

## بررسی دلایل گسترش و تأثیر شکستگی‌های غیرتکتونیکی در مخازن کربناته، سازندهای کنگان و دالان، بخش مرکزی خلیج فارس

وحید توکلی، استادیار، دانشکده زمین‌شناسی دانشگاه تهران، ایران\*

حسین رحیم‌پوربناب، استاد، دانشکده زمین‌شناسی دانشگاه تهران، ایران

محسن الیاسی، دانشیار، دانشکده زمین‌شناسی دانشگاه تهران، ایران

مهرنوش رفیعی، دانشجوی دکتری، دانشکده زمین‌شناسی دانشگاه تهران، ایران

### چکیده

در این مقاله انواع مختلف شکستگی‌های غیرتکتونیکی در سازندهای کربناته - تبخیری کنگان و دالان در بخش مرکزی خلیج فارس ارزیابی شده است. ترک‌های گلی با اندازه کوچک و فراوانی اندک در محیط‌های کم‌عمق ساحلی (جزر و مدی و بالای جزر و مدی) تشکیل شده‌اند که به تناوب از آب خارج می‌شوند. حضور شکستگی‌های گیرشی و خشک‌شدگی نشان‌دهنده تغییر در شوری یا از دست رفتن آب است. این شکستگی‌ها نسبت به ترک‌های گلی فراوان‌تر هستند و در محیط‌های بالای جزر و مدی تشکیل شده‌اند. در این سازندها به دلیل تبدیل کانی ژئیس به انیدریت، مقدار زیادی آب آزاد شده است. در صورت تراوایی کم سنگ، قابلیت گذردهی این آب وجود ندارد و در نتیجه، ترک‌های هیدرولیکی حاصل از تغییر فاز کانیایی ایجاد شده است. این نوع از شکستگی‌ها به دلیل دیاژنز تدفینی و در رخساره‌های نهشته‌شده در محیط‌های تبخیری جزر و مدی ایجاد شده است. شکستگی‌های مرتبط با استیلولیت‌ها به صورت قائم و عمود بر استیلولیت‌ها و سطح لایه‌بندیتشکیل شده‌اند. این شکستگی‌ها نیز به محیط دیاژنز تدفینی نسبت داده شده و با توجه به ماهیت پرشدگی خود، به صورت سدی در مقابل جریان عمل می‌کنند. شکستگی‌های حاصل از بارگذاری به صورت قائم در این سازندها گسترش یافته‌اند؛ اما در بیشتر موارد با سیمان انیدریتی پر شده‌اند. این نوع از شکستگی‌ها در صورت بازبودن، تراوایی مخزن را افزایش می‌دهند. به جز دسته آخر، همه شکستگی‌های مطالعه‌شده به شکل سدهای جریان محلی عمل می‌کنند.

**واژه‌های کلیدی:** شکستگی غیرتکتونیکی، ترک گلی، خشک‌شدگی، شکستگی هیدرولیکی، استیلولیت

## مقدمه

شکستگی‌ها در بیشتر مخازن هیدروکربنی وجود دارند؛ اما به دلیل پیچیدگی‌هایی که در مخازن ایجاد می‌کنند، بیشتر اوقات از مطالعه دقیق آنان صرف‌نظر می‌شود (Nelson 2001). شکستگی‌ها در بسیاری از موارد در سنگ‌ها تخلخل ثانویه ایجاد می‌کنند و تراوایی را افزایش می‌دهند. همچنین، آنها بخش‌های مختلف مخزن را به یکدیگر متصل و از جدایش مخزنی<sup>۱</sup> جلوگیری می‌کنند. ممکن است حضور شکستگی‌های پر شده با مواد ناتراوا خود به جدایش‌های مخزنی منجر شود و تراوایی مخزن را کاهش دهد (Knott 1993). در زمان حفاری شکستگی‌ها روی هرزروی گل و پایداری دیواره چاه و در نتیجه، برای حفاری به‌طور اساسی نقش دارند. ناآگاهی از حضور شکستگی‌ها در زمان حفاری به این مجاری انتقال سیال شده آسیب می‌زند؛ بنابراین، پتانسیل تولید آنان را نابود می‌کند. نبود اطلاعات کافی و دقیق از حضور و نحوه توزیع شکستگی‌ها در مخزن اشتباهات جبران‌ناپذیری در مدیریت مخزن ایجاد می‌کند و حضور آنها به کاهش ناگهانی فشار اولیه مخزن منجر می‌شود. شکستگی‌ها در بازیافت ثانویه مخازن نیز به‌طور اساسی نقش دارند. شکست هیدرولیکی مصنوعی در مخزن تابعی از حضور شکستگی‌های اولیه در آن است و تزریق سیالات در مخازن شکسته، ممکن است به تولید سیالات تزریق شده منجر شود (Zoback 2010). به این ترتیب، لازم است شکستگی‌ها در مخزن هیدروکربنی در مرحله اکتشاف به‌صورت دقیق بررسی شوند تا در مراحل تولید و توسعه مخزن، از اطلاعات به‌دست‌آمده برای مدیریت صحیح مخزن استفاده شود.

بیشتر شکستگی‌ها در مخازن به دلیل فعالیت‌های تکتونیکی پدید می‌آیند؛ اما برخی شکستگی‌ها نیز ارتباطی با تکتونیک منطقه ندارند و از شاخص‌های دیگری تبعیت می‌کنند. نلسون (Nelson 2001) شکستگی‌های مرتبط با رخدادهای طبیعی را از دیدگاه زمین‌شناسی به چهارگروه

تکتونیکی<sup>۲</sup>، ناحیه‌ای<sup>۳</sup>، انقباضی<sup>۴</sup> و مرتبط با سطح<sup>۵</sup> تقسیم‌بندی کرده است. شکستگی‌های انقباضی شامل خشکیدگی<sup>۶</sup>، گیرشی<sup>۷</sup>، گرادیان حرارتی<sup>۸</sup> و تغییرات فازکانیایی<sup>۹</sup> هستند. شکستگی‌های تکتونیکی و ناحیه‌ای به دلیل نیروهای تکتونیکی ایجاد شده و تفاوت آنها در مقیاس و اندازه شکستگی‌ها است. شکستگی‌های ناحیه‌ای در مقایسه با شکستگی‌های تکتونیکی مقیاسی بسیار بزرگی دارند و هندسه بیشتر آنها ساده است. شکستگی‌های مرتبط با سطح به دنبال فرآیندهای سطحی مانند باربرداری یا هوازدهی ایجاد می‌شوند (Nelson 2001).

به نظر می‌رسد واژه انقباضی برای همه شکستگی‌هایی که در این دسته قرار می‌گیرند، چندان مناسب نباشد. برای مثال ایجاد فشار هیدرولیکی همراه با تغییر فاز کانی‌ها به کشش در سنگ منجر می‌شود (Testa & Lugli 2000) اما به هر حال، تشکیل این دسته از شکستگی‌ها با تکتونیک منطقه ارتباطی ندارد و در نتیجه، مطالعه آنان در یک مخزن، نسبت به شکستگی‌های تکتونیکی بیشتر پیچیدگی دارد. این شکستگی‌ها کوچک مقیاس هستند و بیشتر به وسیله سیمان پر شده‌اند؛ اما در مرحله‌ای از عمر مخزن به‌صورت فعال عمل می‌کنند و به افزایش تراوایی می‌انجامند. همچنین، حضور این شکستگی‌ها در فرایند شکستگی هیدرولیکی مصنوعی در چاه به‌صورت اساسی نقش دارد؛ زیرا تشکیل و توزیع شکستگی‌های مصنوعی ایجاد شده از شکستگی‌های طبیعی موجود بسیار تأثیر می‌پذیرد. هدف این مطالعه شناسایی و معرفی انواع شکستگی‌های غیرمرتبط با تکتونیک در مخازن کنگان و دالان، در یکی از میادین بخش مرکزی خلیج فارس و بررسی نقش آنان در مخازن کربناته است. شکستگی‌ها بیشتر

<sup>2</sup> tectonic<sup>3</sup> regional<sup>4</sup> contractional<sup>5</sup> surface-related<sup>6</sup> desiccation<sup>7</sup> syneresis<sup>8</sup> thermal gradient<sup>9</sup> mineral phase change<sup>1</sup> compartmentalization

۲۰۰۰ متری رسوبات تریاس انجامیده و همچنین، رسوبات نهشته‌شده تریاس در ابوظبی ۶۵۰ متر (Loutfi and Sattar 1987) و در ایران (سازندهای کنگان و دشتک) حدود ۱۰۰۰ متر بوده است (Szabo and Kheradpir 1978). علت این امر، وجود رشته‌ای از عوارض ساختمانی مرتفع (احتمالاً بقایای شانه‌های کافت یا سیستم‌های کافتی) موجود در طول لبه شمال شرقی حاشیه جدید بوده است (Szabo and Kheradpir 1978).

کربنات‌های دالان پایینی بر روی سازند آواری فراقون تشکیل شده‌اند و سپس بخش تبخیری نار رسوب کرده است. عضو دالان بالایی پس از نهشت انیدریت‌های نار آغاز می‌شود و سپس سازند کنگان با یک مرز ناپیوستگی (Tavakoli 2015) بر روی سازند دالان قرار می‌گیرد. مرز کنگان - دالان در خلیج فارس بیشتر با استفاده از لایه‌ای ترومبولیتی مشخص می‌شود که در این مطالعه نیز برای تشخیص مرز استفاده شده است. پوش سنگ سازند کنگان، شیل‌های سازند دشتک است که به‌طور تدریجی روی کربنات‌های این سازند رسوب کرده است. در مطالعات قبلی این میدان سازندهای دالان و کنگان به بخش‌های مخزنی K1، K2 (سازند کنگان) و K3 و K4 (دالان بالایی) و بخش K5 (دالان پایینی) تقسیم شده است. لیتولوژی غالب این سازندها در میدان مدنظر کربناته - آهکی است. بخش K1 به‌طور عمده از دولومیت تشکیل شده است و میان‌لایه‌های آهک و انیدریت در آن دیده می‌شود. ضخامت میان‌لایه‌های آهکی در حد چند متر و لایه‌های انیدریتی در حد چند ده سانتی‌متری است. ضخامت متوسط این واحد در میدان ۱۲۰ متر است. واحد K2 از دو بخش بالایی دولومیتی و بخش پایینی آهکی تشکیل شده است و متوسط ضخامت آن در میدان ۴۲ متر است. مرز پرمین - تریاس بین واحدهای مخزنی K3 و K4 قرار دارد (Tavakoli and Rahimpour-Bonab 2012). واحد K3 در بالا دولومیتی بوده و در پایین آهکی است. ضخامت متوسط این واحد ۱۱۰ متر است. واحد K4 بهترین واحد مخزنی میدان مدنظر بوده و از بالا با دولایه انیدریتی آغاز می‌شود. سپس در حدود ۶۰ متر آهک و سپس در پایین‌ترین

بر روی تراوایی تأثیرگذار هستند و پلاگ‌ها از محل‌های غیرشکسته تهیه می‌شوند؛ زیرا تهیه پلاگ از محل‌های شکسته امکان‌پذیر نیست. باتوجه‌به این مطلب، بررسی داده‌های حاصل از آنالیز مغزه در این خصوص راهگشا نخواهد بود و در نتیجه، در این مقاله نیز نقش این شکستگی‌ها به‌طور کیفی بر کیفیت مخزنی ارزیابی خواهد شد.

### زمین‌شناسی منطقه

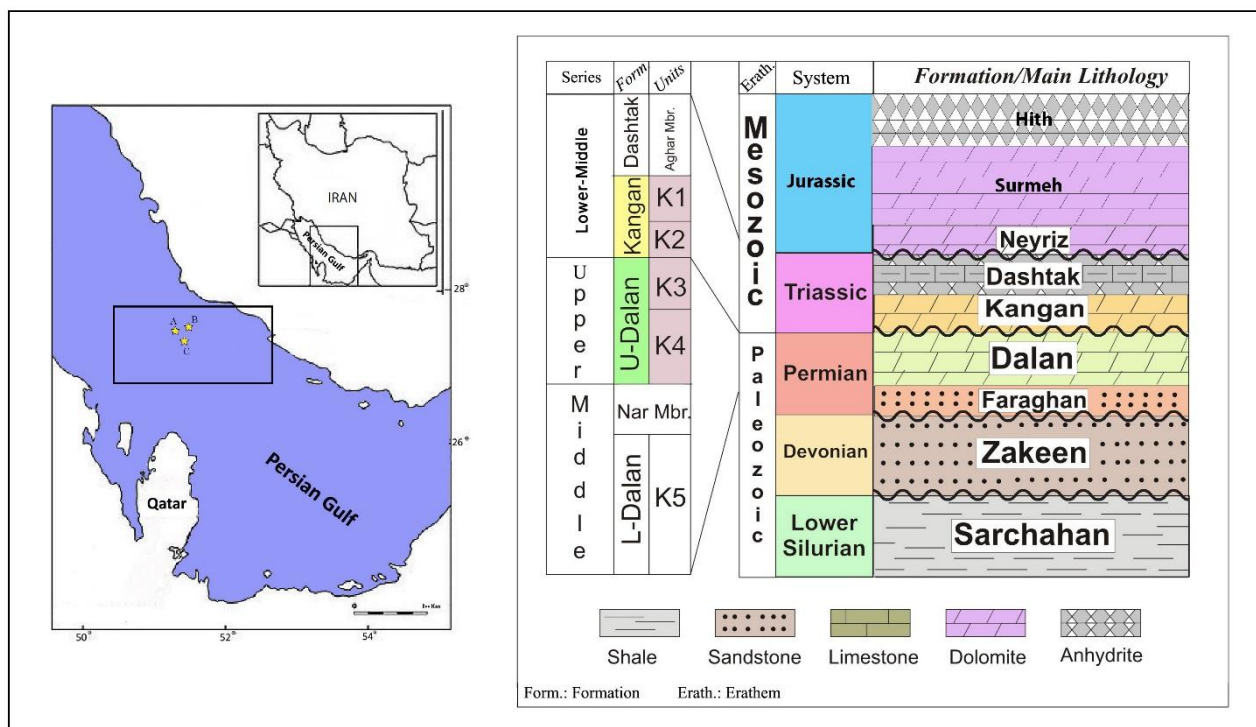
سازندهای دالان و کنگان به سنپرمین - تریاساز مهم‌ترین سنگ‌های مخزن کربنات هدر میدین خلیج فارس هستند که تاکنون مطالعات فراوانی در خصوص دیاژنز، کیفیت مخزنی، رخساره‌ها و محیط رسوبی آنها انجام شده است (Tavakoli et al. 2011; Rahimpour-Bonab et al. 2010; Esrafil-Dizaji and Rahimpour-Bonab 2009; Peyravi et al. 2010; Moradpour et al. 2008; Szabo and Kheradpir, 1978; Rahimpour-Bonab 2007).

سازندهای کنگان و دالان در بخش مرکزی خلیج فارس در پرمین پایانی - تریاس زیرین نهشته شده‌اند. از پرمین میانی، افت حرارتی سریع حاشیه فعال جدید شمال شرق ورق عربی و ادامه اشتقاق قاره‌ای رو به شمال (از ۲۵ درجه جنوبی به ۵ درجه شمالی) موجب پیشروی<sup>۱</sup> سازند خوف (معادل سازندهای کنگان و دالان) در ابتدای پرمین پسین شده است (Alsharhan and Naim, 1997). درابتدای تریاس میانی که نئوتیس دارای گسترش اقیانوسی پایدار بوده، میزان فرونشست ورق عربی کم شده است. ورقه‌های قاره‌ای جداشده شامل سندج، سیرجان و ایران مرکزی به‌سرعت درطول نئوتیس جابه‌جا شده و با حاشیه جنوبی اوراسیا (ورق توران) برخورد کرده‌اند (حدود ۲۲۰ میلیون سال قبل Szabo & Kheradpir 1978; Armstrong et al. 2000). توسعه حاشیه غیرفعال جدید نئوتیس به‌دلیل فرونشست بسیار سریع به پیشروی دریایی وسیع و رسوب‌گذاری سازندهای مدنظر منجر شده است. در قسمت‌های شمالی ورق، کافت‌زایی ممتد در تریاس به فرونشست چشمگیر و رسوب‌گذاری ۳۰۰۰-

<sup>۱</sup> Transgression

تشکیل شده است (Rahimpour-Bonab et al. 2010). منطقه مدنظر و ستون چینه‌شناسی سازندهای کنگان و دالان و سازندهای هم‌جوار در (شکل ۱) نشان داده شده است.

بخش دولومیتی - انیدریتی است. ضخامت متوسط این واحد ۱۳۰ متر است. مطالعات پیشین نشان داده که این مجموعه کربناته - تبخیری در یک رمپ کربناته با شیب بسیار ملایم



شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعه شده (چپ) و ستون چینه‌شناسی چاه‌های مطالعه شده (راست). محل چاه‌ها روی شکل مشخص است. ستون چینه‌شناسی برای هر سه چاه یکسان است.

دستی و نیز استفاده از میزان ماتریکس، در تعیین بافت سنگ‌های کربناته بسیار کاربرد دارد.

### نتایج

شکستگی‌های غیرتکتونیکی که به دلیل نیروهای غیر از تکتونیک در سنگ‌های رسوبی ایجاد می‌شوند، در سازندهای مدنظر شامل این موارد هستند.

### ترک‌های گلی

این شکستگی‌ها به‌طور عمده در رسوبات غنی از رس و گل پشتیبان دیده می‌شوند و از لحاظ اقتصادی در مخازن کربناته کمترین اهمیت را دارند؛ زیرا محدود به سطوح رخنمون یا

### مواد و روش‌ها

در این مطالعه مغزه‌های مربوط به سه چاه (A, B, C) در مجموع ۱۱۱۰ متر بررسی شده‌اند. مغزه‌های کامل برای ثبت شکستگی‌های غیرتکتونیکی بررسی شده و شکستگی‌های موجود ثبت شده‌اند. برای تهیه مقاطع نازک میکروسکوپی از مغزه‌ها در فاصله‌های ۳۰ سانتی‌متری نمونه پلاگ تهیه شده و برای این کار از برش‌های عرضی دو طرف پلاگ استفاده شده است. برای تشخیص آهک از دولومیت، یک‌سوم از هر مقطع به‌وسیله محلول آلزارین رنگ‌آمیزی (Dickson 1965) و مقاطع با میکروسکوپ پلاریزان ارزیابی شده است. تعیین بافت سنگ با استفاده از روش دانهام (Dunham 1962) انجام شده است. این روش به‌دلیل سادگی قابل استفاده‌بودن در نمونه

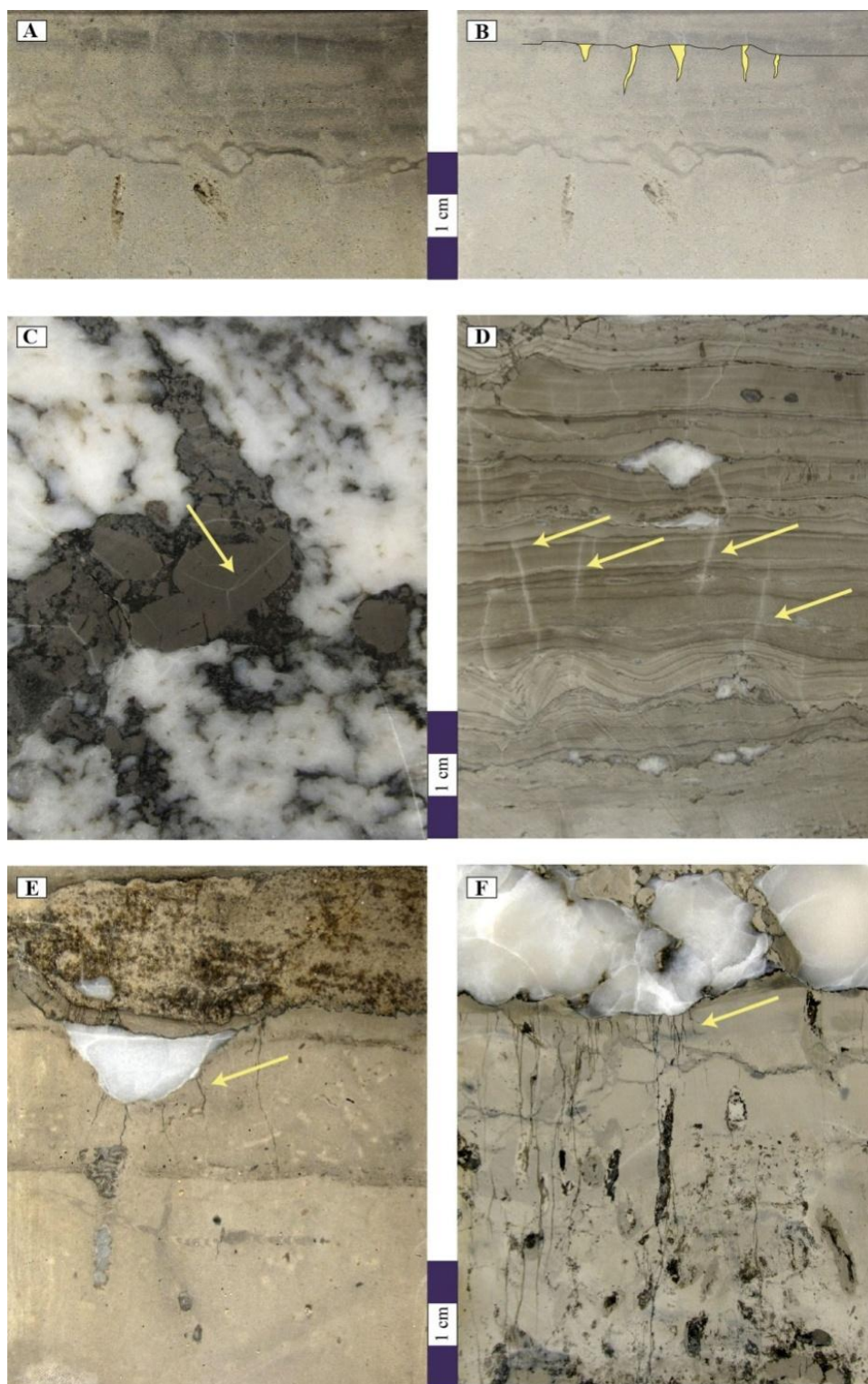
سطوح ناپیوستگی هستند و همچنین، توسط رسوبات بعدی یا سیمان پر شده‌اند (Nelson 2001). این نوع از شکستگی‌ها به‌طور عمده در افق‌های K1 تا K3 و منطبق با رخساره‌های گل پشتیبان دیده می‌شوند. در سازندهای مدنظر همانند سایر مطالعات انجام‌شده بر روی آنان V شکل بوده و به طرف قاعده لایه باریک می‌شوند (شکل ۲). اندازه آنان بیشتر در حد یک تا دو سانتی‌متر بوده است؛ اما گاه تا چندین برابر این مقدار نیز رشد کرده‌اند. باتوجه‌به اینکه سازندهای کنگان و دالان در بخش مرکزی خلیج فارس هیچ‌گاه به شکل چشمگیری ظهور نکرده‌اند (Tavakoli 2015) حضور این ترک‌ها به برجستگی‌های محلی و حد بالای جزر و مدی محدود می‌شود. ترک‌های مشاهده‌شده در این سازندها بیشتر مستقیم بوده‌اند؛ اما در برخی موارد به خصوص با افزایش طول، خمیدگی‌هایی در آنان دیده می‌شود. بازشدگی این ترک‌ها در حدود چند میلی‌متر (بین ۱ تا ۵ میلی‌متر) در قسمت بالا بوده است که به طرف پایین به صفر می‌رسد. رسوبات طبقات بالایی در همه موارد ترک‌های ایجادشده را پر کرده است.

### شکستگی‌های گیرشی و خشک‌شدگی<sup>۱</sup>

شکستگی‌های گیرشی گونه دیگری از شکستگی‌های انقباضی هستند که در رسوبات مختلفی از جمله سنگ آهک، دولومیت، شیل، سیلتست و نوماسه سنگ دیده می‌شوند و علل ایجاد این شکستگی‌ها به عوامل مختلفی همچون ترکیب رس‌ها، سرعت رسوب‌گذاری، میزان فشردگی و شیمی آب بر می‌گردد (Glaessner 1969). در واحدهای مدنظر این شکستگی‌ها در تمامی افق‌ها و عمدتاً منطبق با رخساره‌های گل پشتیبان لاگون و در بخش‌هایی جزر و مدی دیده می‌شوند (شکل ۲). یکی از سازوکارهای تشکیل این شکستگی‌ها اختلاف شوری بین رسوبات و آب و تغییرات شوری در محیط است (Donovan and Foster 1972; Burst 1965; Foster et al. 1955).

عوامل تشکیل این شکستگی‌ها در وضعیت زیر آب دریا یا زیر سطح زمین، از دست رفتن آب رسوبات به دلیل فشردگی است (Nelson 2001; Rich 1951). در مراحل بعدی این شکستگی‌ها به‌وسیله سیمان انیدریت پر شده‌اند. این نوع شکستگی‌ها در سازندهای مدنظر نسبت به ترک‌های گلی بیشتر گسترش دارند. باتوجه‌به اینکه این شکستگی‌ها به‌وسیله این سیمان پر شده‌اند، کیفیت مخزن را افزایش نمی‌دهند. ترک‌های حاصل از دست رفتن آب (خشکیدگی) به این نوع از شکستگی‌ها بسیار شباهت دارند و تشخیص آنان از یکدیگر در سازندهای مدنظر امکان‌پذیر نیست؛ بنابراین، در اینجا با یک نام سنجیده می‌شوند. این ترک‌ها به دلیل از دست دادن آب در رسوبات ایجاد می‌شوند و تشکیل آنان در رخساره‌های میکروبی گزارش شده است (Bouougri and Porada 2002; Noffke et al. 2001b; Noffke et al. 2001a; Gerdes et al. 200b; Gerdes et al. 2000a; Park 1977). همچنین، این ترک‌ها در سازندهای مدنظر نیز مشاهده می‌شوند (شکل ۲). بیشترین فراوانی این دسته از شکستگی‌ها در بخش بالایی سازند کنگان (واحد K1) است و در ضمن در مرز سازندهای کنگان و دالان و نیز در بخش میانی دالان بالایی (مرز واحدهای K3 و K4) نیز دیده می‌شوند. تفاوت این نوع از شکستگی‌ها با ترک‌های گلی در این است که این نوع از شکستگی‌ها در تدفین کم‌عمق، یعنی در مراحل اولیه دیاژنز ایجاد می‌شوند. طول هردو دسته از این شکستگی‌ها حدود چند سانتی‌متر (۱ تا ۵ سانتی‌متر) و ضخامت آنها در حد ۱ تا چند میلی‌متر است. برخلاف ترک‌های گلی که با شکل گوه‌ای مشخص می‌شوند، این شکستگی‌ها شکل منظمی ندارند و همچنین، ترک‌های گلی در سطح لایه تشکیل می‌شوند؛ درحالی‌که این نوع از شکستگی‌ها بیشتر در بدنه لایه وجود دارند. باتوجه‌به سازوکار تشکیل، ترک‌های گلی بیشتر موازی هستند؛ درحالی‌که این نوع ترک‌ها جهت‌یافتگی خاصی ندارند و به همین دلیل، این نوع از شکستگی‌ها در مطالعات مغزه از ترک‌های گلی جدا شده‌اند.

<sup>1</sup> desiccation



شکل ۲- ترک‌های گلی مشاهده‌شده در سازندهای کنگان و دالان در بخش مرکزی خلیج فارس (A, B). ترک حاصل خشک‌شدگی رسوبات. حضور ترک در داخل قطعه ایتراکلاست و عدم امتداد آن در بیرون دانه نشان می‌دهد این ترک از قبل در آن وجود داشته است. باتوجه به سخت‌شدگی ابتدایی رسوبات، این ترک حاصل فعالیت‌های تکتونیکی نیست (C). ترک‌های حاصل خشک‌شدگی موجود در ساخت‌های استروماتولیتی (D). ترک‌های هیدرولیکی حاصل تغییر فاز کانایی در رسوبات گل پشتیبان (E, F).

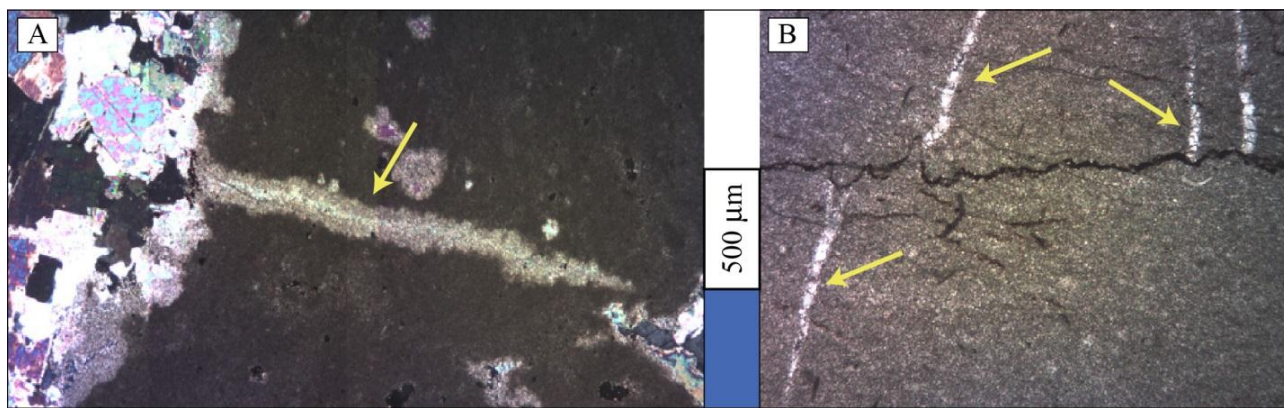


## تغییرات فاز کانایی

این نوع از شکستگی‌ها هم‌زمان با تغییر در حجم سنگ تشکیل می‌شوند (Nelson 2001). کانای ژئوپس با تبدیل به کانای انیدریت مقدار هنگفتی آب آزاد می‌کند که این موضوع در صورت نبودن زهکشی مناسب در سنگ، فشار منفذی را افزایش می‌دهد. افزایش فشار منفذی به ایجاد شکستگی‌های هیدرولیکی در سنگ منجر می‌شود. این شکستگی‌ها به‌صورت شعاعی از ندول‌های انیدریتی خارج می‌شود که این مسئله، هم در نمونه‌های مغزه و هم در مقاطع نازک دیده می‌شوند (شکل‌های ۲ و ۳). این شکستگی‌ها که به‌طور عمده در واحد K3 و انتهای واحد K4 مشاهده می‌شوند، در افزایش یا کاهش تراوایی مخزن چندان تأثیر ندارند و در تمامی موارد با سیمان انیدریت پر و در فاصله کمی از انیدریت‌ها محو می‌شوند. این شکستگی‌ها بیشتر در رخساره‌های گل پستیان دیده می‌شوند که با نهشته‌های انیدریتی همراه هستند.

## شکستگی‌های مرتبط با استیلولیت‌ها

این شکستگی‌ها از جمله شکستگی‌های کشیدگی هستند که عمود بر استیلولیت‌ها ایجاد می‌شوند. استیلولیت‌های موجود در سازندهای دالان و کنگان، در تمامی افق‌ها موازی لایه‌بندی و منطبق با رخساره‌های گل‌پستیان هستند که به‌دلیل فشار قائم روباره ایجاد شده‌اند. طول این شکستگی‌ها کوتاه است و معمولاً در فاصله کوتاهی از استیلولیت‌ها محو می‌شوند. این شکستگی‌ها عمدتاً به‌وسیله مواد تشکیل‌دهنده استیلولیت شامل مواد آلی و رس‌ها یا سیمان انیدریتی پر شده‌اند (شکل‌های ۳ و ۴). همچنین، این نوع شکستگی در رخساره‌های گل پستیان فراوان‌تر است (شکل ۳). تأثیر ساخت‌های حاصل از فشردگی شیمیایی بر کیفیت مخزنی سازندهای کنگان و دالان در بخش مرکزی خلیج فارس پیش از این بررسی شده است (Mehrabi et al. 2016).



شکل ۳- ترک‌های هیدرولیکی ایجادشده در اثر تغییر فاز کانایی در رخساره مادستونی محیط جزر و مدی (A) و اثر کشش عمود بر استیلولیت‌ها در رخساره مادستونی محیط لاگونی (B) در مقطع نازک.

شکستگی‌های حاصل از بارگذاری<sup>۱</sup>

تنش به‌صورت قائم شده است و در نتیجه، شکستگی‌های موازی این محور در سازندهای بررسی‌شده تشکیل شده است (شکل ۴). این نوع شکستگی‌ها در بعضی از قسمت‌ها به شکل باز دیده می‌شوند و به افزایش کیفیت مخزن منجر می‌شوند؛ اما در بیشتر قسمت‌ها به‌طور کامل یا ناقص،

این شکستگی‌ها در مغزه‌ها به‌طور قائم دیده می‌شوند و از دیگر شکستگی‌های کششی موجود در این واحدهای مخزنی هستند. فشار بارگذاری سبب افزایش بزرگای محور اصلی

<sup>1</sup> Loading fractures

به‌وسیله سیمان پر شده‌اند. سیمان پرکننده بیشتر انیدریت و در مواردی کلسیتی است. ممکن است این شکستگی‌ها به دلیل نیروهای تکتونیکی نیز ایجاد شده باشند؛ اما فراوانی ساخت‌های حاصل از انحلال فشاری در سازندهای مدنظر، نشان می‌دهد تنش قائم بزرگی همواره در این سازندها حضور داشته و در نتیجه، شکستگی‌های کششی قائم در آنان به وجود آمده است.

### شکستگی‌های مرتبط با سطح<sup>۱</sup>

این شکستگی‌ها به‌طور ثانویه و در طی باربرداری، رهایی سریع تنش و هوازدگی ایجاد می‌شوند (Nelson 2001). رسم منحنی تاریخچه تدفین این سازندها نشان می‌دهد دو بالاآمدگی در سازندهای کنگان و دالان رخ داده است (Aali et al. 2006). این منحنی تاریخچه تدفین، براساس اطلاعات دمایی و زمانی ۱ چاه نزدیک به مرز قطر و با استفاده از نرم‌افزار وین‌بری<sup>۲</sup> (نسخه ۲،۷۲) رسم شده است. باتوجه‌به نبود داده کمتر از پرمین در منطقه مدنظر، فرض شده است که رسوبات پیش از پرمین، روی شیل‌های غنی از ماده آلی سیلورین، همانند بخش مرکزی عربسان نهشته شده‌اند. مطالعات سازند خوف (Khuff) در کشور امارات (Fontana et al. 2010) نیز این مطلب را تأیید می‌کند. این پژوهشگران، براساس مطالعات ادخال‌های سیال و ایزوتوپ پایدار اکسیژن نتیجه می‌گیرند که برخی سیمان‌های کلسیتی موجود در این سازند، از آب‌های جوی و طی بالاآمدگی رسوبات تشکیل شده است. زمان‌زاده و همکاران (Zamanzadeh et al. 2009) نیز باتوجه‌به رسم منحنی تاریخچه تدفین، با استفاده از بررسی فرآیندهای دیاژنزی بر این عقیده هستند که ایجاد بخشی از تخلخل سازند فراقان (پرمین آغازین) به بالاآمدگی این سازند مربوط می‌شود. در مرز کرتاسه - پالئوژن (۶۶ میلیون سال پیش) و نیز در اواسط

الیگوسن (۲۶ میلیون سال قبل) این سازندها در حدود ۱۵۰-۱۰۰ متر بالا آمده‌اند (Aali et al. 2006) که این امر، ممکن است به تشکیل شکستگی‌های افقی در این سازندها منجر شده باشد. در سازندهای مدنظر، این نوع از شکستگی‌ها همراه با شکستگی‌های قائم، بسیار دیده می‌شوند (شکل ۴C) و اگر تنش‌های تکتونیکی به ایجاد این شکستگی‌های افقی منجر شده باشند، راستایتنش حداکثر باید نسبت به استیلولیت‌ها ۹۰ درجه چرخیده باشد و بنابراین، به نظر می‌رسد شکستگی‌های افقی نیز به دلیل بالاآمدگی این سازندها ایجاد شده باشند.

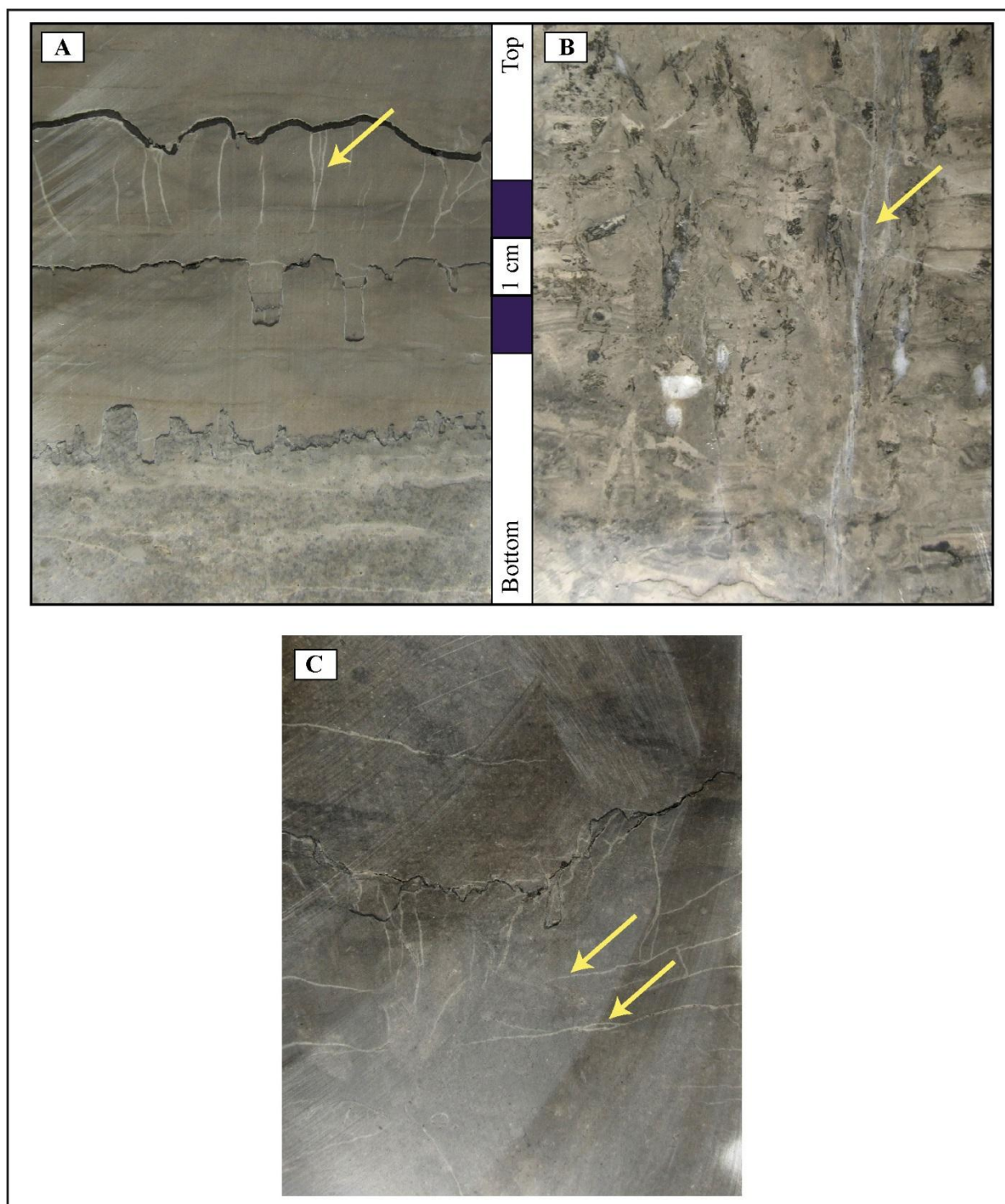
در سازندهای مدنظر، به‌طور ثانویه و در طی عملیات مغزه‌گیری و برداشته‌شدن فشار روباره، شکستگی‌های مصنوعی افقی ایجاد شده‌اند که در افزایش تولید هیدروکربن نقشی ندارند. این نوع از شکستگی‌های مصنوعی معمولاً در مجاورت استیلولیت‌ها و به موازات آنها در تمامی افق‌ها ایجاد می‌شوند (Nelson 1981). این نوع از شکستگی‌ها در تمامی رخساره‌ها و افق‌های مدنظر و به‌طور عمده در مجاورت زون‌های استیلولیتی دیده می‌شوند.

شکل (۵) توزیع انواع شکستگی‌های ارزیابی‌شده را در عمق نشان می‌دهد. تعداد شکستگی‌ها در هر عمق، میزان بازشدگی دهانه شکستگی، شیب و اثر قابل دیدن آن نیز در کنار هر نقطه آمده است. درخصوص شکستگی‌های افقی در بیشتر اوقات، میزان اثر قابل دید، ضخامت مغزه است.

<sup>۱</sup> Surface related fractures

<sup>۲</sup> Win Bury





شکل ۴- شکستگی‌های اثرکشش عمود بر استیلولیت‌ها در نمونه دستی (A)، شکستگی‌های حاصل بارگذاری به صورت قائم (B) و شکستگی‌های مرتبط با سطح (C).

Depth (m)	Period	Form.	Unit	Lithology	Fractures (Number of visible Fractures, Maximum Opening (mm), Dip (deg), Visible Trace (mm))					
100	Triassic	Kangan	K1		2,2,90,10 3,2,90,12 2,2,90,18	1,1,45,12	6,1,45-90,5	6,1,90,5	2,1,90,15 1,3,80,16	4,1,0,100 6,1,0,100
						1,1,30,8	6,1,45-90,5		1,2,90,15 1,4,90,10	3,1,0,100 3,1,0,100
							3,3,45-90,5	4,2,90,5	1,3,90,36	4,1,0,30
								4,2,90,5	1,3,90,72	4,1,0,100
					4,3,90,10	1,2,30,10	4,3,45-90,5	4,2,90,5		
					1,5,90,10	1,1,30,25		6,1,90,5		4,1,0,40
			K2			1,1,0,10	1,3,45,14	2,2,90,8	1,5,90,72	4,1,0,100
					2,2,90,10		5,3,45-90,8	3,3,90,8	1,3,90,50 3,4,90,30	2,1,0,80
					3,2,90,35 3,2,90,15	1,1,15,10 1,1,20,30 2,1,20,30	Mineral Phase Change	4,3,90,6	1,3,90,20	1,3,10,110
200			K3			1,1,20,10		3,3,90,8	1,4,90,20	
								4,1,90,10	Loading	Surface Related
							5,3,45-90,10 5,3,45-90,10	3,1,90,5	1,3,90,30	
								10,1,90,5	1,4,90,40	3,2,0,40
								3,1,90,8	1,5,90,20	
					2,2,90,12 2,4,90,10	1,1,45,10 1,1,45,45	5,3,45-90,5	Stylolite Related		
						2,1,45,10		4,2,90,7	1,5,90,12	3,3,0,100
								4,3,90,5		2,1,0,30
						1,1,45,25		4,1,90,3	1,3,90,10	6,2,0,70
300	Permian	Upper Dalan	K4				5,3,45-90,5			2,1,0,100 1,1,0,100 3,1,0,100
					1,2,90,10	1,1,45,10		4,2,90,5	1,4,90,20	
							5,1,45-90,5	4,1,90,5		
								4,3,90,5 4,1,90,5	1,2,90,20	3,1,0,100
						1,1,45,10 1,1,45,15	5,2,45-90,5	4,2,90,5 4,1,90,5	1,4,90,20	

شکل ۵- توزیع انواع شکستگی‌های بررسی‌شده در سازندهای کنگان و دالان در چاه A. اعداد به ترتیب از چپ به راست نشان‌دهنده تعداد شکستگی‌های قابل رؤیت، حداکثر بازشدگی (میلی‌متر)، شیب شکستگی (درجه) و طول قابل رؤیت شکستگی (میلی‌متر) در مغزه است. توزیع شکستگی‌ها در سه چاه مشابه است. مرز کنگان و دالان با استفاده از لایه ترومبولیتی راهنما مشخص شده است.

## بحث

روی این نوع از بازشدگی‌ها انجام نشده است (Zhao et al. 2014; Armstrong et al. 2000; Deng and Qing 1993). در محیط‌های کربناته، این ترک‌ها بیشتر در محیط‌های جزر و مدی قابل مشاهده هستند و در شیب‌های مختلف بستر تشکیل می‌شوند (Donovan and Archer 1975). برای تشکیل ترک‌های گلی رسوب باید از آب خارج شود. این بازشدگی‌ها

ترک‌های گلی بیشتر در رسوبات آواری قابل مشاهده هستند؛ اما در رسوبات کربناته نیز دیده می‌شوند. این ترک‌ها به دلیل از دست دادن آب رسوبات و در نتیجه، کاهش حجم آنان ایجاد می‌شوند و در نتیجه، نخستین نوع بازشدگی در رسوبات هستند. برخلاف شکستگی‌های تکتونیکی مطالعات چندانی بر

Koehrer et al. 2010; Koehrer et al. 2012; Enayati-Bidgoli et al. 2014; Abdolmaleki et al. 2016; Abdolmaleki and Tavakoli 2016) ترک‌های گیرشی در رسوبات تشکیل شده است و چنانچه در همین مناطق ساحلی پایین‌رفتن سطح آب دریا ادامه پیدا می‌کرد، ترک‌های خشکیدگی در آنان ایجاد می‌شد. هردو نوع این ترک‌ها هم‌زمان یا کمی پس از رسوب‌گذاری در این رسوبات ایجاد شده است و اگر این ترک‌ها با فراوانی چشمگیری ایجاد شوند، به‌صورت محلی از جریان سیال جلوگیری می‌کنند.

به‌دلیل شوری زیاد آب و تبخیر شدید، تشکیل کانی‌های تبخیری در این سازندها امری عادی بوده است. در حال حاضر، فراوان‌ترین کانی موجود تبخیری در این سازندها انیدریت است. به‌صورت تئوری ژپیس تا دمای ۵۰-۴۵ درجه سانتی‌گراد پایدارتر از انیدریت است و در دماهای بیشتر انیدریت رسوب می‌کند (Nyvt 1997; Freyer and Voigt 2003; Farrah et al. 2004; Dutrizac 2002). با در نظر گرفتن دمای سطحی (حدود ۱۵ درجه) تبدیل ژپیس به انیدریت در عمق ۱ کیلومتری زمین رخ می‌دهد. در عمل، تبدیل ژپیس به انیدریت در وضعیت عادی قبل از عمق ۴۰۰ متری رخ نخواهد داد (Philipp 2008). بنابراین، شروع این تبدیل بین عمق‌های ۴۰۰ متری تا ۱ کیلومتری پایین سطح خواهد بود. نهشت مستقیم انیدریت از محلولی که تنها سولفات کلسیم محلول دارد، در دماهای ۴۲ تا ۵۸ درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد (Philipp 2008). بدیهی است که محیط‌های رسوبی هرگز به چنین دمایی نرسیده و در نتیجه، در زمان زمین‌شناسی انیدریت هیچ‌گاه در سطح زمین به فراوانی تشکیل نشده است. باتوجه‌به حضور فراوان انیدریت در سازندهای کنگان و دالان در میدان مدنظر و نبودن هرگونه ژپیس در مطالعات مقاطع نازک، بدون شک این تبدیل در مراحل دیاژنزی رخ داده است. در طی دیاژنز و تبدیل ژپیس به انیدریت، به ازای هر مولکول سولفات کلسیم، دو مولکول آب آزاد می‌شود و در نتیجه، مقادیر هنگفتی آب به‌دلیل تبدیل ژپیس به انیدریت در این سازندها آزاد شده است. مطالعات آزمایشگاهی نشان

بر کیفیت مخزنی سازندها چندان تأثیر ندارند؛ اما به‌خوبی نوع محیط رسوبی تشکیل‌دهنده خود را نشان می‌دهند. فراوانی بیشتر این ترک‌ها در واحدهای K1 و K3 نشان می‌دهد میزان آب در این واحدها در برخی مواقع به کمترین حد ممکن رسیده است. این نتیجه، با نتایج قبلی بررسی تغییرات میزان آب دریا در این منطقه هم‌خوانی دارد (Mehrabi et al. 2016). ترک‌های گلی در محیط دیاژنزی نیز ایجاد می‌شوند؛ اما چنانچه در این محیط‌ها تشکیل شده باشند، باریک و نامنظم هستند و به تناوب دیده می‌شوند و درباره سازندهای کنگان و دالان این نوع ترک‌ها مشاهده نشد. باتوجه‌به فراوانی اندک این نوع ترک‌ها اندازه کوچک و پرسدن در مراحل رسوب‌گذاری، در خصوصیات مخزنی سازندهای مدنظر تأثیری ندارند.

برخی از پژوهشگران ترک‌های گلی و شکستگی‌های گیرشی را در یک دسته طبقه‌بندی می‌کنند؛ اما باتوجه‌به سازوکار تشکیل این دو نوع و تفاوت کاربرد آنها در مطالعات رسوب‌شناسی ظاهراً بهتر است به‌طور مجزا ارزیابی شوند. حضور شکستگی‌ها یا ترک‌های گیرشی بیشتر نشان‌دهنده تغییر در شیمی آب است (Pratt 1998) اما برخی از پژوهشگران تشکیل این ترک‌ها را با فعالیت‌های لرزه‌ای مرتبط می‌دانند (Pratt 1998). این ترک‌ها نیز در مناطق کم‌عمق همراه با نوسان سطح آب دریا تشکیل می‌شوند (Calver and Baillie 1990). در چنین مناطقی تغییرات شوری چشمگیر است. در سازندهای مدنظر، لاگون‌های کم‌عمق و شور همواره در منطقه ساحلی وجود داشته‌اند (Tavakoli et al. 2011) و بنابراین، حضور این ترک‌ها امری طبیعی است. در زمان‌هایی که میزان آب دریا اندکی بالا آمده است، ارتباط این لاگون‌ها با دریای آزاد برقرار شده و در نتیجه، شوری آنان کاهش می‌یافته است در صورتی که در زمان‌های پایین‌بودن سطح آب دریا، تبخیر شدید، شوری آنان را به‌طور چشمگیری افزایش می‌داده است. باتوجه‌به اینکه این تغییرات در زمان‌های کوتاه رخ می‌داده (Strohmenger et al. 2002; Insalaco et al. 2006; )

می‌دهد تبدیل ژپیس به انیدریت نیرویی برابر با ۱۱ مگاپاسکال (برابر با ۱۶۰۰ psi) تولید می‌کند و براساس محاسبات، این نیرو تا ۱۵ مگاپاسکال (برابر با ۲۱۷۵ psi) افزایش می‌یابد (Philipp 2008). برای ایجاد شکست هیدرولیکی به دلیل تبدیل کانیزپیس به انیدریت، باید فشار منفذی ایجادشده بر اثر خروج آب، بر کمترین مقدار تنش غلبه کند. کمترین مقدار تنش حدود ۰٫۶ psi بر فوت و در نتیجه، این تنش همواره از فشار منفذی بیشتر است. در عمق ۳ کیلومتری این اختلاف فشار برابر با ۱۶۰۰ psi و در عمق ۳٫۹ کیلومتری برابر با ۲۱۷۵ psi می‌شود. بیشتر از این اعماق اختلاف، بیش از نیروی حاصل از تبدیل این دوکانی است و در نتیجه، این نوع از شکست حاصل نمی‌شود. از مقایسه کمترین و بیشترین عمق این نوع شکستگی چنین نتیجه‌گیری می‌شود که این شکستگی دست‌کم در عمق ۴۰۰ متری و حداکثر در ۳۹۰۰ متری رخ داده است. باتوجه‌به این مطلب، این شکستگی‌ها در ابتدای سنگ‌شدگی هم‌زمان با شکستگی‌های تکتونیکی ایجاد خواهند شد و تشکیل آنان در ۳۹۰۰ متری متوقف می‌شود. به دلیل حضور این شکستگی‌ها افزایش میزان تراوایی در مخازن به زمان مهاجرت هیدروکربن بستگی دارد و وجودداشتن جهتی خاص در این شکستگی‌ها نشان می‌دهد در سازندهای مدنظر چندان تفاوت استرس وجود نداشته است.

انحلال فشاری به دلیل بارگذاری ثقلی یا نیروهای تکتونیکی ایجاد می‌شود و استیلولیت‌ها بارزترین اثر انحلال فشاری هستند. باتوجه‌به اینکه استیلولیت‌های سازندهای مدنظر همگی با سطح تماس<sup>۱</sup> لایه‌ها موازی هستند، تشکیل آنان در نتیجه بارگذاری ثقلی رخ داده است. در این سازندها انواع مختلفی از استیلولیت‌ها دیده می‌شود (Mehrabi et al. 2016). هر جا که سنگ امکان شکستگی داشته است، شکستگی‌های قائم عمود بر سطح استیلولیت در آنان دیده

می‌شود. این شکستگی‌ها «اثر کشش»<sup>۲</sup> نامیده می‌شوند و به دلیل تنش حداقلی<sup>۳</sup> در جهت عمود بر سطح استیلولیت ایجاد می‌شوند. با در نظر گرفتن اینکه خود سطح استیلولیت، در بیشتر موارد از جریان سیال جلوگیری می‌کند، حضور این دسته از شکستگی‌ها سبب می‌شود در اطراف استیلولیت‌ها به جز سد موازی لایه‌بندی سد عمودی نیز در مقابل جریان سیال ایجاد شود. همراهی این دو سد جریان، به افت کیفیت مخزنی در چنین مناطقی می‌انجامد. واحد K3 در سازندهای مدنظر، باتوجه‌به ماهیت رخساره‌های گل پشتیبان، استیلولیت‌های فراوانی دارند که در بیشتر موارد نیز با شکستگی‌های اثر کشش همراه هستند. مطابق حضور فراوان آثار انحلال فشاری در سازندهای مدنظر، همواره استرس قائم زیادی وجود داشته و این استرس به تشکیل شکستگی‌های قائم منجر شده است. در صورتی که مقادیر تنش‌های متوسط و کوچک باهم برابر باشد، دو دسته شکستگی‌های عمود بر هم ایجاد می‌شود که تلاقی آنها موازی تنش اصلی قائم است. باتوجه‌به موازی بودن این دو دسته از شکستگی‌ها تفکیک آنها در سازندهای مدنظر امکان‌پذیر نیست.

#### نتیجه

شکستگی‌های موجود در مخازن کربناته به شکستگی‌های تکتونیکی محدود نمی‌شوند. باتوجه‌به مقیاس کوچک شکستگی‌های غیرتکتونیکی در بیشتر مطالعات از این شکستگی‌ها صرف‌نظر می‌شود و حضور آنان تأثیرات منحصر به فردی در این مخازن دارد. ترک‌های گلی با در نظر گرفتن حضور اندک خود و پرشدگی هم‌زمان با رسوب‌گذاری حتی در سازندهای کم‌عمقی مانند کنگان و دالان، چندان بر کیفیت مخازن تأثیر ندارند. این ترک‌ها نخستین بازشدگی‌هایی هستند که در رسوبات تشکیل می‌شوند. سپس با از دست رفتن بیشتر آب یا تغییر در وضعیت شوری آب، ترک‌های گیرشی یا خشک‌شدگی حاصل می‌شوند که آنان نیز بیشتر با رسوبات

<sup>2</sup> tension gash

<sup>1</sup> contact

بنابراین، باید به شکستگی‌های غیرتکتونیکی هم از دیدگاه مخزنی و هم از نگاه عملکرد آنها در ایجاد شکست‌های مصنوعی در مخازن کربناته توجه کرد.

## References

- Aali J. Rahimpour-Bonab H. and Kamali M. 2006. Geochemistry and origin of the world's largest gas field from Persian Gulf, Iran. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 50: 161–175.
- Abdolmaleki J. and Tavakoli V. 2016. Anachronistic facies in the early Triassic successions of the Persian Gulf and its palaeoenvironmental reconstruction. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 446: 213–224.
- Abdolmaleki J. Tavakoli V. and Asadi-Eskandar A. 2016. Sedimentological and diagenetic controls on reservoir properties in the Permian–Triassic successions of western Persian Gulf, southern Iran. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 141: 90–113.
- Alsharhan A. S. and Nairn A. E. A. 1997. *Sedimentary Basins and Petroleum Geology of the Middle East*. Elsevier, Amsterdam, 878 p.
- Armstrong A. C. Matthews A. M. and Portwood A. M. 2000. Crack-up: A pesticide leaching model for cracking clay soils. *Agricultural Water Management*, 44: 183–199.
- Bouougri E. and Porada H. 2002. Mat-related sedimentary structures in Neoproterozoic peritidal passive margin deposits of the West African Craton (Anti-Atlas, Morocco). *Sedimentary Geology*, 153: 85–106.
- Burst J. 1965. Subaqueously formed shrinkage cracks in clay. *Journal of Sedimentary Research*, 35: 348–353.
- Calver C. R. and Baillie P. W. 1990. Early diagenetic concretions associated with intrastratal shrinkage cracks in an upper Proterozoic dolomite, Tasmania, Australia. *Journal of Sedimentary Petrology*, 60: 293–305.
- Deng H. and Qing K. 1993. *Sedimentary geochemistry and environmental analysis*. PhD thesis, Gansu Science and Technology Press, Lanzhou. 83 p.
- Dickson J. A. D. 1965. A modified technique for carbonates in thin section. *Nature*, 205: 587.
- Donovan R. N. and Archer R. 1975. Sedimentological consequences of a fall in the level Haweswater, Cumbria. *Proceedings of the*

ثانویه پر می‌شوند. این ترک‌ها در صورتی که در مخازن فراوان باشند، در مراحل نخست رسوب‌گذاری به افزایش تراوایی منجر می‌شوند؛ اما در نهایت با پرشدگی، موانع جریان سیال کوچک مقیاس مخازن را تشکیل می‌دهند. حضور ساخت‌های حاصل از انحلال فشاری در این سازندها نشان می‌دهد همواره تنش قائم بزرگی در این سازندها وجود داشته است. تشکیل شکستگی‌های اثر کشش همراه با استیلولیت‌ها و شکستگی‌های قائم، از آثار این تنش بزرگ است. شکستگی‌های حاصل چنانچه همراه با استیلولیت‌ها و رگچه‌های انحلالی باشند، بیشتر با سیمان انیدریت یا مواد پرکننده استیلولیت یا انحلال فشاری پر شده‌اند؛ اما چنانچه به دلیل نیروی تنش اصلی قائم و بدون ارتباط به ساخت‌های انحلال فشاری شکل گرفته باشند، در برخی موارد باز بوده و به انتقال سیال می‌انجامند. شکستگی‌های حاصل از بارگذاری در سازندهای دالان و کنگان به صورت باز مشاهده شدند و در نتیجه، در حال حاضر بیشتر شکستگی‌های غیرتکتونیکی در مخزن مدنظر، به افزایش تخلخل و تراوایی منجر نمی‌شوند. باتوجه به این نکته که بیشتر این شکستگی‌ها با سیمان انیدریت ثانویه پر شده‌اند، بر خلاف افزایش تخلخل و تراوایی عمل می‌کنند و به ایجاد سدهای جریان به صورت محلی منجر می‌شوند. در خصوص ترک‌های گلی و گیرشی این تأثیر نیز بسیار کم است؛ اما در زمینه شکستگی‌های حاصل از بارگذاری باتوجه به اینکه بیشتر تشکیل این شکستگی‌ها همراه با سطوح استیلولیتی است، این تأثیر چشمگیر است. در خصوص ترک‌های حاصل از تغییر فاز کانیایی نیز با عنایت به اینکه همه این شکستگی‌ها با انیدریت پر شده‌اند، فرض می‌شود این تأثیر مشابه است. حضور سدهای ناتراوا به صورت افقی و قائم، به جلوگیری از جریان سیال در این مخازن منجر می‌شود.

چنانچه سازندهای مدنظر شکستگی هیدرولیکی مصنوعی پیدا کنند، تمامی شکستگی‌های موجود در روند و میزان گسترش شکستگی‌های مصنوعی نقش خواهند داشت؛

- E. Awramik S.M. (Eds.), *Microbial Sediments*. Springer-Verlag, Berlin, 196–208.
- Glaessner M. F. 1969. Trace fossils from the Precambrian and basal Cambrian. *Lethaia*, 2: 369-393.
- Insalaco E. Virgone A. Courme B. Gaillot J. Kamali M. Moallemi A. Lotfpour M. and Monibi S. 2006. Upper Dalan Member and Kangan Formation between the Zagros Mountains and offshore Fars, Iran: depositional system, biostratigraphy and stratigraphic architecture. *GeoArabia*, 11: 75–176.
- Knott S. 1993. Fault seal analysis in the North Sea. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 77: 778–792.
- Koehrer B. Zeller M. Aigner T. Poeppelreiter M. Milroy P. Forke H. and Qi-Kindi S. 2010. Facies and stratigraphy framework of a Khuff outcrop equivalent: Siaq and Mahil formation, Al Jabal Al-Akhdar, Sultanate of Oman. *GeoArabia*, 15: 91–156.
- Koehrer B. Aigner T. Forke H. and Poppelreiter M. 2012. Middle to upper Khuff (sequences KS1 to KS4) outcrop-equivalents in the Oman Mountains: grainstone architecture on a subregional scale. *GeoArabia*, 17: 59–104.
- Loutfi G. and Sattar A. 1987. *Geology and Hydrocarbon Potential of the Triassic Succession in Abu Dhabi, U.A.E.* Society of Petroleum Engineers, 10.2118/15698-MS.
- Mehrabi H. Mansouri M. Rahimpour-Bonab H. Tavakoli V. and Hassanzadeh M. 2016. Chemical compaction features as potential barriers in the Permian-Triassic reservoirs of South Pars Field, Southern Iran. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 145: 95-113.
- Moradpour M. Zamani Z. and Moallemi S. A. 2008. Controls on reservoir quality in the lower Triassic Kangan Formation, Southern Persian Gulf. *Journal of Petroleum Geology*, 31: 367-385.
- Nelson R. A. 1981. Significance of fracture sets associated with stylolite zones. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 65: 2417-2425.
- Nelson R. A. 2001. *Geologic analysis of naturally fractured reservoirs*, 2<sup>nd</sup> ed. Gulf Publishing Co Book Division, 352 p.
- Noffke N. Gerdes G. Klenke T. and Krumbein W.E. 2001a. Microbially induced sedimentary structures - a new category within the classification of primary sedimentary structures. *Journal of Sedimentary Research*, 71: 649– 656.
- Yorkshire Geological Society, Vol. 40, 547–562.
- Donovan R. N. and Foster R. J. 1972. Subaqueous shrinkage cracks from the Caithness Flagstone series (Middle Devonian) of northeast Scotland. *Journal of Sedimentary Research*, 42: 309-317.
- Dunham R. J. 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: Ham, W. E. (Ed.), *Classification of Carbonate Rocks*, American Association of Petroleum Geologists Memoir 1, 108–121.
- Dutrizac J.E. 2002. Calcium sulphate solubilities in simulated zinc processing solutions. *Hydrometallurgy*, 65: 109–135.
- Enayati-Bidgoli A.H. Rahimpour-Bonab H. and Mehrabi H. 2014. Flow unit characterization in the Permian-Triassic carbonate reservoir succession at south Pars gas field, Offshore Iran. *Journal of Petroleum Geology*, 37: 205–230.
- Esrafil-Dizaji B. and Rahimpour-Bonab H. 2009. Effects of depositional and diagenetic characteristics on carbonate reservoir quality: A case study from the South Pars gas field in the Persian Gulf. *Petroleum Geoscience*, 15: 325-344.
- Farrah H. E. Lawrance G. A. and Wanless E. J. 2004. Gypsum-anhydrite transformation in hot acidic manganese sulphate solution. A comparative kinetic study employing several analytical methods. *Hydrometallurgy*, 75: 91–98.
- Fontana S. Nader F.H. Morad S. Ceriani A. and Al-Aasm I. 2010. Diagenesis of the Khuff Formation (Permian–Triassic), northern United Arab Emirates. *Arabian Journal of Geosciences*, 3:351-368.
- Flügel E. 2010. *Microfacies of Carbonate Rocks: analysis, interpretation and application*. Springer, Berlin Heidelberg New York, 976 p.
- Foster W. R. Savins J. and Waite J. 1955. Lattice expansion and rheological behavior relationships in water-montmorillonite systems. *Clays and Clay Minerals*, 3: 296-316.
- Freyer, D. and Voigt W. 2003. Crystallization and phase stability of CaSO<sub>4</sub> and CaSO<sub>4</sub>-based salts. *Chemical Monthly*, 134: 693–719.
- Gerdes G. Klenke T. and Noffke N. 2000a. Microbial signatures in peritidal siliciclastic sediments: a catalogue. *Sedimentology*, 47: 279–308.
- Gerdes G. Krumbein W. E. and Noffke N. 2000b. Evaporite microbial sediments. In: Riding R.



- Chemostratigraphy: Concepts, Techniques, and Applications. Elsevier, Amsterdam, p. 373-393.
- Tavakoli V. and Rahimpour-Bonab H. 2012. Uranium depletion across Permian–Triassic Boundary in Persian Gulf and its implications for paleoceanic conditions. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 350:101-113.
- Tavakoli V. Rahimpour-Bonab H. and Esrafil-Dizaji B. 2011. Diagenetic controlled reservoir quality of South Pars gas field, an integrated approach. *Comptes Rendus Geoscience*, 343: 55-71.
- Testa G. and Lugli S. 2000. Gypsum–anhydrite transformations in Messinian evaporites of central Tuscany (Italy). *Sedimentary Geology*, 130: 249–268.
- Zamanzadeh M. Amini A. and Kamali M. 2009. Burial history reconstruction using late diagenetic products in the early Permian siliciclastics of the Faraghan Formation, southern Zagros, Iran. *Journal of Petroleum Geology*, 32: 171-192.
- Zhao Z. Guo Y. Wang Y. Liu H. and Zhang Q. 2014. Growth patterns and dynamics of mud cracks at different diagenetic stages and its geological significance. *International Journal of Sediment Research*, 29: 82-98.
- Zoback M. 2010. *Reservoir geomechanics*. Cambridge University Press, Cambridge, 461 p.
- Noffke N. Gerdes G. Klenke T. and Krumbein W.E. 2001b. Microbially induced sedimentary structures indicating climatological, hydrological and depositional conditions within Recent and Pleistocene coastal facies zones (southern Tunisia). *Facies*, 44: 23–30.
- Nyvlt J. 1997. On the kinetics of solid–liquid–solid phase transformation. *Crystal Research and Technology*, 32: 695–699.
- Park R.K. 1977. The preservation potential of some recent stromatolites. *Sedimentology*, 24: 485–506.
- Peyravi M. Kamali M. R. and Kalani M. 2010. Depositional environments and sequence stratigraphy of the Early Triassic Kangan formation in the northern part of the Persian Gulf: Implications for reservoir characteristics. *Journal of Petroleum Geology*, 33: 371-386.
- Philipp L. S. 2008. Geometry and formation of gypsum veins in mudstones at Watchet, Somerset, SW England. *Geological Magazine*, 145: 831-844.
- Pratt B. R. 1998. Syneresis cracks: subaqueous shrinkage in argillaceous sediments caused by earthquake-induced dewatering. *Sedimentary Geology*, 117: 1-10.
- Rahimpour-Bonab H. 2007. A procedure for appraisal of a hydrocarbon reservoir continuity and quantification of its heterogeneity. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 58: 1-12.
- Rahimpour-Bonab H. Esrafil-Dizaji B. and Tavakoli V. 2010. Dolomitization and anhydrite precipitation in permo-triassic carbonates at the South Pars gas field, offshore Iran: controls on reservoir quality. *Journal of Petroleum Geology*, 33: 43-66.
- Rich J. L. 1951. Three critical environments of deposition, and criteria for recognition of rocks deposited in each of them. *Bulletin of the Geological Society of America*, 62: 1-20.
- Strohmenger C.J. Always R.H.S. Broomhall R.W. Hulstrand R.F. Al-Mansoori A. Abdalla A. and Al-Aidarous A. 2002. Sequence stratigraphy of the Khuff Formation comparing outcrop and subsurface data (Arabian Plate, UAE): Proceedings of the 10th Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, Paper SPE, 78535, p. 558–568.
- Szabo F. Kheradpir A. 1978. Permian and Triassic stratigraphy, Zagros basin, south-west Iran. *Journal of Petroleum Geology*, 1: 57-82.
- Tavakoli V. 2015. Chemostratigraphy of the Permian–Triassic Strata of the Offshore Persian Gulf, Iran. In: Ramkumar M. (Ed.)

