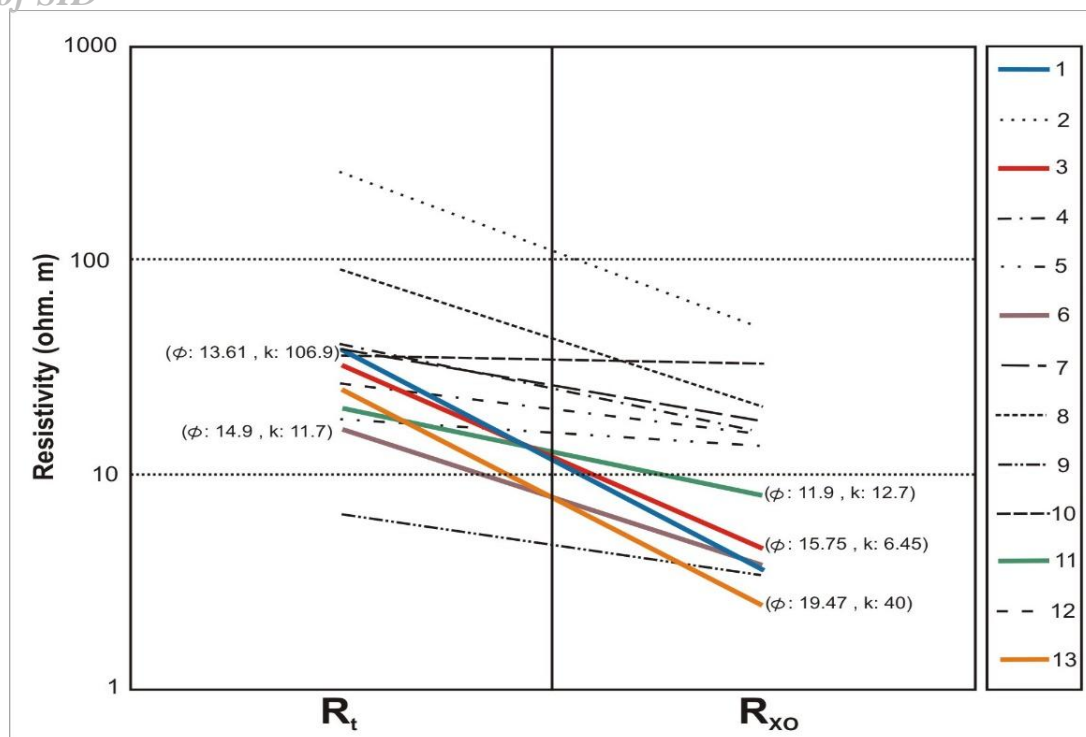
²⁰ Grain-dominated

تخلخل و تراوایی، به ترتیب ۵/۱۳ درصد و ۱/۶۱ میلی داریسی؛ (F) دولستون ریز بلور (زون ۹)؛ تخلخل عمدتاً از نوع بین بلوری و بعضاً قالبی است. تخلخل و تراوایی، به ترتیب ۷/۲ درصد و ۰/۹ میلی داریسی؛ (G) آهک دولومیتی با بافت و کستون اسکلتی (زونهای ۷ و ۱۰)؛ فضاهای خالی آن از نوع ریزتخلخل ماتریکس. تخلخل و تراوایی خیلی کم است. تخلخل و تراوایی، به ترتیب ۲/۸۵ درصد و ۰/۵۳ میلی داریسی؛ (H) آهک دانه ریز با بافت و کستون اسکلتی (زون ۱۰)؛ تخلخل عمدتاً ریزتخلخل است. کیفیت مخزنی در این نمونه بسیار پایین است. تخلخل و تراوایی مغزه، به ترتیب ۱/۷۴ درصد و ۰/۱۵ میلی داریسی.

ماهیت متفاوت ریزتخلخلهای موجود در سنگ آهک و دولستون به گونه‌ای است که ریزتخلخلهای بین بلوری در دولستونها شبکه فضای خالی بهتری را نسبت به ریزتخلخلهای موجود در ماتریکس آهکی، جهت ارتباط فضاهای خالی ثانویه از نوع حفره‌ای و قالبی ایجاد می‌نماید. بنابراین با در نظر گرفتن این پیش فرض، در زون ۱۰، به تدریج که از قاعده زون به سمت بخش میانی می‌رسیم با افزایش درصد آهک، تخلخل و تراوایی مغزه و لاگ کاهش پیدا کرده و مقدار R_{XO} و R_t افزایش و اختلاف آنها به شدت کم می‌شود. با افزایش درصد دولومیت از بخش میانی به سمت بخش بالایی زون، ضمن افزایش تخلخل بین بلوری شاهد کاهش مقدار R_{XO} و اختلاف مقادیر R_t و R_{XO} و بهبود کیفیت مخزنی می‌باشیم.

بازه ۱۲ نیز که متشکل از آهک دولومیتی و دولستون آهکی با بافت و کستون تا پکستون می‌باشد ضمن افزایش مقدار R_{XO} نسبت به بازه مخزنی زیر آن (بازه ۱۳)، کاهش مقدار تخلخل و تراوایی را نشان می‌دهد (شکل ۵). افزایش مقدار R_{XO} به سمت بخش بالای این زون، همراه با افزایش درصد آهک، کاهش درصد تخلخل و کاهش تراوایی است. مقایسه مقادیر تخلخل حاصل از نمودارهای چگالی و صوتی (شکل ۵) و همچنین تصاویر میکروسکوپی نمونه‌ها نشان می‌دهد که به دلیل اینکه تخلخل در این رخساره‌های گل-پشتیبان غالباً از نوع ریزتخلخل می‌باشد، تراوایی به شدت کاهش یافته و این زون را در زمره زون‌های غیرمخزنی قرار می‌دهد.

در شکل ۷، ابتدا و انتهای هر یک از خطوط رسم شده نشان‌دهنده متوسط مقادیر R_t و R_{XO} در هر زون می‌باشد. از طرف دیگر شیب این خطوط متوسط اختلاف مقادیر R_t و R_{XO} در زون‌های مختلف می‌باشد. مقایسه مقادیر مقاومت و همچنین شیب خطوط با متوسط مقادیر تخلخل و تراوایی مغزه در هر زون (جدول ۱) نشان می‌دهد که بهترین زون‌های مخزنی زون‌هایی هستند که R_{XO} در آنها کمتر از ۱۰ اهم‌متر بوده و R_t بیشتر از ۱۰ اهم‌متر باشد. با افزایش اختلاف R_t و R_{XO} نیز کیفیت مخزنی بهبود می‌یابد. بنابراین مطابق شکل ۵ زون‌های ۱، ۱۳، ۱۱، ۶ و ۳ به ترتیب بهترین زون‌های مخزنی محسوب می‌شوند.



شکل ۷: ارتباط بین متوسط مقادیر مقاومت در منطقه شسته شده و دست نخورده با متوسط مقادیر تخلخل و تراوایی مغزه در زونهای مختلف مخزن

کاهش کیفیت مخزنی از زون ۱ به سمت زون ۳ ارتباط مستقیم با کاهش شیب خط $R_t - R_{x0}$ در این زونها دارد. در بازه ۹ از طرفی مقدار R_{x0} کمتر از ۱۰ اهم متر است و از طرفی دیگر مقدار R_t نیز خیلی کم می باشد. بنابراین بازه ۹ به عنوان زون فاقد هیدروکربور با ریزتخلخل موجود در ماتریکس محسوب می شود. شیب کم خط $R_t - R_{x0}$ در بازه های ۵، ۱۲، ۷ و ۱۰ نشان دهنده ناتراوا بودن این زونها می باشد. مطالعه مقاطع نازک مربوط به این زونها (شکل ۶) نیز تأییدکننده این موضوع است.

۵. نتایج

این مطالعه نشان داد که نمودارهای مقاومت به عنوان ابزاری کارآمد در تفکیک تخلخل مفید و غیرمفید، شناسایی زونهای تراوا و در نتیجه زونبندی مخزن قابل استفاده می باشند. روشهای پتروفیزیکی تعیین تخلخل اعم از نمودارهای چگالی، صوتی و نوترون، مقادیر تخلخل کل و درصد تخلخل ثانویه (شامل انواع حفره ای، قالبی و شکستگی) را تعیین می کنند اما از آنجا که رفتار این لاگها نسبت به فضاهای خالی بین دانه ای، بین بلوری و ریزتخلخل ماتریکس مشابه می باشد قادر به تعیین بخشی از تخلخل غیرمفید، که نوع ریزتخلخل می باشد، نیستند. با توجه به اینکه فضاهای خالی ریز موجود در ماتریکس سنگ آهک، در رخساره های گل-پشتیبان، و یا ریزتخلخل بین بلوری در دولستونهای دانه ریز ارتباط مناسبی با یکدیگر ندارند، نقش چندان مهمی در افزایش تراوایی سنگ ایفا نخواهند کرد. با استفاده از نفوذ متفاوت فیلتره گل حفاری در بخش های تراوا و ناتراوای مخزن، می توان زونهای حاوی تخلخل های غیرمفید و مفید را از یکدیگر تفکیک نمود. بنابراین در مواردی که دسترسی به نمونه های مغزه ممکن نیست، با تلفیق نمودارهای پتروفیزیکی مذکور می توان در گستره مورد مطالعه زونبندی مخزنی انجام داد. البته توجه به نتایج مطالعه انواع تخلخل در بررسی های ماکروسکوپی و میکروسکوپی

نمونه‌های مغزه و همچنین توجه به زون‌های دارای شکستگی می‌تواند نقش مهمی در ارزیابی دقیق‌تر این روش در زون‌بندی مخزن داشته باشد.

" هیئت تحریریه مجله از آقایان دکتر علی معلمی و دکتر رضا موسوی حرمی و دکتر محمد کرامتی که داوری مقاله را به عهده داشته‌اند، تشکر و قدردانی می‌نماید "

منابع

- [1] Ahr, W. M., 2008, *Geology of carbonate reservoirs: The identification, description, and characterization of hydrocarbon reservoirs in carbonate rocks*, John Wiley and Sons publication, 277 p.
- [2] Anselmetti, F. S., and G. P. Eberli, 1993, Controls on sonic velocity in carbonates: *Pure and Applied Geophysics*, v. 141, p. 287–323.
- [3] Asquith, G. B., 1985, *Handbook of log evaluation techniques for carbonate reservoirs: AAPG methods in exploration series*, no. 5, 47 p.
- [4] Choquette P. W., and L. C. Pray, 1970, *Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates*, AAPG Bulletin, v. 54, no. 2, p. 207-250.
- [5] Ellis, D. V., and J. M. Singer, 2008, *Well Logging for Earth Scientists*, Springer, 692 p.
- [6] Ehrenberg, S. N., Eberli, G. P., Keramati, M. and S. A. Moallemi, 2006, Porosity-permeability relationships in interlayered limestone-dolostone reservoirs, AAPG Bulletin, v. 90, no. 1, p. 91-114.
- [7] Honarmand, J. and A. Amini, 2012, Diagenetic processes and reservoir properties in the ooid grainstones of the Asmari Formation, Cheshmeh Khush Oil Field, SW Iran, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, v. 81 p. 70-79.
- [8] Lucia, F. J., 1987, Rock-fabric, permeability, and log relationships in an upward-shallowing vuggy carbonate sequence: Bureau of economic geology, *Geological circular* 87, 22p.
- [9] Lucia, F. J., 2007, *Carbonate Reservoir Characterization: An Integrated Approach*, Springer-Verlag, 336 p.
- [10] Moore, C. H, 2001, *Carbonate Reservoirs: Porosity Evolution and Diagenesis in a Sequence Stratigraphic Framework*, Elsevier, Amsterdam, *Developments in Sedimentology*, no. 55, 444 p.
- [11] Serra, O., 1987, *Fundamentals of Well-Log Interpretation: The Interpretation of Logging Data*, *Developments in Petroleum Science*, Elsevier, 684 p.
- [12] Smith, L. B., Eberli, G. P., Masferro, J. L. and S. Al-Dhahab, 2003, Discrimination of effective from ineffective porosity in heterogeneous Cretaceous Carbonates, AlGhubar Field, Oman: AAPG Bulletin, v. 87, no. 9, pp. 1509-1529.
- [13] Verwer, k., Eberli, G. P., and R. J. Weger, 2011, Effect of pore structure on electrical resistivity in carbonates: AAPG Bulletin, v. 95, no. 2, pp. 175-190.
- [14] Weger, R. J., G. P. Eberli, G. T. Baechle, J.-L. Massferro, and Y. F. Sun, 2009, Quantification of pore structure and its effect on sonic velocity and permeability in carbonates: AAPG Bulletin, v. 93, p. 1297–1317.