

Research Article

Identification of areas hoping for shallow karst water resources in Qazvin province using infrared thermal images

Parviz Armani^{1*}, Nader Jalali²

1- Department of Geology, Faculty of Sciences, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

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

Keywords: *Shallow water, Karst, Infrared*

1- Introduction

The need for new water resources is constantly increasing, especially in conditions of water scarcity and drought. Therefore, finding new water resources can be a strategic goal for the country in this situation. Given the negative balance of most groundwater aquifers, it is unreasonable to expect more water supply from these aquifers, and inevitably the search for hard formations must be seriously pursued to access new and reliable water sources. Of course, this issue has been raised in the country for several years, but searches have been limited to geophysical methods and exploratory drilling. Considering the extent of carbonate formations in the country and not so easy access to these areas, especially in the Zagros and Alborz areas, it seems that exploratory explorations by traditional methods are not successful in a short time. As a result, it is suggested that before spending a lot of money on exploratory drilling and field surveys, methods based on knowledge and new remote sensing technologies should be exploited to identify areas of hope for the existence of these resources.

An infrared thermal scanner was used by Waren & Abd El Latif (1996) to measure at night in Greenland and was able to detect fractures and caves in ice under snow cover. Unal & Tufekchi (2000) identify covered karst areas used a GIS and remote sensing techniques to. Mapping of linear structures using remote sensing data is one of the important keys to understanding groundwater issues, especially in hard formations, which have low primary porosity (Meijerink et al., 2008). Theilen-Willige (2018) Using Landsat 8, Aster, Sentinel 1, ALOS and SRTM images in the GIS environment, mapped the distribution of karst features in the Black Hills area of South Dakota, USA, and was able to map karstic landforms such as sinkhole and subsidence.

Shopov et al., (2019) tried to identify underground cavities and deep rock slides in the United States by using thermal cameras mounted on unmanned aerial vehicles (UAVs). This research was performed based on thermal difference identification, orthophoto generation, 3D modeling and integration in a GIS platform. Based on this knowledge, using thermal remote sensing, researches were conducted in Azarshahr (Jalali and Kazemi, 2020) and Bojnourd (Jalali et al., 2009). These studies have led to the development of a method called LTDW, the application of which can lead to the identification of areas hoping for shallow water resources, especially in karst areas.

2- Materials and methods

To conduct this research, it was necessary that all data and information be digitized and usable in the software environment of GIS. Therefore, an attempt was made to prepare all the information layers in the mentioned

* Corresponding author: armani@sci.ikiu.ac.ir

DOI:10.22055/AAG. 2021.36990.2214

Received 2021-03-28

Accepted 2021-08-01

way and to generate the required data deficiencies with the necessary processing and special analyzes and using the basic data.

Petrological map (distribution of carbonate formations), satellite imagery, digital elevation model was some of the data that were prepared digitally and using some of them. Pseudo-three-dimensional view, aspect (slope direction), slope gradient, shadow areas during image acquisition time, drainage density and the normalized difference vegetation index map also were produced and used.

In this study, the satellite images of ETM + sensor particularly its thermal band (band 6), taken in summers of Years 2006 and 2010, was used. In addition, the digital elevation model obtained from the radar sensor (SRTM) and its derivatives, such as aspect direction and slope gradient maps as well as vegetation index (NDVI), geological map of Qazvin 1: 100000 were used in data integration and analysis. Field observations and the spatial distribution of the springs were considered to evaluate and assess the accuracy of results, as ground truths.

3- Compilation and analysis of data

The combined work was performed using lithological data, plant index, shade areas and surface temperature index, using a GIS. The purpose of data integration is to identify areas that can be affected by karst water sources from and around the lineaments, as well as cold transfer with a relative and severe decrease in temperature. The integration criteria were considered as follows:

Search is limited to the level of soluble (carbonate) formations.

Values less than 0.08 vegetation index (NDVI), were considered as areas without vegetation or areas with very low and sparse vegetation, whose effect on reducing the surface temperature can be neglected.

Values smaller than the mean number of -1 times the standard deviation were considered as the threshold for identifying relatively cold areas and less than the average of minus -2 times the standard deviation were considered as the criteria for identifying cold areas.

Shaded and sunny areas were analyzed separately at the time of imaging and the statistical parameters of the thermal infrared image of these areas were calculated separately.

Combining the mentioned data, areas of carbonate rocks that are without vegetation and the temperature of those areas were assessed as cold or relatively cold were identified. The presence of such areas indicates the factor or factors that have caused the temperature to decrease in these areas. Due to the fact that the effect of various effective factors such as vegetation, rainfall and surface water in reducing the surface temperature in this area and in modeling the relationships used were somehow eliminated. It can be concluded that most likely, the decrease in surface temperature in the areas that have been introduced as areas hoping for shallow karstic water resources, was due to inherent conditions and under the influence of hydrogeological conditions in the area. It should be emphasized that the areas identified as areas of hope for the existence of shallow karstic water resources, due to the type of integration, contain less layers of information than the actual level.

4- Conclusion

This research showed that the Ruteh, Elik, Lar, and Qom formations and Cretaceous lithological units, regardless of their outcrops, have the highest level of hope for the existence of shallow karst water sources. The spatial distribution of the areas hoping for shallow karstic water resources in the carbonate formations of the region is shown in Figure 1. If the outcrop of these formations is also considered, in other words, the level of hope areas is measured relative to the outcrop level of each unit. They show the greatest karstification potential.

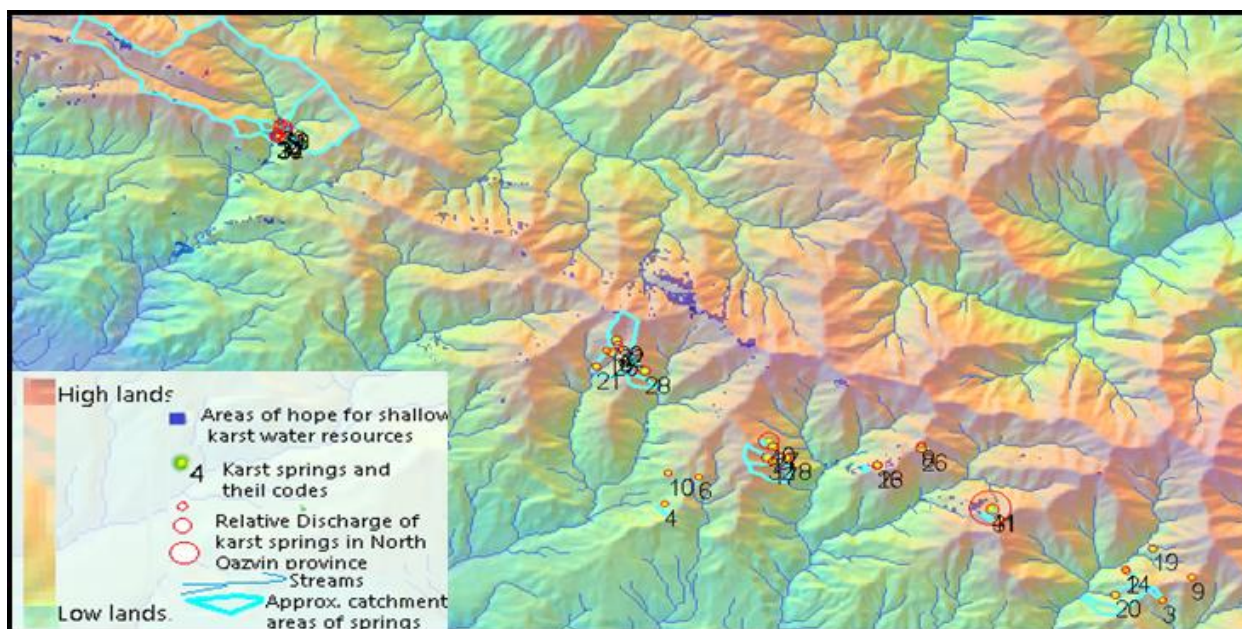


Fig 1- Spatial distribution of areas of hope for shallow karst water resources and surrounding springs and their relevant micro-catchments at Northern part of Qazvin province

References

- Jalali, N., Kazemi, R., 2020. Identification of subsurface spaces in Shiramin Azarshahr region using thermal infrared satellite images. *Journal of Advanced Applied Geology* 3 (10), 370-381. <https://doi.org/10.22055/AAG.2019.28880.1955>
- Jalali, N., Saghaian, B., Imanov, F., Museyyibov, M., 2009. Recognition of shallow karst water resources and cave potentials using thermal infrared image and terrain characteristics in semi-arid regions of Iran. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 11, 439-447. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2009.08.001>
- Meijerink, A.M.J., Bannert, D., Batelaan, O., Lubczynski, M.W., Pointet, T., 2008. Remote Sensing Application to Groundwater, IHP-VI, Series on Groundwater, No. 16, ITC, Enschede, The Netherlands.
- Shopov, Y., Ognianov, O., Filipov, A., Ivanov, I.R., 2019. Development of Technology for Remote Location of Unknown Underground Cavities and Deep-Seated Rockslides by Unmanned Air Systems (UAS). *Journal of Physics: Conference Series*, 13p. doi:10.1088/1742-6596/1368/3/032032
- Theilen-Willige, B., 2018. Detection of Karst Features in the Black Hills Area in South Dakota/Wyoming, USA, Based on Evaluations of Remote Sensing Data. *Geosciences* 8 (6), 192; doi:10.3390/geosciences8060192
- Unal, A., Tufekchi, K., 2000. Using of Geographic Information System Techniques and Satellite Images in the Covered Karst Areas: Amasra-Arit Example, NW of Turkey, proceeding of international symposium on Karst, Karst-(2000), Ankara.
- Waren Campbell, C., Abd El Latif, M., 1996. Application of Thermography to Karst Hydrology. *Journal of Cave and Karst Studies*, 58 (3), 163-167.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Armani, P., Jalali, N., 2023. Identification of areas hoping for shallow karst water resources in Qazvin province using infrared thermal images, Adv. Appl. Geol. 12(4), 787-808.

DOI:10.22055/AAG. 2021.36990.2214

URL: https://aag.scu.ac.ir/article_17047.html

©2023 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers

شناسایی مناطق امید به وجود منابع آب کارستی کم ژرفا در استان قزوین با بهره‌گیری از تصاویر فروسرخ گرمایی

پرویز آرمانی *

دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران

نادر جلالی^۲

پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران، ایران

* Armani@sci.ikiu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۱۰

چکیده

در این پژوهش کوشش شد تا با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای و پارامترهای تاثیرگذار محیطی، مناطق امید به وجود منابع آب کارستی کم ژرفا در استان قزوین شناسایی شود. فرض بر این است که منابع آب کارستی به دو حالت انتقال گرمایی و تبخیر از راه درزه‌ها و فروچاله‌ها، توده‌سنگ‌های در برگرنده و سطح آنها را در محل درزه‌ها، بخش‌های خردشده و فروریخته، تحت تاثیر قرار می‌دهد و این تاثیر با دورسنجی گرمایی قابل شناسایی است. داده‌های مورد نیاز مانند نقشه‌های سنگ‌شناسی، مدل رقومی ارتفاع و مشتقات آن، شاخص گیاهی و تصاویر ماهواره‌ای ETM+ برای طول روز و فصل تابستان تهیه شدند و با آزمون‌ها، معیارها و قانونمندی‌های مورد نیاز برای مدل‌سازی به دست آورده شد. با بهره‌گیری از معیارهای به دست آمده از بررسی‌های میدانی و آزمون‌ها و مدل‌سازی رابطه‌ای، مناطقی از سازندهای کربناته که امید به وجود منابع آب کارستی در آنها می‌رود مورد شناسایی قرار گرفتند. ارزیابی یافته‌ها بر پایه جایگاه چشمه‌های کارستی، همچنین فشردگی آبراهه‌ها، نشان می‌دهد رابطه منطقی میان مناطق امید به وجود منابع آب کارستی کم ژرفا و این عوامل وجود دارد. همواره، چشمه‌های کارستی در کنار مناطق امید و در ارتفاع پایین‌تر از آنها قرار گرفته است. بیش از ۷۵٪ مناطق امید شناسایی شده، در ناحیه با فشردگی کم آبراهه قرار دارد. فراوانی مساحت این مناطق با افزایش فشردگی شبکه آبراهه به کمتر از ۵٪ کاهش می‌یابد. یافته‌های این پژوهش، تاییدی بر روش به کار رفته در مناطق همانند در کرمانشاه و آذرشهر برای شناسایی پتانسیل منابع آب در سازندهای کربناته است.

واژه‌های کلیدی: آب کم ژرفا، کارست، فرسوخ

۱- مقدمه

محدود شده است. با توجه به گسترش سازندهای کربناته در کشور و دسترسی‌های نه چندان آسان به این مناطق، به ویژه در پهنه‌های زاگرس و البرز، به نظر می‌رسد که پی‌جویی‌های اکتشافی به روش‌های سنتی و معمول در زمان کوتاه به نتیجه نمی‌رسند. در نتیجه پیشنهاد می‌شود پیش از صرف هزینه‌های سنگین برای حفاری‌های اکتشافی و بررسی‌های میدانی، ابتدا از روش‌های بر پایه دانش و فن آوری‌های نوین دورسنجی برای شناسایی مناطق امید به وجود این منابع استفاده شود.

توانایی‌ها و محدودیت‌های روش‌های دورسنجی، وقتی که در بررسی پهنه‌های خاص کارستی مورد بهره‌گیری قرار گرفت

نیاز به منابع آب جدید، به ویژه در شرایط کم آبی و خشکسالی همواره رو به افزایش است. بنابراین یافتن منابع آب جدید می‌تواند به عنوان هدف راهبردی برای کشور، به ویژه در این شرایط، مطرح باشد. باتوجه به بیلان منفی در بیشتر سفره‌های آب زیرزمینی، انتظار تامین آب بیشتر از این آبخوان‌ها منطقی نیست و به ناچار باید جستجو در سازندهای سخت برای دستیابی به منابع آب جدید و مطمئن، بطور جدی دنبال شود. البته این موضوع چندین سال است که در کشور مطرح شده اما جستجوها به روش‌های ژئوفیزیکی و حفاری‌های اکتشافی

هنوز کاملاً شناخته نشده بود. ارتباط میان ویژگی‌های یک سیستم کارست با اطلاعات گردآوری شده با بهره‌گیری از طیف گسترده پرتو الکترومغناطیس تا سال ۱۹۷۹ به خوبی شناخته شده نبود (Milanovic', 1981). نخستین تجربه در این زمینه به روش برجسته‌بینی عکس‌های هوایی برای شناسایی محل مجاری زیرزمینی کارستی در رودخانه Camuy به وسیله Rinker (۱۹۷۴)، مورد بهره‌گیری قرار گرفت. Rinker (۱۹۷۵) همچنین یک اسکنر گرمایی فروسرخ را برای بررسی یخچال گرینلند و کارست پورتوریکو برای شناسایی محل شکستگی‌ها و غارهای زیرزمینی به کار برد. نامبرده نتیجه‌گیری نمود که اسکنر فقط در شرایط خاصی می‌تواند به طور موفقیت‌آمیز مورد بهره‌گیری قرار گیرد.

به باور Engman و Gurney (۱۹۹۱)، تصاویر ماهواره‌ای دارای اطلاعات زمین‌شناسی و آب‌شناسی می‌باشند که باید به وسیله واکاوی استخراج شوند. اطلاعات آب زیرزمینی را می‌توان از اشکال زمین، الگوهای زهکشی، شاخص‌های گیاهی، الگوهای کاربری زمین، عوارض خطی و غیرخطی و بافت و تَن تصاویر به دست آورد. بررسی‌های کلی بهره‌گیری از تصاویر چندطیفی در موضوع کارست توسط Milanovic' (۱۹۸۱) به عمل آمد و بر اهمیت زیاد سنجش از دور با امواج فروسرخ در شناسایی مناطق تغذیه و نقاط تخلیه تاکید شد.

روش اسکنر گرمایی فروسرخ توسط Abd El Latif و Waren (۱۹۹۶) برای سنجش شبانه در گرینلند به کار گرفته شد و شکستگی‌ها و غارهایی در یخ‌های زیر پوشش برفی کشف شد. در زمان این سنجش، اختلاف دما در سطح زمین درست در بالای شکستگی‌ها و برف‌های پیرامون ۳ درجه سانتیگراد بوده است که با وجود باد شدیدی که مانع اندازه‌گیری بود، شکستگی‌ها توسط دمانگار به روشنی، قابل شناسایی بودند. مخدوش شدن نتایج بر اثر فاکتورهای تعرق پوشش‌های گیاهی، توپوگرافی و دیگر فاکتورهای زیست محیطی توسط Moore و Heilman (۱۹۷۹) مورد تاکید قرار گرفت. با این حال، به باور آنان، می‌توان بین دماهای سطحی برآورد شده به صورت تجربی، از داده‌های فروسرخ گرمایی و ژرفای آب زیرزمینی، همبستگی خوبی برقرار کرد.

در جنوب کشور سوریه اکتشاف منابع آب زیرزمینی واقع در آبرفت‌های زیر سنگ‌های بازالتی با بهره‌گیری از روش‌های دورسنجی توسط Ammar و Travaglia (۱۹۸۸) در قالب

پروژه فائو به انجام رسید و نتایج خوبی در رابطه با اکتشاف فضاهای زیرزمینی و منابع آب به دست آمد. Tufekchi و Unal (۲۰۰۰) از یک سامانه اطلاعات جغرافیایی و تکنیک‌های سنجش از دور در شناسایی مناطق کارستی پوشیده بهره‌گیری کردند. Khodayi و Naseri (۲۰۰۰)، با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای، نقشه‌ی خطواره‌ها و پوشش گیاهی در منطقه‌ی کارستی شمال شهرستان اشنویه را تهیه کردند. آنها از این دو عامل به عنوان نمایانگر آب زیر زمینی به همراه اطلاعات جانبی دیگر مانند نقشه‌های زمین‌شناسی و توپوگرافی بهره‌گیری نموده و مناطق هدف برای اکتشافات ژئوفیزیکی را شناسایی کردند.

تهیه نقشه ساختارهای خطی با بهره‌گیری از داده‌های سنجش از دور یکی از کلیدهای مهم درک مسائل مربوط به آب زیرزمینی، به‌ویژه در سازندهای سخت، که تخلخل اولیه ناچیزی دارند، می‌باشد (Meijerink et al., 2008). Legg (۱۹۹۵) به تحلیل شکستگی و آب زیرزمینی می‌پردازد و بر این باور است که در مناطق دارای سنگ‌های بلورین مانند سنگ‌های آهکی، پخش آب زیرزمینی، پیش از هر چیز، توسط سامانه‌های شکستگی این سنگ‌ها کنترل می‌شود.

Avish و همکاران (۲۰۱۶) در پژوهشی، با استفاده از تصاویر سنجنده‌های مودیس، استر و داده‌های ETM و هوابرد و زمینی، به بررسی نشانه‌های وجود پتانسیل منابع ژئوترمال در منطقه سیرج-گلباف استان کرمان پرداختند و دو بی‌هنجاری گرمایی در بخش‌های جنوب خاوری و شمالی منطقه را شناسایی کردند. جایگاه چشمه‌های آب گرم و بی‌هنجاری‌های مغناطیسی به دست آمده به روش هوابرد، با ناهنجاریهای شناسایی شده به روش دورسنجی گرمایی انطباق داشتند.

Theilen-Willige (۲۰۱۸) با بهره‌گیری از تصاویر لندست ۸، آستر، سنتینل ۱، تصاویر ALOS و SRTM در محیط GIS نقشه پراکنش زمیندیس‌های کارستی (Karstic landforms) در منطقه Black Hills داکوتای جنوبی ایالت متحده آمریکا را تهیه نمود و توانست برخی از زمیندیس‌های کارستی مانند فروچاله‌ها و فرونشست‌ها را به نقشه در آورد. Shopov و همکاران (۲۰۱۹) با بهره‌گیری از دوربین گرمایی سوار شده بر روی سامانه‌های هوایی بدون سرنشین (پهباد) کوشش نمودند حفره‌های زیرزمینی و لغزش‌های سنگی ژرف را در آمریکا شناسایی نمایند. این پژوهش برپایه شناسایی اختلاف

گرمایی، تولید اورتوفتو، مدل سازی سه بعدی و ادغام در بستر وب GIS انجام شد.

از کاربردهای دورسنجی گرمایی، تهیه دمای سطح آب دریا (SST) و دمای سطح زمین (LST) می باشد. در زمینه شناسایی دمای سطح آب، تجربیات بسیاری وجود دارد. Daneshkar Arasteh و همکاران (۲۰۰۵) نیز فعالیت های ارزشمندی در این رابطه در ایران انجام داده اند. لیکن در رابطه با شناسایی دمای سطح زمین با بهره گیری از تصاویر ماهواره ای به دلیل پیچیدگی های آن و نبودن داده های کافی، تجربه کمی وجود دارد و تجربیات موجود در این زمینه نیز معمولاً با احتیاط به کار گرفته می شوند. این آرمانی است که به جای تصویر فروسرخ گرمایی از نقشه های دمای سطح زمین (LST)، بهره گیری شود. لیکن به دلیل ناشناخته بودن پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه دمای سطح زمین آن گونه ای که Sobrino و همکاران (۲۰۰۰) پیشنهاد کرده است، به ناچار بایستی دمای درخشندگی (Tb) و یا تصویر اصلی باند فروسرخ گرمایی مورد بهره گیری قرار گیرند. انتظار می رود به لحاظ پیشرفت های اخیر در سنجنده ها و ماهواره ها و درک بهتر از پدیده های سطح زمین، این روش ها به طور گسترده توسعه یافته و به کار گرفته شوند. بررسی های به عمل آمده نشان می دهد که دمای درخشندگی با مقادیر اولیه ی تصویر باند ۶ سنجنده ی ETM+، ۱۰۰٪ همبستگی دارد و واریانس مقادیر باند ۶ بیشتر از تصویر Tb می باشد. در نتیجه، در این راستا سفارش شده است تا از تصویر باند ۶ به عنوان تصویری، که آنومالی های گرمایی سطح زمین را در بردارد، بهره گیری شود (Alavipanah, 2016). برپایه این دانسته ها، با بهره گیری از سنجنش از دور گرمایی، پژوهش هایی در منطقه آذرشهر (Jalali and Kazemi, 2020) و بجنورد (Jalali et al., 2009) انجام شد. این پژوهش ها منجر به گسترش روشی با عنوان LTDW شده است که کاربرد آن می تواند به شناسایی مناطق امید به وجود منابع آب کم ژرفا، بویژه در مناطق کارستی بیانجامد.

با جمع بندی منابع یاد شده چنین نتیجه گرفته می شود که کاربرد تصاویر در موضوع کارست بیشتر به تفسیرهای چشمی تصاویر گرفته شده در نورهای مرئی محدود بوده است. کاربردهای سنجنش از دور در زمین شناسی و بررسی های مربوط به کارست در دهه ۱۹۹۰ بطور جدی مورد توجه قرار گرفته است. این در حالی است که به خاطر ماهیت رقومی تصاویر

ماهواره ای و چندطیفی و پرتیفی بودن آنها، پردازش ها و واکاوی رقومی تصاویر و بهره گیری از تصاویر گرفته شده در نوارهای نامرئی طیف الکترومغناطیس، از اهمیت و جایگاه ویژه ای برخوردار است. باید افزود که سنجنش از دور، به عنوان یک دانش و فن نوین، داده های مکانی و طیفی بسیاری را در اختیار می گذارد. این داده ها افزون بر اینکه در تولید و تهیه نقشه های موضوعی مانند خطوطاره های زمین شناسی، به کار گرفته می شوند، در بررسی دمای عوارض و پدیده های سطح زمین به صورت نسبی و مطلق، مورد بهره گیری قرار می گیرند. اگرچه دورسنجی گرمایی در زمینه های بارز مانند بررسی آتش سوزی ها و فوران آتشفشان ها همواره مورد بهره گیری قرار گرفته است، اما کاربرد آن در شناسایی عوارض و پدیده های سرد از گرم همواره با پرسش ها و ابهام هایی همراه بوده است و موارد ناشناخته بسیاری در این رابطه وجود دارد. برای نمونه، به شناسایی غارهای مدفون، اشاره شده است که باید اختلاف دمای درون غار با محیط بیرون زیاد باشد تا بتوان آنها را به طریق دورسنجی مورد شناسایی قرار داد. از سویی دیگر در شناسایی این نوع عوارض و پدیده ها، موانع زیادی مانند تاثیر تبخیر و تعرق، پوشش گیاهی، پستی و بلندی زمین و توپوگرافی وجود دارد.

وجود سازندهای آهکی تراوا در استان قزوین نشانگر توان این استان در داشتن منابع آبی در سازندهای سخت است که وجود سفره های آب زیرزمینی زیر فشار در دشت قزوین نیز به این باور قوت می بخشد. این پژوهش و بررسی های تکمیلی می تواند به اکتشاف و شناسایی مناطق امید به وجود منابع آب کارستی بیانجامد و نتایج به دست آمده، مبنای راهنمایی برای اکتشافات دقیق تر میدانی قرار گیرد. در این راستا چندین پژوهش در منطقه انجام شده است (Ghobadi et al., 2010; Ghazanfari et al., 2014, 2016).

توجه بیش از پیش به روش های دورسنجی، با تاکید بر درک درست از پدیده های سطح زمین و قابلیت های سنجنده های پیشرفته و بهره گیری از تصاویر گرفته شده توسط سنجنده های فروسرخ گرمایی، در بررسی تغییرات نسبی دمای سطح آب و خشکی و بی هنجاری های گرمایی، نشان دهنده اهمیت موضوع در شرایط کنونی است.

هدف اصلی از این کار پژوهشی مشارکت در گسترش روشی است که با استفاده از تصاویر ماهواره ای و داده های محیطی،

توده‌های سنگ جاری شود به شرطی که منبعی از آن‌ها وجود داشته باشد. وجود منابع آب کارستی در سنگ‌های آهکی به شکل‌گیری فرآیند انتقال کمک می‌کند. این عمل سبب می‌شود تا دمای سطح زمین در مناطق نزدیک به منابع آب کارستی تحت تاثیر آن قرار گیرد (Astier, 1974).

تابش نور خورشید باعث گرم‌شدن خاک و سنگ موجود در سطح زمین می‌شود و این امر اسباب تغییرات دمای سطح، در فصول مختلف و در طول سال را فراهم می‌آورد. تنها منابع آب زیرزمینی واقع در ژرفای مشخصی (کمتر از ۴۰ متر) می‌توانند از طریق درز و شکاف و انتشار سرما و یا گرما (بسته به فصول سال) بر دمای سطح زمین تاثیر بگذارند و این تغییرات دمای سطح زمین هم با داده‌های سنجش از دور گرمایی قابل آشکارسازی است، بنابراین با توجه محدودیت سنجنده، شناسایی به این روش به منابع آب کم ژرفا محدود شده است. این تغییرات دما تا ژرفای ۴۰ متر از سطح زمین تاثیر می‌گذارند و ژرفای تحت تاثیر دمای سطح زمین برای زمین‌های رسی قدری بیشتر از زمین‌های از جنس سنگ‌های کربناته و گرانیت است (Astier, 1974). بنابراین، همان گونه که دمای سطح زمین تا ژرفای قابل توجهی جاری و منتقل می‌شود، دمای پدیده‌های سرد و یا گرم موجود در این ژرفا نیز می‌تواند به سطح زمین منتقل و آن را تحت تاثیر خود قرار دهد، مشروط بر اینکه دمای منابع آب زیرزمینی (کارست) با دمای بیرون و فضای آزاد تفاوت آشکار و بارزی داشته باشد.

رسانایی گرمایی سنگها معمولا همانند هم هستند و نسبت به هم کمی تغییر می‌کنند مگر اینکه فضاها تهی و درز و شکاف‌های سنگ‌ها از آب اشباع شود که در این حالت باعث افزایش رسانایی گرمایی در این محیط‌ها می‌شود. زمین‌های رسی و سنگ‌آهک به ترتیب دارای کمترین و بیشترین توان رسانایی گرمایی هستند. توان رسانایی گرمایی خاک‌های رسی و ماسه ای ۰/۰۰۲ تا ۰/۰۰۳ و سنگ‌های کربناته و گرانیت ۰/۰۰۸ تا ۰/۰۰۵ cal/cm/sec می‌باشند (Astier, 1974). بنابراین، گرما و یا سرما در سنگ‌های آهکی نسبت به زمین‌های رسی و ماسه ای سریع تر منتقل می‌شود.

با توجه به اینکه دمای سطح زمین تقریباً میان ۵۰- تا ۵۰+ درجه سانتیگراد تغییر می‌کند، به استناد قانون جابجایی وین (Jahedi and Farrokhi, 1996)، مناسب‌ترین آشکارگر آنست که بتواند انرژی طیف فروسرخ با طول موج میان ۸ تا ۱۴

پیش از صرف هزینه‌های زیاد، مناطق امید به وجود منابع آب کم ژرفا را شناسایی کرد. این روش پیشتر توسط Jalali و همکاران (۲۰۰۹) با عنوان LTDW برای منطقه آذرشهر معرفی شده است. باتوجه به بیلان منفی سفره‌های آب زیرزمینی، انتظار تامین آب بیشتر از این آبخوان‌ها انتظار منطقی نیست و به ناچار باید جستجو در سازندهای سخت برای دستیابی به منابع آب بیشتر و مطمئن، بطور جدی دنبال شود. این موضوع چندین سال است که با بهره‌گیری از روش‌های ژئوفیزیکی و حفاری‌های اکتشافی انجام می‌شود. با توجه به وسعت زیاد سازندهای کربناته در کشور و دسترسی‌های نه چندان آسان به مناطق کوهستانی، به نظر می‌رسد که پی‌جویی‌های اکتشافی به روش‌های سنتی و معمول در زمان کوتاه جواب نمی‌دهد. در نتیجه لازم است از دانش و فن‌آوری‌های نوین، پیش از صرف هزینه‌های سنگین برای شناسایی مناطق امید به وجود این منابع بهره برداری به عمل آید. بر پایه روند رو به کاهش آبخوان‌های آبرفتی، در این پژوهش کوشش شد تا با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای و پارامترهای تاثیرگذار محیطی، مناطق امید به وجود منابع آب کارستی کم ژرفا در استان قزوین شناسایی شوند.

۲- مواد و روش‌ها

بازدیدهای میدانی از منطقه برای بررسی‌های زمین‌ریخت-شناسی انجام گرفت و زمین‌دیس‌های کارستی سازندها شناسایی شدند. برای انجام این پژوهش، لازم بود تمام داده‌ها و اطلاعات به صورت رقومی و قابل استفاده در محیط نرم افزارهای سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) باشند. بنابراین، کوشش شد تا همه لایه‌های اطلاعاتی تهیه شوند و کمبودهای داده‌های مورد نیاز نیز با پردازش‌های لازم و آنالیزهای خاص و با بهره‌گیری از داده‌های پایه تولید شوند. نقشه سنگ‌شناسی (پراکنش سازندهای کربناته)، تصاویر ماهواره‌ای، مدل رقومی ارتفاع از داده‌هایی بودند که به صورت رقومی تهیه شدند و با بهره‌گیری از تعدادی از آنها، تصویر شبه سه بعدی، سوی دامنه، شیب، مناطق سایه در زمان تصویربرداری، شبکه آبراهه‌ها و فشردگی آنها و نقشه شاخص نرمال شده پوشش گیاهی تولید شدند و مورد استفاده قرار گرفتند.

۳- یافته‌ها

انتقال گرما و سرما یکی از ویژگی‌های مهم توده‌های سنگی است. این قابلیت سنگ‌ها سبب می‌شود تا سرما و یا گرما در

میکرومتر را ثبت نماید. برای این آستانه از دما، مواد در این طول موج‌ها، انرژی بیشتری را نسبت به هر طول موج دیگری ساطع می‌کنند. همچنین جو در این نوار طیفی، انتقال گرمایی بیشتری را سبب می‌شود، زیرا که این باند طیفی (۸ تا ۱۴ میکرومتر) یک روزنه انتقالی جوی است.

سنجنده ETM⁺، یک تصویر که ویژگی‌های گرمایی عوارض و پدیده‌های سطح زمین را در بر دارد با توان تفکیک ۶۰ متر نیز در اختیار می‌گذارد. تصاویر فرسرخ گرمایی به دست آمده از سنجنده ASTER نیز کاربردهای بسیاری در این زمینه دارند و از این تصاویر می‌توان برای ارزیابی نتایج بهره‌گیری کرد. امروزه این نوع تصویر، با توجه به توان جدایش مکانی، یکی از مناسب‌ترین تصاویر گرمایی برای بررسی تغییرات گرمایی در سطح زمین در یک منطقه است.

برای اکثر بررسی‌ها، به منظور حذف اثر گرمای خورشید، توصیه شده است که پرواز هواپیما در شب انجام گیرد. اختلاف دمای سازندها در دو حالت شب و در فصل زمستان و روز و در فصل تابستان، به بیشترین مقدار خود می‌رسند. بنابراین، هر دو تصویر اخذ شده در طول روز فصل تابستان و طول شب فصل زمستان در مناطقی که دارای فصول متمایز هستند می‌توانند در شناسایی عوارض و پدیده‌هایی که اختلاف دمای زیادی نسبت به هم دارند، مورد بهره‌گیری 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 موثر هستند. در این پژوهش، از تصویر ماهواره ای سنجنده ETM⁺ تابستان سال ۲۰۰۶ و ۲۰۱۰ میلادی بهره‌گیری شد. افزون بر این، تصویر (باند ۶) از مدل ارتفاعی رقومی به دست آمده از سنجنده رادار (SRTM) و از مشتقات آن، مانند شیب و وجه دامنه و همچنین شاخص گیاهی (NDVI)، نقشه‌ی زمین‌شناسی برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ استان قزوین بهره‌برداری شد و برای ارزیابی نتایج به دست آمده، بازدیدهای میدانی انجام گرفت و از جایگاه چشمه‌ها بازدید شد.

با توجه به همبستگی بالای دمای درخشندگی با مقادیر اولیه‌ی تصویر باند ۶ سنجنده ETM⁺، و اینکه واریانس مقادیر باند ۶ بیشتر از تصویر دمای درخشندگی می‌باشد در نتیجه، در این بررسی‌ها از تصویر باند ۶ به عنوان تصویری که آنومالی‌های گرمایی سطح زمین را در بردارد، بهره‌گیری شد. بنابراین، دورسنجی گرمایی می‌تواند به عنوان یک روش در

شناسایی مناطق امید به وجود منابع آب کارستی مطرح باشد. اما لازم است نقش عوامل تاثیرگذار در کاهش دمای سطح زمین نیز مورد توجه قرار گیرند. برای نمونه، دما در سیماهای کارستی زیرزمینی باید کاملاً متفاوت از دمای بیرون باشد و این تفاوت بایستی اثر خاصی را در سطح زمین فراهم آورد. از سوی دیگر، حساسیت سنجنده‌ی ماهواره، باید متناسب با پرتوهای گرمایی گسیل شده از سطح سازندهای کارستی باشد. برای انجام این پژوهش، مراحل و روش زیر به کار رفته است:

- گردآوری تصاویر ماهواره ای بر پایه معیارهای مشخص از نظر پوشش ابری، زمان تصویربرداری و عدم بارش
- تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه
- تولید نقشه خطواره‌های زمین شناسی با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای به روش فیلتر نمودن و تفسیر چشمی آنها
- تهیه و یا تولید مدل رقومی ارتفاع با بهره‌گیری از داده های SRTM و ASTER

- بررسی و شناخت نقش عوامل موثر بر کاهش دمای سطح زمین و رفع و یا لحاظ اثر آنها مانند:

بررسی نقش ارتفاع در کاهش دمای سطح زمین با انتخاب آستانه‌ی بیشینه: تراز بلندترین نقطه‌ی غیرسرد در منطقه‌ی مورد بررسی (و بر روی تصویر) به عنوان آستانه بیشینه ارتفاع بررسی نقش پوشش گیاهی در کاهش دمای سطح زمین: برای پرهیز از تاثیر گیاه در کاهش دمای سطح زمین، انتخاب محدوده‌ای از ارقام شاخص گیاهی NDVI، که نمایانگر مناطق بدون پوشش هستند به عنوان پنجره بررسی

لحاظ نقش سایه در کاهش دمای سطح زمین از طریق انجام آنالیزهای جداگانه در مناطق سایه و غیر سایه: برای شناسایی مناطق سایه از متادیتای تصاویر، مانند ارتفاع خورشید در زمان تصویربرداری و وضعیت ناهمواری‌ها و دامنه‌های منطقه بهره‌گیری شد.

حذف اثر بارش‌های احتمالی و رطوبت خاک از طریق انتخاب تصاویر با زمان مناسب و واریس آمار بارش‌های حداقل ۱۰ روز پیش از زمان تصویربرداری.

- شناسایی معیار برای شناسایی پیکسل‌های سرد در تصاویر فرسرخ گرمایی گرفته شده در طی روز.

- اجرای مدل رابطه‌ای. در این گام برای دستیابی به هدف، نقش عوامل موثر تاثیر داده شده و توانمندی‌های شناخته شده (در محدوده سازندهای زمین شناسی دارای استعداد کارست

زایی) تعمیم داده می شود.

- ارزیابی نتایج با بهره گیری از داده های موجود و بازدیدهای زمینی، فشردگی آبراهه و جایگاه چشمه ها.
- مقایسه و واکاوی یافته ها.

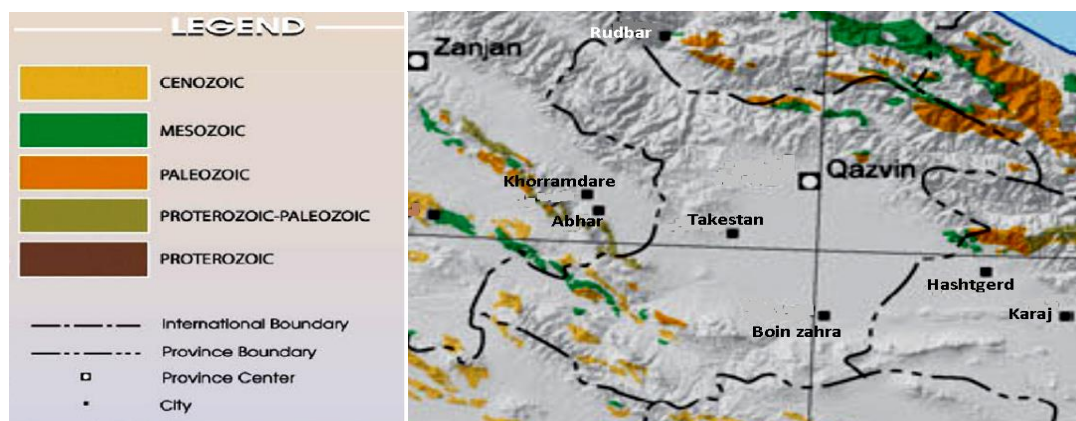
۴- آماده سازی داده ها

اطلاعات ناهمواری ها، شامل شیب و جهت دامنه، ارتفاع از سطح دریا، نقشه مناطق سایه و همچنین شبکه آبراهه ها و فشردگی آنها به روش پردازش تصویر مدل رقومی ارتفاع، تولید و دیگر اطلاعات مانند نقشه های سنگ شناسی، خطواره ها، تهیه و وارد

محیط GIS شدند.

۵- زمین شناسی

به استناد نقشه زمین شناسی سازندهای کربناته با سن مختلف در بخش های شمالی و جنوبی استان قرار دارند. از آنجا که احتمال پدیده کارست زایی در تمام این سازندها وجود دارد، بدون توجه به نام و سن این سازندها و به عبارت بهتر واحدهای سنگ شناسی، یکپارچه سازی شده و در تلفیق اطلاعات و جستجو برای مناطق امید به وجود منابع آب کارستی کم ژرفا، مورد بهره گیری قرار گرفت (شکل ۱).

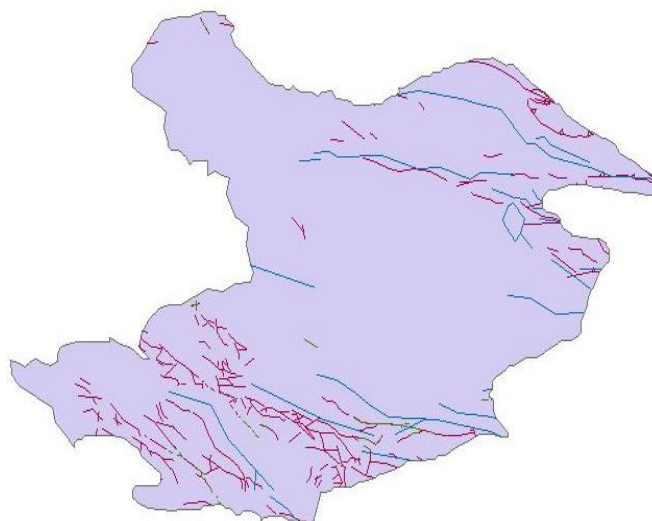


شکل ۱- پراکندگی سنگ های کربناته (بر پایه سن) در گستره استان قزوین (برگرفته از نقشه ۱/۵,۰۰۰,۰۰۰ سازمان زمین شناسی کشور)

Fig 1. Distribution of carbonate rocks (based on age) in Qazvin province (at scale, 1:5.000.000, Geological Survey of Iran).

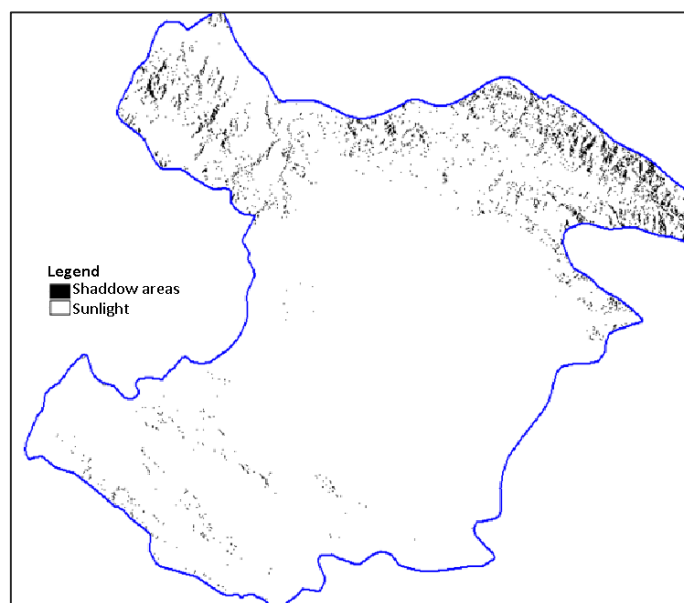
منطقه الموت در شمال و آبگرم در جنوب استان از دید زمین-ساختی شرایط به نسبت مناسبی برای کارست زایی دارا هستند. در منطقه مورد بررسی ساختارهای چین خورده (تاقدیس و ناودیس) دیده می شوند که معمولاً وابستگی تنگاتنگی با گسله های فشاری یا راندگی دارند. روند محور این چین خوردگی ها به تقریب موازی روند گسله ها است (شمال باختری-جنوب خاوری). این ساختارها در شمال استان بگونه ای فراگیر بصورت ناودیس گونه و تاقدیس گونه دیده می شوند. در بخش جنوبی استان چین خوردگی ها نظم بهتری دارند. در منطقه مورد بررسی انواع گوناگون از گسله های وارونه، راندگی، راستالغز و عادی وجود دارند که نقش به سزایی در تکامل ساختاری و دگرریختی منطقه داشته اند (Ghazanfari et al., 2014).

فرآیند کارستی شدن نتیجه نفوذ آب به داخل توده های سنگ تراوا و انحلال پذیری است. افزون بر انحلال پذیری، تراوایی توده سنگ یک عامل مهم به شمار می آید. عامل اساسی قابلیت تراوایی سنگ های کربناته درز و شکافدار بودن این سنگ ها است (Milanovic', 1981). سنگ های آهکی و دولومیتی به ویژه اگر به صورت لایه های ستر و توده ای باشند بسیار شکننده هستند. فرآیندهای زمینساختی شدید باعث پدید آمدن درزها و شکاف های فراوان می شوند که آب می تواند از این طریق به بخش های ژرف توده سنگ ضخیم انتقال یابد. قطعه قطعه شدن توده سنگ ها در اثر فرآیندهای زمینساختی عامل مهمی در کارستی شدن بوده که به طور افقی و عمودی عمل می نمایند و هر چه فاصله میان شکستگی ها کمتر باشد این فرآیند گسترده تر است (Ford and Williams, 2007; Milanovic', 1981).



شکل ۲- نقشه گسل‌ها و شکستگی‌ها در استان قزوین (<https://rsgisc.com/>)

Fig 2. Map of faults and fractures in Qazvin Province (<https://rsgisc.com/>).



شکل ۳- مناطق سایه در استان قزوین در ساعت ۱۰ صبح به وقت محلی (در ۳ آگوست ۲۰۰۶)

Fig 3. Shadow areas in Qazvin province at 10 am local time (August 3, 2006)

۶- مناطق سایه

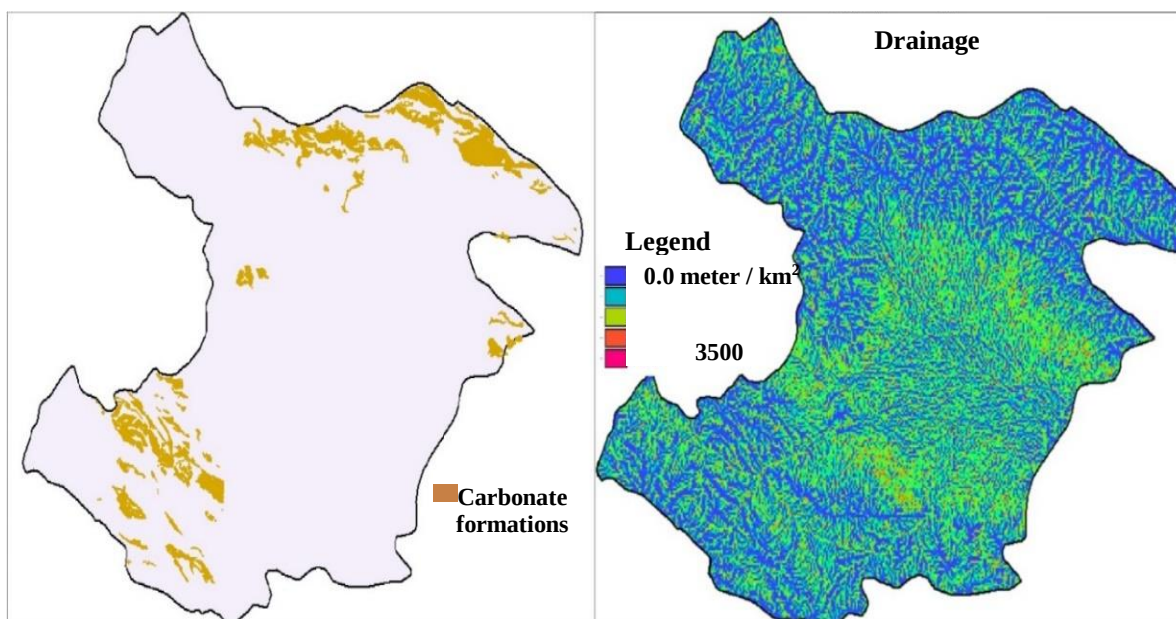
قرارگرفتن دامنه‌ها در منطقه سایه باعث کاهش دمای سطح زمین در آن مناطق می‌شود. بنابراین برای لحاظ این موضوع و انجام آنالیزهای مستقل و جداگانه در مناطق سایه و غیر سایه، لازم است این مناطق در زمان و تاریخ تصویربرداری مورد شناسایی قرارگیرند. این کار با مراجعه به متادیتای تصاویر،

مانند ارتفاع خورشید در زمان تصویربرداری و وضعیت ناهمواری‌ها و دامنه‌های منطقه و با بهره‌گیری از این اطلاعات قابل انجام است. بنابراین با بهره‌گیری از نقشه شیب و سوی 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. نقشه مناطق سایه در تاریخ مورد نظر (2006 08 03)، در شکل ۳، ارائه شده است.

۷- فشردگی شبکه آبراهه‌ها

با توجه به اینکه فشردگی شبکه آبراهه‌ها رابطه عکس با تراوی سازندها دارد، بنابراین نقشه شبکه آبراهه‌ها با بهره‌گیری از مدل رقومی ارتفاع تولید و فشردگی آبراهه‌ها محاسبه شد تا در

ارزیابی نتایج به دست آمده مورد بهره‌گیری قرار گیرند. فشردگی شبکه آبراهه بر حسب متر در کیلومتر مربع و بر اساس تعریف (Alizadeh, 2014) از فشردگی آبراهه که در آن طول تمام رودخانه‌ها و آبراهه‌های واقع در یک سطح مشخص به مساحت آن تقسیم می‌شود، محاسبه شد (شکل ۴).



شکل ۴- فشردگی آبراهه‌ها در استان قزوین (برحسب m/km^2) (راست)؛ پراکنش سازندهای کربناته در سطح استان قزوین (چپ)

Fig 4- Drainage density of Qazvin province (in terms of m/km^2) (right); Distribution of carbonate formations in Qazvin province (left)

۸- تصاویر لندست

تصاویر ماهواره‌ای لندست ETM+ با داشتن اطلاعات طیفی متعدد، به ویژه، داده‌های دریافت شده در طیف فروسرخ گرمایی، امکان بررسی ویژگی‌های بیشتری از مواد سازنده سطح زمین را فراهم می‌آورد. در این پژوهش تصاویر مربوط به سین‌های ۳۵-۱۶۵ و ۱۶۶-۳۵ مورد بهره‌گیری قرار گرفته و پردازش‌های لازم از نظر تصحیحات هندسی و رادیومتری و استخراج اطلاعات برروی آنها انجام شد. تصاویر ETM+ فصل تابستان در طول روز (به دلیل در دسترس بودن و اختلاف زیاد دمای سطح زمین یا خشکی در مناطق خشک و مرطوب با دمای مناطقی که احتمالاً تحت تاثیر منابع آب کارستی کم ژرفا قرار می‌گیرند) مورد بهره‌گیری قرار گرفت.

۹- بارندگی

بارش و به تبع آن رطوبت خاک، سبب کاهش دمای سطح زمین می‌شود. از آنجا که روش بهره‌گیری شده در این مطالعات به

سردی و گرمی مواد سازنده سطح زمین حساسیت زیادی دارد در نتیجه لازم است از تاثیرناگذاری موضعی عوامل خارجی بر دمای سطح زمین اطمینان حاصل شود. در این پژوهش، برای حذف اثر رطوبت خاک در کاهش دمای سطح زمین، آمار بارندگی ایستگاه‌های باران‌سنجی واقع در استان برای تاریخ‌های تصویربرداری و ۱۰ روز قبل از آن مورد بازبینی قرار گرفتند تا از عدم بارندگی در این روزها اطمینان حاصل شود.

۱۰- پوشش گیاهی

گیاه از دو نظر تبخیر و تعرق و پیش‌گیری از جذب انرژی خورشید توسط زمین سبب کاهش دما در مناطق پوشیده از گیاهان می‌شود. از آنجا که موضوع این پژوهش با تغییرات دمای سطح زمین ارتباط مستقیم دارد، لازم است اطلاعات مربوط به حضور پوشش گیاهی در زمان تصویربرداری در دست باشد. بنابراین، با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای و تولید شاخص گیاهی از ترکیب باندهای تصاویر به دست می‌آید.

شد تا تغییرات گرمایی در تصویر گرفته شده در نوار طیفی فروسرخ گرمایی، به چند طبقه و ناحیه گرمایی تقسیم شود. از آنجا که ارقام کوچکتر تصویر نشانگر سردی و ارقام بزرگتر نشانگر گرمی نسبی می باشند، پارامترهای میانگین و انحراف معیار برای جداسازی نواحی مختلف سرد نسبی و گرم نسبی مورد توجه قرار گرفت. در این پژوهش، با رویکرد محتاطانه آستانه عدد میانگین منهای یک انحراف معیار برای شناسایی مناطق نسبتا سرد و آستانه‌ی بین معیار نسبتا سرد و ارقام کمتر از عدد میانگین منهای دو برابر انحراف معیار برای شناسایی مناطق سرد در نظر گرفته شد. با توجه به هدف پژوهش که در آن مناطق سرد نسبی و سرد در مناطق هدف مورد توجه است، به شناسایی نواحی گرم نسبی و گرم پرداخته نشد.

۱۲- تلفیق و واکاوی داده‌ها

کار تلفیق، با بهره گیری از داده‌های سنگ شناسی، شاخص گیاهی، مناطق سایه و شاخص دمای سطح زمین، با بهره‌گیری از GIS، انجام شد. هدف از تلفیق داده‌ها، شناسایی مناطقی است که می تواند تحت تاثیر منابع آب کارستی از محل خطواره‌ها و پیرامون آنها و همچنین انتقال سردی با کاهش نسبی و شدید دما مواجه شده باشند. معیارهای تلفیق به شکل زیر در نظر گرفته شد:

- جستجو به سطح سازندهای انحلال پذیر (کربناته) محدود می‌شود.

- مقادیر کمتر از 0.08 شاخص گیاهی (NDVI)، به عنوان مناطق بدون پوشش گیاهی و یا مناطق با پوشش گیاهی بسیار کم و تنک، که تاثیر آنها بر کاهش دمای سطح زمین قابل چشم پوشی است، در نظر گرفته شد.

- مقادیر کوچکتر از عدد میانگین ۱- برابر انحراف معیار به عنوان آستانه شناسایی مناطق نسبتا سرد و کمتر از آن تا حد میانگین منهای ۲- برابر انحراف معیار، به عنوان معیار شناسایی مناطق سرد در نظر گرفته شد.

- مناطق واقع در سایه و رو به آفتاب، در زمان تصویربرداری به طور جداگانه مورد واکاوی قرار گرفتند و پارامترهای آماری تصویر فروسرخ گرمایی این مناطق جداگانه محاسبه شد.

با تلفیق داده‌های یادشده مناطقی از سنگهای کربناته که

اساس اکثر شاخص‌های گیاهی بر تفاوت رفتار گیاه در بازتاب امواج باندهای سرخ و فروسرخ، استوار است. یکی از شاخص‌های معروف در این زمینه، شاخص گیاهی معروف به شاخص گیاهی نرمال شده یا (NDVI) می باشد. از این شاخص که توسط Rouse و همکاران (۱۹۷۳) معرفی شده در این پژوهش بهره‌گیری شد.

۱۱- شناسایی مناطق سرد

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 می گذارد. امروزه، این نوع تصویر، یکی از مناسب ترین تصاویر فروسرخ گرمایی است که برای بررسی تغییرات گرمایی در سطح زمین در یک منطقه می تواند کاربرد داشته باشد. مقادیر درجه روشنایی تصویر فروسرخ گرمایی نیز مانند دیگر تصاویر سنجنده ETM+ به صورت ۸ بیتی است و گام‌های خاکستری، بین ۰ تا ۲۵۵ تغییر می کنند. اگر چه ارقام ۰ و ۲۵۵ در تصویر به ندرت دیده می شوند، اما در این نوع تصاویر مقادیر نزدیک به صفر به عنوان عوارض و یا پدیده‌های سرد نسبی، و پیکسل‌های با ارزش عددی نزدیک به ۲۵۵، به عنوان عوارض و یا پدیده‌های گرم نسبی در یک تصویر شناخته می شوند.

بررسی‌های مربوط به شناسایی تغییرات و تعیین مرز تغییرات از عدم تغییرات همواره مورد گفتگوی اندیشمندان بوده است. در این راستا، Jensen (1989) و Gale (۱۹۹۲) برای شناسایی آستانه‌های مربوط به تغییرات از عدم تغییرات به پارامترهای میانگین و انحراف معیار تصویر برگرفته از مقایسه توجه نمودند. نامبردگان، آستانه عدد میانگین بعلاوه و منهای یک برابر انحراف معیار را به عنوان دامنه عدم تغییرات معرفی می نمایند. بدون شک، معیار یک برابر انحراف معیار عدد قطعی نیست و می تواند متغیر باشد تا با واقعیت هر منطقه و تصویر مطابقت کند. در بررسی‌های به عمل آمده توسط Jalali و همکاران (۱۹۹۹) به منظور شناسایی تغییرات مربوط به پوشش گیاهی مرتعی در جنوب باختر و باختر ایران، ضریب 0.7 انحراف معیار یعنی عدد میانگین بعلاوه و منهای 0.7 انحراف معیار، برای جداسازی تغییرات از عدم تغییرات به دست آمده است. آنچه که گفته شد برای زمانی است که دو تصویر با زمان متفاوت با هم مقایسه می شوند. در این پژوهش از این یافته و روش، تنها الگویی گرفته

بیشترین پتانسیل کارست‌زایی را از خود نشان می دهند. فراوانی سطح مناطق امید به وجود منابع آب کارستی نسبت به سطح رخنمون سازندهای کربناته استان قزوین در شکل ۶ ارائه شده است.

همان‌گونه که پیشتر اشاره شد، مناطق معرفی شده به عنوان مناطق امید به وجود منابع آب کارستی کم ژرفا، به دلیل نوع تلفیق، لایه‌های اطلاعاتی کمتر از سطح واقعی را در بر می گیرند. این موضوع به این معنی است که تلفیق با بهره‌گیری از معیارهای سخت‌گیرانه انجام گرفته است. در نتیجه مناطق معرفی شده به عنوان مناطق امید، در سطحی کمتر از سطح واقعی ظاهر شده است. بنابراین، احتمال اینکه وسعت واقعی آنها به سمت جایگاه چشمه‌ها گسترش یافته باشد زیاد است. با توجه به اینکه جایگاه چشمه‌ها در دامنه‌ها و نزدیک به خط القعر آبراهه‌ها قرار دارند، انتظار می رود پراکنش لکه‌هایی که به عنوان مناطق امید نمایان شده‌اند از ستیغ بلندی‌ها فاصله گرفته باشد. اگر چه، همان‌گونه که در شکل ۷ نیز نشان می‌دهد بیشتر این لکه‌ها در دامنه‌ها و یال‌ها واقع شده‌اند. جایگاه و ویژگی‌های شماری از چشمه‌های بخش شمالی استان قزوین در جدول شماره ۴، ارایه شده‌اند. منابع آب کارستی ممکن است از حوزه‌های آبخیزی که در آن قرار دارند، حوضه‌های مجاور و یا از فواصل دورتر تغذیه شوند و از طریق فضا‌های انحلالی و گسیختگی‌های شکل گرفته در سازندهای انحلال‌پذیر به شکل چشمه به سطح زمین راه پیدا کنند. با توجه به اینکه حوزه آبخیز محلی که چشمه‌ها در آن واقع هستند از اهمیت زیادی در تغذیه این منابع برخوردارند هستند، محدوده شماری از آن‌ها مشخص و در شکل ۷، ارایه شده‌اند. چشمه‌هایی که در جدول شماره ۴، با شماره ردیف-های ۷، ۱۱، ۱۲، ۲۴، ۳۰، ۳۴، ۳۶، ۳۷ و ۳۹ مشخص شده‌اند، دارای بزرگترین حوزه آبخیز در مقایسه با دیگر چشمه‌ها هستند. در مقابل، چشمه‌های شماره ۶، ۸، ۹، ۱۰، ۱۶ و ۱۹ که دبی‌های کمتری دارند، دارای حوزه‌های آبخیز محلی بسیار کوچکی هستند. در این شکل دبی نسبی هر یک از چشمه‌ها نیز با رسم دایره‌های متناسب با حجم آبدی نشان داده شده‌اند.

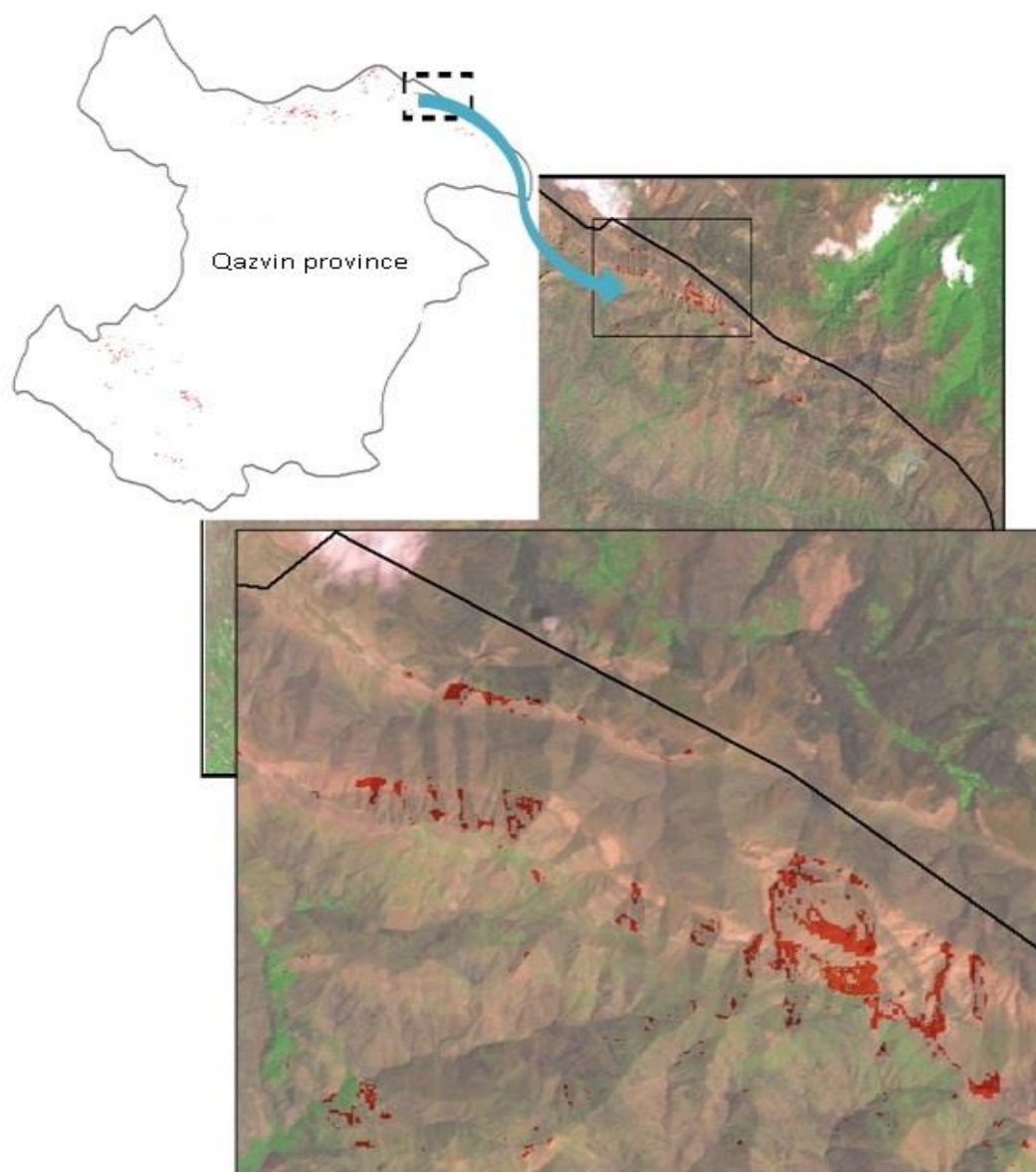
بدون پوشش گیاهی هستند و دمای آن مناطق سرد و یا نسبتاً سرد ارزیابی شده بودند مورد شناسایی قرار گرفتند. وجود چنین مناطقی نشان از عامل یا عواملی دارد که سبب کاهش دما در این مناطق شده‌اند. با توجه به اینکه تاثیر عوامل مختلف موثر از جمله پوشش گیاهی، بارندگی و آبهای سطحی در کاهش دمای سطح زمین در این منطقه و در مدل‌سازی رابطه‌ای به کار رفته به نوعی حذف شدند. می توان نتیجه گرفت که به احتمال زیاد، کاهش دمای سطح زمین در مناطقی که به عنوان مناطق امید به وجود منابع آب کارستی کم ژرفا، معرفی شده‌اند به واسطه شرایط ذاتی و تحت تاثیر شرایط آب زیرزمینی منطقه بوده است.

باید تاکید شود که مناطق معرفی شده به عنوان مناطق امید به وجود منابع آب کارستی کم ژرفا، به دلیل نوع تلفیق، لایه‌های اطلاعاتی کمتر از سطح واقعی را در بر می گیرند. نتیجه تلفیق اطلاعات به روش بالا منجر به تولید نقشه‌ای شد که نشان دهنده پراکنش مکانی مناطق امید به وجود منابع کارستی کم ژرفا در استان قزوین است (شکل ۵). بخش‌هایی از این اطلاعات با وضوح بیشتر بر روی تصویر ماهواره‌ای لندست نشان داده شده است.

۱۳- دستاوردها

بررسی‌ها نشان داد که سازندها و واحدهای سنگ شناسی با نمایه‌های Tr_e^{dl} (لیکا)، Pr^l (روته)، J_1 (لار)، Pr (روته)، OM_q^l (قم)، K_2^l (کرتاسه)، Tr^d (لیکا)، بدون توجه به رخنمون آنها، به ترتیب از بیشترین سطح امید به وجود منابع آب کارستی کم ژرفا برخوردارند (جدول ۱). سنگ‌شناختی، مساحت و زمین‌دیس‌های کارستی سازندهای کربناته در جدول‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است.

پراکنش مکانی مناطق امید به وجود منابع آب کارستی کم ژرفا در سازندهای کربناته منطقه، در شکل ۵ نشان داده شده است. چنانچه رخنمون این سازندها نیز در نظر گرفته شود و به عبارت دیگر سطح مناطق امید نسبت به سطح رخنمون هر واحد سنجیده شود سازندها و واحدهای سنگ-شناسی با نمایه‌های Tr_e^{dl} ، Pr^l ، Tr^d ، OM_q^l ، Pr ، K_2^l و J_1



شکل ۵- پراکنش مکانی مناطق امید به وجود منابع آب کارستی کم ژرفا در شمال استان قزوین (لکه‌های قرمز رنگ) بر روی تصویر ماهواره‌ای ترکیب رنگی کاذب (RGB 7,4,2)

Fig 5- Spatial distribution of areas hoping for shallow karst water resources in the north of Qazvin province (red spots) on a false color composite landsat image (RGB 7,4,2)

بررسی‌ها نشان می‌دهد که شماری از چشمه‌های کارستی منطقه از این شرایط برخوردارند. در شکل ۸، جایگاه چشمه‌ها نسبت به مناطق امید به وجود منابع آب کارستی کم ژرفا نشان داده شده است. چنانچه از این شکل و بررسی جایگاه قرارگیری این چشمه‌ها و همچنین ارتفاع محل چشمه‌ها از سطح دریا نتیجه گرفته می‌شود این است که این چشمه‌ها در همسایگی مناطق امید به وجود منابع آب کارستی و در ارتفاع پایین‌تر از آنها قرار گرفته‌اند. این موضوع

به منظور محاسبه صحت نقشه‌های تولیدشده معمولاً از شاخص‌های گوناگونی مانند "صحت کلی" بهره‌گیری می‌شود. انتظار می‌رود دست کم شماری از چشمه‌های کارستی که اطلاعات مکانی و مختصات جغرافیایی آنها مشخص است در کنار و یا در ارتفاع پایین‌تر از جایگاه مناطق امید قرار گرفته باشند. این که انتظار می‌رود بخشی از این چشمه‌ها در کنار آنها قرار گیرند به این معنی است که امکان دارد چشمه‌ها از منابع آب کارستی ژرف تغذیه شوند. با این حال،

صحت و درستی نتایج این پژوهش را نشان می‌دهد.

جدول ۱- فراوانی و گسترش واحدهای سنگ‌شناسی و سازندها

Table 1. Frequency and expansion of lithological units and formations

Formation symbol	Rock unit	Formation	Percentage of frequency regardless of the outcrops of the formations	Frequency percentage in terms of outcrops of formations
TR _e ^{dl}	Dolomite	Elika	13.98	6.96
P _r ^l	Limestone, Dolomite	Rute	12.91	6.59
J _l	Limestone	Lar	12.25	3.11
P _r	Limestone	Rute	12.23	2.42
OM _q ^l	Limestone	Qom	9.16	1.18
K ₂ ^l	Limestone	Cretaceous	8.43	4.24
T _r ^d	Dolomite	Elika	6.22	6.28
E ^t	Tuff, Limestone	Karaj	5.29	1.02
K _l ^l	Limestone	Tizkuh	4.53	2.21
E ^{dl}	Dolomite, Limestone	Soltanieh	2.43	3.04
E _m ^d	Dolomite	Mila	2.2	5.64
E _{bt} ^{sdl}	Sandston, Dolomite	Barut	1.62	0.74
E _{bt} ^{dl}	Sandston, Dolomite	Barut	1.53	0.33
K ₂	Limestone	Cretaceous	1.34	0.62
E _l	Limestone	Karaj	1.26	1.09
D _{Cs}	Sandstone, Dolomite	Sinak	1.05	1.22
T _r ^l	Limestone	Elika	1	7.69
E ₅ ^{wbt}	Tuff, Limestone	Karaj	0.91	0.34
E _m	Limestone, Dolomite	Mila	0.64	1.12
J _{dl} ^{ml}	Limestone	Dalichai	0.23	2.30
E _n	Limestone	Ziarat	0.2	0.28
I	Limstone	Karaj	0.15	0.12
K _{l1}	Limestone	Tizkuh	0.12	0.46
J _d	Limestone	Dalichai	0.11	1.38
P _d ^s	Sandstone, Limestone	Dorud	0.07	1.00
P	Limestone, Shale	Permian	0.07	0.33
K _l	Limestone	Tizkuh	0.06	0.17
TR _e ¹	Limestone	Elika	0.02	0.29
C	Sandstone, Dolomite	Sinak	0.01	0.07
C _m ^{lml}	Limestone	Mobarak	0.01	0.09

جدول ۲- سنگ شناختی، مساحت و زمین دیس های کارستی سازندهای کریناته منطقه الموت (شمال استان)

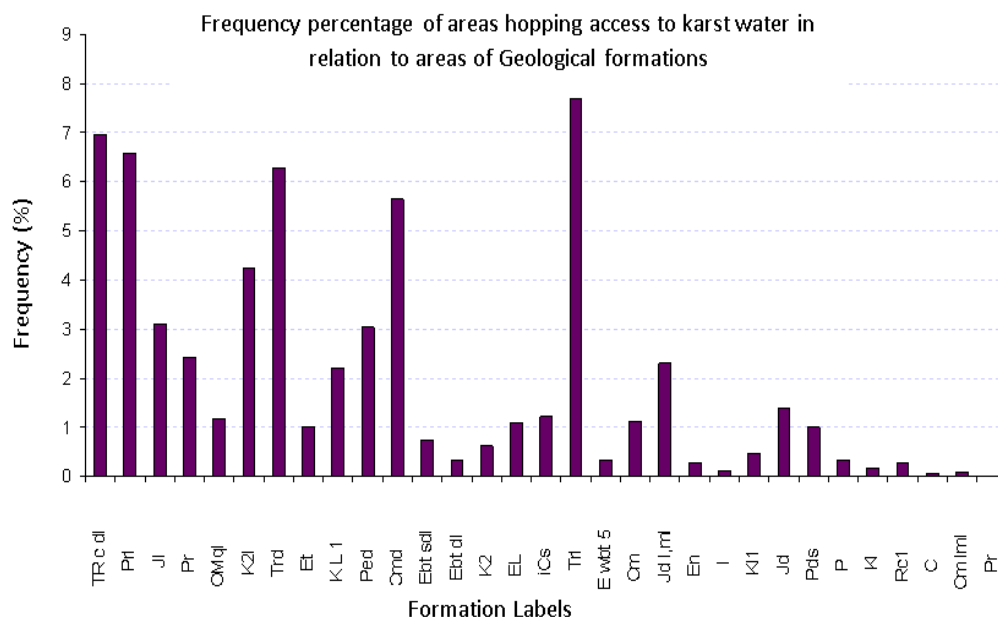
Table 2. Petrology, area and karstic landforms of carbonate formations in Alamut region (northern province)

Relative degree of karstification ((from high to low))	(Karstic Landforms)	Area (km ²)	Lithology	Geological time	Carbonate formations
1	Microkarren, karren, grike, rain pit, dissolution pit, vug and cave	139.95	Limestone, dolomitic limestone	Permian	Ruteh
2	Microkarren, karren, grike, vug and cave	51.61	Dolomitic limestone, dolomite	Triassic	Elika
3	Microkarren, karren, grike, rain pit, dissolution pit, vug and cave	28.91	Limestone	Cretaceous	Tizkuh
4	Microkarren, karren, grike, rain pit, dissolution pit	8.23	Limestone	Jurassic	Lar
5	Microkarren, karren, grike, rain pit	10.6	Dolomite and calcareous dolomite	Cambrian	Soltanieh

جدول ۳- سنگ شناختی، مساحت و زمین دیس های کارستی سازندهای کریناته جنوب استان

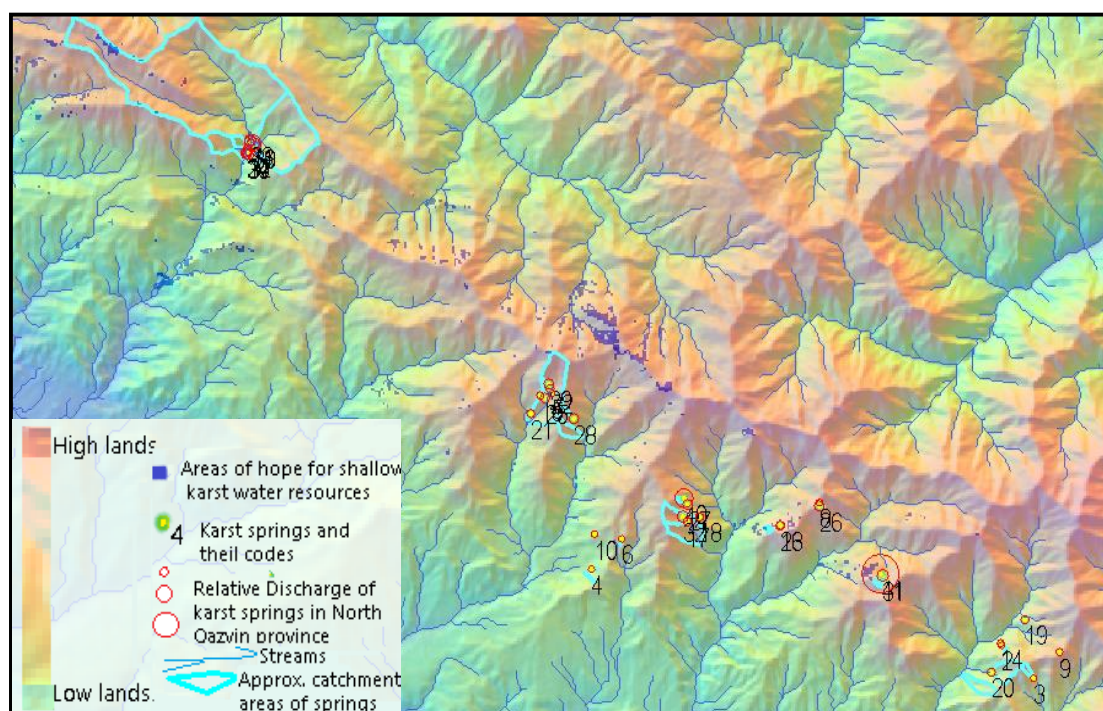
Table 3. Petrology, area and karstic landforms of carbonate formations in the south of the province

Relative degree of karstification ((from high to low))	(Karstic Landforms)	Area (km ²)	Lithology	Geological time	Carbonate formations
1	Grike, dissolution pit, vug and cave	129.19	Limestone	Oligomiocene	Qom
8	karren	9.67	Limestone	Eocene	Ziarat
6	karren, dissolution pit	64.09	Limestone, Calcareous mudstone	Cretaceous	Cretaceous
5	Microkarren, karren, rain pit	65.72	Dolomite, limestone, gypsum	Jurassic	Lar
7	Microkarren, karren	1.42	Dolomite	Triassic	Elika
2	Microkarren, karren, Cracked karren, rain pit	10.74	Limestone & Dolomite	Permian	Ruteh
3	Microkarren, karren, Cracked karren, dissolution pit	7.77	Limestone, shale, dolomite	Cambrian	Mila
4	Microkarren, karren	17.82	Dolomite	Cambrian	Soltanieh



شکل ۶- فراوانی سطح مناطق امید به وجود منابع آب کارستی کم ژرفا نسبت به سطح رخنمون سازندهای کربناته

Fig 6- Areas frequency of hope for shallow karstic water resources relative to the outcrop surface of carbonate formations



شکل ۷- جایگاه مناطق امید به وجود منابع آب کارستی کم ژرفا، چشمه‌های پیرامون و حوزه‌های آبخیز محلی آنها در شمال استان قزوین

Fig 7- Spatial distribution of areas of hope for shallow karst water resources and surrounding springs and their relevant micro-catchments at Northern part of Qazvin province

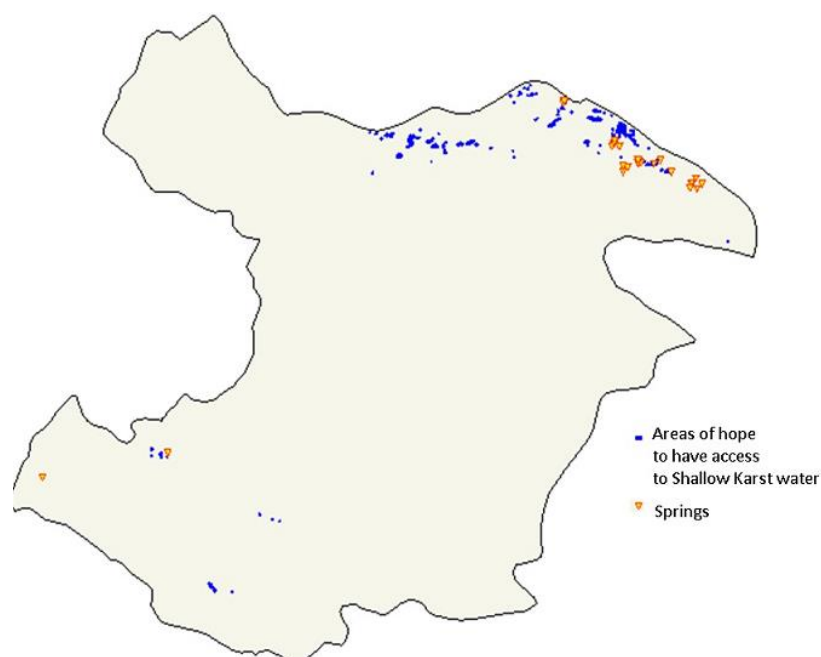
جدول ۴- مشخصات شماری از چشمه‌های کارستی شمال استان قزوین

Table 4: characteristics of a few karst springs at Northern part of Qazvin province

No.	X_UTM	Y_UTM	Altitude (m.)	Formation	Spring name	Code	Village	Year	Month	Day	Discharge	Ec	PH	Temp. (C)
1	469821	4035191	2500	Carbonate	Meshke dare	1310	Heniz	1382	4	29	5	200	6.5	12
2	471237	4033873	2620	Carbonate	Graklu bala	1310	Vanash Bala	1382	5	16	5	300	7	10
3	452118	4037821	2180	Carbonate	Ab dare	1310	Verin	1383	5	13	5	300	7	16
4	450191	4045021	2813	Carbonate	Bosh aband	1310	Zarabad	1383	5	3	5	200	7	18
5	453371	4039111	2564	Carbonate	Vio	1310	Shamskalay	1383	5	24	5	200	7	16
6	436981	4055015	1983	Carbonate	Qizqan chal	1310	Viar	1383	7	3	5	100	7	9
7	461845	4040833	2950	Carbonate	Chorisar	1310	Kochenan	1382	4	3	6	200	7	13
8	472345	4034972	2850	Carbonate	Zadare	1310	Vanash Bala	1382	5	16	6	200	7	12
9	452206	4039273	2307	Carbonate	Karichak	1310	Verin	1383	5	13	6	300	7	19
10	437002	4054980	2031	Carbonate	Paieen khorram	1310	Viar	1383	7	3	6	100	7	10
11	436858	4054594	2104	Carbonate	Vahgol	1310	Viar	1383	7	4	6	100	7	10
12	335073	3969971	2192	Carbonate	Aradarband.	4109	Oruchan	1383	6	19	7	310	7.2	13
13	469783	4035269	2400	Carbonate	Abkhor	1310	Kalaye	1382	4	30	7	300	7	13
14	449711	4044917	2788	Carbonate	Cheshmemark	1310	Zavardasht	1383	5	16	8	100	6.5	16
15	460170	4039868	2790	Carbonate	Karmabdare	1310	Kochenan	1382	4	3	10	200	7	13
16	456180	4039895	2590	Carbonate	Godasang	1310	Kochenan	1382	4	5	10	200	7	13
17	456700	4040106	2500	Carbonate	Eskaman	1310	Kochenan	1382	4	6	10	200	7	13
18	470810	4036273	2700	Carbonate	Sefidkuh	1310	Kalaye	1382	4	30	10	300	6.5	11
19	469415	4034066	2700	Carbonate	Losar	1310	Etan	1382	4	24	10	0	5	12
20	449321	4044170	2560	Carbonate	Lazerje	1310	Zavardasht	1383	5	16	10	100	6.5	0
21	450121	4045221	2894	Carbonate	Kochal	1310	Zarabad	1383	5	3	10	200	7	16
22	460172	4039853	2800	Carbonate	Tarokno	1310	Kochenan	1382	4	3	12	300	7	13
23	436830	4054592	2084	Carbonate	Vahgol	1310	Viar	1383	7	4	12	100	7	9
24	449921	4044822	2793	Carbonate	Siahnamak	1310	Zavardasht	1383	5	16	14	100	6.5	15
25	461825	4040716	2930	Carbonate	Sarcheshme	1310	Kochenan	1382	4	3	15	200	7	12
26	456170	4040600	2600	Carbonate	Dizkhani	1310	Kochenan	1382	4	5	15	200	7	12
27	451170	4044017	2931	Carbonate	Takhabakuh	1310	Evan	1383	5	15	15	0	7.5	19
28	450071	4045412	2993	Carbonate	Kharachal	1310	Zarabad	1383	5	3	15	200	7	17
29	436836	4054539	2074	Carbonate	Vahgol	1310	Viar	1383	7	4	15	100	7	8
30	464638	4037913	3120	Carbonate	Shatan K.	1310	Gazorkhan	1382	3	29	20	100	7.5	13
31	455984	4040112	2600	Carbonate	Tifchalak	1310	Kochenan	1382	4	5	20	200	7	12
32	436951	4055069	1959	Carbonate	Qizqan chal	1310	Viar	1383	7	3	20	100	7	10
33	436807	4054555	2081	Carbonate	Vahgol	1310	Viar	1383	7	4	20	100	7	9
34	302895	3964192	1993	Carbonate	Bashbulagh	4109	Shahiar	1383	8	7	25	400	7.2	13
35	437077	4054960	2029	Carbonate	Paieen khorram	1310	Viar	1383	7	3	25	100	7	9
36	436852	4054567	2091	Carbonate	Vahgol	1310	Viar	1383	7	4	25	100	7	8
37	302907	3964194	1994	Carbonate	Bashbulagh	4109	Shahiar	1383	8	7	30	400	7.2	13
38	437059	4054962	2035	Carbonate	Paieen khorram	1310	Viar	1383	7	3	35	100	7	9
39	456014	4040872	2700	Carbonate	Saker	1310	Kochenan	1382	4	3	40	200	7	12
40	464544	4037980	3200	Carbonate	Shatan dare B.	1310	Khoshkchal	1382	3	30	100	100	8	12

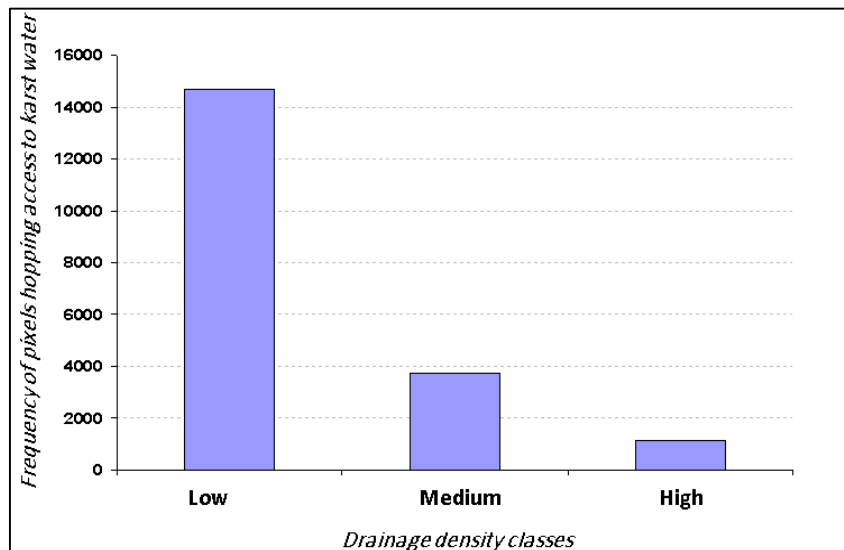
همان گونه که اشاره شد سنگ‌های کربناته موجود در شمال استان قزوین به دلیل انحلال پذیری، دارای تراوایی بالایی هستند. در نتیجه از میزان رواناب سطحی در این مناطق کاسته شده و این کاهش سبب کاهش فشردگی آبراهه‌ها می‌شود. با این توصیف، از آنجا که فشردگی شبکه آبراهه‌ها رابطه وارونه با تراوایی سازندها دارد بنابراین فشردگی آبراهه‌ها می‌تواند به عنوان شاخصی برای ارزیابی یافته‌ها مورد بهره‌گیری قرارگیرد.

بررسی‌های به عمل آمده با بهره‌گیری از تلفیق نقشه‌های مناطق امید به وجود منابع آب کارستی و لایه‌های فشردگی آبراهه‌ها نشان داد بیش از ۷۵٪ مناطق امید معرفی شده، در ناحیه با فشردگی کم آبراهه واقع می‌شوند و فراوانی مساحت این مناطق با افزایش فشردگی شبکه آبراهه به شدت و به کمتر از ۵٪ کاهش می‌یابد (شکل ۹).



شکل ۸- جایگاه چشمه‌ها نسبت به مناطق امید به وجود منابع آب کارستی کم ژرفا در استان قزوین

Fig 8- The location of springs in relation to the areas of hope for the existence of shallow karst water resources in Qazvin province



شکل ۹- فراوانی سطح مناطق امید به وجود منابع آب کارستی کم ژرفا در لایه‌های مختلف فشردگی آبراهه‌ها

Fig 9- Areas frequency of hope for shallow karstic water resources in different drainage layers' density

سپاسگزاری

این سازمان، همچنین معاونت پژوهشی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی در اجرای این پژوهش سپاسگزاری نمایند.

نویسندگان این مقاله وظیفه خود می‌دانند از پشتیبانی و کمک‌های سازمان آب منطقه‌ای استان قزوین، کارشناسان و مدیران

مراجع

- Alavipanah, K., 2016. Thermal remote sensing and its application in earth sciences. Tehran University Publications.
- Alizadeh, A., 2014. Principles of applied hydrology. 34th edition, Astan Quds Razavi Publishing House.
- Astier, J.L., 1974. Application of geophysics to groundwater exploration (Geophysique appliqué Al' Hydrogeologie), 120 Bd Saint-Germain, Paris.
- Avish M.F., Ranjbar H., Hojjat A., Karimi Nasab S., Masoumi A., 2016. Remote sensing and magnetometry studies for the exploration of geothermal resources in Sirch-Golbaf area of Kerman province. Applied Geophysics Research Journal, 3 (11-33): 99-118, <https://doi.org/10.22044/JRAG.2017.885>
- Daneshkar Arasteh, P., Tajirishi, M., Saghafian, B., 2005. Identification of surface temperature using remote sensing technology in Sistan Region, Water and Watershed Journal 2 (2), 13-21. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2011.101915>
- Engman, E.T., Gurney, R.J., 1991. Remote sensing in Hydrology, Chapman and Hall, London, p. 225.
- Ford, D.C., Williams, P.W., 2007. Karst Hydrogeology and Geomorphology, John Wiley and Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, p. 562.
- Gale, W., 1992. The potential of satellites for wide area surveillance of Australia. Royal Australian Air Force Air power studies center.
- Ghazanfari, P., Bakhtiari, M., Taj-abadi, M., 2016. Karst landforms and springs of Alamut valley, north of Qazvin. Quaternary of Iran 2 (8), 353-366.
- Ghazanfari, P., Bakhtiari, M., Jalali, N., 2014. Karstification of carbonate rocks using RS and GIS in Alamut region, North Qazvin. Iran Quaternary 4, 339-352.
- Ghazanfari, P., Jalali, N., Tajabadi, M., 2014. Evaluation of the potential of karst water resources in Qazvin province using RS and GIS new methods. Regional Water Organization of Qazvin Province (Unpublished report).
- Ghobadi, M.H., Taleb Beidokhti, A.R., Momeni, A.A., 2010. The role of lithology and tectonic structures in karst expansion, watershed change and the quality of karst springs in Qazvin Abegarm area. Journal of Iranian Association of Engineering Geology 3 (3-4), 1-12
- Heilman, J.L., Moore, D.G., 1979. Ground water applications of the Heat Capacity Mapping Mission. In: Deutsch, M.D.R., Rango, W.A., (Eds.). Satellite Hydrology. American Water Resources Association, pp. 447-451.
- Jalali, N., Fatehi, A., Norouzi, A.A., Kheirkhah, M.M., Mirghasemi, S.A., 1999. Change Detection of Natural Vegetation Cover in the Territory of Iran Caused by Pollution Resulting from the Kuwaiti Oil well fires during the 1991 Persian Gulf War, Soil Conservation & Watershed Management Research Center of I.R of Iran, . ISBN, ITC publication No.: 9061641608
- Jalali, N., Kazemi, R., 2020. Identification of subsurface spaces in Shiramin Azarshahr region using thermal infrared satellite images. Journal of Advanced Applied Geology 3 (10), 370-381. <https://doi.org/10.22055/AAG.2019.28880.1955>
- Jalali, N., Saghafian, B., Imanov, F., Museyyibov, M., 2009. Recognition of shallow karst water resources and cave potentials using thermal infrared image and terrain characteristics in semi-arid regions of Iran. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 11, 439-447. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2009.08.001>
- Japan Remote Sensing Association 1996. Basics of Remote Sensing. Translated by: Farshid Jahedi and Shahrokh Farrokhi, Iran Remote Sensing Center Publications.
- Jensen J.R., 1989,. Introductory digital image processing. A remote sensing [perspective Prentice-hall, Englewood Cliff, New Jersey, p. 656.
- Legg, C., 1995. Remote Sensing and Geographic Information Systems: Geological Mapping, Mineral Exploration and Mining. Wiley & Sons, p. 172.
- Naseri, H.R., Khodayi, K., 2000. Preparing a map of contours and vegetation as an indicator of underground water in the karst region of the north of Oshnaviye city using satellite data, the 4th conference of the Earth Society Iranian Studies, Tabriz.
- Milanovic', P.T., 1981. Karst Hydrogeology, Water Resources Publications, Littleton, Co. p. 434.

- Meijerink, A.M.J., Bannert, D., Batelaan, O., Lubczynski, M.W., Pointet, T., 2008. Remote Sensing Application to Groundwater, IHP-VI, Series on Groundwater, No. 16, ITC, Enschede, The Netherlands.
- Rinker, J.N., 1974. An application of air photo analysis to a cave location study: Proceedings of the 40th annual meeting, American Society of Photogrammetry, 281-289.
- Rinker, J.N., 1975. Airborne infrared thermal detection of caves and crevasses. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 44(11), 1391-1400.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., 1973. Monitoring vegetation systems in the great plain with ERTS, Third ERTS Symposium, NASA SP-351 I, 309-317.
- Shopov, Y., Ognianov, O., Filipov, A., Ivanov, I.R., 2019. Development of Technology for Remote Location of Unknown Underground Cavities and Deep-Seated Rockslides by Unmanned Air Systems (UAS). Journal of Physics: Conference Series, 13p. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1368/3/032032>
- Sobrino, J.A., Raissouni, N., 2000. Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring application to Morocco. International journal of remote sensing 21, 353-366. <https://doi.org/10.1080/014311600210876>
- Theilen-Willige, B., 2018. Detection of Karst Features in the Black Hills Area in South Dakota/Wyoming, USA, Based on Evaluations of Remote Sensing Data, Geosciences 8 (6), 192; <https://doi.org/10.3390/geosciences8060192>
- Travaglia, C., Ammar, O., 1998. General Organization of Remote Sensing, Syrian Arab Republic. Groundwater exploration by satellite remote sensing in the Syrian Arab Republic, RSC Series 76, FAO 1998.
- Unal, A., Tufekchi, K., 2000. Using of Geographic Information System Techniques and Satellite Images in the Covered Karst Areas: Amasra-Arit Example, NW of Turkey, proceeding of international symposium on Karst, Karst-(2000), Ankara.
- Waren Campbell, C., Abd El Latif, M., 1996. Application of Thermography to Karst Hydrology. Journal of Cave and Karst Studies 58(3), 163-167.