

## منشاء گلفشان‌های فعال قارنیارق و نفتلیجه در دشت گرگان، ایران

سمیه کلانه<sup>۱</sup>، فرزین قائمی<sup>۲</sup>، سیدرضا موسوی حرمی<sup>۳</sup> و حسین مهاجر سلطانی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری تکتونیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران  
<sup>۲</sup> دانشیار گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران  
<sup>۳</sup> استاد گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران  
<sup>۴</sup> دانشجوی دکتری زمین شناسی، شرکت نفت خزر، شرکت نفت خزر، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۲۱، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۳۰)

### چکیده

گلفشان‌های قارنیارق و نفتلیجه از گلفشان‌های فعال بزرگ دشت گرگان به‌شمار می‌روند که در نیمه باختری این دشت واقع شده‌اند. جهت تعیین منشاء این گلفشان‌ها مطالعه محدودی با استفاده از بررسی نمونه‌های جمع‌آوری شده از خروجی این گلفشان‌ها انجام و بر این مبنای مدلی از ساختار زیرسطحی آنها ارائه شده است. در این مطالعه جهت بررسی این دو گلفشان برای اولین بار از داده‌های ژئوفیزیکی استفاده شد. با استفاده از یک مقطع لرزه‌ای دوبعدی که از این دو گلفشان عبور می‌کند و چاه اکتشافی گرگان ۳-الف که در نزدیک گلفشان قارنیارق حفر شده است، توالی رسوبی و عناصر ساختاری ریشه گلفشان‌ها ترسیم شد. تفسیر مقطع لرزه‌ای نشان می‌دهد در ریشه این گلفشان‌ها تعدادی گسل عادی وجود دارد که از لایه‌های دوران نوزیستی عبور کرده‌اند و با شیب زیاد و به‌طور متحدالمرکز به رأس رسوبات چین‌خورده دوران میان‌زیستی می‌رسند. به‌نظر می‌رسد موقعیت تشکیل این گلفشان‌ها با چین‌خوردگی‌های عمیق، تداوم تنش و دی‌پایرسم در لایه‌های کپه‌داغی کنترل می‌شود که به‌نوبه خود سبب توسعه شکستگی‌ها و گسل‌ها در این موقعیت کششی شده‌اند. با توجه به تداوم گسل‌ها و درزها تا رأس چین‌های مدفون کپه‌داغ پیشنهاد می‌شود تله‌های نفتی تشکیل شده در قله این ساختارها، تغذیه‌کننده بخشی از مواد و گازهای خروجی از این گلفشان‌ها باشند. همچنین با توجه افزایش ضخامت رسوبات کاسپین به سمت مرکز حوضه، عمق تشکیل تله‌های هیدروکربوری متفاوت است که این مسئله نتایج مطالعه قبلی را مبنی بر تفاوت در عمق سیالات و گازهای خروجی توجیه می‌کند.

**واژه‌های کلیدی:** حوضه کاسپین جنوبی، حوضه کپه‌داغ، گلفشان، ساختار، داده لرزه‌ای دوبعدی

## ۱ مقدمه

گلفشان پدیده‌ای طبیعی است که منعکس کننده فرایندهای زمین‌شناسی منطقه‌ای است و منبع مهمی از اطلاعات درباره رسوبات و شرایط زیرسطحی است. اصطلاح A سامانه گلفشان ≡ برای توصیف بنای گلفشان و مجموعه تغذیه کننده‌ای ابداع شده است که این ساختار سطحی را به واحد چینه‌شناسی زیرسطحی به عنوان منبع تغذیه کننده خود متصل می‌کند (استوارت و دیویس، ۲۰۰۶). این پدیده در مناطق فعال زمین‌ساختی رخ می‌دهد و معمولاً با تله‌های هیدروکربنی در لایه‌های عمیق مرتبط است (یوسف‌اف و رابینوویتس، ۲۰۰۳). مطالعه گلفشان‌ها در زمینه‌های مختلف علمی برای طیف وسیعی از رشته‌ها از جمله اکتشاف نفت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ برای مثال گلفشان‌ها با فوران‌های شدید و ناپایداری رسوبات اشباع‌شده با گاز اطراف بر عملیات حفاری، تأسیسات دکل و مسیریابی خط لوله اثر می‌گذارند (میلکوف، ۲۰۰۰؛ یوسف‌اف و رابینوویتس، ۲۰۰۴ و استوارت و دیویس، ۲۰۰۶).

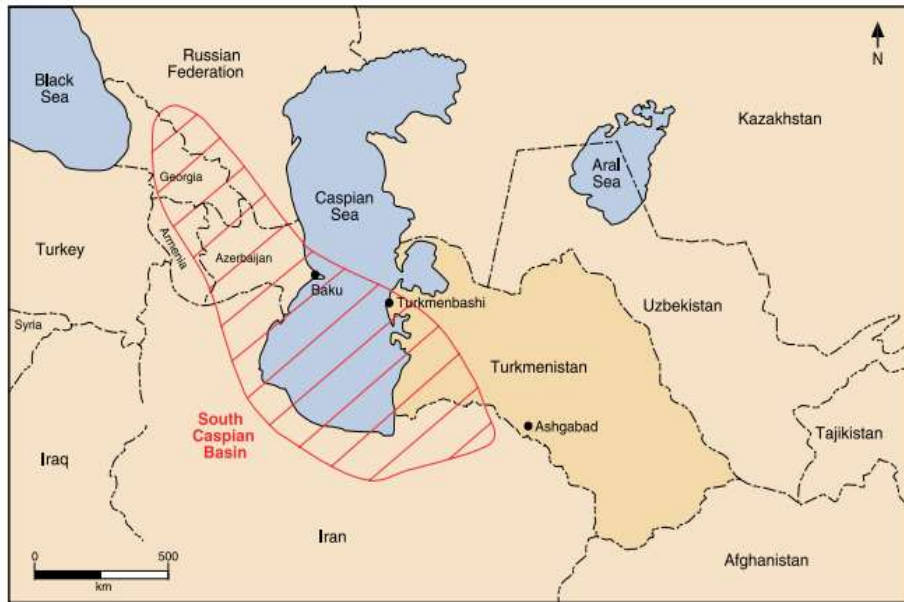
حوضه کاسپین جنوبی مجموعه‌ای بی‌مانند از پارامترهای مختلف زمین‌شناسی است که آن را در میان مناطق مهم هیدروکربنی جهان قرار می‌دهد (شکل ۱). وجود گلفشان‌های فعال در این حوضه که همراه با خروج گاز به‌ویژه متان هستند، سبب شده است از سالیان دور، احتمال وجود ذخایر نفت و گاز در منطقه قوت گیرد. امروزه حوضه کاسپین جنوبی در رده بیست‌وسوم ایالت هیدروکربنی جهان قرار دارد. همچنین بیش از ۳۰٪ کل گلفشان‌های جهان در این حوضه متمرکز شده‌اند. بیش از چهارصد گلفشان فعال در مناطق ساحلی و بستر دریا شناسایی شده است (شکل ۲). بخش عمده این گلفشان‌ها در کشور آذربایجان متمرکز هستند به گونه‌ای که در مناطق ساحلی و دریایی آن بیش از سیصد گلفشان شناسایی شده است که برخی از آنها تا ارتفاع ۴۰۰ متر و عرض چندین کیلومتر هستند (گلی‌اف و فیض‌الله‌اف، ۱۹۹۷ و پلانکه و

همکاران، ۲۰۰۳). همچنین در باختر ترکمنستان، حدود پنجاه گلفشان با ریخت‌شناسی و ویژگی‌های مختلف شناسایی شده است (اپو و همکاران، ۲۰۱۴). دشت گرگان که تداوم جنوبی دلتای بزرگ ترکمنستان محسوب می‌شود، منطقه گذار دو حوضه هیدروکربوری کاسپین و کپه‌داغ است. این دشت چند گلفشان فعال به نام‌های نفتلیجه، قارنیارق، اینچه و صوفیکم دارد که خروج گاز به‌ویژه متان از آنها گزارش شده است (شکل ۳).

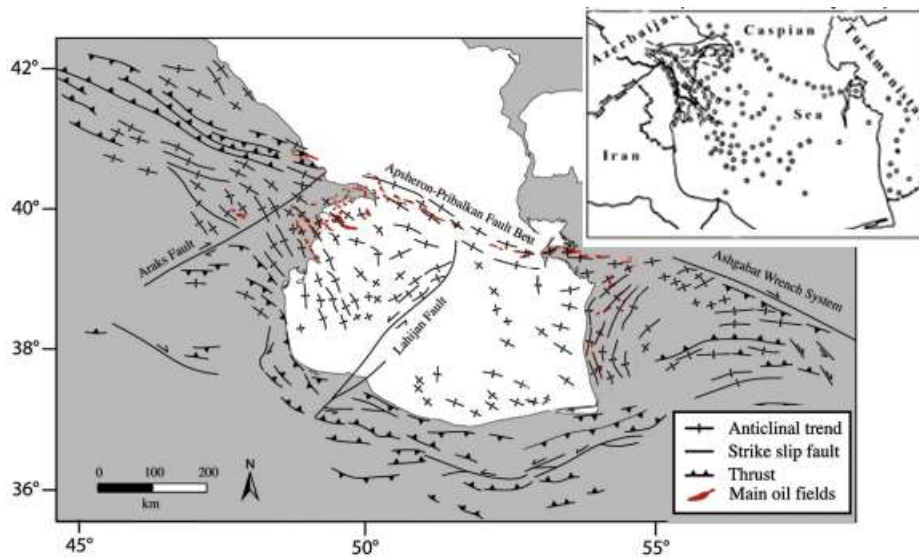
در سالیان اخیر، مطالعاتی درباره این گلفشان‌ها انجام شده است که به برخی از آنها اشاره می‌شود. فصل بهار و همکاران (۱۳۸۹) و رنجبران و ستوهیان (۲۰۱۵) ریخت‌شناسی گلفشان‌های فعال دشت گرگان را بررسی کرده‌اند. مهرابی و همکاران (۱۳۹۶) با اثبات وجود گازهای ترموژنیک در گلفشان‌های دشت گرگان، این مسئله را نشان‌دهنده وجود پتانسیل هیدروکربوری در منطقه دانسته‌اند. رضواندهی و همکاران (۲۰۱۱) با اجرای عملیات لرزه‌ای سه‌بعدی در اطراف چاهی در نزدیکی گلفشان قارنیارق و تفسیر آن، به احتمال وجود پتانسیل زیاد گاز در این محدوده، وقوع گسلش و وجود گلفشان پنهان دیگری در نزدیکی این گلفشان اشاره کرده‌اند. سلیمانی و همکاران (۲۰۱۸) با ادغام داده‌های گرانشی و بهبود کیفیت داده‌های لرزه‌ای، وجود دیپیرهای بسیار بزرگ مدفون را در این دشت نشان دادند. عمرانی و رقیمی (۲۰۱۸) با جمع‌آوری مواد خارج شده از گلفشان قارنیارق و بررسی پتروگرافی آنها نشان دادند برخی از مواد خروجی از این گلفشان منشاء کپه‌داغی دارند. فرهادیان بابادی و همکاران (۲۰۲۰) با جمع‌آوری و بررسی ژئوشیمیایی نمونه‌های گاز، سیالات و مواد خروجی از گلفشان‌های فعال دشت گرگان با ارائه مدلی نشان دادند عمق تشکیل دو گلفشان قارنیارق و نفتلیجه به حداکثر ۶ کیلومتر می‌رسد. در شکل ۴ مدل‌های ارائه شده از منشاء دو گلفشان قارنیارق و نفتلیجه آورده شده

استفاده از مقاطع لرزه‌ای بازتابی و داده‌های چاه اکتشافی، موقعیت ساختاری و رسوبی گلفشان قارنیارق و نفتلیجه با هدف تعیین منشاء تغذیه‌کننده این گلفشان‌ها بررسی می‌شود.

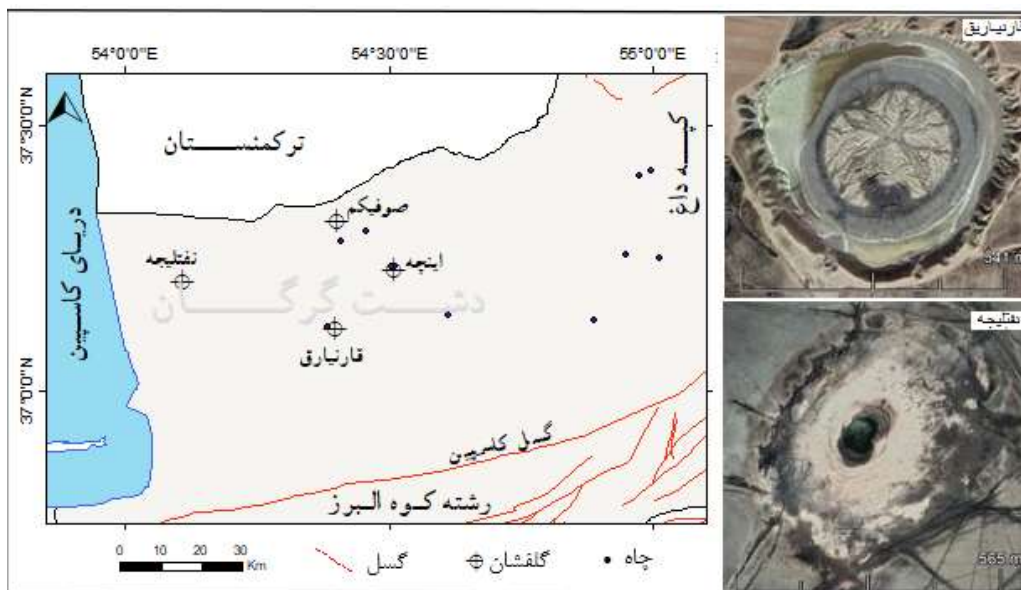
است. صفری و همکاران (۱۳۹۹) به کمک روش‌های زمین‌اطلاعاتی نشان دادند این گلفشان‌ها اغلب در حاشیه‌های فعال همگرا با نرخ لرزه‌خیزی زیاد توزیع شده و اغلب در طول گسل‌ها، چین‌های مرتبط با گسلش و محورهای تاقدیس قرار گرفته‌اند. در مطالعه حاضر با



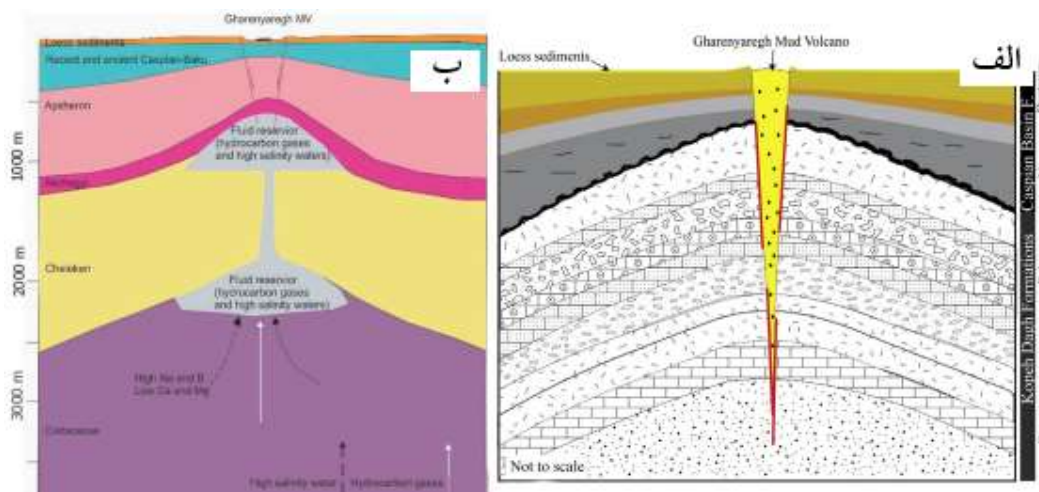
شکل ۱. موقعیت حوضه کاسپین جنوبی (رنگ قرمز) (تورس، ۲۰۰۷).



شکل ۲. نقشه عناصر ساختاری اصلی، میدان‌های هیدروکربوری همراه با نقشه توزیع گلفشان‌ها (دایره در شکل گوشه راست بالا) در حوضه کاسپین جنوبی که تطابق کاملی را با یکدیگر نشان می‌دهند (حسین‌اف و گلی‌اف، ۲۰۰۴ و اوپو و همکاران، ۲۰۱۴).



شکل ۳. موقعیت منطقه، چاه‌های اکتشافی، گسل و گلفشان‌های فعال دشت گرگان همراه با تصاویر گوگل ارث از گلفشان فعال قارنیارق و نفتلیجه.



شکل ۴. مدل‌های ارائه‌شده از منشاء تشکیل گلفشان قارنیارق و نفتلیجه (الف) عمرانی و رقمی (۲۰۱۸) با بررسی قطعات آواری جمع‌آوری شده از گلفشان قارنیارق که بیشتر شامل ماسه‌سنگ، گلوکونیت، سنگ‌آهک، مارن و لوماشل بودند، نشان دادند برخی از این قطعات از حوضه رسوبی کپه‌داغ منشاء گرفته است. (ب) فرهادیان بابادی و همکاران (۲۰۲۰) جهت بررسی منابع اولیه سیال و فرایندهای ثانویه کنترل‌کننده شیمیایی آنها، نمونه‌های گاز، آب و گل از چهار گلفشان فعال دشت گرگان را از نظر ژئوشیمیایی مطالعه کردند. نتایج نشان داد منشاء مواد خروجی از گلفشان‌های قارنیارق و نفتلیجه به حداکثر عمق ۶ کیلومتری هم می‌رسد. این مقدار برای دو گلفشان دیگر به میزان چشمگیری کمتر به دست آمد.

## ۲ زمین‌شناسی منطقه

به سه بخش متعلق به ترکمنستان، آذربایجان و ایران تقسیم (شکل ۱) و با روند آپشرون در شمال، کمربند کپه‌داغ در خاور، کمربندهای تراسی تالش-قره‌باغ در باختر و رشته کوه البرز در جنوب احاطه شده است (تورس، ۲۰۰۷).

حوضه کاسپین جنوبی که با روند شمال باختری- جنوب خاوری و طول حدود ۲۰۰ هزار کیلومتر از باختر ترکمنستان به خاور آذربایجان و شمال ایران گسترش دارد،

یک تا دو میلیون سال رسوب شده و مخزن اصلی هیدروکربنی در حوضه است (رینولدز و همکاران، ۱۹۹۸). رسوب سریع ماسه سبب اعمال فشار بیش از حد روی گل‌ها و ایجاد گلفشان‌ها و دیابیرهای فراوانی شده است. شکل ۲ موقعیت گلفشان‌های حوضه کاسپین جنوبی و ارتباط آن با ساختارهای اصلی و میدان‌های هیدروکربوری را نشان می‌دهد.

دشت گرگان بخش جنوب خاوری حوضه کاسپین جنوبی است که تداوم جنوبی یک دلتای بزرگ‌تر در ترکمنستان محسوب می‌شود. تورس (۲۰۰۷) با بررسی زمین‌شناسی نفت بخش باختری ترکمنستان یعنی استان گگراندآگ-اوکارم (Gograndag-Okarem)، نشان داد سبک ساختاری این منطقه، مجموعه‌ای از تاقدیس‌هایی تقریباً موازی است که در شمال، روند محوری ناحیه‌ای شمال شمال خاوری- جنوب جنوب باختری دارد و در جنوب در نزدیکی مرز ایران به روند شمال شمال باختری- جنوب جنوب خاوری تغییر می‌یابد. این تاقدیس‌ها که در امتداد ساحل قرار گرفته‌اند، محل مناسبی را برای تجمع مواد هیدروکربنی فراهم آورده‌اند و توزیع گلفشان‌ها بر این ساختارها منطبق است (تورس، ۲۰۰۷). بررسی‌های اوپو و کاپوزی (۲۰۱۵) نیز که در شبه‌جزیره چلکن در سواحل ترکمنستان انجام شد، نشان داد موقعیت گلفشان‌ها منطبق با توزیع تاقدیس‌ها است و گسل‌های عادی و امتدادلغز، مسیرهای مناسبی جهت صعود سیالات به سطح و توسعه گلفشان‌ها در آن منطقه فراهم کرده‌اند.

دشت گرگان کاملاً با رسوبات عهد حاضر پوشانده شده است و چهار گلفشان فعال قارنیارق، اینچه، صوفیکم و نفتلیجه در نیمه باختری آن از عوارض ساختاری سطحی و مهم این منطقه به‌شمار می‌آیند (شکل ۳). این دشت از شمال به دلتای بزرگ باختر ترکمنستان و از جنوب به گسل خزر محدود شده است. گلفشان نفتلیجه گلفشانی فعال در ۱۴ کیلومتری شهر گمیشان است. این گلفشان به‌صورت یک

این حوضه با ۲۵ تا ۳۰ کیلومتر ضخامت رسوبات، یکی از ژرف‌ترین حوضه‌های رسوبی در جهان است (دولین و همکاران، ۱۹۹۹ و ناپ و همکاران، ۲۰۰۴). حدود نیمی از این رسوبات در زمان بسیار کوتاه پلیوسن- کوآترنری در یک رژیم غالب فشاری مرتبط با بسته شدن اقیانوس نئوتتیس در طول برخورد عربستان- اوراسیا نهشته شده و منشاء آنها فرسایش کوه‌های اطراف از جمله قفقاز، البرز، کپه‌داغ و زمین‌بوم روسیه است (برونت و همکاران، ۲۰۰۳). احاطه شدن این حوضه با کمربندهای کوهستانی سبب شده است بیشتر رسوبات آن در یک حوضه پس از الیگوسن تجمع یابد (جکسون و همکاران، ۲۰۰۲). حوضه یادشده شامل پوشش رسوبی دوران میانه‌زیستی، پالئوژن و نئوژن با ضخامت ۲۵-۱۵ کیلومتر و رسوبات پلیوسن و کوآترنر به‌ترتیب با ضخامت ۵ تا ۸ و ۱/۵ تا ۲ کیلومتر است (نپروچوف، ۱۹۶۸ و فدینسکی و همکاران، ۱۹۷۲). این حجم عظیم رسوبات ناشی از رسوب‌گذاری زیاد (تا حدود ۱۳۰۰ متر در میلیون سال) است که در طول پلیوسن- پلیستوسن اوج گرفته است (تورس، ۲۰۰۷).

مطالعات مختلف نشان می‌دهد مهم‌ترین منبع تولید گل و هیدروکربن در حوضه کاسپین جنوبی، توالی ضخیمی از گل به سن اولیگو- میوسن است که سری مایکوپ نامیده می‌شود (جونز و سیمونز، ۱۹۹۷). در میوسن میانی با بالاآمدگی بیشتر قفقاز بزرگ ارتباط بین دریای سیاه و کاسپین محدودتر و به ایجاد شرایط بی‌هوازی و تشکیل توالی چینه‌نگاری غنی از مواد آلی مایکوپ- دیاتوم در حوضه کاسپین منجر شد (اسمیت- راج، ۲۰۰۶). در پایان میوسن، این گل‌ها با ماسه‌هایی پوشانده شدند که با سامانه‌های دلتایی مرتبط با پیشروی رودخانه‌های کورا، آمودریا و ولگا وارد حوضه می‌شدند. این ماسه آبرفتی- دلتایی با سن میوسن پایانی- پلیوسن پیشین که با نام A سری تولیدی  $\cong$  در آذربایجان و A سری قرمز  $\cong$  در ترکمنستان شناخته می‌شود و تا ۵ کیلومتر ضخامت دارد، در حدود

۱۹۷۰ و همچنین ۱۹۹۲ تا ۱۹۹۵ میلادی، در دشت گرگان عملیات لرزه‌نگاری دوبعدی گسترده‌ای انجام داد. همچنین تعدادی چاه اکتشافی در این منطقه حفر شد که تنها دو چاه قزل‌تپه ۱ و ۲ واقع در خاوری‌ترین نقطه دشت گرگان، به درون نهشته‌های کرتاسه زیرین نفوذ کردند.

در این پژوهش از یک مقطع لرزه‌ای دوبعدی به طول حدود ۵۵ کیلومتر در جهت شمال باختر- جنوب خاور استفاده شده است که از هر دو گلفشان نفتلیجه و قارنیارق می‌گذرد (شکل ۵). متخصصان ژئوفیزیک در مقطع یادشده عمل برانبارش (stacking) را جهت تقویت بازتابنده‌ها با افزایش نسبت سیگنال به نوفه و همچنین عمل کوچ (migration) را جهت واقع بودن عارضه‌های لرزه‌ای در جای حقیقی خود از نظر عمق و زمان انجام دادند. برای تفسیر این مقطع از نرم‌افزار پترل استفاده شده است. در این نرم‌افزار جهت بارزسازی بازتابنده‌ها و شناسایی عناصر ساختاری، امکان تغییر رنگ مقطع و اعمال مبین‌های لرزه‌ای (seismic attributes) متعددی فراهم شده است. در این مطالعه جهت تفسیر بهتر مقطع مورد استفاده از تغییر رنگ و مبین به هم‌ریختگی (chaos) استفاده شد. این مبین با بارزسازی سیگنال‌های آشفته در داده‌های لرزه‌ای که ممکن است ناشی از مهاجرت مواد هیدروکربوری، رویداد دی‌پایریسم و گسلش باشد، کمک مؤثری در شناسایی عناصر ساختاری و تفسیر مقطع لرزه‌ای می‌کند. شکل ۵- ب مقطع لرزه‌ای را پس از اعمال مبین به هم‌ریختگی نشان می‌دهد که توانسته است مسیر گسل‌ها و همچنین آشفستگی‌های عمیق‌تر ناشی از چین‌خوردگی یا دی‌پایریسم را به خوبی نمایش دهد. همچنین شکل ۵- ج مقطع را پس از اعمال تغییر رنگ نشان می‌دهد که سبب بارزتر شدن بازتابنده‌ها به ویژه افق‌های رسوبی شده است.

در ادامه، جهت کالیبره کردن مقطع لرزه‌ای، از سرسازندهای چاه اکتشافی گرگان ۳- الف استفاده شد. این چاه با عمق کل ۳۳۷۷ متر، عمیق‌ترین چاه اکتشافی در نیمه

ساختار ریزشی با نشست‌های فروافتاده حلقوی است که ریزش‌های متوالی را در پی گسترش فعالیت این گلفشان نشان می‌دهد (مهرابی و همکاران، ۱۳۹۶). دهانه اصلی گلفشان پوشانده شده و یک حوض کوچک پر از آب تشکیل داده است. خروج گل همراه با حباب‌های گاز متان و نفت در آب شور مشهود است. گلفشان قارنیارق در ۱۸ کیلومتری شمال باختر شهرستان آق‌قلا واقع شده است و دهانه تقریباً ۵۰۰ متری دارد (عمرانی و رقیمی، ۲۰۱۸). این گلفشان به شکل یک برجستگی حلقوی است. در داخل این حلقه یک فروافتادگی به عمق تقریبی ۱۰ تا ۱۵ متر وجود دارد که دریاچه نمکی گلفشان در آن تشکیل شده است (مهرابی و همکاران، ۱۳۹۶).

مطالعاتی که درباره دشت گرگان انجام شده است نشان می‌دهد این منطقه پهنه گذار بین بالاآمدگی البرز و کپه‌داغ و حوضه در حال فرونشست کاسپین جنوبی است و رسوبات آن مشکل از دو دسته توالی رسوبی متعلق به حوضه کپه‌داغ (میانه‌زیستی) و رسوبات مربوط به حوضه کاسپین به سن الیگو- میوسن و جوان‌تر است که با یک ناپیوستگی بارز از یکدیگر جدا شده‌اند. علت این ناپیوستگی قفل شدن فرورانش اقیانوس نئوتتیس و وارونه شدن اصلی حوضه کپه‌داغ در زمان ائوسن پسین است. این مرحله چین‌خوردگی در قسمت باختری کمربند با یک ناپیوستگی بزرگ ائوسن- الیگوسن در پایه مجموعه رسوبی ضخیم متعلق به حوضه کاسپین جنوبی همراه است (رابرت و همکاران، ۲۰۱۴ و رادفر و همکاران، ۲۰۱۸).

### ۳ داده و روش

با توجه به شواهد وجود مواد هیدروکربوری در دشت گرگان، در دهه‌های اخیر حفاری‌های اکتشافی متعددی در سواحل دریای خزر (استان‌های مازندران، گیلان و گلستان) و همچنین چند حفاری در محدوده آبی آن انجام شده است. شرکت ملی نفت ایران در دوره‌های زمانی ۱۹۶۰ تا

#### ۴ نتایج و بحث

توالی رسوبی بعد ترشیری در منطقه مورد مطالعه متشکل از رسوبات عهد حاضر و کاسپین جدید و قدیم، آپشرون، آقچاگیل و چلکن است. همان‌طور که در شکل ۵ دیده می‌شود، سازندهای چلکن و آپشرون مخازن مهم هیدروکربوری در حوضه کاسپین هستند که ضخامت زیادی در این محدوده دارند. در نتیجه فرونشست زیاد رسوبات کاسپین، تغییر در شیب لایه‌ها و افزایش ضخامت رسوبات کاسپین از جنوب خاور به شمال باختر در مقطع کاملاً نمایان است. این رسوبات تقریباً پیوسته هستند و چین‌خوردگی محسوسی ندارند، اما تعدادی گسل مزدوج تا پایه رسوبات کاسپین با شیب زیاد توسعه یافته‌اند. طبق گزارش دیرینه‌شناسی بررسی نمونه‌ها و هسته‌های برداشت شده از چاه گرگان ۳- الف، در بخش زیرین توالی چلکن، از عمق حدود ۲۵۰۰ متری به پایین، منبع غنی از فسیل‌های بازسازی شده از کرتاسه بالایی (بیشتر سنونین)، میوسن میانی (به‌ویژه سارماسین) و ائوسن مشاهده شده است. این مسئله نشان‌دهنده وجود فاز فرسایشی شدید ناشی از رویداد بالآمدگی یا پسروی آب در این مناطق است که باعث شده است رسوبات یادشده گسترش چندانی در دشت گرگان نداشته باشند و احتمالاً تنها در ناودیس‌ها از فرسایش شدید بعدی در امان مانده باشند. در شکل ۵- د گسترش احتمالی این نهشته‌ها یا رسوبات قدیمی‌تر دوران نوزیستی در نیمه باختری دشت گرگان نشان داده شده است. در عمق حدود ۲۹۴۰ متری، حفاری به ناپیوستگی کرتاسه- ترشیری رسیده است. ردیابی بازتابنده‌ها در این عمق، دگرشیبی کاملاً مشخصی را بین رسوبات کاسپین و کپه‌داغ نمایش می‌دهد به گونه‌ای که برخلاف بخش فوقانی، در زیر این ناپیوستگی، رسوبات کپه‌داغ با چین خوردگی واضح دیده می‌شود. طبق مطالعات صورت گرفته، برخورد صفحه عربی به حاشیه جنوبی اوراسیا در ائوسن پایانی، سبب ایجاد چین‌خوردگی در سازندهای دوران میانه‌زیستی شده و توانسته

باختری دشت گرگان است که در سال ۱۹۶۳ میلادی در نزدیک گلفشان قارنیارق حفر شده و درون ناپیوستگی کرتاسه نفوذ کرده است. چاه یادشده جایگزین چاه گرگان ۳ بود که در حین حفاری به دلیل انفجار ناشی از گاز و آتش‌سوزی از بین رفته بود. در این چاه پس از رسوبات عهد حاضر و کاسپین جدید و قدیم، عمق قرارگیری سرسازندها در آپشرون حدود ۵۹۰ متر، در آقچاگیل، ۱۲۶۵ متر و در چلکن ۱۳۴۰ متر تخمین زده شده است. در عمق حدود ۲۹۴۰ متر، سازندهای تفکیک‌نشده سرچشمه و سنگانه وجود دارند. گفتنی است به دلیل نبود لایه مبین و مدارک دیرینه‌شناسی، هیچ مرز مشخصی بین سازندهای سرچشمه و سنگانه در چاه‌های اکتشافی تشخیص داده نشده است؛ بنابراین در تمام گزارش‌های چاه‌های دشت گرگان، نام این دو سازند به صورت تفکیک‌نشده از یکدیگر آورده شده است. علاوه بر این، به دلیل نمونه‌گیری در فواصل نامناسب که بیشتر بر مبنای تغییر رنگ یا سایر تفاوت‌های مشهود حین عملیات حفاری انجام می‌شده، خطای عمق سرسازندها تا ۶۰ متر فرض شده است. در ادامه، داده‌های چاه به نرم‌افزار داده شد. از آنجایی که داده‌های چاه بر حسب عمق و داده‌های لرزه‌ای بر حسب زمان هستند، برای تلفیق این دو از منحنی عمق- زمان (checkshot) استفاده شد. شایان ذکر است به دلیل محدودیت عمق حفاری و نداشتن نقاط کنترلی سازندهای عمیق‌تر، ردیابی بازتابنده‌های مربوطه در نیمه باختری این دشت بسیار دشوار است و تفسیر را در عمق بیشتر با حدس و گمان همراه ساخته است؛ با این حال جهت تفسیر افق‌های عمیق‌تر، از مطالعات صورت گرفته در نواحی مجاور مانند پژوهش رادفر و همکاران (۲۰۱۸) استفاده شده است. در نهایت، با افزودن عمق سرسازندها به عنوان نقاط کنترلی روی بازتابنده‌ها، اطلاعات پیوسته و ممتدی از توالی رسوبی به دست آمد که در شکل ۵- د نشان داده شده است.

است تله‌های ساختاری بسیاری را در رأس این چین‌ها ایجاد کند. تنها سرسازند کپه‌داغ که در چاه اکتشافی گرگان ۳- الف گزارش شده است، سازند تفکیک‌نشده سرچشمه- سنگانه است که سن آن به اواخر بارمین- آلبین می‌رسد. به عبارتی، سازندهای جوان‌تر کرتاسه در چاه اکتشافی تشخیص داده نشده است که همان‌طور که شرح داده شد، ممکن است به دلیل فرسایش شدید حاکم بر منطقه باشد. مطالعات انجام‌شده با استفاده از داده‌های چاه‌های اکتشافی قزل‌تپه ۱ و ۲ که در خاوری‌ترین نقطه دشت گرگان حفر شده‌اند (رابرت و همکاران، ۲۰۱۴ و رادفر و همکاران، ۲۰۱۸)، نشان می‌دهد در عمق بیشتر، سازندهای عمیق‌تر مربوط به حوضه کپه‌داغ شامل تیرگان، زرد (معادل سازند شوربچه)، مزدوران و کشف‌رود (معادل شمشک) در دنباله باختری این حوضه یعنی دشت گرگان تداوم دارند. حوضه کپه‌داغ پس از زاگرس دومین حوضه در ایران است که پتانسیل هیدروکربوری دارد. سازند کشف‌رود مهم‌ترین منبع هیدروکربوری و سنگ آهک مزدوران و رسوبات آواری سازند شوربچه مهم‌ترین مخزن هیدروکربوری در حوضه کپه‌داغ است (موسوی حرمی و برنر، ۱۹۹۲؛ کاوسی و همکاران، ۲۰۰۹ و رابرت و همکاران، ۲۰۱۴). ضخامت سازند شوربچه به سمت دشت گرگان به تدریج کاهش می‌یابد و در این منطقه به‌طور کامل با سازند زرد جایگزین می‌شود که بیشتر از جنس مارن و شیل آهکی است (سیدامامی، ۱۹۷۵؛ افشار حرب، ۱۹۷۹ و رابرت و همکاران، ۲۰۱۴). مطالعات رادفر و همکاران (۲۰۱۸) دی‌پایریسم لایه زرد را در برخی مناطق نشان می‌دهد.

همان‌طور که در مقطع لرزه‌ای دیده می‌شود، موقعیت گلفشان‌های نفتلیجه و قارنیارق منطبق بر رأس چین‌های کپه‌داغ است. در ریشه این گلفشان‌ها یک رشته گسل‌های مزدوج عادی با شیب زیاد و الگوی متحدالمرکز تا رأس چین‌های مدفون توسعه یافته‌اند و سبب جابه‌جایی محسوس در رسوبات فوقانی شده‌اند. در زیر گلفشان قارنیارق، شیب

گسلش تقریباً عمودی و گسترش آن کمتر است. چین‌خوردگی لایه‌های کپه‌داغ در زیر این گلفشان کاملاً مشخص است. در محدوده گلفشان نفتلیجه، گسل‌ها گسترش وسیع‌تری دارند و با ایجاد جابه‌جایی بارزتر در لایه‌های کاسپین، می‌توان آنها را تا عمق زیادی حتی درون لایه کپه‌داغ ردیابی کرد. مطالعات مختلف نشان می‌دهد تشکیل گلفشان‌ها در حوضه کاسپین جنوبی در میوسن آغاز شده و در پلیوسن شدت گرفته است. زمین‌ساخت فعال منطقه و چین‌خوردگی پس از رسوب سری تولیدی، تله‌های هیدروکربنی بسیاری را در این حوضه ایجاد کرده به‌طوری‌که چین‌های اواخر پلیوسن و جوان‌تر در سراسر حوضه شایع است (دولین و همکاران، ۱۹۹۹ و جکسون و همکاران، ۲۰۰۲). سازند الیگو- میوسن مایکوپ با ۱ تا ۲ کیلومتر ضخامت، منبع اصلی تغذیه‌کننده گل و هیدروکربن در حوضه کاسپین جنوبی فرض می‌شود (اینان و همکاران، ۱۹۹۷ و فولر و همکاران، ۲۰۰۰). مطالعه نمونه‌های خارج‌شده از گلفشان‌های غیرایرانی حوضه کاسپین جنوبی نشان می‌دهد برخی از آنها قطعات و سیالات قدیمی‌تری نسبت به سازند مایکوپ دارند. به عبارتی، ریشه برخی از گلفشان‌ها به لایه‌های کرتاسه و ژوراسیک می‌رسد (گلی‌اف و همکاران، ۱۹۹۷؛ اینان و همکاران، ۱۹۹۷؛ کاتز و همکاران، ۲۰۰۰؛ پلانکه و همکاران، ۲۰۰۳ و حسین‌اف و گلی‌اف، ۲۰۰۴). همان‌طور که گفته شد، در مقطع مورد مطالعه، چین‌خوردگی و دی‌پایریسم بارزی در رسوبات کاسپین دیده نمی‌شود. همچنین رسوبات دوران نوزیستی قبل از سازند چلکن به‌ویژه رسوبات معادل مایکوپ- دیاتوم به دلیل فرسایش منطقه‌ای توسعه چندانی در دشت گرگان ندارند. به‌نظر می‌رسد این مسئله یکی از دلایل مهم تعداد بسیار کمتر و اندازه کوچک گلفشان‌ها در دشت گرگان نسبت به سایر مناطق حوضه کاسپین جنوبی باشد. به‌طور کلی برای تشکیل گلفشان وجود چند شرط ضروری است: پوشش رسوبی ضخیم؛ وجود لایه

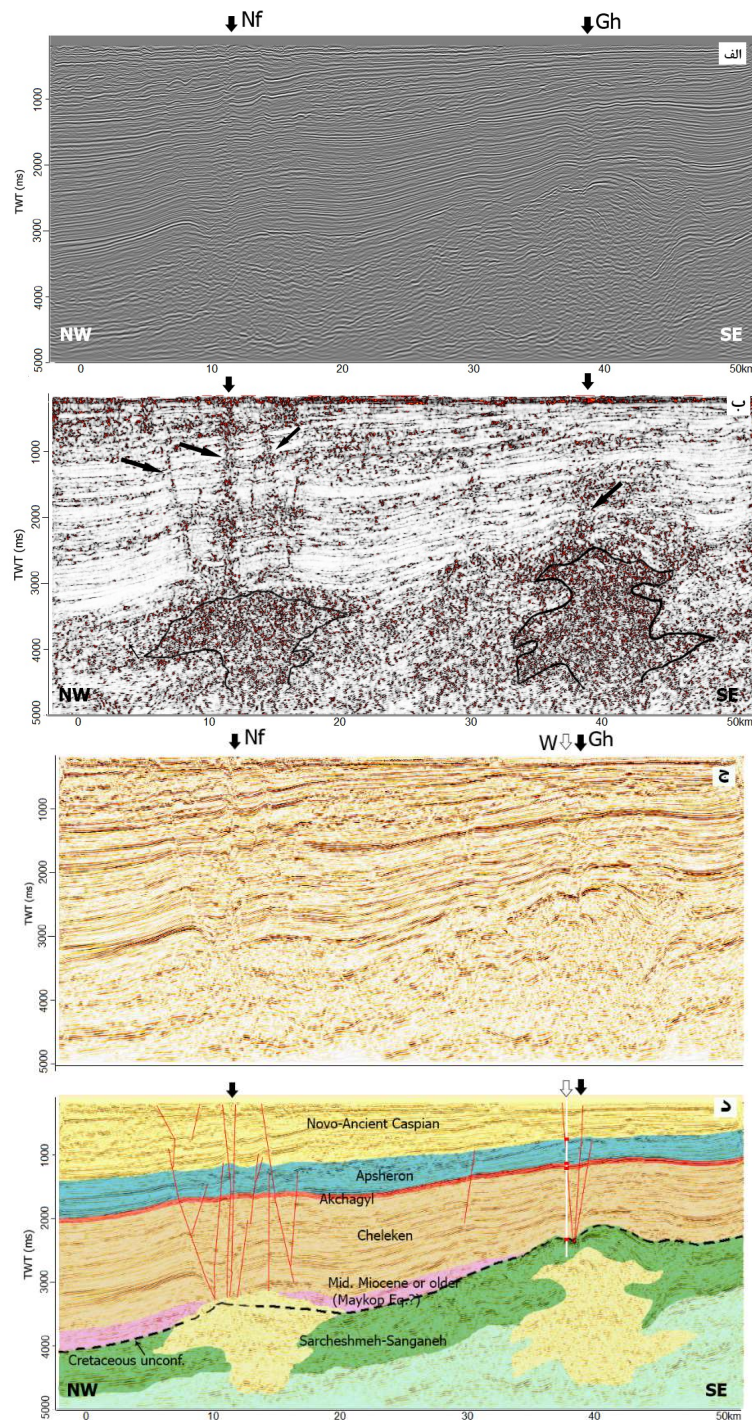


ایران مرکزی و اوراسیا به سمت شمال و همچنین حرکت به سمت شمال باختر حوضه دریای کاسپین نسبت به اوراسیا، از لحاظ زمین‌ساختی بسیار فعال است (جکسون و همکاران، ۲۰۰۲؛ آلن و همکاران، ۲۰۰۳؛ ورنانت و همکاران، ۲۰۰۴ و هالینگزورث و همکاران، ۲۰۰۸). رخداد زمین‌لرزه در این دشت نیز گواه این مسئله است. نتایج پژوهش‌های ریتز و همکاران (۲۰۰۶) نشان می‌دهد حرکت به سوی شمال باختر حوضه کاسپین جنوبی نسبت به اوراسیا یا چرخش ساعتگرد آن که در پلیستوسن میانی آغاز شد، نه تنها سبب تغییر از یک فشردگی کلی در جهت شمالی-جنوبی به یک ترافشارش کلی در جهت شمال شمال خاور-جنوب جنوب باختر در البرز شد، بلکه یک رژیم تراکشنی را در حوضه داخلی محدوده ایجاد کرده است و آن را نمونه برجسته‌ای از رویداد پدیده‌های کششی درون یک منطقه اغلب زیر فشار ساخته است (ریتز و همکاران، ۲۰۰۶). به نظر می‌رسد وجود روباره ضخیمی از رسوبات دوران نوزیستی سبب تشدید دیاپیرسم در لایه‌های عمیق‌تر قبل ترشیری از جمله سازند زرد شده است. تشکیل و گسترش گسل‌های کششی در رأس چین‌خوردگی‌های عمیق که تا سطح تداوم دارند، مسیرهای ترجیحی مناسبی برای مهاجرت مواد هیدروکربوری و گل از لایه‌های مختلف چینه‌شناسی و تغذیه گلفشان فراهم کرده است.

##### ۵ نتیجه‌گیری

سرعت سریع رسوب‌گذاری و تشکیل رسوبات ضخیم، نامتراکم و غنی از گل و مواد آلی که با نرخ متفاوت فرونشست در حوضه کاسپین همراه بوده، شرایط مناسبی برای تشکیل گلفشان‌ها در حوضه کاسپین جنوبی فراهم آورده است. نتایج این پژوهش به‌طور خلاصه عبارت‌اند از: (۱) توسعه نیافتن سری مایکوپ به‌عنوان مهم‌ترین منبع تغذیه گل و گاز گلفشان‌های این حوضه در دشت گرگان، تعداد

شکل‌پذیر؛ پتانسیل زیاد هیدروکربنی؛ رسوب‌گذاری سریع و متعاقب آن، فشار زیاد؛ جایگاه فشاری؛ گسل‌ها؛ رخداد زمین‌لرزه (یوسف‌اف و رایینوویتس، ۲۰۰۳). گلفشان‌های فعال دشت گرگان در نیمه باختری این دشت واقع شده‌اند؛ یعنی در جایی که رسوبات نامتراکم حوضه کاسپین ضخامت زیادی دارند. همان‌طور که در مقطع لرزه‌ای دیده می‌شود، ضخامت این رسوبات به سمت حوضه مرکزی افزایش می‌یابد به گونه‌ای که در زیر گلفشان‌های قارنیارق و نفتلیجه، سطح ناپیوستگی کرتاسه-ترشیر به ترتیب در عمق حدود ۲۹۰۰ و ۴۰۰۰ متر قرار می‌گیرد. مطالعات قبلی و مدل‌های ارائه‌شده از منشاء گلفشان‌های دشت گرگان (شکل ۴) که با بررسی نمونه‌های جمع‌آوری‌شده از مواد خارج‌شده از این گلفشان‌ها انجام شده است، نشان می‌دهد برخی از مواد خروجی از گلفشان‌ها از حوضه رسوبی کپه داغ منشاء گرفته‌اند. با توجه به اینکه رسوبات هر دو حوضه کپه‌داغ و کاسپین پتانسیل هیدروکربوری دارند و با توجه به تداوم شکستگی‌ها و گسل‌ها تا سازندهای قبل ترشیری به نظر می‌رسد اتاقک‌های مختلفی می‌تواند در اعماق مختلف هر دو حوضه و در امتداد گسل‌ها و درزها شکل گرفته باشد که منبع تغذیه گلفشان‌ها باشند. در مطالعه فرهادیان بابادی و همکاران (۲۰۲۰) عمق منابع اولیه سیال از گلفشان‌های قارنیارق و نفتلیجه تا ۶ کیلومتر تخمین زده شد، درحالی‌که در دو گلفشان فعال دیگر در دشت گرگان این عمق بسیار کمتر به دست آمد. طبق شکل ۵-د با توجه به عمق متفاوت قرارگیری رسوبات کپه‌داغ به‌عنوان تأمین‌کننده بخشی از مواد خروجی از این گلفشان‌ها، تفاوت در عمق منشاء مواد خروجی را می‌توان توجیه کرد. طبق پژوهش سلیمانی و همکاران (۲۰۱۸) وجود گلفشان‌های فعال در دشت گرگان گواه بر رابطه ساختاری بین تنش‌های حاضر در طول سامانه‌های امتدادلغز بزرگ و تداوم دیاپیرهای گل است. در حال حاضر این دشت به دلیل ادامه فرونشست حوضه کاسپین جنوبی، تداوم همگرایی



شکل ۵. (الف) مقطع لرزه‌ای مورد استفاده که از دو گلفشان قارنیارق (Gh) و نفتلیجه (Nf) عبور می‌کند. (ب) مقطع لرزه‌ای پس از اعمال مبین به هم‌ریختگی جهت بارز کردن گسل‌ها و مناطق با الگوی آشفته مانند دیابیرهای احتمالی (ج) مقطع لرزه‌ای پس از اعمال تغییر رنگ جهت بارزتر کردن بازتابنده‌ها به ویژه افق‌های رسوبی (د) تفسیر مقطع لرزه‌ای. موقعیت چاه گرگان ۳-الف (W) حفرشده در نزدیک گلفشان قارنیارق در این مقطع نشان داده شده است. موقعیت گلفشان‌ها با پیکان سیاه و موقعیت چاه با پیکان سفید نشان داده شده است. موقعیت گسل‌ها (خطوط قرمز)، ناپیوستگی کرتاسه (خط تیره) و لایه احتمالی میوسن میانی یا قدیمی‌تر و مناطق با الگوی آشفته ناشی از چین خوردگی یا دیابیرسیم (زرد روشن) در توالی مدفون کپه‌داغ که با اعمال مبین به هم‌ریختگی به دست آمد، در شکل نمایش داده شده است.

گلفشان‌ها می‌شود.

### تشکر و قدردانی

این مقاله مستخرج از پایان‌نامه دکتری نویسنده اول (سمیه کلانه) از دانشگاه فردوسی مشهد با کد طرح ۴۷۳۲۷ است. همچنین این پژوهش با حمایت شرکت نفت خزر در چارچوب برنامه‌های پژوهشی انجام شده است. از داوران و ویراستار محترم قدردانی می‌کنیم که با بازبینی دقیق و پیشنهادهای ارزنده خود، موجب بهبود مقاله شدند.

### منابع

صفری، ح.، رضادوست، م.، رقیمی، م.، ۱۳۹۹، تعیین جایگاه زمین‌ساختی گلفشان‌های غرب استان گلستان به کمک تکنیک‌های زمین‌اطلاعاتی: زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، ۳، ۴۲۱-۴۳۵.

فصل‌بهار، ج.، پورکرمانی، م.، فصل‌بهار، ش.، ۱۳۸۹، بررسی زمین‌شناسی گلفشان‌های حاشیه جنوب خاوری دریای خزر: فصلنامه علوم زمین، ۷۷، ۷۵-۸۲.

مهرابی، ب.، مازینی، آ.، فرهادیان، م.، پلودتکینا، ا.، اینگواگیاتو، س.، ۱۳۹۶، منشاء گازهای هیدروکربوری در گلفشان‌های جنوب شرق دریای خزر (دشت گرگان) بر اساس ترکیب مولکولی و ایزوتوپی کربن و هیدروژن: پژوهش‌های دانش زمین، ۲۹، ۸۷-۱۰۲.

Afshar-Harb, A., 1979, The stratigraphy, tectonics and petroleum geology of the Kopet Dagh region, northern Iran (Ph.D. Thesis). Imperial College London (University of London)

Allen, B. M., Vincent, S. J., Ismail-zadeh, A., Simmons, M., and Anderson, L., 2002, Onset of subduction as the cause of rapid Pliocene-Quaternary subsidence in the South Caspian basin: *Geology*, **30**, 775-778.

Brunet, M. F., Korotaev, M. V., Ershov, A. V., and Nikishin, A. M., 2003, The South Caspian Basin: A review of its evolution from subsidence modeling: *Sedimentary Geology*, **156**, 119-148.

بسیار کمتر و اندازه کوچک گلفشان‌ها در دشت گرگان را نسبت به سایر مناطق حوضه کاسپین جنوبی توجیه می‌کند؛ (۲) موقعیت این گلفشان‌ها با رأس تاقدیس‌های مدفون کپه‌داغ منطبق است و با توجه به اینکه وجود گلفشان‌های فعال از نشانه‌های فعال بودن منطقه از لحاظ عملکرد نیروهای زمین‌ساختی و وجود تنش‌امروزی در منطقه است، به‌نظر می‌رسد تداوم چین‌خوردگی و دی‌پایرسم رسوبات عمیق کپه‌داغ مانند سازند زرد در موقعیت‌یابی این گلفشان‌ها مؤثر است؛

(۳) تشکیل و توسعه گسل‌ها در رأس چین‌خوردگی‌های عمیق که مربوط به کشش ایجادشده در این موقعیت ساختاری است، مسیرهای مناسبی برای خروج گل و هیدروکربن از اعماق مختلف به سطح فراهم می‌آورد. البته، روبراه ضخیم رسوبات دوران نوزیستی، گسترش گسل‌های وزنی در این منطقه را تشدید کرده است؛

(۴) با توجه به تداوم گسل‌ها درون رسوبات عمیق دوران میانه‌زیستی، به‌نظر می‌رسد بخشی از مواد خارج‌شده از گلفشان از جمله گازهای خروجی، منشاء کپه‌داغی داشته باشد؛

(۵) افزایش ضخامت رسوبات کاسپین به سمت باختر و در نتیجه، تفاوت در عمق قرارگیری رسوبات کپه‌داغ به‌عنوان تأمین‌کننده بخشی از مواد خروجی گلفشان‌ها به‌ویژه گازها، سبب تفاوت در عمق سیالات و گازهای خروجی از این

Devlin, W. J., Cogswell, J. M., Gaskins, G. M., Isaksen, G. H., Pitcher, D. M., Puls, D. P., Stanley, K. O., and Wall, G. R. T., 1999, South Caspian Basin; Young, cool, and full of promise: *GSA Today*, **9**, 1-9.

Farhadian Babadi, M., Mehrabi, B., Tassi, F., Cabassi, J., Pecchioni, E., Shakeri, A., and Vaselli, O., 2020, Geochemistry of fluids discharged from mud volcanoes in SE Caspian Sea Gorgan Plain, Iran: *International Geology Review*, doi.org/10.1080/00206814.2020.1716400.

Fedynsky, V. V., Fomenko, K. E., Garkalenkov, J. A., Goncharov, V. P., Khrychev, B. A., Malovintsky, Y. P., Milashin, A. P., and

- Neprochov, J. P., 1972, The Earth's crust of the inland seas and continental depressions of the west Tethys region: 24th International Geological Congress, Montreal, P. Q., Section 3: Montreal, Canada, International Union of Geological Sciences, 51–57.
- Fowler, S. R., Mildenhall, J., Zalova, S., Riley, G., Elsley, G., Desplanques, A., and Guliyev, F., 2000, Mud volcanoes and structural development on Shah Deniz: *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **28**, 189–206.
- Guliyev, I. S., Feizullayev, A. A., and Tagiyev, M., 1997, Isotopic–geochemical characteristics of organic matter (source rocks), oil and gas in the south Caspian basin, in Lerch, I., Ali-Azdeh, A., Guliyev, I., Bagirov, E., Nadirov, R., Tagiyev, M., Feizullayev, A., eds., *South Caspian Basin: Stratigraphy, Geochemistry and Risk Analysis: Institute of Geology of Azerbaijan Academy of Sciences (Baku)*, 90–152.
- Hollingsworth, J., Jackson, J., Walker, R., and Nazari, H., 2008, Extrusion tectonics and subduction in the eastern South Caspian region since 10 Ma: *The Geological Society of America*, **36**, 763–766, doi:10.1130/G25008A.1.
- Huseynov, D. A., and Guliyev, I. S., 2004, Mud volcanic natural phenomena in the South Caspian Basin: geology, fluid dynamics and environmental impact: *Environmental Geology*, **46**, 1012–1023.
- Inan, S., Namik Yalcin, M., Guliev, I. S., Kuliev, K., and Feizullayev, A. A., 1997, Deep petroleum occurrences in the Lower Kura Depression, South Caspian Basin, Azerbaijan: an organic geochemical and basin modeling study: *Marine and Petroleum Geology*, **14**, 731–762.
- Jackson, J., Priestley, K., Allen, M., and Berberian, M., 2002, Active tectonics of the south Caspian basin: *Geophysical Journal International*, **148**, 214–245.
- Jones, R. W., and Simmons, M. D., 1997, A review of the stratigraphy of Eastern Paratethys (Oligocene-Holocene), with particular emphasis on the Black Sea, in Robinson, A., ed., *Regional and Petroleum Geology of the Black Sea and Surrounding Region: American Association of Petroleum Geologists Memoir*, **68**, 39–52.
- Katz, B., Richards, D., Long, D., and Lawrence, W., 2000, A new look at the components of the petroleum system of the South Caspian Basin: *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **28**, 161–182.
- Kavoosi, M., Lasemi, Y., Sherkati, S., and Moussavi-Harami, R., 2009, Facies analysis and depositional sequences of the Upper Jurassic Mozduran Formation, a carbonate reservoir in the KopetDagh Basin, NE Iran: *Journal of Petroleum Geology*, **32**, 235–259.
- Knapp, C. C., Knapp, J. H., and Connor, J. A., 2004, Crustal-scale structure of the South Caspian Basin revealed by deep seismic reflection profiling: *Marine and Petroleum Geology*, **218**, 1073–1081.
- Milkov, A. V., 2000, Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates: *Marine Geology*, **167**, 29–42.
- Moussavi-Harami, R., and Brenner, R. L., 1992, Geohistory analysis and petroleum reservoir characteristics of Lower Cretaceous (Neocomian) sandstone, eastern portion of Kopet-Dagh basin, northeast Iran: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, **76**, 1200–1208.
- Neprochov, Y. P., 1968, structure of the Earth's crust of epicontinental seas: Caspian, Black and Mediterranean: *Canadian Journal of Earth Sciences*, **5**, 1037–1043.
- Omrani, H., and Raghimi, M., 2018, Origin of the mud volcanoes in the South East Caspian Basin, Iran: *Marine and Petroleum Geology*, doi: 10.1016/j.marpetgeo.2018.05.017.
- Oppo, D., Capozzi, R., Nigarov, A., and Esenov, P., 2014, Mud volcanism and fluid geochemistry in the Cheleken peninsula, western Turkmenistan: *Marine and Petroleum Geology*, **57**, 122–134.
- Oppo, D., and Capozzi, R., 2015, Spatial association of mud volcano and sandstone intrusions, Boyadag anticline, western Turkmenistan: *Basin Research*, **28**, 827–839.
- Planke, S., Svensen, H., Hovland, M., Banks, D. A., and Jamtveit, B., 2003, Mud and fluid migration in active mud volcanoes in Azerbaijan: *GeoMarine Letters*, **23**, 258–268.
- Radfar, A., Rahimi Chakdel, A., Nejati, A., Soleimani, M., and Taati, F., 2018, New insights into the structure of the South Caspian Basin from seismic reflection data, Gorgan Plain, Iran: *International Journal of Earth Sciences*, <https://doi.org/10.1007/s00531-018-1659-x>.
- Ranjbaran, M., and Sotohian, F., 2015, Environmental impact and sedimentary structures of mud volcanoes in southeast of the Caspian Sea basin, Golestan Province, Iran:

- Caspian Journal of Environmental Sciences, **13**, 391-405.
- Reynolds, A. D., Simmons, M. D., Bowman, M. B. J., et al., 1998, Implications of outcrop geology for reservoirs in the Neogene Productive Series: Apsheron Peninsula, Azerbaijan: American Association of Petroleum Geologists Bulletin, **82**, 25–49.
- Rezvandehy, M., Aghabaei, H., and Tabatabaee Raissi, S. H., 2011, Integrating seismic attributes in the accurate modeling of geological structures and determining the storage of the gas reservoir in Gorgan Plain (North of Iran): Journal of Applied Geophysics, **73**, 187-195.
- Ritz, J. F., Nazari, H., Ghassemi, A., Salamati, R., Shafei, A., Solaymani, S., and Vernant, P., 2006, Active transtension inside central Alborz: A new insight into northern Iran–southern Caspian geodynamics: Geology, **34**, 477–480, doi:10.1130/G22319.1.
- Robert, A. M. M., Letouzey, J., Kavooosi, M. A., Sherhati, S., Müller, C., Vergés, J., and Aghababaei, A., 2014, Structural evolution of the Kopeh Dagh fold-and-thrust belt (NE Iran) and interactions with the South Caspian Sea Basin and Amu Darya Basin: Marine and Petroleum Geology, **57**, 68-87.
- Seyed-Emami, K., 1975, Jurassic–Cretaceous Boundary in Iran, AAPG Bull, **59**, 231–238.
- Smith-Rouch, L. S., 2006, Oligocene-Miocene Maykop/Diatom total petroleum system of the south Caspian basin province, Azarbaijan, Iran and Turkmenistan: Bulletin 2201-I, U.S. Geological Survey.
- Soleimani, M., Aghajani, H., and Heydari-Nejad, S., 2018, Structure of giant buried mud volcanoes in the South Caspian Basin: Enhanced seismic image and field gravity data by using normalized full gradient method: Interpretation, **6**(4), 443p.
- Stewart, S. A., and Davies, R. J., 2006, Structure and emplacement of mud volcano systems in the South Caspian Basin: American Association of Petroleum Geologists Bulletin, **90**, 771–786.
- Torres, M. A., 2007, The petroleum geology of western Turkmenistan: The Gograndag-Okarem province, in P. O., Yilmaz, and G. H., Isaksen, eds., Oil and Gas of the Greater Caspian area: American Association of Petroleum Geologists, Studies in Geology, **55**, 109–132.
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., et al., 2004, Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman: Geophysical Journal International, **157**, 381–398.
- Yusifov, M., and Rabinowitz, P. D., 2004, Classification of mud volcanoes in the South Caspian Basin, offshore Azerbaijan: Marine and Petroleum Geology, **21**, 965–975.
- Yusifov, M. Z., and Rabinowitz, P. D., 2003, Seismic interpretation and classification of mud volcanoes of the South Caspian Basin, Offshore Azerbaijan: The Offshore Technology Conference.

## Origin of the Gharnyaregh and Neftelijeh mud volcanoes in Gorgan plain, Iran

Somayeh Kalaneh<sup>1</sup>, Farzin Ghaemi<sup>2\*</sup>, Seyed Reza Mousavi-Harami<sup>3</sup> and Hosein Mohajer Soltani<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. Student, Department of Geology, Faculty of Sciences, Ferdowsi Mashhad University, Mashhad, Iran

<sup>2</sup> Associate Professor, Department of Geology Faculty of Sciences, Ferdowsi Mashhad University, Mashhad, Iran

<sup>3</sup> Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Ferdowsi Mashhad University, Mashhad, Iran

<sup>4</sup> Ph.D. Student, Khazar Oil Exploration and Production Company (KEPCO), Tehran, Iran

(Received: 11 June 2022, Accepted: 22 October 2022)

### Summary

Mud volcanoes are natural phenomena that provide an essential source of information about subsurface sediments and deep structures. The phenomenon is usually associated with hydrocarbon accumulations in deep-seated strata. More than 30% of all mud volcanoes in the world are concentrated in the South Caspian Basin. Gorgan plain, as a part of the south Caspian lowland, is a transition zone between uplifting zones of the Alborz and Kopet Dagh and the subsiding basin of the south Caspian. Four active mud volcanoes in the western parts of the Gorgan Plain have extrusion of gas and mud. The existence of the possible hydrocarbon contents in this plain caused a reflection seismic survey and exploratory wells were performed in this area by the National Iranian Oil Company. In this paper, we used 2-D reflection seismic data and well top data for the investigation of stratigraphy and structural setting of the Neftlijeh and Gharnyaregh mud volcanoes. According to the Well Report, the area sediments are composed of the Tertiary to Quaternary sediments of the SCB and underlying pre-Tertiary sequence of the Kopet-Dagh basin and a missing Oligocene, Eocene, Paleocene and upper Cretaceous deposition are observed in the well. The interpretation of the seismic section shows that the Caspian basin deposits reveal a partial deformation and increasingly sloping toward the depocenter, while the sequence of Kopet Dagh is folded.

The Neftlijeh and Gharnyaregh mud volcanoes occurred on subsurface anticline axes of the Kopet Dagh and a cluster of conjugate normal faults developed into the Cenozoic formations above the hinge zone of these anticlines. The subsidence pattern is observable at the summit of the anticlines. The structure suggests the presence of a chamber within the crest of the anticline. It seems extrusion and material removal from this chamber caused subsidence and forming of the structure. The Oligo-Miocene Maykop Formation is the significant source of both the extruded mud and the petroleum in the south Caspian basin, which is not observed in the studied well due to later regional erosion. However, the Cheleken and Apsheron deposits, known as reservoir rocks, have a large thickness in the area. The Kashafud Formations are considered as the main source rock for the Kopet Dagh basin and the Mozduran and Tirgan formations are known as reservoir rocks. The occurrence of the Late Eocene compressional tectonic phase and following the folding of the Mesozoic sedimentary created structural traps at the strata. In addition, continued diapirism and uplifting of the deep-seated strata led to the growth of extensional faults and fractures over the hinge zones. These structures provide effective pathways for gas and fluid ascent from deep reservoirs to the surface. Generally, the results suggest that these mud volcanoes have a spatial and genetic relationship with buried folds. It seems the location of Gharnyaregh and Neftelijeh mud volcanoes is controlled by subsurface anticlines and their feeding source originated from both the Tertiary (SCB) and Pre-Tertiary (Kopet Dagh) units.

**Keywords:** South Caspian basin, Kopet Dagh basin, Mud volcano, structure, 2-D reflection seismic data

\*Corresponding author:

fghaemi@um.ac.ir