

## توزیع الکتروفاسیس‌های مخزنی در رخساره‌های رسوبی سازند آسماری میدان نفتی قلعه‌نار

محمود جمیل‌پور<sup>۱</sup>، اسداله محبویی<sup>۲\*</sup>، سیدرضا موسوی‌حرمی<sup>۳</sup>، محمد خانه‌باد<sup>۴</sup> و حامد هوشمندکوچی<sup>۵</sup>

۱- دانشجوی دکترا، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

۲ و ۳- استاد گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

۴- استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

۵- شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب

نویسنده مسئول: mahboubi@um.ac.ir

دریافت: ۹۹/۹/۲ پذیرش: ۹۹/۱۱/۴

نوع مقاله: پژوهشی

## چکیده

سازند کربناته آسماری در میدان نفتی قلعه‌نار یکی از مهم‌ترین مخازن نفتی فروافتادگی دزفول است. این مخزن به دلیل تغییرات شدید محیط‌رسوبی و فرایندهای دیاژنزی دارای ناهمگونی بسیار زیادی است که پیش‌بینی پشاکس‌های پتروفیزیکی سنگ را در گستره مخزن بسیار مشکل می‌سازد. با ایجاد ارتباطی منطقی بین رخساره‌های رسوبی و الکتریکی می‌توان در شناخت بهتر مخزن و کاهش عدم قطعیت‌ها مؤثر واقع شد. در این مطالعه با استفاده از داده‌های پتروگرافی و توصیف مغزه در شش چاه، تعداد ۷ مجموعه رخساره‌ای سنگ آهک و یک رخساره دولومیت درشت بلور شناسایی شده است. بر اساس نمودارهای پتروفیزیکی گاما، نوترون، چگالی، صوتی و فوتوالکتریک و با بکارگیری نرم‌افزار ژئولاگ و الگوریتم MRGC، تعداد ۵ الکتروفاسیس (از ۱ تا ۵) مخزنی تعیین شدند که الکتروفاسیس ۱ بهترین و الکتروفاسیس ۵ بدترین کیفیت مخزنی را دارا هستند. بررسی فراوانی الکتروفاسیس‌ها نشان می‌دهد که ۳۰ درصد از الکتروفاسیس‌های سازند آسماری میدان نفتی قلعه‌نار دارای کیفیت مخزنی خوب و خیلی خوب هستند.

واژگان کلیدی: نمودارهای پتروفیزیکی، نرم‌افزار ژئولاگ، الگوریتم MRGC، خوشه‌بندی، پتروگرافی

## پیشگفتار

اطلاعات زمین‌شناسی به دست آورد که این خواسته نیز مستلزم صرف هزینه‌های هنگفت، افزایش خطر حفاری و طولانی شدن مدت زمان حفر چاه می‌شود. با شناسایی رخساره‌های الکتریکی یا الکتروفاسیس‌های مخزنی می‌توان در کاهش هزینه‌های تولید از مخازن هیدروکربنی مفید واقع شد. این رخساره‌ها، مجموعه‌ای از پاسخ نمودارهای درون چاهی است که تفکیک یک لایه را از دیگر لایه‌ها ممکن می‌سازد (سرا، ۱۹۸۶؛ سرا و ابوت، ۱۹۸۲). در حقیقت مفهوم رخساره‌های الکتریکی، گروه‌بندی داده‌ها با توجه به تشابهات پتروفیزیکی است که غالباً در آن مجموعه‌ای از داده نمودارهای پتروفیزیکی به رخساره‌هایی دسته‌بندی می‌شوند و با داده‌های مغزه و یا رخنمون قابل مقایسه‌اند (رابلر، ۲۰۰۵). مطالعات رخساره‌های الکتریکی با استفاده از مجموعه لاگ‌ها انجام می‌شود تا همزمان خصوصیات بیش‌تری به یک رخساره خاص تعلق گیرد، در این حالت پاسخ‌های مجموعه

سازند آسماری به سن الیگوسن - میوسن به صورت یک پلاتفرم کربناته در حاشیه یک حوضه اینترا شلف<sup>۱</sup> در بخش مرکزی اقیانوس نئوتتیس نهشته شده است. این سازند به عنوان مهم‌ترین مخزن نفت کشور ایران معرفی شده است (ون‌بوخم و همکاران، ۲۰۱۰؛ اهرنبرگ و همکاران، ۲۰۰۷؛ هال و وارمن، ۱۹۷۰). برخلاف مخازن ماسه‌سنگی، مخازن کربناته معمولاً به دلیل ناهمگونی‌های متعددی که در اثر شرایط محیط‌رسوبی و فرایندهای دیاژنزی در این نوع سنگ‌ها ایجاد می‌شود، از نظر کیفیت مخزنی بسیار متغییر بوده و از این‌رو پیش‌بینی روند تغییرات کیفی در گستره عمودی و افقی این نوع مخازن غالباً با چالش همراه است. بنابراین جهت رفع این مشکل می‌بایست از تمامی گستره مخزن

<sup>1</sup> Intra-shelf basin

رسوبگذاری متفاوت طی نهشته شدن سازند آسماری در این ناحیه دارد.

### روش مطالعه

در این مطالعه ۲۲۰۰ برش نازک رسوبی و ۸۴۰ متر مغزه در ۶ چاه مورد مطالعه قرار گرفتند. این برش‌های نازک غالباً با استفاده از آلیزارین قرمز به روش دیکسون (۱۹۶۶) جهت تفکیک سنگ‌آهک از دولومیت رنگ‌آمیزی شده و نیز به منظور بررسی بهتر تخلخل، به اپوکسی آبی آغشته شده‌اند. به منظور تعیین دقیق آشکوب‌های الیگوسن و میوسن در گستره میدان، با استفاده از داده‌های فسیل‌شناسی مرزهای زمانی مشخص و در نهایت به وسیله نرم‌افزار سیکلولاگ برای چاه‌های بدون اطلاعات فسیل‌شناسی، تعمیم داده شد. نام‌گذاری رخساره‌های کربناته بر اساس طبقه‌بندی دانهام (۱۹۶۲) و امبری و کلوان (۱۹۷۱) انجام شده است. جهت تعیین تخلخل در نمونه‌های مغزه از طبقه‌بندی آرچی (۱۹۵۲) و در برش‌های نازک از طبقه‌بندی چوکت و پری (۱۹۷۰) استفاده شد. دولومیت‌ها نیز به روش سیبلی و گرگ (۱۹۸۷) طبقه‌بندی شدند. به منظور تعیین الکتروفاسیس‌های مخزنی سازند آسماری میدان قلعه‌نار، از نرم‌افزار ژئولاگ ۷/۴ استفاده شد. جهت ارزیابی و صحت‌سنجی خوشه‌بندی انجام شده، نتایج آزمایش تزریق جیوه بر روی نمونه‌های دو چاه (B & C) با الکتروفاسیس‌های بدست آمده مطابقت داده شد. همچنین جهت ارزیابی بهتر خوشه‌های سنگی تعیین شده، پراکندگی داده‌های تخلخل و تراوایی مربوط به الکتروفاسیس‌های مختلف بر روی نمودار متقاطع این دو پارامتر ترسیم شد.

### مجموعه رخساره‌های رسوبی

بر اساس مطالعه پتروگرافی برش‌های نازک در شش چاه (بررسی بافتی، نوع آلومک‌ها و فراوانی آن‌ها)، ۸ مجموعه رخساره‌ای در مخزن آسماری میدان نفتی قلعه‌نار شناسایی گردید (جمیل‌پور و همکاران، ۱۳۹۸). از آنجایی که هر مجموعه رخساره‌ای از ریزرخساره‌هایی تشکیل شده که شرایط مشابهی از نظر محیط‌رسوبی دارند.

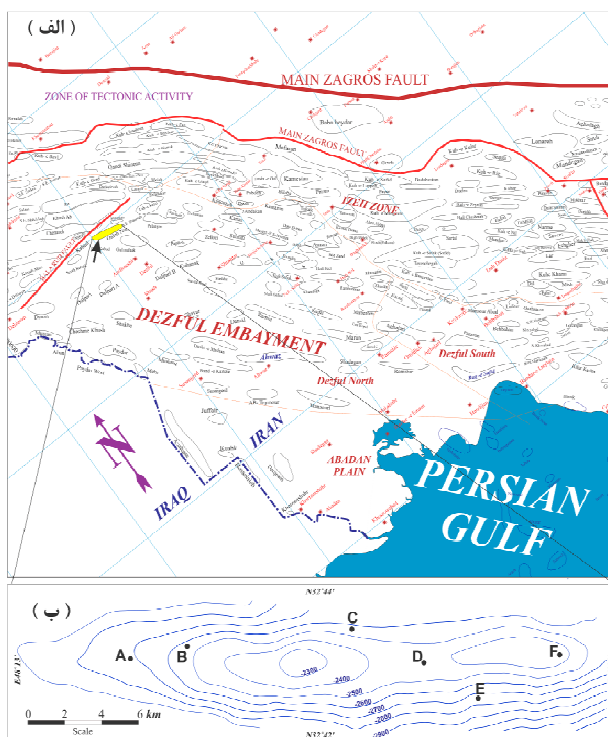
نمودارهای پتروفیزیکی پیچیده است تا آنجا که چشم انسان قادر به تقسیم‌بندی رخساره‌ها نخواهد بود. بر این اساس تجزیه و تحلیل دقیق داده‌ها با روش‌های آماری و گروه‌بندی آن‌ها در دسته‌های جدا، اجتناب‌ناپذیر است (توکلی و امینی، ۲۰۰۶).

در این مطالعه سعی می‌شود تا با استفاده از نمودارهای پتروفیزیکی خام، داده‌های آزمایش تزریق جیوه، داده‌های روتین مغزه و پتروگرافی ارتباطی منطقی بین الکتروفاسیس‌ها و رخساره‌های رسوبی ایجاد نمود تا بتوان به وسیله مدل‌سازی در چاه‌ها و یا فواصل بدون مغزه پیش‌بینی درستی از تغییرات رخساره‌ها و در نهایت تغییرات پارامترهای مخزنی ارایه داد.

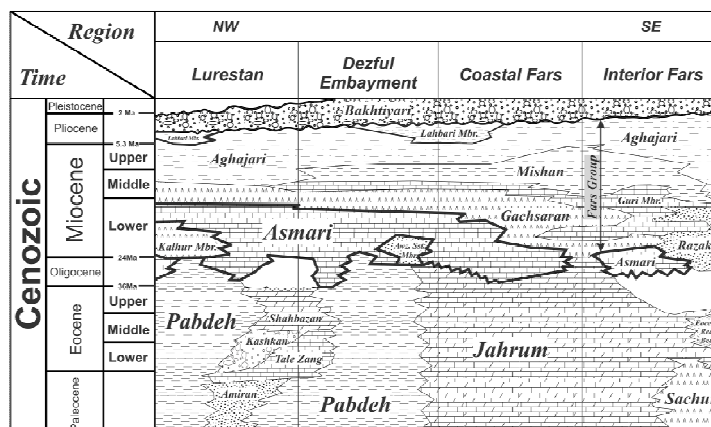
### موقعیت جغرافیایی و چینه‌شناسی میدان

میدان قلعه‌نار توسط میادین نفتی بالارود (در شمال)، کبود (در باختر) و لب سفید (در خاور) احاطه می‌شود (شکل ۱). افق‌های آسماری و بنگستان در این میدان تولیدی هستند. سازند کربناته آسماری به سن الیگومیوسن در این میدان نقش مهمی در استحصال نفت ایفا می‌کند. مرز پایینی و بالایی این سازند به ترتیب با سازندهای پابده (اوسن) و گچساران (میوسن) است.

سازند آسماری در پهنه کمر بند چین‌خورده و رورانه زاگرس (نواحی لرستان، دزفول جنوبی و فارس) دارای تغییرات شدیدی به لحاظ محدوده سنی و سنگ‌شناسی است (شکل ۲) (جیمز و وایند، ۱۹۶۵). این سازند در میدان نفتی قلعه‌نار شامل ردیفی از سنگ‌آهک، دولومیت و دولومیت آهکی و مارن بوده و شامل نهشته‌های روپلین (زیرین و بالایی)، شاتین، آکیتانین و بوردیگالین است. ضخامت سازند آسماری در میدان قلعه‌نار بسیار متغیر بوده به طوریکه از ۳۰۵ متر در باختر میدان به حدود ۴۱۱ متر در خاور می‌رسد. با توجه به نقشه‌های هم‌ضخامت سازند آسماری در محدوده گسل‌های بالارود و پیشانی کوهستان (آقانباتی، ۱۳۸۳؛ مطیعی، ۱۳۷۴) به نظر می‌رسد که این تغییر شدید ضخامت با توجه به گستره طولی کم این میدان نسبت به میادینی مانند اهواز و مارون که تغییرات ضخامت سازند آسماری کم است نشان از وجود توپوگرافی در کف بستر و ایجاد فضای



شکل ۱. الف) موقعیت میدان نفتی قلعه‌نار در فروافتادگی دزفول و ب) موقعیت چاه‌های مورد مطالعه



شکل ۱. چینه‌نگاری حوضه زاگرس در دوران سنوزویک با اندکی تغییرات از (جیمز و وایند، ۱۹۶۵)

پلانکتون در زمینه‌ای از گل کربناته، نشانگر ته‌نشست رسوبات در شرایط دریایی نسبتاً عمیق، کم انرژی و با شوری نرمال دریایی می‌باشد (فلوگل، ۲۰۱۰؛ کوزووویک و همکاران، ۲۰۰۴؛ گیل، ۲۰۰۰؛ ویلسون، ۱۹۷۵).

مجموعه رخساره‌ای II: رودستون تا پکستون لپیدوسیکلینی نومولیتی

**FA-II: Nummulitidae- Lepidocyclinidae rudstone / packstone**

این مجموعه رخساره‌ای دارای روزنداران منفذدار بزرگ و کشیده از خانواده‌های نومولیتی‌ده و لپیدوسیکلینی‌ده است.

مجموعه رخساره‌ای I: پکستون تا وکستون دارای فرامینیفراهای پلانکتون

**FA-I: Planktonic foraminifera packstone/wackestone**

این مجموعه رخساره‌ای تنها در پایین سازند آسماری مشاهده گردید و شامل سنگ‌آهک‌های بسیار متراکم و بدون تخلخل می‌باشد. فرامینیفراهای پلاژیک شامل گلوبیژرین‌ها، گلوبوروتالیدیهای بدون کیل<sup>۱</sup> و زاوایژرینا به همراه قطعات حمل شده و شکسته شده نومولیتی‌ده، دایتروپا و جلبک قرمز است. وجود فرامینیفراهای سالم

<sup>1</sup> Keel less

تنها قالب برخی از فسیل‌های خانواده نومولیتیده و لپیدوسیکلینیده به صورت تخلخل باقی مانده است.

#### مجموعه رخساره‌ای IV: فلوتستون تا رودستون مرجانی-کورالیناسه

##### FA-IV: Coral-coraline red algae floatstone/rudstone

این مجموعه از قطعات جلبک قرمز (لیتوتامینیوم و مزوفیلوم) و مرجان تشکیل شده است. فورامینیفرهای بنتیکی مانند میلیولید، آرکایاس، پئروپلیس و آمفستزینا و خرده‌های اکینویید از دیگر آلوکم‌های تشکیل‌دهنده این مجموعه رخساره‌ای هستند. قطعات مرجانی و جلبکی دارای اندازه‌های متفاوت (از یک میلی‌متر تا بیش از یک سانتی‌متر) بوده و از این‌رو این مجموعه رخساره‌ای جورشدگی خوبی را نشان نمی‌دهد. سیمانی شدن در این مجموعه معمولاً همزمان با رشد ریف‌های مرجانی چارچوب‌ساز، نهشته‌های مستحکمی ایجاد می‌شود که در برابر انرژی امواج دریا مقاوم‌اند (تاکر و رایت، ۱۹۹۰). لیکن حضور مرجان شاخه‌ای حاکی از انرژی کم آب دریا در پایین‌ترین بخش زون یوفوتیک است (پومار و همکاران، ۲۰۱۴؛ مرسیلی و همکاران، ۲۰۱۲؛ براندانو و همکاران، ۲۰۰۹؛ متیوویسنس و همکاران، ۲۰۰۸ ب).

#### مجموعه رخساره‌ای V: پکستون تا گرینستون دارای بیوکلاست و ایید

##### FA-V: Bioclast ooid packstone/grainstone

تجمعی از دانه‌های کربناته (غالباً ایید) در حد و اندازه ماسه در این مجموعه رخساره‌ای وجود دارد. فقدان زمینه گل کربناته بین دانه‌ها بیانگر تشکیل این مجموعه در محل برخورد سطح اساس امواج در شرایط آب و هوایی عادی با کف بستر می‌باشد (وزیری‌مقدم و همکاران، ۲۰۰۵). این اییدها دارای لایه‌هایی متحدالمرکز متشکل از بلورهای مماسی هستند که نشان‌دهنده ته‌نشست در محیط دریایی با انرژی متوسط تا بالا است. جابجایی بایوکلاست‌ها به دلیل وجود امواج و شرایط اشباع کربنات کلسیم منجر به تشکیل ایید شده است (سیم و لی، ۲۰۰۶). اییدها جورشدگی خوبی را به نمایش می‌گذارند البته تعدادی ایید شکسته نیز در برخی مقاطع دیده می‌شود که گرچه مقدار آن کم است لیکن به نظر می‌رسد به دلیل افزایش انرژی امواج، رسوبات را به سمت برگشتگی بافتی سوق داده است. هسته اییدها معمولاً از

فرامینیفرهایی از قبیل آپرکولینا، نئوروتالیا، هتروستزینا و اسپیروکلپیتوس از خانواده نومولیتیده و نفرولپیدینا و یولپیدینا از خانواده لپیدوسیکلینیده به همراه آمفستزینا، میوزیپسینا، قطعات جلبک قرمز و اکینویید در این مجموعه دیده می‌شوند. دانه‌ها بعضاً دارای بیش از دو میلی‌متر بزرگ بوده و در زمینه‌ای از گل آهکی، قطعات جلبک قرمز و خرده‌های اسکلتی قرار دارند. فراوانی فرامینیفرهای بزرگ محیط عمیق (نومولیتیده و لپیدوسیکلینیده) و حضور قطعات اسکلتی فونای تپیک دریای باز مانند اکینویید و جلبک‌های قرمز مبین رسوبگذاری در ناحیه الیگوفوتیک رمپ میانی است (پومار و همکاران، ۲۰۱۴؛ براندانو و همکاران، ۲۰۰۹؛ متیوویسنس و همکاران، ۲۰۰۸؛ نیلسنیک و همکاران، ۲۰۰۵).

#### مجموعه رخساره‌ای III: پکستون تا گرینستون نومولیتی

##### FA-III: Nummulites packstone/grainstone

در این مجموعه رخساره‌ای، فرامینیفرهای بنتیک بزرگ شاخص روپلین به فراوان دیده می‌شود. انواع نومولیت درشت (مانند فیشتلی و واسکوز)، لپیدوسیکلینا، آپرکولینا و هتروستزینا در این مجموعه حضور دارند. حضور فرامینیفرهای سالم در این مجموعه رخساره‌ای نشان دهنده حمل و نقل بسیار کم آن‌ها و برجا بودن قطعات است. از دیگر خرده‌های اسکلتی می‌توان از اکینوییدها، جلبک قرمز، نئوروتالیا، میلیولید و گاستروپود نام برد. بیش‌ترین حضور این مجموعه رخساره‌ای در زمان روپلین بالایی می‌باشد. در این رخساره نومولیت‌ها حضور فراوانی داشته و بخش اعظم آلوکم‌های موجود در این رخساره را تشکیل می‌دهند. با توجه به فراوانی نومولیت‌ها در رمپ میانی (باراتولو و همکاران، ۲۰۰۷؛ پومار، ۲۰۰۱) می‌توان محیط رسوبی این رخساره را به رمپ میانی نسبت داد. حضور فراوان نومولیت‌ها نشان‌دهنده مقدار کم مواد غذایی و شرایط الیگوترافی باشد. حضور انواع کشیده و پهن خانواده نومولیتیده نشانگر افزایش عمق آب و تکامل موجود جهت استفاده بهینه از میزان نور دریافتی برای جلبک همزیست می‌باشد (بی‌وینگتون-پتی و همکاران، ۲۰۰۵). شدت دولومیتی شدن در این رخساره به حدی است که تمام سنگ به طور یکپارچه دولومیتی شده و

و حفره‌ای در این رخساره نشان‌دهنده تشکیل و تنشست آن در یک محیط کم انرژی با عمق خیلی کم (بین جذر و مدی) می‌باشد (رَسِر و همکاران، ۲۰۰۵؛ نیلسیک و همکاران، ۲۰۰۵؛ اِستِرَسِر و همکاران، ۱۹۹۹).

#### مجموعه رخساره‌های VIII: دولومیت درشت بلور

##### FA-VIII: Coarse Crystalline Dolomite

همانطور که پیشتر ذکر شد این مجموعه رخساره‌ای به دلیل عملکرد شدید فرایند دولومیتی شدن بر روی هر یک از مجموعه‌های رخساره‌ای قبلی می‌تواند شکل بگیرد و بنابراین این واحد به صورت مجموعه رخساره‌ای مجزا در نظر گرفته می‌شود که غالباً بلورهای دولومیت به صورت صفحه‌ای شکل‌دار، صفحه‌ای نیمه‌شکل‌دار و به ندرت غیر صفحه‌ای دیده می‌شود. به طور کلی قسمت‌های مهم دولومیت درشت‌بلور شده در توالی سازند آسماری میدان قلعه‌نار محدود به زمان روپلین است. با توجه به جایگاه آن در توالی سازند آسماری، به نظر می‌رسد که این رخساره بیشتر از دولومیتی شدن شدید مجموعه رخساره‌ای شماره دو (Nummulitidae-) در نهشته‌های روپلین ایجاد شده باشد.

#### مدل رسوبی

توصیف و تفسیر رخساره‌های رسوبی، نبود وجود ریف‌های سدی به هم پیوسته، تغییر تدریجی رخساره‌ها به یکدیگر، نبود رخساره‌های ریزشی و لغزشی که حاکی از رسوبگذاری در منطقه پرشیب می‌باشند، مدل رسوبی از نوع رمپ کربناته را برای سازند آسماری در میدان قلعه‌نار پیشنهاد می‌نماید. همچنین به نظر می‌رسد به دلیل تمرکز رسوبات در نواحی رمپ میانی و داخلی و نبود تمرکز آن‌ها در رمپ خارجی، این نوع رمپ از نوع هم شیب<sup>۳</sup> بوده و فاقد شکستگی در نیمرخ می‌باشد (بروچت و رایت، ۱۹۹۲). حضور فرامینیفراهای کفزی بزرگ با دیواره هیالین (خانواده نومولیتیده و لپیدوسیکلینیده) به همراه جلبک قرمز نشان‌دهنده تنشست رسوبات در نواحی گرمسیری می‌باشد (براندانو و کوردا، ۲۰۰۲).

زمان رسوبگذاری موقعیت‌های مختلف رمپ کربناته طی نهشته شدن سازند آسماری در میدان قلعه‌نار به گونه‌ای

بایوکلاست یا فرامینیفراهای بنتیک سالمی مثل میلیولید و الفیدیوم تشکیل شده است. این مجموعه رخساره‌ای متعلق به محیط پشته‌های زیر آبی<sup>۲</sup> است که شاخص مرز بین رمپ میانی و داخلی بوده و معادل RMF-29 معرفی شده توسط فلوگل (۲۰۱۰) است.

#### مجموعه رخساره‌های VI: وکستون تا گرینستون دارای

##### فرامینیفراهای بنتیک

##### FA-VI: Bentic foraminifer wackestone/grainstone

این مجموعه رخساره‌ای دارای بافتی متغیر (از وکستون تا گرینستون) است. حضور فرامینیفراهای بنتیک بدون منفذ متنوع از قبیل بورلیس، آرکایاس، پنروپلیس، آستروتولینا، میلیولید، دندرتینا و ... به همراه نئورتولینا، آفیسستزینا، خرده‌های اکتیونید، بریوزوئر، شکم‌پا، دوکفه‌ای و جلبک قرمز و جلبک سبز باعث شده که این مجموعه رخساره‌ای بالاترین تنوع زیستی را بین سایر مجموعه‌ها داشته باشد. بر مبنای ویژگی‌های بافتی (وجود گل کربناته بین دانه‌ها)، تنوع و گسترش فرامینیفراهای بدون منفذ با پوسته پورسلانوز و حضور دوکفه‌ای و گاستروپود، این مجموعه رخساره‌ای را به محیط لاگون (محیط رسوبی کم عمق و کم انرژی دارای نور فراوان) در رمپ داخلی نسبت می‌دهد (شب‌افروز و همکاران، ۲۰۱۵؛ شب‌افروز و همکاران، ۲۰۱۵؛ پومار و همکاران، ۲۰۱۴؛ ذبیحی زوآرم و همکاران ۲۰۱۳؛ مرسیلی و همکاران، ۲۰۱۲؛ پومار و هالوک، ۲۰۰۸؛ متیوویسنس و همکاران، ۲۰۰۸).

#### مجموعه رخساره‌های VII: مادستون

##### FA-VII: Mudstone

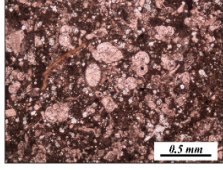
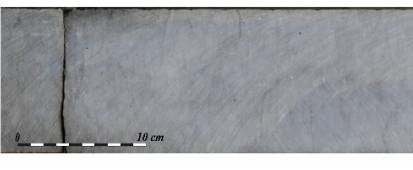
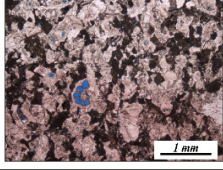
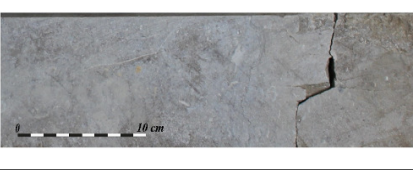
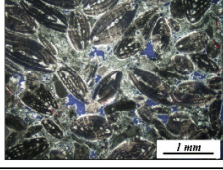
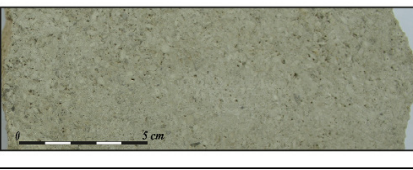
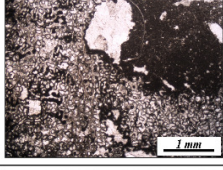
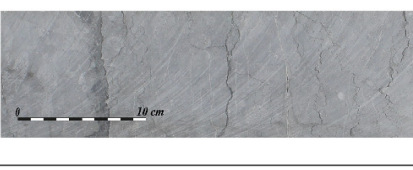
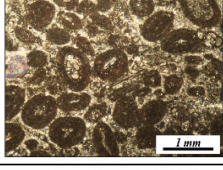
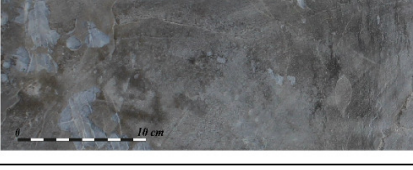
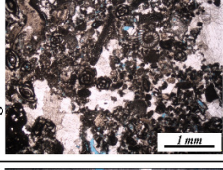
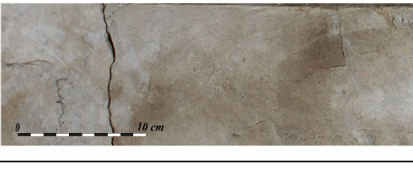
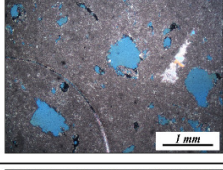
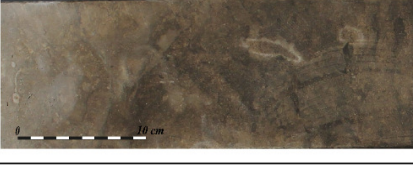
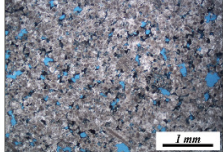
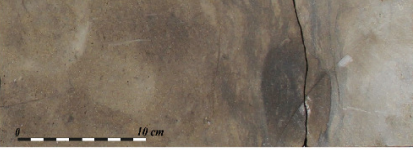
به طور کلی این مجموعه رخساره‌ای یک مادستون حاوی ماسه است که غالباً دولومیتی می‌باشد. ذرات آواری غالباً از نوع کوارتز و دارای جورشدگی خوب و بدون گردشدگی و در حد ماسه خیلی ریز و یا سیلت نیز به میزان متفاوت در این مجموعه رخساره‌ای دیده می‌شوند. تنها آثار زیستی قابل مشاهده جلبک‌های سبز-آبی (استروماتولیت) به همراه قطعات بسیار پراکنده صدف دوکفه‌ای است. وجود دولومیت‌های بسیار ریز بلور، حضور دانه‌های کوارتز و کانی‌های تبخیری، و نبود فسیل‌های گیاهی و جانوری به همراه فابریک تخلخل چشم پرنده‌ای

<sup>3</sup> Homoclinal

<sup>2</sup> Shoal

نهایت نیز شرایط سبخایی (سازند گچساران) با خروج این رمپ کربناته حاصل شده است (حیدری، ۲۰۰۸).

است که می‌توان نهشته‌های رمپ خارجی را به زمان روپلین پایینی، رمپ میانی را به روپلین بالایی و شاتین و رمپ داخلی را به آکیتانین و بوردیگالین نسبت داد.

<i>Facies Association</i>	<i>Depositional setting</i>	<i>Core photo</i>	<i>Porosity Description</i>
<i>Planktonic foraminifera packstone / wackestone</i> 	<i>Deep shelf margin (Outer Ramp)</i>		<i>Neither visible pore space on core (Archie classification Type A), nor on thin sections. Tight Limestone.</i>
<i>Nummulitidae-Lepidocyclusinidae wackestone/packstone</i> 	<i>Open sea shelf (Distal Middle Ramp)</i>		<i>No visible pore space on core (Archie classification Type A), but rare primary porosity (intraparticle) on thin sections. Tight Limestone.</i>
<i>Nummulites packstone /grainstone</i> 	<i>Open sea shelf (Middle Ramp)</i>		<i>Visible pore space on core (pinpoint) (Archie classification Type B to C), and thin sections (primary porosity; interparticle). Porous Limestone.</i>
<i>Coral-coraline red algae floatstone/rudstone</i> 	<i>Open sea shelf (Proximal Middle Ramp)</i>		<i>Neither visible pore space on core (Archie classification Type A), nor on thin sections. Stylolites have developed on this FA. Very tight Limestone.</i>
<i>Bioclast ooid packstone/grainstone</i> 	<i>Distal Inner Ramp</i>		<i>Neither visible pore space on core (Archie classification Type A), nor on thin sections. All pore spaces on this FA was filled by sparry calcite cement. Tight Limestone.</i>
<i>Benthic foraminifer wackestone/ grainstone</i> 	<i>Inner Ramp (Lagoon)</i>		<i>Visible pore space on core (pinpoint) (Archie classification Type B), and thin sections (secondary porosity; moldic). Porous Limestone.</i>
<i>Mudstone</i> 	<i>Proximal Inner Ramp (close to beach)</i>		<i>Visible pore space on core (pinpoint) (Archie classification Type B), and thin sections (primary porosity; fenestral). Porous Limestone with some stylolites.</i>
<i>Crystalline Dolomite</i> 	<i>Not allocated to special depositional setting</i>		<i>Visible pore space on core (pinpoint) (Archie classification Type B to C), and thin sections (secondary porosity; intercrystalline). High porous Limestone.</i>

شکل ۲. تصاویر برش‌های نازک میکروسکوپی و مغزه مجموعه‌های رخساره‌ای مخزن آسماری میدان قلعه‌نار به همراه محیط رسوبی و وضعیت تخلخل

جدول ۱. مشخصات و محیط رسوبی ریزرخساره‌ها و مجموعه‌های رخساره‌ای سازند آسماری در میدان قلعه‌نار

Facies		Microfacies Name	Components	Depositional Setting	
FA-I	Planktonic foraminifera packstone / wackestone	FA-I-1	Planktonic foraminifera packstone / wackestone	Planktonic foraminifera such as Globigerina, Keel-less Globorotalids, and Zeauvigerina, with transported and broken parts of Nummulitidea, Ditropa and red algae	Deep shelf margin (Outer Ramp)
		FA-I-2	Planktonic foraminifera nummulitidae bioclast packstone		
FA-II	Nummulitidae-Lepidocyclinidae floatstone/rudstone	FA-II-1	Nummulitidae-Lepidocyclinidae floatstone/rudstone	Operculina, Neorotalia, Heterostegina, Spiroclypcus, Nephrolepidina and Eulepidina, Amphistegina, Miogypsina and red-algae, echinoid debris.	Open sea shelf (Distal Middle Ramp)
		FA-II-2	Neorotalia corallinean packstone/grainstone		
		FA-II-3	Nummulites neorotalia corallinean packstone		
FA-III	Nummulites packstone/grainstone	FA-III-1	Bioclast corallinean Nummulites packstone/grainstone	Rupelian index large benthic foraminifera in abundance. Large types of Nummulite (such as fichteli and vasculus), Lepidocyclina, Operculina and Heterostegina.	Open sea shelf (Middle Ramp)
		FA-III-2	Nummulites grainstone/packstone		
		FA-III-3	Miliolid corallinean nummulites packstone/grainstone		
FA-IV	Coral-coraline red algae floatstone/rudstone	FA-IV-1	Coral-coraline red algae rudstone	Parts of red algae (Lithothamnion and Mesophyllum) and coral. Benthic foraminifera such as Miliolids, Archaia, Peneroplis, Amphistegina and echinoid.	Open sea shelf (Proximal Middle Ramp)
		FA-IV-2	Coral-coraline red algae wackestone/floatstone		
		FA-IV-3	Corallinean perforated imperforated foraminifer packstone		
FA-V	Bioclast ooid packstone/ grainstone	FA-V-1	Faverina ooid packstone/grainstone	very good sorted tangential ooids with pervasive sparry calcite cement.	Distal Inner Ramp (Shoal)
		FA-V-2	Bioclast ooid packstone/grainstone		
FA-VI	Benthic foraminifer wackestone/grainstone	FA-VI-1	High diversity imperforated foraminifer packstone/grainstone	Various imperforated benthic foraminifera such as Borelis, Archaia, Peneroplis, Austrotrillina, Miliolid, Dendritina, etc. with Neorotalia, Amphistegina, Echinoid fragments, Bryozoa, Gastropod, Bivalve and Red Algae	Inner Ramp (Lagoon)
		FA-VI-2	Small rotaliids echinoids wackestone/packstone		
		FA-VI-3	Ostracods bioclast packstone/grainstone		
		FA-VI-4	Small miliolid wackestone		
FA-VII	Mudstone	FA-VII-1	Mudstone	Good sorted and not rounded of very fine sand or silt.	Proximal Inner Ramp (close to beach)
		FA-VII-2	Sandy mudstone		
FA-VIII	Crystalline Dolomite	FA-VIII	Crystalline Dolomite	Planar-E, Planar-S and rare Nonplanar crystal of dolomite	Not allocated to special depositional setting

## الکتروفاسیس‌ها

خوشه‌بندی داده‌ها یکی از روش‌هایی است که مهندسان مخزن و زمین‌شناسان برای شناخت بهتر مخزن استفاده می‌کنند. برای تعیین الکتروفاسیس‌های مخزنی غالباً از نمودارهای پتروفیزیکی درون چاهی استفاده می‌شود. لیکن می‌بایست نتایج به دست آمده از این طریق با داده‌های زمین‌شناسی (پتروگرافی و توصیف مغزه)، نتایج

آزمایش معمول مغزه<sup>۱</sup> و نتایج آزمایش تزریق جیوه مطابقت و صحت آن مورد ارزیابی قرار گیرد. طبق تعریف، مجموعه‌ای از پاسخ‌ها به نمودارهای پتروفیزیکی که به صورت رقمی بوده و ویژگی خاصی از فیزیک و ترکیب سنگ را نشان می‌دهد، الکتروفاسیس نامیده می‌شود (دیویس، ۲۰۱۸). در این روش، سنگ‌های

<sup>1</sup> Routine Core Analysis (RCA)

فشار مویینه (به دست آمده از نتایج آزمایش تزریق جیوه) مورد اعتبارسنجی قرار رفته و در نهایت یک مدل بهینه پنج الکتروفاسیسی (EFs 1-5) تعیین شد. این الکتروفاسیسی‌ها برای مابقی چاه‌های بدون مغزه رواج داده شد.<sup>۴</sup>

جهت انجام الکتروفاسیسی‌های مخزنی در مخزن آسماری میدان نفتی قلعه‌نار از نمودارهای ارزیابی شده پتروفیزیکی مثل تخلخل مفید و اشباع آب استفاده نشد و در این قسمت صرفاً از داده‌های خام پتروفیزیکی استفاده گردید. استفاده از نمودارهای ارزیابی شده در تعیین الکتروفاسیسی‌های مخزن به دلیل اعمال نظر کاربر پتروفیزیست گویای واقعیت مخزن نیست و الکتروفاسیسی‌های بدست آمده بدین طریق تا حد زیادی در کنترل ارزیابی پتروفیزیکی صورت گرفته بر روی سنگ مخزن می‌باشد. به عبارت دیگر استفاده از نمودارهای ارزیابی شده در تعیین الکتروفاسیسی‌های مخزنی منجر به قابل پیش‌بینی بودن نتایج می‌گردد. به طور مثال در فواصلی از مخزن که تخلخل مفید بالا و اشباع آب پایین باشد قطعاً الکتروفاسیسی تعیین شده بدین روش از نظر کیفیت مخزنی خوب و یا خیلی خوب خواهد بود درحالی‌که ممکن است اینگونه نباشد و سنگی با تخلخل بالا، به دلیل اندازه کوچک گلوگاه‌های تخلخل توانایی عبور دادن سیال از خود را نداشته و در واقعیت، جزء الکتروفاسیسی‌های بد مخزنی طبقه‌بندی شود. از طرفی ممکن است ارزیابی پتروفیزیکی صورت گرفته جهت تعیین درصد اشباع آب و میزان تخلخل مفید، صحیح نبوده و این عامل منجر به اشتباه در تعیین الکتروفاسیسی‌های مخزنی گردد.

پراکندگی مراکز اصلی خوشه‌بندی داده‌ها روی اغلب نمودارهای متقاطع (نوترون-چگالی، نوترون-صوتی، چگالی-صوتی و ...) به گونه‌ای است که می‌توان ۵ مرکز تجمع را برای این داده‌ها در نظر گرفت که این مراکز دسته‌های اصلی الکتروفاسیسی‌ها را تشکیل می‌دهند. انطباق بین رخساره‌های رسوبی و الکتروفاسیسی‌ها به گونه‌ای برقرار شد که با تغییر خصوصیات رخساره رسوبی در توالی هر چاه، تغییر در نوع الکتروفاسیسی نیز مشاهده گردد. بهترین الکتروفاسیسی به لحاظ کیفیت مخزنی با شماره یک (به رنگ سبز تیره) و بدترین الکتروفاسیسی

مختلف با تخلخل‌های متفاوت در خوشه‌هایی مجزا تفکیک می‌گردند که این خوشه‌ها دارای مجموعه پاسخ‌های متفاوت نمودارهای پتروفیزیکی می‌باشند. این تفاوت در مجموعه پاسخ‌ها، منجر به اختلاف در نتایج آزمایش معمول مغزه و نتایج آزمایش تزریق جیوه خواهد شد. بنابراین، الکتروفاسیسی‌ها را می‌توان با مجموعه‌ای از این خصوصیات از یکدیگر متمایز نمود (طرقه و همکاران، ۲۰۱۵؛ طرقه، ۲۰۱۴؛ ائوزن و پاور، ۲۰۱۲). در واقع، داده‌های موجود در هر الکتروفاسیسی حداکثر شباهت به یکدیگر را داشته و همچنین حداکثر اختلاف را با داده‌های خوشه‌های دیگر دارند (فرشی و همکاران، ۲۰۱۹؛ لی و همکاران، ۲۰۱۴).

جهت تعیین الکتروفاسیسی‌های سنگ مخزن، با استفاده از نرم‌افزار ژئولاگ ۷/۴، بارگذاری نمودارهای پتروفیزیکی خام مانند اشعه گاما محاسبه شده (CGR)، تخلخل نوترون (NPHI)، چگالی (RHOB)، فوتوالکتریک (PEF) و صوتی (DT) به عنوان نمودارهای مدل<sup>۲</sup> انجام شد. از آنجایی که داده‌های تخلخل و تراوایی در شش چاه موجود بود از این داده‌ها به عنوان نمودارهای همراه<sup>۳</sup> جهت تعیین الکتروفاسیسی‌های مخزنی استفاده شد. سپس جهت مدل‌سازی و آموزش شبکه عصبی، در شش چاه مغزه‌دار (فراپند تعیین خوشه‌های اصلی الکتروفاسیسی‌ها) سنگ مخزن با الگوریتم MRGC صورت پذیرفت. شناسایی الگوهای طبیعی در نمودارهای پتروفیزیکی بدون هیچ گونه پیش‌زمینه‌ای در مورد داده‌های ورودی و همچنین پیشنهاد تعداد بهینه خوشه‌ها به طور خودکار از مزایای مهم روش MRGC است (نوریان و همکاران، ۲۰۲۰؛ نوریان و همکاران، ۲۰۱۷). تعداد خوشه‌ها در این روش توسط نرم‌افزار تعیین می‌شود (جمشیدی و همکاران، ۱۳۹۵) که بسته به نیاز مطالعه می‌توان تعداد خوشه‌های بالاتر (دقت بالاتر) یا تعداد خوشه‌های کمتر (دقت کمتر) را انتخاب نمود. پس از خوشه‌بندی داده‌های ورودی، مدل‌های مختلف الکتروفاسیسی با تعداد خوشه‌های متفاوت به دست آمد. سپس مدل‌های الکتروفاسیسی مختلف (با تعداد الکتروفاسیسی‌های متفاوت) با استفاده از نتایج پتروگرافی، نتایج آزمایش معمول مغزه و منحنی‌های

<sup>۲</sup> Model Logs<sup>۳</sup> Associated Logs<sup>۴</sup> Propagated



الکتروفاسیس مخزنی نشان می‌دهد. توصیف هر یک از الکتروفاسیس‌های تعیین شده به قرار زیر است:

نیز با شماره ۵ (به رنگ آبی پر رنگ) مشخص گردید (شکل ۳). جدول ۲ مقادیر میانگین برخی پارامترهای پتروفیزیکی و تخلخل و تراوایی مغزه را در هر

	NAME	COI	PAT	WEIGH	CGR	NPHI	RHOB	PEF	DT
1	EF 1 (Very Good)			66					
2	EF 2 (Good)			134					
3	EF 3 (Fair)			270					
4	EF 4 (Bad)			632					
5	EF 5 (Very Bad)			90					

شکل ۳. فراوانی برخی شاخص‌های پتروفیزیکی در الکتروفاسیس‌های مخزنی سازند آسماری در میدان نفتی قلعه‌نار

جدول ۱. مقادیر میانگین شاخص‌های پتروفیزیکی و آنالیز مغزه در هر یک از الکتروفاسیس‌های مخزنی سازند آسماری میدان قلعه‌نار

EFS	SGR (API)	CGR (API)	NPHI (V/V)	RHOB (GR/CM <sup>3</sup> )	DT (μS/F)	PEF (B/E)	SWE (%)	PHIE (%)	CORE φ(%)	CORE k (mD)
EF 1	77.33	2.98	0.08	2.69	51.38	4.86	32.80	8.90	5.91	0.38
EF 2	69.66	2.68	0.07	2.72	50.29	3.45	40	4.30	4.82	0.31
EF 3	42.62	3.61	0.03	2.74	50.05	3.67	61.70	2.60	3.35	0.08
EF 4	24.27	0.96	0.04	2.67	52.56	3.65	84.90	0.90	1.08	0.04
EF 5	59.99	9.55	0.14	2.64	55.77	4.78	99.20	0.10	0.08	0.02

ارزیابی پتروفیزیکی نیز نشان می‌دهد میانگین تخلخل مؤثر ۴/۳ درصد و میانگین اشباع آب ۴۰ درصد می‌باشند که این ارقام رده‌بندی این الکتروفاسیس در جایگاه دوم (کیفیت مخزنی خوب) تایید می‌نماید. این الکتروفاسیس در توالی‌های مربوط به شاتین، بوردیگالین و روپلین (پایینی و بالایی) دیده می‌شود. مجموعه‌های رخساره‌ای مادستونی و وکستون تا گرینستون دارای شکل‌های بنتیک دارای بیش‌ترین گسترش این الکتروفاسیس می‌باشند. الکتروفاسیس ۲ در مجموع ۱۲ درصد مخزن آسماری را تشکیل می‌دهد.

**الکتروفاسیس ۳:** این الکتروفاسیس کمترین فراوانی را در بین الکتروفاسیس‌های مخزنی سازند آسماری داشته و به دلیل شرایط خاص اندازه حفرات و گلوگاه‌ها، جایگاه ویژه‌ای در بین سایر الکتروفاسیس‌ها دارد. حضور حفرات با اندازه‌های مختلف باعث شده که پارامتر تخلخل در این الکتروفاسیس از جورشدگی بدی برخوردار باشد و این امر باعث تمایز آن از الکتروفاسیس‌های خوب و بد شده است. به عبارت دیگر شرایط مخزنی نه آنقدر خوب است که بتوان در زمره الکتروفاسیس‌های ۱ و ۲ قرار گیرد و نه آنقدر بد که بتوان آن را در ردیف الکتروفاسیس‌های ۴ و ۵ قرار داد. ارزیابی‌های پتروفیزیکی نیز نشان می‌دهد وجود اندازه حفرات مختلف باعث شده که سنگ مخزن در محدوده این الکتروفاسیس، به طور همزمان به وسیله

**الکتروفاسیس ۱:** این الکتروفاسیس در بین الکتروفاسیس‌های تعیین شده بهترین شرایط را از منظر کیفیت مخزنی دارد. نتایج آنالیز روتین مغزه نشان می‌دهد بالاترین میانگین داده‌های تخلخل و تراوایی به ترتیب با ۵/۹۱ درصد و ۰/۳۸ میلی‌داری، به این الکتروفاسیس اختصاص دارد. بررسی خصوصیات ارزیابی پتروفیزیکی نیز نشان می‌دهد میانگین تخلخل مؤثر ۸/۹ درصد و میانگین اشباع آب ۳۲/۸ درصد می‌باشند که به ترتیب بالاترین و پایین‌ترین میزان در بین الکتروفاسیس‌های تعیین شده می‌باشند. اگرچه این الکتروفاسیس در تمامی توالی سازند آسماری دیده می‌شود، اما به طور چشمگیری در رسوبات روپلین بالایی و بوردیگالین قابل مشاهده است. این الکتروفاسیس بیشتر در مجموعه‌های رخساره دولومیتی درشت بلور با تخلخل بین‌بلوری و رخساره گرینستون نومولیتی با تخلخل بین‌دانه‌ای دیده شده و در مجموع ۱۸ درصد مخزن آسماری را به خود اختصاص می‌دهد.

**الکتروفاسیس ۲:** گرچه کیفیت مخزنی این الکتروفاسیس همانند الکتروفاسیس ۱ نیست لیکن به لحاظ مخزنی شرایط مناسبی دارد چرا که نتایج آنالیز روتین مغزه نشان می‌دهد میانگین داده‌های تخلخل و تراوایی به ترتیب با ۴/۸۲ درصد و ۰/۳۱ میلی‌داری، به این الکتروفاسیس اختصاص دارد بررسی خصوصیات

در مجموع ۳۵ درصد مخزن آسماری را به خود اختصاص می‌دهد.

### آزمایش تزریق جیوه

یکی از روش‌ها برای ارزیابی صحت الکتروفاسیس‌های تعیین شده استفاده از داده‌های آزمایش تزریق جیوه<sup>۱</sup> و بررسی منحنی‌های مربوط به آن می‌باشد. معمولاً نتایج آزمایش تزریق جیوه به صورت منحنی‌هایی است که شکل آن‌ها به ویژگی‌های بافتی سنگ و هندسه تخلخل بستگی دارد. با بررسی شکل این نمودارها می‌توان به ارتباط بین تراوایی و اشباع آب در سنگ‌های مخزن پی برد. هر چقدر تراوایی کمتر باشد کانال‌ها و لوله‌های موئین باریک‌تر بوده و در نتیجه فشار بیش‌تری جهت غلبه بر نیروی موئینه و جابجایی فاز ترکننده نیاز است. بنابراین درصد اشباع آب در سنگ‌هایی با منافذ ریز بیشتر است (فرشی و همکاران، ۱۳۹۵). الگوهای مختلف منحنی (بر روی نمودار درصد اشباع آب و فشار تزریق) و میزان آب کاهش نیافتنی نشان‌دهنده تفاوت در شرایط پتروفیزیکی نمونه‌ها می‌باشد که این تفاوت می‌بایست خود را در الکتروفاسیس‌های تعیین شده نشان داده و با شرایط مخزنی آن الکتروفاسیس منطبق باشد.

بدین منظور داده‌های آزمایش تزریق جیوه ۲۵ نمونه که در دو چاه در دسترس بودند (شکل ۴) جهت اعتبارسنجی الکتروفاسیس‌های تعیین شده، مورد بررسی قرار گرفتند. همانطور که از شکل مشخص می‌شود، الکتروفاسیس‌های تعیین شده انطباق خوبی با نتایج آزمایش تزریق جیوه نشان می‌دهند. به نحوی که نمونه‌های با میزان آب کاهش نیافتنی بالا منطبق بر الکتروفاسیس‌های بد و خیلی بد بوده و نمونه‌های با میزان آب کاهش نیافتنی پایین با الکتروفاسیس‌های مخزنی خوب و خیلی خوب مرتبط‌اند. روند منحنی‌ها در الکتروفاسیس‌های بد و خیلی بد نشان می‌دهد که برای تخلیه مایعات از شبکه منافذ سنگ به فشار زیادی نیاز است (کاندرا و همکاران، ۲۰۱۵)، لیکن در الکتروفاسیس‌های خوب و خیلی خوب به دلیل افزایش قطر حفرات و گلوگاه‌های مرتبط به هم، تخلیه حجم عظیمی از فاز ترکننده به راحتی و با فشار کمی صورت می‌پذیرد (سان و همکاران، ۲۰۱۵). شیب منحنی‌ها و

دو سیال آب (در حفرات ریزتر) و نفت (در حفرات درشت‌تر) اشغال شود. میانگین داده‌های تخلخل و تراوایی مغزه برای الکتروفاسیس ۳ به ترتیب، ۳/۳۵ درصد و ۰/۰۸ میلی‌داری است. ارزیابی‌های پتروفیزیکی نیز نشان می‌دهد میانگین تخلخل مؤثر ۲/۶ درصد و میانگین اشباع آب ۶۱/۷ درصد می‌باشند. به نظر می‌رسد این الکتروفاسیس در نهشته‌های بوردیگالین حضور بیش‌تری دارد. گرچه این الکتروفاسیس را نمی‌توان به مجموعه رخساره‌ای معینی اختصاص داد لیکن به نظر می‌رسد مجموعه‌های رخساره‌ای مادستونی و وکستون تا گرینستون دارای شکل‌های بنتیک دارای بیش‌ترین حضور الکتروفاسیس ۳ هستند. این الکتروفاسیس در مجموع ۱۰ درصد مخزن آسماری را به خود اختصاص می‌دهد.

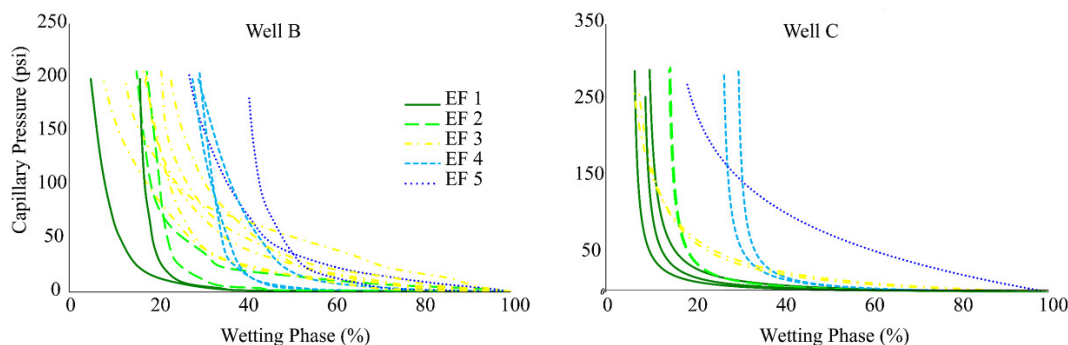
**الکتروفاسیس ۴:** نتایج آنالیز عادی مغزه نشان می‌دهد میانگین داده‌های تخلخل و تراوایی به ترتیب با ۱/۰۸ درصد و ۰/۰۴ میلی‌داری، به این الکتروفاسیس اختصاص دارد بررسی خصوصیات ارزیابی پتروفیزیکی نیز نشان می‌دهد میانگین تخلخل مؤثر ۰/۹ درصد و میانگین اشباع آب ۸۴/۹ درصد است. مقدار بالای اشباع آب و میزان کم تخلخل حکایت از کیفیت مخزنی پایین این الکتروفاسیس دارد. این الکتروفاسیس در تمامی توالی سازند آسماری مخزن وجود دارد اما بیشتر در نهشته‌های روپلین بالایی مشاهده می‌شود. این الکتروفاسیس در مجموعه‌های رخساره‌ای بایوکلاست ایید پکستون تا گرینستون و رودستون تا پکستون لپیدوسیکیلینی نومولیتی دیده شده و در مجموع ۲۵ درصد مخزن آسماری را به خود اختصاص می‌دهد.

**الکتروفاسیس ۵:** این الکتروفاسیس به لحاظ مخزنی بدترین شرایط را دارد به طوری‌که میانگین داده‌های تخلخل و تراوایی مغزه به ترتیب مقادیر ۰/۰۸ درصد و ۰/۰۲ میلی‌داری را برای این الکتروفاسیس نشان می‌دهد. بررسی خصوصیات ارزیابی پتروفیزیکی از میانگین تخلخل مؤثر ۰/۰۱ درصد و میانگین اشباع آب ۹۹/۲ درصد حکایت دارد. محدوده‌های روپلین پایینی، شاتین و آکیتانین در سازند آسماری میدان قلعه‌نار از بیش‌ترین حضور این الکتروفاسیس برخوردار می‌باشند. مجموعه‌های رخساره‌ای فلوتستون تا رودستون مرجانی کورالیناسه و پکستون تا وکستون دارای شکل‌های پلانکتون دارای بیش‌ترین حضور الکتروفاسیس ۵ بوده و

<sup>1</sup> Mercury Injection Capillary Pressure (MICP)

پایین است و می‌بایست در زمره الکتروفاسیس‌ها با کیفیت مخزنی خوب به شمار آید لیکن توزیع غیر یکنواخت اندازه حفرات باعث شده اندازه گلوگاه‌های تخلخل نیز یکسان نبوده و در نتیجه با هر میزان افزایش فشار تزریق جیوه، مقداری از فاز ترکنده نمونه (آب) جابجا می‌شود که این حالت جهت داشتن کیفیت مخزنی خوب خیلی مناسب نیست.

میزان تقعر آن نشان‌دهنده توزیع اندازه تخلخل در نمونه می‌باشد. به طوریکه شیب منحنی در الکتروفاسیس‌های ۱، ۲، ۴ و ۵ بسیار زیاد بوده که این پدیده نشان از جورشدگی اندازه حفرات و در نتیجه جورشدگی اندازه گلوگاه‌های تخلخل دارد لیکن وضعیت در الکتروفاسیس ۳ با کیفیت مخزنی متوسط به گونه‌ای متفاوت است. گرچه میزان آب کاهش نیافتنی این الکتروفاسیس بسیار



شکل ۴. منحنی آزمایش تزریق جیوه در نمونه‌های دو چاه مختلف

می‌باشد که توسط آمافوله (۱۹۹۳) تعریف شده است. این رابطه یکی از بهترین پارامترهای پتروفیزیکی برای توصیف کمی ساختار منافذ در مخازن است و مقادیر بیشتر RQI در یک سنگ منعکس کننده کیفیت بالای مخزن است (جین و همکاران، ۲۰۱۳). لیکن در این مطالعه صرفاً وضعیت دو پارامتر تخلخل و تراوایی و ارتباط آن‌ها با الکتروفاسیس‌های تعیین شده بررسی می‌شود. یکی از روش‌هایی که به وسیله آن می‌توان الکتروفاسیس‌های مخزنی تعیین شده را مورد ارزیابی قرار داد بررسی محدوده الکتروفاسیس‌ها بر روی نمودار مقاطع<sup>۱</sup> تخلخل و تراوایی می‌باشد به این نحو که الکتروفاسیس‌های مختلف می‌بایست محدوده‌های متفاوتی را بر روی این نمودار در برگیرند. البته ممکن است این محدوده‌ها مقداری همپوشانی نیز داشته باشند لیکن می‌بایست از یکدیگر به طور کلی مجزا باشند. نمودارهای تخلخل و تراوایی نشان دادند که الکتروفاسیس‌های مختلف دارای محدوده‌های متفاوتی از پراکندگی داده‌ها بر روی این نمودار می‌باشند به طوریکه الکتروفاسیس‌های خوب و خیلی خوب دارای مقادیر بالاتری از نسبت نفوذپذیری به تخلخل می‌باشند که در الکتروفاسیس‌های بد و خیلی بد عکس این قضیه صادق

#### داده‌های تخلخل و تراوایی

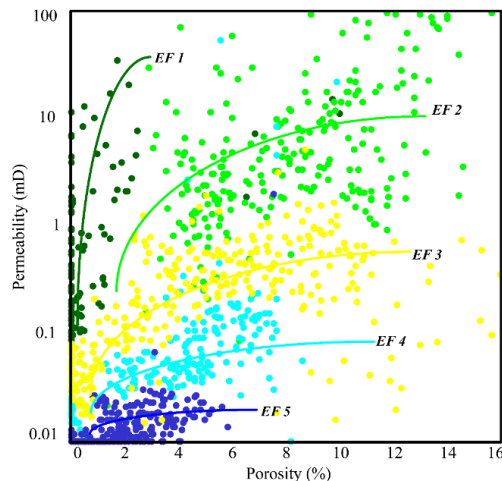
معمولاً دو پارامتر مهمی که در مخازن هیدروکربوری مطرحند تخلخل و نفوذپذیری می‌باشند. سنگ مخزن برای اینکه بتواند حجم قابل‌ملاحظه‌ای از هیدروکربور را در خود جای دهد می‌بایست تخلخل داشته باشد و برای اینکه سیال هیدروکربوری بتواند به سمت چاه حرکت کند می‌بایست از تراوایی قابل‌ملاحظه برخوردار باشد. سنگ‌هایی که متخلخل هستند الزاماً نفوذپذیری ندارند لیکن داشتن نفوذپذیری به معنای وجود تخلخل در سنگ می‌باشد. بنابراین به نظر می‌رسد پارامتر نفوذپذیری در مخازن هیدروکربوری از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. نفوذپذیری سنگ تحت تأثیر عوامل زمین‌شناسی بسیار زیادی قرار دارد و در بسیاری از موارد از تخلخل مستقل است. برای داشتن نفوذپذیری زیاد، فضاهای خالی سنگ باید از طریق گلوگاه‌هایی با بزرگی مناسب که مایعات بتوانند از آن به راحتی عبور کنند به هم متصل شوند (مرادی و همکاران، ۲۰۱۹؛ مرادی و همکاران، ۲۰۱۷؛ ابوسدا و همکاران، ۲۰۱۵).

تاکنون پژوهشگران متعددی به بررسی روابط ریاضی بین پارامترهای پتروفیزیکی تخلخل و تراوایی برای توصیف کمی ساختار منافذ در مخازن هیدروکربوری پرداخته‌اند. مهمترین این روابط، شاخص کیفیت مخزن (RQI)

<sup>1</sup> Cross-Plot

هیدروکربوری به سمت چاه است که نقشی تعیین کننده در تفکیک واحدهای مخزنی خوب از بد ایفا می‌نماید (شکل ۵).

است. به عبارت دیگر در تعیین الکتروفاسیس‌های مخزنی سعی شد به گونه‌ای عمل شود که پارامتر نفوذپذیری تاثیر بیشتری نسبت به سایر پارامترها در تعیین کیفیت مخزنی داشته باشد چرا که در نهایت این حرکت سیال



شکل ۵. نمودار تخلخل تراوایی در الکتروفاسیس‌های مختلف مخزن آسماری میدان قلعه‌نار

پتروفیزیکی مانند تخلخل مؤثر، تراوایی و اندازه گلوگاه‌های حفرات و توزیع آن‌ها تاثیر گذاشته و زون‌هایی با ویژگی‌های پتروفیزیکی متفاوت تولید نمایند. مخزن آسماری میدان قلعه‌نار نیز از این قاعده مستثنی نیست به طوریکه ممکن است یک رخساره رسوبی به طور افقی در کل میدان قابل پیگیری بوده و به رخساره دیگری تبدیل نشود لیکن به دلیل وجود شدت و فرایندهای دیاژنزی مختلف دچار تغییر در کیفیت مخزنی و طبیعتاً تغییر در نوع الکتروفاسیس گردد. بنابراین و به دلیل تنوع شدیدی که هر مجموعه رخساره‌ای رسوبی از منظر کیفیت مخزنی دارد اختصاص یک الکتروفاسیس به مجموعه رخساره‌ای خاص صحیح به نظر نمی‌رسد. این حالت به خصوص در نهشته‌های مربوط به زمان‌های آکیتانین و بوردیگالین که مجموعه‌های رخساره‌ای در تمامی چاه‌ها به راحتی قابل ردیابی بوده و تغییرات جانبی کمی دارند در سازند آسماری میدان نفتی قلعه‌نار دیده می‌شود. شکل ۶ توزیع الکتروفاسیس‌های مخزنی را در مدل رسوبی پیشنهادی و مجموعه‌های رخساره‌ای آن برای سازند آسماری میدان قلعه‌نار نشان می‌دهد.

بیش‌ترین فراوانی الکتروفاسیس ۱ که دارای بهترین شرایط مخزنی می‌باشد در مجموعه رخساره‌ای دولومیت درشت بلور است. فرایند دولومیتی شدن که غالباً با

## بحث

از آنجایی که قرار است الکتروفاسیس‌ها برای چاه‌ها و یا فواصل بدون مغزه تعمیم داده شوند، بنابراین می‌بایست صحت خوشه‌بندی آن‌ها از نظر تفکیک مناسب سنگ‌ها با کیفیت مخزنی گوناگون با سایر داده‌ها (در اینجا نتایج آزمایش تزریق جیوه و تخلخل و تراوایی مغزه) مورد ارزیابی قرار گیرد. به عبارت دیگر انجام الکتروفاسیس در مخازن هیدروکربوری صرفاً با اتکا بر داده نمودارهای ارزیابی پتروفیزیکی و بدون وجود داده‌های زمین‌شناسی (مثل برش‌های نازک رسوبی و مغزه) و آزمایشگاهی (نتایج آزمایش تزریق جیوه و آزمایشات معمول مغزه) مخصوصاً در مخازن کربناته از اعتبار لازم برخوردار نیست. بنابراین می‌بایست جهت تعیین الکتروفاسیس‌های مخزنی در میادین نفت و گاز، داده‌های زمین‌شناسی و آزمایشگاهی نیز در دسترس بوده تا بتوان به نتایج آن استناد نمود.

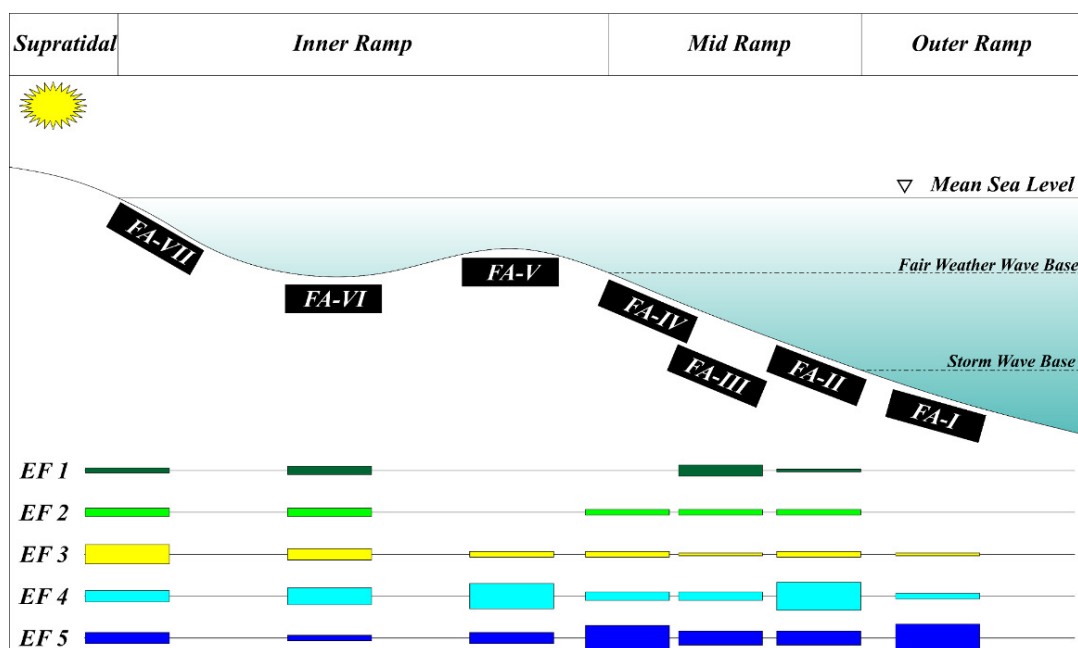
انواع مختلف فرایندهای دیاژنزی سازنده<sup>۱</sup> و یا مخرب<sup>۲</sup> از جمله مهم‌ترین عواملی هستند که در کنترل کیفیت مخزنی در سنگ‌های کربناته می‌تواند موثر باشند. این فرایندهای متنوع می‌توانند با شدت مختلف بر ویژگی‌های

<sup>1</sup> Constructive

<sup>2</sup> Destructive

از دیگر مجموعه رخساره‌ای که الکتروفاسیس ۱ در آن گسترش قابل‌ملاحظه‌ای دارد مجموعه رخساره‌ای پکستون تا گرینستون نومولیتی در پایین روپلین بالایی می‌باشد. این رخساره که غالباً از نومولیت‌های درشت (دو میلی‌متر و درشت‌تر) تشکیل شده دارای تخلخل اولیه از نوع بین‌دانه‌ای است. نکته جالب در این مجموعه رخساره‌ای باقی ماندن تخلخل اولیه و عدم تاثیر فشردگی‌های فیزیکی و شیمیایی در از بین بردن تخلخل است. از طرفی فرایند دولومیتی شدن در این مجموعه رخساره‌ای از نوع انتخابی است به طوریکه نومولیت‌ها غالباً دولومیتی نشده لیکن سیمان بین آن‌ها دولومیتی شده است. متاسفانه این رخساره در چاه‌های محدودی دیده شده و ضخامت قابل‌توجهی نیز ندارد از این‌رو نمی‌توان از آن به عنوان یک زون تولیدی یاد کرد.

تخریب بافت اولیه سنگ همراه بوده باعث ایجاد بلورهای شکل‌دار و درشت دولومیت شده که این بلورها نیز با تشکیل شبکه‌ای به هم پیوسته از فضا‌های خالی با اندازه گلوگاه بزرگ، باعث ایجاد بهترین شرایط مخزنی در توالی روپلین بالایی سازند آسماری میدان قلعه‌نار شده‌اند. این قسمت از سازند به عنوان مهم‌ترین فاصله تولیدی<sup>۱</sup> از مخزن می‌باشد چرا که در گستره میدان قابل پیگیری بوده و شرایط مخزنی تقریباً یکسانی دارد. بنابراین چاه‌های توسعه‌ای میدان غالباً بدین منظور حفاری و تکمیل می‌گردند. البته در مواردی دولومیتی شدن بیش از حد منجر به تشکیل بلورهای درشت نیمه شکل‌دار تا بی‌شکل شده که با از بین رفتن فضا‌های خالی سنگ و کاهش اندازه گلوگاه‌های تخلخل همراه بوده و مجموعه را به سمت الکتروفاسیس‌های بد (۴ و ۵) سوق داده است.



شکل ۶. مدل رسوبی پیشنهادی برای مجموعه‌های رخساره‌ای مختلف سازند آسماری میدان قلعه‌نار به همراه فراوانی هر یک از الکتروفاسیس‌ها در آن مجموعه

در آن‌ها بیشتر باشد. لیکن فرایند ثانویه‌ای مثل انحلال با ایجاد تخلخل‌های حفره‌ای و مرتبط نمودن تخلخل‌های اولیه جدا افتاده (مثل فنسترال در مادستون‌ها و بین‌ذره‌ای و درون‌ذره‌ای در وکستون تا گرینستون دارای شکل‌های بنتیک (آکیتانین) دارد. این دو مجموعه به طور اولیه دارای تخلخل پایینی هستند بنابراین انتظار می‌رود فراوانی الکتروفاسیس‌های بد (۴ و ۵) در آن‌ها پدید آورده است.

الکتروفاسیس ۲ بیش‌ترین فراوانی را در مجموعه‌های رخساره‌ای مادستونی (بوردیگالین) و وکستون تا گرینستون دارای شکل‌های بنتیک (آکیتانین) دارد. این دو مجموعه به طور اولیه دارای تخلخل پایینی هستند بنابراین انتظار می‌رود فراوانی الکتروفاسیس‌های بد (۴ و ۵) در آن‌ها پدید آورده است.

<sup>1</sup> Pay Zone

طبقه‌بندی گردد. شرایط در الکتروفاسیس ۵ نیز مشابه الکترو فاسیس ۴ است به نحوی که مجموعه رخساره‌های فلوتستون تا رودستون مرجانی-کورالیناسه (شاتین) که می‌توانسته به دلیل گسترش فضاهای خالی اولیه (تخلخل رشدی درون مرجان‌ها) کیفیت مخزنی خوبی داشته باشد، به دلیل سیمانی شدن و تراکم شدید (فرایندهای دیاژنزی مخرب) تمامی تخلخل خود را از دست داده و به بدترین مجموعه رخساره‌ای سازند آسماری در میدان قلعه‌نار از منظر کیفیت مخزنی تبدیل شده است. همچنین مجموعه رخساره‌ای پکستون تا وکستون دارای شکل‌های پلانکتون (روپلین زیرین) که به طور اولیه بدون هرگونه تخلخل و کیفیت مخزنی است به دلیل عدم حضور فرایندهای دیاژنزی سازنده مثل انحلال و دولومیتی شدن، باعث گسترش الکتروفاسیس ۵ در آن شده است.

شکل ۷ ستون سنگ‌شناسی سازند آسماری به همراه برخی نمودارهای پتروفیزیکی خام و ارزیابی شده، الکتروفاسیس‌های مخزنی و موقعیت مجموعه‌های رخساره‌ای را نشان می‌دهد. بررسی کلی سازند آسماری در میدان نفتی قلعه‌نار نشان می‌دهد که توالی‌های آهکی این سازند غالباً دارای الکتروفاسیس‌های با کیفیت مخزنی پایین می‌باشند لیکن غالب الکتروفاسیس‌های خوب و خیلی خوب در توالی‌های دولومیتی قرار گرفته‌اند. از طرفی به دلیل شکننده‌تر بودن دولومیت نسبت به سنگ آهک (آرین و محمدیان، ۱۳۸۹) گسترش شکستگی‌ها به دلیل چین‌خوردگی در این نوع توالی‌ها بیشتر از توالی‌های آهکی می‌باشد. از این رو به نظر می‌رسد در فواصل دولومیتی علاوه بر ماتریکس، شکستگی‌ها نیز نقش مهمی در حرکت سیال هیدروکربوری به سمت چاه داشته باشند.

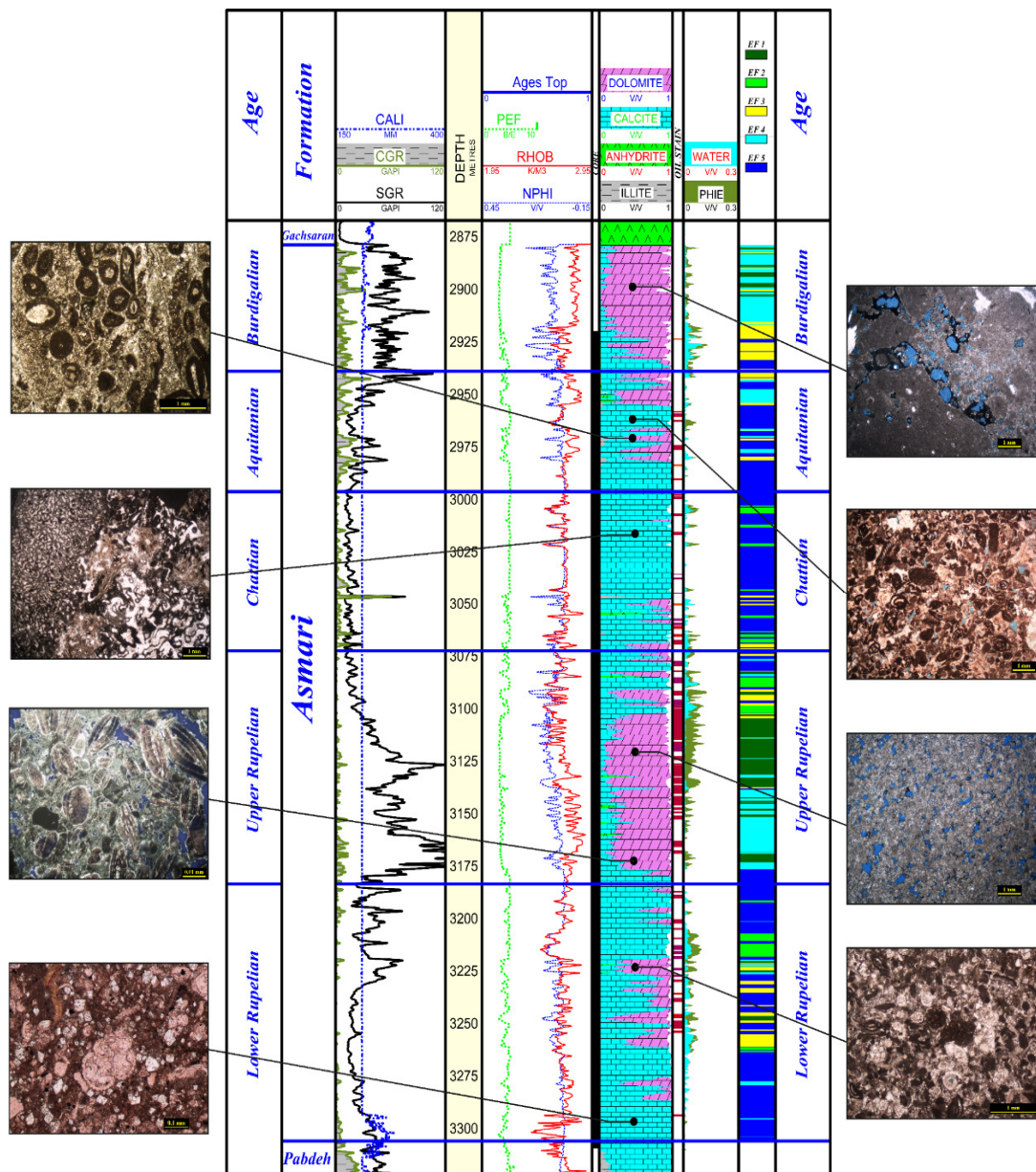
شکل ۸ توزیع الکتروفاسیس‌های مخزنی به همراه ستون سنگ‌شناسی که درصد کانی‌های آن از ارزیابی پتروفیزیکی بدست آمده در تعدادی از چاه‌های میدان (چاه‌های مغزه‌دار) دیده می‌شود. همانطور که در این شکل نیز مشخص است ضخامت سازند آسماری از باختر به خاور میدان افزایش می‌یابد. همچنین، رسوبات زمان‌های روپلین و شاتین دارای تغییرات شدید در ضخامت و الکتروفاسیس‌های مخزنی در طول میدان می‌باشد لیکن رسوبات آکیتانین بوردیگالین در طول

به نظر می‌رسد در نهشته‌های روپلین عدم گسترش فرایند دولومیتی شدن به طور کامل به عنوان یک پدیده سازنده منجر به افزایش کیفیت مخزنی سنگ‌هایی شده که به طور اولیه تخلخل بسیار پایینی دارند. به عبارت دیگر فرایند دولومیتی شدن باعث فرارگیری آن‌ها در الکتروفاسیس ۲ شده است. چرا که بررسی‌های پتروگرافی نشان می‌دهد دولومیتی شدن رخساره‌های آهکی (به طور مثال رودستون تا پکستون لپیدوسیکلینی نومولیتی) منجر به ایجاد تخلخل‌های مرتبط در این قسمت از سازند آسماری شده است و اگر شرایط به گونه‌ای پیش می‌رفت که کل سنگ دولومیتی شود ممکن بود این مجموعه رخساره‌ای در الکتروفاسیس ۱ قرار گیرند.

وضعیت برای سنگ‌هایی که در الکتروفاسیس ۳ طبقه‌بندی می‌گردند نیز به همین منوال است. با این تفاوت که شدت فرایندهای دیاژنزی سازنده (دولومیتی شدن و انحلال) در آن‌ها کمتر از حالتی است که بتوان آن‌ها را در الکتروفاسیس ۲ طبقه‌بندی نمود. به عبارت دیگر توقف زود هنگام فرایندهای دیاژنزی سازنده باعث شده که این سنگ‌ها به طور کامل تحت تأثیر قرار نرفته و بنابراین نتوان انتظار یک سنگ با کیفیت مخزنی خیلی خوب و یا خوب از آن‌ها داشت. در الکتروفاسیس ۴ به نظر می‌رسد وضعیت به گونه‌ای متفاوت است. همانطور که پیشتر گفته شد این الکتروفاسیس بیش‌ترین فراوانی را در مجموعه‌های رخساره‌ای بایوکلاست ایید پکستون تا گرینستون (آکیتانین) و رودستون تا پکستون لپیدوسیکلینی نومولیتی (روپلین) دیده می‌شود. دلایل متفاوتی باعث فراوانی حضور الکتروفاسیس ۴ در این دو مجموعه رخساره‌ای شده است. مجموعه رخساره‌ای شول به طور اولیه از پتانسیل مخزنی بالایی برخوردار است و فضاهای خالی در آن به صورت حفرات بزرگ بین‌دانه‌ای، باعث ایجاد تخلخل و تراوایی بالا در سنگ می‌شوند (حسینی و همکاران، ۱۳۹۹؛ مهربانی و همکاران، ۱۳۹۸) لیکن فرایندهای دیاژنزی مخربی مثل سیمانی شدن فراگیر و تراکم باعث از بین رفتن تمامی فضاهای خالی سنگ در مجموعه رخساره‌ای بایوکلاست ایید پکستون تا گرینستون شده است. عدم وجود فرایندهای دیاژنزی سازنده مثل دولومیتی شدن باعث شده مجموعه رخساره‌ای رودستون تا پکستون لپیدوسیکلینی نومولیتی (که به طور اولیه تخلخل پایینی دارد) در الکتروفاسیس ۴

(الکتروفاسیس ۱ و ۲) در مقابل توالی‌های دولومیتی سازند آسماری در میدان قلعه‌نار می‌باشد (رحیم‌پور و همکاران، ۱۳۹۷).

میدان تغییر ضخامت کمتری داشته و تغییر الکتروفاسیس‌های مخزنی نیز در آن‌ها به نسبت کمتر است. از نکات قابل توجه دیگر در این نمودار تطابقی، حضور الکتروفاسیس‌های مخزنی خیلی خوب و خوب



شکل ۷. ستون سنگ‌شناسی سازند آسماری در چاه D میدان قلعه‌نار به همراه برخی نمودارهای خام و ارزیابی شده پتروفیزیکی، الکتروفاسیس‌های مخزنی و مجموعه‌های رخساره‌ای

نتیجه‌گیری  
در مخازن هیدروکربوری کربناته به دلیل وجود تغییرات در شدت و نوع فرایندهای دیاژنزی، تغییرات کیفیت مخزنی حتی در یک رخساره رسوبی معین بسیار متغیر است. بنابراین، انتظار داشتن کیفیت مخزنی یکسان از هر رخساره رسوبی در محدوده عمودی و افقی مخازن کربنات، تقریباً غیرمنطقی است. سازند کربناته آسماری با لیتولوژی غالب دولومیت و سنگ‌آهک در میدان نفتی

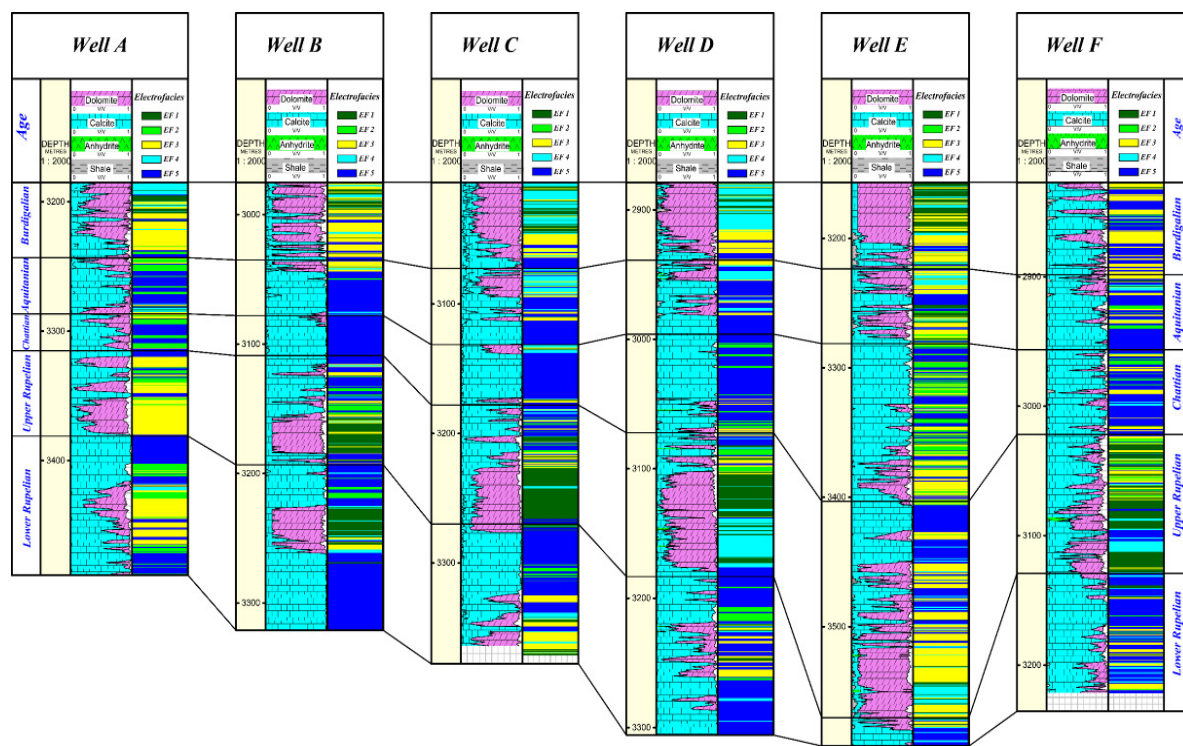
نتیجه‌گیری  
در مخازن هیدروکربوری کربناته به دلیل وجود تغییرات در شدت و نوع فرایندهای دیاژنزی، تغییرات کیفیت مخزنی حتی در یک رخساره رسوبی معین بسیار متغیر است. بنابراین، انتظار داشتن کیفیت مخزنی یکسان از هر رخساره رسوبی در محدوده عمودی و افقی مخازن کربنات، تقریباً غیرمنطقی است. سازند کربناته آسماری با لیتولوژی غالب دولومیت و سنگ‌آهک در میدان نفتی

تأثیرات شرایط محیطی و تعیین کیفیت مخزنی نهایی سنگ‌های کربناته دارند. با توجه به حضور انواع فرایندهای دیاژنزی مخرب و سازنده در مخزن آسماری میدان قلعه‌نار، می‌توان برآیند آن‌ها را در ایجاد کیفیت مخزنی مثبت ارزیابی نمود.

فواصل دولومیتی سازند آسماری در میدان قلعه‌نار محدود به زمان‌های روپلین و بوردیگالین است که غالباً الکتروفاسیس‌های مخزنی خوب و خیلی خوب در این محدوده‌ها گسترش دارند.

مجموعه‌های رخساره‌ای دولومیت بلورین (VIII)، پکستون تا گرینستون نومولیتی (III)، و کستون تا گرینستون دارای شکل‌های بنتیک (VI) و مادستون (VII) دارای بیش‌ترین فراوانی الکتروفاسیس‌های ۱ و ۲ و در نتیجه بهترین کیفیت مخزنی می‌باشند. از طرفی مجموعه‌های رخساره‌ای فلوتستون تا رودستون مرجانی کورالیناسه (IV)، پکستون تا وکستون دارای شکل‌های پلانکتون (I)، بایوکلاست الیید پکستون تا گرینستون (V)، رودستون تا پکستون لپیدوسیکیلینی نومولیتی (II) دارای بیش‌ترین فراوانی الکتروفاسیس‌های ۴ و ۵ و در نتیجه بدترین کیفیت مخزنی می‌باشند.

قلعه‌نار از این قاعده مستثنی نیست. بر اساس نمودارهای پتروفیزیکی، آزمایش تزریق جیوه، نتایج داده‌های معمول مغزه و مطالعات پتروگرافی، ۵ الکتروفاسیس برای مخزن آسماری میدان قلعه‌نار مشخص شد که شرایط کیفیت مخزنی از الکتروفاسیس ۱ به ۵ و کاهش می‌یابد. گرچه تخلخل‌های اولیه‌ای مانند تخلخل بین‌ذره‌ای، درون‌ذره‌ای و فنسترال به ترتیب برای مجموعه‌های رخساره‌ای پکستون تا گرینستون نومولیتی، رودستون تا پکستون لپیدوسیکیلینی نومولیتی و مادستونی در توالی سازند آسماری میدان نفتی قلعه‌نار دیده شد لیکن یا مقدار این نوع تخلخل‌ها کم بوده و یا گسترش مجموعه رخساره‌ای مربوط به آن محدود است. از طرفی حضور فراوان انواع تخلخل‌های ثانویه مانند بین‌بلوری، حفره‌ای، قالبی و غیره، نشان می‌دهد فرایندهای دیاژنزی و ثانویه نسبت به فرایندهای مربوط به محیط رسوبگذاری کنترل بیش‌تری بر روی کیفیت مخزنی نهایی سنگ دارند. این بدان معناست که فرایندهای دیاژنزی سازنده (مانند انحلال، دولومیتی شدن مناسب و شکستگی) و فرایندهای دیاژنزی مخرب (مانند انواع تراکم، سیمانی شدن دولومیتی شدن بیش از اندازه) نقش مهمی در محو



شکل ۸. تغییرات جانبی و عمودی الکتروفاسیس‌های مخزنی در تعدادی از چاه‌های (مغزه‌دار) میدان نفتی قلعه‌نار



## تشکر و قدردانی

بدین وسیله از تمامی مسئولان در دانشگاه فردوسی مشهد که با طرح موضوع (کد طرح ۳/۴۱۴۵۸) امکان انجام چنین مطالعه‌ای را فراهم نمودند تشکر و قدردانی می‌شود. همچنین از مدیران و کارشناسان محترم شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب به ویژه در ادارات زمین‌شناسی گسترشی و پژوهش به سبب در اختیار قرار دادن داده‌ها و امکانات لازم جهت انجام این مطالعه سپاسگزاری می‌گردد. از داوران عزیز که با بررسی‌های دقیق و رایحه پیشنهادات ارزنده، موجب افزایش سطح علمی مقاله حاضر شدند قدردانی می‌گردد. از مدیر مسئول، سردبیر و تمامی عزیزانی که در مجله رسوب‌شناسی کاربردی دانشگاه بوعلی‌سینا همدان، امکان اشتراک یافته‌های علمی و مدیریت دانش را برای پژوهشگران فراهم می‌آوردند تشکر می‌شود.

## منابع

- آرین، م.، محمدیان، ر (۱۳۸۹) تحلیل شکستگی‌های مخزن آسماری میدان مارون (زاگرس)، نشریه علوم‌زمین، سال بیستم (شماره ۷۸)، ص ۸۷-۹۶.
- آقانباتی، ع (۱۳۸۳) زمین‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۶ ص.
- جمشیدی، م.، گلی، ط.، جلیلیان، ع. ح.، ارزانی، ن.، ارشد، ع. و (۱۳۹۵) بررسی رخساره‌های رسوبی و الکتریکی مخزن بنگستان با بهره‌گیری از روش MRGC در میدان نفتی قلعه‌نار، جنوب باختری ایران، مجله رسوب‌شناسی کاربردی، دوره ۴، شماره ۸، ص ۵۵-۴۲.
- جمیل‌پور، م.، محبوبی، ا.، موسوی‌حرمی، س. ر.، خانه‌باد، م.، هوشمندکوچی، ح (۱۳۹۸) شناسایی الکتروفاسیس‌های مخزنی سازند آسماری میدان نفتی قلعه‌نار در چارچوب رخساره‌های رسوبی، پنجمین همایش انجمن رسوب‌شناسی ایران. کرمان.
- حسینی، ک.، رضائی، پ.، شیرودی، س. ک (۱۳۹۹) تحلیلی بر رخساره‌های الکتریکی، واحدهای جریان‌ی و بررسی توان مخزنی سازند میشریف (سنومانین- تورونین) در میدان نفتی اسفند، خلیج‌فارس، مجله رسوب‌شناسی کاربردی، دوره ۸، شماره ۱۵، ص ۴۶-۶۴.
- رحیم‌پوریناب، ح.، سلمانی، ع.، رنجبران، م.، آل‌علی، س. م (۱۳۹۷) تاثیرات محیط رسوبی و فرایندهای دیازنزی بر کیفیت مخزنی سازند آسماری در میدان قلعه‌نار،
- فرافتادگی دزفول. مجله رسوب‌شناسی کاربردی، دوره ۶، شماره ۱۱، ص ۱۵-۳۴.
- فرشی، م.، موسوی‌حرمی، س. ر.، محبوبی، ا.، خانه‌باد، م.، قنوتی، ک (۱۳۹۵) ارزیابی گونه‌های سنگ مخزن آسماری میدان گچساران با استفاده از روش آنالیز خوش‌های به کمک شبکه عصبی مصنوعی نگاشت خود سازمان یافته (SOM). نشریه پژوهش نفت، شماره ۲۶، ص ۱۵-۴.
- مطیعی، ه (۱۳۷۴) زمین‌شناسی ایران، زمین‌شناسی نفت زاگرس (جلد ۱). انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور. ۵۸۹ ص.
- مهرابی، ح.، دهاقین، م. ح.، احمدی، ی (۱۳۹۸) تحلیل یکپارچه گونه‌های سنگی مخزنی، واحدهای جریان‌ی هیدرولیکی و رخساره‌های الکتریکی در چارچوب سکانس‌های رسوبی مخازن پرمین-تریاس در بخش مرکزی خلیج‌فارس. مجله رسوب‌شناسی کاربردی، دوره ۷، شماره ۱۴، ص ۷۱-۸۴.
- Abuseda, H., Kassab, M. A., LaLa, A. M., & El Sayed, N. A. (2015) Integrated petrographical and petrophysical studies of some Eocene carbonate rocks, Southwest Sinai. Egypt. *Egyptian Journal of Petroleum*, 213-230.
- Amaefule, J. O., Altunbay, M., Tiab, D., Kersey, D. G & Keelan, D. K (1993) Enhanced reservoir description: using core and log data to identify hydraulic (flow) units and predict permeability in uncored intervals/wells. In: SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.
- Archie, G. E (1952) Classification of carbonate reservoir rocks and petrophysical considerations. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.*, 36: 278-298.
- Barattolo, F., Bassi, D & Romano, R (2007) Upper Eocene larger foraminiferal-coralline algal facies from the Klokova Mountain (southern continental Greece). *Facies*, 53 (3): 361-375.
- Beavington-Penney, S. J., Wright, V. P & Racey, A (2005) Sediment production and dispersal on foraminifera-dominated early Tertiary ramps: the Eocene El Garia Formation, Tunisia. *Sedimentology*, 52 (3): 537-569.
- Brandano, M., Corda, L (2002) Nutrients, sea level and tectonics: constrains for the facies architecture of a Miocene carbonate ramp in central Italy. *Terra Nova*, 14 (4): 257-262.
- Brandano, M., Frezza, V., Tomassetti, L., Pedley, M., Matteucci, R (2009) Facies analysis and palaeoenvironmental interpretation of the Late Oligocene Attard Member (Lower Coralline

- Flügel, E (2010) *Microfacies of carbonate rocks: analysis, interpretation and application* (Second Edition). Springer.
- Geel, T (2000) Recognition of stratigraphic sequences in carbonate platform and slope deposits: empirical models based on microfacies analysis of Palaeogene deposits in southeastern Spain. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 155: 211-238.
- Heydari, E (2008) Tectonics versus eustatic control on supersequences of the Zagros Mountains of Iran. *Tectonophysics*, 451: 56-70.
- Hull, C. E., Warman, H. R (1970) Asmari oil fields of Iran. (H. M. T., Ed.) *Geology of giant petroleum fields*, AAPG Memoir, 14: 428-437.
- James, G. A., Wynd, J. G (1965) *AAPG Bulletin*, 2182-2245.
- Jin, L., Guiwen, W., Min, C., Shunan, W., Yu, C., Chao, C., Jianlun, L (2013) Pore structures evaluation of low permeability clastic reservoirs based on petrophysical facies: A case study on Chang 8 reservoir in the Jiyuan region, Ordos Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 40(5): 604-614.
- Li, H., Yang, X., & Wei, W (2014) The Application of Pattern Recognition in Electrofacies Analysis. *Journal of Applied Mathematics*, 1-8.
- Mateu-Vicens, G., Hallock, P., Brandano, M (2008a) A Depositional Model and Paleocological Reconstruction of the Lower Tortonian Distally Steepened Ramp of Menorca (Balearic Islands, Spain). *Palaios*, 23(7): 465-481.
- Mateu-Vicens, G., Pomar, L., Tropeano, M (2008b) Architectural complexity of a carbonate transgressive systems tract induced by basement physiography. *Sedimentology*, 55: 1815-1848.
- Moradi, M., Moussavi-Harami, R., Mahboubi, A., Khanehbad, M (2019) Relationship between depositional facies and reservoir characteristics of the Oligo-Miocene Asmari Formation, Aghajari Oilfield, SW Iran. *Geopersia*, 21-41.
- Moradi, M., Moussavi-Harami, R., Mahboubi, A., Khanehbad, M., Ghabeishavi, A (2017) Rock typing using Geological and Petrophysical data in the Asmari reservoir, Aghajari Oilfield, SW Iran. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 523-537.
- Morsilli, M., Bosellini, F. R., Pomar, L., Hallock, P., Aurell, M., Papazzoni, C. A (2012) Mesophotic coral buildups in a prodelta setting (Late Eocene, southern Pyrenees, Spain): a Limestone Formation), Malta. *Sedimentology*, 56 (4): 1138-1158.
- Burchette, T. P., Wright, V. P (1992) Carbonate ramp depositional systems. *Sedimentary Geology*, 79 (1-4): 3-57.
- Chandra, V., Barnett, n., Corbett, a., Geiger, S., Wright, P., Steele, R., Milroy, P (2015) Effective integration of reservoir rock-typing and simulation using near-wellbore upscaling. *Marine and Petroleum Geology*, 67: 307-326.
- Choquette, P. W., Pray, L. C (1970) Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull*, 54: 207-250.
- Ćosović, V., Drobne, K., Moro, A (2004) Paleoenvironmental model for Eocene foraminiferal limestones of the Adriatic carbonate platform (Istrian Peninsula). *Facies*, 50: 61-75.
- Davis, J. C (2018) *Electrofacies in Reservoir Characterization*. B. S. Daya Sagar, Q. Cheng, F. Agterberg, *Handbook of Mathematical Geosciences*. Cham: Springer.
- Dickson, J. A. D (1966) Carbonate identification and genesis as revealed by staining. *Journal of Sedimentary Research*, 36 (2): 491-505.
- Dunham, R. J (1962) Classification of carbonate rocks according to depositional textures. *Mem. Amer. Ass. Petrol. Geol*, 1: 108-121.
- Ehrenberg, S. N., Pickard, N. A., Laursen, G. V., Monibi, S., Mossadeq, Z. K., Svånå, T. A., Thirlwall, M. F (2007) Strontium isotope stratigraphy of the Asmari Formation (Oligocene - lower Miocene), SW Iran. *Journal of Petroleum Geology*, 30(2): 107-128.
- Embry, A. F., Klovan, J. E (1971) A late Devonian reef tract on north-eastern Banks Island, Northwest Territories. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 19: 730-781.
- Euzen, T., Power, M. R (2012) Well log cluster analysis and electrofacies classification: a probabilistic approach for integrating log with mineralogical data. *Geoconvention, Canadian Society of Petroleum-Geologists*. 3p CSPG CSEG CWLS Convention.
- Farshi, M., Moussavi-Harami, R., Mahboubia, A., Khanehbad, M., Golaifshani, T (2019) Reservoir rock typing using integrating geological and petrophysical properties for the Asmari Formation in the Gachsaran oil field, Zagros basin. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 176: 161-171.

- Shabafrooz, R., Mahboubi, A., Vaziri-Moghaddam, H., Moussavi-Harami, R., Ghabeishavi, A., Al-Aasm, I. S (2015b) Facies analysis and carbonate ramp evolution of Oligo-Miocene Asmari Formation in the Gachsaran and Bibi-Hakimeh oilfields and the nearby Mish anticline, Zagros Basin, Iran. *N. Jb. Geol. Paläont. Abh.*, 276(1): 121-146.
- Sibley, D. F., Gregg, J. M (1987) Classification of dolomite rock texture. *Journal of Sedimentary Petrology*, 57: 967-975.
- Sim, M. S., Lee, Y. I (2006) Sequence stratigraphy of the Middle Cambrian Daegi Formation (Korea), and its bearing on the regional stratigraphic correlation. *Sedimentary Geology*, 191(3-4): 151-169.
- Strasser, A., Pittet, B., Hillgärtner, H., Pasquier, J. B (1999) Depositional sequences in shallow carbonate-dominated sedimentary systems: concepts for a high-resolution analysis. *Sedimentary Geology*, 128(3-4): 201-221.
- Sun, P., Xu, H., Dou, Q., Adesokan, H., Sun, Y., Huang, Q., Jiang, N (2015) Investigation of pore-type heterogeneity and its inherent genetic mechanisms in deeply buried carbonate reservoirs based on some analytical methods of rock physics *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 27: 385-398.
- Tavakoli, V., Amini, A (2006) Application of Multivariate Cluster Analysis in Logfacies Determination and Reservoir Zonation, Case Study of Marun Field, South of Iran. *Journal of Science University of Teheran*, 69-75.
- Torghabeh, A. K., Rezaee, R., Moussavi-Harami, R., Pimentel, N (2015) Using electrofacies cluster analysis to evaluate shale-gas potential: Carynginia Formation, Perth Basin, Western Australia *International Journal of Oil, Gas and Coal Technology*, 10(3): 250-271.
- Torghabeh, A. K., Rezaee, R., Moussavi-Harami, R., Pradhan, B., Kamali, M. R., Kadkhodaie-Ilkhchi, A (2014) Electrofacies in gas shale from well log data via cluster analysis: A case study of the Perth Basin, Western Australia. *Central European Journal of Geosciences*, 6(3): 393-402.
- Tucker, M. E., Wright, V. P (1990) *Carbonate Sedimentology*. Oxford: Blackwell.
- Van Buchem, F. S., Allan, T. L., Laursen, G. V., Lotfpour, M., Moallemi, A., Monibi, S., Vincent, B (2010) Regional stratigraphic architecture and reservoir types of the Oligo-Miocene deposits in the Dezful Embayment (Asmari and Pabdeh Formations) SW Iran. *Geological Society of London, Special Publications*, 329(1): 219-263.
- mixed carbonate-siliciclastic system. *Sedimentology*, 59(3): 766-749.
- Nebelsick, J. H., Rasser, M. W., Bassi, D (2005) Facies dynamics in Eocene to Oligocene circumalpine carbonates. *Facies*, 51: 197-216.
- Noorian, Y., Moussavi-Harami, R., Mahboubi, A., Abdollahi-Moussavi, A. A (2017) Evaluation of reservoir characterization in the framework of electro-facies: a case study from the Bangestan reservoir in the Mansuri oilfield, SW Iran, *Geosciences Journal*, 21: 713-727.
- Noorian, Y., Moussavi-Harami, R., Mahboubi, A., Kadkhodaie, A., Omidpour, A (2020) Assessment of heterogeneities of the Asmari reservoir along the Bibi Hakimeh anticline using petrophysical and sedimentological attributes: Southeast of Dezful Embayment, SW Iran. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 193: 1-21.
- Pomar, L (2001a) Ecological control of sedimentary accommodation: evolution from a carbonate ramp to rimmed shelf, Upper Miocene, Balearic Islands. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*: 175(1-4): 249-272.
- Pomar, L., Hallock, P (2008) Carbonate factories: A conundrum in sedimentary geology. *Earth-Science Reviews*, 87: 134-167.
- Pomar, L., Mateu-Vicens, G., Morsilli, M., Brandano, M (2014) carbonate ramp evolution during the Late Oligocene (Chattian), Salento Peninsula, southern Italy. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 404: 109-132.
- Rabiller, P (2005) *Facies prediction and data modeling for reservoir characterization*, 1st ed. Rabiller Geo-consulting.
- Rasser, M., Scheibner, C., Mutti, M (2005) A paleoenvironmental standard section for Early Ilerdian tropical carbonate factories (Corbieres, France, Pyrenees, Spain). *Facies*, 51(1): 218-232.
- Serra, O (1986) *Fundamentals of well-log interpretation v.2-the interpretation of logging data*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers.
- Serra, O., Abbott, H. T (1982) The contribution of logging data to sedimentary sedimentology and stratigraphy. *Society of Petroleum Engineers*, 22: 117-131.
- Shabafrooz, R., Mahboubi, A., Ghabeishavi, A., Moussavi-Harami, R (2015a) Depositional architecture and sequence stratigraphy of the Oligo-Miocene Asmari platform; Southeastern Izeh Zone, Zagros Basin, Iran. *Facies*, 1: 1-32.

- Vaziri-Moghaddam, H., Kimiagari, M., Taheri, A (2005) Depositional environment and sequence stratigraphy of the Oligo-Miocene Asmari Formation in SW Iran. *Facies*, 52: 41-51.
- Wilson, J. L (1975) Carbonate facies in geologic history. Berlin-Heidelberg- NewYork: Springer.
- Zabihi Zoeram, f., Vahidinia, M., Mahboubi, A., Amiri Bakhtiar, H (2013) Facies analysis and sequence stratigraphy of the Asmari Formation in the northern area of Dezful Embayment, south-west Iran. *Studia Universitatis Babeş-Bolyai Geologia*, 58 (1): 45-56.