

Assessment of hydrothermal resource development by RS techniques (a case study: convey of water by tunnel from the Safa dam to Golzar City and the neighboring regions, Kerman Province, Iran)

Majid Kazemi¹, Nasrollah Kalantari^{1*}, Sajad Zareie², Mehdi Eilbeygi³

1- Department of Geology, Faculty of Earth Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

2- Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

3- Rey Ab Consulting Engineers

Keywords: Kerman, Hydrothermal, LST, Siderite, Hypogene Karst

1-Introduction

The study area is located between Baft and Golzar cities of the Kerman Province of Iran. From the perspective of central Iran structural sedimentary units (Aghanabati 2006), the study area is located in the southern part of Central Iran, and the magmatic belt of Urumieh-Dokhtar (Dehaj-Sardouieh) and has hydrothermal resources. In addition to having numerous economic benefits, the development of hydrothermal resources, the development of engineering structures and structures such as water transfer tunnels in areas with high-temperature hydrothermal fluids, water and rock interaction, and the presence of toxic elements require special attention. Due to the decision of the local government to dig a water transfer tunnel in the study area and the potential for water pollution by hydrothermal sources and due to some hydrothermal evidence such as mineral springs / hot springs and artesian wells containing hydrogen sulfide and carbon dioxide, travertine deposits, porphyry systems, volcanic activity and igneous rocks, assessment of subsurface development of hydrothermal vents are important to understand the development of these resources, ascending flow situations and hypogene karst. The study area in terms of lithology includes sedimentary, volcanic layers, various volcanic rocks such as igneous rocks, ignimbrite, lavas, rhyolite basalt intrusions, a combination of gabbro to granite rocks, between volcanic layers with volcanic rocks and limestone. In this study, with the help of remote sensing techniques and images of Landsat8 and Aster satellites, to prepare geological and structural geological maps, siderite mineral distribution, and ground surface temperature (LST) calculation as their overlap maps along with serial visits for analysis. The detection of subsurface development of hydrothermal resources was used to predict ascending, and possible hypogene karst flows in the tunnel route and adjacent points. This study's results can help make management decisions including operations, protect the tunnel against intrusion and polluted water, and increase the tunnel's useful life.

2- Material and methods

Numerous researchers use RS techniques in vast fields such as agriculture monitoring, recognition of minerals and alteration zones, structural geology and rock detection, identification of hydrothermal alteration, Karstification, Karst geohazards and their destabilizing, and LST (Ashley and Abrams, 1980; Hellman and Ramsey, 2004; Oommen, 2008; Charif, 2013; Theilen-Willige et al., 2014; Zarei et al., 2016). In this study, five steps have been taken. They include: A- preparing geological and structural maps to recognize and discriminate rocks, faulting, and folding (Anticline and Syncline).

B- A few days field trip was conducted to make a surface geological reconnaissance of the area and the surrounding, visiting the tunnel's pathway, detecting some ground control points such as spas, travertine deposits, and artesian wells and boreholes, and verifying the geological and structural maps.

*Corresponding author: nkalantari@hotmail.com

DOI: 10.22055/AAG.2020.33156.2111

Received 2020-04-05

Accepted 2020-11-02

C- Preparation, correction for radiometric and atmospheric errors, resampled, geo-referenced of the images, and preprocessing of the ASTER and Landsat-08 satellite images of 2006, 2013, and 2019 years were carried out. D- Processing of the satellite images, identifying the siderite mineral distribution, and calculating the LST. E- Integrating the results of the above steps (01-04) and the collected results interpreted, based on the area's condition using GIS and ENVI software's.

3- Results and discussion

Based on the prepared maps, various types of rocks, including igneous, sedimentary, volcano-sedimentary, and carbonate, were recognized. It was also unveiled that tectonic forces such as faulting, folding (anticline and syncline) have an important impact on the displacement of rocks and influence hydrothermal and groundwater movement in the study area.

The siderite mineral commonly exists in the north and some parts in the south of the study area. The siderite mineral formation is important because it identifies the development of hypogene karsts and subterranean caverns (Kempe, 2009). It can occur in different sizes and depths. In the presence of water and CO₂, this mineral can produce goethite deposits and carbonic acid and then start to dissolve to make an underground cavity (Koziol, 1999). Goethite is derived from the siderite mineral, and both are Fe-minerals. The presence of Iron and particularly goethite, has been confirmed by some researchers in the Urumieh-Bazman Belt (Haghighi et al., 2017), which supports the present collected results.

Calculating the LST through the ASTER image and having SWIR bands, and using the high temperature of hydrogeological resource and their impact on the surrounding rocks, we collated conclusive data concerning the location of the spas and the artesian wells. Ultimately, the geological, structural features, siderite mineral distribution, and the LST maps significantly overlapped.

4- Conclusion

In general, the overlaying of geological and structural elements, the siderite mineral distribution, and the LST maps indicated desirable results, which include; the hydrothermal resource has been developed in the area, and except for the carbonate rocks, such progress is more under the influence of tectonic forces (massive fracturing and faults) rather than lithology. The evidence proves the siderite mineral formation, and other researchers have confirmed it. The parameters such as the high-temperature points, faults, and high-density jointed areas and mineral distribution locations depicted significant overlapping and good adaptability. Therefore, the hypogene karstic process's occurrence, due to good overlapping and particularly in areas with limestone, sedimentary, volcanic, and volcano-sediments rocks, is more expectable.

Hence, in some parts of the conveying water tunnel, where crossing faults, high density of joints and the rocks (limestone, sedimentary, volcanic and volcano-sediments), the lining practice has to be undertaken with due care and attention to protect the tunnel water against polluted waters, especially in the south portal and on 10-14 km of the water conveyance tunnel length.

References

- Aghanabati, S.A., 2006. Geology of Iran, Geological survey of Iran press, p 603.
- Ashley, R.P., Abrams, M.J., 1980. Alteration mapping using multispectral images; Cuprite mining district, Esmeralda County, Nevada, Report 80-367.
- Charif, A., Malek, H.A., El Bchari, F., Theilen-Willige, B., Chaibi, M., Löwner, R., Ridaoui, M., Ougougdal, M.A., Nakhcha, C., 2013. Mapping Karstic Geohazards in the Safi Region, Morocco, by the Use of Landsat, Ikonos and RapidEye Images. In Proceeding of 24th Geological Remote Sensing Group (GRSG) Annual Meeting—Status and Developments in Geological Remote Sensing, Berlin, Germany, 9–11 December.
- Haghighi Bardineh, S.N., Zarei Sahamieh, R., Zamanian, H., Ahmadi Khalaji, A., 2017. Mineralization, Geochemistry, Fluid inclusion and Stable Isotopes (O, S) studies in the Takht Fe-skarn Deposit, NE Hamedan. *Scientific Quarterly Journal of Geoscience* 27, 99-112.
- Hellman, M.J., Ramsey, M.S., 2004. Analysis of hot springs and associated deposits in Yellowstone National Park using ASTER and AVIRIS remote sensing. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 135 (1–2), 195–219.
- Kempe, S., 2009. Siderite weathering as a reaction causing hypogene speleogenesis: the example of the Iberg/Harz/Germany. In: A.B. Klimchouk, D.C. Ford (Eds.) *Hypogene Speleogenesis and Karst Hydrogeology of Artesian Basins*. Ukrainian Institute of Speleology and Karstology, Special Paper 1, Simferopol 59-60.
- Koziol, A.M., 1999. Experimental determination of siderite (iron carbonate) stability under moderate pressure-temperature conditions, and application to Martian carbonate parageneses, LPI 1226.

- Oommen, T., 2008. An objective analysis of Support Vector Machine based classification for remote sensing. *Mathematical Geosciences* 40, 409–424.
- Theilen-Willige, B., Malek, H.A., Charif, A., El Bchari, F., Chaibi, M., 2014. Remote Sensing and GIS Contribution to the Investigation of Karst Landscapes in NW-Morocco. *Geosciences, Special Issue: Geological Mapping and Modeling of Earth Architectures* 4, 50-72.
- Zarei, S., Khosravi, H., Nasiri, A., Dastorani, M., 2016. Using Landsat Thematic Mapper (TM) sensor to detect change in land surface temperature in relation to land use change in Yazd, Iran. *Solid Earth* 7, 1551–1564.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Kazemi, M., Kalantari, N., Zareie, S., Eilbeygi, M., 2021. Assessment of hydrothermal resource development by RS techniques (a case study: convey of water by tunnel from the Safa dam to Golzar City and the neighboring regions, Kerman Province, Iran). *Adv. Appl. Geol.* 11(2), 365-381.

DOI: 10.22055/AAG.2020.33156.2111

url: https://aag.scu.ac.ir/article_16074.html?lang=en

بررسی منابع هیدروترمال در گستره تونل انتقال آب سد صفا به گلزار، استان کرمان، با استفاده از سنجش از دور

مجید کاظمی

دانشکده علوم زمین، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه شهیدچمران اهواز، اهواز، ایران

نصراله کلانتری*

دانشکده علوم زمین، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه شهیدچمران اهواز، اهواز، ایران

سجاد زارعی

دانشکده علوم زمین، گروه سنجش از دور و GIS، دانشگاه شهیدچمران اهواز، اهواز، ایران

مهدی ایل بیگی

شرکت مهندسی مشاور ری آب

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۱۲

*nkalantari@hotmail.com

چکیده

گستره مورد مطالعه در حد فاصل شهرهای بافت و گلزار استان کرمان، در بخش مرزی زون ساختاری ایران مرکزی و کمربند ماگمایی ارومیه دختر قرار دارد و دارای منابع هیدروترمال می‌باشد. برای تامین کمبود آب شرب شهر کرمان گزینه حفرتونل و انتقال آب از سد صفا در جنوب شهرستان رابر مدنظر قرار گرفته است. در این پژوهش به دلیل وجود منابع هیدروترمال ماگمایی و خطر زیاد آلودگی آب تونل توسط عناصر بالقوه سمناک، میزان گسترش زیرسطحی منابع هیدروترمال و کارست هایپوزن، به کمک تکنیک سنجش از دور، مطالعات زمین‌شناسی، شناسایی کانی سیدریت بعنوان عاملی موثر در توسعه کارست هایپوزن و محاسبه دمای سطح زمین (LST) جهت شناخت آنومالی‌های حرارتی ناشی از نفوذ آب‌های هیدروترمال بررسی و نقشه‌های هم‌پوشانی آن‌ها تهیه و تحلیل شد. نتایج نشان داد موقعیت شکستگی‌ها، نقاط دما بالا و دارای کانی سیدریت، چشمه‌های آب گرم و گمانه‌های آرتزین همخوانی داشته و نشان از توسعه زیرسطحی گسترده منابع هیدروترمال و پتانسیل رخداد کارست هایپوزن و انتقال آلاینده به آب داخل تونل را دارد. همچنین مشخص شد توسعه منابع هیدروترمال بیشتر تحت کنترل عملکرد گسل‌های تراسی عمیق و شبکه شکستگی‌ها است و اثر سنگ‌شناسی به استثناء مناطق دارای سنگ‌های کربناته در درجه دوم اثرگذاری قرار دارد، بنابراین در برخورد مسیر تونل با گسل‌ها بویژه گسل‌های تراسی، نقاط دارای تراکم شکستگی زیاد و سفره‌های آرتزین نیازمند دقت بیشتری در انجام عملیات لاینیگ تونل جهت حفاظت کیفیت آب می‌باشد. این موضوع در پرتال جنوبی و کیلومتر ۱۰ تا ۱۴۰۰۰ بواسطه وجود سنگ‌های آهکی و هم‌پوشانی با گمانه آرتزین اهمیت بیشتری دارد.

کلمات کلیدی: کرمان، هیدروترمال، LST، سیدریت، کارست هایپوزن

مقدمه

سنجش از دور (Remote Sensing) علم و تکنولوژی کسب اطلاعات و تصویربرداری از زمین با استفاده از تجهیزات هوانوردی مثل هواپیما، بالن یا تجهیزات فضایی مثل ماهواره می‌باشد. از مهم‌ترین مزایای استفاده از سنجش از دور می‌توان به استفاده از تصاویر رقومی و قابل پردازش توسط الگوریتم و رایانه، داشتن دید گسترده قابل توجه و ایجاد پوشش مناسب از گستره، داشتن تناوب برداشت اطلاعات در بازه‌های زمانی کوتاه، تهیه داده‌های متنوع در انواع قدرت تفکیک‌ها، کاهش عملیات زمینی و نیروی انسانی محدود و همچنین عدم نیاز به دسترسی مستقیم به منطقه مورد مطالعه اشاره کرد. این علم در مطالعات علوم محیطی از جمله پایش‌های مربوط به کشاورزی و جنگل‌ها (Oommen, 2008)، بررسی فرآیندهای کارستی، سازه‌های مهندسی و زیربنایی، بیابان‌زایی و مخاطرات کارست و آلودگی آب زیرزمینی (Charif, 2013; Theilen-

جغرافیایی $29^{\circ}41'31''$ - $29^{\circ}14'35''$ واقع شده است (شکل ۱). از دیدگاه سنگ‌شناسی، گستره مطالعاتی دارای ردیف‌های ولکانیکی رسوبی، ترکیب ولکانیکی متنوع از آذرآواری، ایگمبیریت‌ها، گدازه‌ها و توده‌های نفوذی با ترکیب بازالت تا ریولیت، ترکیب گابرو تا گرانیت و تناوب ردیف‌های ولکانیکی و رسوبی - آواری و آهکی است. بر اساس مطالعات صورت گرفته توسط سازمان زمین‌شناسی ایران در سال ۱۹۷۳ کمان ماگمایی به سه واحد ساختاری کمربند رفسنجان (بلوک‌های مراد، چوپار و گوک)، کمربند دهاج - ساردوئیه و ناحیه اسفندقه - سبزوار تقسیم شده است که گستره مورد مطالعه در قسمت کمربند دهاج - ساردوئیه قرار می‌گیرد.

از نظر سنی، ترکیبی از سنگ‌های ائوسن پایینی شامل مجموعه‌های رسوبی آتشفشانی، توریبداتی، مجموعه‌های ولکانیکی بحرآسمان، رازک و مجموعه ولکانیکی رسوبی هزار، مجموعه‌های رسوبی و سنگ آهک، رسوبات تخریبی، سنگ‌های الیگوسن شامل سازند قرمز پایینی متشکل از مارن، کنگلومرا و ماسه همراه با آذرآواری، آندزیت داسیت، جریان لاوا و در نهایت با سنگ‌های سازند قرمز بالایی به سن میوسن و متشکل از لای سنگ و ماسه سنگ‌های حاوی ولکانیک‌های آندزیتی و دگرسان شده و نیز تعدادی توده‌های نفوذی (جبال بارز و کوه پنج) در گستره مطالعاتی دیده می‌شود. در بازدیدهای صحرایی و بررسی منابع موجود مشخص شد که وضعیت گسل‌های اصلی و فرعی موجود در گستره مورد مطالعه بیشتر از دو روند شمالی جنوبی و شمال شرقی جنوب غربی تبعیت می‌کنند. از گسل‌های اصلی موجود در گستره می‌توان به گسل امتداد لغز راست‌گرد لاله‌زار، گسل معکوس ماده کوه، گسل سرزه و گسل امتداد لغز کوه عشق اشاره کرد (جدول ۱). عملکرد گسل لاله‌زار موجب نهشته شدن تراورتن در جنوب شیرینک، محدوده غربی مسیر تونل و شمال شرقی گستره مورد مطالعه شده است (Khademi et al., 2010; Zamani, 2015; Kerman Regional Water Company, 2016) که نشان دهنده گردش عمقی زیاد و توسعه سیستم هیدروترمال و احتمالاً کارست هایپوژن می‌باشد که نیاز به بررسی‌های هیدروشیمیایی و ایزوتوپی بیشتری می‌باشد. در مختصات‌های تقریبی $29^{\circ}37'46''$ و $56^{\circ}58'14''$ - $29^{\circ}32'18''$ به ترتیب یک تاقدیس و یک نادویس استنتاجی (در سطح رخنمون ندارد) وجود دارد که بخشی از ویژگی‌های زمین‌شناسی ساختاری گستره می‌باشد (جدول ۱). با توجه به لیتولوژی گستره که عموماً تحت عنوان سازند سخت مورد توجه قرار گرفته است، مسائل هیدروژئولوژیکی آن با شرایط آبخوان‌های معمول آبرفتی متفاوت می‌باشد.

در این‌گونه محیط‌ها به واسطه تغییرات شدید افقی و عمود ضرایب هیدرودینامیکی و ضریب نفوذ آب‌های سطحی، توسعه حوضه‌های هیدروژئولوژیکی گستره (که می‌تواند وسیع‌تر و یا گاهاً محدودتر از حوضه‌های هیدروژئولوژیکی باشد)، توزیع فضایی تخلخل ناشی از ناهمگنی و آنیزوتروپی وابسته به تکنیک، وجود گازها، عناصر سمی

قرمز نزدیک SWIR (۵-۲ میکرومتر) مناسب‌ترین بخش می‌باشد (Cudahy et al., 2017). با توجه به این‌که محدوده طول موج ۲-۲/۴۵ میکرومتر سنجنده ETM^+ ماهواره Landsat در سنجنده Aster به تعداد ۵ باند تقسیم شده است و از طرف دیگر چون تعداد زیادی از کانی‌ها دارای طیف جذبی و انعکاسی بارز در همین محدوده هستند (Hellman and Ramsey, 2004)، باندهای جذب مربوط به کانی‌های حاوی هیدروکسیل و کربنات و همچنین گروه کانی‌های مشخصه ناحیه آلتراسیون گرمایی ناشی از آب‌های هیدروترمال شامل کانی‌های سیدریت، کائولینیت، کلریت، آلونیت، میکا، ژاروسیت، دیکیت، پیروفیلیت، کالسیت و آنکریت، قابل شناسایی می‌باشند.

همچنین با استفاده از طیف‌سنجی تصویری و تفسیر تصاویر رنگی مجازی حاصل از ترکیب باندهای مختلف براساس نقشه زمین‌شناسی، امکان تشخیص کانی‌های آهن و رس و تولید نقشه‌های کانی‌شناسی در سطح وجود دارد که می‌توان گسترش واحدهای سنگی گوناگون را بر اساس این داده‌ها مشخص (Gupta, 2003; Rajesh, 2004) و شرایط زیر سطحی را تحلیل نمود. نکته قابل توجه در استفاده صحیح از سنجنش از دور به عنوان یک ابزار اکتشاف زمین‌شناسی، داشتن تحلیل درست از زمین‌شناسی ناحیه‌ای و ساختار زمین‌شناسی گستره مورد مطالعه (مدل زمین‌شناسی گستره) است. لذا زمین‌شناس بایستی با استفاده از نرم‌افزارهای پردازش تصویر و نرم‌افزارهای سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، اطلاعات زمینی داده‌های مربوط به زمین‌شناسی ساختمانی و تصاویر ماهواره‌ای را تلفیق و تحلیل نماید.

با توجه به گستردگی و پیچیدگی زمین‌شناسی گستره مورد مطالعه، وجود برخی نشانگرهای کارست هایپوژن (مانند چشمه‌های آب‌گرم حاوی هیدروژن سولفور و دی اکسید کربن، نهشته شدن تراورتن (Khademi et al., 2010)، وجود فعالیت‌های آتشفشانی و پولوتونیک، سنگ‌های انحلال‌پذیر، سیستم‌های پورفیری، جریان‌های رو به بالا و نیز انواع واکنش‌های مرتبط با هایپوژن)، احداث تونل انتقال آب شرب، همچنین حضور برخی معادن پورفیری و اهمیت سازه‌ها باعث شدند که برای نیل به اهداف این پژوهش به کمک تصاویر ماهواره‌ای گستره، اقدام به شناسایی کانی سیدریت (نشانه و عاملی برای توسعه کارست‌های هایپوژن (Kemp, 2009) می‌باشد)، محاسبه دمای سطح زمین و بررسی خطواره‌ها و گسل‌های موجود در گستره شد و در نهایت با کمک نشانگرهای موجود میزان توسعه زیرسطحی منابع هیدروترمال و مناطق محتمل ایجاد کارست هایپوژن مورد بررسی قرار گرفت.

زمین شناسی و هیدروژئولوژی گستره مورد مطالعه

گستره مورد مطالعه مسیر مد نظر برای حفر مسیر تونل از نظر تقسیمات زمین‌شناسی ساختاری رسوبی ایران (Aghanabati, 2006) در زون ایران مرکزی (نواحی جنوبی بلوک پشت بادام و یزد) و کمان ماگمایی ارومیه - بزمان یا همان ارومیه - دختر گستره کرمان در مختصات طول جغرافیایی $38^{\circ}58'47''$ - $14^{\circ}57'54''$ و عرض

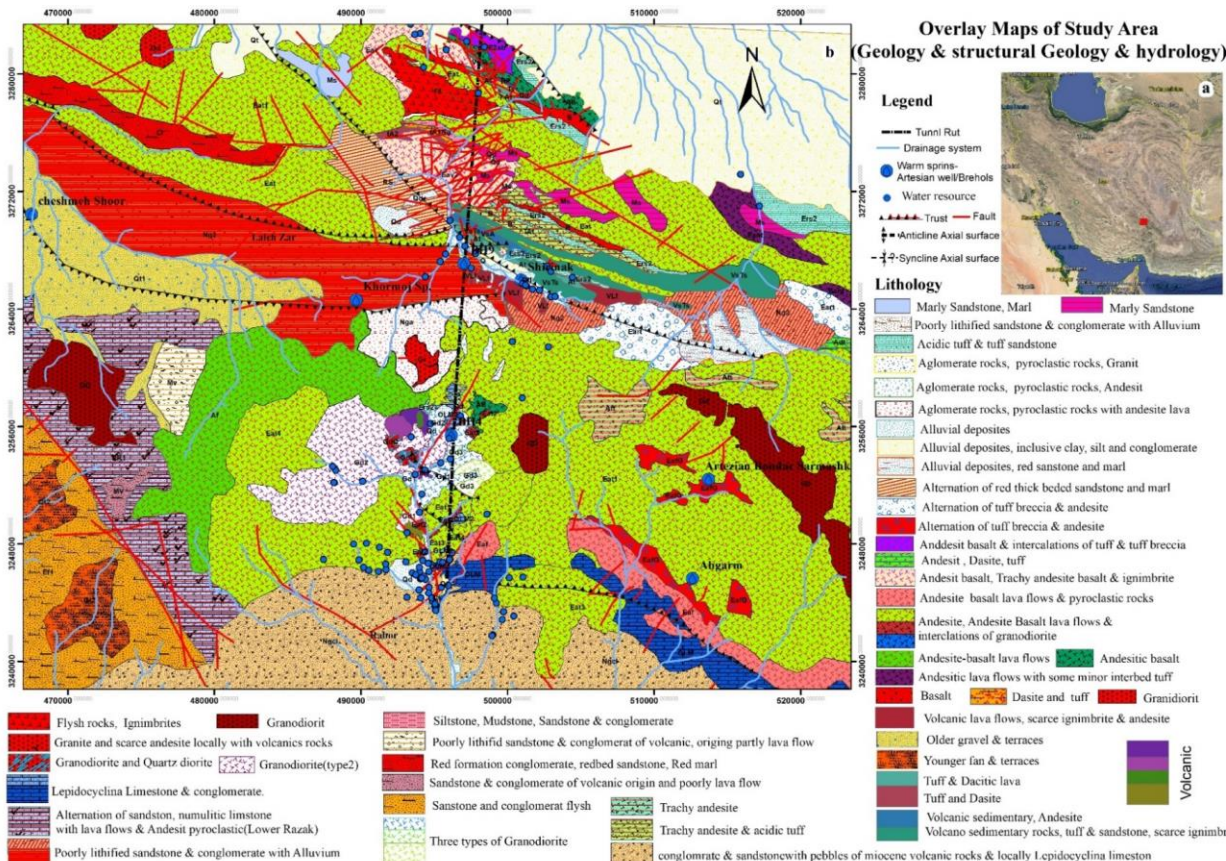
رودخانه‌های دائمی و فصلی می‌باشد. وجود چشمه‌های آب گرم، چاه و گمانه‌های آرتزین همراه سایر منابع در گستره مطالعاتی، نشان دهنده شرایط هیدروژئولوژیکی خاص گستره است (جدول ۲).

و آبخوان‌های معلق و تأثیرات متقابل سنگ‌ها و آب، برای حفر تونل، نیازمند رویکرد مطالعاتی متفاوتی می‌باشد. از دیدگاه هیدروژئولوژیکی، منابع آب مهم در گستره مورد مطالعه شامل چشمه‌های آب گرم، چاه و گمانه‌های آرتزین، سایر چشمه‌های موجود، قنات، آبراهه‌ها و

جدول ۱- عناصر ساختاری و تکتونیکی مهم گستره مورد مطالعه (تغییر یافته از Khademi et al., 2010; Zamani, 2015; Kerman Regional Water Company, 2016).

Table 1. Important structural and tectonic elements of the study area. Modified after Khademi et al. (2010), Zamani (2015), and Kerman Regional Water Company (2016).

Row	structure	Properties	Length (km)	Trend	Dip direct	Dip (degree)	Crossed tunnel (m)
1	Laleh-e-Zar fault	Dextral-Seismic	80	SE-NW & E-W	S- SW	58	18887
2	Madeh-Koh fault	Revers	40	SW-NE & E-W	S-SE	65	37243
3	Sarzeh fault	Revers	25	E-W	N	72.5	22778
4	Koh-e-eshgh fault	Strickslipe	9	SW-NE & N-S	W		9734
5	Anticline			With axial surface: 86/210			32324
6	Syncline			With axial surface: 85/030			22101



شکل ۱- تصویر ماهواره‌ای ایران و موقعیت گستره مورد مطالعه (a) و نقشه (همپوشانی) زمین‌شناسی - زمین‌شناسی ساختاری و هیدرولوژی گستره مورد مطالعه (b).

Fig. 1. Satellite image of Iran and the location of study area (a) and (b) Overlay maps of geology, structural geology and hydrology of the study area.

هایپوژن و نیز جلوگیری از آلوده شدن سایر منابع آب قابل درک است. حوضه‌های آبریز، آبراهه‌ها و رودخانه‌ها، قنات و موقعیت

با توجه به شرایط موجود، اهمیت این مطالعه جهت شناخت محدوده‌های دارای منابع هیدروترومال و محتمل گسترش کارست

شده همراه با سایر عناصر ساختاری در گستره مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است.

چشمه‌های آب گرم، آب شور و گمانه‌های آرتزین نسبت به مسیر مورد نظر برای حفر تونل و همچنین گسل‌های موجود و شناسایی

جدول ۲- چشمه‌های آب گرم و شور و گمانه‌های آرتزین موجود در گستره مطالعاتی.

Table 2. Hot and saline springs and artesian boreholes in the study area.

Row	Source name	X	Y	Temperature (°C)	Ec (μmhos/cm)	pH	TDS(180c-mg/lit)
1	Shirinak hot spring	500707	3265846	19/7	5450	7/1	4010
2	Borehole BH4	696163	3255398	25	3400	7/1	2330
3	Borehole BH5	495290	3257819	25/1	1475	7/7	1010
4	Borehole BH9	497037	3267105	20/7	5610	6/7	4195
5	Shirinak Artesian well	499881	3266339	19/8	590	6/6	1856
6	Shoor Spring	495050	3248967	19/4	930	7/8	685
7	Khormoj Spring	480682	3264620	-	360	6/8	234
8	Laleh zar hot spring	466536	3273968	40/5	3700	7	2610
9	Bidrmashk hot spring	513716	3252390	-	696	7/3	452

روش کار

در نرم‌افزار ENVI پارامتر Reflectance تنها برای باندهای بازتابی، پارامتر Radiance برای باندهای بازتابی و حرارتی و پارامتر Brightness Temperature تنها برای باندهای حرارتی قابل محاسبه است. برای محاسبه رادیانس در نرم‌افزار ENVI از رابطه خطی ۱ استفاده می‌شود (Joseph, 2003; Christoph et al., 2013; Xie et al., 2016).

$$\text{Radiance} = \text{Gain} * \text{DN} + \text{Offset} \quad (\text{رابطه ۱})$$

در رابطه ۱ پارامتر Gain اشاره به میزان شیب خط رابطه بین درجه روشنایی و انرژی رسیده به سنجنده و پارامتر Offset نیز اشاره به عرض از مبدأ رابطه بین درجه روشنایی و انرژی رسیده به سنجنده دارد. برای محاسبه Reflectance-Top of Atmosphere در نرم‌افزار ENVI از رابطه ۲ استفاده می‌شود (Joseph, 2003; Christoph et al., 2013; Xie et al., 2016).

$$\text{Reflectance} = (p * L * d) / (ESUN * \sin(\theta)) \quad (\text{رابطه ۲})$$

در رابطه ۲، P: عدد پی، L: رادیانس تصویر ماهواره‌ای، d: فاصله زمین تا خورشید در زمان تصویربرداری ماهواره، ESUN: تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین در طول موج‌های باندهای سنجنده مورد نظر و θ زاویه ارتفاعی خورشید برحسب درجه می‌باشد. همچنین برای محاسبه دمای درخشندگی در نرم‌افزار ENVI از رابطه ۳ استفاده می‌شود (Joseph, 2003; Christoph et al., 2013; Xie et al., 2016).

$$T = (K2) / (\ln(K1/L + 1)) \quad (\text{رابطه ۳})$$

در رابطه ۳، K1: ضریب ثابت باند حرارتی، K2: ضریب ثابت باند حرارتی و L: رادیانس می‌باشد. مقادیر پارامترها و ضریب استفاده شده در جدول ۳ ارائه شده است.

برای انجام این پژوهش و دست‌یابی به هدف مورد نظر اطلاعات مورد نیاز جمع‌آوری و پیش پردازش تصاویر انجام شد. برای آشنایی بیشتر با گستره یک بازدید کلی چهار روزه صورت گرفت و داده‌های صحرایی مورد نیاز مانند موقعیت جغرافیایی منابع چشمه‌های آب گرم، گمانه‌های آرتزین و مسیر گسل‌ها جمع‌آوری شد. با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat و Aster اقدام به مطالعه و بررسی دورسنجی گستره جهت شناسایی کانی سیدریت و تخمین دمای سطح زمین (LST) شد. سپس نتایج حاصله با نتایج مطالعات موجود مطابقت داده شدند و صحت سنجی ارائه شده است. در این بررسی از نرم‌افزار ArcGIS برای تهیه نقشه‌ها، هم‌پوشانی نقشه‌ها و تجزیه و تحلیل داده‌ها استفاده شده است، و همچنین از نرم‌افزار ENVI برای پردازش تصاویر سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۹ ماهواره Landsat 8 و ۲۰۰۶ ماهواره Aster استفاده شد. استفاده از تصاویر ماهواره‌ای برای تهیه نقشه‌های پتانسیل‌یابی کانی سیدریت و تخمین دمای سطح زمین، نیازمند انجام برخی تصحیحات می‌باشند تا نتایج حاصله مورد اطمینان و قابل استفاده باشند. این عملیات شامل تصحیحات هندسی و اتمسفری و همچنین پردازش‌های بارزسازی پدیده‌های محیطی مورد نظر است که بر اساس هدف و نیاز کاربر انتخاب می‌شوند.

تصحیحات رادیومتریک و اتمسفری

به علت عبور امواج الکترومغناطیسی از جو و سپس دریافت توسط سنجنده‌ها، این امواج دچار جذب و پراکنش توسط جو می‌شوند که منجر به تغییر میزان مقدار انرژی رسیده به سنجنده می‌شود و بنابراین، انجام تصحیحات رادیومتریک و اتمسفری ضروری می‌باشد. برای این منظور از دستور Radiometric Calibration در نرم‌افزار ENVI برای محاسبه مؤلفه‌های رادیومتریک Radiance و Reflectance و Brightness Temperature استفاده می‌شود.

درجه روشنایی، رادیانس و بازتاب TOA وارد فرآیند محاسبه می-شود، که در بین آن‌ها استفاده از داده‌های رادیانس از دقت بالایی برخوردار می‌باشد (Bernstein et al., 2012). الگوریتم QUAC یک الگوریتم قدرتمند برای تصحیح اتمسفری تصاویر ماهواره‌ای چند طیفی و ابرطیفی در نرم‌افزار ENVI است. این الگوریتم تنها در نرم‌افزار ENVI است و روشی ساده و کاربردی برای حذف اثر جذب و پخش امواج الکترومغناطیسی می‌باشد. همچنین این الگوریتم می‌تواند برای انجام تصحیحات اتمسفری تصاویر چند طیفی و ابرطیفی در بازه بین ۴۰۰ تا ۳۰۰۰ نانومتر و برای تصحیح تصاویری که در گذشته تهیه شده و یا تصاویری که فاقد نمونه‌های اتمسفری و زمینی برای اعمال روش‌های مطلق هستند استفاده شود. در این روش تنها با استفاده از چند باند و داشتن طول موج هر یک از آن‌ها و بدون ارائه اطلاعات زیادی تصویر تصحیح می‌گردد. در این الگوریتم از ساختار ساده شده مدل‌های انتقال تابشی استفاده شده است که برای مدل‌سازی مسیر حرکت امواج الکترومغناطیسی رسیده به سنجنده استفاده می‌شود. در تصویر b۲ سمت چپ رفتار طیفی بدون انجام تصحیح اتمسفری نمایش داده شده که اثرات جذب موجود در روی رفتار طیفی به شدت باعث ایجاد اعوجاج در آن شده است، این در حالی است که پس از انجام تصحیحات اتمسفری و تعدیل اثر اتمسفر (از حیث جذب و پخش)، رفتار طیفی حاصله به خوبی تصحیح شده و پدیده‌ها را از یکدیگر متمایز ساخته است.

جدول ۳- مقادیر و ضرایب مورد استفاده در رابطه‌ها.

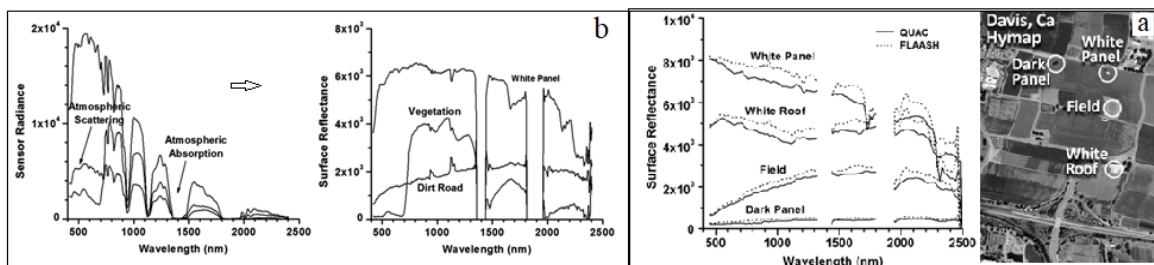
Table 3. Values and coefficients used in relationships.

	Band 10	Band 11
Gain	3/3420*10-4	3/3420*10-4
Offset	0/1000	0/1000
K1	774/8853	480/8883
K2	1321/0789	1201/1442

تصحیح اتمسفری تصاویر ماهواره‌ای

اتم‌سفر به عنوان مهم‌ترین عامل ایجاد خطای رادیومتریکی است. مهم‌ترین اثرات اتم‌سفر بر روی امواج از طریق پخش و جذب امواج الکترومغناطیسی اتفاق می‌افتد. برای انجام تصحیحات اتمسفری تصاویر ماهواره‌ای از الگوریتم QUAC (Quick Atmospheric Correction) در ENVI استفاده شده است. این الگوریتم در مقایسه با سایر روش‌های مبتنی بر محاسبات فیزیکی از سرعت بسیار بالایی برخوردار است. بررسی‌های انجام شده در ارتباط با دقت الگوریتم‌های QUAC و FLAASH نشان داده که روش QUAC به صورت تقریبی ۱۵ درصد نتایج آن با روش FLAASH متفاوت است (Bernstein et al., 2012) و مقایسه رفتارهای طیفی حاصل از الگوریتم QUAC و FLAASH در شکل a۲ نشان داده شده است.

بر خلاف سایر روش‌های فیزیکی که به شدت از نوفه‌های سنجنده تأثیر می‌پذیرند، الگوریتم QUAC به صورت مستقل از اعوجاج‌های سنجنده فرآیند تصحیح را انجام می‌دهد. در این الگوریتم سه فرمت



شکل ۲- (a) مقایسه الگوریتم QUAC و FLAASH و (b) تصحیح اتمسفری (Bernstein et al., 2012).

Fig. 2. (a) Comparison between QUAC and FLAASH algorithms and (b) Atmospheric correction (Bernstein et al., 2012).

$$MNDWI = \frac{(Green - SWIR)}{(Green + SWIR)} \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$Sidrite = \frac{(B5 + B6)}{(B3 + B4)} \quad \text{for ASTER} \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$Sidrite = \frac{(2B7)}{(B5 + B4)} \quad \text{for Landsat8} \quad (\text{رابطه ۷})$$

همچنین برای محاسبه و تخمین دمای سطح زمین از معادله‌های ۸ تا ۱۱ استفاده شد (Hecker et al., 2013).

$$PV = \frac{(NDVI - NDVI_{min})}{(NDVI_{max} - NDVI_{min})} \quad (\text{رابطه ۸})$$

تهیه نقشه پتانسیل یابی کانی سیدریت و تخمین دمای سطح زمین (LST)

برای شناسایی کانی سیدریت نیاز به محاسبه شاخص‌های NDVI، MNDWI می‌باشد و با استفاده از روابط ۴ تا ۷ اقدام به تهیه نقشه پتانسیل یابی کانی سیدریت برای تصاویر ماهواره‌ای ASTER و Landsat 8 شد (Myneni et al., 1995; McFeeters, 1996; Xu, 2006; Cudahy et al., 2017).

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad (\text{رابطه ۴})$$

می‌آورند. کانی هماتیت در دمای بالا و سیدریت در دمای پایین شکل می‌گیرند (Guilbert and Park, 1997)، لذا سیدریت سطحی‌تر است. کانی گوتیت از فرسایش کانی‌های آهن نظیر سیدریت تشکیل می‌شود. محققین زیادی (Kaufman., 1998; Massironi et al., 2008; Gholami et al., 2012; Abedi et al., 2013) از تصاویر ماهواره‌ای به منظور بارزسازی کانی‌های آهن استفاده کرده‌اند. در Landsat8 باندهای ۲ (Blue) و ۴ (Red) به ترتیب جذب و بازتاب قوی را برای اکسیدهای آهن نشان می‌دهند (Hunt and Salisbury, 1971; Hunt and Ashley, 1979). سیالات صعود کننده و عامل توسعه فرآیند کارستی شدن در گستره مورد مطالعه به طور غالب هیدروترمال و دارای منشأ ماگمایی با ترکیبات شیمیایی اسیدی - خورنده، کانی‌زا و دمای زیادی هستند که به مرور زمان و طی مسافت و صعود از طریق مجاری زمین ساختاری اولیه و ثانویه به سطح زمین نزدیک شده و از قدرت خوردندگی و دمای زیاد آن کاسته می‌شود. در این مسیر صعود، سیال دچار تغییراتی در ترکیب شیمیایی و دما شده و نوع واکنش‌های رخ داده تغییر می‌کند. سیدریت ($FeCO_3$) کانی است که نشانه و عاملی برای توسعه کارست‌های هایپوژن می‌باشد (Kemp, 2009) و نیز در مناطقی که منابع هیدروترمال وجود دارد پتانسیل توسعه بیشتری دارند.

لذا، شناسایی مناطق دارای این کانی می‌تواند راهنمای خوبی جهت مطالعات هیدروشیمیایی گستره برای تعیین دقیق‌تر محدوده وجود آن جهت اتخاذ تصمیمات مدیریتی در ایجاد و نگهداری از سازه تونل و نیز اقدامات حفاظت کیفی منابع آب باشد. کانی سیدریت با رنگ‌های متمایل به زرد - قهوه‌ای - زرد قهوه‌ای - خاکستری - قهوه‌ای تیره، غیرشفاف تا نیمه شفاف، با شکستگی صدفی - نامنظم - کامل، جلای شیشه‌ای - نیمه مات، رخ کامل با سیستم تبلور رمبوئدریک و در رده‌بندی کربنات است. همچنین خاصیت مغناطیسی متغیر و منشأ تشکیل آن هیدروترمال - متاسوماتیک - پگماتیسی - است. چنانچه این کانی در محیط (در زیر سطح ایستابی و در بالای سطح ایستابی) وجود داشته باشد با حضور آب واکنش صورت می‌گیرد و CO_2 و کانسار آهن (عموماً گوتیت) تشکیل می‌دهد، و CO_2 موجب تشکیل اسید کربنیک می‌شود و شروع به ایجاد حفرات زیرزمینی یا همان اصطلاحاً کارست هایپوژن می‌کند (Kozioł, 1999). برای شناسایی سیدریت در گستره سه تصویر از سال‌های ۲۰۰۶، ۲۰۱۳ و ۲۰۱۹ اخذ شده است. که تصاویر مربوط به سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۱۳ مربوط به ماهواره Landsat8 و تصویر سال ۲۰۰۶ از سنجنده ASTER اخذ شده است. برای شناسایی سیدریت در گستره با استفاده از سنجنده ASTER نیاز به باندهای B4، B3، B5، B6 و B4 می‌باشد. باندهای ۴، ۵ و ۶ در محدوده SWIR قرار گرفتند که در تاریخ ۲۰۰۷ به بعد دچار نقص فنی شده‌اند. با توجه به اشتراک نسبی طول موج‌های مورد استفاده برای شناسایی سیدریت در سنجنده ASTER با ماهواره Landsat8 امکان استفاده از این ماهواره در

$$\text{Emissivity} = 0.004 * PV + 0.986 \quad (\text{رابطه ۹})$$

$$\text{Emissivity corrected for soil NDVI} < 0.2 = 0.97 \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

$$\text{Emissivity corrected for vegetation NDVI} > 0.5 = 0.99$$

$$\text{Emissivity corrected for } 0.2 < \text{NDVI} < 0.5 = \text{emissivity}$$

$$\text{TS(LST)} = \text{TB} / (1 + (\text{Rad} * (\text{TB} / 14380) * \text{aloge})) \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

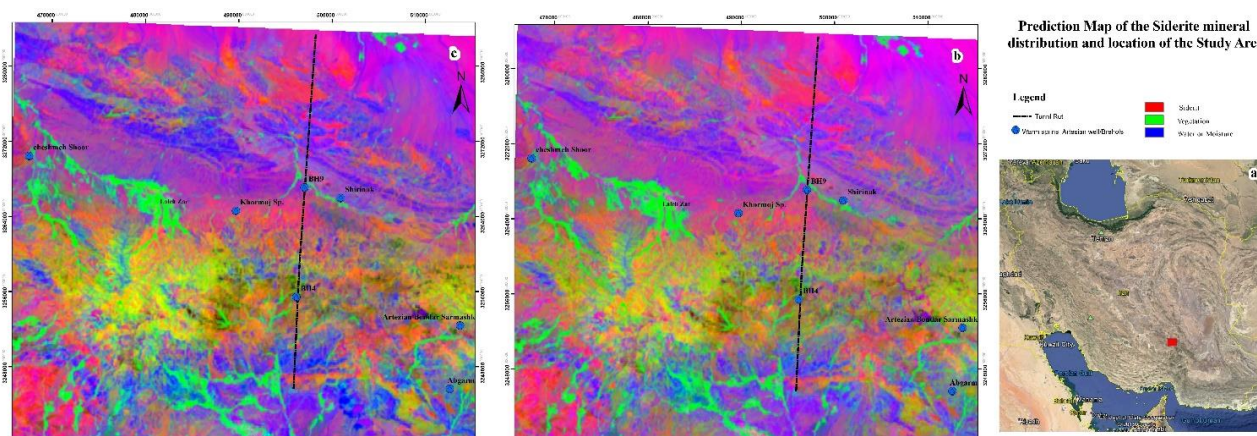
بارزسازی اکسیدهای آهن (کانی سیدریت)

برای اکتشاف مواد معدنی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، شاخص‌هایی مورد توجه است که با توجه به زایش و مکانیسم تشکیل کانسار می‌تواند تعیین شود. مانند دگرسانی سنگ بستر که در اثر نفوذ محلول‌های داغ سرشار از مواد معدنی تحت فشار زیاد در سنگ بستر تزریق شده و موجب تغییرات کانی‌شناسی و شیمیایی را در سنگ بستر فراهم می‌آورد. تصاویر و داده‌های ماهواره‌ای به دلیل داشتن ویژگی‌های طیفی قابل تشخیص برای شناسایی کانی‌های مختلف هر گروه کانیایی، یکی از قابل اعتمادترین منابع جهت استفاده در مطالعات زمین‌شناسی و اکتشاف مواد معدنی، استخراج کانی‌های دگرسانی، تفکیک و تشخیص دگرسانی‌های هیدروترمالی می‌باشد که اثر آن‌ها در سطح قابل تشخیص است. برای مثال لیمونیت که یک کانی آهن است دارای باند جذبی قوی در باند آبی طیف مرئی است. بنابراین، از طریق نسبت‌گیری باندها در تصاویر ماهواره‌ای می‌توان نواحی لیمونیت‌دار را بارزسازی و نقشه‌برداری کرد. داده‌های سنجنده ASTER با داشتن ۱۴ باند در محدوده‌های خاص و مناسب امواج الکترومغناطیسی، امکان شناسایی برخی از کانی‌ها را فراهم می‌سازد. مهم‌ترین کانی‌هایی که با داده‌های ASTER قابل شناسایی می‌باشد، آن دسته از کانی‌ها هستند که در ساختمان کریستالی خود دارای یون OH می‌باشند، نظیر کانی کائولین، آلونیت، ژاروسیت و اکسیدهای آهن نظیر سیدریت. برای شناسایی کانی‌ها باید ابتدا ویژگی طیفی جذب و انعکاسی آن‌ها را با توجه به موقعیت باندهای داده ASTER مورد مطالعه و بررسی قرارداد و باندهایی را که دارای جذب و انعکاس قابل توجهی هستند شناسایی کرد. برای مثال کانی کائولین در باند ۴ و ۵ SWIR به ترتیب دارای حداکثر انعکاس و جذب را دارد. لذا برای شناسایی کائولین از باندهای ۴ و ۵ داده ASTER می‌توان به خوبی استفاده کرد (Watson et al., 2008; Heasler et al., 2009; Glassley, 2010). سنجنده ASTER از سال ۲۰۰۷ به بعد دارای خطایی به نام Cross-Track می‌باشد. در بعضی از این تصاویر این مشکل برطرف شده ولی برای اکثر تصاویر مربوط به ایران این مشکل وجود دارد و باندهای SWIR در آن‌ها حذف شده است (Arai et al., 2011).

اما روند تشکیل کانی‌های سیدریت و هماتیت به این صورت است که با کاهش دما و فشار محلول‌های گرمایی حاوی آهن با دیواره‌های سنگ میزبان واکنش می‌کند و ذخایر گرمایی آهن را به وجود

روی آن‌ها اعمال و سپس شاخص‌های NDVI و MNDWI از این تصاویر استخراج شد تا پوشش گیاهی و پهنه‌های آبی در تصویر شناسایی و تفکیک با استفاده از رابطه ۷ مناطقی که سیدریت در آن‌ها وجود دارد شناسایی شد. در شکل ۳ تصاویر سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۹ گستره مورد مطالعه بعد از تفکیک گیاه، آب و سیدریت نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، مناطق دارای رنگ سبز خالص، مربوط به پوشش گیاهی زیاد، مناطق دارای رنگ آبی خالص، مربوط به پوشش آبی و خاک‌های مرطوب و مناطقی که به رنگ قرمز هستند نشان دهنده اکانی سیدریت می‌باشند. هر چند که گستره مورد مطالعه در طی این ۶ سال تغییرات چندانی از نظر توسعه کانی سیدریت نکرده است، ولی گسترش این کانی در گستره مورد مطالعه و همپوشانی با موقعیت منابع هیدروترمال بصورت چشمه‌های آب گرم و گمانه‌های آرتزین بسیار قابل توجه می‌باشد.

تاریخ‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۹ فراهم می‌باشد. برای بهبود در شناسایی سیدریت، پوشش گیاهی و مناطقی که مرطوب و یا توده آبی هستند شناسایی می‌شوند. به همین منظور در این گستره شاخص‌های NDVI و MNDWI شناسایی و سپس مناطقی که دارای سیدریت می‌باشند با استفاده از روابط ۴ تا ۷ محاسبه شد (Myneni et al., 1995; McFeeters, 1996; Xu, 2006; Cudahy et al., 2017). در این روابط طول موج باند NIR در محدوده 0.845-0.885، باند قرمز در محدوده 0.630-0.680، باند سبز در محدوده 0.525-0.600 و باند SWIR در محدوده 1.56-1.66 میکرومتر است. از رابطه ۶ که برای شناسایی سیدریت در ASTER استفاده شد به دلیل شباهت باندهای مورد استفاده در ASTER برای شناسایی سیدریت با Landsat 8 امکان استفاده از معادله ۷ میسر می‌باشد. بعد از دریافت تصاویر سال ۲۰۱۳ و ۲۰۱۹ ماهواره Landsat 8 از سایت USGS تصحیحات رادیومتری و اتمسفری لازم

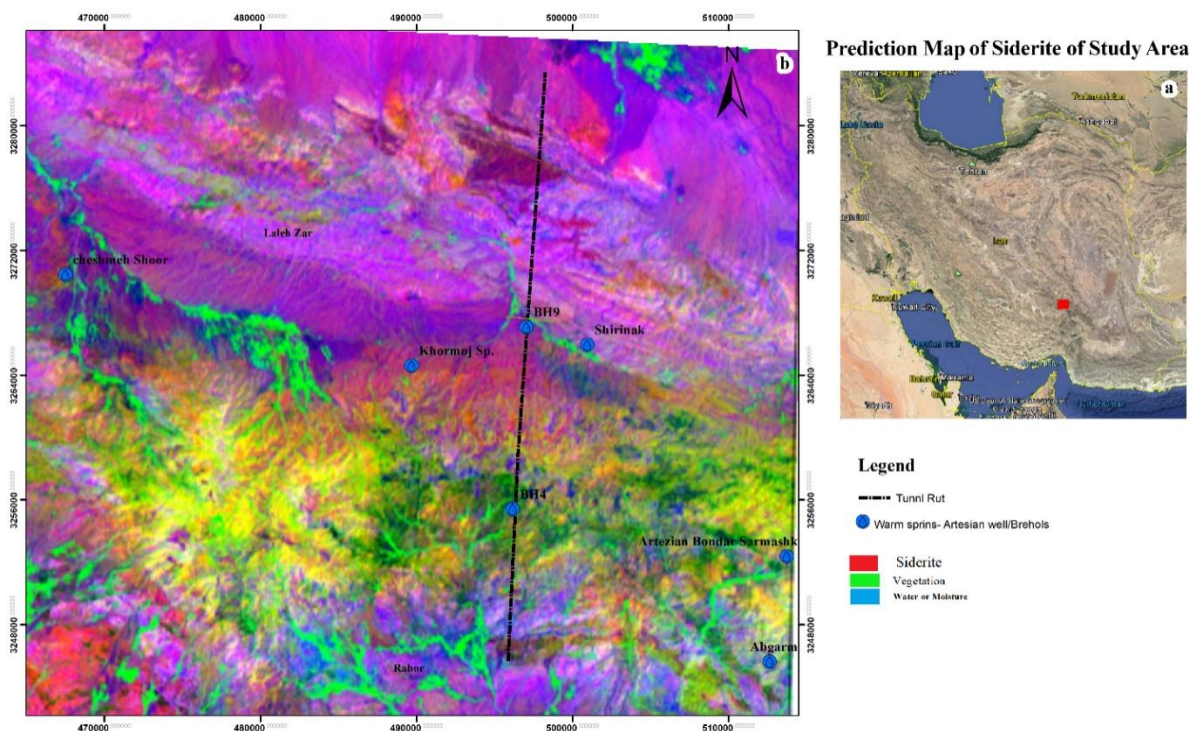


شکل ۳- (a) موقعیت گستره مورد مطالعه و نقشه پیش‌بینی مناطق مستعد حضور کانی سیدریت، (b) تصویر لندست سال ۲۰۱۹ و (c) تصویر لندست سال ۲۰۱۳.

Fig. 3. (a) Location of study area and (b) Predicted siderite mineral distribution map by Landsat images 2019 and (c) 2013.

مناطق هستند که پوشش گیاهی و آب و رطوبت با یکدیگر مخلوط هستند. به عنوان مثال نواحی که رنگ آن‌ها سبز پررنگ هست پوشش‌های گیاهی مرطوب و یا گیاهانی که در آب هستند را نشان می‌دهد. رنگ سبز کم رنگ منعکس کننده خاک لخت و درصد پوشش گیاهی کمتر می‌باشد. شاخص MNDWI در محدوده ۱- تا ۱ قرار گرفته است و هر چقدر این عدد به ۱ نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده مناطق دارای درصد بالای پوشش آبی و رطوبت است که به رنگ آبی مشخص است. وقتی این عدد به سمت عدد صفر و ۱- متمایل باشد نواحی دارای رطوبت کمتر را نشان می‌دهد، که شامل پوشش‌های مخلوط آبی و گیاهی است. اعدادی که منفی هستند پوشش‌های خاکی با رطوبت را شامل می‌شود که رنگ نشان داده شده در شکل ۴ ترکیبی از رنگ آبی می‌باشد.

در شکل ۴ تصویر مربوط به سال ۲۰۰۶ سنجنده ASTER نمایش داده شده است که شاخص‌های گیاه و آب با استفاده از رابطه ۴ و ۵ بدست آمده و برای محاسبه سیدریت از رابطه ۶ استفاده شده است (Cudahy et al., 2017). همانطور که مشاهده می‌شود در تصویر ۴ نیز ترکیب باندهای سبز، آبی و قرمز است که به ترتیب برای آشکارسازی پدیده‌های پوشش گیاهی، آب و کانی سیدریت استفاده است. با توجه به وجود باند حرارتی و مطابق با رابطه ۶ آشکارسازی کانی سیدریت در شکل ۴ بهتر نشان داده شده است (به دلیل استفاده از باندهای SWIR که برای شناسایی کانی حایز اهمیت است). لازم به ذکر است که شاخص‌های NDVI و MNDWI در محدوده ۱- تا ۱ قرار دارند. در شاخص NDVI اعدادی که به سمت عدد ۱ نزدیکتر هستند نشان‌دهنده پوشش گیاهی خالص‌تر و مترکم‌تر با رنگ سبز کامل می‌باشد و هر چه این عدد به سمت ۰ و ۱- پیش می‌رود



شکل ۴- (a) موقعیت گستره مورد مطالعه و (b) نقشه پیش‌بینی مناطق مستعد حضور کانی سیدریت (تصویر Aster سال ۲۰۰۶).

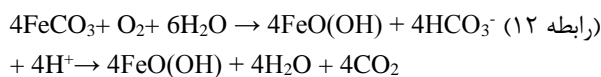
Fig. 4. (a) Location of study area and (b) Predicted siderite mineral distribution map by ASTER image (2006).

به طور کلی، بعد از هم‌پوشانی نقشه زمین‌شناسی و تصاویر پردازش یافته با هدف شناسایی کانی سیدریت (شکل ۵) مشخص شد که در محل رخنمون لیتولوژی‌هایی از نوع توف و داسیت، آندزیت توف و ماسه‌سنگ‌های توفی، آندزیت بازالت، آندزیت بازالت با میان لایه‌های گرانودیوریتی، سنگ‌های فیلیشی و ایگممبریت، ماسه‌سنگ نسبتاً تحکیم یافته و آگلومریت و در نهایت تراکی آندزیت و توف، کانی سیدریت وجود دارد. سابقه وجود رگه‌های کانسار آهن حاوی گوتیت، هماتیت، پیریت و کالکوپیریت در کمربند ماگمایی ارومیه دختر اثبات شده است (Haghighi et al., 2017).

محاسبه دمای سطح زمین

دمای سطح زمین یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در مطالعات جهانی به شمار می‌آید، که در کنترل فرایندهای بیولوژیکی، شیمیایی و فیزیکی زمین در مقیاس محلی و منطقه‌ای مؤثر می‌باشد (Alavipanah et al., 2007; Zarei et al., 2016). همچنین از آن می‌توان به عنوان یک پارامتر کنترل کیفی محیطی در مطالعات توسعه زیرسطحی منابع هیدروترمال و کارست هایپوژن استفاده نمود. دمای سطح زمین در تصاویر ماهواره‌ای شامل میانگین دمای پیکسلی است که پوشش‌دهنده بخشی از سطح زمین است و بر اساس انرژی رسیده به سنجنده (رادینس) در باند حرارتی محاسبه می‌شود. دمای سطح زمین تابعی از انرژی خالص در سطح زمین است که بستگی به مقدار انرژی رسیده به سطح زمین، قابلیت انتشار سطحی، رطوبت و

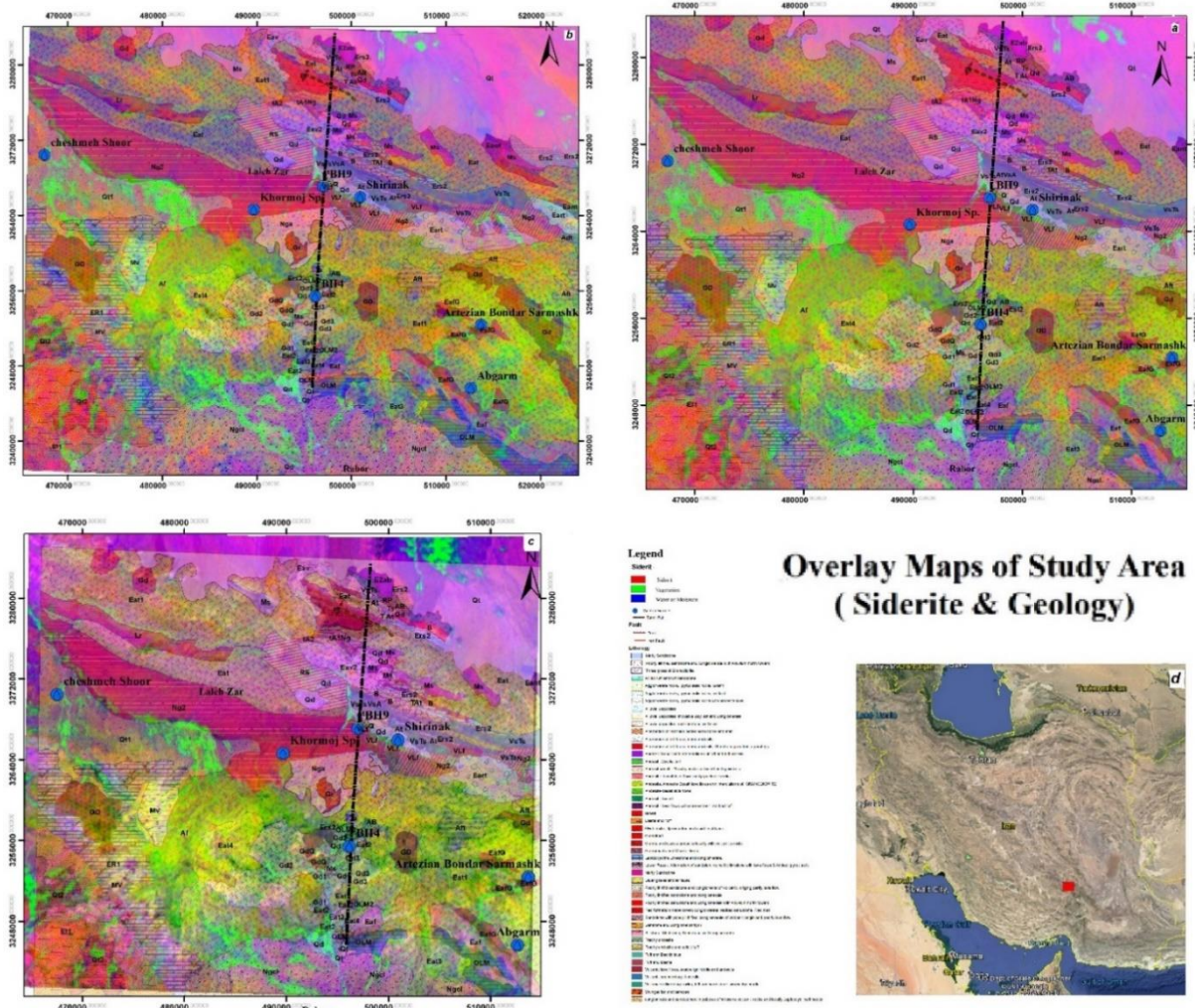
کانی سیدریت با فرمول $FeCO_3$ همراه با سولفیدها می‌باشد و در محلول‌های هیدروترمال و همینطور دگرسانی‌های هیدروترمالی دارای منشأ هیدروترمالی، متاسوماتیکی و پگماتیتی است. همچنین کانی سیدریت از کانی‌های اصلی لیستونیت‌های کربناته است که از نظر پاراژنتیکی، در مرحله گرمایی بر روی سنگ‌های میزبان تشکیل می‌گردد (Zarrinkoub et al., 2005). لیستونیت‌ها عمدتاً در صفحات گسلی و همراه با آمیزه‌های رنگین دیده می‌شوند. هوازدگی کانی سیدریت و فرآیند رخداد کارست هایپوژن و تشکیل غارهایی زیر سطحی (Kempe, 2009) می‌تواند در زون‌های برخورد سیالات صعود کننده و آب‌های جوی غنی از اکسیژن فرورو رخ دهد. واکنشی که طی آن فرآیند رخداد کارست هایپوژن و تشکیل رگه‌های آهن صورت می‌گیرد، طبق رابطه ۱۲ می‌باشد (Kempe, 2009) که در این فرآیند کانی سیدریت به کانی گوتیت تبدیل و دی‌اکسید کربن و پروتون‌هایی را آزاد می‌کند.



توسعه این کانی در گستره مورد مطالعه بسیار زیاد می‌باشد و تمرکز آن بیشتر در قسمت‌های شمالی است ولی در بخش‌هایی از جنوب گستره مورد مطالعه نیز شناسایی شده است.

که در فضای بالای اتمسفر به وسیله سنجنده‌ها بدست می‌آید، دمای روشنایی می‌نامند، که تحت تأثیر جذب و پخش اتمسفری است و مقدار آن کمتر از دمای سطح زمین می‌باشد (Becker et al., 1995). در روش‌های بازیابی دمای سطح زمین، از داده‌های چند کانال مادون قرمز (TIR) حرارتی استفاده می‌شود.

جریان هوای اتمسفر دارد. این دما را می‌توان با استفاده از تابش مادون قرمز که از سطح زمین ساطع می‌گردد به وسیله رابطه معکوس پلانک برآورد نمود. رابطه پلانک بیان کننده رابطه میان تابش یک جسم در طول موج‌های مختلف است که با برقراری ارتباط بین ویژگی‌های جسم و محیط و دمای ثبت شده توسط سنجنده دمای سطح زمین محاسبه می‌گردد. در سنجش از دور، دمای سطح زمین را



شکل ۵- نقشه نهایی هم‌پوشانی لایه زمین‌شناسی و تصویر ماهواره‌ای که برای شناسایی کانی سیدریت استفاده شده است؛ (a) سال ۲۰۱۹، (b) سال ۲۰۱۳ برای تصاویر ماهواره Landsat8، (c) سال ۲۰۰۶ برای تصویر ماهواره Aster و (d) موقعیت گستره مورد مطالعه.

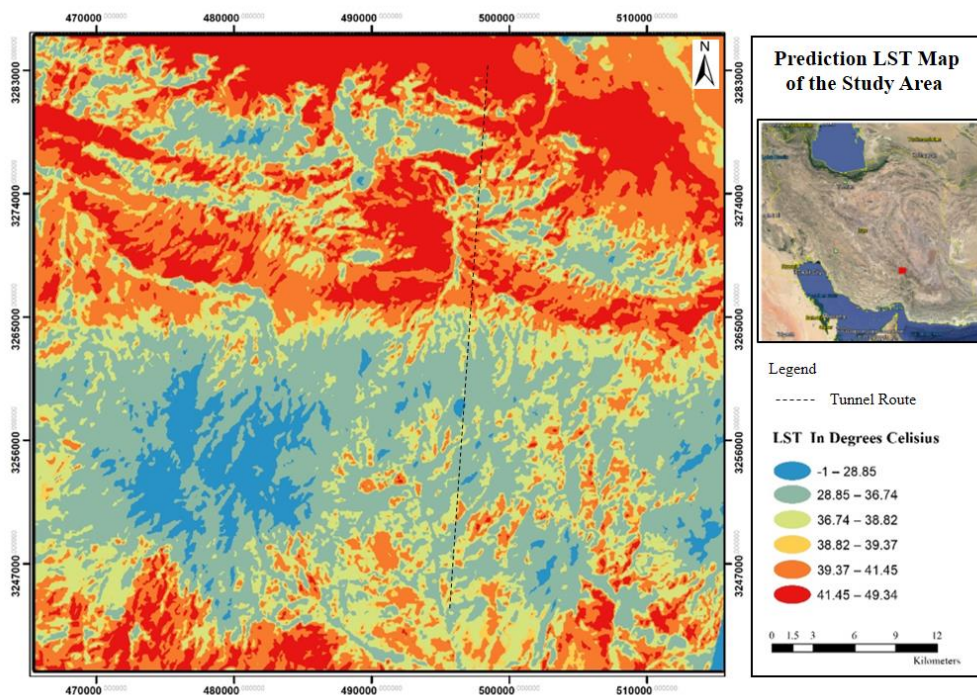
Fig. 5. Overlay maps of geology and predicted siderite mineral distribution; (a) 2019, (b) 2013, (c) 2006 and (d) Location of the study area.

در گستره مورد مطالعه چشمه‌های آب گرم زیادی از جمله چشمه آب گرم شیرینک، گمانه‌های آرتزین و چندین نقطه رخنمون تراورتن وجود دارند که نشانه‌های سطحی از حضور منابع هیدروترمال در گستره است. در این مطالعه، علاوه بر بازدید صحرایی به علت صعوبت العبور بودن بعضی مناطق و گستردگی گستره مورد مطالعه از تکنیک‌های سنجش از دور که ابزاری کارآمدی است استفاده شده است. با استفاده از شاخص دمای سطح زمین (LST) محاسبه شده می‌توان برای شناسایی سایر چشمه‌های آب گرم با منشأهای مختلف و نیز جهت به

دست آوردن اطلاعات بیشتر از میزان توسعه منابع هیدروترمال و به تبع آن به کمک سایر اطلاعات بدست آمده نقاط محتمل کارست هایپوژن را شناسایی نمود. جهت پایش و تدقیق نتایج این بخش از موقیعت ثبت شده برای چشمه‌های آب گرم و گمانه‌های آرتزین طی بازدیدهای صحرایی استفاده شده است. در این مطالعه از روش الگوریتم پنجره مجزا استفاده شده است که با استفاده از این الگوریتم اثر جو حذف شده و دمای سطح زمین با ترکیب خطی یا غیر خطی از درجه روشنایی حرارت دو کانال محاسبه شده است (Becker et al., 1995).

گسل‌های راندگی، چین خوردگی‌ها و گسل‌های راستالغز چپ رو و راست رو که پیامد ساختارهای فشاری است (با توجه به درازای گسل‌ها و همچنین محل تلاقی گسل‌های اصلی با گسل‌های فرعی) می‌تواند محل مناسبی برای نفوذ ماگما، نفوذ سیالات هیدروترمال، کانه‌زایی و گسترش مجاری کارستی و انتقال حرارت باشد (Manghany et al., 2009). از این رو هم‌پوشانی نقشه‌های دمای تخمین زده شده با لایه‌های زمین‌شناسی و نقشه گسل‌های موجود شناسایی شده مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج بدست آمده با نقاط دارای چشمه‌های آب گرم، تراورتن و گسل‌های تراستی انطباق بسیار خوبی دارد (شکل‌های ۷ و ۸).

(al., 1995). در این مطالعه برای محاسبه دمای سطح زمین از تصویر ماهواره‌ای Aster استفاده شد (شکل ۶). همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است قسمت‌های شمالی که مربوط به مرز ایران مرکزی و نوار ماگمایی ارومیه - دختر است دمای نسبتاً بیشتری را نشان می‌دهد. شکستگی‌ها به ویژه گسل‌ها عامل مهم و اساسی در تشکیل مسیرها و حفرات زیرسطحی (Theilen-Willige, et al., 2014)، تشکیل ذخایر معدنی و انتقال حرارت می‌باشند، و همچنین کانی‌سازی‌ها عمدتاً در محل تقاطع گسل‌ها رخ می‌دهند. عناصر ساختاری از جمله گسل‌های عادی، شکستگی‌های کششی و ساختمان‌های هورست و گرابن که پیامد ساختارهای کششی است و یا



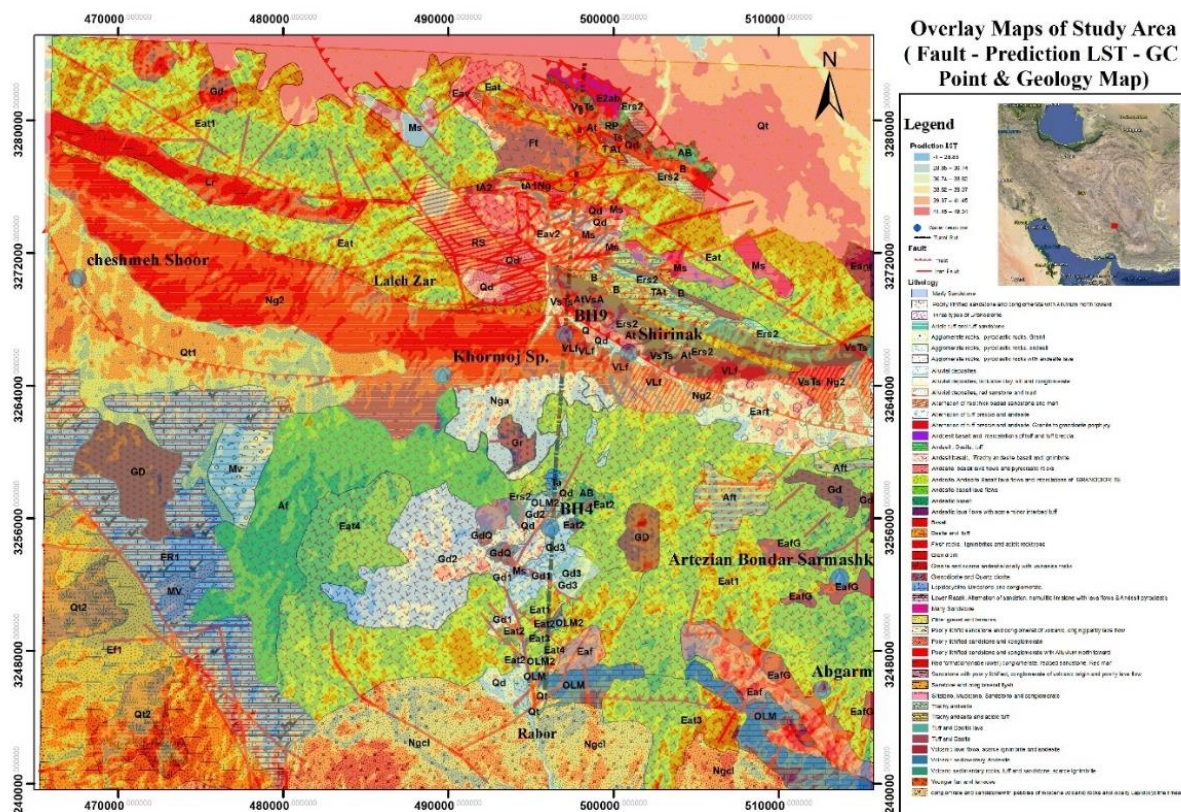
شکل ۶- نقشه دمای سطح زمین محاسبه شده با استفاده تصاویر ماهواره‌ای استر در گستره مورد مطالعه.

Fig. 6. Prediction LST map of the study area by Aster image.

نتیجه‌گیری

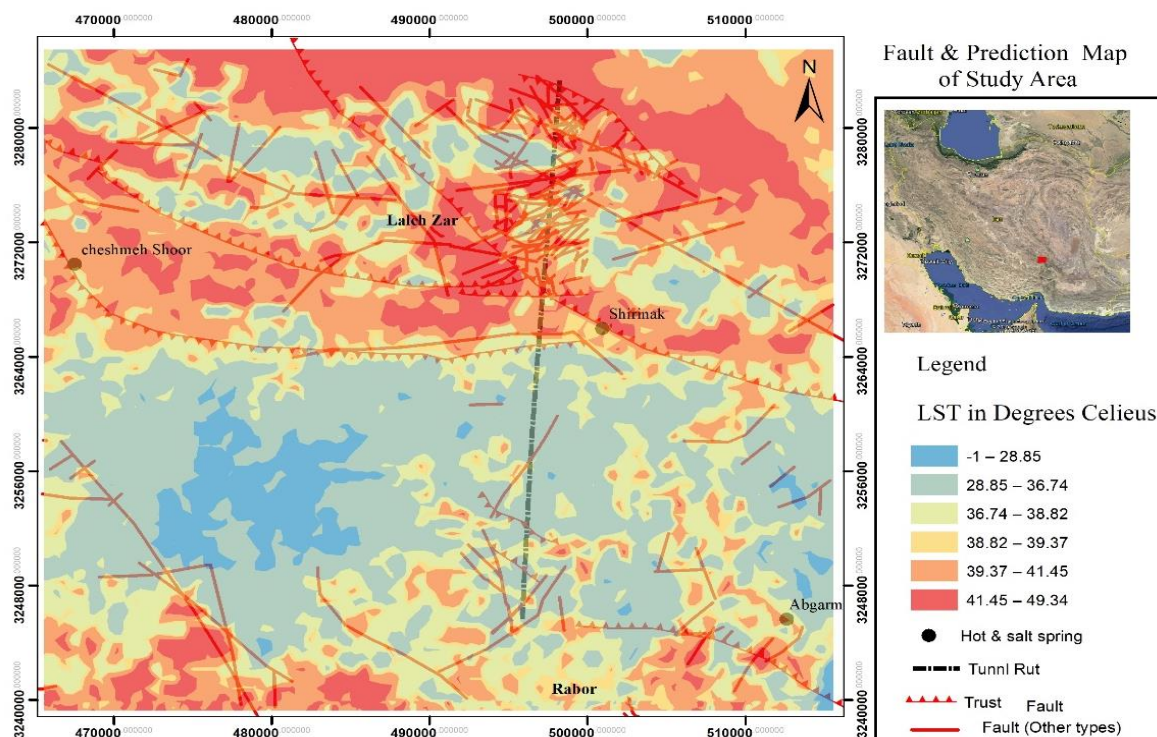
تراکم گسل‌ها هم‌پوشانی دارد و در نقاطی که نوع گسل‌ها از نوع تراستی می‌باشد میزان هم‌پوشانی و میزان دما بیشتر است. علاوه بر این مشاهده شد که در راستای گسل‌های تراستی و چشمه‌های آب گرم موجود در گستره مورد مطالعه، دمای محاسبه شده از تصاویر ماهواره‌ای و ارتباط بین این سه مؤلفه باهم مطابقت دارد. گسل‌های تراستی نیز عموماً دارای گسترش عمقی بیشتر و می‌تواند مسیری برای ارتباط سریع بین سطح و عمق باشد. همچنین وجود نهشته‌های تراورتن در بخش شمال شرقی گستره تأییدکننده این موضوع می‌باشد. لذا، در مسیر احداث تونل یکی از مناطق اصلی که می‌بایست جهت جلوگیری از ورود آلاینده‌های مربوط به منابع هیدروترمال به آب درون تونل مدنظر قرار بگیرد نقاط برخورد مسیر تونل با گسل‌های تراستی می‌باشد.

در این مطالعه سعی شد با توجه به شرایط زمین‌شناسی، زمین‌شناسی ساختاری و شرایط هیدروژئولوژیکی گستره مورد مطالعه، به کمک تکنیک‌های سنجش از دور، کانی‌شناسی و دمای سطح زمین، میزان گسترش زیرسطحی منابع هیدروترمال وابسته به آب‌های ماگمایی در گستره و اطراف مسیر تونل مورد بررسی قرار گیرد. برای شناسایی کانی سیدریت، هم‌پوشانی نقشه زمین‌شناسی و تصاویر پردازش شده انجام شد، و بر اساس نتایج به دست آمده در محل رخنمون سنگ‌هایی از نوع توف و داسیت، آندزیت توف و ماسه‌سنگ‌های توفی، آندزیت بازالت، آندزیت بازالت با میان لایه‌های گرانودیوریتی، سنگ‌های فیلیشی و ایگمنبریت، ماسه‌سنگ نسبتاً تحکیم یافته، آگلومریت، تراکی آندزیت و توف، کانی سیدریت مشاهده شد. نقشه‌های به دست آمده از موقعیت گسل‌ها و نقشه دمای محاسبه شده نشان دادند که در گستره مورد مطالعه، مناطق با دمای زیاد با



شکل ۷- نقشه هم‌پوشانی لایه گسل‌ها، دمای سطح زمین محاسبه شده، لیتولوژی و نقاط کنترلی.

Fig. 7. Overlay map of the study area (fault, prediction LST, GC points and lithology).



شکل ۸- نقشه هم‌پوشانی لایه‌های دمای سطح زمین محاسبه شده و گسل‌های موجود و شناسایی شده.

Fig. 8. Overlay map of the study area (fault, prediction LST and GC points).

شناسی به استثناء مناطق دارای سنگ‌های کربناته در درجه دوم اثرگذاری قرار دارد.

۲- وجود کانی سیدریت در گستره مورد مطالعه توسط تصاویر ماهواره‌ای و حضور برخی معادن آهن در کمر بند ارومیه تایید شد.

۳- براساس هم‌پوشانی نقاط دارای دما زیاد، گسل‌های اصلی و مناطق با تراکم شکستگی زیاد، وجود کانی سیدریت، فعالیت هیدروترمالی رخداد کارست هایپوژن پتانسیل زیادی دارد، این نوع کارست با ایجاد حفرات زیرسطحی می‌تواند نقش مهمی در انتقال آلاینده‌های ناشی سیالات هیدروترمال و ناپایداری سازه تونل در دراز مدت داشته باشد.

۴- بنابراین در بخش‌هایی از مسیر تونل انتقال آب که با این شواهد برخورد دارد نیازمند توجه و دقت بیشتری در انجام عملیات لاینیگ تونل جهت حفاظت کیفیت آب داخل تونل و ممانعت از هجوم آلودگی می‌باشد. در ورودی (پرتال جنوبی) و کیلومتر ۱۰۰۰ تا ۱۴۰۰ بواسطه وجود سنگ‌های آهکی و هم‌پوشانی با گمانه آرتزین این موضوع اهمیت بیشتری دارد.

بنابراین پیشنهاد می‌گردد که در مطالعات آینده و تکمیلی احداث تونل، مطالعات بسیار دقیقی از گسل‌ها، درزه‌ها و شکستگی‌ها و نوع مواد پرکننده این درزه‌ها همراه با ویژگی‌های آن‌ها و همچنین گسترش کانسار آهن انجام گردد. همچنین پیشنهاد می‌گردد در نقاط برخورد مسیر تونل با نقاطی که در آن‌ها ۱- دما زیادست، ۲- وجود کانی سیدریت شناسایی شده است و ۳- کانسار آهن وجود دارد نسبت به لاینیگ تونل توجه و دقت بیشتری لحاظ گردد.

قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند تا از حمایت‌های شرکت آب منطقه‌ای استان کرمان (جناب آقای مهندس رضایی) و مدیریت معدن مس درآلو جناب آقای مهندس محمد رضا نیکویی و نیز آقایان مهندس علیرضا مرادیان و مهندس شاهین محمدی تشکر و نیز معاونت پژوهشی دانشکده علوم زمین دانشگاه شهید چمران اهواز قدردانی نمایند.

بر اساس نقشه دمای محاسبه شده سطح زمین، موقعیت گمانه‌های آرتزین و نیز موقعیت گسل‌ها مشخص شد که گمانه‌های آرتزین در نقاط دارای دمای زیاد قرار دارند. لذا می‌توان نتیجه گرفت که با استفاده از نقشه دمای سطح زمین تا حدود زیادی می‌توان مناطق دارای منابع هیدروترمال و گسترش سفره‌های آرتزین با دما زیاد را در گستره شناسایی کرد.

با توجه به همپوشانی موقعیت گسل‌ها و نقاط دما بالا، گسترش زیرسطحی منابع هیدروترمال در گستره مورد مطالعه بیشتر متأثر از تراکم و گسترش گسل‌ها و به تبع آن شکستگی‌های حاصل از آن‌ها می‌باشد تا اینکه تحت تاثیر لیتولوژی باشد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که در چنین مناطقی عامل توسعه منابع هیدروترمال و کارست هایپوژن بیشتر تحت تأثیر عملکرد نیروهای تکتونیکی است تا عامل لیتولوژیکی. در نقشه‌های به دست آمده نیز مناطق با دمای بالا صرفاً محدود به مناطق با لیتولوژی آهکی، رسوبی- آذراواری و رسوبات عهد حاضر نیست، بلکه دمای زیاد در مناطق با لیتولوژی آذرین نیز مشاهده می‌شود.

بنابراین، با توجه به نتایج عوامل مؤثر در گسترش زیرسطحی منابع هیدروترمال، کارست هایپوژن، افزایش پتانسیل آلاینده‌های آب داخل تونل و احتمالاً ناپایداری تونل در دراز مدت به ترتیب شامل: ۱- گسل‌ها، شبکه درزه‌ها و شکستگی‌های گسترده و همچنین میزان ارتباط و نحوه عملکرد آن‌ها، ۲- عملکرد عوامل هیدروژئوشیمیایی در شکستگی‌ها، ناپیوستگی‌ها و سنگ‌های انحلال پذیر و ۳- میزان گسترش کانسار آهن حاوی کانی‌های سیدریت و گوتیت در گستره مورد مطالعه می‌باشد.

بطور خلاصه هم‌پوشانی نقشه‌های زمین‌شناسی، عناصر ساختاری، توزیع کانی سیدریت و همچنین LST نتایج قابل قبولی را نشان داد که عبارتند از:

۱- در گستره مورد مطالعه منابع هیدروترمال دارای توسعه زیرسطحی زیادی هستند و این توسعه بیشتر تحت کنترل نیروهای تکتونیکی بویژه عملکرد گسل‌های تراستی عمیق و شبکه شکستگی‌ها است و اثر سنگ

منابع

- Adib, A., Arman, A.H., Pourkermani, M., 2014. Seismicity and faulting reduce around the Laleh-e-zar fault. *Journal of Geotechnical Geology* 10(1), 1-14.
- Aghanabati, S.A., 2006. *Geology of Iran*, Geological Survey Organization of Iran Press, p. 603.
- Alavipanah, S.K., Saradjian, M., Saradjian, G.R., Komaki, C.B., Moghimi, E., Karimpour Reyhan, M., 2007. Land surface temperature in the Yardang Region of Lut Desert (Iran) based on field measurements and Landsat thermal data. *Journal of Agricultural Science and Technology (JAST)* 9, 287-303.
- Arai, K., Thome, K., Biggar, S.F., 2011. ASTER VNIR and SWIR Radiometric Calibration and Atmospheric Correction. *Land Remote Sensing and Global Environmental Change*, p. 83-116.
- Ashley, R.P., Abrams, M.J., 1980. Alteration mapping using multispectral images; Cuprite mining district, Esmeralda County, Nevada, p. 80-367.
- Becker, F., Li, Z.L., 1995. Surface temperature and emissivity at various scales: Definition, measurement and related problems, *Remote Sensing Reviews* 12, 225-253.
- Bernstein, L.S., Jin, X., Gregor, B., Adler-Golden, S.M., 2012. The Quick Atmospheric Correction (QUAC) Code: Algorithm Description and Recent Upgrades. *SPIE Optical Engineering* 51(11), 111719.

- Carvalho Júnior, O.A., Guimarães, R.F., Montgomery, D.R., Gillespie, A.R., Gomes, R.A.T., Souza Martins, E., Silva, N.C., 2013. Karst depression detection using ASTER, ALOS/PRISM and SRTM-derived digital elevation models in the Bambuí group, Brazil. *Remote Sensing* 6, 330–351.
- Charif, A., Malek, H.A., El Bchari, F., Theilen-Willige, B., Chaibi, M., Löwner, R., Ridaoui, M., Ougougdal, M.A., Nakhcha, C., 2013. Mapping Karstic Geohazards in the Safi Region, Morocco, by the Use of Landsat, Ikonos and RapidEye Images. In *Proceeding of 24th Geological Remote Sensing Group (GRSG) Annual Meeting—Status and Developments in Geological Remote Sensing*, Berlin, Germany, p. 9–11.
- Cudahy, T., Jones, M., Lisitsin, V., Caccetta, M., 2017. 3D mineral mapping of Queensland- Version 2 ASTER and related geoscience products, CSIRO Mineral Resources EP1767.
- Kerman Regional Water Company, 2016. First Geological Report of Water Transmit Tunnel.
- Glassley, W.E., 2010. *Geothermal energy: renewable energy and the environment*, CRC Press, Boca Raton.
- Guilbert, J.M., Park, C.F., 1997. *Deposits related to regional metamorphism in the geology of ore deposits*, New York, p. 837-854.
- Gupta, R.P., 2003. *Remote Sensing Geology*, Second Edition, Springer-Verlag, Berlin, p. 655.
- Haghighi Bardineh, S.N., Zarei Sahamieh, R., Zamanian, H., Ahmadi Khalaji, A., 2017. Mineralization, Geochemistry, Fluid inclusion and Stable Isotopes (O, S) studies in the Takht Fe-skarn Deposit, NE Hamedan. *Geosciences* 27, 107.
- Heasler, H., Jaworowski, C., Foley, D., 2009. Geothermal systems and monitoring hydrothermal features. In: Young R., Norby L., (ed) *Geological Monitoring*, Geological Society of America, pp. 14-105.
- Hecker, C.A., Smith, T.E.L., da Luz, B.R., Wooster, M.J., 2013. Thermal infrared spectroscopy in the laboratory and field in support of land surface remote sensing, C. Kuenzer, S. Dech (eds.), *Thermal Infrared Remote Sensing*, Springer, pp. 43-67.
- Hellman, M.J., Ramsey, M.S., 2004. Analysis of hot springs and associated deposits in Yellowstone National Park using ASTER and AVIRIS remote sensing. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 135, 195–219.
- Hunt, G.R., Salisbury, J.W., 1971. Visible and near infrared spectra of minerals and rocks: II. Carbonates *Modern Geology* 2, 23–30.
- Hunt, G.R., Ashley, R.P., 1979. Spectra of altered rocks in the visible and near infrared. *Economic Geology* 74 (7), 1613–1629.
- Joseph, G., 2003. *Fundamentals of Remote Sensing*, Universities Press, Hyderabad, p. 433.
- Koziol, A.M., 1999. Experimental determination of siderite (iron carbonate) stability under moderate pressure-temperature conditions, and application to Martian carbonate parageneses, LPI 1226.
- Kempe, S., 2009. Siderite weathering as a reaction causing hypogene speleogenesis: the example of the Iberg/Harz/Germany. In: A.B. Klimchouk, D.C. Ford (eds.) *Hypogene Speleogenesis and Karst Hydrogeology of Artesian Basins*, Ukrainian Institute of Speleology and Karstology, Special Paper 1, p. 59-60.
- Khademi, A., Bouzari, S., Shafiei, A., 2010. Morphotectonic Indices of Lalezar Fault in South of Bardsir. *Journal of Earth Science* 5(1), 103-110.
- Manghany, M., Hashim, M., Mansor, S., 2009. Geologic mapping of United Arab Emirates using multispectral remotely sensed data. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, p. 476-480.
- Massironi, M., Bertoldi, L., Calafa, P., Vison, D., Bistacchi, A., Giardino, C., Schiavo, A., 2008. Interpretation and processing of Aster data for geological mapping and granitoids detection in the Saghro massif (eastern Anti-Alts, Moroco). *Geosphere* 4, 736-759.
- McFeeters, S.K., 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing* 17, 1425–1432.
- Myneni, R.B., Hall, F.G., Sellers, P.J., Marshak, A.L. 1995. The Interpretation of Spectral Vegetation Indexes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 33, 481- 486.
- Oommen, T., 2008. An objective analysis of Support Vector Machine based classification for remote sensing. *Mathematical Geosciences* 40, 409–424.
- Rajesh, H.M., 2004. Application of remote sensing and GIS in mineral resource mapping-An overview. *Journal of mineralogical and Petrological Sciences* 99(3), 83-103.
- Stracher, G.B., Sokol, E.V., Prakash, A., 2014. *Coal and peat fires: a global perspective, case studies – coal fires*, Elsevier Publication.
- Theilen-Willige, B., Malek, H.A., Charif, A., El Bchari, F., Chaibi, M., 2014. Remote Sensing and GIS Contribution to the Investigation of Karst Landscapes in NW-Morocco. *Geosciences* 4, 50-72.

- USGS, 2019. Landsat & Aster data, available at <http://earthexplorer.usgs.gov>.
- Watson, F.G.R., Lockwood, R.E., Newman, W.B., Anderson, T.N., Garrott, R. A., 2008. Development and comparison of Landsat radiometric and snowpack model inversion techniques for estimating geothermal heat flux. *Remote Sensing of Environment* 112(2), 471–481.
- Xie, H., Luo, X., Pan, H.Y., Tong, X.H, 2016. Evaluation of Landsat8 OLI imagery for unsupervised inland water extraction. *International Journal of Remote Sensing* 37(8), 1826–1844.
- Xu, H., 2006. Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery. *International Journal of Remote Sensing* 27, 3025-3033.
- Zamani, M., 2015. Hydrogeochemical study of Laleh-e-Zar Groundwater – Kerman Province. MSc. Thesis, Kerman University.
- Zarei, S., Khosravi, H., Nasiri, A., Dastorani, M., 2016. Using Landsat Thematic Mapper (TM) sensor to detect change in land surface temperature in relation to land use change in Yazd, Iran. *Solid Earth* 7, 1551–1564.
- Zarrinkoub, M.H., Amini, S., Aftabi, A., Karimpour, M.H., 2005. Mineralogy-geochemistry-structural position and a genetic model for listvenite in east of Iran. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralography* 13, (2).

