

# مطالعه رخصاره‌ها، محیط رسوبی، فرآیندهای دیاژنزی و تأثیر آن‌ها بر کیفیت مخزنی سازند خانه‌زو در شرق حوضه کپه‌داغ

رویا خضلول<sup>۱</sup>، سیدعلی معلمی<sup>۲\*</sup> و بهرام موحد<sup>۳</sup>

۱- رسوب‌شناسی و سنگ‌شناسی رسوبی، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، ایران

۲- مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران، تهران، ایران

۳- شرکت CAPE، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۰۹

## چکیده

در این پژوهش سازند خانه‌زو به‌عنوان یکی از مخازن هیدروکربوری ایران از نظر رخصاره‌ها، محیط رسوبی، دیاژنزی و کیفیت مخزنی مورد مطالعه قرار گرفته است. مطالعه سازند خانه‌زو با استفاده از تلفیق مطالعات سنگ چینه‌نگاری و زمین‌شناسی صحرایی در ۲ برش سطحی (آب‌قد و برش خانه‌زو (برش الگو)) و ۲ برش زیرسطحی (چاه افشار و چاه چهچه) در ناحیه کپه‌داغ واقع در شمال شرق ایران صورت گرفته است. مطالعات پتروگرافی منجر به شناسایی ۸ ریزرخصاره گردیده که در قالب سه کمربند رخصاره‌ای اصلی شامل رمپ میانی، رمپ خارجی و حوضه نهشته شده‌اند. براساس شواهدی چون نبود رخصاره‌های دوباره نهشته شده و تبدیل تدریجی رخصاره‌ها به یکدیگر می‌توان نتیجه گرفت که رخصاره‌های سازند خانه‌زو در یک سکوی کربناته از نوع رمپ هم‌شیب نهشته شده‌اند. مطالعات پتروگرافی همچنین نشان می‌دهد که فرآیندهای دیاژنزی مختلفی از جمله میکریتی شدن، آشفستگی زیستی، سیمانی شدن (بلوکی و دروزی)، انحلال فشاری، دولومیتی شدن، انحلال، پیریتی شدن و سیلیسی شدن بر روی رسوبات توالی مورد مطالعه اثرگذار بوده است. انواع تخلخل شناسایی شده در توالی مورد مطالعه شامل حفره‌ای، بین‌بلوری و شکستگی است. سیمانی شدن و تراکم نیز از فرآیندهای دیاژنزیکی است که سبب کاهش ویژگی‌های مخزنی شده است. با توجه به درصد پایین تخلخل، غیرمفید بودن آن‌ها و عدم وجود تراوایی کافی، افق مخزنی در این سازند از کیفیت بالایی برخوردار نیست. به بیان دیگر، شکستگی و انحلال بر کیفیت مخزنی تأثیرگذار نبوده چراکه در غالب موارد توسط سیمان پر شده‌اند.

**کلمات کلیدی:** سازند خانه‌زو، کپه‌داغ، رخصاره، محیط رسوبی، فرآیندهای دیاژنزی، کیفیت مخزنی

\*مسئول مکاتبات

s.a.moallemi@nioc.ir

آدرس الکترونیکی

شناسه دیجیتال: (DOI: 10.22078/pr.2020.4227.2913)

## مقدمه

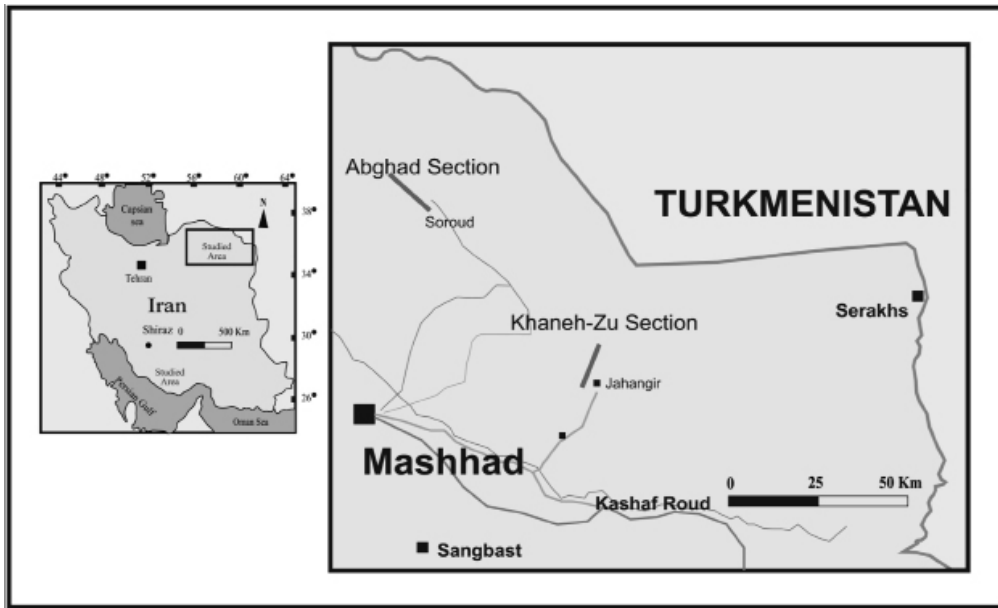
مختلف تا حدودی ناهمگن است. این سازند از زون‌های متخلخل و تراوای محدود تا افق‌های ناتراوای درون مخزنی تشکیل شده است. وجود این ناهمگنی‌ها و تغییرات گسترده سبب می‌شود بحث درباره عوامل مؤثر و کنترل کننده دیاژنز و رخساره‌ها ضروری باشد. هدف از مطالعه حاضر، معرفی رخساره‌ها و محیط رسوبی و فرآیندهای دیاژنزی و تأثیر آن‌ها بر کیفیت مخزنی بر روی سازند خانه‌زو در حوضه کپه‌داغ است.

## زمین‌شناسی و چینه‌شناسی منطقه

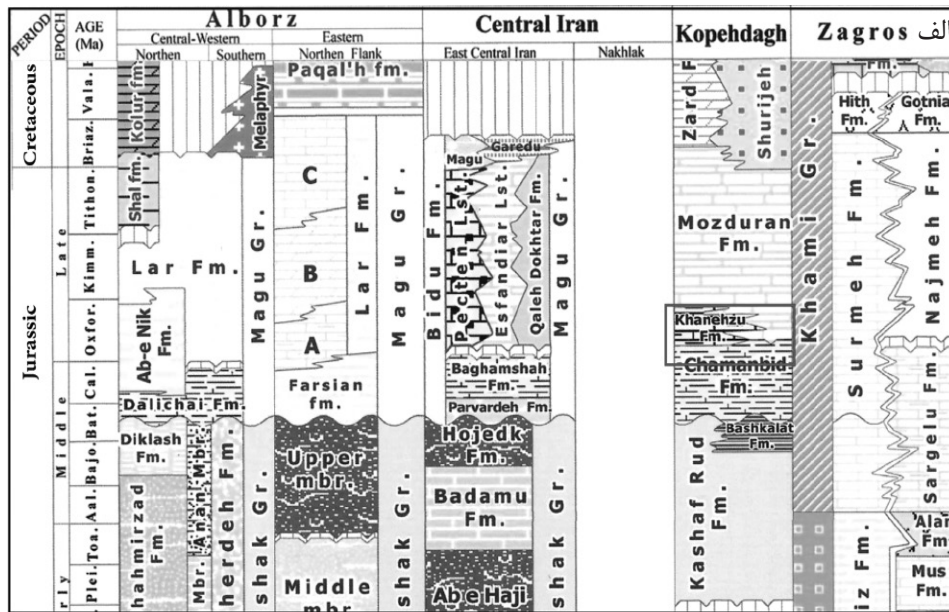
منطقه مورد مطالعه در شمال شرق ایران، در حوضه کپه‌داغ واقع شده است (شکل ۱). کپه‌داغ بخشی از سامانه آلپ-همالیا است که پس از بسته شدن اقیانوس پالئوتتیس تشکیل شده است. این منطقه دومین حوضه هیدروکربوری ایران است [۷]. در ناحیه کپه‌داغ شیل‌های ژوراسیک میانی-بالایی و سازند چمن‌بید سنگ مادر در این حوضه رسوبی می‌باشند [۵]. سنگ‌های کربناته سازند مزدوران سنگ مخزن مهم گاز در این حوضه است. سازند خانه‌زو در نقشه‌های منتشر شده توسط سازمان زمین‌شناسی به‌عنوان مزدوران-۱ معرفی شده است. سازند خانه‌زو به سن ژوراسیک بالایی (آکسفوردین-کیمریجین) از نهمشته‌های کربناته ضخیم لایه شامل دولومیت، سنگ آهک دولومیتی، دولومیت آهکی و لایه‌های متناوب شیل و آهک تشکیل شده و رخساره آن مشابه سازند مزدوران است و اولین بار توسط افشارحرب و الهیار در سال ۱۹۷۱ معرفی گردید. سازند خانه‌زو دارای گسترش محدودی است. از لحاظ گسترش منطقه‌ای این سازند به سمت غرب تغییر رخساره داده و به سازند چمن‌بید تبدیل می‌شود. مرز زیرین سازند خانه‌زو با سازند کشف‌رود ناگهانی است (شکل ۲). ضخامت این سازند در برش الگو ۲۷۱ m است (شکل ۳).

کیفیت مخزنی سازندهای کربناته، به‌طور عمده تحت تأثیر رخساره‌ها، فرآیندهای دیاژنزی و شکستگی ایجاد می‌شود [۱، ۲ و ۳]. بنابراین آگاهی از توزیع رخساره‌ها و تأثیر فرآیندهای دیاژنزی، به‌منظور شناخت ناهمگنی‌ها ضروری است. حوضه رسوبی کپه‌داغ در شمال شرق ایران دارای میادین گازی عظیمی است. سنگ مخزن اصلی این میادین را سازند مزدوران تشکیل می‌دهد. تاکنون ۵ تاکنوس در این ناحیه حفاری شده‌اند که تنها خانگیران و گنبدلی دارای گاز قابل استحصال و اقتصادی هستند. اگر شرایط حفظ هیدروکربور فراهم باشد (همانند تاکنوس‌های خانگیران و گنبدلی) محدوده شرق و جنوب مشهد می‌توانند به‌عنوان اهداف اکتشافی در آینده مورد نظر قرار گیرند. سازند خانه‌زو از سنگ‌های کربناته و دولومیت‌های ضخیم لایه و صخره‌ساز تشکیل شده و رخساره‌های آن شبیه سازند مزدوران است. این سازند دارای گسترش محدودی بوده و از لحاظ گسترش منطقه‌ای به سمت غرب تغییر رخساره داده و به سازند چمن‌بید تبدیل می‌شود. به‌علت توپوگرافی خشن کوه‌های هزارمسجد و نبودن راه ارتباطی کافی و نیز گسله بودن شدید ناحیه دقیق مطالعه نشده است. لیتولوژی اصلی و دولومیت‌های تشکیل‌دهنده متخلخل بوده ولی تراوایی چشم‌گیری دیده نمی‌شود لذا سنگ مخزن احتمالی برای تجمع هیدروکربور است.

تاکنون این سازند از جنبه‌های مختلف تغییرات رخساره‌ای و محیط رسوبی، تغییرات دیاژنزی در بخش‌های مختلف کپه‌داغ توسط پژوهشگران مختلفی مورد مطالعه قرار گرفته است [۴-۷]. سازند خانه‌زو به‌دلیل تغییرات رخساره‌ای گسترده، تأثیر عمده فرآیندهای دیاژنزی در جهات افقی و عمودی و ارتباط زبانه‌ای که در برخی مناطق با سازند چمن‌بید نشان می‌دهد در مقیاس‌های



شکل ۱ نقشه موقعیت برش‌های مورد مطالعه



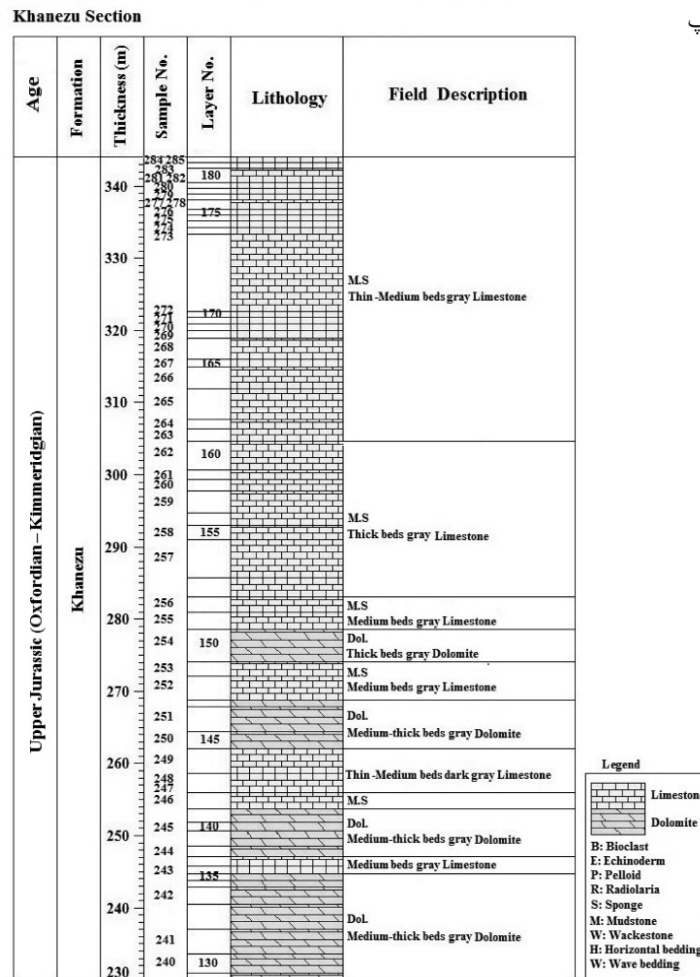
شکل ۲ الف) چارت تطابق چینه‌شناسی کپه داغ با سایر حوضه‌های ایران، سازند خانه‌زو با کادر قرمز مشخص شده است. ب) تصویر صحرایی از مرز زیرین سازند خانه‌زو با سازند کشفارود در برش الگو

Khanezu Section

Age	Formation	Thickness (m)	Sample No.	Layer No.	Lithology	Field Description	ت.ع
Upper Jurassic (Oxfordian – Kimmeridgian)	Khanezu	230	239				
		229					
		228					
		227					
		226					Dol.
		225					Medium-thick beds gray Dolomite
		224	125				
		223					
		222					
		221					
		220					
		219					
		218					
		217	120				
		216					
		215					
		214					
		213					
		212					
		211					
		210					
		209					
		208					
		207					
		206					
		205					
		204					
		203					
202							
201							
200							
199							
198							
197							
196							
195							
194							
193							
192							
191							
190							

Khanezu Section

Age	Formation	Thickness (m)	Sample No.	Layer No.	Lithology	Field Description	ت.ع
Upper Jurassic (Oxfordian – Kimmeridgian)	Khanezu	189					
		188					
		187					
		186					
		185	70				
		184					
		183					
		182					
		181					
		180					
		179					
		178	65				
		177					
		176					
		175					
		174					
		173					
		172					
		171	60				
		170					
		169					
		168 b					
		168 a					
		167					
		166					
		165	55				
		164					
		163					
		162					
		161					
		160	50				
		159					
		158					
		157					
		156					
		155	45				
		154					
		153					
152							
151	40						
150							
149							
148							
147							
146	30						
145							
144							



شکل ۳ الف، ب و پ) ستون چینه‌شناسی سازند خانه‌زو در برش الگو

### داده‌ها و روش مطالعه

مطالعه صحرایی دو برش از سازند خانه‌زو انجام شده و نمونه‌برداری به صورت منظم و هر ۳ m انجام شده است. داده‌های مورد استفاده در این مطالعه شامل ۴۰ مقطع نازک از برش آب‌قد، ۲۰۰ مقطع نازک از برش خانه‌زو، ۸۰ مقطع نازک از چاه افشار و ۹۰ مقطع نازک از خرده‌های حفاری چاه چهچه بود. غالب مقاطع نازک جهت تعیین سنگ‌شناسی با محلول آلیزارین قرمز رنگ‌آمیزی شده‌اند [۸]. ابتدا ریزرخساره‌ها و محیط رسوبی همراه با فرآیندهای دیاژنزی براساس مطالعات سنگ‌نگاری و توصیف مقاطع معرفی شده‌اند. برای نام‌گذاری ریزرخساره‌ها از روش تقسیم‌بندی دانهام و امری و کلووان [۹ و ۱۰] در تفسیر و رده‌بندی ریزرخساره‌ها

تعیین شده با ریزرخساره‌های استاندارد ویلسون و فلوگل [۱۱ و ۱۲] و مطابقت داده شده است. در سنگ‌نگاری مقاطع نازک کانی‌شناسی، بافت، اندازه دانه‌ها، جورشدگی، اجزاء تشکیل‌دهنده اعم از اسکلتی و غیراسکلتی، انرژی محیط، رخساره‌های همراه و نیز شناسایی و توزیع فرآیندهای دیاژنزی معرفی گردید.

### بررسی رخساره‌ها و محیط رسوبی

براساس نتایج حاصل از توصیف مطالعه مغزه‌ها و مقاطع نازک میکروسکوپی و تلفیق این اطلاعات و مقایسه آن‌ها با مدل‌های استاندارد [۱۲] منجر به شناسایی ۹ ریزرخساره در سازند خانه‌زو شده است. در ادامه این ریزرخساره‌ها به‌طور خلاصه مورد توصیف و تفسیر قرار گرفته‌اند (جدول ۱).



جدول ۱ ریزرخساره‌ها و کمربندهای رخساره‌ای شناسایی شده در سازند خانه‌زو

شماره رخساره	ریز رخساره‌ها	آلوکم‌ها		سطح انرژی	رخساره‌های همراه	کمربندهای رخساره‌ای
		اسکلتی	غیراسکلتی			
۱	مادستون	-	-	پایین		حوضه
۲	مادستون بیوکلستی	خرده صدف	-	پایین		حوضه
۳	وکستون سوزن اسفنج‌دار حاوی رادیولر	سوزن اسفنج (ک)، رادیولر (ک)	پلوئید (ک)	متوسط		رمپ خارجی
۴	وکستون بیوکلستی پلوئیددار	خرده‌های دوکفه‌ای، پلت (ف)، خرده‌های خارپوست، روزن‌بران کفزی (ک)	پلوئید (ف)	متوسط		رمپ خارجی
۵	وکستون بیوکلستی	روزن‌بران کفزی، سوزن اسفنج، رادیولر، خرده صدف، خارپوست	-	متوسط		رمپ خارجی
۶	پکستون بیوکلستی فیلامنت دار	سوزن اسفنج، دوکفه‌ای پوست نازک (ف)	-	متوسط تا بالا		رمپ میانی
۷	وکستون خارپوست دار حاوی بیوکلست	خرده‌های خارپوست (ف)، روزن‌بران کفزی (ک)	پلوئید (ک)	متوسط		رمپ میانی
۸	وکستون بیوکلستی دارای روزن‌بران کفزی	خرده‌های دوکفه‌ای (ک)، روزن‌بران کفزی (ر)، خرده‌های بیوکلستی (ر)	-	متوسط		رمپ میانی
۹	پکستون بیوکلستی	خرده‌های بیوکلستی، (ر)، روزن‌بران کف-زی (ک)	-	متوسط تا بالا		رمپ میانی
درصد فراوانی: (ف) فراوان، ۱۵ تا ۲۰٪، (ر) رایج، ۱۰ تا ۱۵٪، (ک) کم، ۲ تا ۹٪						

## کمربند رخساره‌ای دریای باز (Open Marin)

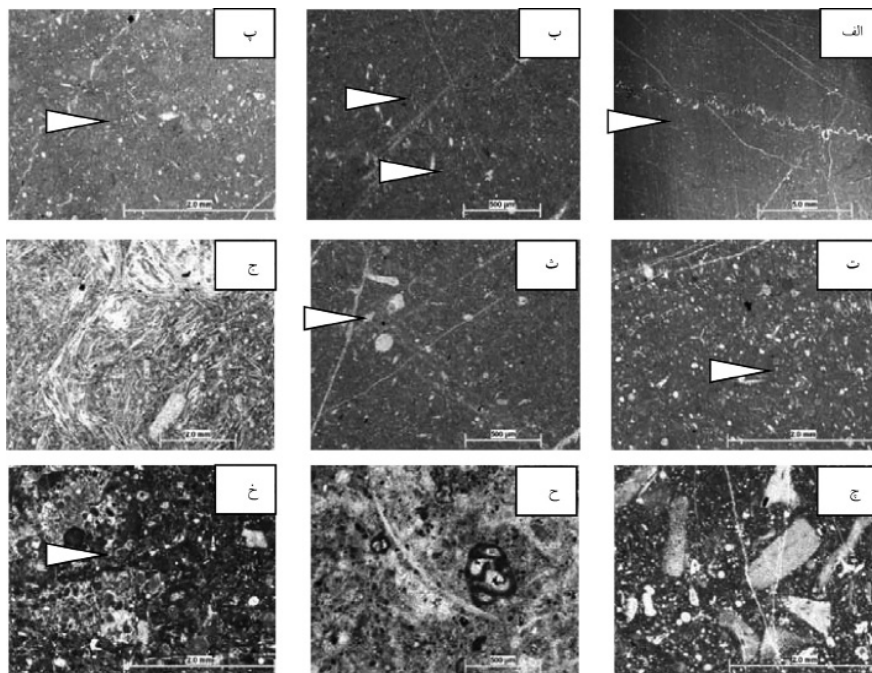
## ریزرخساره شماره ۱- مادستون

این رخساره بدون اجزاء اسکلتی، بسیار ریزدانه، یکنواخت و بدون لامینه است که براساس طبقه‌بندی فولک از نوع میکریست است. در دو حلقه چاه و دو برش سطح الارضی که بررسی شد این رخساره با مطالعه مقاطع نازک و با استناد به آخرین مطالعات قبلی به‌دست آمد [۶]. در بعضی اعمالق، مقدار رس افزایش یافته و رخساره مادستون آرژیلی را تشکیل می‌دهد (شکل ۴ الف). این رخساره عمیق‌ترین رخساره توالی مورد مطالعه بوده و یک محیط آرام و کم‌انرژی را در زمان افزایش عمق نشان می‌دهد. از فرآیندهای دیاژنزی در این رخساره می‌توان به استیلولیت‌ها، شکستگی‌های مستقیم و موازی نیز متقاطع پرشده با سیمان و بدون سیمان و آهن‌دار شدن اشاره نمود. در ارتباط با نوع و مقدار تخلخل باید گفت که در

برش‌های سطحی تخلخل از نوع حفره‌ای مجزا است. کلیه این فرآیندها در فصل دیاژنیز به‌طور مفصل آورده شده است. در این بررسی مادستون‌هایی که در حال دولومیتی شدن هستند به‌چشم می‌خورد. دولومیت‌های تشکیل شده از نوع دانه شکری و ریزبلور با بافت اکثراً زنتوپیک می‌باشند.

## ریزرخساره شماره ۲- مادستون بیوکلستی

در ناحیه مورد مطالعه این رخساره حاوی ۵ الی ۱۰٪ بیوکلست شامل سوزن اسفنج با برش‌های عرضی و طولی، رادیولریا و خارپوستان بوده که در زمینه‌ای از میکرایت قرار گرفته‌اند (شکل ۴ ب). در این رخساره استیلولیت‌ها با دامنه تزاریس کوتاه و همراه با اکسید آهن به‌صورت موازی و یا متقاطع با دسته درزها و شکستگی‌های موازی و متقاطع، می‌باشند. دوکفه‌ای‌های پوست نازک در زمینه گل نشان‌دهنده محیط کم‌انرژی است.



شکل ۴ الف) مادستون (ریزرخساره ۱)، ۲۱۰ m، برش خانه‌ز، ب) مادستون بیوکلستی (ریزرخساره ۲)، ۱۶۲ m، برش خانه‌ز، پ) وکستون سوزن اسفنج‌دار حاوی رادیولر (ریزرخساره ۳)، ۱۵۸ m، برش خانه‌ز، ت) وکستون بیوکلستی پلوئیددار (ریزرخساره ۴)، ۱۱ m، برش آبقد، ث) وکستون بیوکلستی (ریزرخساره ۵)، ۱۱۲ m، برش آبقد ج) پکستون بیوکلستی فیلامنت‌دار (ریزرخساره ۶)، ۶۰ m، برش خانه‌ز، چ) وکستون خارپوست‌دار حاوی بیوکلست (ریزرخساره ۷)، ۶۷ m، برش خانه‌ز، ح) وکستون بیوکلستی دارای روزن‌بران کفزی (ریزرخساره ۸)، ۵۷ m، برش خانه‌ز، خ) پکستون بیوکلستی، ۲۵ m، برش آبقد، کلیه عکس‌ها در نور طبیعی

#### کمر بند رخصاره‌ای رمپ خارجی

#### ریزرخساره شماره ۳- وکستون سوزن اسفنج‌دار دارای رادیولر

این رخصاره بافتی گل‌پشتیبان و وکستونی دارد. آلوکم اصلی این رخصاره خرده‌های فسیلی بوده که بیشتر حاوی ۱۰ تا ۱۵٪ سوزن اسفنج با برش‌های عرضی و طولی و رادیولر در اندازه ۵۰ تا ۷۰۰  $\mu\text{m}$  است. از محصولات فرآیندهای دیاژنزی این رخصاره شامل استیلولیت و دسته درزهای موازی و متقاطع که با کلسیت ریزبلور پر شده‌اند می‌توان اشاره کرد. مقدار فراوانی رادیولر سیلیسی در بخش‌های عمیق‌تر مشاهده می‌شود که نشان می‌دهد رادیولرها احتمالاً سیلیسی بوده‌اند که حل شده و قالبشان با سیمان کلسیتی پر شده است و احتمالاً این سیلیس منشأ تشکیل کوارتزهای اتوژن است. فراوانی رادیولرها نسبت به سوزن اسفنج کمتر است و اولویت حضور با سوزن‌ها است (شکل ۴ پ).

#### ریزرخساره شماره ۴- وکستون بیوکلستی پلوئیددار

این رخصاره بافتی گل‌پشتیبان و وکستونی دارد. این رخصاره به صورت غالب دارای ۵ الی ۷٪ پلوئید و حدود ۵٪ بیوکلست‌هایی نظیر سوزن اسفنج، خار اکینودرم (کرینوئید) و به مقدار بسیار اندک روزن‌بران بنتیک است (شکل ۴- ت). درزهایی موازی هم به چشم می‌خورد. پلوئیدها بسیار ریز و در اندازه ۰/۱ تا ۰/۲ mm و نهایتاً ۰/۵ mm هستند. حضور پلوئید محیط کم‌عمق و کم انرژی را نشان می‌دهد.

#### ریزرخساره شماره ۵- وکستون بیوکلستی

این رخصاره شامل فسیل‌های متنوعی است که با در نظر گرفتن ترتیب غالب بودن می‌توان از دوکفه‌ای‌های پوست نازک با سایز بزرگ در حدود ۱۰٪ و ۲٪ روزن‌بران بنتیک نام برد. فرامینفر شاخص مشاهده شده اسپیری لینا است. به‌طور فرعی سوزن اسفنج و کلسی‌اسفر نیز دیده می‌شوند (شکل ۴ ث).

می‌توان میکرودرزها اشاره کرد که به‌صورت مستقیم و باریک و پر شده با کلسیت ریزبلور و نیز متقاطع دیده می‌شوند. فرامینفرها نسبت به رادیولرها عمق کمتری را نشان می‌دهند؛ زیرا به نور وابسته نیستند و در آب‌های سرد زندگی می‌کنند.

#### ریزرخساره شماره ۹- پکستون بیوکلستی

می‌توان گفت این رخساره به‌صورت غالب، برابر و مجموعاً دارای ۲۰ الی ۴۰٪ اکینودرم، سوزن اسفنج، خرده فسیل‌های متنوع فراوان، ائید، پلوئید و دانه‌های میکریتی (ائید) شده است. هیدروکربور مرده و اکسید آهن به‌صورت نفوذی در زمینه سنگ و در بین دانه‌های بیوکلستی به میزان حدوداً ۳٪ به چشم می‌خورد. از فرآیندهای دیاژنتیکی می‌توان به شکستگی‌های باریک و طویل اشاره کرد که با کلسیت پر شده‌اند (شکل ۴ خ).

#### فراوانی رخساره‌ها در برش‌های مورد مطالعه

در شکل ۵ فراوانی رخساره‌های شناسایی شده در برش‌های خانه‌زو و آب‌قد نشان داده شده است. در برش خانه‌زو MF2 (مادستون بیوکلستی) مربوط به محیط حوضه و MF5 (وکستون بیوکلستی) مربوط به محیط رمپ میانی از بیشترین فراوانی برخوردارند. در برش آب‌قد MF3 (وکستون دارای سوزن اسفنج و رادیولریا) مربوط به محیط رمپ خارجی بیشترین فراوانی را نشان می‌دهد.

#### محیط رسوبی

رخساره‌های شناسایی شده سازند خانه‌زو در سه کمربند رخساره‌ای شامل محیط حوضه، رمپ خارجی و رمپ میانی نهشته شده‌اند. براساس شواهدی چون تدریجی بودن روند تبدیل کمربندهای رخساره‌ای به یکدیگر، عدم وجود نهشته‌های توربیدیتی و نیز نبود آثار ریف‌های بزرگ سدی نهشته‌های این سازند در یک سکوی کربناته از نوع رمپ هم‌شیب نهشته شده‌اند (شکل ۵). مدل رسوبی پیشنهادی برای این سازند در شکل ۵ ارائه شده است.

این میکروفاسیس در بخش‌هایی از سازند خانه‌زو در برش الگو مشاهده شد. از فرآیندهای دیاژنتیکی می‌توان به تراکم شیمیایی به فرم استیلولیت‌های موازی و پر شده با اکسید آهن، رگچه‌های انحلالی موازی و متقاطعی که با کلسیت ریزبلور پر شده و نیز ساخت ژئوپتال اشاره کرد.

#### کمربند رخساره‌ای رمپ میانی

#### ریزرخساره شماره ۶- پکستون بیوکلستی فیلامنتی

این رخساره دارای حدود ۳۰٪ فیلامنت‌های تقریباً طویل و نازک است که مربوط به منطقه کم‌عمق‌تر هستند. همچنین، تقریباً ۱۰٪ بیوکلست‌های دیگری نظیر سوزن اسفنج، پلوئید، فرامینفر بسیار کم و قطعات خارپوستان مشاهده شده است. ساخت ژئوپتال مشاهده شده است. رگه‌های تدفینی حاصل تراکم و تکتونیک‌های نیز به‌صورت موازی و متقاطع پر شده با کلسیت دیده می‌شوند (شکل ۴ ج).

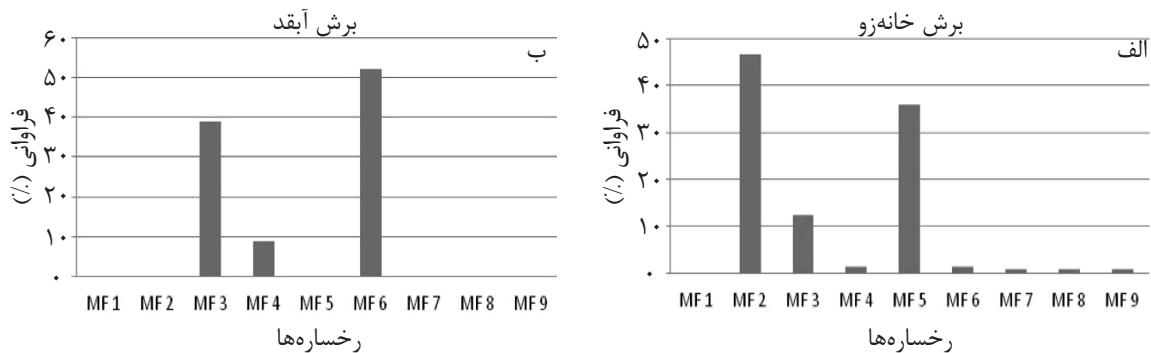
#### ریزرخساره شماره ۷- وکستون خارپوست دار حاوی بیوکلست

می‌توان گفت این رخساره به‌صورت غالب تقریباً دارای ۵ الی ۱۰٪ اکینودرم و قطعات مربوطه است. سایر بیوکلست‌های همراه سوزن اسفنج با برش‌های عرضی و طولی، فرامینفر، پلوئیدهای ریز و دوکفه‌ای است. از فرآیندهای دیاژنتیکی می‌توان به میکرودرزها و رگه‌های متقاطع و باریک اشاره کرد که حاصل تدفین و تکتونیک بوده و با کلسیت ریزبلور پر شده‌اند (شکل ۴ چ).

#### ریزرخساره شماره ۸- وکستون بیوکلستی دارای روزن‌بران کفزی

این رخساره شامل فرامینفرهای متنوع بنتیک و پلانکتونیک در برش‌های سطحی سازند خانه‌زو است که حدود ۵ الی ۸٪ سنگ را شامل می‌شوند. اکثراً حفظ‌شدگی خوب و ساختار سالمی دارند (شکل ۴ ح). به‌طور فرعی سوزن اسفنج، پلوئید، دوکفه‌ای و سایر خرده بیوکلست‌ها نیز در این رخساره دیده می‌شود. از فرآیندهای دیاژنتیکی





شکل ۵ توزیع رخصاره‌ها (الف) در برش خانه‌زو، (ب) در برش آبد

بوده اما در کیمریجین از این حالت خارج و به رمپ کربناته (سازند خانه‌زو) تبدیل شده است [۷]. در واقع نبودن سنگ آهک‌های دوباره نهشته شده در کیمریجین و بیوهرم‌ها، همچنین غلبه رخصاره‌های پکستونی و تا حدودی گرینستونی بر رخصاره‌های ریفی، به کم شیب شدن حوضه و تبدیل شدن آن به رمپ کربناته (شکل ۶) انجام شده است [۷].

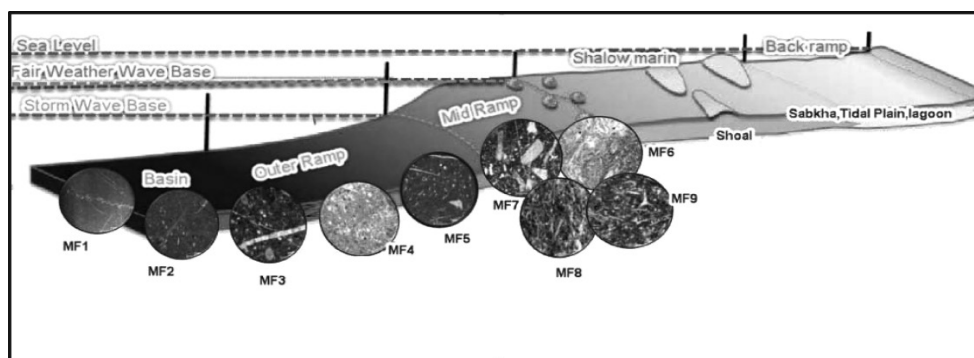
#### دیاژنز و توالی دیاژنزی

در این مطالعه برای بررسی فرآیندهای دیاژنزی از پتروگرافی و توصیف مقاطع نازک استفاده شده است. فرآیندهای دیاژنزی شناسایی شده در این مطالعه شامل میکریتی شدن، زیست‌آشفستگی، سیمانی شدن، انحلال، تراکم، شکستگی و جانیشینی سیلیسی شدن و پیریتی شدن است. به صورت خلاصه توصیف این فرآیندها در زیر آورده شده است.

#### میکریتی شدن

میکریتی شدن یکی از فرآیندهای دیاژنتیکی است که روی دانه‌ها به‌ویژه خرده‌های فسیلی مؤثر بوده است. این فرآیند، اولین رویداد دیاژنتیکی است که هم‌زمان با رسوب‌گذاری در محیط فرآتیک دریایی و در محل تماس آب و رسوب رخ داده است. این فرآیند به‌وسیله تکرار فعالیت‌های میکروارگانیسم‌ها بر سطح آلوکم‌ها ایجاد شده که سپس بر اثر پر شدن این بورینگ‌ها توسط گل آهکی، حاشیه میکریتی در اطراف ذرات تشکیل شده است.

براساس مطالعات انجام شده با پیشروی دریا بر روی سازند تخریبی کشف‌رود از غرب به شرق تا محدوده شمال شهر مشهد محیطی کم‌عمق در حاشیه فلات قاره با شیبی متوسط (رمپ) تشکیل شده و به تدریج عمیق‌تر شده است به طوری که توالی ضخیمی از کربنات‌های خانه‌زو در قالب دو سیکل پیش‌رونده و پس‌رونده تشکیل شده است. تغییرات از روند یک سیکل بزرگ پیش‌رونده تبعیت می‌نماید. با پیشروی نسبتاً تدریجی دریا، سیکل دوم رسوبی که پس‌رونده است بر روی سیکل پیش‌رونده اول ایجاد گردیده است [۶]. نوسانات کوتاه‌مدت سطح دریا باعث می‌شود تا رسوب کامل سازند خانه‌زو باقی‌مانده و سپس با تغییر سریع سطح آب و پیشروی دریا، سازند چمن‌بید که هم‌زمان با رسوب‌گذاری خانه‌زو در بخش عمیق‌تر در حال تشکیل بوده است بر روی خانه‌زو تنه‌شین می‌نماید. گسترش خانه‌زو محدود است و حدوداً از شمال شهر مشهد شروع شده و به طرف غرب تا قوچان گسترش یافته است سپس ناپدید و به سازند چمن‌بید تبدیل شده است [۶]. فراوانی این آهک‌ها در طی بالا بودن سطح نسبی آب دریاها بیشتر است [۱۳]. در حوضه رسوبی کپه‌داغ، گذر از دوره آکسفوردین به کیمریجین، با تغییرات آب و هوایی و رسوب‌گذاری همراه بوده است. راه‌های آبی ایجاد شده در آکسفوردین طی کیمریجین پر شده‌اند [۷]. حوضه رسوبی در زمان رسوب‌گذاری شلف حاشیه‌دار (سازند چمن‌بید)



شکل ۶ مدل رسوبی شماتیک سازند خانه‌زو در ناحیه مورد مطالعه

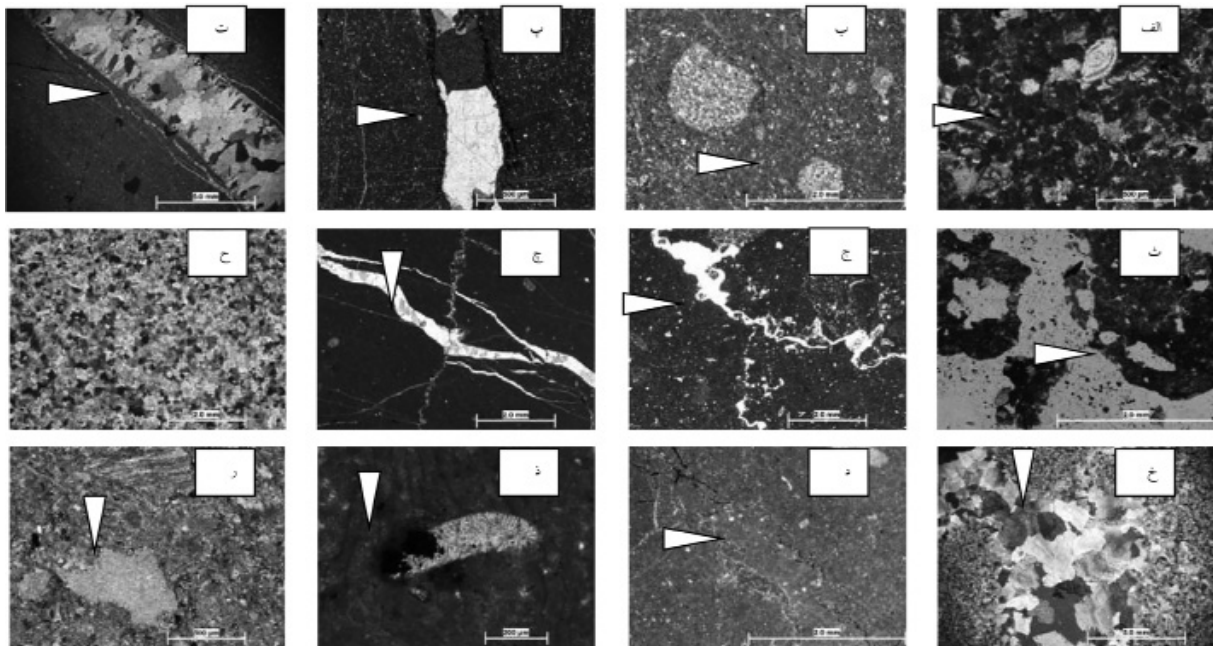
### سیمانی شدن (Cementation)

سیمان‌های کربناته‌ای که در توالی سازند خانه‌زو شناسایی شده و سیستم منافذ را تغییر داده و اشغال کرده‌اند شامل سیمان بلوکی (شکل ۷ پ) سیمان کلسیتی سیمان دروزی (شکل ۷ ت)، هستند. سیمان کلسیتی ریزبلور بخشی از تخلخل‌های ناشی از شکستگی‌ها، درزها و اندکی از تخلخل‌های درون دانه‌ای را پر کرده است. عمدتاً در ریزرخساره‌های وکستون و پکسونی دو محیط ذکر شده مشاهده می‌شود. این سیمان به صورت بلورهای کوچک و هم‌اندازه در محیط‌های دریایی [۱۷] و تدفینی باعث کاهش تخلخل شده است. سیمان کلسیت دروزی در محیط دریایی و تدفینی تشکیل شده [۱۳] و در مقاطع مورد مطالعه این سیمان تخلخل‌های ثانویه را پر کرده است. سیمان بلوکی پرکننده بخشی از تخلخل‌های حفره‌ای، کانالی و شکستگی است که نشانگر تشکیل در محیط دفنی است (شکل ۷ پ و ت). سیمان دروزی و سیمان کلسیت هم‌بعد در تمامی گروه‌های ریزرخساره‌ای مورد مطالعه گسترش دارد و مهم‌ترین عامل در کاهش تخلخل در سازند خانه‌زو هستند. بیشترین درصد سیمانی شدن در محیط تدفینی صورت گرفته و می‌تواند حاصل انحلال دانه‌ها در اثر فشردگی شیمیایی، انحلال کانی‌های ناپایدار مانند آراگونیت و جابه‌جایی یون‌ها در طی مسافت‌های طولانی توسط آب‌های زیرسطحی باشد [۱].

طی این فرآیند ذرات کربناته توسط بلورهای مخفی (کریپتوکریستالین) کربناته یا میکریست جایگزین شده‌اند (شکل ۷ الف). این فرآیند یک فرآیند دیاژنزی اولیه بوده و شاخص منطقه فریاتیک محیط دریایی کم‌عمق است [۱۴]. از لحاظ تأثیر بر روی خصوصیات مخزنی، میکریستی شدن می‌تواند نفوذپذیری را توسط پر کردن دهانه‌های حفرات یا کاهش اندازه آن‌ها کاهش دهد [۱۲].

### زیست‌آشفستگی و نقب‌کنی

فرآیند آشفستگی زیستی یکی از فرآیندهای مؤثر بر نهشته‌های مورد مطالعه است که توسط موجودات نقب‌کن در رسوبات آهکی ریزدانه که در محیط‌های دریایی ته‌نشست می‌کنند رخ داده است. نرم‌تنان درون‌زی و خارپوستان و کرم‌ها ساخت‌های نامنظمی ایجاد کرده و موجب بهم‌ریختگی و تغییر در پراکندگی دانه‌بندی اصلی شده‌اند. در توالی‌های مورد مطالعه زیست‌آشفستگی‌ها به ندرت باعث تغییر بافت و ساختار اولیه رسوب‌گذاری [۱۲، ۱۵] شده و به صورت حفاری رسوبات نرم است (شکل ۷ ب). این فرآیند در محیط‌های کم‌انرژی مانند حوضه و گاهی در رمپ خارجی [۱۶] مشاهده شده است. زیست‌آشفستگی‌ها به وسیله کلسیت سیمان‌جانشین شده است و عوارض آن در مقاطع نازک قابل مشاهده است (شکل ۷ ب). آشفستگی زیستی با ساخت‌های خال‌خال و تفاوت‌هایی در رنگ و اندازه دانه‌ها به چشم می‌خورد.



شکل ۷ الف) میکریتی شدن خرده‌های فسیلی، ۱۴۰ m، برش آبقد، نور طبیعی. ب) آشفستگی زیستی، ۱۵۷ m، برش آبقد، نور پلاریزه. پ) سیمان کلسیتی بلوکی پرکننده شکستگی، ۸۳ m، برش خانه‌زو، نور پلاریزه. ت) سیمان دروزی پرکننده شکستگی، ۱۲۰ m، برش خانه‌زو، نور پلاریزه. ث) انحلال به‌صورت تشکیل حفره‌های انحلالی، ۲۲۲۱ m، چاه چهچه، نور طبیعی. ج) شکستگی باز (فاز اول)، ۲۰۲ m، برش خانه‌زو، نور طبیعی. چ) شکستگی پرشده با سیمان (فاز دوم) قطع کننده فابریک‌های قبلی، ۲۳۶ m، برش خانه‌زو، نور پلاریزه. ح) دولومیت ریزبلور با مرز بلوری سابهدرال تا آنهدرال، ۲۶۳ m، برش خانه‌زو، نور پلاریزه. خ) دولومیت زین‌اسبی، ۲۵۷ m، برش خانه‌زو، نور پلاریزه. د) تراکم شیمیایی به‌صورت استیلولیت، ۲۲۰ m، برش خانه‌زو، نور طبیعی. ذ) پیریتی شدن بر روی خارپوست، ۲۶۷ m، برش خانه‌زو، نور طبیعی. ر) سیلیسی شدن، ۶۱ m، برش آبقد، نور پلاریزه

## انحلال

چند مرحله انحلال به‌دلیل دیاژنز گسترده و پیچیدگی در رخداد فرآیندها، توالی سازند خانه‌زو را تحت تأثیر قرار داده است. سازند خانه‌زو به‌دلیل ماهیت سنگ‌شناسی کربناته و در اثر دیاژنز تدفینی تحت تأثیر فرآیند انحلال قرار گرفته است (شکل ۷ ث). با توجه به مطالعات پیشین و مطالعه انجام شده، عمده انحلال‌های مشاهده شده که باعث گسترش کم‌وبیش تخلخل شده است مربوط به رخنمون‌های دریایی و تحت تأثیر دیاژنز تدفینی می‌باشند [۵، ۶، ۷]. انحلال حاصل از محیط تدفینی تقریباً مؤثر بوده به طوری که اجزای تشکیل‌دهنده سنگ از جمله دانه‌ها، سیمان و ماتریکس را تحت تأثیر قرار داده است. می‌توان چنین بیان کرد که این فرآیند غالباً در همه رخساره‌های سازند خانه‌زو با فراوانی‌های متفاوت دیده شده است. بخشی

از انحلال‌های مشاهده شده دارای منشأ دفنی هستند و توسط سیال‌های دفنی ایجاد شده‌اند مانند تخلخل‌های موجود در مسیر استیلولیت‌ها که بیشتر با اکسید آهن پر شده‌اند و تخلخل درون‌دانه‌ای در حجرات روزن‌بران کفزی که توسط پیریت و کلسیت جانشین شده است.

## شکستگی

در توالی مورد مطالعه یکی از مهم‌ترین انواع تخلخل، تخلخل حاصل از شکستگی است که در اثر فرآیندهای تکتونیکی و تدفین که به موازات لایه‌بندی یا در جهات مختلف ایجاد شده و در رخساره‌های هر سه گروه دیده می‌شود. شکستگی‌های نسل اول در شرایط تدفینی کم‌عمق رخ داده‌اند که با قطع کردن آلوک‌ها و زمینه به‌وسیله کلسیت ریزبلور و گاهی بلوکی هم بعد پر شده است (شکل ۷ ج).

تأمین می‌شود که شامل: ۱- واکنش دولومیت‌های قدیمی‌تر ۲- اخراج یون منیزیم در حین تبدیل مونت مورینیت به ایلیت ۳- انحلال نمک‌های تلخ که در اعماق رسوبات حوضه‌ای ممکن است حضور داشته باشند. فرآیندهای دیاژنتیکی که باعث بلوغ مواد آلی می‌شوند، می‌تواند منجر به تشکیل فزاینده سیالات زیرسطحی شده که به دلیل خاصیت اسیدی که دارند می‌توانند عاملی برای انحلال کربنات‌ها و ایجاد تخلخل ثانویه باشند. این کربنات انحلالی می‌تواند در مراحل بعدی به صورت سیمان کلسیتی یا دولومیتی رسوب کند [۲۰]. این دولومیت‌ها تأثیری بر روی تخلخل و تراوایی نداشته و به شکل دولومیت‌های نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل می‌باشند. بلورهای شکل‌دار به صورت نادر وجود دارد. اندازه بلورهای آن حدوداً بین ۳۰ تا ۷۵  $\mu\text{m}$  است که در بیشتر ریزرخساره‌های حوضه و رمپ خارجی مشاهده شده است. در مجموع نوع مدل دولومیتی شدن تدفینی در رخساره‌های گل‌پشتیان نسبت به دانه‌پشتیان گسترش بیشتری داشته‌اند. از لحاظ نحوه تشکیل، دولومیت‌ها ثانویه یا جانیشینی بوده و دارای بافت هیپیدئوتوپیک تا زئوتوپیک هستند.

#### تراکم

تراکم در برش‌های مورد مطالعه در سازند خانه‌زو به صورت انحلال فشاری در مرز دانه‌ها (میکرواستیلولیت‌ها)، شکل‌گیری استیلولیت‌ها و رگچه‌های انحلالی است که در مقاطع نازک با دامنه کوتاه و متوسط مشخص است (شکل ۷ د). این پدیده یکی از شاخص‌ترین محصولات دیاژنز تدفینی است که فابریک سنگ، دانه‌ها، سیمان و زمینه را با هم قطع می‌کند. عموماً با توجه به ماهیت گل‌پشتیان بیشتر رخساره‌های به دست آمده از این بخش برش‌های مورد مطالعه سازند خانه‌زو، گسترش فرآیندهای مرتبط با تراکم شیمیایی بیشتر مشاهده می‌گردد. تراکم فیزیکی دارای فراوانی بسیار کمتری نسبت به تراکم شیمیایی است.

شکستگی‌های نسل دوم با قطع نمودن برخی از فرآیندهای دیاژنزی از جمله استیلولیت و شکستگی‌های نسل اول مشخص می‌شوند که در جاهای متفاوت توسط کلسیت هم‌بعد ریز بلور، بلوکی و دروزی پرشده (شکل ۷ چ) و برخی نیز به صورت شکستگی‌های باز هستند. این شکستگی‌ها به صورت افقی و عمودی، باز، پرشده، نیمه‌پر شده و با میزان بازشدگی مختلف قابل شناسایی می‌باشند. بخش بسیار کمی از این شکستگی‌ها باز هستند.

#### دولومیتی شدن

دولومیتی شدن یک فرآیند دیاژنز مؤثر بر نهشته‌های مورد مطالعه است. در این تحقیق و با استناد به پژوهش‌های قبلی دو نوع دولومیت از نوع جانیشینی و درشت‌بلور پرکننده منافذ و شکستگی‌ها شناسایی شده‌اند [۷]. دولومیت‌های سازند خانه‌زو از نوع ثانویه بوده و توزیعشان روند خاصی را نشان نمی‌دهد. براساس طبقه‌بندی‌های انجام شده [۱۸] دولومیت‌های سازند خانه‌زو از نوع ۳ (جانیشینی سنگ آهک و یا تبلور مجدد دولومیت اولیه بعد از تدفین)، ۴ (دارای بلورهای متوسط تا درشت نامسطح) (شکل ۷ ح) و ۵ (بلورهای درشت پرکننده حفرات و شکستگی‌ها) (شکل ۷ خ) بوده که دارای مرزهای بلوری شکل‌دار تا بی‌شکل بوده و به این ترتیب دولومیت‌های متوسط تا درشت‌بلور را تشکیل می‌دهند. با توجه به حضور دولومیت‌های زین‌اسبی و نیز فراوانی انحلال فشاری و استیلولیت مدل دولومیتی شدن دفنی برای دولومیت‌های این سازند پیشنهاد می‌شود [۱۹]. بیشتر دولومیت‌ها در طی دفن سنگ‌های آهکی ته‌نشین می‌شوند. فرض می‌شود فشردگی گل سنگ‌ها، تراکم رسوبات و خروج سیال‌های غنی منیزیم به داخل سنگ‌های آهکی باشد. آب‌های هیدروترمال در شکستگی‌ها، حرکت نموده و منجر به تشکیل رگه‌های دولومیت بی‌تناسب (زین‌اسبی) می‌شود. این دولومیت درشت‌بلور و دارای فابریک مخرب است. منیزیم از منابع مختلفی

نسبی تأثیر فرآیندهای دیاژنزی در ناحیه مورد مطالعه است. در مرحله ائوزنتیک فرآیندهای اولیه دیاژنزی شامل زیست آشفستگی و میکریتی شدن است که بلافاصله پس از رسوب‌گذاری در کف حوضه آغاز شده است. در مرحله مزوژنیک فرآیندهای تراکم فیزیکی و شیمیایی، سیمان کلسیتی پرکننده حجره‌های فسیلی، نسل اول شکستگی، انحلال و دولومیتی شدن رخ می‌دهد. در طی دیاژنز نهایی، فرسایش و بالاآمدگی در اثر فرآیندهای تکتونیکی رخ داده که منجر به ایجاد شکستگی‌های متعدد در توالی‌های کرناته می‌شود. فرآیندهای دیاژنزی تدفینی در این توالی‌ها باعث گسترش شکستگی، درزها، استیلولیت‌ها و به میزان خیلی کم تخلخل حفره‌ای مجزا در رخساره‌های گل‌پشتیبان شده است و در آخر باعث پر شدن برخی از آن‌ها با سیمان کلسیتی به فرم‌های متنوع و ذکر شده است. ترتیب رخداد فرآیندهای دیاژنز شناسایی شده در توالی مورد مطالعه براساس مطالعات پتروگرافی در جدول ۲ نشان داده شده است.

تراکم شیمیایی عامل مهمی در کاهش تخلخل و تراوایی شده است.

### پیریتی شدن

در این مطالعه پیریت به اشکال ریزبلور، کوبیک و دانه تمشکی گرد و جانشیننی بخشی در بیوکلست‌ها (شکل ۷ ذ) فراوان هستند. در بعضی از ریزرخساره‌ها پیریت در حجرات روزن‌بران کفزی جانشین شده است. پیریت در محیط تدفینی تشکیل شده و نشان‌دهنده شرایط احیایی محیط است [۱۷].

### سیلیسی شدن

سیلیس نیز به‌صورت جانشیننی بخشی در بیوکلست‌ها، در امتداد شکستگی‌ها و در زمینه به مقدار بسیار کم مشاهده شده می‌شود (شکل ۷ ر). فراوانی سیلیس بیشتر در ریزرخساره‌های حاوی رادیولر است و به نظر می‌رسد خرده‌های بیوکلستی رادیولرها منبع تأمین سیلیس باشند.

### توالی دیاژنزی

توالی پاراژنزی فرآیندهای دیاژنزی نمایان‌گر زمان

جدول ۲ توالی پاراژنتیکی سازند خانه‌زو

Paragenetic Sequence		
Diagenetic Features	Early	Late
Bioturbation	_____	
Micritization	_____	
Neomorphism	_____	
Dissolution		_____
Sparry Calcite Cementation		_____
Drusy Calcite Cementation		_____
Blocky Calcite Cementation		_____
Mechanical Compaction	_____	
Chemical Compaction		_____
Fracturing		_____
Xenotopic Dolomite		_____
Saddle Dolomite		_____
Pyritization		_____



### انواع تخلخل در سازند مورد مطالعه

تخلخل اساسی‌ترین فاکتور در تشکیل یک مخزن است. برای طبقه‌بندی تخلخل از روش چاکت و پری [۲۱] و اهر [۲] استفاده شده است. درصد تخلخل به صورت چشمی زیر میکروسکوپ پلاریزان و مقایسه با چارت‌های استاندارد انجام گرفته است. طبقه‌بندی اهر بر انواع ژنتیکی تخلخل معطوف شده و در این روش فرآیندهای ایجادکننده یا تغییردهنده تخلخل شامل فرآیندهای رسوبی یا ته‌نشستی، دیازنزی و شکستگی است. این ۳ مورد در سه رأس مثلث قرار می‌گیرند و اضلاع نشان دهنده تخلخل‌های هیبریدی محصول ۲ فرآیند است.

### انواع تخلخل

ارزیابی نوع و میزان تخلخل براساس مطالعه پتروگرافی برش‌های نازک میکروسکوپی و به صورت چشمی انجام شده است. براساس این مطالعه انواع مختلفی از تخلخل‌ها در نمونه‌ها مشاهده شده که در این بین تخلخل حفره‌ای متداول‌تر و از نظر حجمی مهم‌تر است. انواع تخلخل‌های مشاهده شده در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرد.

### تخلخل حفره‌ای

تخلخل حفره‌ای مهم‌ترین و متداول‌ترین نوع تخلخل در توالی مورد مطالعه است. این نوع تخلخل در رخساره‌های مختلف که بر اثر افت نسبی سطح آب دریا تحت تأثیر رخنمون تحت‌جوی قرار گرفته‌اند دیده می‌شود. تخلخل‌های انحلالی

بزرگ به صورت جزا از هم ایجاد شده‌اند و میزان آن در نمونه‌ها حدود ۴٪ است. تخلخل حفره‌ای جزء تخلخل‌های ثانویه بوده و مستقل از فابریک سنگ است [۱۹] (شکل ۸ الف).

### تخلخل بین‌بلوری

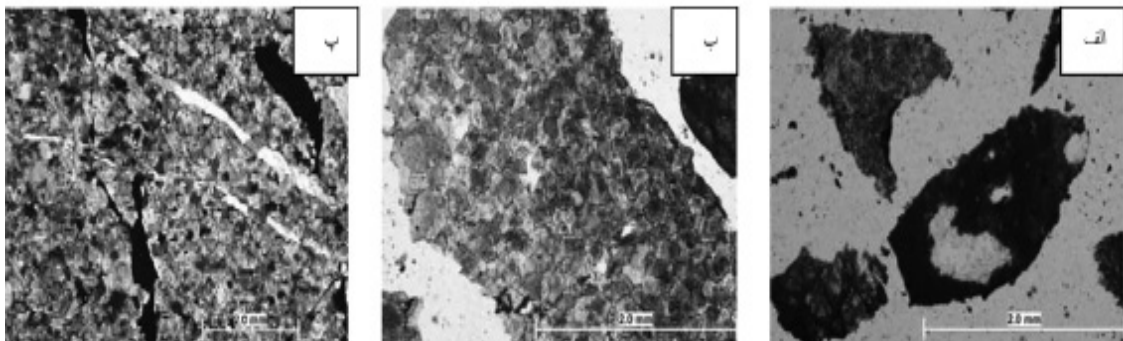
این نوع تخلخل وابسته به فابریک سنگ بوده و به‌طور عمده در دولومیت‌ها تشکیل می‌شود. تخلخل بین‌بلوری در نمونه‌هایی که جانشینی کامل با دولومیت رخ داده و بلورهای شکل‌دار دولومیت تشکیل شده‌اند دیده می‌شود. میزان این نوع تخلخل بسیار پایین بوده و به میزان ۱ تا ۲٪ در نمونه‌ها دیده می‌شود (شکل ۸ ب).

### تخلخل شکستگی

این تخلخل ثانویه بوده و تحت کنترل فابریک سنگ نیست. این نوع تخلخل در برش‌های مطالعه شده معمول است (شکل ۸ پ). یک فاز سیمانی شدن بعد از فاز شکستگی باعث پر شدن شکستگی‌ها شده است. اگرچه شکستگی‌های پر نشده در توالی نیز معمول بوده و میزان آن بین ۱ تا ۴٪ تغییر می‌کند. شکستگی علاوه‌بر اینکه تخلخل را افزایش می‌دهد، نقشی عمده در افزایش تراوایی دارد.

### فاکتورهای کنترل‌کننده تخلخل

فاکتورهای متعددی کنترل‌کننده افزایش یا کاهش تخلخل هستند. در ادامه عواملی که باعث تغییرات تخلخل در نمونه‌های مورد مطالعه شده به‌طور اجمالی مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل ۸ الف) تخلخل حفره‌ای، ب) تخلخل بین‌بلوری، پ) تخلخل شکستگی

توجه به موارد فوق تخلخل غالب در سازند خانه‌زو توسط فرآیند انحلال ایجاد شده است. براساس طبقه‌بندی ژنتیکی تخلخل توسط اهر [۲] این سازند در رده تخلخل‌های دیاژنتیکی قرار می‌گیرد و مخزن حاصله نیز دیاژنتیکی است (شکل ۸). بنابراین به منظور شناخت و بهره‌برداری مخزن احتمالی این سازند بایستی از استراتژی‌های مخصوص مخازن دیاژنتیکی استفاده نمود.

#### فاکتورهای کاهش‌دهنده تخلخل

سیمانی شدن یکی از عمده‌ترین عواملی است که باعث کاهش و تخریب تخلخل در توالی مورد مطالعه شده است. انواع سیمان، در محیط‌های مختلف دیاژنتیکی تشکیل شده و بخشی از فضاهای خالی را پر کرده‌اند. سیمان‌های بلوکی و دروزی از مهم‌ترین سیمان‌های مشاهده شده هستند. عامل دیگر در کاهش تخلخل فشردگی است که در طی ته‌نشست و بعد از آن عمل کرده است. در شکل ۹ اضلاع مثلث نیز تخلخل‌های هیبریدی را که محصول ۲ فرآیند می‌باشند را نشان می‌دهد. براساس این طبقه‌بندی تخلخل در سازند خانه‌زو به‌طور عمده تحت تأثیر فرآیند انحلال تشکیل شده و بر این اساس در رده تخلخل‌های دیاژنتیکی قرار می‌گیرد.

#### تخلخل در رخصاره‌های مختلف

میزان تخلخل در رخصاره‌های مختلف در برش‌های خانه‌زو و آب‌قد در جدول ۳ ارائه شده است. همان‌طور که در این جدول دیده می‌شود در برش خانه‌زو رخصاره‌های MF2 (مادستون بیوکلسیتی)، MF3 (وکستون سوزن اسفنج‌دار حاوی رادیولر) از تخلخل میانگین بالاتری برخوردار هستند. رخصاره‌های مذکور گل‌پشتیبان بوده و تخلخل‌های اولیه یا ته‌نشستی مانند بین‌دانه‌ای و درون‌دانه‌ای وجود ندارد؛ بنابراین تخلخل موجود مستقل از رخصاره بوده و تحت تأثیر فرآیندهای دیاژنتزی ایجاد شده است.

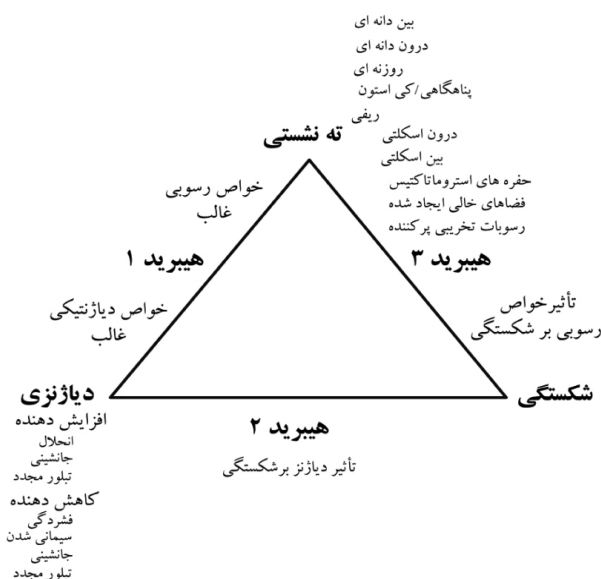
#### فاکتورهای افزایش‌دهنده تخلخل

فرآیندهای دیاژنتزی نظیر انحلال مهم‌ترین عامل افزایش‌دهنده تخلخل و تراوایی در توالی مورد مطالعه است. انحلال با ایجاد تخلخل حفره‌ای باعث افزایش تخلخل و کیفیت مخزنی شده است. شکستگی از دیگر فرآیندهای افزایش‌دهنده تخلخل است که بیشترین نقش را در افزایش تراوایی داشته و با برقراری ارتباط بین تخلخل‌ها و تولید تخلخل جدید باعث افزایش آن و تراوایی می‌شود. دولومیتی شدن تا حد کمی باعث ایجاد تخلخل بین‌بلوری شده و نقش مثبتی را در ایجاد کیفیت مخزنی نداشته است؛ بنابراین با

جدول ۳ میزان تخلخل در رخصاره‌های مختلف در برش خانه‌زو و آب‌قد

برش آب‌قد			
تخلخل			
میانگین	Max	Min	رخصاره
.	.	.	MF1
.	.	.	MF2
.	.	.	MF3
.	.	.	MF4
.	.	.	MF5
.	.	.	MF6
.	.	.	MF7
.	.	.	MF8
-	.	.	MF9

برش خانه‌زو			
تخلخل			
میانگین	Max	Min	رخصاره
-	.	.	MF1
۴/۱	۷	۱	MF2
۴/۴	۸	۱	MF3
۴	۸	۱	MF4
-	.	۱	MF5
-	.	.	MF6
-	.	.	MF7
-	.	.	MF8
-	.	.	MF9



شکل ۹ طبقه بندی ژنتیکی تخریل در سنگ های کربناته [۲]

خارجی) نیز با فراوانی زیاد در برش الگو مشاهده شده است و به مقدار محدود نیز در آبقد به چشم می خورد. لیتولوژی زون ۱ غالباً آهک و کمی آهک شیلی است. بخش دولومیتی (زون ۲) مربوط به بالای سازند در برش الگو است و در برش آبقد مشاهده نشده است. به بیان دیگر، سازند خانه زو در برش آبقد با توجه به پتروگرافی و مطالعه مقاطع میکروسکوپی فاقد دولومیت بوده، لذا این فقدان گستردگی زون بندی را با مشکل مواجه نموده است. فرآیندهای دیاژنتیکی غالب در آن شکستگی ها و رگچه های ریز پر شده با کلسیت ریزیلور و گاهی پر نشده، استیلولیت و فضاهای متخلخل ناشی از فرآیند انحلال و تا حدودی سیمانی شدن است. در رابطه با زون بندی چاه ها نیز می توان گفت که با توجه به نتایج این تحقیق و نیز با استناد به مطالعات قبلی، کیفیت مخزنی پایینی را می توان برای چاه ها رقم زد. مطالعه پتروگرافی و نیز بررسی لاگ های پتروفیزیکی برش های زیرسطحی منجر به شناسایی ۳ زون شده است (شکل ۱۰).

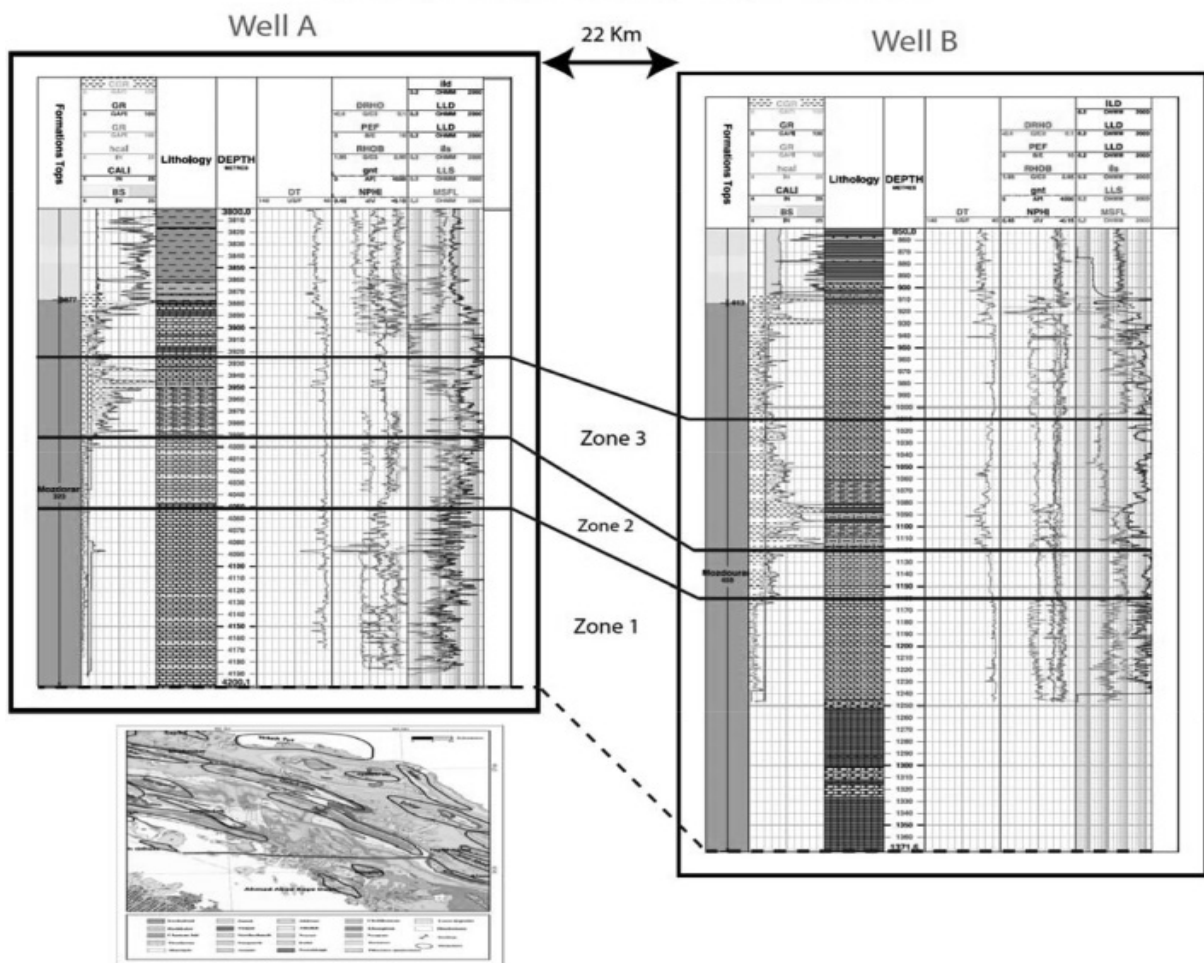
زون ۱- این زون در قاعده سازند خانه زو قرار دارد که دارای لیتولوژی آهک دولومیتی است. تنها رخساره مشاهده شده در مورد هر دو چاه مادستون است.

عوامل کاهش دهنده تخریل نیز عمدتاً دیاژنتیکی بوده و شامل سیمانی شدن و فشردهگی هستند.

### زون بندی مخزن

در بحث زون بندی باید عنوان کرد که به دلیل از بین رفتن مجموعه ای از لایه های طی فرآیندهای مختلف زمین شناسی در برش های سطحی، امکان زون بندی و تطابق آن ها با لایه های زیرسطحی (چاه) وجود ندارد. حتی در مورد دو برش سطحی آبقد و برش الگو نیز عمل زون بندی با مشکل و ابهاماتی روبه رو است. حتی لیتولوژی لایه ها در ۴ برش هیچ هم خوانی با یکدیگر ندارند. به عنوان نمونه سازند خانه زو در برش آبقد کاملاً آهکی بوده و فاقد لیتولوژی دولومیت است. لذا نمی توان به طور واضح تعدادی زون تعیین نمود. با توجه به موارد فوق فرآیند زون بندی در دو چاه با هم و در برش های سطحی نیز با یکدیگر انجام شد. زون اول زون بندی برش های سطحی در قاعده سازند خانه زو بوده و رخساره های غالب مشاهده شده در آن وکستون خارپوست دار حاوی بیوکلست (رمپ میانی) و وکستون سوزن اسفنج دار حاوی رادیولر (رمپ خارجی) است. دو رخساره مادستون بیوکلستی (حوضه) و وکستون بیوکلستی (رمپ

## Correlation between wells



شکل ۱۰ تطابق زون‌های شناسایی شده در چاه‌های مورد مطالعه

شایان ذکر است که در هر دو حلقه چاه میان‌لایه کم ضخامت شیلی وجود دارد که حدود ۲۳ m در چاه شماره B و با مترای حدودی ۱۰ m در چاه A مشاهده شده است. این لایه شیلی در چاه شماره B به صورت نفوذی و میان‌لایه ای در وسط زون ۳ (آهک شیلی) و در چاه A در بالای زون ۳ قرار گرفته است. به احتمال قوی این حالت به دلیل دیاژنزی شدید و یا تکتونیک فعال در زمان رسوب‌گذاری و جابه‌جایی لایه‌ها است اما برای پاسخ دقیق‌تر نیاز به مطالعات جامع‌تر است.

هیچ فرآیند دیاژنزی به صورت غالب و چشم‌گیر در آن‌ها مشاهده نشده ولی به‌طور جزئی می‌توان از انحلال و به تبع آن تخلخل حفره‌ای در متن سنگ نام برد. به لحاظ مخزنی این زون دارای کیفیت پایین و ضعیف است (جدول ۴).

زون ۲- زون دوم آهکی بوده و مثل زون اول کیفیت مخزنی در آن پایین بوده و از فرآیندهای دیاژنزی فقط می‌توان به انحلال (کم) اشاره نمود.

زون ۳- این زون دارای لیتولوژی آهک شیلی، شیل و آهک دولومیتی است. فرآیند دیاژنزی غالبی مشاهده نشده است و کیفیت مخزنی پایین است.

جدول ۴ خصوصیات زون‌های شناسایی شده (چاه‌ها) شامل ضخامت، بافت و محیط رسوبی، فرآیندهای دیاژنزی و کیفیت مخزنی

زون	بافت و محیط رسوبی	فرآیندهای دیاژنزی	کیفیت مخزنی	ضخامت در چاه A	ضخامت در چاه B
۱	آهک دولومیتی مادستون - رمپ خارجی	انحلال، شکستگی	پایین	۱۵۰	۸۵
۲	آهک مادستون - حوضه	انحلال جزئی	پایین	۶۰	۴۱
۳	آهک شیلی مادستون - رمپ خارجی تا حوضه	انحلال کم، شکستگی	پایین	۷۰	۱۱۰

### نتیجه‌گیری

دریایی و ناحیه تدفینی رخ داده‌اند. فرآیندهای دیاژنتیکی شناسایی شده به ترتیب شامل میکریتی شدن، آشفته‌گی زیستی، سیمانی شدن (بلوکی و دروزی)، تراکم شیمیایی به صورت تشکیل استیلولیت، دولومیتی شدن، پیریتی شدن و سیلیسی شدن است. انواع تخلخل شناسایی شده در توالی مورد مطالعه شامل حفره‌ای، بین‌بلوری و شکستگی است. تخلخل موجود مستقل از رخساره بوده و تحت تأثیر فرآیندهای دیاژنزی مانند انحلال، دولومیتی شدن و شکستگی ایجاد شده است. سیمانی شدن و تراکم نیز از فرآیندهای دیاژنتیکی است که سبب کاهش ویژگی‌های مخزنی شده است. با توجه به درصد پایین تخلخل، غیرمفید بودن آن‌ها و عدم وجود تراوایی کافی، افق مخزنی در این سازند از کیفیت بالایی برخوردار نیست. به بیان دیگر، شکستگی و انحلال بر کیفیت مخزنی تأثیرگذار نبوده چراکه در غالب موارد توسط سیمان پر شده‌اند.

در این پژوهش ریزرخساره‌ها، محیط رسوبی، دیاژنز و کیفیت مخزنی رخنمون‌ها و برش‌های زیرسطحی نهشته‌های سازند خانه‌زو واقع در حوضه کپه‌داغ در شمال شرق ایران مورد بررسی قرار گرفته است. بر مبنای مطالعات پتروگرافی مقاطع نازک میکروسکوپی ۹ ریزرخساره در توالی مورد مطالعه شناسایی گردید. این رخساره‌ها در محیط حوضه (دریای باز)، رمپ خارجی و رمپ میانی نهشته شده‌اند. براساس شواهدی چون نبود رخساره‌های دوباره نهشته شده و تبدیل تدریجی رخساره‌ها به یکدیگر می‌توان نتیجه گرفت که رخساره‌های سازند خانه‌زو در یک سکوی کربناته از نوع رمپ هم‌شیب نهشته شده‌اند. مطالعات پتروگرافی همچنین نشان می‌دهد که فرآیندهای دیاژنزی مختلفی بر روی رسوبات توالی مورد مطالعه اثرگذار بوده است که با در نظر گرفتن ترتیب توالی در ناحیه فرآتیک

### مراجع

- [1]. Lucia F J (2007) Carbonate reservoir characterization: an integrated approach, Springer, Berlin, New York, 336.
- [2]. Ahr W M (2008) Geology of carbonate reservoirs: the Identification, description, and characterization of hydrocarbon reservoirs in carbonate rocks, 1st edition, Wiley Publication, 1- 277.
- [3]. Moore C H, Wade W J (2013) Carbonate reservoirs, porosity and diagenesis in a sequence stratigraphic framework, 2nd edn, Elsevier, Amsterdam, 67: 374.
- [4]. Afsharharb A (1979) The Stratigraphy, tectonics and petroleum geology of the Kopet-Dagh Region, Northern Iran, PhD Thesis, 1-316.
- [5]. Afshar Harb A (1979) The stratigraphy, tectonics and petroleum geology of the kopet dagh region, Northern Iran, Unpublished PhD Thesis, Imperial College of Science and Technology, London.
- [6]. موحد ب.، سنگ‌شناسی (۱۳۷۷)، محیط رسوبی، گسترش ناحیه‌ای و خصوصیات مخزنی سازندهای مزدوران ۱ و ۲ و چمن‌بید در کپه‌داغ.
- [7]. Kavooosi M A, Lasemi Y, Sherkati S, Moussavi-harami R (2009) Facies analysis and depositional sequences



- of the Upper Jurassic Mozduran Formation, a carbonate reservoir in the Kopet Dagh Basin, NE Iran, *Journal of Petroleum Geology*, 32, 3: 235-259.
- [8]. Dickson J A D (1966) Carbonate identification and genesis as revealed by staining, *Journal of Sedimentary Research*, 36, 2: 491-505.
- [9]. Dunham R J (1962) Classification of carbonate rocks according to depositional texture, In: W. E. Ham (Ed.), *Classification of Carbonate Rocks*. AAPG Memoir, 1: 108-121.
- [10]. Embry A F, Klovan J E (1971) A Late Devonian reef tract on northeastern Banks Island, NWT. *Bulletin of Canadian petroleum geology*, 19: 730–781.
- [11]. Wilson J L (1975) *Carbonate facies in geologic history*, 1st edition, Springer-Verlag, New York, 1-471.
- [12]. Flügel E (2010) *Microfacies of carbonate rocks*, 1st edition, Springer – Verlag, New York, 967.
- [13]. Tucker M E, Wright V P (1990) *Carbonate sedimentology*, 1st ed., Blackwell Scientific Publishing, 1-482.
- [14]. Bathurst R G C (1975) *Carbonate sediment and their diagenesis*, 1st edition, Elsevier, North Holland, 1-657.
- [15]. Burchette T P and Britton S R (1985) *Carbonate facies analysis in the exploration for hydrocarbons; a case-study from the Cretaceous of the Middle East*, Geological Society, London, Special Publications, 18: 311-338.
- [16]. Hollis C 2011, Diagenetic controls on reservoir properties of carbonate successions within the Albian–Turonian of the Arabian Plate, *Petroleum Geoscience*, 17, 3: 223-241.
- [17]. Hajikazemi E, Al-Aasm I S and Coniglio M (2010) Subaerial exposure and meteoric diagenesis of the Cenomanian-Turonian Upper Sarvak Formation, southwestern Iran, Geological Society, London, Special Publications, 330, 1: 253-272.
- [18]. Adabi M H (2002) Petrography and geochemical criteria for recognition of unaltered coldwater and diagenetically altered Neoproterozoic dolomite, western Tasmania, Australia: 16th Australian Geological Convention, Australia (abstract), 350.
- [19]. Lee Y I and Friedman G M (1987) Deep – burial dolomitization in the lower Ordovician. Ellenburger. Group Carbonates in west Texas and Southeastern New Mexico: *Journal of Sedimentary Research*, 57, 3: 544-557.
- [20]. Scholle P A and Ulmer-Scholle D S (2003) *A color guide to the petrography of carbonate rocks: grains, texture, porosity, diagenesis*, AAPG Memoir 77, Published by the American Association of Petroleum Geologists Bulletin, Tulsa, Oklahoma, USA, 459.
- [21]. Choquette P W and Pray L C (1970) Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates, *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 54: 207-250.



# Microfacies, Depositional Environment, Diagenetic Processes and Their Effects on Reservoir Characterization of the Khaneh-Zu Formation in the East of Kopet Dagh Basin

Roya Khezerloo<sup>1</sup>, Seyed Ali Moallemi<sup>\*2</sup> and Bahram Movahed<sup>3</sup>

1- Department of Geology, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

2. Exploration Deputy Directorate, Exploration Directorate, (NIOC), Tehran, Iran

3. CAPE Company, Tehran, Iran

s.a.moallemi@nioc.ir

DOI: 10.22078/pr.2020.4227.2913

Received: July/14/2020

Accepted: September/30/2020

## Introduction

Reservoir quality of carbonate rocks is mainly affected by microfacies and diagenetic processes [1, 2, 3, 4]. Therefore, it is essential to be aware of facies distribution and effect of diagenetic processes in order to identify heterogeneities. Carbonates of Khaneh-zu Formation have been studied by considering various aspects of facies changes, depositional environment, and diagenetic processes in different parts of Kopet Dagh [5, 6, 7]. Khaneh-Zu Formation is somewhat heterogeneous at different scales due to extensive facies changes, effect of diagenetic processes horizontally and vertically and tabular communication in some areas with Chaman-Bid Formation. Diagenesis is the main controlling factor in many of hydrocarbon reservoirs, especially in Middle East. Diagenetic history of sediments is controlled by sea water level fluctuations [10]. This formation is composed of porous zones and permeability as well as intra-reservoir non-porous horizons. Such heterogeneities and extensive changes made it essential to discuss factors affecting and controlling microfacies and diagenesis. This study was conducted to introduce microfacies, depositional environment, and effect of diagenetic processes on Khaneh-Zu Formation in Kopet Dagh Basin.

## Materials and Methods

This research is based on field studies of Khaneh-Zu Formation in two outcrop sections including Abghad and Khaneh-Zu. During systematic sampling, 410 samples have been selected for thin section preparation. Thin sections were stained with alizarin red-s using Dickson's method [8] for determination of calcite and dolomite. Different parameters such as lithology, type and percentage of allochem, texture, microfacies and diagenetic features were studied and interpreted in details. Carbonate rocks have been classified based on Dunham and Folk classification [8, 9]. Depositional environment was studied based on Wilson and Flügel [11, 12] standard models.

## Result and Discussion

According to the results obtained from petrography and combination of these data with field observation and comparing them to standard facies models [11, 12], 9 microfacies were identified in the Khaneh-Zu Formation. The identified microfacies were deposited in different facies belt including mid ramp, outer ramp and basin. The results from petrographic studies and field observation show that the Khaneh-Zu Formation in the studied sections has been affected by different diagenetic processes varying from marine and burial

stages. The main identified diagenetic features are micritization, bioturbation, cementation, dissolution, compaction, fracturing, and pyritization.

### Conclusions

Based on field studies integrated with petrographical investigation of thin sections of the Khaneh-Zu Formation in Kopet-Dagh Basin, 9 types of microfacies have been identified. These microfacies have been deposited in four facies belt related to inner, mid and outer ramp and basin.

Based on the lack of calciturbidites and great barrier reefs, a gentle carbonate ramp platform proposed for the Khaneh-Zu Formation.

Considering the tectonic transformations in the area and placement of sediment basin in present mode with northeastern-southwest trend, it is possible to consider carbonate ramp platform for Khaneh-Zu Formation in this area. According to unpublished seismic profiles, topography of sedimentary basin has been created by tectonic transformations at Upper Jurassic Time.

Different diagenetic processes affected on this formation which are micritization, bioturbation, cementation, dissolution, compaction, fracturing, and pyritization.

Among all, dissolution formed isolated vuggy porosity, and so it has not positive effects on permeability and reservoir quality increased reservoir quality. Cementation and compaction have negative effect on reservoir characteristics. So as a point of view of reservoir characterization, the studied interval shows poor reservoir quality.

### References

- Lucia FJ (2007) Carbonate reservoir characterization: an integrated approach, Springer, Berlin, New York, 336.
- Ahr WM (2008) Geology of carbonate reservoirs. Wiley Pub. 277.
- Moore CH, Wade WJ (2013) Carbonate reservoirs, porosity and diagenesis in a sequence stratigraphic framework, 2nd edn, Elsevier, Amsterdam. 67, 374.
- Afshar-Harb A (1979) The Stratigraphy, Tectonics and Petroleum Geology of the Kopet Dagh Region, Northern Iran, PhD Thesis, Imperial College of Science and Technology, London, 1-316.
- Afshar-Harb A (1979) The stratigraphy, tectonics and petroleum geology of the kopet dagh region, Northern Iran, Unpublished Ph.D. Thesis, Imperial College of Science and Technology, London.
- Movahed B, Petrology and sedimentary environment, regional distribution and reservoir characterization of the Mozduran 1 and 2 and Chamanbid formaitoms in Kopet Dagh basin, Journal of Oil and Gas Exploration and Production, 1-5.
- Kavoosi MA, Lasemi Y, Sherkati S, Moussavi-harami R (2009), Facies analysis and depositional sequences of the Upper Jurassic Mozduran Formation, a carbonate reservoir in the Kopet Dagh Basin, NE Iran.
- Dickson JAD (1966) Carbonate identification and genesis as revealed by staining, Journal of Sedimentary Research, 36, 2: 491-505.
- Dunham RJ (1962) Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: W. E. Ham (Ed.), Classification of Carbonate Rocks. AAPG Memoir, 1, 108-121.
- Emery, D. & Meyers, K.J. 1996. Sequence Stratigraphy. Blackwell, Oxford. Jordan, C.F., Connaly, T.C. & Vest, H.A. 1985. Middle Cretaceous carbonate of Mishrif Formation, Fateh Field, offshore Dubai, U.A.E. In: Roehl, P.O. & Choquette, P.W. (eds) Carbonate petroleum reservoirs. Springer-Verlag, New York, 426-442.
- Wilson, J. L., 1975. Carbonate Facies in Geologic History, Springer-Verlag, New York, 439p.
- Flügel, E., 2010. Microfacies of carbonate rocks, Springer – Verlag, New York, 967p.