

**Research Article****Investigation of geochemical anomalies associated with oilfields using matching magnetometric data and satellite images, case study: Moghan plain**Zahra Sadeghizadeh<sup>1\*</sup>, Seyed Hossein Mojtahedzadeh<sup>2</sup>, Abdulhamid Ansari<sup>2</sup>, Amin Hossein Morshedy<sup>2</sup>

1- Master of Petroleum Exploration Engineering, Yazd University

2- Department of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University

**Keywords:** Hydrocarbon seepage, Surface geochemistry, Remote sensing, Magnetometry, Hydrocarbon exploration**1- Introduction**

Due to the high depth of pressure and the weakness of the plates between the geological layers, hydrocarbons can escape from subsurface reservoirs through fractures and faults. In their migration path, hydrocarbon seepages affect other elements within the soil and cause alterations (Abrams, 2005). The relationship between surface alteration caused by hydrocarbon seepage at the ground's surface and the subsurface hydrocarbon reservoirs has been explored for many years. However, over the past few decades, it has been used successfully as a practical tool to explore oil reserves and prioritize exploratory drilling in oil fields.

Since the formation of a reduction environment due to hydrocarbon seepage caused by reducing or acidic fluids such as H<sub>2</sub>S and removing hematite and converting it to pyrite and magnetite, remote sensing can detect these alterations. Fu et al. (2007) studied alterations of minerals due to hydrocarbon seepage using ASTER sensor data. The results showed that the band ratio technique could detect the effects of bleached red beds and secondary carbonate minerals due to hydrocarbon seepages (Fu et al., 2007). Salati, using ASTER and Hyperion data, studied the alteration of carbonate minerals due to hydrocarbon leakage in the Dezful embayment and proposed generalized models of spectral and geochemical alterations (Salati, 2015). In addition, magnetic anomalies above the oil and gas fields have been considered for decades. Studies show that autogenic magnetic mineralization in shallow sediments above hydrocarbon accumulation causes slight but detectable changes in magnetic field profiles. The sediments with magnetic susceptibility contain anomalies involving ferromagnetic minerals such as grigite, magnetite, magmatic and pyrrhotite. The hydrocarbons-regenerating environment can lead to the deposition of various magnetic iron oxides and sulfides, including magnetite, maghemite, pyrrhotite, and grigite (Ellwood, 1996).

Donovan reported magnetite in the Permian rocks overlying the Oklahoma Cement oil field and thought that the migration of saline waters associated with hydrocarbons from the bottom caused hematite reduction and magnetite formation (Donovan, 1974). Reynolds et al. (1990) re-tested the phenomenon of magnetite formation in the Cement oil field and concluded that it was due to contamination from drilling. However, they confirmed the ferrimagnetic pyrrhotite minerals in this area and stated that it was deposited due to hydrocarbon seepages (Reynolds, 1990). Although autogenic magnetite was not present in the Cement field, its formation in many hydrocarbon seepage sites was confirmed by Elmore et al. (1987) and McCabe et al. (1987). The study results for more than 2,700 exploration wells presented at the AAPG International Congress in Perth, Australia, showed that 82% of the wells drilled on prospects with positive geochemical anomalies were completed as commercial explorations. In contrast, only 11% of the boreholes drilled on prospects without positive hydrocarbon geochemical anomalies resulted in oil and gas exploration. Therefore, by combining seismic data with surface

\* Corresponding author: utab.sadeghizadeh@gmail.com

DOI: 10.22055/AAG.2021.33089.2109

Received 2020-03-30

Accepted 2021-05-30

exploration methods, the success of drilling and exploration would be more than doubled and, in some cases, it would result in a ten times increase (Schumacher, 1996).

## 2- Materials and methods

The present study aimed to process and interpret the geological, remote sensing, and surface geochemical exploration data of the Moghan sedimentary basin and then compare these exploration data with possible hydrocarbon-rich areas (anticlines). In remote sensing studies, band ratio methods, RGB colour composition and principal component analysis were applied to ASTER and Landsat8 data to identify ferrous iron, carbonate replacement by gypsum, and clay mineral alterations (Rangzan et al., 2021; Bonyadi et al., 2020). Also, surface magnetic anomalies were identified by applying analytical signal analysis, first derivative and continuation filters on ground magnetic data (Karimpour, 2012). Output alteration maps were matched with the control map of the anticlines, and the control map was obtained from the combination of the anticline and faults. Output alteration maps were first matched with the control map of the anticlines and then with the control map obtained from the combination of the anticlines and faults. Finally, a combination layer of all alterations was matched with the anticline's control map and the control map of both anticline and faults in the study area.

## 3-Results and discussion

The results of the alteration matching with the anticlines and faults of the region are shown in pie charts separately for each alteration layer in Fig. 1. Pie charts of surface magnetic anomalies and alteration of carbonate minerals, ferrous iron and clay minerals are shown in Fig 1. As shown in all charts, the percentage of positive anomalies in the anticline area relative to total area anomalies is higher than in the anticline area in the study area, indicating a high concentration of positive anomalies in the anticline area. Also, the same results simultaneously show a high concentration of positive anomalies in the anticline and fault area (Fig. 2).

The results extracted from these pie charts are presented as concentration rates in Tables 1 and 2. Concerning the efficiency coefficients in Table 1, carbonate (3.33) and illite minerals (2.76) alterations are the most, and ferrous iron minerals (1.39) alteration and surface magnetic anomalies (2.29) are the minor alterations observed upon the anticlines at the surface. Comparing Tables 1 and 2 shows the improvement and increase in the efficiency coefficient of different alterations in Table 2 than in Table 1. It indicates that if the faults are also used in adaptation, the results will be better than before, which may be due to the positive effect of the regional faults in directing hydrocarbon leakages to the surface.

Table 1. Concentration rates of alterations and magnetic anomalies within the anticline and outside the anticline range.

| Type of anomaly                     | Concentration of anomalies upon anticlines | Concentration of anomalies outside the range of anticlines | Efficiency coefficient |
|-------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------|
| Ferrous iron minerals alteration    | 1.21                                       | 0.92                                                       | 1.31                   |
| Carbonate minerals alteration       | 2.03                                       | 0.67                                                       | 3.03                   |
| Illite minerals alteration          | 1.93                                       | 0.70                                                       | 2.76                   |
| Montmorillonite minerals alteration | 1.51                                       | 0.83                                                       | 1.82                   |
| Kaolinite minerals alteration       | 1.50                                       | 0.83                                                       | 1.81                   |
| Surface magnetic anomalies          | 1.23                                       | 0.92                                                       | 1.34                   |

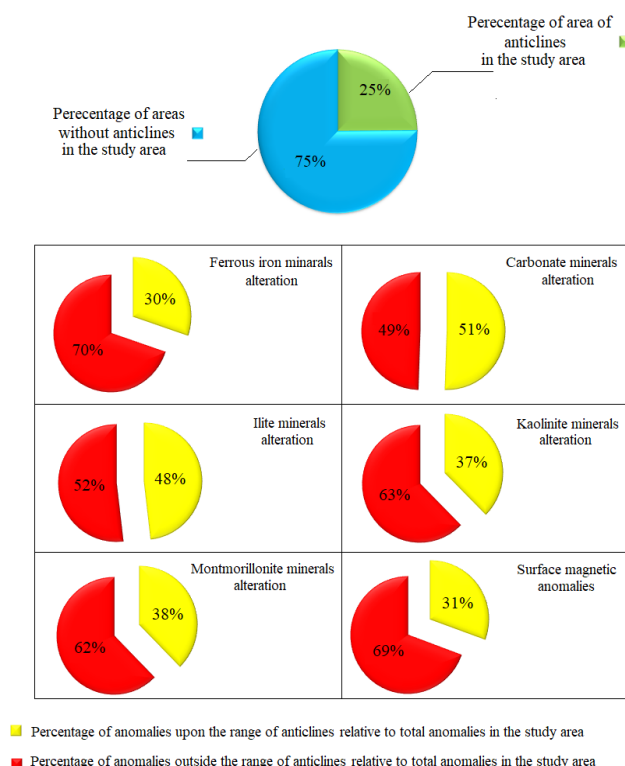


Fig. 1. Pie charts showing the percentage of hydrocarbon seepage anomalies at the top of anticlines and areas without anticlines for various anomalies and alterations.

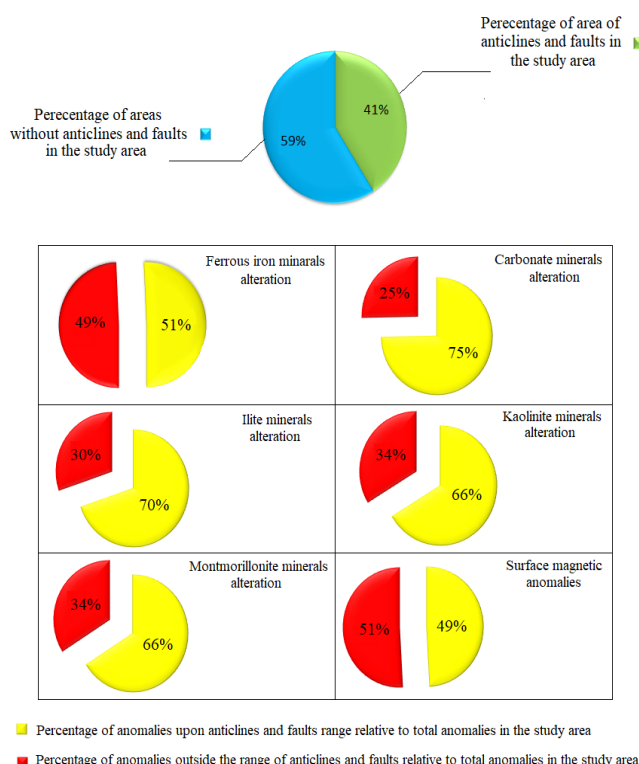


Fig. 2. Pie charts showing the percentage of hydrocarbon seepage anomalies at the top of anticlines and faults and areas without anticlines and faults for various anomalies and alterations.

Table 2. Concentration rates of alterations and magnetic anomalies within the range of anticlines and faults and outside the range of anticlines and faults.

| Type of anomaly                     | Concentration of anomalies upon anticlines and faults | Concentration of anomalies outside the range of anticlines and faults | Efficiency coefficient |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------|
| Ferrous iron minerals alteration    | 1.20                                                  | 0.86                                                                  | 1.39                   |
| Carbonate minerals alteration       | 1.82                                                  | 0.42                                                                  | 4.33                   |
| Illite minerals alteration          | 1.70                                                  | 0.51                                                                  | 3.33                   |
| Montmorillonite minerals alteration | 1.60                                                  | 0.57                                                                  | 2.81                   |
| Kaolinite minerals alteration       | 1.61                                                  | 0.57                                                                  | 2.82                   |
| Surface magnetic anomalies          | 1.97                                                  | 0.86                                                                  | 2.29                   |

According to the pie chart (Fig. 3a), 35% of the anomalies are concentrated upon the anticlines, and 65% of the anomalies are concentrated in the rest of the study area, outside the range of anticlines. So calculating the concentration and efficiency coefficients in Table 3 show that alterations upon the anticlines are twice as many as in other areas. Similar results were obtained by matching a combination layer of all alterations with the anticline and faults control layer (Fig. 3b and Table 3).



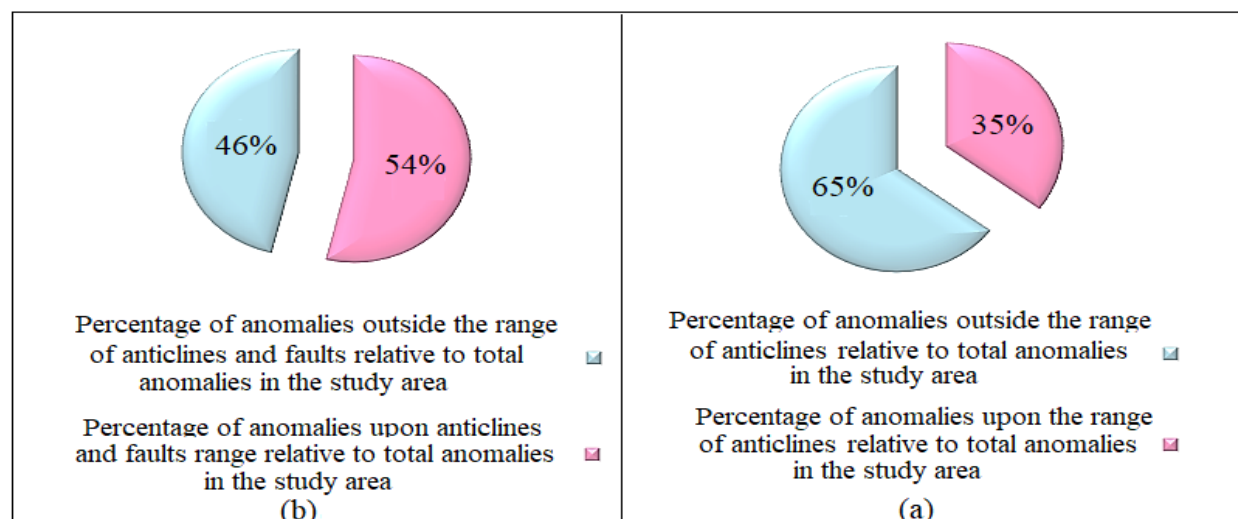


Fig. 3. Pie charts showing the percentage of all alterations due to hydrocarbon seepage (derived from the anomaly layer) above the anticlines and faults and areas without anticlines and faults.

Table 3. Concentration rates of all anomaly layers within the range of anticlines and faults and outside the range of anticlines and faults.

| Integrated layer derived from all alterations                              | Anomaly type |
|----------------------------------------------------------------------------|--------------|
| The concentration of anomalies outside the range of the anticlines         | 0.86         |
| The concentration of anomalies upon anticlines                             | 1.42         |
| The efficiency coefficient of the anomalies upon the anticline             | 1.65         |
| The concentration of anomalies outside the range of anticlines and faults  | 0.81         |
| The concentration of anomalies upon anticlines and faults                  | 1.37         |
| The efficiency coefficient of the anomalies upon the anticlines and faults | 1.69         |

#### 4- Conclusions

The following results were obtained from the present research:

Geochemical methods used to identify alteration patterns in Moghan plain while saving time, cost and investigating a more comprehensive range than conventional geophysical methods show high confidence in costly exploratory drilling.

The dispersion of carbonates replacement by gypsum, clay minerals, ferrous iron alterations and surface magnetic anomalies showed a good agreement with the position of the anticlines and faults, indicating that these alterations have a common origin and because of their adaptation and overlapping upon the anticlines and faults of the area, they are likely due to leakage of hydrocarbons from underground to the surface.

The percentage of positive anomalies upon the anticlines relative to total anomalies is higher than the percentage of anticlines and faults in the study area, which indicates a high concentration of positive anomalies in the area of anticlines and faults.

The highest increase in efficiency coefficient for anomalies outside the range of anticlines was due to the alteration of carbonate minerals by 3.03, 9 times higher than its initial state, and the lowest increase in efficiency coefficient was 1.31 for ferrous minerals alteration, which has changed only about two times as much as it was.

Using the faults in the adaptation, the efficiency coefficient of carbonate minerals alteration became 20 times higher than its initial state, and the efficiency coefficient of ferrous minerals alteration was only two times higher than their initial state. The use of faults made not a significant difference in its efficiency coefficient.

By comparing the efficiency coefficients for the anomalies upon the anticlines and faults relative to the anomalies outside the range of the anticlines and faults, it was found that carbonate and illite minerals are the most prominent alterations due to hydrocarbon leakages in the area. In contrast, surface magnetic anomalies and ferric iron minerals are minor alterations due to hydrocarbons in the Moghan plain.

Due to the accumulation and distribution of alteration minerals in the central and southern parts of the following results were obtained from the present research:

Geochemical methods used to identify alteration patterns in Moghan plain while saving time and cost and investigating a more comprehensive range than conventional geophysical methods show high confidence in costly exploratory drilling.

The dispersion of carbonates replacement by gypsum, clay minerals, ferrous iron alterations and surface magnetic anomalies showed a good agreement with the position of the anticlines and faults, indicating that these alterations have a common origin. Because of their adaptation and overlapping upon the anticlines and faults of the area, they are likely due to leakage of hydrocarbons from underground to the surface.

The percentage of positive anomalies upon the anticlines relative to total anomalies is higher than the percentage of anticlines and faults in the study area, which indicates a high concentration of positive anomalies in the area of anticlines and faults.

The highest increase in efficiency coefficient for anomalies outside the range of anticlines was due to the alteration of carbonate minerals by 3.03, 9 times higher than its initial state, and the lowest increase in efficiency coefficient was 1.31 for ferrous minerals alteration, which has changed only about two times as much as it was.

Using the faults in the adaptation, the efficiency coefficient of carbonate minerals alteration became 20 times higher than its initial state, and the efficiency coefficient of ferrous minerals alteration was only two times higher than their initial state. The use of faults made not a significant difference in its efficiency coefficient.

By comparing the efficiency coefficients for the anomalies upon the anticlines and faults relative to the anomalies outside the range of the anticlines and faults, it was found that carbonate and illite minerals are the most prominent alterations due to hydrocarbon leakages in the area. In contrast, surface magnetic anomalies and ferric iron minerals are minor alterations due to hydrocarbons in the Moghan plain.

Due to the accumulation and distribution of alteration minerals in the central and southern parts of the Moghan plain, the Zivar Formation can be suggested for further hydrocarbon exploration. In general, the findings of this paper indicate that locating geochemical and geophysical anomalies due to hydrocarbon leakage to the surface can be a considerable help in identifying the location of hydrocarbon potential of reservoirs in oilfields. However, it should be noted that not observing these anomalies on other anticlines in the region does not mean that the hydrocarbon potential of those anticlines is negative. The Moghan plain and the Zivar Formation can be suggested for further hydrocarbon exploration. In general, the findings of this paper indicate that locating geochemical and geophysical anomalies due to hydrocarbon leakage to the surface can be a considerable help in identifying the location of hydrocarbon potential of reservoirs in oilfields. However, it should be noted that not observing these anomalies on other anticlines in the region does not mean that the hydrocarbon potential of those anticlines is negative.

## References

- Abrams, M.A., 2005. Significance of hydrocarbon seepage relative to petroleum generation and entrapment. *Marine and Petroleum Geology* 22, 457–477.
- Bonyadi, Z., Daryanavard, E., 2020. Comparison of ASTER and Landsat-8 OLI data for detecting iron occurrences and alteration in Shahrak area, Kurdistan Province. *Advanced Applied Geology* 10(2), 154–166.
- Donovan, T.J., 1974. Petroleum microseepage at Cement, Oklahoma-evidence and mechanisms. *AAPG Bulletin* 58, 429–446.



- Ellwood, B.B., Burkart, B., 1996. Test of Hydrocarbon-Induced Magnetic Patterns in Soils: The Sanitary Landfill as Laboratory. AAPG Bulletin 7, 91-98.
- Elmore, R.D., M.H., Engel, L., Crawford, K., Nick, S., Imbus, Z., Sofer, 1987. Evidence for a relationship between hydrocarbons and authigenic magnetite. Nature 325, 428-430.
- Fu, B., Zheng, G., Ninomiya, Y., Wang, C., Sun, G., 2007. Mapping hydrocarbon-induced mineralogical alteration in the northern Tian Shan using ASTER multispectral data. Terra Nova 19, 225-231.
- Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi A., Golmohammadi, A., 2012. Mineralization and ground magnetic exploration of magnetite mineralization between Baghak and C-North, Sangan iron mine, Khaf. Advanced Applied Geology 2(1), 38-54.
- McCabe, C., Sassen, R., Saffer, B., 1987. Occurrence of secondary magnetite within biodegraded oil. Geology 15, 1351-1370.
- Rangzan, K., Beiranvand, S., Pourkaseb, H., Zarasvandi, A., Ranjbar, H., 2021. Enhancing of iron containing minerals using satellite images and spectroscopy technique (Case study: North Saveh). Advanced Applied Geology 11(1), 29-42.
- Reynolds, R.L., Fishman, N.S., Wanty, R.B., Goldhaber, M.B., 1990. Iron sulfide minerals at Cement oil field, Oklahoma: implications for magnetic detection of oil fields. GSA Bulletin 102, 368-380.
- Salati, S., 2014. Characterization and remote detection of onshore hydrocarbon seep-induced alteration. Ph.D. Thesis, University of Twente, Netherlands, 162 pp.
- Schumacher, D., 1996. Hydrocarbon-induced alteration of soils and sediments. AAPG Memoir 66, 71-89.

**HOW TO CITE THIS ARTICLE:**

Sadeghizadeh, Z., Mojtahedzadeh, S.H., Ansari, A., Morshedy, A.H., 2022. Investigation of geochemical anomalies associated with oilfields using matching magnetometric data and satellite images, case study: Moghan plain. Adv. Appl. Geol. 12(3), 468-488.

DOI: 10.22055/AAG.2021.33089.2109

url: [https://aag.scu.ac.ir/article\\_17036.html?lang=en](https://aag.scu.ac.ir/article_17036.html?lang=en)

©2022 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



## بررسی بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی مرتبط با میادین نفتی با استفاده از تطبیق داده‌های مغناطیس‌سنجی و تصاویر ماهواره‌ای، مطالعه موردی: دشت مغان

زهره صادقی زاده\*

فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد اکتشاف نفت، دانشگاه یزد

سید حسین مجتهد زاده

عضو هیات علمی دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

عبدالحمید انصاری

عضو هیات علمی دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

امین حسین مرشدی

عضو هیات علمی دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

\*utab.sadeghizadeh@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۰۹

### چکیده

در سال‌های اخیر روش‌های اکتشافی مبتنی بر مطالعه دگرسانی‌های ناشی از نشت هیدروکربور از سنگ مخزن به‌طرف سطح زمین موردتوجه قرار گرفته است. با توجه به اینکه این نشت‌ها به‌صورت هاله‌هایی در بالای نفت‌گیرها رخ می‌دهند، محل نشت آن‌ها دارای انطباق نسبی با موقعیت نفت‌گیرهای دارای هیدروکربور است. هدف از این مطالعه، پردازش و تفسیر داده‌های زمین‌شناسی، دورسنجی، ژئوشیمی اکتشافی سطحی حوضه رسوبی مغان و سپس تطبیق نتایج حاصل از این داده‌ها با مناطق محتمل غنی از هیدروکربور می‌باشد. در مطالعات دورسنجی، روش‌های نسبت‌گیری باندی، ترکیب رنگی RGB و آنالیز مؤلفه‌های اصلی جهت شناسایی دگرسانی‌های آهن فروس، ژپس جایگزین کربنات‌ها و کانی‌های رسی مورد استفاده قرار گرفت. همچنین بی‌هنجاری‌های مغناطیس سطحی توسط کاربرد فیلترهای آنالیز سیگنال تحلیلی، مشتق اول و ادامه فراسو بر روی داده‌های مغناطیس زمینی شناسایی گردیدند. انطباق تراکم بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی مثبت ابتدا با لایه تاقدیس‌ها و سپس با لایه تلفیقی گسل‌ها و تاقدیس‌های منطقه، با توجه به ضرایب کارایی انجام گرفت. این بررسی نشان داد که دگرسانی کانی‌های کربناته و ایلیت (شاخص‌ترین دگرسانی‌های مشاهده‌شده) با تاقدیس‌ها در سطح زمین بیشترین انطباق را داشته و دگرسانی کانی‌های آهن فروس و بی‌هنجاری‌های مغناطیسی سطح کم‌ترین انطباق را دارا می‌باشند. همچنین تراکم بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی مثبت بر روی تاقدیس‌ها بیشتر از مناطق فاقد تاقدیس‌هاست و در صورتی که از گسل‌ها نیز استفاده شود، این تراکم تقریباً دو برابر خواهد شد. این موضوع نشت احتمالی هیدروکربورها از مخازن به سطح زمین و ایجاد بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی بالای مخازن را ثابت می‌کند. از این یافته می‌توان برای کشف محل تقریبی مخازن مدفون در منطقه کمک گرفت و هزینه عملیات حفاری را به‌طور قابل ملاحظه کاهش داد.

**کلمات کلیدی:** تراوش هیدروکربورها، ژئوشیمی سطحی، سنجش از دور، مغناطیس سنجی، دگرسانی خاک، اکتشاف هیدروکربورها، دشت مغان

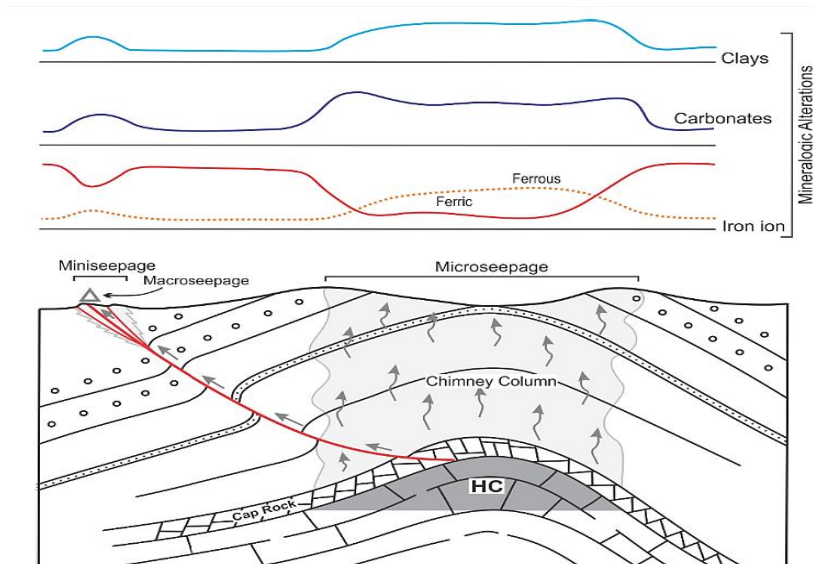
### مقدمه

می‌گردد که به موجب آن دگرسانی‌های شیمیایی و کانی شناسی متنوعی پدید می‌آید. دگرسانی‌های اصلی شامل احیا آهن فریک، تبدیل لایه‌های مخلوط رس و فلدسپات به کانی‌ها رسی و افزایش غلظت کربنات‌هاست. در نتیجه مهاجرت هیدروکربن‌ها، برخی گازهای احیا کننده مانند  $H_2S$  با آهن فریک (لیمونیت، هماتیت و گوتیت) واکنش داده و آهن فروس (مگنتیت و مگهمیت) را تولید می‌کند (Asadzadeh and de Souza Filho, 2017; Martínez-Gomez and Jaramillo, 2016).

به دلیل وجود فشار زیاد در عمق و نیز ضعف صفحات بین لایه‌های زمین‌شناسی، هیدروکربورها می‌توانند از طریق شکستگی‌ها و گسل‌ها از مخازن زیر سطح به سمت سطح زمین فرار و نشت کنند. میکروتراوش‌های هیدروکربنی در مسیر مهاجرت خود بر روی عناصر دیگر درون خاک تأثیر گذاشته و دگرسانی‌هایی را در مسیر حرکت خود به وجود می‌آورند (Abrams, 2005). نشت طولانی مدت هیدروکربن‌ها منجر به ایجاد مناطق احیایی محلی در نزدیکی سطح

زیاد می‌باشد. شرایط احیایی و اسیدی ناشی از اکسیداسیون هیدروکربن‌ها در نزدیکی سطح، موجب دگرسانی فلدسپارهای هوازده به کانی رسی، و تبدیل کانی رسی اسمکتیت به کائولینیت می‌گردد (Chen et al., 2017) (شکل ۱).

همچنین هیدروکربن‌های مهاجر به سطح ممکن است در واکنش با  $CO_2$  اکسیده شوند و موجب ایجاد یک محیط اسیدی ضعیف در آب زیرزمینی گردند. سپس، کربنات‌ها با مشارکت میکروارگانیسم‌ها با این یون‌های فلزی واکنش نشان می‌دهند و ایجاد کربنات‌های ثانویه (ژیپس) می‌کنند؛ بنابراین غلظت کربنات ثانویه در لبه‌های تجمع هیدروکربن



شکل ۱- مدل کلی دگرسانی‌های ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی ناشی از عملکرد هیدروکربن‌ها در خاک‌ها و رسوبات (Asadzadeh and de Souza Filho, 2017).

Fig. 1. General model of geochemical and geophysical alterations due to hydrocarbon performance in soils and sediments.

گردیده است (Donovan, 1974; Sun and Khan, 2016). رینولدز و همکاران پدیده تشکیل مگنتیت در میدان نفتی سمت<sup>۱</sup> را دوباره مورد آزمایش قرار دادند و نتیجه گرفتند که این موضوع ناشی از آلودگی حاصل از حفاری است. باین‌حال آن‌ها وجود کانی فری مغناطیس پیرویت را در این قسمت اثبات کردند و اظهار نمودند که این کانی به‌عنوان نتیجه‌ای از تجزیه و تراوش هیدروکربن ته‌نشین شده است (Reynolds et al., 1990). اگرچه مگنتیت اتونژیک در میدان سمت حضور نداشت، باین‌حال پدیده تشکیل آن در بسیاری از محل‌های تراوش هیدروکربن، به‌وسیله المور و همکاران و مک‌کب و همکاران به اثبات رسید (Elmore et al., 1987; McCabe et al., 1987).

نتایج مطالعه برای بیش از ۲۷۰۰ حلقه چاه اکتشافی در جهان نشان داد که از چاه‌های حفر شده روی مناطق محتمل اکتشافی همراه با آنومالی‌های ژئوشیمیایی مثبت، ۸۲٪ به عنوان اکتشاف‌های تجاری تکمیل شدند. در مقابل، تنها ۱۱ درصد از چاه‌های حفر شده روی مناطق محتمل اکتشافی بدون وجود بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی ناشی از هیدروکربن منجر به اکتشاف نفت و گاز گردیدند. بنابراین با تلفیق داده‌های لرزه‌ای با روش‌های اکتشاف سطحی میزان موفقیت حفاری و

موضوع ارتباط دگرسانی‌های سطحی ناشی از نشت هیدروکربورها در سطح زمین و در بالای مخازن هیدروکربوری در چند دهه گذشته به عنوان ابزاری برای پی‌جویی ذخائر نفتی و اولویت‌بندی حفاری‌های اکتشافی در میدان‌های نفتی با موفقیت بکارگرفته شده است. از آنجایی که نشت هیدروکربورها سبب ایجاد دگرسانی‌هایی بر روی مخازن و در سطح زمین می‌گردد، در سال‌های متمادی از دورسنجی به‌عنوان روشی برای آشکار سازی این دگرسانی‌ها استفاده گردیده است. نتایج مطالعات فو و همکاران، نشان دادند که با استفاده از تکنیک نسبت‌های باندی می‌توان اثرات لایه‌های قرمز سفید شده و کانی‌های کربناته ثانویه ناشی از نشت هیدروکربن‌ها را تشخیص داد (Fu et al., 2007). صلاتی با استفاده از داده‌های سنجنده استر و هایپریون به مطالعه دگرسانی کانی‌های کربناته حاصل از نشت هیدروکربورها در فروافتادگی دزفول پرداخت و مدل‌های تعمیم‌یافته‌ای از تغییرات طیفی و ژئوشیمیایی را پیشنهاد نمود (Salati, 2015; Salati et al., 2014).

روش دیگری که برای چندین دهه در بارزسازی دگرسانی‌های ناشی از تراوش هیدروکربورها موردتوجه بوده است، مغناطیس‌سنجی سطحی می‌باشد. دنوان، وجود مگنتیت را در سنگ‌های پرمین پوشاننده میدان سمت اوکلاهاما گزارش کرد و اندیشید که مهاجرت آب‌های شور مرتبط با هیدروکربن‌ها از عمق، موجب احیا هماتیت و تشکیل مگنتیت

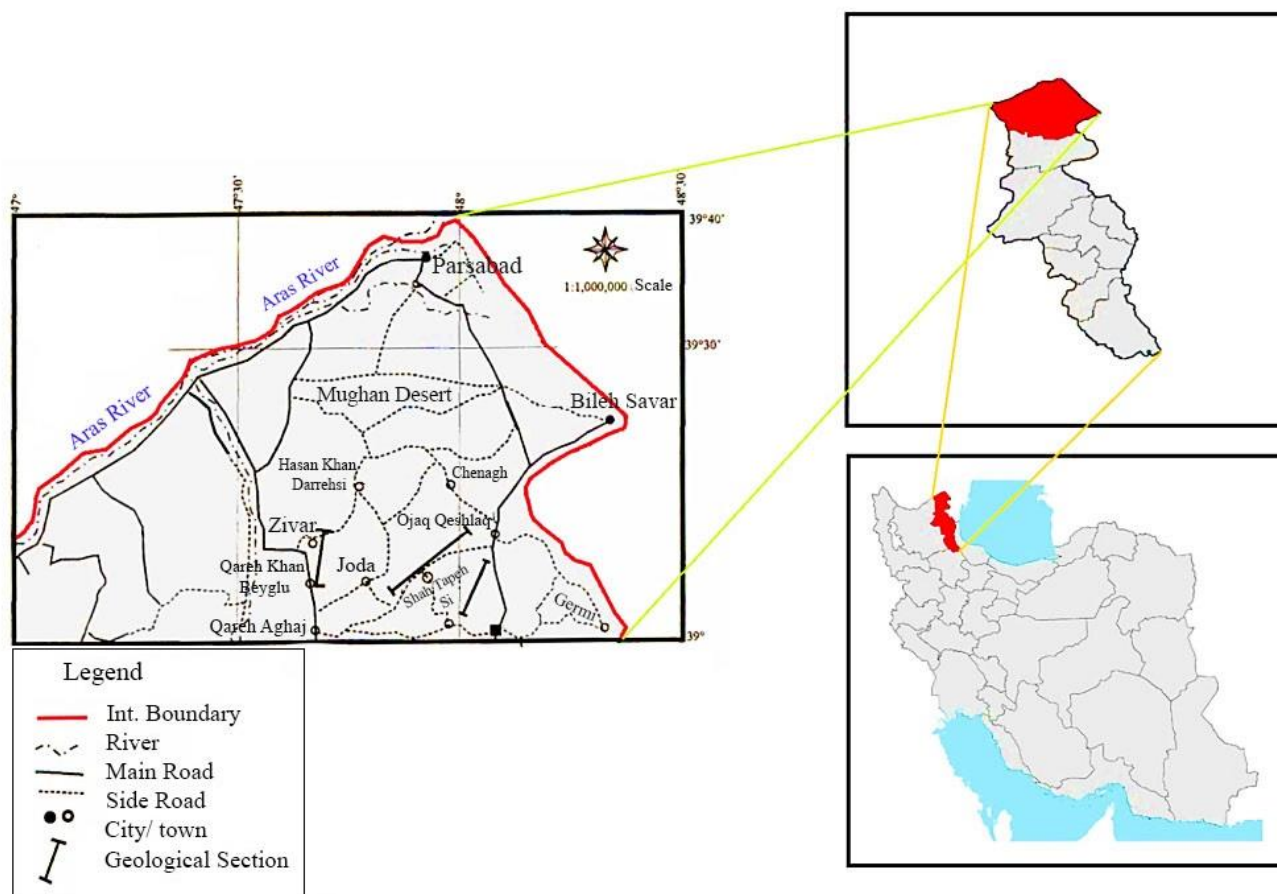
(Fakoori et al., 2007). سازندهای دشت مغان و ارتفاعات خروسلو مربوط به دوره‌ی میوسن تا دوران کواترنر هستند. سازندهای رسوبی رودخانه‌ای کواترنری و بعدازآن رسوبات قدیمی‌تر، تا حدود اولین پادگانه‌ها، مرکب از مواد آهکی، سنگ‌های آهکی، دولومیتی، کنگلومرا و مواد رسوبی می‌باشد که بخش شمالی دشت مغان را فراگرفته است. رسوبات دوران میوسن که متشکل از خاکسترهای آتشفشانی، ماسه‌سنگ و تا حدودی شن، ماسه و کنگلومرا می‌باشند. بعد از سازندهای رودخانه‌ای مزبور در قسمت وسیعی از جنوب شرقی مغان طبقاتی متشکل از مواد حمل شده توسط باد وجود دارد که ارتفاع آن‌ها متجاوز از ۵۰ متر می‌باشد. سازندهای مربوط به دوران پلیوسن که از مواد رسی و توده‌های ژیبسی - نمکی دوره‌ی نئوژن تشکیل شده است و در جنوب غربی اصلاندوز قرار دارد. در امتداد این قسمت به‌طرف شرق، رسوبات کنگلومرایی مشاهده می‌شود. منطقه‌ی جنوبی مغان شامل گرمی و ارتفاعات خروسلو که متعلق به دوره‌ی الیگومیوسن است. این سازندها همراه با مواد آتشفشانی، تقریباً به‌صورت خط مستقیمی از شرق به غرب امتداد دارد و به جنوب خدا آفرین در کرانه‌ی رودخانه‌ی ارس منتهی می‌شود (Jafarzadeh et al., 2014).

اکتشاف بیش از دو برابر و در برخی موارد منجر به افزایش ده برابری گردیده است (Schumacher, 1996).

در این مقاله به دگرسانی‌های قابل استنباط از تصاویر ماهواره‌ای و نیز نقشه تغییرات مغناطیس سطحی و ارتباط آن‌ها با نشت سطحی هیدروکربورها از مخازن احتمالی نفتی، انباشته شده در زیر تاقدیس‌ها، در منطقه دشت مغان پرداخته شده و کارایی این مطالعات در پی‌جویی مخازن هیدروکربوری نشان داده شده است.

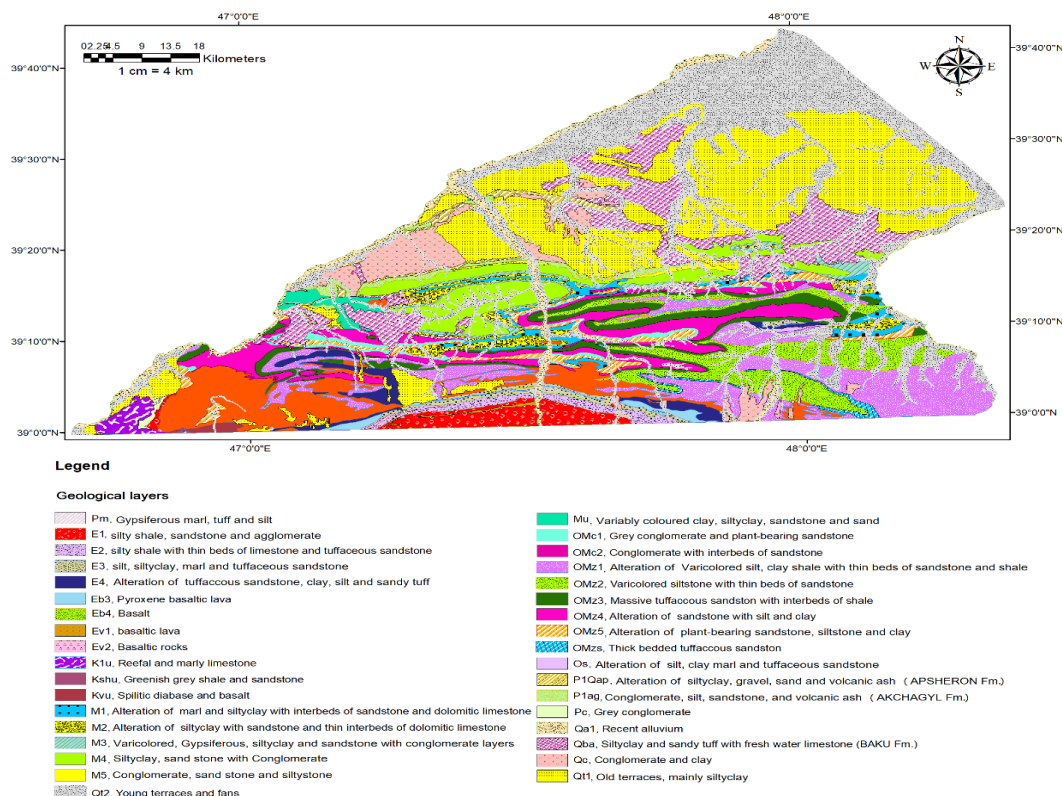
## موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی عمومی

برگه ۱:۲۵۰۰۰۰ دشت مغان در شمال غربی ایران و در سمت غربی دریای خزر و در شمال استان اردبیل، روی بین مدار ۴۶°، ۲۰' تا ۴۸° طول شرقی از نصف النهار گرینویچ و ۳۹°، ۴۰' تا ۳۹° عرض جغرافیایی شمالی واقع شده است (شکل ۲). منطقه نفت‌خیز دشت مغان دارای وسعت ۷۳۷۸ کیلومترمربع است و ضخامت رسوبات در این منطقه به بیش از ۸ کیلومتر می‌رسد. بلوک دشت مغان محدوده‌ای از چین مرکب قفقاز کوچک، طالش و ناحیه میان‌کوهی فروافتادگی کورا - ساختارهای بزرگ می‌باشد که تا قلمرو آذربایجان گسترش یافته است (شکل ۳).



شکل ۲- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه.

Fig. 2. Geographical location of the study area.



شکل ۳- نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه دشت مغان با مقیاس ۱/۲۵۰۰۰۰  
Fig. 3. Geological map of study area, Moghan plain, with scale of 1.250000.

## روش مطالعه

مخازن زیرزمینی به سطح پرداخته شده است. بی‌هنجاری‌های کم عمق ناشی از نشت هیدروکربورها با ترسیم نقشه‌های مشتق قائم اول، ادامه فراسو و سیگنال تحلیلی استخراج و سپس تفسیر گردیده‌اند و پس از آن به منظور یافتن انطباق بین بی‌هنجاری‌های مغناطیسی کم عمق و نشت هیدروکربورها، موقعیت تاقدیس‌ها بر روی نقشه بی‌هنجاری‌های کم عمق مغناطیسی پلات شده است. در آخر نیز تطبیق لایه‌های اطلاعاتی سنجش از دور و مغناطیس سنجی با لایه‌های اطلاعاتی تاقدیس‌ها و گسل‌ها صورت گرفته است.

در این مقاله داده‌های سنجش از دور بوسیله روش‌های نسبت‌های بانندی، ایجاد ترکیب رنگی کاذب، آنالیز مؤلفه‌های اصلی و طبقه‌بندی الگوریتم نقشه‌برداری زاویه طیفی مورد پردازش قرار گرفته است. نسبت‌گیری بانندی در واقع یکی از روش‌های پردازش تصاویر ماهواره‌ای است که شامل تقسیم پیکسل‌های یک تصویر یا یک باند طیفی به پیکسل‌های متناظر آن تصویر یا باند دیگر است. آنالیز مؤلفه‌های اصلی یکی از روش‌هایی که برای کاهش همبستگی بین داده‌های چند متغیره و افزایش تمایزات در آن‌ها استفاده می‌شود، روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی است. با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی می‌توان تعداد زیادی متغیر مستقل همبسته را با تعداد محدودی متغیر جدید که مؤلفه‌های اصلی نامیده می‌شوند و ناهمبسته‌اند، جایگزین نمود (Clark, 1999). داده‌های تصویری خام معمولاً به صورت باندهای منفرد یا به صورت ترکیب رنگی حقیقی و یا ترکیب رنگی کاذب بر روی

روش‌های تفسیری در این مطالعه شامل مطالعات دورسنجی و مغناطیس‌سنجی سطحی (کم عمق) و در آخر تطبیق لایه‌های اطلاعاتی می‌گردد. از آنجایی که تفسیر دگرسانی‌های ژئوشیمیایی منطقه و نیز محل تراوش هیدروکربورها و موقعیت نفت‌گیرهای منطقه در زیر سطح بدون اطلاعات زمین‌شناسی منطقه امکان‌پذیر نمی‌باشد؛ لذا در ابتدا به معرفی و بررسی زمین‌شناسی دشت مغان پرداخته شده است. کانی‌های دارای اکسید آهن و کربناته‌ها، کانی‌های هیدروکسید و هیدرات و همچنین رس‌ها و ژئوسپیس برخی از متداول‌ترین دگرسانی‌های ناشی از تراوش‌های هیدروکربنی هستند. در این مطالعه موقعیت دگرسانی‌های اکسید آهن و کانی‌های رسی، از پردازش تصاویر سنجیده استر ماهواره ترا و نیز لندست شناسایی گردید و پس از تطبیق نسبی با نقشه زمین‌شناسی، با موقعیت تاقدیس‌های منطقه تطبیق داده شد و الگوی دگرسانی کانی‌های منطقه که ناشی از نشت هیدروکربورها بود استخراج گردید.

معمولاً پس از شناسایی الگوی دگرسانی و بررسی هم‌زمان وضعیت زمین‌شناسی منطقه، مطالعات مغناطیس‌سنجی انجام می‌شود؛ بنابراین در ادامه مطالعه به بررسی‌های مغناطیس‌سنجی در دشت مغان به منظور بررسی اثربخشی روش‌های ژئوفیزیکی در تعیین بی‌هنجاری‌های مغناطیسی کم عمق مرتبط با کانی‌سازی ناشی از نشت هیدروکربن‌ها از

جلوگیری از خطا در بارسازی دگرسانی‌ها، پوشش گیاهی با استفاده از شاخص پوشش گیاهی استاندارد از نواحی مورد مطالعه تفکیک گردید. شاخص پوشش گیاهی استاندارد (NDVI) باعث افزایش اختلاف شدید در بازتاب بین مادون قرمز و رنگ قرمز موجود در طیف‌های پوشش گیاهی می‌شود (Rockwell, 2013).

### پردازش داده‌های لندست ۸

در تعیین الگوها جهت شناسایی دگرسانی‌های آهن فروس ابتدا از روش نسبت‌های باندی و ترکیب رنگی باندها استفاده شد. برای این منظور از نسبت‌های باندی جدول ۱ و سپس ایجاد یک ترکیب رنگی از این نسبت‌ها کمک گرفته شد. سپس نقشه دگرسانی‌های آهن فروس با استفاده از روش طبقه‌بندی الگوریتم نقشه‌بردار زاویه طیفی و نمونه‌گیری توسط ROI از مناطق دارای دگرسانی آهن فروس تهیه گردید. از آنجا که نواحی دارای دگرسانی معمولاً مقدار شاخص پایینی از کانی‌های کدر و هیدروکسیدی را دارا هستند، اما شاخص بالایی از آهن فروس همراه می‌باشند؛ بنابراین مناطق دارای رنگ آبی مناطق دگرسانی را نمایش می‌دهند (شکل ۴).

### پردازش داده‌های استر

پردازش داده‌های استر جهت آشکارسازی دگرسانی‌های کربناته (ژئیس جایگزین کربناته‌ها) و کانی‌های رسی (مونت‌موریلونیت، کائو-اسمکتیت و ایلیت) در دو بخش مجزا و توسط روش‌های نسبت‌های باندی و ایجاد تصاویر RGB از این نسبت‌ها و روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی صورت گرفت. نسبت‌های باندی مورد استفاده به منظور آشکارسازی دگرسانی‌های کربناته در جدول ۱ نمایش داده شده‌اند. در ناحیه مورد مطالعه نواحی دگرسان شده باید دارای غلظت بالایی از ژئیس و رس و غلظت پایینی از کلسیت و آهن فریک باشند. بنابراین برای ایجاد ترکیب رنگی کاذب، باندهای طیفی مختلفی از داده‌های استر انتخاب شده و در سیستم رنگی RGB ترکیب شدند تا تصاویر ترکیب رنگی را برای مناطق مورد مطالعه ایجاد کنند (شکل ۵) (Wang, 2016). در ادامه نیز از ترکیب رنگی کاذب RGB استفاده گردید.

در تعیین دگرسانی کانی‌های رسی مونت‌موریلونیت، کائو-اسمکتیت و ایلیت از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی استفاده گردید (Zhang et al., 2013). به‌منظور نقشه‌برداری عضو انتهایی کائو-اسمکتیت و انتخاب ترکیب باندهای مناسب، نمودار بازتاب-طول موج آن با باندهای استر تطبیق داده شد (شکل ۶) و مقادیر بردارهای ویژه حاصل از تحلیل مؤلفه‌های اصلی باندهای ۱، ۳، ۶، ۷ برای کانی‌های کائو-اسمکتیت به دست آمد. باندهای ۵، ۶، ۳، ۱ استر برای نمایش ایلیت انتخاب شدند. همچنین بردارهای ویژه حاصل از تحلیل مؤلفه‌های اصلی باندهای ۴، ۶، ۷، ۸ برای کانی‌های مونت‌موریلونیت به دست آمد. بنابراین دگرسانی کانی‌های رسی با استفاده از روش کروستا استخراج گردید.

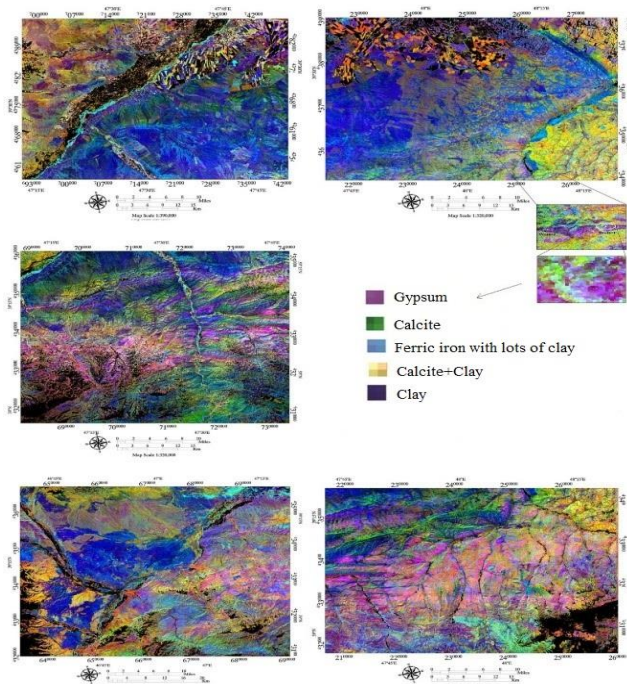
صفحه مانیتور نمایش داده می‌شوند. معمولاً از ترکیب سه رنگ و اختصاص یکرنگ از سه رنگ اصلی قرمز، سبز و آبی به هر باند، تصویر رنگی ساخته می‌شود (Gao, 2009). همچنین نقشه‌برداری زاویه طیفی یک روش طبقه‌بندی تصویر با محاسبه تشابه بین طیف تصویر و یک طیف مرجع مانند کتابخانه‌های طیفی است. الگوریتم این روش، با تبدیل طیف‌ها به بردار در فضایی به ابعاد تعداد باندها، زاویه بین دو بردار محاسبه می‌کند. در این مطالعه از مقدار زاویه ۰/۲ استفاده گردید. طیف عضو انتهایی را می‌توان از فایل‌های ASCII، کتابخانه‌های طیفی و یا مناطق مورد علاقه (ROI) به‌طور مستقیم در تصویر استخراج کرد که در این مطالعه طیف‌های عضو انتهایی از مناطق دگرسانی (ROI) جمع‌آوری گردید (Khorram et al., 2016).

به‌منظور آشکارسازی بی‌هنجاری‌های مغناطیسی، ابتدا با حذف  $IGRF = 48.90/54$  میدان مغناطیس باقی‌مانده ترسیم گردید و سپس با استفاده از فیلترهای آنالیز سیگنال تحلیلی، ادامه فراسو، مشتق قائم پردازش گردید که هر کدام در ادامه به صورت مختصر تشریح گردیده‌اند. در فیلتر آنالیز سیگنال تحلیلی با گرفتن مشتق در جهات مختلف اثر روند منطقه‌ای که از نوع درجه اول می‌باشد در سه جهت حذف می‌شود با این کار اثر بی‌هنجاری‌های سطحی و غیر مرتبط با کانسار به‌طور بهتری حذف می‌شود و پیکره توده اصلی نیز بهتر نمود پیدا می‌کند و درواقع مرز بی‌هنجاری را نشان می‌دهد (Roest and Pilkington, 1992). با اعمال فیلتر ادامه فراسو اثر بی‌هنجاری‌های ناشی از پدیده‌های کوچک و سطحی با طول موج کوتاه که بر اثر توده‌های سطحی یا نوفه‌ها ایجاد می‌شود تضعیف شده و بی‌هنجاری‌های بزرگ‌تر و عمیق‌تر با طول موج بالا به‌طور شاخص برجسته نشان داده می‌شوند (Alamdari and Madanchi, 2013). با استفاده از فیلتر مشتق قائم بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای و عمیق به دلیل خطی بودن آن خیلی ضعیف شده و یا از بین می‌روند؛ بنابراین بی‌هنجاری‌های سطحی با طول موج کوتاه به‌صورت واضح‌تر و برجسته‌تری نشان داده خواهند شد (Ansari et al., 2013).

### بحث و بررسی

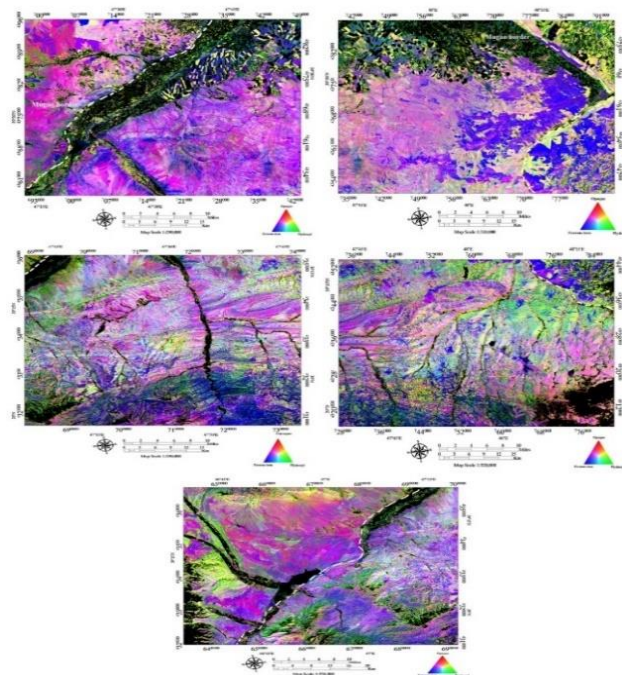
#### تهیه و پردازش داده‌های سنجنش از دور

از تصاویر ماهواره لندست ۸ جهت استخراج دگرسانی‌های آهن فروس استفاده گردید. تصاویر لندست مورد استفاده در این مطالعه در تاریخ ۲۰۱۷/۰۳/۲۲ در گذر ۱۶۷ و ۱۶۸، ردیف ۳۳ و تصاویر استر در ماه ژانویه سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۰۳ برداشت شده‌اند. این داده‌های دریافت‌شده از وبسایت USGS<sup>۲</sup> توسط ارائه‌دهندگان داده از پیش پردازش شده‌اند. تصاویر لندست ۸ و داده‌های استر (L1B) از نظر رادومتریک و اتمسفری تصحیح گردید. به‌منظور پردازش سریع‌تر و نیز برای تشخیص بهینه دگرسانی‌ها، تمام تصاویر ماهواره‌ای به ۵ منطقه برش زده شدند و به‌طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفتند. ابتدا به منظور



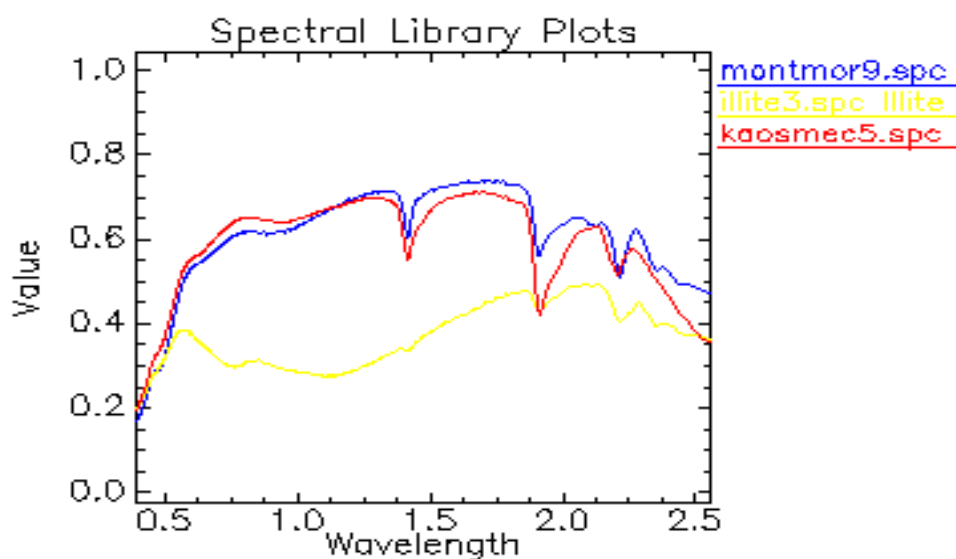
شکل ۵- ترکیب رنگ کاذب حاصل از نسبت‌های عمق باند جذب نسبی (RBD) و نسبت‌های باندی  $b4/(b6+b9)$  به رنگ قرمز برای بارزسازی سنگ ژئپس،  $b7/(b9+b8)$  به رنگ سبز برای بارزسازی کلسیت و  $b5/(b7+b6)$  به رنگ آبی برای بارزسازی رس‌ها.

Fig. 5. False color combination of relative absorption band (RBD) and band ratios:  $b4 / (b6 + b9)$  plotted with red color indicates gypsum rock,  $b7 / (b9 + b8)$  plotted with green indicates calcite and  $b5 / (b7 + b6)$  plotted with blue indicates clay.



شکل ۴- ترکیب رنگی کاذب نسبت‌های باندی  $6.2, 6.7, 6.5, 4.5$  Landsat 8 باند راتو در ۵ منطقه مورد مطالعه، دشت مغان. رنگ قرمز نشان‌دهنده کانی‌های کدر، رنگ سبز بیانگر هیدروکسیل‌ها و رنگ آبی وجود آهن فروس را نمایش می‌دهد.

Fig. 4. False color combination of 6.2, 6.7, 6.5 4 4.5, Landsat 8 band ratios in 5 study areas, Moghan plain. Red color indicates opaque minerals, green indicates hydroxyls, and blue indicates ferrous iron.



شکل ۶- نمایش کانی‌های هدف در کتابخانه طیفی برای اعضای انتهایی (Kokaly et al., 2017).

Fig. 6. Presentation of target minerals in the spectral library for end-members (Kokaly et al., 2017).

جدول ۱- ترکیب‌های باندی مورد استفاده لندست ۸ و استر مورد استفاده برای بارزسازی دگرسانی‌های ناشی از نشت هیدروکربورها (Salati, 2014).  
Table 1. Aster and Landsat band combinations used to detect hydrocarbon alterations in the region.

| ASTER       |          | Landsat 8            |                                                                                               |
|-------------|----------|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Band ratios | Minerals | Band ratios          | Minerals                                                                                      |
| $(7+9)/8$   | Calcite  | 5/6                  | Ferric oxide                                                                                  |
| $(5+7)/6$   | Clays    | 4/2                  | Ferrous iron ( $Fe_{2+}$ ) (For example; magnetite and pyrite) with carobonates and silicates |
| $4/(6+9)$   | Gypsum   | $(4/5) \times (6/5)$ | minerals Opaque                                                                               |
| -           | -        | 6/7                  | Clays (Hydroxyl minerals)                                                                     |

از دگرسانی‌های به‌دست‌آمده در شرق و بخش‌هایی از مرکز اثر این لایه ها در نتایج دگرسانی حذف گردید. سازندهای دارای لایه‌هایی آهکی و مارنی در بخش‌های مرکزی و شرق منطقه (شکل ۳)، کربنات‌های مستعد دگرسان شدن در منطقه می‌باشند و مناطق دگرسان شده تطبیق خوبی با این لایه‌ها دارند.

### دگرسانی کانی‌های رس

شکل ۹ تمامی دگرسانی کانی‌های رسی را در یک تصویر نشان می‌دهد. دلیل توجیه‌کننده این توزیع کانی‌ها می‌تواند تولید  $CO_2$ ،  $H_2S$  و اسیدهای آلی مرتبط با اکسیداسیون هیدروکربنی نزدیک به سطح باشد که در نتیجه آن محیط نسبتاً اسیدی و احیایی منجر به دگرسانی فلدسپارها به کانی‌هایی مانند کائولینیت، ایلیت می‌شود. دگرسانی کانی‌های رسی تطابق خوبی با محل قرارگیری تاق‌دیس‌ها دارند و توزیع جغرافیایی کانی‌های رسی ایلیت، کائولینیت و مونت‌موریلونیت در منطقه نشان می‌دهد که توزیع رخمون‌های شسته شده سازند تقریباً از فرم محدوده جغرافیایی تاق‌دیس‌های منطقه در عمق تبعیت می‌کند. همچنین شکل نشان می‌دهد که توزیع جغرافیایی ایلیت درست در مناطق پوشیده از لایه‌های رسی کائولینیت و مونت‌موریلونیت رخ داده است و این امر نشان می‌دهد که غنی‌سازی کائولینیت با دگرسانی خاک رس در این مناطق ارتباط دارد. غنی‌سازی کائولینیت از ایلیت‌های منطقه بیشتر در نواحی مرکزی و جنوبی دشت مشاهده می‌شود.

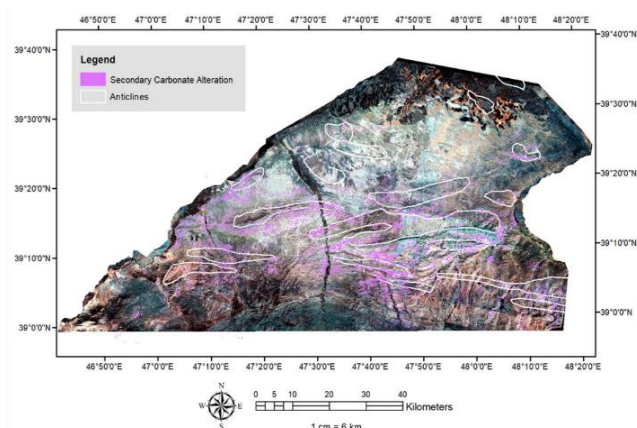
### دگرسانی‌های بارزسازی شده

#### دگرسانی کانی آهن فروس

مطابق شکل ۷ گسترش و پراکندگی این کانی‌ها در شمال شرق و جنوب و مرکز منطقه مشاهده می‌شود. در صورتی که غرب دشت فاقد این دگرسانی‌ها می‌باشد. با توجه به نقشه زمین‌شناسی دشت مغان دگرسانی‌های شمال و شمال شرق منطقه، بر روی رخمون‌های سازند باکو حضور دارند که این سازند از جنس سیلت رسی و ماسه‌های توفی می‌باشد. همچنین دگرسانی‌های جنوب منطقه ناشی از رخمون‌های سازند زیور در منطقه می‌باشد که اغلب از جنس شیل سیلتی، ماسه‌سنگ و کنگلومرا هستند. وجود دگرسانی‌های آهن فروس در سازندهای زمین‌شناسی کربناته در بخش‌های مرکزی دشت مغان نیز مشاهده می‌شوند و مقادیر آهن فروس در نمونه‌های بالای تاق‌دیس‌ها ارزش بالایی نسبت به مناطق غیر تاق‌دیزی دارد.

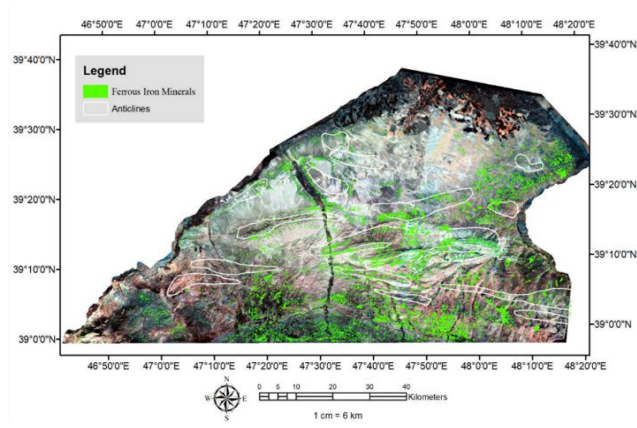
#### دگرسانی کانی‌های کربناته

مناطق دارای دگرسانی ژپس جایگزین کربنات در شکل ۸ نمایش داده شده است. نتایج نشان‌دهنده یک همبستگی سازگار بین مناطق دارای دگرسانی هیدروکربورها و مناطق غنی از آهن فروس و ژپس، عدم وجود کربنات‌ها و مقدار پایینی از رس است. باید توجه داشت که در منطقه‌ای که احتمال می‌رود دگرسانی ناشی از نشت هیدروکربورهاست نباید کانی موردنظر نشان‌دهنده دگرسانی (مثلاً کانی ژپس)، کانی متداول آن سازند باشد؛ زیرا در این صورت دیگر نمی‌تواند ناشی از نشت هیدروکربورها باشد. بنابراین با حذف اثر سازندهای ژپسی



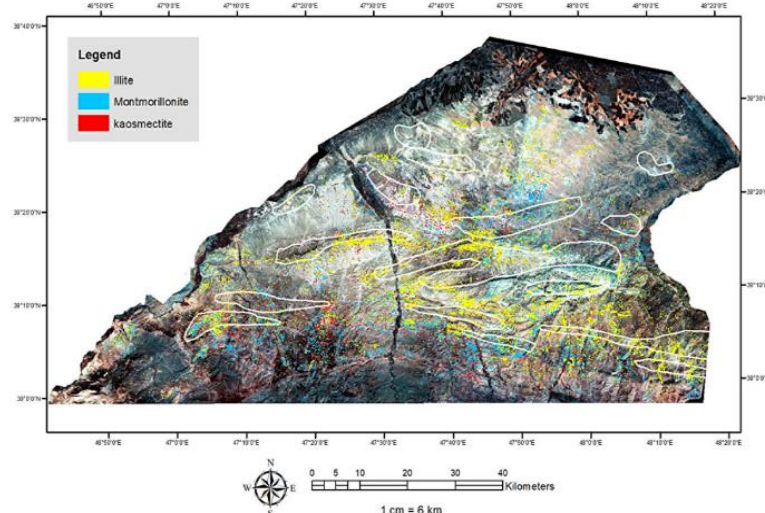
شکل ۸ - نقشه دگرسانی کانی‌های کربناته (ژپس جایگزین کربنات) که بر روی تصاویر موزاییک شده ترکیب رنگی حقیقی RGB: ۳ ۲ ۱ استر مناطق مورد مطالعه دشت مغان با رنگ بنفش پلات گردیده است.

Fig. 8. Alteration map of carbonate minerals (carbonate replacement gypsum) have been plotted with purple color on ASTER mosaiced images of true color combination RGB: 1 2 3 of the study areas, Moghan plain.



شکل ۷ - نقشه دگرسانی کانی‌های آهن فروس که بر روی تصاویر موزاییک شده ترکیب رنگی کاذب RGB: ۶ ۴ ۲ لندست ۸ مورد مطالعه دشت مغان با رنگ سبز پلات گردیده است.

Fig. 7. Alteration map of ferrous minerals have been plotted with green color on Landsat 8 mosaiced images of false colour combination RGB: 2 4 6 of the study areas, Moghan Plain.



شکل ۹ - نقشه دگرسانی کانی‌های ایلیت، مونت‌موریلونیت و کائو\_اسمکتیت (کائولینیت+اسمکتیت) که بر روی تصاویر موزاییک شده ترکیب رنگی حقیقی RGB: ۳ ۲ ۱ استر مناطق مورد مطالعه دشت مغان به ترتیب با رنگ‌های زرد، آبی و قرمز پلات گردیده است.

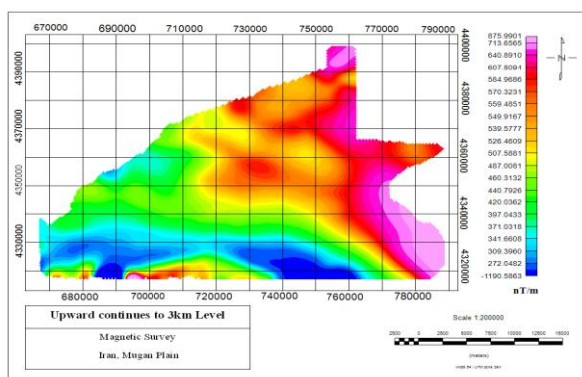
Fig. 9. Alteration map of illite, montmorillonite and Cao-smectite minerals (kaolinite + smectite) have been plotted with yellow, blue and red respectively on ASTER mosaiced images of true combination color RGB: 1 2 3 of the study areas, Moghan Plain.

دگرسانی‌های سطحی مطابقت داده شود. در نقشه سیگنال تحلیلی (شکل ۱۰) یک بی‌هنجاری شدید در قسمت شمال شرق و نیز بی‌هنجاری‌های شدید ممتدی در جنوب منطقه دیده می‌شود که این بی‌هنجاری‌ها در نقشه مغناطیس باقی‌مانده نیز وجود دارند (شکل ۱۱)؛ بنابراین این بی‌هنجاری دارای منشأ عمیق است که تا سطح ادامه می‌یابد. شدت پایین بی‌هنجاری‌های قسمت شرقی منطقه بیانگر این موضوع است که منبع مغناطیسی برای این توده‌ها عمیق و دارای

### استخراج بی‌هنجاری‌های سطحی به کمک نقشه‌های مغناطیس‌سنجی

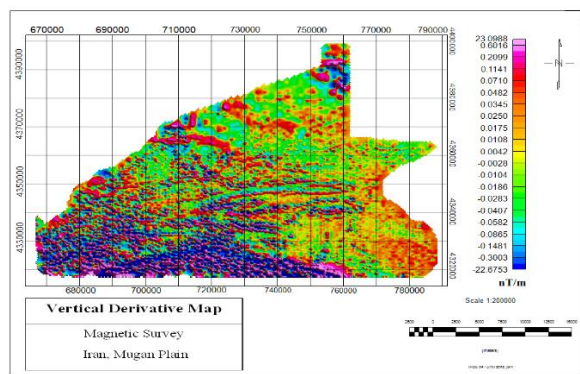
چنان‌چه گفته شد با توجه به اینکه فقط بی‌هنجاری‌های مغناطیسی می‌تواند مرتبط با دگرسانی‌های ناشی از نشت هیدروکربورها در سطح باشد، در این قسمت به تفکیک بی‌هنجاری‌های سطحی و عمقی پرداخته می‌شود تا فقط بخش بی‌هنجاری‌های سطحی با نتایج مطالعات

استفاده از نقشه‌های ادامه فراسو و نقشه مشتق قائم مغناطیسی مراجعه شد (شکل ۱۲ و ۱۳). در بخش‌های جنوبی منطقه دایک‌هایی همراه با رخنمون در سطح زمین وجود دارد که بی‌هنجاری‌های سطحی در این بخش ناشی از وجود این دایک هاست و نمی‌توان منبع آن را ناشی از مغناطیس ناشی از دگرسانی دانست. این بی‌هنجاری‌ها به‌صورت دستی از نقشه سیگنال تحلیلی حذف گردید تا نقشه مغناطیس سطحی نهایی تولید شود.



شکل ۱۱- نقشه ادامه فراسو در ۳۰۰۰ متر.

Fig. 11. Continues highpass filter at 3000 m map.



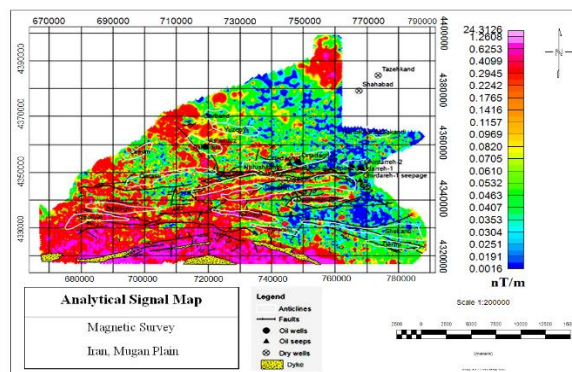
شکل ۱۳- نقشه مشتق قائم مرتبه اول مغناطیسی.

Fig. 13. Vertical first order magnetic derivative map.

### لایه‌های اطلاعاتی مناطق مستعد ذخیره و نشت هیدروکربورها جهت انجام تطابق

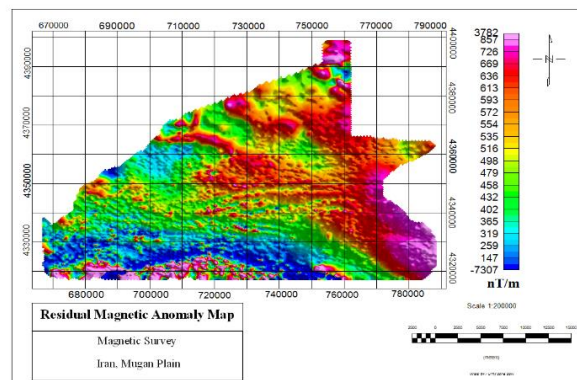
در صورتی که دگرسانی‌های مشخص شده روی نقشه‌ها در سطح زمین و نیز بی‌هنجاری‌های سطحی مغناطیسی (شکل ۱۴)، در نتیجه‌ی دگرسانی‌های خاک ناشی از نشت هیدروکربورها حاصل شده باشند، باید انطباق خوبی بین محل‌های نشت و دگرسانی‌های بی‌هنجاری‌های مغناطیسی وجود داشته باشد. به همین خاطر نقشه شاهد تاقدیس‌های منطقه به‌عنوان منطقه دارای پتانسیل ذخیره هیدروکربور و نیز نقشه

خاصیت مغناطیس سطحی ضعیف می‌باشد. بی‌هنجاری‌های مغناطیس سطحی در بخش‌های مرکزی تا غربی منطقه گسترش یافته‌اند و تطابق خوبی بین بی‌هنجاری‌های مغناطیس سطح و تاقدیس‌ها مشاهده می‌شود. با توجه به این تطابق می‌توان احتمال داد که این بی‌هنجاری‌های سطحی ناشی از کانی‌های دگرسان‌شده بالای تاقدیس‌های حاوی هیدروکربور هستند. به‌منظور تشخیص بهتر بی‌هنجاری‌های سطحی و بررسی عدم ارتباط آن‌ها با بی‌هنجاری‌های عمقی، به نقشه‌های بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای و باقی‌مانده تولیدشده با



شکل ۱۰- نقشه سیگنال تحلیلی؛ گسل‌ها انطباق خوبی با محل بی‌هنجاری‌های مغناطیسی دارند.

Fig. 10. Analytical signal map; faults are in good agreement with the location of magnetic anomalies.



شکل ۱۲- نقشه میدان مغناطیسی باقی‌مانده.

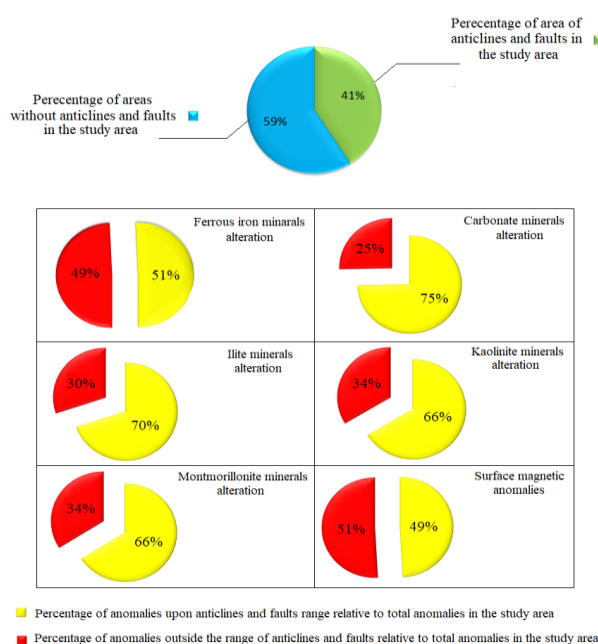
Fig. 12. Residual magnetic field map.

### تطابق لایه‌های اطلاعاتی

برای انجام یک تطابق باید ابتدا لایه‌ای از اهداف اکتشافی ایجاد نمود و سپس سایر دگرسانی‌های ژئوشیمیایی سطحی را که به روش غیرمستقیم حاصل شده‌اند، با این لایه ثابت به‌صورت جداگانه تطبیق داد. بررسی‌های تطبیق ابتدا توسط تطابق لایه تاقدیس‌های منطقه با لایه‌های اطلاعاتی دگرسانی‌ها صورت پذیرفت، سپس مقدار تراکم دگرسانی‌های مختلف در بالای تاقدیس‌های نفتی منطقه با مناطق خارج از تاقدیس‌ها به دست آمد و با یکدیگر مقایسه شدند.



مورد مطالعه بیشتر است که این مسئله حاکی از تمرکز بالای بی‌هنجاری‌های مثبت بر روی محدوده تاقدیس‌ها و گسل‌های منطقه می‌باشد. با توجه به جدول ۳ بیش‌ترین افزایش ضریب کارایی برای بی‌هنجاری‌های روی محدوده تاقدیس‌ها نسبت به بی‌هنجاری‌های خارج از محدوده تاقدیس‌ها، متعلق به دگرسانی کانی‌های کربناته به مقدار  $4/33$  یعنی ۲۰ برابر نسبت به حالت اولیه می‌باشد. همچنین کم‌ترین افزایش ضریب کارایی با مقدار  $1/39$  به دگرسانی کانی‌های آهن فروس تعلق دارد که مانند حالت قبل تنها حدود ۲ برابر نسبت به حالت اولیه تغییر نموده است. بنابراین با توجه به ضرایب کارایی در جدول ۳ دگرسانی کانی‌های کربناته و ایلیت ( $3/33$ ) عمده‌ترین دگرسانی‌های مشاهده‌شده روی تاقدیس‌ها در سطح زمین و دگرسانی کانی‌های آهن فروس ( $1/39$ ) و بی‌هنجاری‌های مغناطیسی سطح ( $2/29$ ) کم‌ترین آن‌ها می‌باشند. با مقایسه ضرایب کارایی در دو جدول ۳ و ۴ می‌توان به بهبود و افزایش ضریب کارایی دگرسانی‌های مختلف در جدول ۳ نسبت به جدول ۲ پی برد. این بهبود و افزایش ضریب نشان می‌دهد در صورتی که علاوه بر تاقدیس‌ها از گسل‌ها نیز در انطباق استفاده شود، نتیجه بهتری نسبت به حالت قبل حاصل خواهد داشت که علت این امر نیز می‌تواند ناشی از اثر مثبت گسل‌های منطقه در هدایت نشت هیدروکربورها به سطح زمین باشد.



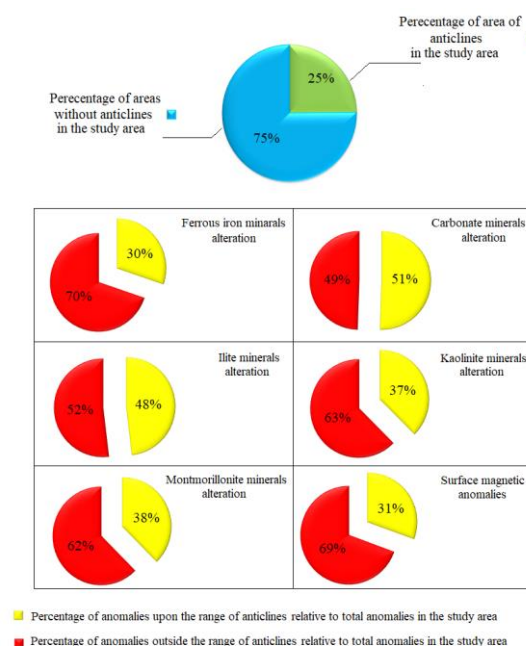
شکل ۱۹- نمودارهای دایره‌ای که درصد حضور بی‌هنجاری‌های ناشی از تراوش هیدروکربورها را در بالای تاقدیس‌ها و گسل‌ها و مناطق فاقد تاقدیس و گسل برای بی‌هنجاری‌ها و دگرسانی‌های مختلف نشان می‌دهند.

Fig. 19. Pie charts showing the percentage of hydrocarbon seepage anomalies at the top of anticlines and faults and areas without anticlines and faults for various anomalies and alterations.

بی‌هنجاری‌های مثبت روی تاقدیس‌ها با تمامی نقشه‌های بی‌هنجاری و دگرسانی منطقه دارای تطابق خوبی است و نرخ تراکم بی‌هنجاری‌های مثبت روی تاقدیس‌ها بسیار بیشتر از نرخ تراکم بی‌هنجاری‌ها خارج از محدوده تاقدیس‌ها می‌باشد. بیش‌ترین افزایش ضریب کارایی برای بی‌هنجاری‌های روی محدوده تاقدیس‌ها نسبت به بی‌هنجاری‌های خارج از محدوده تاقدیس‌ها، متعلق به دگرسانی کانی‌های کربناته به مقدار  $3/03$  یعنی ۹ برابر نسبت به حالت اولیه می‌باشد. کم‌ترین افزایش ضریب کارایی با مقدار  $1/31$  به دگرسانی کانی‌های آهن فروس تعلق دارد که تنها حدود ۲ برابر نسبت به حالت اولیه تغییر نموده است. بنابراین دگرسانی کانی‌های کربناته و ایلیت عمده‌ترین دگرسانی‌های مشاهده‌شده روی تاقدیس‌ها در سطح زمین و دگرسانی کانی‌های آهن فروس و بی‌هنجاری‌های مغناطیسی سطح کم‌ترین آن‌ها می‌باشند.

### تطابق دگرسانی‌ها با تاقدیس‌ها و گسل‌های منطقه

نتایج حاصل از انجام تطابق دگرسانی‌ها با تاقدیس‌ها و گسل‌های منطقه به‌صورت نمودارهای دایره‌ای و به‌طور جداگانه برای هر لایه اطلاعاتی در شکل ۱۸ و ۱۹ نمایش داده شده است. در تمامی نمودارها درصد بی‌هنجاری‌های مثبت روی محدوده تاقدیس‌ها نسبت به کل بی‌هنجاری‌های منطقه از درصد مساحت تاقدیس‌ها و گسل‌ها در منطقه



شکل ۱۸- نمودارهای دایره‌ای که درصد حضور بی‌هنجاری‌های ناشی از تراوش هیدروکربورها را در بالای تاقدیس‌ها و مناطق فاقد تاقدیس برای بی‌هنجاری‌ها و دگرسانی‌های مختلف نشان می‌دهند.

Fig. 18. Pie charts showing the percentage of hydrocarbon seepage anomalies at the top of anticlines and areas without anticlines for various anomalies and alterations.

جدول ۲- نرخ تراکم دگرسانی‌ها و بی‌هنجاری‌های مغناطیسی درون محدوده تاقدیس‌ها و خارج از محدوده تاقدیس‌ها.

Table 2. Concentration rates of alterations and magnetic anomalies within the anticline and outside the anticline range

| Type of anomaly                     | Concentration of anomalies upon anticlines | Concentration of anomalies outside the range of anticlines | Efficiency coefficient |
|-------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------|
| Ferrous iron minerals alteration    | 1.21                                       | 0.92                                                       | 1.31                   |
| Carbonate minerals alteration       | 2.03                                       | 0.67                                                       | 3.03                   |
| Ilite minerals alteration           | 1.93                                       | 0.70                                                       | 2.76                   |
| Montmorillonite minerals alteration | 1.51                                       | 0.83                                                       | 1.82                   |
| Kaolinite minerals alteration       | 1.50                                       | 0.83                                                       | 1.81                   |
| Surface magnetic anomalies          | 1.23                                       | 0.92                                                       | 1.34                   |

جدول ۳- نرخ تراکم دگرسانی‌ها و بی‌هنجاری‌های مغناطیسی درون محدوده تاقدیس‌ها و گسل‌ها و خارج از محدوده تاقدیس‌ها و گسل‌ها.

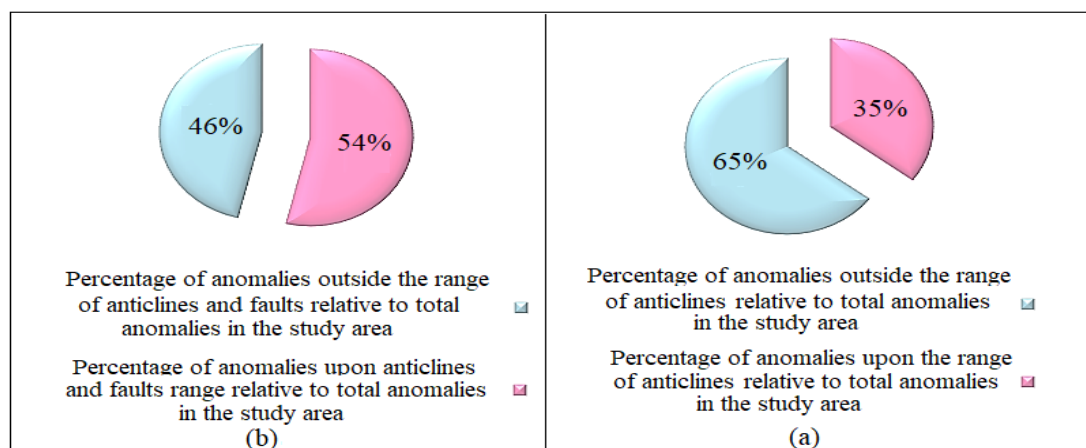
Table 3. Concentration rates of alterations and magnetic anomalies within the range of anticlines and faults and outside the range of anticlines and faults.

| Type of anomaly                     | Concentration of anomalies upon anticlines and faults | Concentration of anomalies outside the range of anticlines and faults | Efficiency coefficient |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------|
| Ferrous iron minerals alteration    | 1.20                                                  | 0.86                                                                  | 1.39                   |
| Carbonate minerals alteration       | 1.82                                                  | 0.42                                                                  | 4.33                   |
| Ilite minerals alteration           | 1.70                                                  | 0.51                                                                  | 3.33                   |
| Montmorillonite minerals alteration | 1.60                                                  | 0.57                                                                  | 2.81                   |
| Kaolinite minerals alteration       | 1.61                                                  | 0.57                                                                  | 2.82                   |
| Surface magnetic anomalies          | 1.97                                                  | 0.86                                                                  | 2.29                   |

دارد و ۴۶ درصد از بی‌هنجاری‌ها نیز در مابقی منطقه مورد مطالعه که فاقد حضور تاقدیس‌ها و گسل‌هاست تمرکز یافته است؛ بنابراین با محاسبه نرخ تراکم و ضریب کارایی (جدول ۴) مشاهده می‌شود که حضور دگرسانی‌ها بر روی تاقدیس‌ها و گسل‌ها تا دو برابر بیشتر از سایر مناطق می‌باشد. با مقایسه ضریب کارایی تراکم بی‌هنجاری‌ها روی تاقدیس‌ها و گسل‌ها (جدول ۴) مشاهده می‌شود که ضرایب کارایی دو جدول تنها دارای یک اختلاف جزئی (۰/۰۴) هستند. این اختلاف جزئی می‌تواند نشأت گرفته از لایه‌های اطلاعاتی دگرسانی‌ها و بی‌هنجاری‌های استفاده شده در تلفیق باشد.

### تطابق لایه تلفیقی تمامی لایه‌های بی‌هنجاری‌ها با تاقدیس‌ها و گسل‌های منطقه

با توجه به نمودار دایره‌ای ۲۰a، ۳۵ درصد بی‌هنجاری‌ها بر روی تاقدیس‌ها و ۶۵ درصد از بی‌هنجاری‌ها در مابقی منطقه مورد مطالعه که فاقد حضور تاقدیس‌هاست تمرکز یافته است؛ بنابراین با محاسبه نرخ تراکم و ضریب کارایی در جدول ۴ می‌توان اظهار نمود که حضور دگرسانی‌ها بر روی تاقدیس‌ها دو برابر بیشتر از سایر مناطق است. همچنین با تطابق لایه تلفیقی تمامی دگرسانی‌ها با لایه تلفیقی حاصل از تاقدیس‌ها و گسل‌ها نتایج مشابهی حاصل گردید (شکل ۲۰b). ۵۴ درصد از بی‌هنجاری‌ها در مناطقی که به تاقدیس‌ها و گسل‌ها اختصاص



شکل ۲۰- نمودارهای دایره‌ای که درصد حضور تمامی بی‌هنجاری‌های ناشی از تراوش هیدروکربورها (حاصل از لایه تلفیقی بی‌هنجاری‌ها) را در بالای تاقدیس‌ها و گسل‌ها و مناطق فاقد تاقدیس و گسل‌ها نشان می‌دهند.

Fig. 20. Pie charts showing the percentage of all alterations due to hydrocarbon seepage (derived from the anomaly layer) above the anticlines and faults and areas without anticlines and faults.

جدول ۴- نرخ تراکم لایه تلفیقی حاصل از تمام بی‌هنجاری‌ها درون محدوده تاقدیس‌ها و گسل‌ها و خارج از محدوده تاقدیس‌ها و گسل‌ها.

Table 4. Concentration rates of all anomaly layers within the range of anticlines and faults and outside the range of anticlines and faults.

| Integrated layer derived from all alterations                              | Anomaly type |
|----------------------------------------------------------------------------|--------------|
| The concentration of anomalies outside the range of the anticlines         | 0.86         |
| The concentration of anomalies upon anticlines                             | 1.42         |
| The efficiency coefficient of the anomalies upon the anticline             | 1.65         |
| The concentration of anomalies outside the range of anticlines and faults  | 0.81         |
| The concentration of anomalies upon anticlines and faults                  | 1.37         |
| The efficiency coefficient of the anomalies upon the anticlines and faults | 1.69         |

محدوده تاقدیس‌ها نسبت به بی‌هنجاری‌های خارج از محدوده تاقدیس‌ها، متعلق به دگرسانی‌های کانی‌های کربناته به مقدار ۳/۰۳ یعنی ۹ برابر نسبت به حالت اولیه می‌باشد و کم‌ترین افزایش ضریب کارایی با مقدار ۱/۳۱ به دگرسانی‌های کانی‌های آهن فروس تعلق دارد که تنها حدود ۲ برابر نسبت به حالت اولیه تغییر نموده است. با استفاده از گسل‌ها در تطابق، ضریب کارایی دگرسانی‌های کانی‌های کربناته ۲۰ برابر نسبت به حالت اولیه خود دارای رشد بود و ضریب کارایی دگرسانی‌های کانی‌های آهن فروس تنها رشدی ۲ برابری نسبت به حالت اولیه خود داشت و استفاده از گسل‌ها باعث ایجاد تفاوت چشم‌گیری در کارایی آن نشد. با مقایسه ضرایب کارایی مشخص شد که کانی‌های کربناته و ایلیت شاخص‌ترین دگرسانی‌های ناشی از نشت هیدروکربورها در منطقه‌اند در حالیکه کانی‌های آهن فروس و بی‌هنجاری‌های مغناطیسی سطحی کم

## نتیجه‌گیری

تطابق خوبی بین توزیع نواحی دگرسان‌شده کانی‌های ژئیس جایگزین کلسیم کربنات، کانی‌های رسی و آهن فروس و بی‌هنجاری‌های مغناطیسی سطحی در منطقه دشت مغان وجود دارد که نشان می‌دهد این دگرسانی‌ها دارای یک عامل مشترک می‌باشند و به دلیل تطبیق و حضورشان بر روی تاقدیس‌ها و گسل‌های منطقه به احتمال زیاد این دگرسانی‌ها ناشی از نشت و تراوش هیدروکربورها به سطح هستند. درصد بی‌هنجاری‌های مثبت روی محدوده تاقدیس‌ها نسبت به کل بی‌هنجاری‌های مثبت دشت مغان از درصد مساحت تاقدیس‌ها و گسل‌ها در منطقه مورد مطالعه بیشتر است که این مسئله حاکی از تمرکز بالای بی‌هنجاری‌های مثبت بر روی محدوده تاقدیس‌ها و گسل‌های منطقه می‌باشد. بیش‌ترین افزایش ضریب کارایی برای بی‌هنجاری‌های روی

هزینه عملیات اکتشاف به مقدار خیلی زیادی کاهش یافته و زمان عملیات را نیز کوتاه تر نماید. همچنین این روش ها امکان بررسی محدوده وسیع تری نسبت به روش های ژئوفیزیکی معمول را می دهند. اگرچه انطباق داده های مغناطیسی و ماهواره ای دارای نتایج قابل قبولی در شناسایی و اثبات وجود دگرسانی های ژئوشیمیایی در منطقه می باشد؛ با این حال انطباق نتایج بدست آمده با بررسی های میدانی و استفاده از داده های صحرایی به منظور مطالعه دقیق تر پیشنهاد می گردد.

اهمیت ترین دگرسانی های ناشی از نشت هیدروکربورها در دشت مغان هستند. با توجه به تجمع و پراکندگی کانی ها در بخش های مرکزی و جنوبی دشت مغان می توان سازند زیور را برای مطالعات و بررسی های بیشتر به منظور اکتشاف هیدروکربورها پیشنهاد نمود. به طور کلی یافته های این مقاله نشان می دهد که تعیین محل بی هنجاری های ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی ناشی از نشت هیدروکربورها به سطح می تواند کمک شایان توجهی به مشخص کردن محل مخازن احتمالی تجمع هیدروکربور در میدان های نفتی نماید و با اولویت بندی محل حفاری ها،

## منابع

- Abrams, M.A., 2005. Significance of hydrocarbon seepage relative to petroleum generation and entrapment. *Marine and Petroleum Geology* 22, 457–477.
- Alamdar, K., Madanchi, A., 2013. A review of methods for separating regional from residual anomalies in potential data with a case study of Abadeh Aerial Geophysical Data with Geological Interpretation. *Journal of Aalytical and Numerical Methods in Mining Engineering* 3, 50-58.
- Ansari, A., Mojtahedzadeh, S. H., Alamdar, K., 2013. *Gravitational and Magnetic Methods in Exploratory Geophysics*. Yazd University Publication, 522 pp.
- Asadzadeh, S., de Souza Filho, C. R., 2017. Spectral remote sensing for onshore seepage characterization: A critical overview. *Earth-Science Reviews* 168, 48-72.
- Chen, S., Zhao, Y., Zhao, L., Liu, Y., and Zhou, C., 2017. Hydrocarbon Micro-Seepage Detection by Altered Minerals Mapping from Airborne Hyper-Spectral Data in Xifeng Oilfield, China. *Journal of Earth Science* 28, 656–665.
- Clark, R.N., 1999. *Spectroscopy of rocks and minerals and principles of spectroscopy*. Wiley, 56 pp.
- Donovan, T.J., 1974. Petroleum microseepage at Cement, Oklahoma-evidence and mechanisms, *AAPG Bulletin* 58, 429-446.
- Ellwood, B.B., Burkart, B., 1996. Test of Hydrocarbon-Induced Magnetic Patterns in Soils: The Sanitary Landfill as Laboratory. *AAPG Bulletin* 66, 91-98.
- Elmore, R.D., M.H., Engel, L., Crawford, K., Nick, N., Imbus, S., Sofer, Z., 1987. Evidence for a relationship between hydrocarbons and authigenic magnetite. *Nature* 325, 428–430.
- Fakoori, G.A., Hasangoodarzi, M., Sherkati, S., Fazeli, S., Tavakoli Shirazi, S., Nabet, M., Shokrzadeh Domrigh, N., Farzaneh, F., Tohidinia, A., Mobasheri, A., Sadri, M., Tarhandeh, E., Asi, H., 2007. Final report joint study project in moghan area. *NIOC and Lukoil Oil Company* 152 pp.
- Fu, B., Zheng, G., Ninomiya, Y., Wang, C. and Sun, G., 2007. Mapping hydrocarboninduced mineralogical alteration in the northern Tian Shan using ASTER multispectral data. *Terra Nova* 19, 225-231.
- Gao, J., 2009. *Digital analysis of remotely sensed imagery*. McGraw-Hill, 674 pp.
- Jafarzadeh, M., Moussavi Harami, R., Amini, A., Mahboubi, A., Farzaneh, F., 2014. Geochemical constraints on the provenance of Oligocene–Miocene siliciclastic deposits (Zivah Formation) of NW Iran: implications for the tectonic evolution of the Caucasus. *Arabian Journal of Geoscience* 7, 4245–4263.
- Khorram, S., van der Wiele, C. F., Koch, F. H., Nelson, S. C., Potts, M. D., 2016. *Principles of Applied Remote Sensing*, Springer, 319 pp.
- Kokaly, R.F., Clark, R.N., Swayze, G.A., Eric Livo, K., Hoefen, T.M., Pearson, N.C., Wise, R.A., Benzal, W.M., Lowers, H.A., Driscoll, R.L., Klein, A.J., 2017. *USGS Spectral Library Version 7: Data Series 1035*. U.S.G. Survey, 61 pp.
- Martínez-Gomez, H. M., and Jaramillo J. M., 2017. Magnetic and Radiometric Signatures in Soils above Hydrocarbon Accumulations, Toqui-Toqui and Mana Fields, Tolima, Colombia, *AAPG International Conference and Exhibition, Barcelona, Spain*.
- McCabe, C., R. Sassen, and B. Saffer, 1987. Occurrence of secondary magnetite within biodegraded oil. *Geology* 15, 7–10.
- Reynolds, R.L., Fishman, N.S., Wanty, R.B., Goldhaber, M.B., 1990. Iron sulfide minerals at Cement oil field, Oklahoma: implications for magnetic detection of oil fields. *GSA Bulletin*, 102, 368–380.
- Rockwell, B.W., 2013. Automated mapping of mineral groups and green vegetation from Landsat Thematic Mapper imagery with an example from the San Juan Mountains, Colorado, *USGS Numbered Series*, 25 pp.

- Roest, W.R., Verhoef, J., Pilkington, M., 1992. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. *Geophysics*, 57, 116–125.
- Salati, S., 2014. Characterization and remote detection of onshore hydrocarbon seep-induced alteration. Thesis in the Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation. University of Twente, The Netherlands, 162 pp.
- Salati, S., Van Ruitenbeek, F., Van der Meer, F., Naimi, B., 2014. Detection of Alteration Induced by Onshore Gas Seeps from ASTER and WorldView-2 Data. *Remote Sensing* 6, 3188-3209.
- Schumacher, D., 1996. Hydrocarbon-induced alteration of soils and sediments. *AAPG Memoir* 66, 71–89.
- Sun, L, Khan, Sh., 2016. Ground-based Hyperspectral Remote Sensing of Hydrocarbon-Induced Rock Alterations at Cement, Oklahoma. *Marine and Petroleum Geology* 77, 1243-1253.
- Wang, W., 2016. Comparing three Classifiers for Detecting Hydrocarbon Seepage Alteration. Thesis in the Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation. University of Twente, The Netherlands, 69pp.
- Zhang, G., Shao, Zh., Huang, Y., 2013. Hydrocarbon-induced clay and carbonate minerals interpretation in Songliao Basin using ASTER data, 3<sup>rd</sup> International Conference on Multimedia Technology (ICMT 2013), Atlantis Press.