

Detection of sub-surface spaces, using thermal infrared images in Shiramin region, Azarshahr, Iran

Nader Jalali^{1*}, Rahim Kazemi¹

1-Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Tehran, Iran

Keywords: Subsurface spaces, Thermal infrared image, Data integration, Shiramin

1-Introduction

Most of the geological features, like sinks and subsurface space, are taking place at soluble materials. Therefore in this study, the detection of such features is concentrated on carbonate rocks. Acidic spring activities formed travertine rocks in the Shiamin area (located on the west side of Lake Urumieh). These springs washed out carbonate minerals from Jurassic and Cretaceous rock formation and spread them over the plain downstream of Sahand volcanic mount. As a result of these activities, not only thick layers of travertine rocks were formed, but also unseen subsurface spaces were created in the bedrocks.

The existence of subsurface spaces and sinks make restrictions for site selection and construction of engineering structures. Although geophysics and drilling help engineers resolve these issues, these methods are very cost-effective and time-consuming. So, low prices and severe methods should be considered as well for subsurface studies first. Consequently, an attempt was made to develop a simple method for mapping subsurface spaces using thermal infrared images.

Heat transfer is one of the crucial characteristics of rock masses, making a favorite condition for heat or coldness to flow. The existence of water bodies in liquid or vapor or air in fracturing systems and spaces inside the rock masses promotes heat or coldness transfers. This physical behavior of rocks causes thermal anomalies above the source of such energy at the land surface within different seasons (Astier, 1974). According to Astier, 1974, air temperature influences land surface material and may penetrate 40 meters in soil and rocks, which implies that if a source of energy exists at about 40 meters below the ground surface, it may influence land surface temperature in some conditions. As a belief, these thermal anomalies can be detected and enhanced by thermal sensors of satellites.

Rinker (1975) has used a thermal infrared scanner for studying the Greenland glacier and Portorico karst region to detect subsurface caves and fractures. He concluded that if the temperature between caves and free space be significantly different, satisfactory results will be obtained. Quatrochi (2004) has an optimistic evaluation of applying ETM⁺ images for representing land and water bodies temperature. Campbell et al. (1996) has mapped out caves and springs in a watershed by using a high resolution and high sensitive thermal infrared camera. Abdel-Hady et al. (1970) believe that applying a thermal infrared band of spectrum is under progress and can be applied to detect subsurface phenomena. Coolbaugh (2007) used thermal bands of ASTER images to map hot spring in the Nevada geothermal region by reducing the topography and sunlight effects. Cracknell et al. (1997) have optimistically evaluated the application of the thermal band of TM image in detecting the buried coal fires and allocating their geographic locations. Based on considering the literature review on the application of thermal infrared images to identify thermal anomalies, the conclusion is drawn that in most cases, the knowledge is transferred to technology and new methodologies are still under development.

2-Methodology

Land surface temperature is varying between -50 to +50 Celsius. So based on Vein displacement law, the most convenient detector for enhancing relevant emitted energy to this range of temperature is a detector that records energy through the thermal band of the electromagnetic spectrum (8 to 14 micrometer). Some high-resolution sensors (like TM, ETM⁺, and ASTER) were mounted on some satellites that provide proper thermal infrared

*Corresponding author: jalali_n@yahoo.com

DOI: 10.22055/aag.2019.28880.1955

Received 2019-03-12

Accepted 2019-12-04

images despite some digital cameras and scanners. The ETM⁺ image acquired in summer 2002 and 5 other thermal bands of ASTER images were used in this study. Moreover, SRTM data and its derivatives like slope and aspect maps, satellite-derived NDVI image, a geological map of the Azarshahr area at scale 1:100000, and geotechnical data reports were prepared and used.

The difference in rocks and subsurface sources of energy (like water bodies) reaches the highest level in winter nights and summer days. Therefore both images that were acquired in cold nights and hot days depend on their availability to identify thermal anomalies. Ideally, it is recommended to convert thermal infrared images to land surface temperature (LST) and work on LST (Sobrino et al., 2004). Unfortunately, there is insufficient data on the emissivity of land components available to produce precise LST maps. Therefore two possibilities like brightness temperature (T_b) or DN values of the thermal band itself remains to use. Since T_b image and DN values of the thermal band are fully correlated, and thermal image owns high variance. Therefore DN values of the thermal infrared image are used in this study.

According to the authors' experiences, searching based on the following criteria (base rules) will lead to identifying potential areas hosting subsurface spaces in carbonate rocks.

- Search limits to the boundary of carbonate rocks or other soluble materials.
- Search limits to altitudes less than the altitude of the highest point or height of the highest none-cold pixel within carbonate rocks.
- Mean value -1 standard deviation of ETM⁺ thermal infrared image is assumed as cold and relatively cold areas.
- Search should take place within the shadow and sunlight aspects, separately.
- Rainfall data should be checked and be ensured that there has not been any rain at least ten days before satellite image acquisition for avoiding antecedent soil moisture.
- Values between -0.05 to +0.05 of NDVI image are assumed as areas that have no vegetation. This criterion is considered to avoid the influence of vegetation cover on lowering the land surface temperature.

As a point, the land surface temperature is being influenced by subsurface temperature. By the time the general conditions of the land surface in carbonate rocks to be the same in terms of vegetation cover, antecedent soil moisture, illumination, and altitude, any variations of temperature in land surface can be attributed to the physical and hydrogeological properties of these formations. Accuracy of the obtained results was then assessed by field survey, historical geology of the area, borehole data, and ASTER sensor's thermal images.

3- Results and discussion

Data analysis provides a map showing the spatial distribution of potentials for unseen subsurface spaces. In other words, spatial data integration based on the rule, as mentioned earlier, bases on prepared data layers in a GIS domain, delivered a map presenting the areas hosting subsurface and unseen spaces, as it is shown in figure 1.

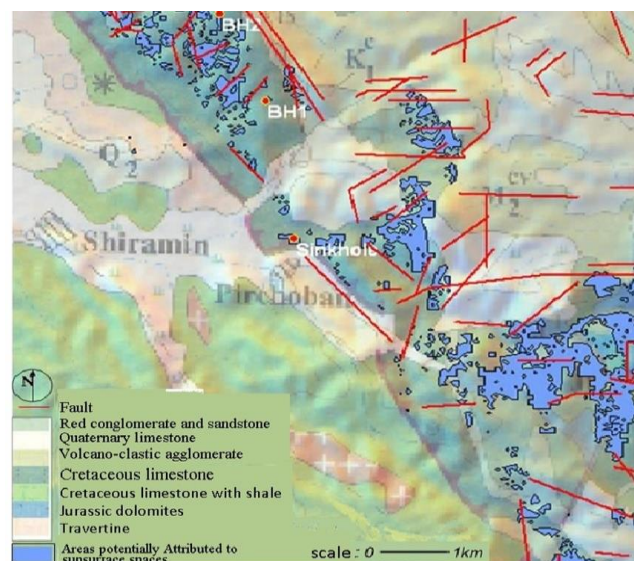


Fig. 1. Spatial distribution of areas hosting subsurface spaces in Shiramin area (blue patches).

Investigations showed that some parts of carbonate rocks in the Shiramin region (west of Lake Urumieh) that are hosting subsurface spaces have relatively appeared cooler than the others on thermal images. Accuracy of the result is verified by data obtained by boreholes and field geological knowledge. Cross-sections across the geological lineament indicate a local and regional decrease in land surface temperature around these lineaments. Since the roles of various parameters on influencing land surface temperature are considered by applying logical base rules, any reduction of thermal image values could be attributed to the land surface as a function of carbonate rocks' inherent condition.

4-Conclusions

Evaluation of thermal infrared images' capabilities on enhancing subsurface spaces was the main objective of this study. Excluding the effects of various environmental factors on lowering land surface temperature endorsed some parts of carbonate rocks that are influenced by subsurface spaces' inherent condition to be identified. Consequently, the hypothesis that "subsurface spaces due to their air or water content are influencing land surface temperature and related thermal anomalies can be detected by thermal remote sensing" is being approved. The introduced approach to enhancing thermal anomalies related to inherent hydrogeological and thermal conditions of carbonate rocks might be considered a rapid and economical method to apply before using cost-effective geophysical and drilling methods for such explorations.

Acknowledgments

This research was supported by the grant of the vice-chancellor's office for research and technology, the University of Zanjan. We acknowledge their support. The journal of Advanced Applied Geology reviewers and editors are also thanked for their constructive suggestions which greatly contributed to the improvement of manuscript.

References

- Abdel-Hady, M., Abdel-Hafez, M.A., Harlan H., Karbs, 1970. Subsurface drainage mapping by airborne infrared imagery techniques. Department of Civil Engineering, Oklahoma State University, Stillwater, Oklahoma. Digital library, Okstate, 10-17.
- Astier, 1974. Application of geophysics to groundwater exploration (Geophysique appliqué Al' Hydrogeologie, 120 Bd Saint-Germain, Paris), Chapter 7, 201-208.
- Coolbaugh, M.F.C., Kratt, A., Fallacaro, W.M., Calvin, J.V., Taranik, 2007. Detection of geothermal anomalies using Advanced Space-borne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) thermal infrared images at Bradys Hot Springs, Great Basin Center for Geothermal Energy and the Arthur Brant Laboratory for Exploration Geophysics, University of Nevada, Reno, 89557 USA. Remote Sensing of Environment 106, 350-359.
- Cracknell, A.P., Mansor, S.B., 1997. Detection of sub-surface coal fires using Landsat TM data. Department of Applied Physics and Electronic and Manufacturing Engineering University of Dundee, Dundee DDI 4HN, Scotland, U.K. ISPRS Commission VII, 80-84.
- Dale, A., Quattrochi, 2004. Thermal Remote Sensing, Johan Wiley Publication.
- Sobrinho, J.A., Jimenez-Munoz, J.C., Paoliniba, L., 2004. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. Remote Sensing of Environment 90, 434-440.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Jalali, N., Kazemi, R., 2020. Detection of sub-surface spaces, using thermal infrared images in Shiramin region, Azarshahr, Iran. Adv. Appl. Geol. 10(3), 370-381.

DOI: 10.22055/AAG.2019.28880.1955

url: https://aag.scu.ac.ir/article_15346.html?lang=en

شناسایی فضاهای زیرسطحی در منطقه شیرامین آذرشهر با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای فرسوخ گرمایی

نادر جلالی

پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران، ایران

رحیم کاظمی

پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۱۳

*Jalali_n@yahoo.com

چکیده

فروافتادگی‌ها، از نگرانی‌های مهندسی در جانمایی سازه‌ها می‌باشند. بدیهی است که ژئوفیزیک و حفاری‌ها می‌توانند در این راستا کمک نمایند، لیکن گاهی گستردگی مناطق و هزینه‌های زیاد مانع از بررسی‌ها می‌شود. در این مطالعه سعی شده تا قابلیت‌های سنجش از دور گرمایی در شناسایی فضاهای زیرسطحی در منطقه شیرامین که وجود آن‌ها در این منطقه به اثبات رسیده است، محک زده شود. برای دستیابی به این هدف، از تصاویر فرسوخ گرمایی سنجنده‌های ETM⁺ و ASTER، مدل ارتفاع رقومی و مشتقات آن و همچنین سایر داده‌های محیطی موثر در کاهش دمای سطح زمین استفاده شده است. نرم افزار پردازش تصاویر ماهواره‌ای، مدیریت داده‌ها، تلفیق اطلاعات مکانی و مدل‌سازی، ILWIS محصول موسسه ITC هلند بوده است.

مدل‌سازی رابطه‌ای بر اساس تلفیق لایه‌های اطلاعاتی مرتبط با موضوع، بر مبنای به‌کارگیری معیارهای تصمیم‌گیری، به شناسایی آنومالی‌های گرمایی مرتبط با شرایط ذاتی سنگ‌های کربناته و در نتیجه تهیه نقشه پراکنش مکانی مناطق دارای فضاهای زیرسطحی در منطقه شیرامین آذرشهر، انجامیده است. صحت نتایج را مشاهدات میدانی، لاگ چاه‌های اکتشافی و تاریخ زمین‌شناسی منطقه، تأیید می‌کنند. در نتیجه به‌کارگیری توأم تصاویر فرسوخ گرمایی و داده‌های محیطی و تلفیق منطقی آن‌ها می‌تواند در شناسایی مناطقی که در آنها فضاهای زیرسطحی وجود دارند، مؤثر واقع شود.

کلمات کلیدی: فضاهای زیرسطحی، شیرامین، تصاویر فرسوخ گرمایی، مدل‌سازی

مقدمه

وجود فضاهای زیرزمینی کم‌عمق، همواره محدودیت‌ها و موانعی را در اجرای طرح‌های عمرانی نظیر سدها، راه‌ها و ابنیه به وجود می‌آورد. مشکلاتی که در منطقه سد لار در اثر پدیده انحلال در سازندهای کربناته رخ داده، نمونه بارزی از این موارد است که حتی در مطالعات صورت گرفته نیز، این فضاهای خالی مورد شناسایی کامل قرار نگرفته‌اند. مثال دیگر، فرو افتادگی - های منطقه پلدشت واقع در استان آذربایجان غربی است که لایه ضخیمی از بازالت بر روی آبرفت‌های قدیمی قرار گرفته و در اثر آب شستگی در امتداد مسیر قدیمی جریان آب در این آبرفت‌ها، فضاهای زیرسطحی طولی گسترده - ای به وجود آمده که سنگینی بار بارالت‌ها را تحمل نکرده و قطعات و بلوک - های بازالت به داخل این فضاها سقوط کرده‌اند. زمین‌شناسان معمولاً در بررسی‌های میدانی به موارد زیادی از فروچال‌ها و فروافتادگی‌ها برخورد می‌کنند که در واقع در محل فضاهای زیرسطحی موجود به وقوع پیوسته‌اند. البته ایده‌آل این است که قبل از وقوع این نوع حوادث، پتانسیل‌ها و مناطق دارای این استعداد شناسایی و تمهیدات لازم به کار گرفته شود. بنابراین، شناخت روش‌های سریع، ارزان و علمی معتبر برای شناسایی اینگونه فضاهای زیرسطحی که معمولاً با آب و یا هوای مرطوب پر شده‌اند می‌تواند تحول زیادی را در موضوع زمین‌شناسی زیرسطحی سبب شود. بدیهی است در صورت تبیین این روش‌ها، امکان استفاده از آنها در شناسایی گسل‌هایی که آثار آنها در سطح زمین قابل ردیابی نباشند و همچنین مواردی نظیر مطالعه - ی آنومالی‌های حرارتی مرتبط با ژئوترمال‌ها، فراهم می‌آید.

انتقال دادن گرما و سرما یکی از ویژگی‌های مهم توده‌های سنگی است. این قابلیت سنگ‌ها سبب می‌شود تا سرما و یا گرما در توده‌های سنگ جاری شود مشروط به اینکه منبعی از آن‌ها در زیر زمین وجود داشته باشد. وجود آب در درز و شکاف سنگ‌ها و دالان‌های انحلالی در سنگ‌های آهکی به شکل‌گیری فرآیند انتقال کمک می‌کند (Astier, 1974). این رفتار توده - های سنگی سبب می‌شود تا دمای سطح زمین در فراز مناطق نزدیک به فضاهای زیرزمینی و پیکره‌های آب، تحت تأثیر این شرایط قرار گیرد. علاوه بر این، اختلاف دمای هوای درون فضاهای زیرسطحی و هوای آزاد در فصول مختلف و انتقال دمای هوا از این فضاها به سطح زمین از طریق درزها و شکاف‌های سنگ‌ها و انتقال از طریق توده سنگ می‌تواند در تغییر دمای سطح زمین بر فراز فضاهای زیرسطحی واقع در عمق کم، تأثیرگذار باشد. طبق نظریه (Astier, 1974)، تابش نور خورشید باعث گرم شدن خاک و سنگ موجود در سطح زمین می‌شود و این امر سبب تغییرات دمای سطح در فصول مختلف و در طول سال می‌گردد و ممکن است این تغییرات تا عمق ۴۰ متر از سطح زمین تأثیرگذار باشد. از این مطالب نتیجه گرفته می‌شود همانطور که دمای سطح زمین تا این اعماق جاری و منتقل می‌شود، دمای پدیده‌های سرد و یا گرم موجود در این اعماق نیز می‌تواند به سطح زمین منتقل و آن را تحت تأثیر قرار دهد مشروط بر اینکه دمای منابع آب موجود در فضاهای زیرسطحی و یا هوای درون آنها با دمای بیرون و فضای آزاد متفاوت و این اختلاف در سطح زمین تأثیرگذار باشد.

هدایت گرمایی سنگ‌ها، معمولاً مشابه هم است و بطور جزئی نسبت به هم تغییر می‌کنند مگر اینکه خلل و فرج و درز و شکاف‌های موجود در

عوارض زیرسطحی، حفره‌ها و دالان‌های زیرزمینی و پیکره‌های مرطوب به تله افتاده در دامنه‌های طبیعی می‌توانند به روش دورسنجی گرمایی اکتشاف شوند. روش تصویربرداری تشخیص سه بعدی اشیاء زیرزمینی توخالی (فضاهای زیرسطحی) تا عمق ۲۰ برابر قطر آنها، توسط (Del, 2007) Grande، در ایالت متحده ثبت و منتشر شده است. در این روش اثر تغییرات دمای روزانه و فصلی و اینرسی گرمایی مواد در برگیرنده در نظر گرفته می‌شود. Coolbaugh (۲۰۰۷) نیز با استفاده از تصاویر سنجنده ASTER، دمای چشمه‌های آب گرم مرتبط به آب‌های ژئوترمال در منطقه نوادا را با هدف مشخص نمودن نقش آب‌های گرم زیرزمینی در دمای سطح زمین، مشخص کرد. در این عملیات تأثیر گرمای خورشید و نقش ناهمواری‌ها مورد توجه قرار گرفته و تأثیر آنها به حداقل رسانده شده است. Cracknell و همکاران (۱۹۹۷) قابلیت تصاویر لندست و باندهای فرسرخ سنجنده TM را در تشخیص زغال‌سنگ‌های دچار آتش‌سوزی شده در زیر سطح زمین، ارزیابی کرده و موقعیت آنها را با توجه به آنومالی‌های حرارتی، با موفقیت شناسایی کردند. توجه به نمونه‌های ذکر شده از کاربردهای دورسنجی گرمایی، نشان از توجه خاص به این دانش دارد و نشان می‌دهد که در مواردی این علم به فن‌آوری تبدیل شده و ابزارهای خاص سنجش انرژی فرسرخ گرمایی تولید شده‌اند. بنابراین هدف اصلی این تحقیق، ارزیابی قابلیت‌های سنجش از دور گرمایی در شناسایی فضاهای زیرسطحی و معرفی روش مبتنی بر دانش دورسنجی گرمایی، به کارگیری داده‌های محیطی و معیارهای تصمیم‌گیری برای مدل‌سازی برای این موضوع، تعیین شده است.

زمین‌شناسی منطقه‌ی مورد مطالعه

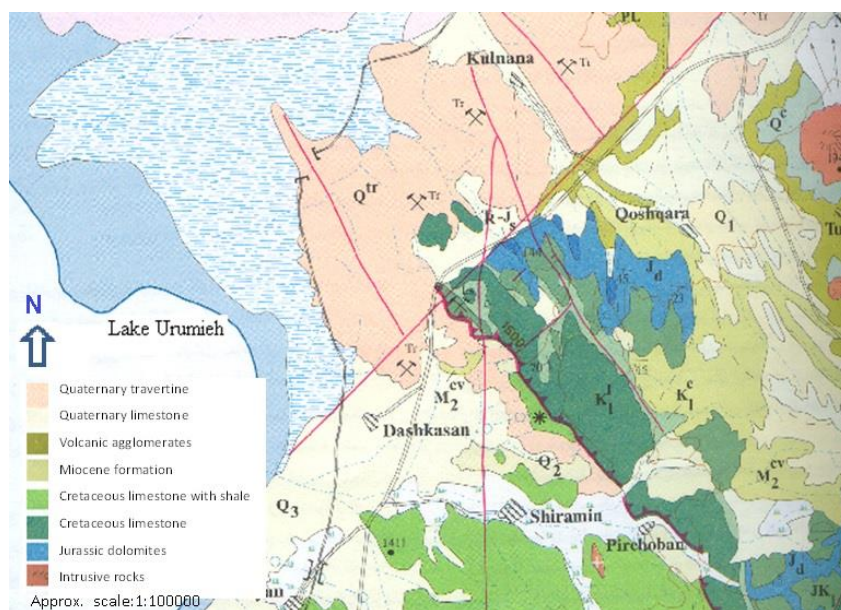
این منطقه در شرق دریاچه ارومیه و شمال کوه سهند واقع شده است. نفوذ و حرکت آب‌های زیرزمینی اسیدی (آب‌های ژئوتیل و رادوز) مرتبط با آتشفشان سهند در سازندهای کربناته ژوراسیک، به‌ویژه در طول شکستگی‌های گسلی و انحلال آنها سبب انتقال بیکرنات‌ها و راه یافتن آنها به سطح زمین، توسط چشمه‌های آهک‌ساز شده است. تراورتن‌های معروف منطقه آذرشهر با وسعت ۵۶ کیلومتر مربع و با ضخامت متوسط تقریبی ۱۰ متر، نهشته‌هایی هستند که با این ساز و کار تشکیل شده‌اند. این نظریه در مورد تشکیل نهشته‌های تراورتن، سبب شده است تا سازمان زمین‌شناسی و تحقیقات معدنی کشور موضوع وجود غارهای زیرسطحی در سازندهای کربناته منطقه با حجم معادل نهشته‌های کواترنری را محتمل بدانند. بررسی‌های تکمیلی به‌منظور شناسایی غارها در منطقه با عملیات ژئوالکتریک و حفر گمانه‌های اکتشافی توسط Mohammadi و همکاران (۲۰۰۵) صورت گرفته و وجود حفره‌های کوچک و بزرگ فراوان و فضاهای انحلالی (غار) و منابع آب در این سازندها تأیید شده است (Qadirzade, 2005 and 2006). بنابراین با علم به اینکه فضاهای زیرسطحی در این منطقه شکل گرفته‌اند و این فضاها در اعماق بیش از ۲۵ متری و به طول حداقل ۱۵۰۰ متری واقع شده، این منطقه را به عنوان یکی از مناطقی که برای بررسی کاربرد تصاویر ماهواره‌ای فرسرخ گرمایی، مناسب است، مطرح می‌کند. همانطور که در شکل ۱ نمایش داده شده است تراورتن‌های آذرشهر و سنگ‌های آهکی انحلال‌پذیر کرتاسه در منطقه شیرامین گسترش دارند.

سنگ‌ها از آب اشباع گردد که این امر سبب افزایش قابلیت هدایت گرمایی و سرمایشی در این محیط‌ها می‌شود. زمین‌های رسی و آهکی به‌ترتیب دارای کمترین و بیشترین قابلیت هدایت گرمایی هستند. قابلیت هدایت گرمایی خاک‌های رسی و ماسه‌ای ۰/۰۰۲ تا ۰/۰۰۳ و سنگ‌های کربناته و گرانیت ۰/۰۰۵ تا ۰/۰۰۸ cal/cm/sec می‌باشند (Astier, 1974). از این مطلب چنین نتیجه‌گیری می‌شود که گرما و یا سرما در سنگ‌های آهکی نسبت به زمین‌های رسی و ماسه‌ای سریع‌تر منتقل می‌شود.

در اثر پدیده انحلال در سنگ‌های کربناته، سازندهای گچی و نمکی، شسته شدن مواد ریزدانه از میان آبرفت‌ها (Piping) و نیروهای تکتونیکی، ممکن است فضاهای ثانویه زیرسطحی در سازندهای زمین‌شناسی به وجود آیند. این فضاها ممکن است در عمق زیادی قرار گرفته باشند و یا اینکه در نزدیک به سطح زمین ایجاد شوند. غارها معمولاً از اشکال کارستی هستند که در واقع به یک تونل و یا راهرو زیرزمینی شباهت دارند که به صورت افقی و یا با مجرای با شیب ملایم ممکن است به سطح زمین راه داشته باشند (Qobadi, 2007). بخشی از این فضاهای زیرسطحی از آب و بخشی نیز توسط هوا اشغال می‌شوند. البته ممکن است تمام این فضاها از هوا پر شده باشند. در هر حال، دمای هوای داخل این فضاها در فصول سرد و گرم با دمای هوای آزاد تفاوت زیادی دارد. اختلاف دمای عوارض و پدیده‌های سطح زمین و نزدیک به سطح زمین، همواره مورد توجه محققین بوده و اکتشافات زیادی با استفاده از تصاویر فرسرخ گرمایی، صورت گرفته است. تحقیقات به عمل آمده در طی دو دهه گذشته نشان داده که داده‌های فرسرخ گرمایی دارای کاربردهای قابل‌توجهی هستند. لیکن بنا به دلایلی فقط در موارد کمی، روش‌های تهیه نقشه دمای سطح زمین، مورد استفاده قرار گرفته است. به‌ر حال انتظار می‌رود به لحاظ توسعه‌های اخیر در سنجنده‌ها و ماهواره‌ها و درک بهتر از پدیده‌های سطح زمین، این روش‌ها به‌طور وسیع توسعه یافته و استفاده شوند.

Quattrochi (۲۰۰۴) تصاویر دریافت شده توسط سنجنده ETM⁺ را با توجه به قابلیت این نوع تصاویر و توان این سنجنده در به نمایش گذاشتن تغییرات نسبی دمای سطح آب و خشکی برای بررسی دمای پدیده‌ها، با ذکر نمونه‌هایی از تشخیص سنگ‌های تیره بازالت از زون آلتراسیون و همچنین تفکیک نواحی گرم از نواحی سرد در پیکره‌های آبی، مهم ارزیابی می‌کند. Milanovic (۱۹۷۹) به نقل از (Rinker, 1975)، استفاده از یک اسکرن فرسرخ گرمایی برای بررسی یخچال گرینلند و منطقه‌ی کارستی پورتوریکو به منظور شناسایی شکستگی‌ها و غارهای زیرسطحی را تشریح کرده است. نامبرده چنین نتیجه گرفته که این روش در شرایط خاصی نتایج مطلوب در اختیار می‌گذارد. شرط خاص این است که دمای محیط غارهای زیرسطحی با دمای بیرون و فضای آزاد متفاوت و این اختلاف در سطح زمین تأثیرگذار باشد.

Campbell و همکاران (۱۹۹۶) از یک دوربین فرسرخ گرمایی هوایی برای شناسایی چشمه‌ها و غارهای یک حوضه‌ی آبخیز کارستی استفاده نمود. این دوربین مجهز به یک آشکارگر فرسرخ گرمایی با حساسیت حدود ۰/۱ درجه‌ی سانتیگراد و تصویربرداری با توان تفکیک مکانی کمتر از ۱ متر بوده است. Abdel-Hady و همکاران (۱۹۷۰)، باند فرسرخ گرمایی را یکی از بخش‌های مهم طیف الکترومغناطیس با اهداف کاربردهای مهندسی دانسته و کاربردهای آن را به دلایل اقتصادی رو به افزایش می‌دانند. به عقیده‌ی آنان، پدیده‌های زیرزمینی که طراحی و اجرای سازه‌های مهندسی را تحت تأثیر قرار می‌دهد، با ابزار سنجش از دور حرارتی قابل شناسایی هستند. موقعیت



شکل ۱- نقشه زمین شناسی منطقه شیرامین.

Fig. 1. Regional geological map of Shiramin area.

روش کار

این روش‌ها در منابع مختلف ذکر شده و از جمله توسط EbrahimiHeravi و همکاران (۲۰۱۶) مقایسه شده‌اند و مناسب‌ترین آنها معرفی شده است. اکثر این روش‌ها، از داده‌های پوشش گیاهی و کاربری اراضی برای تخمین مقدار گسیلمندی (Emissivity)، استفاده می‌کنند. با توجه به اینکه در روش به کار رفته در این تحقیق، جستجو به مناطق بدون پوشش گیاهی محدود شده است و پارامتر گسیلمندی مواد تشکیل‌دهنده منطقه که مورد نیاز برای محاسبه دمای سطح زمین می‌باشد مشخص نیست، به ناچار بایستی دمای درخشندگی (Tb) و یا تصویر اصلی باند فروسرخ گرمایی آنپور که Sobrino و همکاران (۲۰۰۴) پیشنهاد کرده‌اند، مورد استفاده قرار گیرند.

برای محاسبه دمای درخشندگی، ابتدا باید تصویر فروسرخ گرمایی به رادیانس تبدیل شود. در واقع پس از استفاده از عکس قانون پلانک (برای تبدیل رادیانس به دمای درخشندگی) لازم است دمای درخشندگی به دمای واقعی تبدیل شود. برای تبدیل تصویر فروسرخ گرمایی (در اینجا باند ۶ ماهوره لندست ۷) از رابطه ۱ و برای تبدیل تصویر رادیانس به دمای درخشندگی از رابطه ۲) استفاده شده است.

$$Cv_r = G(DN_Band6) + B \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$Tb = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{Cv_r} + 1\right)} \quad (\text{رابطه ۲})$$

در حالیکه:

Tb، دمایدرخشندگی، K1 و K2 اعداد ثابت کالیبراسیون برای باند ۶ سنجنده ETM⁺ و CVr (رادیانس) محاسبه شده از رابطه خطی فوق می‌باشد که در آن B (Bias) و G (Gain) به ترتیب دو عدد و ضریب

دمای سطح زمین تقریباً بین ۵۰- تا ۵۰+ درجه سانتیگراد تغییر می‌کند، بنابراین به استناد قانون جابجایی وین، مناسب‌ترین آشکارگر (Detector) آنست که بتواند انرژی طیف فروسرخ با طول موج بین ۸ تا ۱۴ میکرومتر را ثبت نماید (Jahedi et al., 1995). برای این آستانه از دما، مواد در این طول موج‌ها، انرژی بیشتری را نسبت به هر طول موج دیگر ساطع می‌کنند. سنجنده ETM⁺، یک تصویر که ویژگی‌های گرمایی عوارض و پدیده‌های سطح زمین را در بر دارد با توان تفکیک مکانی ۶۰ متر نیز در اختیار می‌گذارد. در حال حاضر این نوع تصویر، با توجه به توان تفکیک مکانی یکی از مناسب‌ترین تصاویر فروسرخ گرمایی برای بررسی تغییرات گرمایی در سطح زمین می‌باشد. در این بررسی‌ها از تصویر ماهواره‌ای سنجنده ETM⁺ تابستان سال ۲۰۰۲ میلادی استفاده شده است. علاوه بر این تصویر (باند ۶)، از مدل ارتفاعی رقومی به دست آمده از سنجنده رادار (SRTM) و از مشتقات آن، نظیر جهت شیب و همچنین شاخص گیاهی (NDVI)، نقشه‌ی زمین‌شناسی در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ آذرشهر بهره گرفته شده است.

اختلاف دمای سازندها در دو حالت شب و در فصل زمستان و روز و در فصل تابستان، به بیشترین مقدار خود می‌رسد. بنابراین هر دو تصویر دریافت شده در طول روز - فصل تابستان و طول شب- فصل زمستان در مناطقی که دارای فصول متمایز هستند می‌توانند در تشخیص عوارض و پدیده‌هایی که اختلاف دمای زیادی نسبت به هم دارند، مورد استفاده قرار گیرند. بدیهی است در انتخاب تصویر، زمان شب و یا روز، در دسترس بودن تصاویر، نوع سنجنده، نوع عارضه و یا پدیده و عرض جغرافیایی مؤثر هستند. ایده‌آل این است که به جای تصویر فروسرخ گرمایی از نقشه‌ی دمای سطح زمین (Land Surface Temperature) (LST)، استفاده شود. برای تهیه نقشه دمای سطح زمین، روش‌های متعددی وجود دارد و

با تلفیق لایه‌های اطلاعات آماده شده و به کارگیری و تعمیم معیارهای معرفی شده، مدل‌سازی رابطه‌ای در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی با هدف به نقشه درآوردن موقعیت فضاهای زیرسطحی در سنگ‌های کربناته منطقه شیرامین آذرشهر به اجرا در می‌آید. برای ارزیابی صحت نتایج به دست آمده، از مشاهدات میدانی و اطلاعات لاگ‌های چاه‌های اکتشافی و همچنین تصاویر فرورسرخ گرمایی سنجنده ASTER استفاده شده است. این تصاویر در ۵ باند طیفی منفصل در محدوده ۸/۱۲۵ تا ۱۱/۶۵ میکرومتر دریافت می‌شوند.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

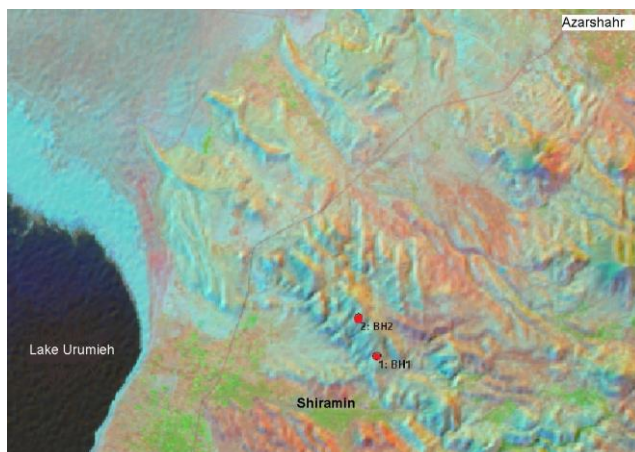
عوامل متعددی نظیر پوشش گیاهی، بارندگی، آبیاری، ارتفاع، جهت شیب، پارامترهای فیزیکی نظیر ثابت دی‌الکتریک و لیتوتوژی ممکن است در کنار ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی و ترمودینامیکی سازندهای زمین-شناسی در تغییر کاهش دمای سطح زمین مؤثر باشند. با توجه به اینکه دمای نزدیک به سطح زمین تابعی از برآیند تأثیر پارامترهای متعدد می‌باشد بنابراین زمانی که شرایط عمومی مناطق تشکیل شده از سازندهای زمین‌شناسی (در این تحقیق سنگ‌های کربناته) از نظر پوشش گیاهی، وضعیت و میزان بارندگی، دامنه‌های رو به خورشید و قرار گرفتن در سایه و ارتفاع، یکسان باشند می‌توان اختلاف دمای اینگونه سازندها را به ویژگی‌های ذاتی این سازندها نسبت داد. آنچه که محرز است دمای پدیده‌های گرم و یا سرد زیرسطحی به دو صورت هدایت گرمایی از طریق توده‌های سنگی و انتقال از طریق درز و شکافها و دالان‌های طبیعی جریان می‌یابد. اگرچه عوامل یاد شده می‌توانند سبب تغییر دمای سطح زمین گردند لیکن شرایط ذاتی و فیزیکی سازندها نیز در بروز آنومالی‌های گرمایی نقش ایفاء می‌کنند. تصویر ترکیب رنگی RGB 642 همانطور که در شکل ۲، نشان داده شده است به دلیل مشارکت تصویر فرورسرخ گرمایی و تصاویر باندهای انعکاسی در تولید آن، علاوه بر انعکاس اطلاعات مکانی، اطلاعات طیفی گرمایی مشهودی را در رابطه با دمای نسبی سطح زمین در معرض نمایش قرار می‌دهد. در ترکیب رنگی باندهای RGB 642، واحدهای سنگی با سردی نسبی، به رنگ آبی فیروزه‌ای ظاهر شده‌اند در حالی که مناطق گرم‌تر به رنگ‌های قرمز و نارنجی دیده می‌شوند.

ثابت برای تصویر باند ۶ سنجنده‌ی مذکور و DN_Band 6 نیز مقادیر رقمی این تصویر هستند.

کمیت این ضرایب و اعداد کالیبراسیون از پارامترهای آماری و متادیتای تصاویر و فایل مرجع سنجنده و ماهواره، قابل برداشت می‌باشند. به عنوان مثال کمیت K1 و K2 برای باند ۶ ماهواره لندست ۷، به ترتیب ۶۶۶/۰۹ وات ساعت بر مترمربع در استرادیان و ۱۲۸۲/۷۱ درجه کلونین می‌باشند. بررسی‌های به عمل آمده نشان می‌دهد که دمای درخشندگی (Tb) با مقادیر رقمی تصویر باند ۶ سنجنده ETM^+ ، ۱۰۰٪ همبستگی دارد و واریانس مقادیر باند ۶ بیشتر از تصویر Tb است. در نتیجه، در این بررسی‌ها از تصویر باند ۶، به عنوان تصویری که انرژی تابشی و به عبارت دیگر ویژگی‌های گرمایی نسبی سطح زمین را منعکس می‌کند استفاده شده است.

بر اساس تجربیات مولفین، جستجو با معیارهای منطقی زیر می‌تواند به شناسایی فضاهای زیرسطحی در محدوده سنگ‌های کربناته و انحلال‌پذیر بیانجامد.

- برای پرهیز از تأثیر رطوبت پیشین خاک، باید آمار بارش‌ها کنترل شده و اطمینان حاصل شود که دست کم تا ۱۰ روز قبل از زمان تصویربرداری، بارندگی رخ نداده است.
- جستجو در محدوده‌ی سنگ‌های کربناته و انحلال‌پذیر انجام شود.
- جستجو در مناطق با ارتفاع کمتر از ارتفاع مرتفع‌ترین پیکسل و یا ارتفاع نقطه‌ی غیر سرد در محدوده‌ی سنگ‌های کربناته و دیگر سنگ‌های انحلال‌پذیر صورت گیرد.
- مقادیر کمتر از میانگین منهای یک برابر مقدار انحراف معیار تصویر فرورسرخ گرمایی، به عنوان معیاری برای شناسایی مناطق سرد و نسبتاً سرد در نظر گرفته شود.
- جستجو در دامنه‌های در معرض تابش نور خورشید و سایه بطور جداگانه انجام پذیرد. توضیح اینکه با توجه به ساعت و تاریخ تصویربرداری در نیمکره شمالی، دامنه‌های شمال‌شرقی، شرقی و جنوب‌شرقی و تا حدی دامنه‌های جنوبی دامنه‌های رو به آفتاب محسوب می‌شوند.
- به منظور اجتناب از تأثیر گیاه در کاهش دمای سطح زمین، مقادیر بین ۰/۰۵- تا ۰/۰۵+ شاخص گیاهی به عنوان یک معیار برای اجتناب از تأثیر پوشش گیاهی در کاهش دمای سطح زمین در نظر گرفته شود.



شکل ۲- تصویر ترکیب رنگی کاذب RGB 642 سنجنده ETM^+ منطقه شیرامین.

Fig. 2. False color composite image of ETM^+ bands, RGB 6, 4 and 2 for Shiramin area.

دمای سطح زمین، دامنه‌هایی که رو به خورشید هستند و دامنه‌هایی که در سایه قرار دارند بطور جداگانه مورد بررسی قرار گرفته و پارمترهای آنها محاسبه شد. قرار گرفتن دامنه‌ها در منطقه سایه باعث کاهش دمای سطح زمین در آن مناطق می‌شود. بنابراین برای لحاظ این موضوع و انجام آنالیزهای مستقل و جداگانه در مناطق سایه و غیر سایه، لازم است این مناطق در زمان و تاریخ تصویربرداری مورد شناسایی قرار گیرند. این مهم با مراجعه به متادیتای تصاویر، مانند ارتفاع خورشید در زمان تصویربرداری و وضعیت ناهمواری‌ها و دامنه‌های منطقه و با استفاده از این اطلاعات قابل انجام است. بنابراین با استفاده از نقشه شیب و وجه دامنه و آگاهی از ارتفاع خورشید در زمان تصویربرداری توسط ماهواره لندست، نقشه مناطق سایه و در دامنه‌های آفتاب‌گیر در لحظه تصویربرداری به نقشه در آمده‌اند.

با توجه به اینکه دما با ارتفاع رابطه‌ی معکوس دارد، سعی گردید تا بررسی‌ها در حد امکان در یک بازه‌ی مناسب ارتفاعی صورت پذیرد. در این رابطه بیشترین ارتفاع مربوط به واحدهای سنگی کربناته که سرد نیستند به عنوان ارتفاع حداکثر در نظر گرفته شد و مناطق با ارتفاع کمتر از آن، با هدف شناسایی مناطق دارای فضاهای زیرسطحی، مورد جستجو قرار گرفتند. انتظار بر این است که پیکسل‌های با ارتفاع کمتر از این آستانه‌ی دمای تعیین شده، از دمای نسبی بیشتری برخوردار باشند. بنابراین، کاهش دما در این پیکسل‌ها می‌تواند به‌عنوان یک ناهنجاری، مورد توجه قرار گیرد. چنانچه کاهش دما در نتیجه تأثیر عوامل بارش، توپوگرافی و پوشش گیاهی نباشد، با توجه به کنترل سایر عوامل و یکنواخت بودن لیتولوژی، کاهش دما می‌تواند به شرایط ذاتی سازند نسبت داده شود. در جدول ۱، پارمترهای آماری مربوط به مدل رقومی ارتفاع عمومی، ارتفاع در مناطق سایه، ارتفاع در مناطق روبه خورشید و کمیت‌های تصویر فرسوخ گرمایی متناظر، ارائه شده است.

برای حصول اطمینان از اینکه اختلاف دمای سازندها فقط به ویژگی‌های ذاتی، فیزیکی و هیدروژئولوژیکی آنها مربوط می‌باشد، لازم است بررسی‌های متعددی نظیر اقدامات زیر به عمل آید. در این رابطه نقش هر یک از عوامل تأثیرگذار بر کاهش دمای سطح مورد بررسی قرار گرفت تا ارتباط احتمالی کاهش دمای سطح زمین با فضاهای زیرسطحی که دمای کمتری نسبت به محیط پیرامون دارد به اثبات برسد.

با هدف آگاهی از رطوبت پیشین خاک و سازندها، آمار بارندگی حداقل ۱۰ روز قبل ثبت شده در ایستگاه‌های نزدیک به منطقه، مورد بررسی قرار گرفت. بررسی‌ها نشان می‌دهد در طول ۱۰ روز قبل از زمان تصویربرداری در منطقه‌ی مورد مطالعه، بارندگی رخ نداده است. در صورت عدم دسترسی به داده‌های بارش، می‌توان شرایط جوی را بر روی تصاویر ماهواره‌ای هواشناسی NOAA و یا MODIS مورد بررسی قرار داد.

عامل مهم دیگری که بر دمای سطح عوارض تأثیر می‌گذارد وجود پوشش گیاهی است که با نسبت‌گیری باندهای فرسوخ انعکاسی و سرخ، شاخص سبزیگی و حضور پوشش گیاهی مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای بررسی پوشش گیاهی از شاخص (Normalized Difference Vegetation Index) که توسط (Rouse et al., 1976)، پیشنهاد شده است، استفاده شد. در این شاخص مقادیر -0.5 تا $+0.5$ به‌عنوان زمین‌های فاقد پوشش گیاهی در نظر گرفته می‌شوند و با افزایش مقادیر تا $+1$ بر تراکم پوشش افزوده می‌شود. به‌منظور در نظر گرفتن اثر پوشش گیاهی در کاهش دمای سطح زمین، بررسی‌ها، به پیکسل‌های فاقد پوشش گیاهی در سازندهای انحلال‌پذیر محدود شده است.

بررسی‌ها نشان داد که در شرایط مساوی، دامنه‌های رو به خورشید امواج بلند گرمایی بیشتری را نسبت به دامنه‌های با جهت مخالف ساطع می‌کنند. بنابراین، با هدف لحاظ اثر سایه ناشی از جهت شیب دامنه در کاهش

جدول ۱- پارمترهای آماری ارتفاع عمومی، ارتفاع در مناطق سایه، ارتفاع در مناطق روبه آفتاب در سنگ‌های کربناته و کمیت‌های تصویر فرسوخ گرمایی متناظر آنها.

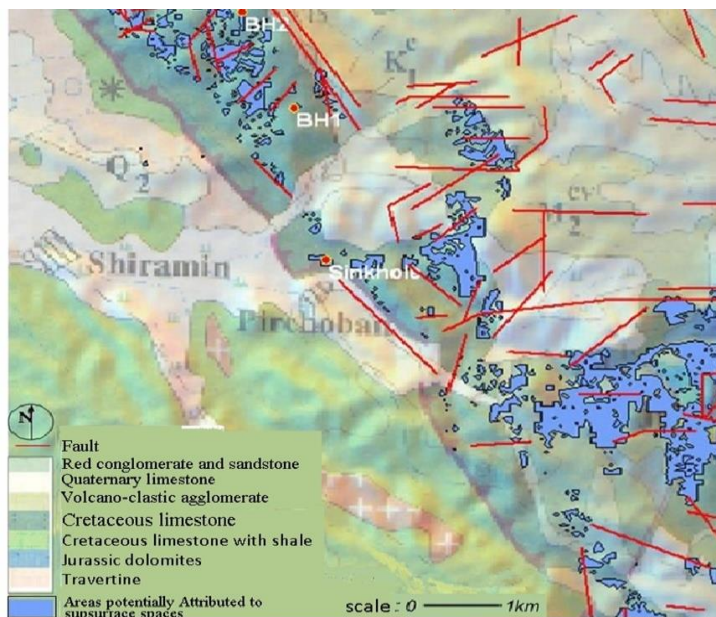
Table 1. Statistical parameters of general elevation, elevations at shadow and at sunlight aspects within the carbonate rocks and their matching thermal image values.

Statistics	Elevation in carbonate rocks (m)	Elevation in sunlight aspects (m)	Elevation in shadow aspects (m)	Thermal image values in shadow	Thermal image values in sunlight slopes
Min.	1268	1268	1268	138	149
Max.	1866	1845	1866	246	234
Mean	1450	1440	1405	194	200
Standard Deviation	136	127	106	18	11

بحث

تصویر فرسوخ گرمایی در محدوده مناطق شناسایی شده از طریق اعمال شرایط تعریف شده، در مقایسه با سایر بخش‌های آن کاهش محسوسی دارند.

نتیجه‌ی تلفیق اطلاعات بر اساس معیارهای یاد شده در منطقه شیرامین آذرشهر، به شناسایی مناطق احتمالی دارای فضاهای زیرسطحی انجامید (شکل ۳). بررسی‌ها نشان داد که میانگین مقادیر پیکسل‌های

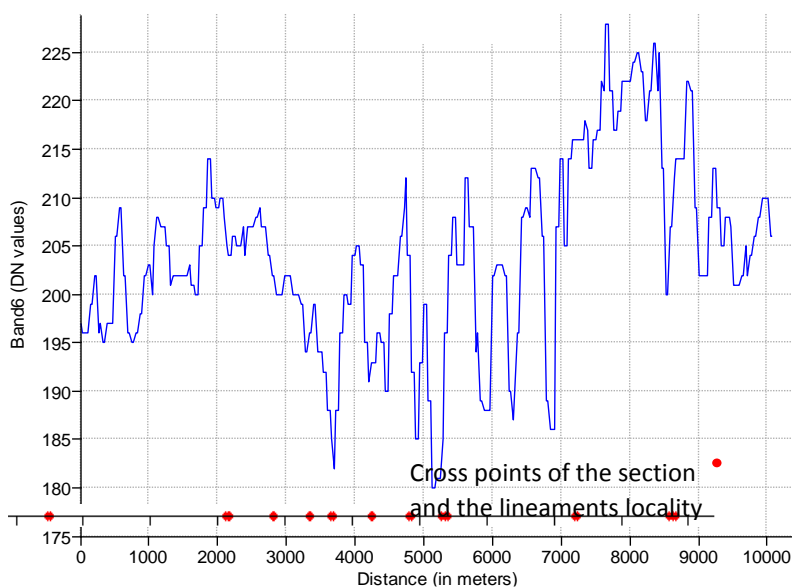


شکل ۳- پراکنش مناطق دارای احتمال وجود فضاهای زیرسطحی در منطقه شیرامین (لکه های آبی رنگ).

Fig. 3. Spatial distribution of areas having potential for subsurface spaces in Shiramin area (blue patches).

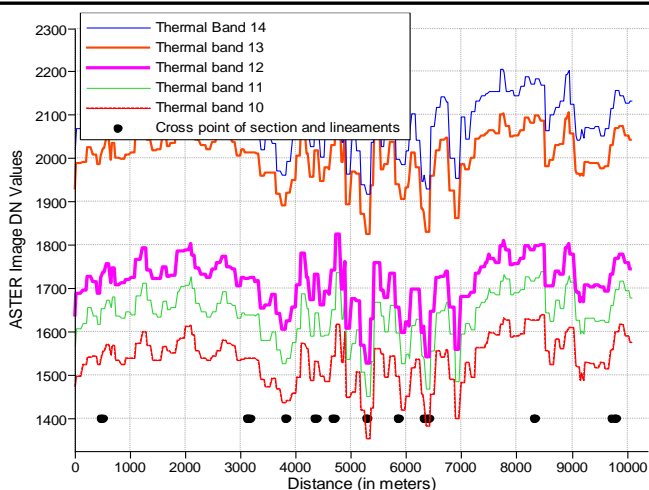
نشان داده شده‌اند (شکل‌های ۴ و ۵). بنابراین با توجه به اینکه بررسی‌ها تحت شرایط خاص و رعایت ضوابط و معیارهای قید شده صورت گرفته و نقش عوامل مؤثر محیطی در کاهش دمای سطح زمین در نظر گرفته شده است، چنین نتیجه‌گیری می‌شود که کاهش مقادیر پیکسل‌های تصویر فروسرخ گرمایی که تابعی از دمای سطح زمین می‌باشند می‌تواند با شرایط ذاتی سنگ‌های انحلال‌پذیر محل مرتبط باشد.

پروفیل‌هایی که بصورت متقاطع با خطواره‌ها (به احتمال زیاد گسل‌ها) رسم شده‌اند، نشان می‌دهند که خطواره‌ها سبب افت شاخص دمای سطح زمین شده‌اند و در امتداد این پروفیل‌ها، تغییرات دمایی و آنومالی‌های حرارتی سطح زمین به دو صورت محلی و منطقه‌ای آشکار شده‌اند. تغییرات دمایی سطح زمین، در امتداد این پروفیل‌ها که تعداد زیادی از خطواره‌ها را قطع می‌کنند برای تصویر فروسرخ گرمایی ETM^+ و تعداد ۵ تصویر فروسرخ سنجنده ASTER رسم و نمودار این تغییرات به ترتیب



شکل ۴- برش تصویر فروسرخ گرمایی (باند ۶ سنجنده ETM^+) که خطواره‌های زمین شناسی را در چند نقطه قطع می‌کند.

Fig. 4. Variation of DN values of a thermal image (ETM^+ Band 6) crossing the geological lineaments along a profile.



شکل ۵- برش تصاویر فروسرخ گرمایی (سنجنده ASTER) که موقعیت خطواره‌های زمین‌شناسی را در چند نقطه قطع می‌کنند.

Fig. 5. Variation of DN values of a thermal images (ASTER) crossing the geological lineaments along a profile.

ارزیابی صحت نتایج

متر حفاری به فضاهای زیرسطحی برخورد کرده و قطر فضاهای زیرزمینی از ۱۰ تا ۵۵ متر ادامه داشته است. در جدول ۲، مشخصات گمانه‌های اکتشافی در منطقه شیرامین آذرشهر، ارایه شده است.

برای ارزیابی صحت نتایج از تطبیق نتایج با واقعیت‌های زمینی، کمک گرفته شده است. حفاری‌های قبلی به عمل آمده در محل چاه‌های اکتشافی شماره ۱ و ۲ که در محدوده آنها مناطق دارای فضاهای زیرسطحی، به نقشه درآمده‌اند، به ترتیب پس از ۴۵ و ۲۵

جدول ۲- مشخصات گمانه‌های اکتشافی در منطقه شیرامین آذرشهر.

Table 2. Characteristics of the exploratory boreholes at Shiramin area.

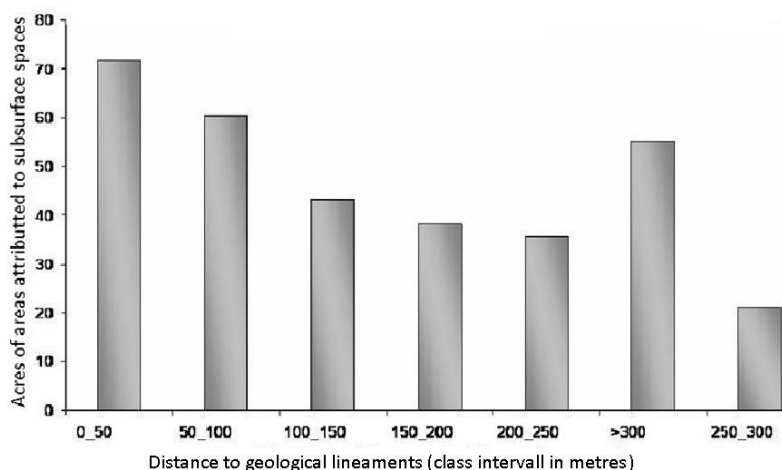
Borehole ID	Coordinates UTM(X,Y)	Subsurface spaces		DN values of Thermal image	Altitude (m)	Distance to lineament	Lithology label On map
		Depth	Diameter				
BH1	(578924, 4167667)	45	10	195	1542	140	K11*
BH2	(578423, 4168773)	25	55	191	1637	192	K11

فضاهای زیرسطحی کاسته می‌شود. این امر به این معنی است که خطواره‌ها در برقراری ارتباط دمای بخش‌های زیرسطحی و سطح زمین، نقش ایفاء می‌کنند. با توجه به اینکه تراکم ضعیف و کم آبراهه‌ها یکی از مشخصه‌های مناطقی است که میزبان فضاهای زیرسطحی هستند. به همین دلیل از این پارامتر نیز برای ارزیابی صحت نتایج استفاده شده است. برای دستیابی به این هدف، تراکم آبراهه‌ها برای هر یک از واحدهای سنگ‌شناسی محاسبه شد و مشخص شد که سنگ‌های کربناته با سن ژوراسیک، که نسبت به سنگ‌های کربناته کرتاسه از ظرفیت بیشتری برای فضاهای زیرسطحی مشخص شده‌اند، از تراکم آبراهه کمتری برخوردار هستند. با توجه به اینکه سازند ژوراسیک نسبت به کرتاسه در این محل بیشتر دچار انحلال شده است، این واقعیت با نتایج این تحقیق مطابقت دارد.

همانطور که در شکل ۳ نیز نمایش داده شده است، موقعیت محل حفاری‌های اکتشافی، بخصوص گمانه شماره ۲ که به فضاهای زیرسطحی برخورد کرده‌اند با پهنه مشخص شده به‌عنوان منطقه احتمالی دارای فضاهای زیرسطحی انطباق دارند. وجود فروچال معروف در منطقه (شمال روستای پیرچوپان) که همواره کوران هوای خنک و مرطوبی از داخل آن به بیرون می‌وزد و انطباق موقعیت آن با پهنه مشخص شده در شکل ۳، به عنوان منطقه دارای فضای زیرسطحی، دلیل آشکاری بر صحت روش به کار رفته برای شناسایی فضاهای زیرسطحی است.

از طرف دیگر بررسی ارقام تصاویر سنجنده ASTER در محدوده مناطق مشخص شده به‌عنوان وجود فضاهای زیرسطحی نشان داد که مناطقی که در تصویر لندست، سرد ظاهر شده بودند در تصاویر فروسرخ گرمایی سنجنده ASTER نیز سرد نمایان می‌شوند.

شکل ۶، نشان می‌دهد که با فاصله گرفتن از خطواره‌های زمین-شناسی، از سطح مناطق به نقشه درآمده به‌عنوان مناطق دارای



شکل ۶- کاهش سطح مناطق دارای فضاهای زیرسطحی با فاصله گرفتن از خطواره ها در منطقه آذرشهر.

Fig. 6. Decreasing of acreage of areas attributed to subsurface spaces with increasing distance to the lineaments in Shiramin, Azarshahr.

بررسی و حذف اثر سایر عوامل مؤثر بر کاهش دمای سطح زمین، سبب می‌شود که مناطق تحت تأثیر دمای فضاهای زیرسطحی در سازندهای کربناته، آشکار و مورد شناسایی قرار گیرند. در نتیجه این فرضیه که فضاهای زیرسطحی به واسطه دمای هوا و آب کارستی احتمالی داخل آنها دمای سطح زمین را تحت تأثیر قرار می‌دهند و این تأثیر با استفاده از دورسنجی گرمایی قابل تشخیص است، اثبات می‌گردد. این اصل با توجه به معیارهای تصمیم‌گیری می‌تواند با تبدیل به یک قاعده، برنامه و مدل، به‌عنوان یک روش مناسب و کم هزینه برای شناسایی اولیه اینگونه مناطق مورد استفاده قرار گیرد.

قدردانی

بر خود وظیفه می‌دانم از پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری برای فراهم نمودن شرایط برای انجام این تحقیق و سازمان زمین‌شناسی و تحقیقات معدنی کشور برای در اختیار گذاشتن نقشه‌ها و گزارش‌ها، سپاسگزاری نمایم.

نتیجه‌گیری

بررسی‌های اولیه بر روی تصویر گرفته شده در طول موج‌های فروسرخ گرمایی در روز و در فصل تابستان، نشان می‌دهد که سنگ‌های آهکی که احتمال فضاهای زیرسطحی در آنها می‌رود، نسبت به سایر واحدهای سنگ‌شناسی سردتر هستند. علاوه بر این، ایجاد تصویر رنگی کاذب با مشارکت تصویر باند گرمایی (باند ۶) سنجنده ETM⁺ نیز در شناسایی اولیه سنگ‌های آهکی با سردی نسبی متمایز، مؤثر است. شایان ذکر است که در این تحقیق، به دلیل دسترسی به تصاویر و قابلیت سنجنده از نظر تصویربرداری در طول موج فروسرخ گرمایی و توان تفکیک مکانی متناسب با مقیاس سایر نقشه‌های به کار رفته، از تصاویر ماهواره لندست استفاده شده است. لیکن با توجه به پیسرفت‌های حاصل شده در فناوری دورسنجی، شایسته است تا تصاویر سنجنده‌های با قابلیت‌های بهتر، نظیر سنجنده ASTER و یا تصاویر دوربین‌های حرارتی با وضوح بیشتر، جایگزین تصاویر لندست شوند.

منابع

- Abdel-Hady, M., Abdel-Hafez, M.A., Harlan H., Karbs, 1970. Subsurface drainage mapping by airborne infrared imagery techniques. Department of Civil Engineering, Oklahoma State University, Stillwater, Oklahoma. Digital library, Okstate, 10-17.
- Astier, 1974. Application of geophysics to groundwater exploration (Geophysique appliqué Al' Hydrogeologie, 120 Bd Saint-Germain, Paris.), Chapter 7, 201-208.
- Coolbaugh, M.F.C., Kratt, A., Fallacaro, W.M., Calvin, J.V., Taranik, 2007. Detection of geothermal anomalies using Advanced Space-borne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) thermal infrared images at Bradys Hot Springs, Great Basin Center for Geothermal Energy and the Arthur Brant Laboratory for Exploration Geophysics, University of Nevada, Reno, 89557 USA. Remote Sensing of Environment 106, 350-359.
- Cracknell, A.P., Mansor, S.B., 1997. Dtection of sub-surface coal fires using landsat TM data. Department of Applied Physics and Electronic and Manufacturing Engineering University of Dundee, Dundee DDI 4HN, Scotland, U.K. ISPRS Commission 80-84.
- Dale, A., Quattrochi, 2004, Thermal Remote sensing, Johan Wiley Publication.
- Del Grande, Nancy, K., 2007. Thermal imaging method to detect subsurface objects, <https://www.google.com/patents/US7157714>.
- Ebrahimi, H., 2016. Determination of more convenient method for providing land surface temperature by making use of Landsat images. Iranian Journal of remote sensing and GIS 8, 59-76.

- Geological map of Azarshahr at scale 1: 100000, published by organization for geological survey and mineral exploration of Iran.
- Mohammadi, M., J., Razawi, S., 2005. Scientific geophysical exploratory report on unseen subsurface spaces nearby Pirchoopan village. Geology Organization of Iran, 11-58.
- Petar, T., Milanovic, 1979. Karst hydrogeology, Colorado, 80161, USA.
- Qadirzade, A., Mosafi, P., 2005. Existence of caves in Azarshahr area, 1th volume of quarterly magazine of East Azerbaijan mine. Engineering Bureau, 16-17.
- Qadirzade, A., Khakzad A., AmriKazemi, 2006. Analysis of buried caves in Azarshahr region, proceeding of earth science at organization for Geological Survey and Mineral Exploration of Iran.
- Qobadi, M.H., 2007. Engineering Geology of Karst, BuAliSina University Organization.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., 1973. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS, Third ERTS Symposium, NASA SP-351, 309-317.
- Sobrino, J.A., Jimenez-Munoz, J.C., Paoliniba, L., 2004. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. Remote Sensing of Environment 90, 434-440.
- Campbell, W.C., El Latif, M.A., Joseph, W.F 1996. Application of Thermography to Karst Hydrology. Journal of Cave and Karst Studies 58, 163-167.

