

## Determination of tectonic setting of mud volcanoes in the western part of Golestan Province, using geo-information technology

Hojjat Ollah Safari<sup>1\*</sup>, Maryam Rezaoust<sup>1</sup>, Mostafa Raghimi<sup>1</sup>

1- Geology Department, Faculty of Sciences, Golestan University, Gorgan, Iran

**Keywords:** Mud volcano, Tectonic setting, Kopet Dagh, South Caspian basin, Golestan Province

### 1-Introduction

Investigations on tectonic setting of Mud volcanoes show that these located mainly in active convergent margins with high rate of seismicity along fault zones, fault related folds and anticlinal axes (Milkov, 2005; Stewart and Davis, 2006). In spite of many investigations on Mud volcanos and their tectonic setting, unfortunately, the little studies performed about mud volcanoes in eastern of Caspian Sea (Feyzullayev, 2012; Bentacor, 2015; Ranjbaran and Sotohan, 2015). Therefore, these mud volcanoes, with geographic coordination  $53^{\circ} 52'$  to  $54^{\circ} 57'$  eastern longitude and  $36^{\circ} 56'$  to  $37^{\circ} 31'$  northern latitude were selected for a detail studies about determination and defining their tectonic setting by using remote sensing techniques, GIS environment abilities and complementary field investigations (as Geo-Information Technology, GiT).

### 2-Methodology

The adopted methodology in this research includes six steps which summarized as follows:

1. Preparation of available data.
2. Surface geological studies by using remote sensing techniques such as enhancing of Landsat 8 TM image and complementary field surveys.
3. Determination of surface structures by using remote sensing techniques such as semi-automated visual interpretation on directional filtered Landsat 8 TM image, then the digitizing of extracted faults and entering in GIS environment as data layers.
4. Determination of subsurface structures (faults and folds) on the basis of available published map (Nogol-e-Sadat and Almasian, 1993), then, the digitizing of them and finally entering of them in GIS environment as data layers.
5. Distinguishing of mud volcanoes on the basis of available data and complementary field surveys and finally entering in GIS environment as data layers.
- 6- The overlaying of data layers (consist of structures and mud volcanoes) in GIS environment and finally, investigation on their relationships and finally, proposition of a conceptual model of tectonic setting.

### 3- Results and discussion

This research shown that approximately 45 mud volcanoes spread in study area that five mud volcanoes: Gharnyaregh, Naftalijah, Suficam, Incheh and Gomishan are active. Other mud volcanoes categorized as inactive and probable classes. Some magnetic lineaments and basement faults were determined which the most important of them is a fault zone with north-south trend, right-lateral strike-slip mechanism and 30 Km width in central part of study area. These mud volcanoes, which aligned around this determined basement fault have tectonic indicators such as alignment along the main faults, having active areal seismicity (as seismic trends located on these fault zone) and locating over anticlinal axes with hydrocarbour reservoir. In regard to these facts, we can deduced that these mud volcanoes are tectonic related placed in a Transcurrent plate boundary

\*Corresponding authorsafari.ho@gmail.com

DOI: 10.22055/aag.2020.32110.2071

Received 2019-12-31

Accepted 2020-03-25

which defined the western Kopet Dagh with continental crust (Aursky, 1971) and south Caspian basin with oceanic crust (Delvin and Cogswell, 1999) boundary as a zone with North-South trend and 30 Km width.

#### 4-Conclusions

In this research, 45 mud volcanoes were determined on the basis of remote sensing techniques and carefully field investigations. Also, a main basement fault with N-S strike and 30 km width were distinguished which define the tectonic boundary of western Kopet Dagh and South Caspian Basin zones as a transcurrent fault zone. These mud volcanoes have important characteristics which shown that they formed related to tectonic setting and also, aligned around the determined main basement fault. On the basis of these documents, this hypothesis was formed that they are related to a transcurrent tectonic regime.

#### Acknowledgments

This research was carried out as a M.Sc. thesis with cooperation of Geological Department of Golestan University. The authors thank from member of Geology department and also, the manager of research and technology.

#### References

- Amursky, G.I., 1971. The deep structure of the Kopet-Dagh. *Geotectonics* 1, 34-40.
- Bentacor, I.S., 2015. Mud diapirs and folds in South Caspian Basin: Geometry and syn-sedimentary evolution of structures with petroleum interest, PhD Thesis, University of Granada, 221p.
- Delvin, W.J., Cogswell, J.M., etc. 1999. South Caspian Basin: Cool, Young and full of Promise, *GSA Today. Geological Society of America* 9 (7), 1-3.
- Feyzullayev, A.A., 2012. Mud volcanoes in the South Caspian basin: Nature and estimated depth of its products. *Natural Science* 4, 445-453.
- Milkov, A.V., 2005. Global distribution of mud volcanoes and their significance in petroleum exploration, as a source of methane in the atmosphere and hydrosphere, and as Geohazard, In: Martinelli, G., Panahi, B. (eds) *Mud volcanoes, Geodynamics and Seismicity, IV Earth and Environmental Sciences* 51, 29-34.
- Nogol-e-Sadat, M.A.A., Almasian, M., 1993. Tectonic Map of Iran, Scale: 1/1000000, Treatise on the geology of Iran, Geological Survey of Iran.
- Ranjbaran, M., Sotohian, F., 2015. Environmental impact and sedimentary structures of mud volcanoes in southeast of the Caspian Sea basin, Golestan Province, Iran. *Caspian Journal Environmental Science* 13 (4), 391-405.
- Stewart, S. A., Davies, R. J., 2006. Structure and emplacement of mud volcano systems in the South Caspian Basin. *AAPG Bulletin* 90 (5), 771-786.

#### HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Safari, H., Rezadoust, M., Raghimi, M., 2020. Determination of tectonic setting of mud volcanoes in the western part of Golestan Province, using geo-information technology. *J. Adv. Appl. Geol.* 10(3), 421-435.

DOI: 10.22055/AAG.2020.32110.2071

url: [https://aag.scu.ac.ir/article\\_15488.html?lang=en](https://aag.scu.ac.ir/article_15488.html?lang=en)

## تعیین جایگاه زمین‌ساختی گلفشان‌های غرب استان گلستان به کمک تکنیک‌های زمین‌اطلاعاتی

حجت اله صفری\*

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه گرگان، گرگان، ایران

مریم رضادوست

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه گرگان، گرگان، ایران

مصطفی رقیمی

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه گرگان، گرگان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۰۱

\*safari.ho@gmail.com

### چکیده

بررسی گلفشان‌ها نشان می‌دهد که از نظر زمین‌ساختی عمدتاً در حاشیه‌های فعال همگرا با نرخ بالای لرزه‌خیزی توزیع شده که اغلب در طول گسل‌ها، چین‌های مرتبط با گسلش و محورهای تاقدیس قرار گرفته‌اند. به همین دلیل در پژوهش حاضر به مطالعه و تفسیر زمین‌ساختی گلفشان‌های غرب استان گلستان پرداخته شد تا اولاً ارتباط آنها با پدیده‌هایی نظیر ساختارهای زمین‌شناسی (نظیر گسل‌ها و چین‌ها) و لرزه‌خیزی منطقه مشخص گردد و ثانیاً محیط زمین‌ساختی آنها شناسایی شود. نتایج این پژوهش نشان داد که حدود ۴۵ گلفشان در منطقه مورد مطالعه وجود دارند که از بین آنها ۵ گلفشان قارنبارق، نفتلیجه، صوفیکم، اینچه و گمیشان فعال می‌باشند. این گلفشان‌ها دارای شاخصه‌های گلفشان‌های با منشاء زمین‌ساختی نظیر به خط‌شدگی در طول زون‌های اصلی گسلش و قرارگیری بر روی روندهای لرزه‌خیز منطبق بر این گسل‌ها و همچنین واقع شدن در بالای ساختارهای تاقدیسی (دارای مخازن هیدروکربوری) می‌باشند. با توجه به این شواهد، این گلفشان‌ها باید در رده گلفشان‌های با منشاء زمین‌ساختی قرار گیرند که بر یک مرز زمین‌ساختی تراگذر در حدفاصل بخش غربی زون ساختاری کپه‌داغ غربی (با پوسته قاره‌ای) و خزر جنوبی (با پوسته اقیانوسی) در پهنه‌ای شمالی- جنوبی به عرض ۳۰ کیلومتر واقع شده‌اند.

**کلمات کلیدی:** گلفشان، محیط زمین‌ساختی، کپه‌داغ، حوضه خزر جنوبی، استان گلستان

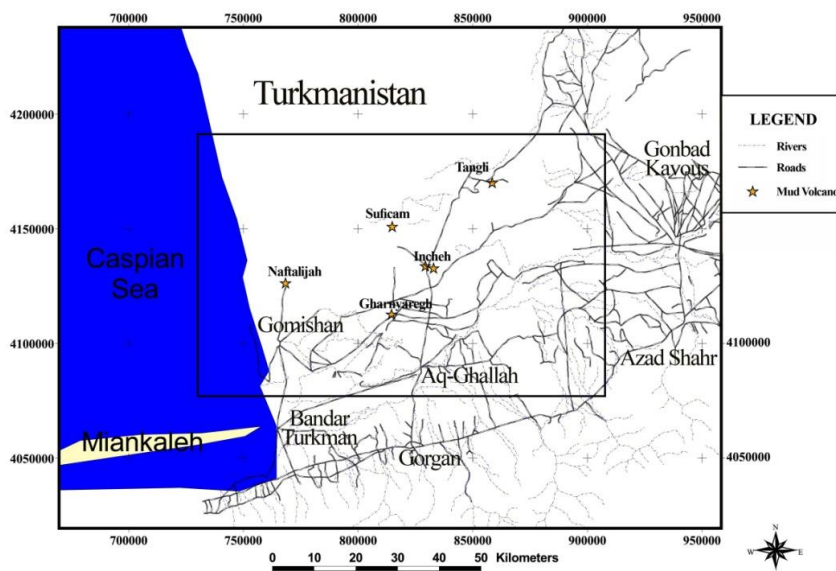
### مقدمه

داده و باعث صعود ستونی از سیال و رسوب می‌شود و این عمل تا رسیدن به سطح و کاهش فشار سیال ادامه خواهد یافت (Deville et al., 2003). بررسی گلفشانها در مناطق مختلف دنیا نشان می‌دهد که بیشترین میزان گلفشان‌ها در حاشیه فعال مرزهای همگرا با نرخ بالای لرزه‌خیزی توزیع شده که اغلب در طول گسل‌ها، چین‌های مرتبط با گسلش و محورهای تاقدیس واقع شده‌اند. میلکوف (Milkov, 2005) طی بررسی‌های انجام داده به این نتیجه رسید که گلفشان‌ها اکثراً (حدود ۸۰٪) در محیط‌های زمین‌ساختی مختلفی مانند زون‌های فرورانش (مانند گلفشان‌های مکران)، محیط‌هایی با رژیم فشارشی (مانند دریای خزر جنوبی) و محیط‌هایی با نرخ رسوبگذاری بالا (مانند دلتاهای امروزی) دیده می‌شوند. به این ترتیب، دیابیرسم گل در مناطق زمین‌ساختی همگرا مانند قفقاز (Planke et al., 2003) اندونزی و خزر جنوبی (Omrani and Raghimi, 2018; Rezadoust, 2018) خیزی زیادند. فیض‌الله‌یف (Feyzullayev, 2012) ضمن بررسی گلفشان‌های اطراف حوضه خزر (کاسپین) اظهار نمود که به دلیل فراوانی، ارتفاع، اندازه و ارتباط با منابع نفت/گاز، این گلفشان‌ها یکی از مهم‌ترین گلفشان‌های جهان می‌باشند. مقایسه گل‌فشان‌های بخش باختری و خاوری دریای خزر جنوبی توسط یوسفوف و رابینوویتس (Yusifov and Rabinowitz, 2004) نشان می‌دهد که گل‌فشان‌های بخش باختری فراوان‌تر و از نظر اندازه بزرگ‌تر از گل‌فشان‌های بخش خاوری دریای خزر می‌باشند.

گلفشان‌ها پدیده‌های زمین‌شناسی هستند که در انواع فعال آنها به‌طور مداوم گل و لای سردی به خارج پرتاب و یا روان شده و با انباشته شدن روی هم کم‌کم مخروط‌های کوچک و بزرگ از جنس گل رس تشکیل می‌دهند که از نظر هندسی دارای ارتفاع ۵۰۰-۲ متر و با قاعده‌ای به قطر ۲۰-۳۵۰۰ متر می‌باشند (Stewart and Davies, 2006; Jakubov et al., 1971). این گلفشان‌ها تپه‌ای و نسبتاً دایره‌ای شکل بوده و دارای یک دهانه اصلی و چند دهانه کوچکتر جانبی می‌باشند و دهانه اصلی معمولاً در وسط گلفشان واقع شده و کاسه‌ای یا تیغه‌ای شکل است (Mirkazemian, 2009). به مجموعه ساختارهای مرتبط با یک شکل ساختمانی (گلفشان) و مجموعه تغذیه کننده آنها سیستم گلفشان گفته می‌شود (Stewart and Davies, 2006). در مجموع گلفشان‌ها می‌توانند منشاء زمین‌ساختی، زمین‌ساختی- رسوبی، ماگمایی و یا مختلط داشته باشند. فشارهای زمین‌ساختی، وزن رسوبات سرباره‌ای و نشت گاز (بخصوص متان) از میادین هیدروکربوری اصلی‌ترین محرک جهت ایجاد گلفشان‌ها می‌باشد که سبب تجمع سیالاتی با فشار زیاد در طول ناپیوستگی‌های مورفولوژیکی و ساختارهای زمین‌شناسی (صفحات گسلش و محور تاقدیس-ها) می‌شود. این افزایش حجم و فشار سیال بخشی از توده گل (به شکل یک گنبد) را کم وزن نموده و با فشار منفی رو به بالا (Bouyancy)، حرکت

علاوه بر مطالعات فراوانی که بر روی گلفشان‌های غرب خزر (حوضه خزر جنوبی و قفقاز) صورت گرفته است؛ کار کمی بر روی گلفشان‌های شرق دریای خزر صورت پذیرفته است. بر این اساس، گلفشان‌های غرب استان گلستان با مختصات جغرافیایی  $52^{\circ}$  تا  $54^{\circ}$  و  $57^{\circ}$  درجه شرقی و

شکلی (شکل ۱) تا با بررسی و تفسیر زمین‌ساختی آنها، رابطه آنها با مرزهای فعال صفحات زمین‌ساختی، گسل‌ها، چین‌ها و لرزه‌خیزی مشخص گردیده و در نهایت بتوان در مورد موقعیت زمین‌ساختی آنها قضاوت نمود.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به منطقه مورد مطالعه به همراه محل شناخته‌شده‌ترین گلفشان‌های منطقه.  
Fig. 1. Geographical setting and access roads to study area together with well-known Mud volcanoes.

بخش باختری خود به دو زیربخش تقسیم شده است، یکی زیربخش خاوری با رخنمون‌های سنگی کپه‌داغ و دیگری زیربخش باختری (به صورت دشت) می‌باشد (Rezadoust, 2018; Aghanabati, 2004). مهم‌ترین روند گسلش در زیربخش خاوری (کپه‌داغ باختری) گسل‌هایی با روند شمال‌خاور-جنوب‌باختری هستند که تقریباً به موازات گسل خزر (مرز کپه‌داغ-البرز) قرار گرفته و دارای مکانیسم حرکتی امتداد لغز چپ‌بر با مقداری مولفه معکوس می‌باشند (Safari, 2014).

ب- **حوضه خزر جنوبی:** از میوسن میانی، همزمان با تکوین کوه‌های آلپ، دریای تیس به دو حوضه مدیترانه و پاراتیس تقسیم شده که حوضه خزر جنوبی بخشی از پاراتیس خاوری گردید (Aghanabati, 2004; Berberian and King 1981). اشتوکلین (1974, Stocklin) خزر جنوبی و پی‌سنگ بازالتی آن را باقیمانده تیس کهن می‌داند در صورتی که آپالوسکی (1974, Apolskey) پیدایش خزر جنوبی را نتیجه عملکرد یک گسل چپگرد در زمان ژوراسیک پسین - کرتاسه پیشین می‌داند که در انتهای جنوب خاوری آن فرورفتگی دریای خزر ایجاد شده است. همچنین بربریان (1983, Berberian) فرونشست خزر جنوبی و تشکیل پوسته اقیانوسی را حاصل دو فاز کششی در مزوزویک و ترشیری می‌داند. زون شاین و لوشیون (1986, Zonenshain and Le Pichon), حوضه خزر جنوبی را بخشی از حوضه اقیانوسی قفقاز بزرگ می‌دانند که در ۱۸۰ میلیون سال پیش، به صورت بازشدگی پشت کمان و در پشت جزایر کمانی پونتید خاوری و قفقاز کوچک به وجود آمده است. علوی (1991, Alavi) حاشیه جنوبی دریای خزر را دنباله باختری کپه‌داغ و لبه جنوبی صفحه توران می‌داند. داده‌های ژئوفیزیکی نشان می‌دهند که در حوضه خزر جنوبی، بر روی یک پی‌سنگ بازالتی، به ضخامت ۱۵ تا ۲۰ کیلومتر، توالی ستبری از

### موقعیت زمین‌ساختی منطقه

منطقه مورد بررسی در مرز بین زون‌های ساختاری کپه‌داغ - خزر جنوبی قرار گرفته است (شکل ۲). به همین دلیل در این پژوهش هر دو زون ساختاری معرفی می‌گردند که به شرح ذیل می‌باشند:

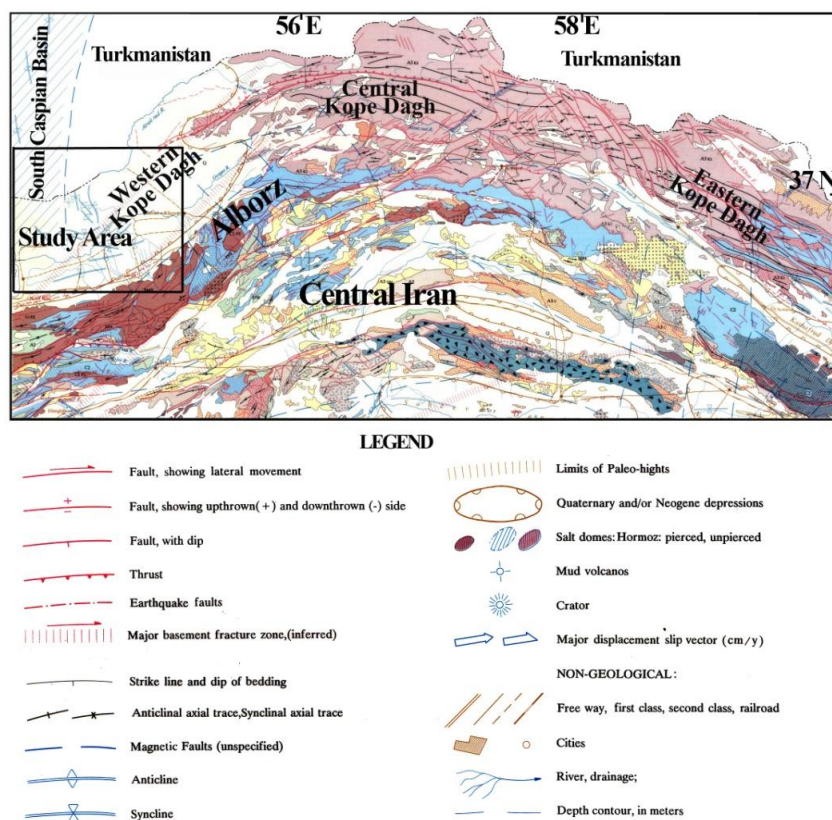
**الف- کپه‌داغ:** پهنه ساختاری - رسوبی کپه‌داغ در یک راستای تقریباً جنوب-خاوری - جنوب‌باختری (WNW تا ESE)، از خاور دریای خزر آغاز و پس از عبور از ترکمنستان و ایران، وارد خاک افغانستان می‌شود (Safari, 2014; Afsharharb, 1994). مرز شمالی این پهنه با فلات توران، منطبق بر گسل عشق‌آباد (با روند N310) است. مرز جنوبی کپه‌داغ با رخنمون‌های ناپیوسته منشورهای برافزاینده تیس کهن مشخص می‌شود که در شمال خاوری فریمان (سفیدسنگ)، جنوب باختری مشهد و جنوب گرگان برونزد دارند (شکل ۲). از نگاه زمین‌ساختی، شکل فعلی کپه‌داغ حاصل فازهای آلپ پایانی است. از نظر زمان تشکیل و سازوکار حرکتی، گسل‌های کپه‌داغ را به دو گروه گسل‌های همزمان با فرونشست حوضه (با روند خاوری - باختری و یا شمال خاوری - جنوب باختری با مکانیسم فعلی معکوس) و گسل‌های حین یا پس از رخداد کوهزاد (با روند NW-SE و NE-SW با مکانیسم-های امتداد لغز راست‌بر یا چپ‌بر) تقسیم نمود (Afsharharb, 1994).

از نظر ساختاری کپه‌داغ را می‌توان به سه بخش ساختاری باختری، مرکزی و خاوری با سه روند متفاوت تقسیم نمود (شکل ۲). به گونه‌ای که ساختارهای اصلی نظیر: روند چین‌ها، روند گسل‌های اصلی رانده و همچنین امتداد کوه‌ها و دره‌ها، در این سه بخش متفاوت می‌باشد (Rezadoust, 2018; Aghanabati, 2004). بخش باختری، که بخش عمده‌ای از منطقه مورد بررسی در آن قرار گرفته است، دارای روند شمال‌خاوری-جنوب‌باختری بوده و از باختر بجنورد تا دشت گرگان کشیده شده است.



سطح (۸ تا ۱۲ کیلومتر)، سن مزوزویک و پالئوزن دارند و در روی این سطح، سن رسوبات نئوزن - کواترنر و ضخامت آنها ۵ تا ۸ کیلومتر است.

پوشش رسوبی چین‌خورده وجود دارد که بین ۱۵ تا ۲۵ کیلومتر ضخامت دارد. در ژرفای ۸ تا ۱۲ کیلومتری پوشش رسوبی رویی، تغییراتی در طول امواج لرزه‌ای دیده می‌شود که حکایت از آن دارد که رسوبات واقع در زیر این



شکل ۲- موقعیت زمین‌ساختی منطقه مورد مطالعه (Nogol sadat and Almasian, 1993 با تصحیحات).  
Fig. 2. Tectonic setting of study area (Modified after Nogol sadat and Almasian, 1993).

### وضعیت زمین‌شناسی گلفشان‌های منطقه

در ایران حدود ۷۰ درصد گلفشان‌های حوضه خزر جنوبی و کپه‌داغ (۴۳) گلفشان فعال، نیمه فعال و احتمالی) در محدوده بندرترکمن - گنبد کاووس قرار گرفته‌اند (Rezadoust, 2018؛ شکل ۳) که مهمترین آنها گلفشان‌های صوفیکم، قارنیارق (شمال شهرستان آق‌قلا)، نفتلیجه (شمال شرق شهرستان گمیشان) و اینچه (کنارتالاب اینچه‌برون) می‌باشند (شکل ۱). خروج گاز، آب حاوی کلرید سدیم و مواد نفتی آروماتیکی سبب فعال شدن این گلفشان‌ها گردیده است. این گلفشان‌ها به مخروطی شکل با قطر حداکثر ۷۰۰ متر (در گلفشان قارنیارق) هستند و مطالعات نشان می‌دهد که قسمت مرکزی آن‌ها از جنس ماسه و بخش بیرونی آن‌ها از جنس گل باشد. این مخروط‌ها در مناطق لرزه‌خیز و در امتداد برخی از گسل‌ها به وجود آمده و تهنسست سریع مواد و خروج بعدی آب از لایه لای ذرات باعث تشکیل آتشفشان گلی در سطح رسوبات شده است (Ranjbaran and Sotohan, 2015; Fasl-e-Bahar et al., 2010). دمای روانه گلی و سیالات همراه این گلفشان‌ها پایین بوده و غلظت روانه گلی آنها نسبت به سایر گلفشان‌های ایران (در ناحیه مکران) بالا می‌باشد (Fasl-e-Bahar et al., 2010; Rezadoust, 2018).

بر مبنای اطلاعات حاصل از عملیات لرزه نگاری، وجود تاقدیس‌ها و ناودیس‌های بزرگی در بخش جنوبی دریای خزر و ارتباط نزدیک محل گلفشان‌ها با این ساخت‌ها به اثبات رسیده است (Omrani and Raghimi, 2018; Fasl-e-Bahar et al., 2010). در بررسی گلفشان‌های منطقه مورد مطالعه، این نتیجه حاصل گردیده است که اکثر گلفشان‌های این منطقه با نتفگیرهای ساختاری مرتبطند (Rezadoust, 2018). بر طبق مطالعات میدانی و آزمایشگاهی، سن رسوبات گلفشان نفتلیجه میوسن بالایی تا کواترنر می‌باشد (Mousavi Rouhbakhsh, 2001; Fasl-e-Bahar et al., 2009). به عقیده عمرانی (Omrani, 2017) گلفشان قارنیارق شامل دو بخش داخلی و خارجی می‌باشد. بخش داخلی اثرات فعالیت‌های جدیدتر را به نمایش گذاشته و شامل برش‌های گلفشان (ملانژ دیاپیری) است که از مواد دانه‌ریز ماسه‌ای - رسی است که دارای قطعات سنگی زاویه‌دار تا گرد شده (شامل لوماسل، ماسه‌سنگ، مارن و آهک) در اندازه‌های مختلف است. در حالی که بخش بیرونی از مواد قدیمی‌تر و لبه‌های ریزشی تشکیل شده است (شکل ۳a). گلفشان صوفیکم به شکل ۵ فروچاله ساختاری با امتداد شمال شرق - جنوب غربی دیده می‌شود (Rezadoust, 2018) خروج حباب‌های گازی به همراه تراوش‌های عمدتاً گل و آب در چهار دهانه این گلفشان به صورت ممتد قابل مشاهده است (شکل ۳c). گلفشان اینچه از نظر

بوده و در سطح آن بر اثر خروج گاز متان در چند نقطه جوشش دیده می‌شود.

ریخت‌شناسی به صورت گودالی با دیوارهای در حدود ۷۰ درجه که متناسب با میزان بارندگی در منطقه، ژرفای آن تغییر می‌کند. گل این گلفشان از ذرات رس، سیلت به رنگ خاکستری روشن تشکیل شده و دارای گرانیروی کمی



شکل ۳- شواهد صحرایی از مهم‌ترین گلفشان‌های فعال منطقه؛ (a) قارنیارق، (b) نفتلیجه، (c) اینچه، (d) صوفیکم، (e) گلفشان غیرفعال سقرتپه، (f) گلفشان احتمالی آلتین توکماغ.  
 Fig. 3. Field evidences of active mud volcanoes; (a) Gharnyaregh, (b) Naftalijeh, (c) Incheh, (d) Suficam, (e) Inactive Segher-Tappe mud volcano, and (f) Probable Altin-Tokmagh mud volcano.

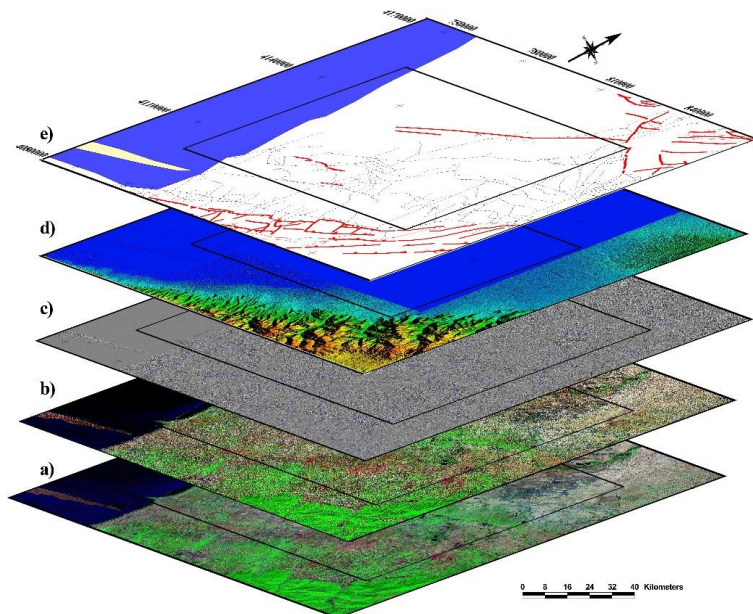
### روش کار

روش‌های بکار رفته در این پژوهش پیمایشی و توصیفی-تحلیلی بوده است. بدین منظور اقدام به مطالعه و جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز و پردازش اولیه آن‌ها به منظور ایجاد پایگاه داده‌ها در محیط نرم‌افزاری شده است. سپس این داده‌ها با هدف استخراج اطلاعات مورد تحلیل قرار گرفته و یافته‌ها از طریق بررسی‌های میدانی کنترل شده‌اند. مراحل اصلی این پژوهش به شرح ذیل می‌باشند:

**روش‌های سنجش از دور:** جهت شناسایی گسل‌ها، ابتدا تصویر ماهواره‌ای ETM+ (مربوط به سال ۲۰۱۷) تهیه و تصویری با رنگ کاذب (از ترکیب باندهای ۱-۴-۷) بدست آمده و به روش امتزاج تصاویر (Fusion) به

کمک باند ۸ پانکروماتیک (با دقت ۱۴ متر) تفکیک مکانی آن ارتقاء داده شد (شکل ۴a). سپس با اعمال فیلترهای بالاگذر (High Pass) و بارزکننده لبه‌ها (Edge Sharpening) تصویر یادشده بارزسازی شد (شکل ۴b). در ادامه با اعمال فیلترهای جهت‌دار (Convolution/Directional) در جهات ۴۵، ۹۰، ۱۳۵، ۱۸۰ درجه بر روی تصویر (شکل ۴c) و همچنین با باری گرفتن از تصویر مدل رقومی ارتفاعی (شکل ۴d) در محیط نرم‌افزار (ENVI 4.3) اقدام به شناسایی و استخراج شکستگی‌های موجود در منطقه گردید (شکل ۴e).



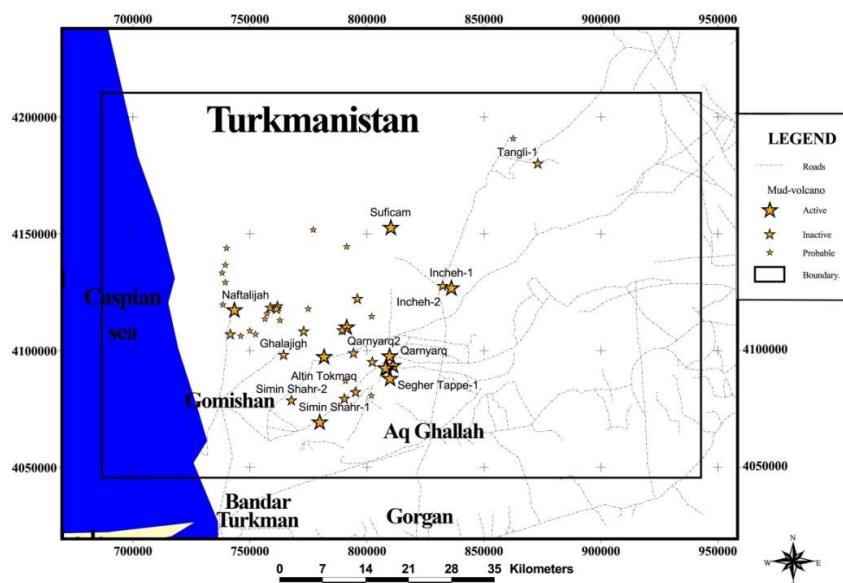


شکل ۴- استخراج خطوطها با استفاده از (a) تصویر ماهواره‌ای با ترکیب باند ۷۴۱، (b) تصویر تلفیق شده برای ارتقاء تفکیک مکانی، (c) فیلتر جهت دار اعمال شده بر روی تصویر، (d) مدل رقومی ارتفاعی منطقه بهمراه و (e) خطوطهای استخراج شده.

Fig 4. Extracting of lineaments by using: (a) Satellite image with band composition 741, (b) Enhanced image by fusion for extolling of spatial resolution, (c) Imposing of directional filters on image, (e) Digital Elevation Model (DEM) together with (f) Extracted Lineaments

همچنین با استفاده از این روش‌ها مناطق مظنون به وجود گلفشان‌ها که به صورت اشکال ژئومورفولوژیکی مخروطی شکل با مقاطع دایروی تا بیضوی در تصاویر ماهواره‌ای دیده می‌شوند؛ مورد شناسایی قرار گرفتند. این فرایند منجر به شناسایی بیش از ۷۰ پدیده مخروطی شکل گردید (شکل ۵).  
**پیمایش‌های صحرائی:** در طی عملیات صحرائی کلیه خطوطهای استخراج شده توسط روش‌های سنجش از دور کنترل و سپس اندازه‌گیری گردیدند و سپس گسل‌هایی که با شواهد صحرائی به اثبات رسیدند؛ در نقشه

ساختاری بهمراه سایر عوارض آورده شدند (شکل ۶). همچنین محل گلفشان‌های احتمالی (مورد ۷۳) مورد پیمایش‌ها و کنترل‌های صحرائی قرار گرفت که در نهایت تعداد ۴۳ مخروط گلفشان تشخیص داده شده و به سه دسته فعال، نیمه فعال و احتمالی دسته‌بندی گردیدند (شکل ۵). همچنین انجام نمونه‌برداری از لجن و آب گلفشان‌ها انجام گردید.

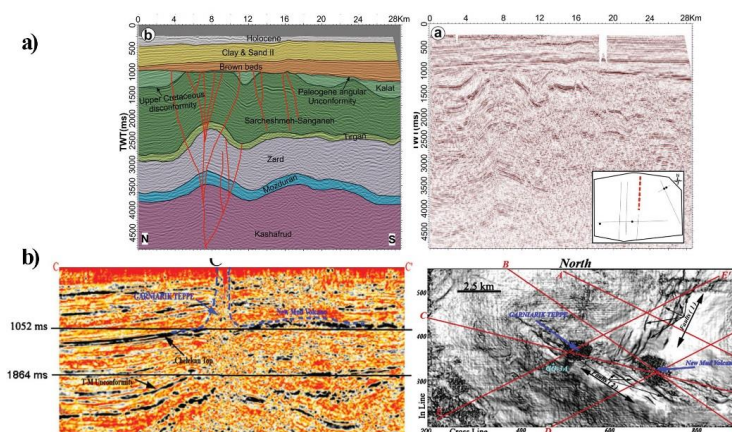


شکل ۵- شناسایی گلفشان‌های منطقه و دسته‌بندی آنها به سه دسته فعال، نیمه فعال و احتمالی.

Fig 5. Determination of mud volcanoes and categorized to three class; active, passive and probable.

ساختارهای سطحی قرار داده شد. جهت بررسی وضعیت چین‌های مدفون نیز چین‌های زیرسطحی از نقشه‌های مذکور استخراج و در محیط GIS رقومی گردید. علاوه بر این مسئله، با استفاده از مقاطع ژئوفیزیک لرزه‌ای تهیه شده ساختارها کنترل گردیدند (اشکال a و b). در نهایت تمامی ساختارهای عمقی استخراج‌شده بر روی سایر ساختارهای سطحی انداخته شد و در نهایت نقشه ساختاری منطقه تهیه گردید (شکل ۷).

**تحلیل و استخراج اطلاعات زیرسطحی:** در این پژوهش از اطلاعات زیرسطحی نظیر نقشه‌های ژئوفیزیک هوایی، نقشه خطواره‌های مغناطیسی و نقشه‌های زیرسطحی (برگرفته از منابع مختلفی نظیر: Delvin, 1999; Nogol-e-sadat and Almasian, 1993; NIOC, 1977; GSI, 2006) استفاده گردیده و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. برای شناسایی گسل‌های پی‌سنگی و اصلی از یک‌سری شواهد برای شناسایی گسل‌های پی-سنگی بر روی تصاویر مغناطیس هوایی و ژئوفیزیک هوایی استفاده شد. برای اینکار نقشه‌های فوق در محیط GIS رقومی شده و سپس بر روی سایر

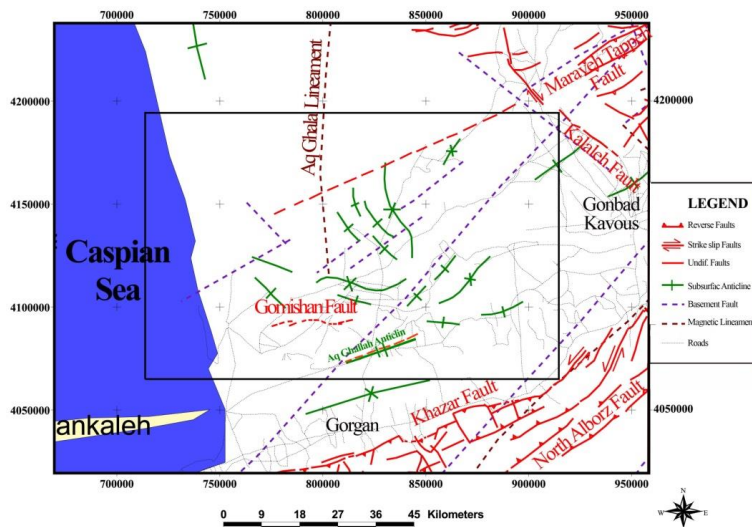


شکل ۶- کنترل ساختارهای استخراج‌شده توسط مقاطع ژئوفیزیک؛ (a) مقطعی از ادامه گسل معکوس مراوه تپه با مقداری مولفه امتداد لغز که به صورت مقطع V شکل در شمال گنبد کاووس (Radfar et al., 2018) ظاهر نموده است، (b) مقطعی از تاق‌دیس زیرسطحی قارنیارق و نحوه تشکیل گلفشان قارنیارق (Rezvandehi et al., 2011).

Fig. 6. Controlling of extracted lineaments by using seismic sections; (a) a section from Maraveh-Tappe with V-shape in North of Gonbad-Kavous (Modified after Radfar et al., 2018), (b) a section from Gharnyaregh subsurface anticline and the forming of related mud volcano (modified after Rezvandehi et al., 2011).

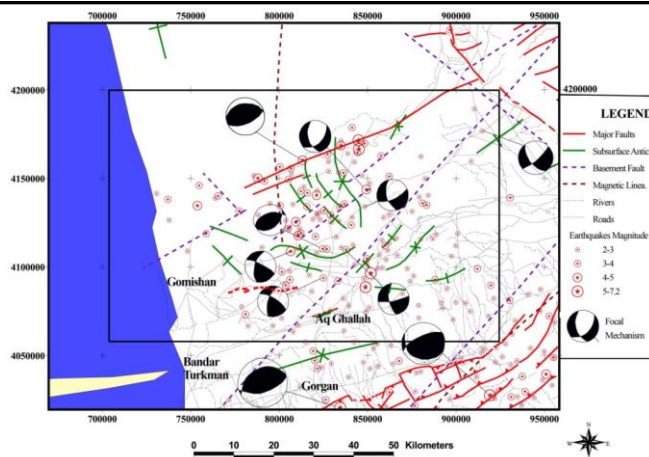
اساس بزرگا) ترسیم گردید. در ادامه حل مکانیسم کنونی زلزله‌های اصلی را نیز از کاتالوگ‌های معتبر (Rustaei et al., 2015) گردآوری گردیده و در نقشه به نمایش در آمد. در نهایت تمامی اطلاعات لرزه‌خیزی (در قالب لایه-های اطلاعاتی بر روی ساختارهای سطحی و زیرسطحی انداخته شده و نقشه لرزه-زمین‌ساختی منطقه تهیه گردید (شکل ۸).

**تعیین وضعیت لرزه‌خیزی منطقه:** داده‌های موجود زلزله‌های منطقه مورد بررسی از کاتالوگ‌های موسسات معتبری نظیر: سازمان زمین‌شناسی آمریکا دانشگاه هاروارد و موسسه ژئوفیزیک ایران استخراج گردید. به این صورت که مشخصاتی نظیر مختصات جغرافیایی، زمان رخداد، بزرگای زلزله و عمق زلزله به صورت فایل Excel درآمده و تبدیل به فایلی با پسوند DBF گردید. در ادامه فایل مذکور فراخوانده شده و ابتدا به صورت نقاط با اندازه متفاوت (بر



شکل ۷- نقشه ساختاری منطقه مورد مطالعه.  
Fig. 7. Structural map of study area.



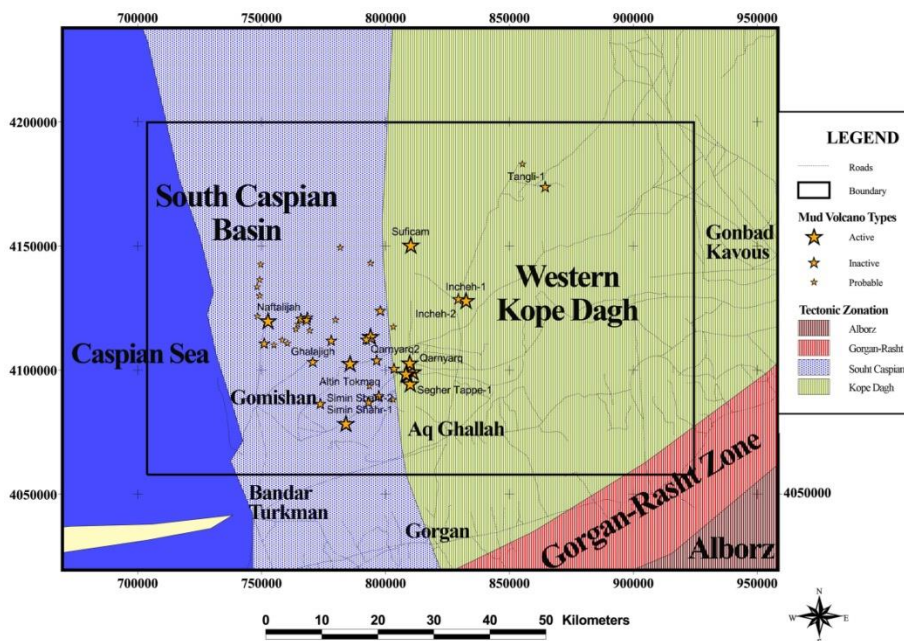


شکل ۸- نقشه لرزه‌زمین‌ساختی منطقه مورد مطالعه و پیرامون.

Fig. 8. Seismo-tectonic map of study area and adjacent.

ارتباط‌سنجی گلفشان‌ها با سایر پدیده‌های زمین‌شناسی: برای این منظور لایه اطلاعاتی محل گلفشان‌ها (با توجه به دسته‌بندی آنها، در محیط GIS بر روی سایر لایه‌های اطلاعاتی نظیر ساختارهای سطحی، ساختارهای زیرسطحی، وضعیت لرزه‌خیزی و پهنه‌بندی زمین‌ساختی انداخته شده و ضمن تحلیل فضایی، نسبت به ارتباط‌سنجی با این پدیده‌ها اقدام گردیده است.

تعیین پهنه‌های ساختاری ناحیه‌ای: ابتدا نقشه‌های پهنه‌بندی زمین-ساختی ایران از منابع مختلف گردآوری شده (مانند: Nogol-e-sadat, 1988; Stocklin, 1968; Berberian, 1995; Berberian, 1983, Nabavi, 1977) و در محیط GIS رقومی گردیده و با هم مقایسه شدند. سپس بر اساس عمومی‌ترین و قابل قبول‌ترین پهنه‌بندی‌ها، اقدام به ارائه یک پهنه‌بندی شده و بر اساس آن محل منطقه مورد بررسی بر روی پهنه‌بندی مشخص گردید (شکل ۹).



شکل ۹- نقشه پهنه‌بندی زمین‌ساختی منطقه مورد مطالعه (برگرفته از: Berberian, 1983; Berberian, 1995; Stocklin, 1968; Nogol-e-sadat, 1988; Nabavi, 1977 با انجام اصلاحات).

Fig. 9. Tectonic zonation map of study area (Modified after Nogol-e-sadat, 1988; Stocklin, 1968; Berberian, 1995; Berberian, 1983, Nabavi, 1977).

زمین‌ساختی منطقه، وضعیت لرزه‌زمین‌ساختی منطقه و همچنین بررسی گلفشان‌های فعال منطقه بدست آمده پرداخته شده است.

### نتایج این پژوهش

در این بخش، به نتایج حاصل از این پژوهش که در زمینه‌های مختلفی نظیر: بررسی گسل‌های سطحی، بررسی ساختارهای زیرسطحی، موقعیت

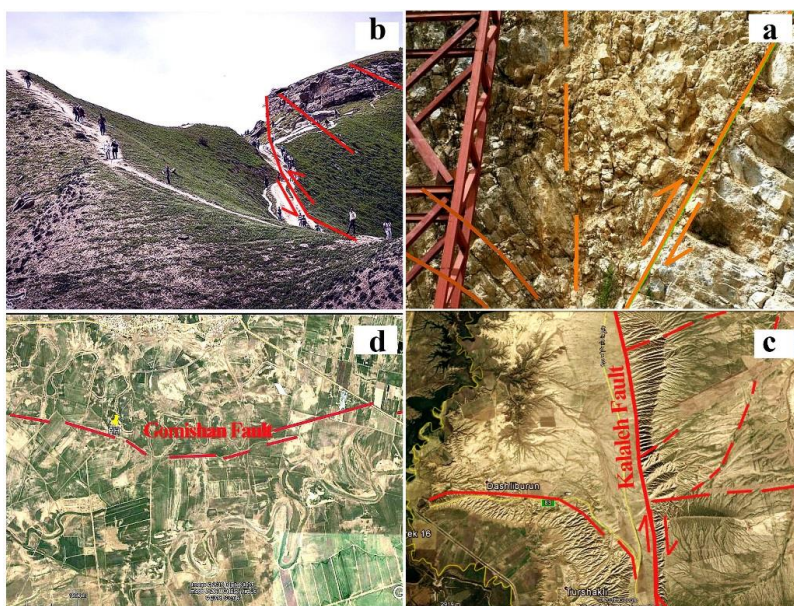
صورت یک زون گسلیده با مقطع V شکل (ساختار گل‌مانند) مشاهده نمود (Radfar et al., 2018) که حکایت از وجود مولفه امتدادلغز (علاوه بر مولفه معکوس) در طول این گسل دارد (شکل ۸۶). گسل مراوه‌تپه از لحاظ لرزه‌زمین‌ساختی جزء گسل‌های فعال بوده (Shahpasandzade, 2004) و با توجه به اثرات نوزمین‌ساختی این گسل نظیر به خط شدن گل‌فشان‌های منطقه صوفیکم (شکل ۳)، در این پژوهش ادامه آن در دشت گرگان (تا شمال آق‌قلا) شناسایی و به نقشه درآمد (شکل ۷).

**ج- گسل کلاله (داشلی‌برون):** این گسل با طولی حدود ۱۰۰ کیلومتر و روند تقریبی N160 از گسل عشق‌آباد در شمال داشلی‌برون (از حوالی مرز ایران و ترکمنستان) آغاز گردیده و ضمن عبور از شرق داشلی‌برون تا غرب-جنوب غرب شهرستان کلاله ادامه یافته و به گسل خزر ختم شده است (شکل ۷). بنظر می‌رسد که این گسل کپه‌داغ غربی را به دو بخش رخنمون‌یافته (بخش شرقی) و بخش مدفون‌شده (بخش غربی) تقسیم نموده است. با توجه به شواهد ساختاری نظیر خمش‌های راستگرد سایر پدیده‌های ساختاری، می‌توان علاوه بر مولفه نرمال (که سبب پایین‌افتادگی بلوک غربی شده است)، مولفه امتدادلغز راست‌بر نیز برای آن در نظر گرفت. راستای مستقیم این گسل نیز این مسئله را تایید می‌کند و همچنین نبود هیچ خمشی در مسیر کوه-دشت، جوان بودن این گسل را نیز به اثبات می‌رساند (شکل ۱۰c).

**بررسی گسل‌های سطحی:** مهم‌ترین گسل‌های شناسایی شده در منطقه عبارتند از: گسل خزر، گسل شمال البرز، گسل مراوه‌تپه و گسل کلاله می‌باشند که در ذیل شواهد و اثرات این گسل‌ها آورده خواهد شد.

**الف- گسل خزر:** این گسل با طول ۵۵۰ کیلومتر به عنوان گسلی اصلی در اثر بسته شدن اقیانوس پالئوتتیس تشکیل شده و بنابراین مرز بین کپه‌داغ و البرز در منطقه گرگان محسوب می‌شود (Safari and Gholami, 2011). گسل خزر با روند ۸۰-۸۵°N به عنوان یک گسل رانده با شیب ۵۵ تا ۶۰ درجه رو به جنوب، در مرز کوه و دشت، سطح را قطع کرده و به طور محلی شیست‌های گرگان را در مقابل نهشته‌های کواترنری قرار داده است (شکل ۱۰a). گسل مزبور همانند بسیاری دیگر از گسل‌های مرز پیشانی کوهستان، به صورت پیوسته ادامه نداشته بلکه می‌توان آن را به قطعات متعددی تقسیم کرد که هر یک ویژگی‌های زمین‌ساختی و زمین‌ریخت-شناسی معینی دارند (شکل ۷).

**ب- گسل مراوه‌تپه:** گسل مراوه‌تپه که به عنوان گسل آق‌بند نیز شناخته می‌شود، گسلی با طول حدود ۱۰۰ تا ۱۵۰ کیلومتر می‌باشد که در شمالی‌ترین بخش استان گلستان با روند N70E (شمال‌شرق-جنوب‌غربی) دیده می‌شود. ادامه شرقی این گسل در استان خراسان شمالی ضمن تغییر روندی آشکار دارای روند شرقی-غربی شده است. بر طبق شواهد صحرایی (شکل ۱۰b)، این گسل دارای شیب رو به جنوب بوده و براساس مشاهده خش‌لغز بر سطح گسل، دارای سازو کار رانده با مقداری مولفه امتدادلغز چپ‌بر می‌باشد. این گسل را نیز می‌توان در مقطع لرزه‌ای شماره ۷۲۱۰۹ به



شکل ۱۰- شواهد صحرایی از گسل‌های مهم منطقه مورد مطالعه؛ (a) گسل خزر، (b) گسل مراوه‌تپه، (c) اثر گسل کلاله بر روی تصویر ماهواره‌ای گوگل ارث و (d) اثر گسل گمیشان بر روی تصویر ماهواره‌ای گوگل ارث.

Fig. 10. Field evidences of main faults in study area; (a) Khazar fault, (b) Maraveh-Tappe fault and the traces of (c) Kalalah fault, and (d) Gomishan fault in Google Earth image.

(اشکال ۷ و ۱۰d). روند این گسل شرقی-غربی با شیب به سمت جنوب می‌باشد. همچنین با توجه به سازوکار کانونی زمین لرزه‌های ثبت شده در محدوده این گسل، سازوکار آن احتمالاً رانندگی خواهد بود. زمین‌لرزه‌های اکتبر ۲۰۰۴ میلادی ( $M_s=5/4$ )، ژانویه ۲۰۰۵ میلادی ( $M_s=5/1$ ) و

**د- گسل احتمالی گمیشان:** این گسل به دلیل قرارگیری در رسوبات آبرفتی دشت گرگان به راحتی قابل تشخیص نبوده و با استفاده از شواهد لرزه‌ای رخ داده در این منطقه و همچنین پرتگاه شرقی-غربی کوتاهی که از شرق بندر گمیشان تا رودخانه اتراک ادامه دارد، شناسایی و معرفی شد

مکانیسم کانونی این زلزله‌ها نشان می‌دهد که مکانیسم این زلزله‌ها عمدتاً معکوس با مولفه امتداد لغز چپ‌بر می‌باشند (شکل ۸)، ب- روند شمالی- جنوبی با تعداد زیادی زلزله‌هایی با بزرگای  $Ms > 4/0$  در یک پهنه عرضی ۳۰ کیلومتری که از شمال شهرستان گرگان آغاز و با عبور از منطقه آق‌قلا به طرف شمال (تا گسل مراوه تپه) کشیده شده‌اند. حل مکانیسم کانونی این زلزله‌ها نشان می‌دهد که مکانیسم این زلزله‌ها امتداد لغز راست‌بر با کمی مولفه کششی می‌باشند (شکل ۸). این خط لرزه‌خیز بر بخش شرقی خطواره آق‌قلا منطبق می‌باشد که با روند تقریباً شمالی- جنوبی از مرکز منطقه عبور نموده است. این خطواره بر مرز بین زون‌های زمین‌ساختی کپه- داغ غربی و خزر جنوبی منطبق می‌شود. به نظر می‌رسد که با توجه به عدم تقارن رخداد زلزله‌ها در طول ساختار عظیم پی‌سنگی، این گسل باید شبیهی به طرف شرق داشته باشد.

#### وضعیت پهنه‌بندی‌های زمین‌ساختی منطقه

در منطقه مورد مطالعه چهار پهنه زمین‌ساختی البرز، گرگان- رشت، کپه- داغ (بخش غربی) و خزر جنوبی (بخش شرقی) قابل مشاهده هستند (شکل ۹). دشت گرگان ظاهراً در حدفاصل بخش غربی کپه‌داغ و بخش شرقی حوضه خزر جنوبی قرار می‌گیرد. هر چند که اطلاعات زیرسطحی حکایت از آن دارد که دشت گرگان ظاهراً بخشی از دریای خزر بوده که بواسطه پسروی دریا به شکل فعلی درآمده است و موید این مسئله وجود رخساره‌های خزر جنوبی نظیر سازندهای چلکن، آقچاگیل و آپشرون در زیر دشت گرگان می‌باشد (Mousavi Rouhbakhsh, 2001; Radfar et al., 2018). اما بر پایه اطلاعات زیرسطحی عمیقتر، در شرق خطواره آق‌قلا، رسوبات کرتاسه و قدیمی‌تر کپه‌داغ غربی بر روی پی‌سنگ ضخیم از جنس قاره‌ای (با ضخامت بیش از ۴۰ کیلومتر) قرار گرفته است و این در حالی است که در غرب این خطواره پوسته نازک اقیانوسی با ضخامت ۱۵ تا ۲۰ کیلومتر با سن ژوراسیک (Amursky, 1971; Aghanabati, 2004) وجود دارد.

#### ارتباط‌سنجی گلفشان‌ها با سایر پدیده‌ها

**الف- ارتباط‌سنجی با ساختارها:** با مقایسه وضعیت فضایی گلفشان‌های منطقه مورد مطالعه با موقعیت ساختارهای سطحی و عمقی (شکل ۱۱) معلوم می‌گردد که گلفشان‌های شناسایی شده از شمال به گسل مراوه‌تپه، از شرق به گسل کلالة و از جنوب به گسل خزر محدود شده‌اند و این چهارچوب ساختاری، رخنمون گلفشان‌ها را محدود نموده‌اند. همچنین سه گلفشان فعال نفتلیجه، صوفیکم (شامل ۵ فروچاله ساختاری با امتداد N70E) و تنگ‌لی بر روی گسل مراوه‌تپه قرار گرفته‌اند.

ارتباط‌سنجی فضایی گلفشان‌ها با موقعیت چین‌های زیرسطحی نشان می‌دهد که بیشترین تمرکز گلفشان‌ها در محلی است که چین‌هایی با روند شمال‌غرب- جنوب‌شرقی (زون خزر جنوبی) ضمن خمشی آشکار به امتداد شمال‌شرق- جنوب‌غربی تا شرقی- غربی تغییر روند داده‌اند (شکل ۷). این محدوده بر مرکز منطقه مورد مطالعه حدفاصل شهرستان‌های گمیشان- سیمین‌شهر- آق‌قلا و اینچه‌برون منطبق شده است (شکل ۱۱).

آوریل ۱۹۷۰ ( $Mb=5/2$ ) در اطراف این گسل مکان‌یابی شده و احتمالاً در ارتباط با گسل گمیشان رخ داده‌اند (Mahdavian, 2013).

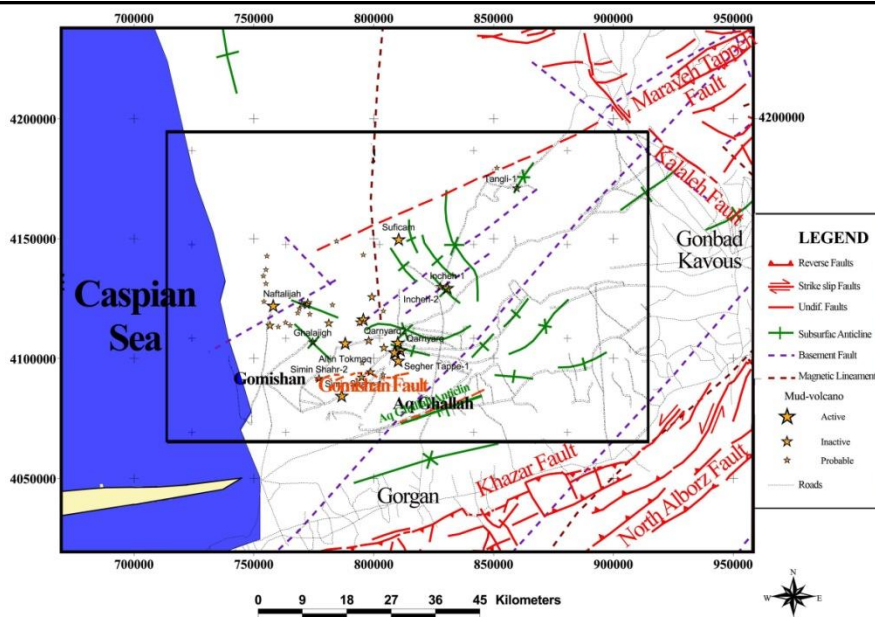
**بررسی ساختارهای زیرسطحی:** همانگونه که در بخش روش‌ها ذکر گردید؛ جهت استخراج ساختارهای زیرسطحی از نقشه‌های موجود و اطلاعات ژئوفیزیکی استفاده گردیده و ساختارهای استخراج شده در قالب گسل‌های پی‌سنگی، خطواره‌های مغناطیسی و چین‌های مدفون استخراج و در نقشه ساختاری منطقه (شکل ۶) آورده شدند. وضعیت این ساختارها به شرح ذیل می‌باشند:

**الف- مهم‌ترین گسل‌های زیرسطحی در منطقه مورد مطالعه، به صورت خطواره‌های مغناطیسی و گسل‌های پی‌سنگی قابل مشاهده هستند. مهم‌ترین خطواره مغناطیسی، خطواره‌ای است که با روند تقریباً شمالی- جنوبی از مرکز منطقه عبور نموده و در نقشه ساختاری به عنوان خطواره آق‌قلا معرفی گردیده است (شکل ۷). این خطواره بر مرز بین زون‌های زمین‌ساختی کپه- داغ غربی و خزر جنوبی منطبق بوده (شکل ۸) و به همین دلیل یکی از مهم‌ترین عوارض ساختاری و زمین‌ساختی منطقه مورد بررسی محسوب می‌شود. سایر خطواره‌های مغناطیسی پیرامون منطقه مورد بررسی قرار داشته و تقریباً بر گسل‌های خزر و گسل کلالة (در شرق) منطبق هستند. از دیگر عوارض می‌توان به خطواره‌هایی اشاره نمود که به عنوان گسل‌های پی‌سنگی با عوارض سطحی، معرفی شده‌اند. این خطواره‌های تکتونیک در منطقه مورد مطالعه عمدتاً دارای روند شمال‌شرق- جنوب‌غربی (هم‌روند با بخش غربی کپه‌داغ و البرز شرقی) می‌باشند (شکل ۷).**

**ب- مهم‌ترین روندهای چین‌های مدفون یادشده عبارتند از:** چین‌هایی با روند شمال‌شرقی- جنوب‌غربی که در بخش‌های شرقی و جنوب‌شرقی منطقه مورد بررسی دیده شده و هم‌روند با بخش غربی کپه‌داغ (و ادامه آن در زیر دشت گرگان) می‌باشند. این چین‌ها در حدفاصل دو خطواره تکتونیک موجود در این بخش قرار گرفته‌اند (شکل ۷). دسته دوم چین‌هایی با روند شمال‌غرب- جنوب‌شرقی تا شرقی- غربی که در بخش‌های غربی و مرکزی دیده می‌شوند. این روند ساختاری از چین‌ها پیرامون خطواره مغناطیسی حدفاصل زون‌های زمین‌ساختی کپه‌داغ غربی- خزر جنوبی و در شمال دو خطواره تکتونیک ذکر شده قرار گرفته‌اند. این چین‌ها با نزدیک شدن به بخش شرقی (دارای روند شمال‌شرق- جنوب‌غربی) دچار خمش‌های ساختاری خمش‌های ساختاری چپگرد شده و بعضاً هم‌روند با چین‌های دسته اول می‌شوند (شکل ۷). نمونه‌ای از اثر این تاقدیس‌ها را می‌توان در مقطع لرزه‌ای تاقدیس قارنیارق (شمال آق‌قلا) مشاهده نمود (Rezvandehi et al., 2011) که حاوی یک میدان گازی بوده و سبب فعال شدن گلفشان قارنیارق شده است (شکل ۱۱b).

**وضعیت لرزه‌خیزی منطقه:** با کنترل وضعیت کانون زلزله‌ها در منطقه مورد بررسی و پیرامون متوجه می‌شویم که حداقل دو روند لرزه‌خیز در منطقه قابل تشخیص است که عبارتند از: الف- روند شمال‌شرق- جنوب‌غربی با تعداد زیادی زلزله‌های با بزرگای  $Ms > 5/0$  در بخش شمالی منطقه که بر گسل مراوه‌تپه و ادامه آن در بخش شمالی دشت گرگان، منطبق است. حل



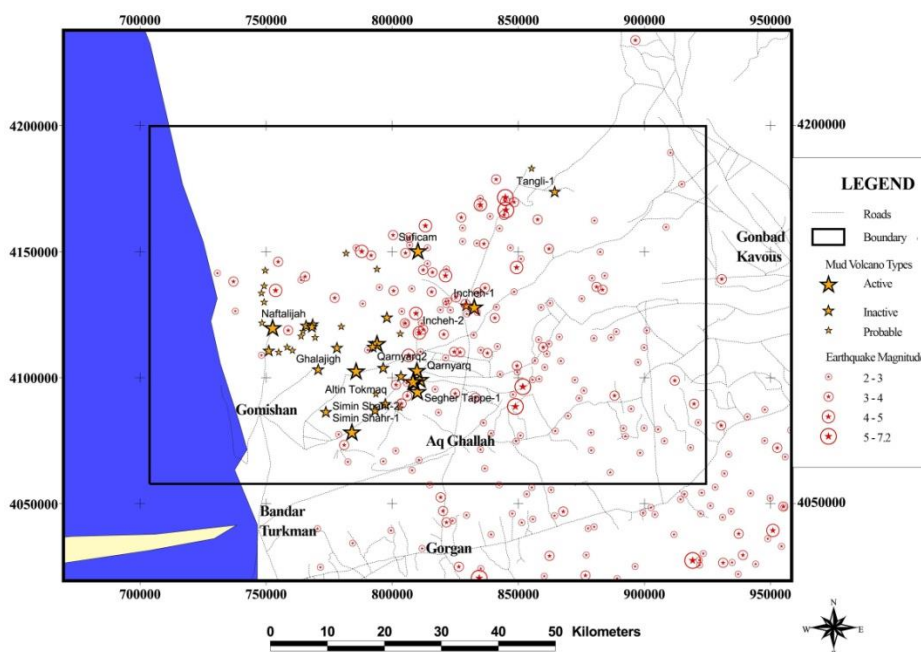


شکل ۱۱- ارتباط سنجی موقعیت فضایی گلفشان‌ها و ساختارهای سطحی و زیرسطحی.

Fig. 11. Spatial relationship between mud volcanoes with surface and subsurface structures.

برای مثال: زلزله‌های ۲۰۰۴/۱۰/۷ و ۲۰۰۵/۱۱/۱۰ با بزرگای  $M_s=6$  بر گلفشان تنگلی و زلزله ۲۰۰۳/۳/۳۰ با بزرگای  $M_s=5$  بر گلفشان صوفیکم منطبق است. همچنین انبوهی از زلزله‌هایی با بزرگای  $4 < M_s < 5$  در حدفاصل گلفشان‌های صوفیکم- قارنیارق تا سیمین‌شهر (بخش مرکزی منطقه) متمرکز هستند (شکل ۱۲).

ب- ارتباط سنجی با وضعیت لرزه‌خیزی منطقه: با توجه به اینکه ارتباط بین فعالیت‌های گلفشانی و زمین‌لرزه‌ها اساساً پذیرفته شده است. ارتباط-سنجی بین محل گلفشان‌ها و کانون زلزله‌ها نشان می‌دهد که به بیشترین تراکم زلزله‌ها در منطقه مورد مطالعه در بخش مرکزی است که بر محل گلفشان‌ها منطبق است (شکل ۱۲). به گونه‌ای که اکثر زلزله‌های بزرگ ( $M_s > 4/5$ ) دقیقاً بر محل گلفشان‌های فعال (و یا نیمه فعال) قرار گرفته‌اند.



شکل ۱۲- ارتباط فضایی بین کانون‌های زلزله و محل تظاهر گلفشان‌ها.

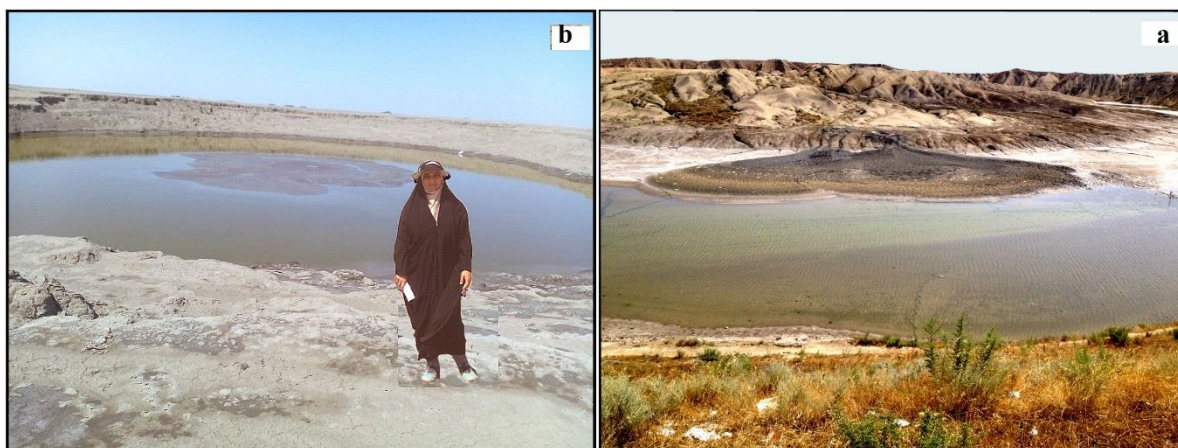
Fig. 12. Spatial relationship between earthquake foci with mud volcanoes.

(Rezadoust, 2018) نشان داد که روانه‌های گلی این گلفشان حاوی مواد هیدروکربوری می‌باشد. شواهد صحرایی هم از وجود مواد هیدروکربوری به

ج- ارتباط سنجی با میادین هیدروکربوری: بررسی محتوای هیدروکربونی روانه گلی گلفشان‌های فعالی نظیر نفتلیجه، قارنیارق توسط رضادوست

د- ارتباطسنجی با پهنه‌های زمین‌ساختی: با ارتباطسنجی فضایی بین محل تظاهر چشمه‌ها و پهنه‌های زمین‌ساختی متوجه می‌شویم که عمده گلفشان‌های منطقه مورد مطالعه در حدفاصل بخش غربی زون ساختاری کپه‌داغ غربی و خزر جنوبی در پهنه‌ای شمالی- جنوبی به عرض ۳۰ کیلومتر قرار گرفته‌اند (شکل ۹). با توجه به اینکه کپه‌داغ دارای پوسته قاره‌ای است که در طی فاز هرسی‌نین سخت شده و دارای ضخامت حداقل ۴۰ کیلومتر می‌باشد و خزر جنوبی که دارای پی‌سنگی از جنس پوسته بازالتی (با سن ژوراسیک) با ضخامت حدود ۲۰ کیلومتر بوده و به سرعت در حال فرونشینی است؛ مرز این دو پهنه باید یک مرز زمین‌ساختی مهم باشد. به طور معمول این مرز زمین‌ساختی باید میزبان پدیده‌های مرتبط با همجواری دو پوسته متفاوت باشد که از جمله آنها گلفشان‌ها هستند.

صورت آغشتگی روانه گلی یا وجود سرچشمه‌های نفتی در بخش‌هایی از این گلفشان‌ها حکایت دارد (شکل ۱۳). همچنین، در گلفشان‌های فعالی نظیر نفتلیجه، قارنیارق، اینچه و صوفیکم بعضاً حباب‌هایی از گاز متان یا سایر گازهای هیدروکربوری در سطح بخش سیال (محتوای آب دار) این گلفشان قابل مشاهده بوده و بعضاً متصاعد شدن متان در پیرامون آنها قابل استشمام است. رضواندهی و همکاران (Rezavandehi et al., 2011) نیز با مطالعه مقاطع لرزه‌ای زیر گلفشان قارنیارق موفق به تشخیص لایه‌ای از گاز (زون‌های گازدار) به ضخامت ۹/۶ متر شدند (شکل b۶) و به این ترتیب، یکی از عوامل بالا رفتن فشار منفذی در لایه چینه‌ای چلکن، شکل‌گیری و صعود این گلفشان را زون گازدار مذکور دانستند.



شکل ۱۳- نماهایی از خروج مواد هیدروکربوری از گلفشان‌های فعال؛ (a) خروج مواد نفتی از گلفشان قارنیارق و (b) خروج گاز (بخصوص متان) از گلفشان نفتلیجه.

Fig. 13. Two viewpoints from hydrocarbon leakages from active mud volcanoes; (a) Oil seepage from Gharnyaregh mud volcano, and (b) Gas leakage (especially Methane) from Naftalijah mud volcano.

که بر محل گلفشان‌ها منطبق است. بن‌تاکور (Betacour, 2015) به ارتباط ژنتیکی ساختارهای تاقدیسی و محل تظاهر گلفشان‌ها پی‌برد و همچنین بونینی (Bonini, 2012) نیز به ارتباط ژنتیکی گلفشان‌ها و ساختارها (بخصوص محل خمش لولای تاقدیسی‌ها و گسل‌هایی با مولفه کششی) اذعان نموده است. ارتباطسنجی محل تظاهر گلفشان‌ها با میادین هیدروکربوری حکایت از قرارگیری بخش اعظم گلفشان‌ها بر روی (یا پیرامون) میادین هیدروکربوری داشته (Rezadoust, 2018) و به همین دلیل وجود مواد هیدروکربوری به صورت آغشتگی روانه گلی یا وجود سرچشمه‌های نفتی در بخش‌هایی از این گلفشان‌ها دیده می‌شود. یا بعضاً حباب‌هایی از گاز متان یا سایر گازهای هیدروکربوری در سطح بخش سیال (محتوای آب دار) این گلفشان‌ها قابل مشاهده است. رضواندهی و همکاران (Rezavandehi et al., 2011) نیز با مطالعه مقاطع لرزه‌ای زیر گلفشان قارنیارق موفق به تشخیص لایه‌ای از گاز (زون‌های گازدار) به ضخامت ۹/۶ متر شدند (شکل b۶) و به این ترتیب، یکی از عوامل بالا رفتن فشار منفذی در لایه چینه‌ای چلکن، شکل‌گیری و صعود این گلفشان را زون گازدار مذکور دانستند. گلفشان‌ها می‌توانند منشاء زمین‌ساختی، زمین‌ساختی- رسوبی، ماگمایی و یا مختلط داشته باشند. با توجه به اینکه مهم‌ترین شاخصه‌های گلفشان‌های با منشاء زمین‌ساختی شامل مواردی مانند: قرارگیری در راستای گسل‌های اصلی ناحیه‌ای، واقع‌شدن در حاشیه صفحات زمین‌ساختی، تظاهر در پهنه‌هایی با لرزه‌خیزی بالا، وجود مواد نفتی در ترکیب روانه گلی، جوان بودن سازندهای

### بحث و بررسی

بررسی گلفشان‌ها در مناطق مختلف دنیا نشان می‌دهد که از نظر زمین-ساختی، رخداد گلفشان‌ها عمدتاً در حاشیه‌های فعال همگرا توزیع شده و اغلب در طول گسل‌ها و محورهای تاقدیسی واقع شده‌اند. قرارگیری گلفشان‌ها در مرزهای فعال زمین‌ساختی سبب شده است که این مناطق دارای فعالیت‌های لرزه‌خیزی نسبتاً بالایی نیز باشند. در پژوهش حاضر به مطالعه و تفسیر زمین-ساختی گلفشان‌های غرب استان گلستان پرداخته شد تا ارتباط آنها با سایر پدیده‌های زمین‌شناسی منطقه مشخص گردیده و محیط زمین‌ساختی آنها شناسایی شوند.

در طی این مطالعات معلوم گردید که حدود ۴۵ گل‌فشان در منطقه مورد مطالعه (دشت گرگان- شرق دریای خزر) وجود دارند که از بین آنها ۵ گلفشان قارنیارق، نفتلیجه، صوفیکم، اینچه و گمیشان هنوز فعال می‌باشند. ارتباطسنجی گلفشان‌ها با ساختارهای سطحی و زیرسطحی نشان داد که چهارچوب ساختاری منطقه تاثیر مستقیم بر تظاهر گلفشان‌ها داشته است به‌گونه‌ای که گلفشان‌ها از شمال به گسل مراوه‌تپه، از شرق به گسل کلاله و از جنوب به گسل خزر محدود شده‌اند. همچنین بیشترین تمرکز گلفشان‌ها در محدوده‌ای است که چین‌هایی با روند شمال‌غرب- جنوب‌شرقی ضمن خمشی آشکار به امتداد شمال‌شرق- جنوب‌غربی تا شرقی- غربی تغییر روند داده‌اند. ارتباطسنجی بین محل گلفشان‌ها و کانون زلزله‌ها نیز نشان می‌دهد که بیشترین تراکم زلزله‌ها در منطقه مورد مطالعه در بخش مرکزی است

شیبی رو به شرق داشته باشد. در طول این مرز زمین‌ساختی خمش‌های عمده ساختاری (شکل ۷) دیده می‌شوند.

به این ترتیب نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که گلفشان‌های غرب استان گلستان در رده گلفشان‌های مرتبط با زمین‌ساخت قرار داشته و بر خلاف این انتظار که در یک مرز زمین‌ساختی همگرا واقع شده‌اند (Planke et al., 2003; Milkov, 2005; Omrani and Raghimi, 2018; Feyzullayev, 2012; Yusifov and Rabinowitz, 2004) گلفشان‌ها در یک مرز زمین‌ساختی تراگذر شکل گرفته‌اند.

### نتیجه‌گیری

بررسی ارتباط گلفشان‌ها با پهنه‌های زمین‌ساختی نشان داد که این گلفشان‌ها از نظر زمین‌ساختی، در حدفاصل زون‌های ساختاری کپه‌داغ غربی و خزر جنوبی در پهنه‌ای شمالی- جنوبی به عرض ۳۰ کیلومتر (منطبق بر خطواره آق‌قلا) قرار گرفته‌اند که بر یک مرز زمین‌ساختی تراگذر منطبق می‌باشد. این مرز زمین‌ساختی به صورت یک روند لرزه‌خیز عریض ۳۰ کیلومتری شمالی- جنوبی با مکانیسم امتداد لغز راست‌بر با کمی مولفه کششی دیده می‌شود. با توجه به عدم تقارن رخداد زلزله‌ها در طول این ساختار عظیم پی- سنگی، این مرز باید شیبی رو به شرق داشته باشد. به این ترتیب شکل‌گیری گلفشان‌های غرب استان گلستان بر روی یک مرز زمین‌ساختی تراگذر، به- همراه شواهدی نظیر: قرارگیری در راستای گسل‌های اصلی ناحیه‌ای، تظاهر در پهنه‌هایی با لرزه‌خیزی بالا، وجود مواد نفتی در ترکیب روانه گلی، جوان بودن سازندهای منشاء و درجه حرارت پایین روانه‌گلی (و سیالات آن)، حاکی از آن است که این گلفشان‌ها در رده گلفشان‌های با منشاء زمین‌ساختی قرار می‌گیرند.

منشاء (سازند چلکن) و درجه حرارت پایین روانه‌گلی و سیالات آن می‌باشد؛ می‌توان نتیجه گرفت که گلفشان‌های غرب استان گلستان با داشتن این شاخصه‌ها باید در رده گلفشان‌های مرتبط با زمین‌ساخت قرار گیرند.

بررسی ارتباط گلفشان‌ها با پهنه‌های زمین‌ساختی نشان داد که این گلفشان‌ها از نظر زمین‌ساختی، در حدفاصل بخش غربی زون ساختاری کپه- داغ غربی و خزر جنوبی در پهنه‌ای شمالی- جنوبی به عرض ۳۰ کیلومتر (منطبق بر خطواره آق‌قلا) قرار گرفته‌اند. با توجه به اینکه کپه‌داغ غربی دارای پوسته قاره‌ای با ضخامت حداقل ۴۰ کیلومتر است که در طی فاز هرسی‌نین سخت شده و متحمل فازهای کوهزایی آلبی نیز گردیده است. در حالی که زون ساختاری خزر جنوبی دارای پی‌سنگی از جنس پوسته بازالتی با ضخامت حدود ۲۰ کیلومتر با سن ژوراسیک است (Amursky, 1971; Aghanabati, 2004)؛ باید مرز این دو پهنه یک مرز زمین‌ساختی مهم باشد. نتایج برخی پژوهش‌ها نیز موید این مسئله می‌باشد (Bentacor, 2015; Guest, 2007; Smith-Rouch, 2006). همچنین، با توجه به این حقیقت که پوسته بازالتی خزر جنوبی در بخش شمالی به زیر صفحه توران فرورانده می‌شود (Bentacor, 2015; Guest, 2007)، در حالی که در کپه داغ غربی یک کوهزاد برخوردی وجود دارد؛ بایستی اذعان نمود که این مرز زمین‌ساختی، باید یک مرز تراگذر (Transcurrent Boundary Plate) باشد که به صورت یک روند لرزه‌خیز عریض ۳۰ کیلومتری شمالی- جنوبی با تعداد زیادی زلزله با بزرگای  $M_s > 4.0$  با مکانیسم امتداد لغز راست‌بر با کمی مولفه کششی رخ داده‌اند، دیده می‌شود که با توجه به عدم تقارن رخداد زلزله‌ها در طول این ساختار عظیم پی‌سنگی، این مرز باید

### منابع

- Afsharharb, A., 1994. Geology of Iran: Kopet Dagh Geology, the Geology of Iran Montage Project, Geological Survey of Iran Publication 11, 275 (In Persian).
- Aghanabati, S.A., 2004. Geology of Iran, Geological Survey of Iran Publication, 586p (In Persian).
- Amursky, G.I., 1971. The deep structure of the Kopet-Dagh. *Geotectonics* 1, 34-40.
- Alavi, M., 1991. Sedimentary and structural characteristics of the paleo-Tethys, remnants in northeastern Iran. *Geological Society of America Bulletin* 103, 9183-9192.
- Bentacor, I.S., 2015. Mud diapirs and folds in South Caspian Basin: Geometry and syn-sedimentary evolution of structures with petroleum interest, PhD Thesis, University of Granada, 221p.
- Berberian, M., 1983. The Southern Caspian: A compressional depression floored by trapped, modified oceanic crust. *Canadian Journal of Earth Sciences* 20 (21), 163-183.
- Berberian, M., King, G.C.P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences* 18, 210-265.
- Bonini, M., 2012. Mud volcanoes: Indicators of stress orientation and tectonic controls. *Earth Science Review* 115, 121-152.
- Delvin, W.J., Cogswell, J.M., etc. 1999. South Caspian Basin: Cool, Young and full of Promise, *GSA Today. Geological Society of America* 9 (7), 1-3.
- Deville, E., Battan, A., Griboulard, R., Guer Luis, S., Herbni, J.P., Houzay, J.P., Muller, C., Prinzhofer, A., 2003. The origin and processes of mud volcanism: new insights from Trinidad, geological society, London, special publications 216, 475-490.
- Fasl-e-Bahar, J., Purkermani, M., Fasl-e-Bahar, S.H., 2010. Investigating Mud Volcanoes, South East Skirts of Caspian Sea, *State's Geology and Mining Discoveries*, 75.
- Fasl-e-Bahar, J., Purkermani, M., Fasl-e-Bahar, S.H., 2009. Investigating on mud volcanoes. *Geosciences Journal* 20 (77), 57-82 (In Persian).
- Feyzullayev, A.A., 2012. Mud volcanoes in the South Caspian basin: Nature and estimated depth of its products. *Natural Science* 4, 445-453.



- Geological Survey of Iran Publication, 2006. The Tectonic lineament map of Iran, 1:5000000.
- Guest, B., Guest, A., Axen, G., 2007. Late Tertiary tectonic evolution of Northern Iran: A case study of simple crustal folding. *Global and Planetary Changes* 58, 435-453.
- Jakubov, A.A., Ali-Zade, A.A., Zeinalov, M.M., 1971. Mud volcanoes of the Azerbaijan SSR, Publishing house of the Academy of Sciences of the Azerbaijan SSR, Baku.
- Mahdavian, A., 2013. Seismicity zonation of Golestan Province, Shahid Abbaspour Segment. *Journal of Shahid Beheshti University* 23 (89), 165-174 (In Persian).
- Milkov, A.V., 2005. Global distribution of mud volcanoes and their significance in petroleum exploration, as a source of methane in the atmosphere and hydrosphere, and as Geohazard, In: Martinelli, G., Panahi, B., eds. *Mud volcanoes, Geodynamics and Seismicity, IV Earth and Environ. Sciences*, 51, 77-87.
- Mirkazemian, M., 2009. *Mud Volcanoes, National Geosciences Data Base of Iran*, 40p (In Persian).
- Mousavi Ruhbakhsh, M., 2001. *Geology of Caspian Sea, The Geology of Iran Montage Project*, Geological Survey of Iran Publication, 80, 254 (In Persian).
- Nabavi, H., 1976. *Introduction to geology of Iran*, Geological Survey of Iran Publication, 109p (In Persian).
- National Iranian Oil Company (NIOC), 1977. *Geological Map of North East of Iran*, Scale: 1/1000000.
- Nogol-e-Sadat, M.A.A., Almasian, M., 1993. *Tectonic Map of Iran*, Scale: 1/1000000, *Treatise on the geology of Iran*, Geological Survey of Iran.
- Nogol-e-Sadat, M. A. A., 1988. Review of tectono-sedimentary zonation in Iran, *International Geology Congress*, Washington 2, 512.
- Omran, H., Raghimi, M., 2018. Origin of the mud volcanoes in the south east Caspian Basin, Iran. *Marine and Petroleum Geology* 96, 615-626.
- Omran, H., Raghimi, M., 2017. Structural and mineralogical studies of Qarnyaregh mud volcano, North of Aq-ghala, Golestan province, Internal research project, Golestan University, 29p (In Persian).
- Planke, S., Svensen, H., Hovland, M., Banks, D.A., Jamtveit, B., 2003. Mud and fluid migration in active mud volcanoes in Azerbaijan, *Geo-Mari Processes of mud volcanism: New insights from Trinidad*, Geological Society of London Publication 216, 475.
- Ranjbaran, M., 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 Science* 13 (4), 391-405.
- Rezadoust, M., 2018. *Tectonic Setting of Mud Volcanoes in Western part of Golestan province*, Msc Thesis, Golestan University, 150p (In Persian).
- Rezvandehy, M., Aghabaei, H., 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.
- Rustaei, M., Rustaei, M., Zamani, B., Nemati, M., 2015. Studies of Neotectonic stress condition and proposed a kinematic model for Gorgan plain, Northeastern of Iran. *Geosciences Journal* 25 (98), 375-384 (In Persian).
- Safari, H., 2014. Deformation analysis of Northern limb of Eastern Alborz: Using Geo-information Technologies, *Tectonic and Structure Journal* 2 (4), 1-27 (In Persian).
- Smith-Rouch, L., 2006. Oligocene- Miocene Maykop- Diatom total petroleum systems of the Caspian Sea basin provinces, Azerbaijan, Iran and Turkmenistan. *USGS Bulletin No. 2201-4*, 33p.
- Stewart, S. A., Davies, R. J., 2006. Structure and emplacement of mud volcano systems in the South Caspian Basin, *AAPG Bulletin*, 90 (5), 771-786.
- Stocklin, J., 1974. *North Iran: Alborz Mountains*, Geological Society, London, Special Publications 4, 213- 2334.
- Stocklin, J., 1968. Structural history and tectonics of Iran, a review. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 52(7), 1229- 1258.
- Yusifov, M., Rabinowitz Philip, D., 2004. Classification of mud Volcanoes the south Caspian Basin, offshore Azerbaijan. *Marine and Petroleum Geology* 21, 965-975.
- Zonenshain, L.P., Le Pichon, X., 1986. Deep basins of the Black Sea and Caspian Sea as remnants of Mesozoic back-arc basins. *Tectonophysics* 123, 181-211.