



Application of remote sensing to promote geotourism of the Mineral springs of Taftan Mountain

Aliyeh Seifi^{1*}, Mahdiah Hosseinjanizadeh²

¹ Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

² Department of Ecology, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

Article Info	Abstract
Keywords: Geotourism Taftan ASTER image Google Earth	<p>The Taftan region in Sistan and Baluchestan, with its diverse natural features including mountains, valleys, springs, caves, and natural lakes holds significant geotourism and ecotourism value. In this study, satellite imagery and Google Earth were employed as remote sensing technologies to identify the locations of mineral springs and to develop a geotourism map of these geothermal features. The band ratio technique, one of the effective methods used in multispectral ASTER imagery, was applied to enhance minerals associated with the depositional zones of mineral springs and to map the vegetation cover within the area. Following the enhancement of calcite, gypsum, jarosite, and opal/chalcedony minerals, potential mineral spring locations were prioritized based on the presence or absence of these minerals and the distribution of vegetation. The results of mineral and vegetation enhancement, along with the potential mineral spring zones, were subsequently transferred to Google Earth, where the definitive locations of the mineral springs were visually identified. In the final stage, a geotourism map of the mineral springs was produced based on their precise locations and flow paths. Prioritizing areas according to mineral presence and vegetation cover significantly improved the speed of detecting mineral spring locations on the slopes of Mount Taftan and around Lake Lavan. Additionally, incorporating the visual characteristics of spring-related deposits and the presence of water flow at each site improved the accuracy of mineral spring identification and the delineation of geotourism routes associated with Taftan's geothermal springs. The resulting geotourism map of the Taftan mineral springs will play an important role in planning geotourism development and facilitating travel planning for tourists and mountaineers visiting Mount Taftan.</p>

*Corresponding author: Aliyeh Seifi

Email: aliyeh.seifi@birjand.ac.ir

<https://doi.org/10.48306/jgrs.2025.549139.1020>

Received November 2024; Accepted December 2024

©2025 Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran. This is an open article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)

Extended abstract

1- Introduction

The Taftan region in Sistan and Baluchestan is rich in natural and geological features, including mountains (Panj Angosht, Jamchin, and Taftan volcano), valleys (Tarshab, Tamin, Kousheh, and Gol), springs (Dehpabid, Sangan, Taftan, Panahgah, and Paylak), and caves (Puseh and Ladiz), making it a significant area for geotourism and ecotourism. The region's stunning landscapes, scenic beauty, mineral springs, and sulfur gas emissions from the mountain's heights and slopes combine to create excellent opportunities for geotourism and mountaineering activities. Since field studies in areas with geotourism potential have not been efficient in terms of time and cost, geotourism surveys can instead be conducted by identifying existing surface indicators such as vegetation presence, specific mineralogy and lithology, and distinct morphology through remote sensing. Therefore, this study will utilize satellite images and Google Earth as remote sensing technology to locate mineral springs and their access routes, as well as to develop a geotourism map of the mineral springs. Taftan volcanic mountain is situated at the intersection of Taftan, Mirjaveh, and Khash counties in Sistan and Baluchestan province, in southeastern Iran. Surrounding Taftan Mountain are well-known tourist villages named Tamin and Tamandan. Notable features of Taftan volcano include sulfur gas emissions (fumarole), mineral springs, and acidic waters.

2- Methodology

The locations of the springs were identified through observations on Google Earth, and their access paths were established by following the water flow and waterways. These paths constitute the geotourism routes of the Taftan mineral springs. These routes will be valuable for the Cultural Heritage and Tourism Organization of Sistan and Baluchestan Province in planning the development of geotourism around the Taftan mineral springs. Additionally, they will serve a key role in organizing trips to Mountain Taftan for both tourists and mountaineers. This study utilized cloud- and snow-free ASTER sensor images from the Taftan region dated June 19, 2007, to identify minerals related to mineral spring deposits and to map regional vegetation. Log residuals calibration was applied to the ASTER data to correct for solar radiation, atmospheric transmission, instrument gain, topographic effects, and albedo. Based on previous research by Moore et al. (2005) on Taftan's mineral springs, minerals such as calcite, gypsum, jarosite, and opal/chalcedony were identified as indicators of these deposits. The band ratio technique, effective for detecting geological features in multispectral images, was employed to highlight these minerals. Calcite was identified using the band ratio method from Ninomiya (2003), while gypsum, jarosite, and opal/chalcedony were detected following the band ratios from Seifi et al. (1401). Vegetation mapping was conducted using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). After highlighting, areas with the highest concentrations of the specified minerals and vegetation around Taftan Mountain were prioritized to infer probable mineral spring locations based on their presence or absence. These highlighted mineral and vegetation zones, along

with prioritized areas, were imported into Google Earth for visual inspection to confirm mineral spring locations. Finally, geotourism routes were established based on the identified mineral spring sites.

3- Results

Taftan Mountain, known for its fumarole and mineral springs, is considered a promising geotourism site in Sistan and Baluchestan Province. The springs are sulfate-type, and deposits of calcite, gypsum, jarosite, and opal/chalcedony have formed at their outlets. Vegetation is also expected to be present around these springs. The NDVI image reveals vegetation on the slopes of Taftan, along the western waterways leading to the mountain, and in villages within the study area. Minerals such as calcite, gypsum, jarosite, and opal/chalcedony were identified on Taftan Mountain. The detection of gypsum, jarosite, and opal/chalcedony aligns with findings from Seifi et al. (1401), whereas the highlighted calcite differs: this study found calcite mainly in the south of Taftan, while Seifi et al. (1401) reported it in the north.

Potential mineral spring sites were investigated and ranked based on the presence or absence of calcite, gypsum, jarosite, and opal/chalcedony minerals, along with vegetation cover. Sites containing all four minerals or three minerals plus vegetation were assigned highest priority. Sites with three minerals alone, or two minerals accompanied by vegetation, were designated second priority. Within the study area, 36 sites were classified as first priority (marked with circles) and 26 as second priority (marked with squares), the majority of which exhibited vegetation. To identify definitive mineral spring locations, mineral and vegetation highlights were overlaid with priority zones and visually assessed in Google Earth. Using visual cues such as green sediment presence and water flow, combined with matches to highlighted minerals and vegetation, spring locations were pinpointed in Google Earth. A total of 26 springs were identified on the southern to western slopes of Taftan Mountain, most aligning with priority areas, with a few outside these areas. Springs on the western slopes displayed more extensive sediment deposits, whereas southern springs had smaller sediments identifiable by visible water flow. Among the top-priority locations, one exhibited features resembling a pool upon visual inspection, identified as a natural pond named Lake Lavan, fed by numerous springs at its base. Local villages such as Tarshab, Tamandan, Valan, Tamin, and Lahramba overlapped with first priority areas, while Jash and Kousheh aligned with second priority zones.

4- Conclusion

The locations of the springs were identified through observations on Google Earth, and their access paths were established by following the water flow and waterways. These paths constitute the geotourism routes of the Taftan mineral springs. These routes will be valuable for the Cultural Heritage and Tourism Organization of Sistan and Baluchestan Province in planning the development of geotourism around the Taftan mineral springs. Additionally, they will serve a key role in organizing trips to Mountain Taftan for both tourists and mountaineers.

کاربرد سنجش از دور برای توسعه ژئوتوریسم چشمه‌های آب معدنی کوه تفتان

عالیه سیفی*^۱، مهدیه حسینجانیزاده^۲

^۱گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند

^۲گروه اکولوژی، پژوهشکده علوم محیطی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

چکیده:

منطقه تفتان در سیستان و بلوچستان با دارا بودن پدیده‌های متعدد مانند کوه‌ها، دره‌ها، چشمه‌ها و غارها به همراه دریاچه‌های طبیعی دارای اهمیت ژئوتوریسم و اکوتوریسم است. در این مطالعه از تصاویر ماهواره‌ای و گوگل ارث به عنوان تکنولوژی سنجش از دور برای تعیین موقعیت و همچنین تهیه نقشه ژئوتوریسم چشمه‌های آب معدنی استفاده شده است. از روش نسبت بانندی که یکی از روش‌های مناسب در تصاویر چندطیفی سنجنده استر است، برای بارزسازی کانی‌های مرتبط با ته نشست‌های محل چشمه‌های آب معدنی و نقشه برداری پوشش گیاهی موجود در منطقه استفاده گردید. پس از بارزسازی کانی‌های کلسیت، ژیپس، ژاروسیت و اپال/کلسدونی، مکان‌های احتمالی چشمه‌های آب معدنی براساس وجود یا عدم وجود کانی‌های مذکور و پوشش گیاهی اولویت‌بندی شدند. سپس نتایج بارزسازی کانی‌ها و پوشش گیاهی به همراه محدوده‌های احتمالی چشمه‌ها به محیط گوگل ارث منتقل شده و به صورت بصری مکان‌های قطعی وجود چشمه‌های آب معدنی تعیین گردید. در مرحله نهایی، نقشه ژئوتوریسم چشمه‌های آب معدنی براساس موقعیت چشمه‌ها و مسیرهای آنها تهیه شد. اولویت بندی محدوده‌ها براساس وجود یا عدم وجود کانی‌ها و پوشش گیاهی باعث افزایش سرعت در شناسایی محل چشمه‌های آب معدنی در دامنه‌های تفتان و همچنین دریاچه طبیعی لاوان گردید. مدنظر قرار دادن ویژگی‌های بصری ته نشست‌های محل چشمه‌ها و وجود جریان آب متعلق به هر چشمه موجب افزایش دقت در شناسایی چشمه‌ها و تعیین مسیرهای ژئوتوریسم چشمه‌های آب معدنی تفتان گردید. نقشه ژئوتوریسم چشمه‌های آب معدنی تفتان برای برنامه‌ریزی توسعه ژئوتوریسم و برنامه‌ریزی سفر گردشگران و کوهنوردان به کوه تفتان نقش مهمی ایفا خواهد کرد.

واژگان کلیدی: ژئوتوریسم، تفتان، تصویر استر، گوگل ارث

۱- مقدمه

زمین‌گردشگری (ژئوتوریسم) و زیست‌بوم‌گردی (اکوتوریسم) زیرمجموعه صنعت گردشگری هستند و ژئوتوریسم از جنبه‌های ناشناخته گردشگری پایدار بوده که به معرفی پدیده‌های زمین‌شناسی به گردشگران می‌پردازد (ممیز و همکاران، ۱۳۹۱؛ زمانی، ۱۳۹۷). عارضه‌های زمین‌شناسی مانند چشمه‌های آب معدنی (گرم/ سرد)، رودخانه‌ها، آبشارها، معادن، دامنه‌های کوهستانی و غیره به عنوان میراث زمین‌شناختی و ژئومورفولوژیکی نشان‌دهنده سرگذشت زمین‌شناسی هر منطقه می‌باشند و ارزش ژئوتوریسم دارند (زمانی، ۱۳۹۷). تا سال ۲۰۲۵، ۲۲۹ ژئوپارک جهانی یونسکو در سراسر جهان در حدود ۵۰ کشور واقع شده که مناطقی با اهمیت زمین‌شناسی بین‌المللی همراه با توسعه پایدار و مشارکت جامعه محلی هستند (سایت یونسکو، ۲۰۲۵). سه ژئوپارک ارس، قشم و طبس از کشور ایران ثبت جهانی یونسکو شده است (سایت یونسکو، ۲۰۲۳a، ۲۰۲۳b و ۲۰۲۵). این در

حالی است که منطقه تفتان در سیستان و بلوچستان با دارا بودن پدیده‌های طبیعی و زمین‌شناختی متعدد مانند کوه‌ها (کوه پنج انگشت، کوه جم‌چین و قله تفتان)، دره‌ها (دره ترشاب، دره تمین، دره کوشه و دره گل)، چشمه‌ها (دهپابید، سنگان، تفتان، پناهگاه و پایلک) و غارها (غار پوسه و غار لادیز) به همراه دریاچه سردریا و حوضه آبریز سنگان اهمیت ژئوتوریسم و اکوتوریسم دارد (بومری، ۱۳۸۴؛ بلوچی، ۱۳۹۱؛ شاکری و همکاران، ۱۳۹۴). آتشفشان نیمه فعال تفتان که دارای قله متعدد و نشانه‌های مناطق زمین‌گرمایی مانند دودخان و چشمه‌های آب معدنی می‌باشد، با ارتفاع تقریبی ۴۰۵۰ متر از سطح دریا به بام استان سیستان و بلوچستان معروف است (سیفی و همکاران، ۱۴۰۱). به طور کلی، طبیعت زیبا و چشم‌اندازهای دلنواز تفتان به همراه وجود چشمه‌های آب معدنی (گرم و سرد) و خروج بخارات و گازهای گوگردی در ارتفاعات و دامنه‌های این کوه پتانسیل زیادی برای انجام فعالیت‌های ژئوتوریسمی و کوهنوردی در این منطقه ایجاد کرده است.

با توجه به اینکه مطالعات میدانی مناطق دارای پتانسیل ژئوتوریسم از نظر وقت و هزینه مقرون به صرفه نبوده است لذا انجام بررسی‌های ژئوتوریسمی با شناسایی نشانه‌های سطحی موجود مانند وجود پوشش گیاهی، کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی خاص، مورفولوژی ویژه و غیره توسط تصاویر ماهواره‌ای امکانپذیر خواهد بود. در میان ماهواره‌های چندطیفی موجود سنجنده تابش‌سنج بازتابی و گسیلش گرمایی فضابرد پیشرفته (استر) به دلیل دارا بودن باندهای طیفی در محدوده‌های مرئی-فروسرخ نزدیک، فروسرخ موج کوتاه و فروسرخ حرارتی برای نقشه‌برداری آثار اکوتوریسمی و ژئوتوریسمی مانند پوشش گیاهی و تهنشست‌های مرتبط با چشمه‌های آب گرم مفید می‌باشد (سیفی و همکاران، ۱۴۰۱). بعلاوه گوگل ارث با دارا بودن تصاویر با قدرت تفکیک بالا مانند تصاویر شرکت ایرباس (<https://www.airbus.com>) و مدل‌های رقومی دقیق جهت دید سه‌بعدی، امکان بررسی بصری پدیده‌های ژئوتوریسمی را تسهیل می‌کند. تاکنون تحقیقات متعددی از تکنولوژی سنجنش از دور به همراه سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) برای ارزیابی پتانسیل اکوتوریسم و ژئوتوریسم مناطق مختلف ایران مانند گرگان، چابهار، ورسک، کرمان و رفسنجان استفاده نموده است (بزرگ نیا و همکاران، ۱۳۹۱؛ ناصری و کامیابی، ۱۳۹۱؛ اولادی، ۱۳۹۳؛ زمانی، ۱۳۹۷؛ حسینجانی زاده و همکاران، ۱۳۹۷ و ۱۳۹۹). بزرگ نیا و همکاران (۱۳۹۱) و اولادی (۱۳۹۳) بر اکوتوریسم تاکید داشته به طوری که مناطق بالقوه اکوتوریسم در ناحیه نهارخوران (گرگان) و منطقه جنگل عباس آباد (ورسک) را با استفاده از سنجنش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی تعیین کردند. ناصری و کامیابی (۱۳۹۱)، زمانی (۱۳۹۷)، حسینجانی زاده و همکاران (۱۳۹۷ و ۱۳۹۹) مطالعات ژئوتوریسم را مدنظر قرار داده‌اند به گونه‌ای که مناطق دارای پتانسیل ژئوتوریسم در شهرستان‌های چابهار، کرمان و رفسنجان را با روش فوق‌الذکر مشخص کرده‌اند.

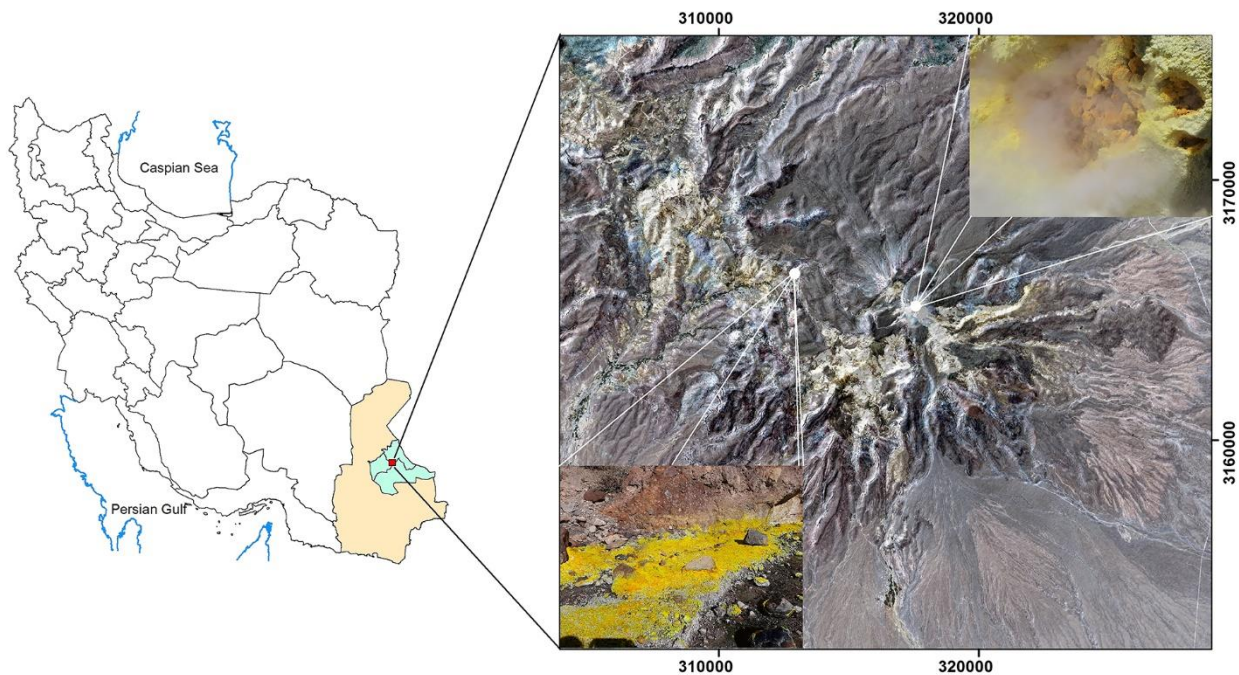
کوه تفتان به دلیل دارا بودن ویژگی‌های منحصر به فرد از جمله خروج گازهای گوگردی و چشمه‌های آب معدنی گرم و سرد مورد توجه محققان بسیاری در علوم مختلف بوده است به طوری که در تحقیقات زمین‌شناسی مشخصات گازهای خروجی، آب چشمه‌های دامنه کوه و تهنشست‌های حاصل از آن تعیین شده است (بومری، ۱۳۸۴؛ مر و همکاران، ۱۳۸۴؛ مختاری و احمدی، ۱۳۹۱). در مطالعات جغرافیایی جنبه‌های اکوتوریسمی و ژئوتوریسمی کوه تفتان و محدوده‌های اطراف آن مورد بررسی قرار گرفته و مناطق بالقوه آن تعیین شده است (بلوچی، ۱۳۹۱؛ رخشانی بجد، ۱۳۹۲؛ لطیفی پور، ۱۳۹۳). در هیچ یک از این مطالعات از سنجنش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی استفاده نشده است؛ به عنوان مثال بلوچی (۱۳۹۱) و بلوچی و باقریان (۱۳۹۳) پدیده‌های ژئومورفیک شامل کوه پنج انگشت، دره ترشاب، دره تمین، کوه جم‌چین، چشمه دهپابید، دره کوشه، دره گل، روپس، دریاچه سردریا، حوضه آبریز سنگان، غار پوسه، غار لادیز و قله تفتان را با روش پراونگ بررسی کرده و نقش هر یک

را در توسعه ژئوتوریسم مشخص نمودند. تنها مطالعه دورسنجی ژئوتویسمی در کوه تفتان توسط سیفی و همکاران (۱۴۰۱) انجام شده است که آنها در این مطالعه کانی‌های مرتبط با نشانه‌های زمین گرمایی شامل دودخان و تهنشست‌های چشمه‌های آب گرم را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای آشکارسازی کردند. با این وجود، تحقیقی که در آن موقعیت چشمه‌های آب معدنی (گرم و سرد) با هدف ژئوتوریسم توسط سنجش از دور تعیین شده باشد انجام نشده است. بنابراین در این مطالعه از تصاویر ماهواره‌ای و گوگل ارث به عنوان تکنولوژی سنجش از دور برای تعیین موقعیت چشمه‌های آب معدنی و مسیرهای آنها و همچنین برای تهیه نقشه ژئوتوریسم چشمه‌های آب گرم استفاده شده است.

۲- منطقه‌ی مطالعاتی و روش تحقیق

کوه آتشفشانی تفتان از نظر سیاسی در مرز سه شهرستان تفتان، میرجاوه و خاش در استان سیستان و بلوچستان و از نظر زمین‌شناسی در زمین درز سیستان معروف به زون فلیش، در جنوب شرق ایران واقع شده است (شکل ۱). در اطراف کوه تفتان روستاهای توریستی معروفی به نام تمین و تمندان وجود دارد (بلوچی، ۱۳۹۱).

آتشفشان تفتان با ارتفاع تقریبی ۴۰۵۰ متر از سطح دریا، دارای قله متعددی می‌باشد که اصلی‌ترین آنها دارای دو قله یکی در شمال غرب (به نام نرکوه) و دیگری در جنوب شرق (مادر کوه یا تفتان) است. این کوه که یکی از آتشفشان‌های جوان ایران و متعلق به کواترنری می‌باشد، درون سنگ‌های رسوبی و آذرین متعلق به کرتاسه و ائوسن زون شرق ایران فوران کرده است. سنگ‌های آتشفشانی تفتان شامل گدازه‌ها و توف‌های شدیداً دگرسان شده، سنگ‌های پیروکلاستیک و لاهار مانند است که ویسکوزیته نسبتاً زیاد گدازه‌ها سبب ایجاد پرتگاه‌های مرتفع در نیمه غربی کوه شده است (بومری، ۱۳۸۴). از پدیده‌های موجود در کوه تفتان می‌توان به خروج گاز گوگردی (دودخان)، چشمه‌های آب گرم و آب ترش اشاره کرد (مهرپرتو و پادیار، ۱۳۸۲) (شکل ۱). نتایج آنالیز شیمیایی آب و تهنشست‌های مرتبط با چشمه‌های آب گرم تفتان نشان دهنده فوق اشباع بودن آن نسبت به انیدریت، ژیپس، کالسدونی و ژاروسیت است که این رسوبات در اطراف دهانه چشمه‌های با منشاء آب‌های آتشفشانی مشاهده می‌شوند (مر و همکاران، ۱۳۸۴).



شکل ۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران و سیستان و بلوچستان (عکس‌های خروج گاز از محل دودخان و رسوبات چشمه‌های آب معدنی توسط نویسندگان تهیه شده است).

در این مقاله برای شناسایی کانی‌های مرتبط با تهنشست‌های محل چشمه‌های آب معدنی و نقشه برداری پوشش گیاهی موجود در منطقه از تصاویر سنجنده استر استفاده گردید. این سنجنده اطلاعات سطح زمین را در ۳ باند طیفی مرئی-فروسرخ نزدیک، ۶ باند فروسرخ موج کوتاه و ۵ باند فروسرخ حرارتی جمع‌آوری می‌کند (Duda et al., 2020). باندهای محدوده مرئی-فروسرخ نزدیک برای نقشه‌برداری پوشش گیاهی و کانی‌های حاوی بنیان‌های آهن مانند ژاروسیت مناسب بوده و باندهای محدوده فروسرخ موج کوتاه کاربر را قادر به شناسایی مواد حاوی بنیان‌های هیدروکسیل (مانند ژاروسیت و اپال بواسطه وجود ادخاله های آب)، سولفات (مانند ژیپس) و کربنات (مانند کلسیت) می‌سازد. لازم به ذکر است که آشکارساز محدوده فروسرخ موج کوتاه به دلیل افزایش شدید دمای آن از آوریل ۲۰۰۸ خاموش شده است و تصاویر استر اخذ شده پس از این تاریخ، فاقد برف از منطقه تفتان مربوط به تاریخ ۱۹ ژوئن ۲۰۰۷ بود که در این پژوهش برای شناسایی کانی‌های مرتبط با چشمه‌های آب معدنی موجود در منطقه تفتان استفاده گردید.

عوامل مختلفی از جمله خرابی حسگر، شرایط آب و هوایی، تغییرات زاویه خورشید نسبت به زمین و موارد دیگر باعث تخریب و افت کیفیت تصاویر ماهواره‌ای می‌شوند که نیاز به تنظیم و بازیابی هندسی و رادیومتری دارند (Pour et al., 2023). محصول استر سطح 1T با اعمال اصلاحات هندسی و رادیومتری بر روی داده‌های تصویر اصلی استر سطح 1A تولید می‌شود به طوری که کاربر نیازی به انجام پردازش هندسی و رادیومتری در استر سطح 1T ندارد (Duda et al., 2020). از آنجایی که کوه تفتان دارای ارتفاع ۴۰۵۰ متر نسبت به سطح دریا واقع شده است و تصویربرداری استر در ماه ژوئن (فصل بهار) که پوشش

گیاهی رشد می‌کند، انجام شده است، کالیبراسیون باقیمانده لگاریتم برای حذف اثرات تابش خورشیدی، عبور جوی، بهره دستگاه، توپوگرافی و آلبدو از اطلاعات استر اعمال شد (ITT Visual Information Solutions, 2009). در این روش، تمام مقادیر اعداد رقومی در یک تصویر بر میانگین هندسی اجزای طیفی و مکانی تصویر تقسیم می‌شوند. میانگین طیفی برای حذف اثرات توپوگرافی عمل می‌کند، در حالی که میانگین مکانی متغیرهایی مانند تابش خورشیدی، عبور جوی و بهره دستگاه را در نظر می‌گیرد (ITT Visual Information Solutions, 2009; Pour et al., 2023).

با استفاده از مطالعات علمی انجام شده بر روی چشمه‌های آب معدنی کوه تفتان (مر و همکاران، ۱۳۸۴)، کانی‌های کلسیت، ژپس، ژاروسیت و اپال/کلسدونی به عنوان کانی‌های مرتبط با چشمه‌های آب گرم این منطقه مشخص و سیمای جذبی آنها بر طبق باندهای محدوده‌های مرئی-فروسرخ نزدیک و فروسرخ موج کوتاه تصویر استر تعیین شدند. سپس از روش نسبت بانندی که یکی از روش‌های مناسب برای تشخیص ویژگی‌های زمین‌شناسی در تصاویر چند بانندی است، برای بارسازی استفاده شد. این روش برای کاهش اثر نور خورشید و توپوگرافی استفاده می‌شود که نتیجه تقسیم دو باند برای یک ویژگی در دو طرف کوه تقریباً یکسان است به طوری که در تصویر نسبت بانندی اثر سایه حذف می‌شود. از این روش برای نقشه‌برداری از پوشش گیاهی، رسوبات، سنگ‌ها و خاک‌ها و شناسایی مناطق دگرسانی هیدروترمال استفاده می‌شود (Pour et al., 2023). کانی‌های ژپس، ژاروسیت، کلسدونی/ اپال و کلسیت (مر و همکاران، ۱۳۸۴)، دارای ویژگی‌های طیفی در محدوده‌های مرئی-فروسرخ نزدیک و فروسرخ موج کوتاه هستند که براساس این ویژگی‌ها باندهای مناسب برای نسبت بانندی انتخاب می‌شود. کانی ژاروسیت بدلیل انتقالات الکترونی آهن فریک و ارتعاشات بنیان‌های Fe-OH در ۰/۴۳۶ و ۲/۲۶۵ میکرومتر (باندهای ۱ و ۷ استر) ویژگی جذبی نشان می‌دهد (سیفی و همکاران، ۱۳۹۶; Zabcic, 2008; Hosseinjanizadeh et al., 2014a). ژپس در ۲/۴۱۸ و ۲/۲۱۷ میکرومتر (باندهای ۶ و ۹ استر) بدلیل ارتعاشات H₂O جذب دارد (Bishop et al., 2013). در ساختمان آمورف سیلیس اپالی و کلسدون اذخاله آب وجود دارد که باعث ایجاد ویژگی جذبی در محدوده ۲/۲۶-۲/۲۲ میکرومتر (باندهای ۶ و ۷ استر) طیف اپال و کلسدونی می‌شود (Calvin et al., 2015). کانی کلسیت در ۲/۳۳ میکرومتر (باند ۸ تصویر استر) بدلیل بنیانهای CO₃ دارای ویژگی جذبی می‌باشد (Rowan & Mars, 2003; Hosseinjanizadeh et al., 2014b).

در تحقیق کنونی، برای شناسایی کلسیت از نسبت بانندی استفاده شده در مطالعه نینومیا (۲۰۰۳) (معادله ۱) و همچنین برای آشکارسازی کانی‌های ژپس، ژاروسیت و اپال/کلسدونی از نسبت‌های بانندی استفاده شده در مطالعه سیفی و همکاران (۱۴۰۱) (معادله‌های ۲ تا ۴) استفاده شده است.

(1) کلسیت: (b6/b8)(b9/b8)

(2) ژپس: (b8/b6)(b8/b9)

(3) ژاروسیت: (b2/b1)(b8/b7)

(4) اپال/کلسدونی: (b5/b6)(b8/b7)

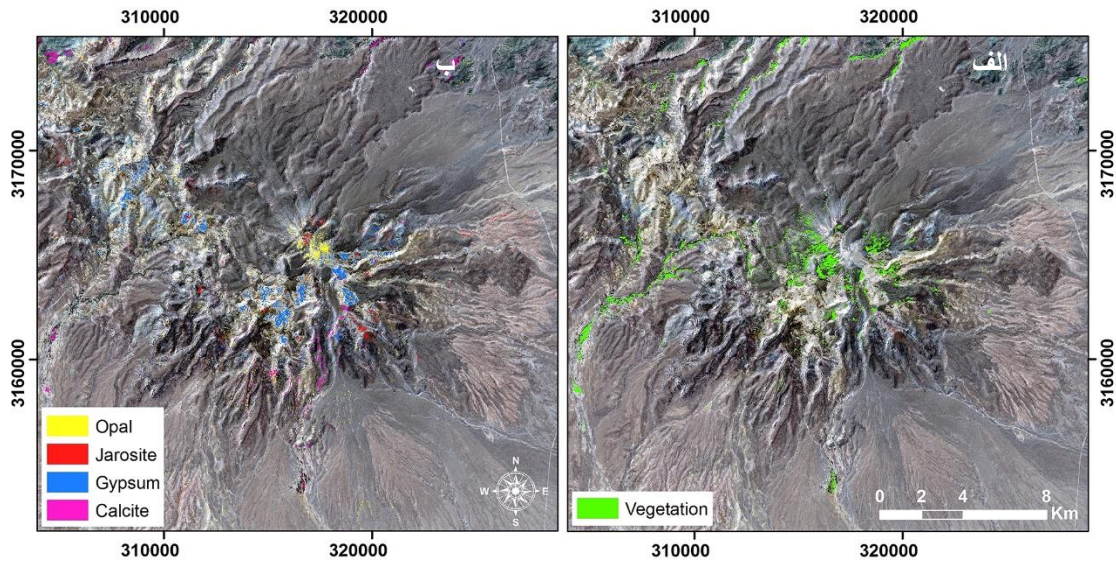
شاخص نرمال‌سازی پوشش گیاهی (NDVI) معادله (۵) برای نقشه‌برداری پوشش گیاهی در منطقه تفتان به کار گرفته شد. این شاخص یکی از قدیمی‌ترین، شناخته‌شده‌ترین و پرکاربردترین شاخص‌های پوشش گیاهی است. در معادله این شاخص باندهایی به کار می‌روند که بالاترین میزان جذب و بازتاب کلروفیل را در محدوده قرمز و فروسرخ نزدیک مورد استفاده قرار می‌دهند (ITT Visual Information Solutions, 2009).

(5) پوشش گیاهی: $(b3-b2)/(b3+b2)$

از آنجایی که هدف از بارزسازی کانی‌های کلسیت، ژیپس، ژاروسیت و اپال/کلسدونی به همراه پوشش گیاهی شناسایی موقعیت چشمه‌های موجود در منطقه کوه تفتان بوده و مکان چشمه‌ها نسبت به اندازه پیکسل‌های تصویر مورد استفاده (۱۵*۱۵ متر) محدود می‌باشد لذا بالاترین مقادیر حاوی مواد فوق‌الذکر به وسیله رابطه $\mu+3\sigma$ (میانگین بعلاوه سه برابر انحراف معیار) تعیین و به فرمت وکتور در مراحل بعد مورد استفاده قرار گرفت. مکان‌های مورد انتظار برای وجود چشمه‌های آب معدنی براساس وجود یا عدم وجود کانی‌های کلسیت، ژیپس، ژاروسیت و اپال/کلسدونی و پوشش گیاهی اولویت‌بندی شدند. به این صورت که چنانچه در موقعیتی هر چهار کانی مذکور یا سه کانی به همراه پوشش گیاهی وجود داشت، در اولویت اول قرار گرفتند. اگر در مکانی سه کانی از کانی‌های فوق‌الذکر یا دو کانی به همراه پوشش گیاهی قرار داشت، به عنوان اولویت دوم در نظر گرفته شدند. لازم به ذکر است که برای بارزسازی کانی‌های محل چشمه‌های آب معدنی و پوشش گیاهی از نرم‌افزار ENVI استفاده شد و اولویت‌بندی مکان‌های احتمالی وجود چشمه‌ها در نرم‌افزار ArcGIS انجام گرفت. سپس نتایج بارزسازی کانی‌ها و پوشش گیاهی به همراه محدوده‌های احتمالی وجود چشمه به محیط گوگل ارث منتقل شده و به صورت بصری مورد بررسی قرار گرفت تا مکان‌های قطعی وجود چشمه‌های آب معدنی تعیین شود. در مرحله بعد، مسیرهای ژئوتوریسمی چشمه‌های آب معدنی براساس موقعیت چشمه‌ها مشخص و رسم گردید.

۳- بحث و نتایج

کوه تفتان با دارا بودن دودخان و چشمه‌های آب معدنی گرم و سرد یکی از مناطق بالقوه ژئوتوریسم در استان سیستان و بلوچستان است. چشمه‌های آن از نوع سولفات‌ها بوده و تهنشست‌های کلسیت، ژیپس، ژاروسیت و اپال/کلسدونی در دهانه چشمه‌ها تشکیل شده است (مر و همکاران، ۱۳۸۴). بعلاوه می‌توان انتظار وجود پوشش گیاهی در حوالی چشمه‌ها را داشت. هر یک از این موارد اعم از کانی‌ها و پوشش گیاهی مرتبط با چشمه‌ها ویژگی‌های طیفی منحصر به فردی دارند که برای نقشه برداری دورسنجی استفاده می‌شود. در این مقاله از نسبت‌های باندی تعریف شده توسط نینومیا (۲۰۰۳) و سیفی و همکاران (۱۴۰۱) برطبق ویژگی‌های طیفی کانی‌های فوق‌الذکر و شاخص پوشش گیاهی NDVI برای شناسایی مواد مورد نظر استفاده گردید. در تصویر حاصل از NDVI، پوشش گیاهی در دامنه‌های تفتان و آبراهه‌های غربی منتهی به تفتان و همچنین در محل روستاهای موجود در محدوده منطقه مورد مطالعه آشکارسازی شده است (شکل ۲الف). کانی‌های کلسیت، ژیپس، ژاروسیت و اپال/کلسدونی در کوه تفتان بارزسازی شدند. کلسیت عمدتاً در دامنه‌های جنوبی کوه تفتان آشکارسازی شده است. ژیپس در مناطق دگرسان شده در کوه تفتان و شمال غرب آن بارز شده است. ژاروسیت که عمدتاً همراه با ژیپس بارزسازی شده است در مناطق مختلفی از کوه تفتان، شمال غرب آن و در رسوبات شرق کوه تفتان مشاهده می‌شود. اپال/کلسدونی به طور کلی در قله شمالی تفتان یا همان نرکوه بارز شده است (شکل ۲ب). لازم به ذکر است که کانی‌های فوق‌الذکر در مناطق دیگر به صورت خیلی محدود قابل مشاهده هستند.

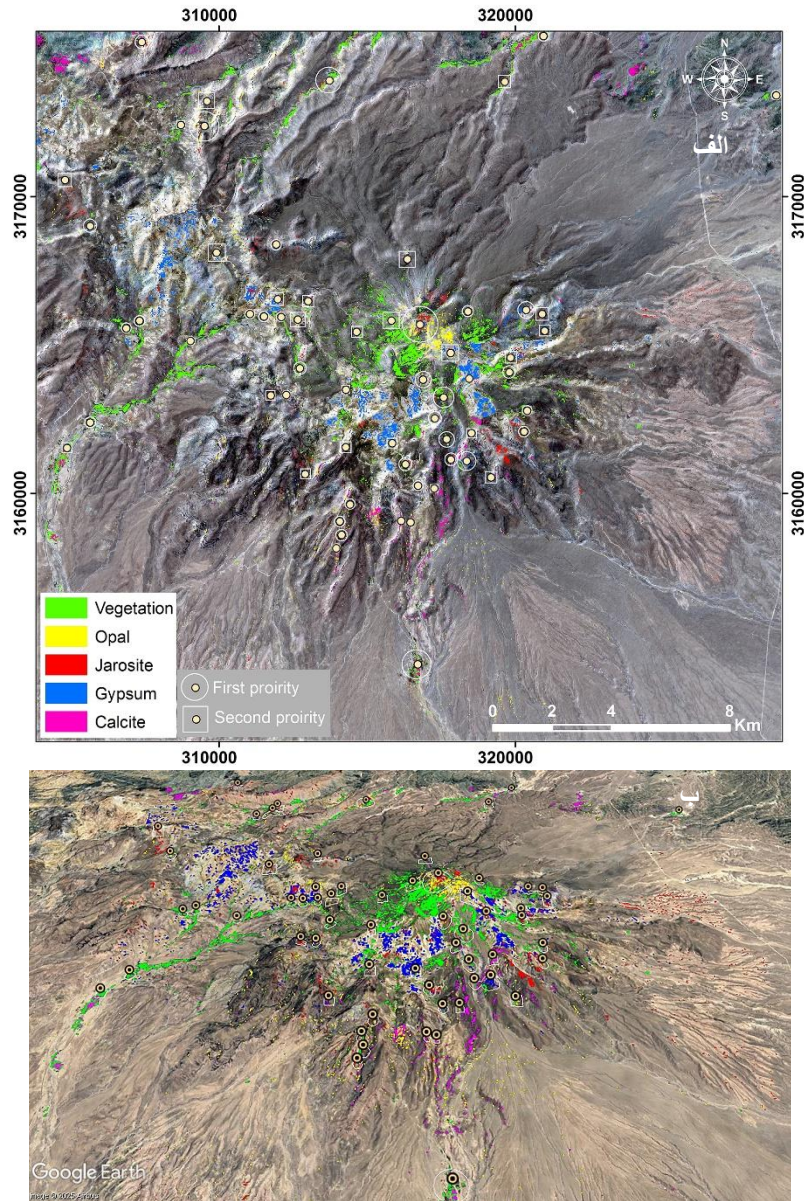


شکل ۲) الف) بارزسازی پوشش گیاهی؛ ب) بارزسازی کانی‌های کلسیت، ژیپس، ژاروسیت و اپال/کلسدونی

مکان‌های احتمالی چشمه‌های آب معدنی براساس وجود یا عدم وجود کانی‌های کلسیت، ژیپس، ژاروسیت و اپال/کلسدونی به همراه پوشش گیاهی مورد بررسی قرار گرفته و اولویت‌بندی شدند. به این صورت که مکان‌های دارای هر چهار کانی فوق‌الذکر و یا دارای سه کانی به همراه پوشش گیاهی در اولویت اول قرار گرفتند و محل‌های دارای سه کانی از کانیهای مذکور و یا دارای دو کانی به همراه پوشش گیاهی به عنوان اولویت دوم در نظر گرفته شدند. محدوده‌های اولویت اول با دایره و اولویت دوم با مربع مشخص شدند و برای هر محدوده یک مرکز تعیین گردید (شکل ۳). در شکل ۳ الف موقعیت کانی‌ها و پوشش گیاهی بارز شده به همراه محدوده‌های اولویت اول و دوم بر روی تصویر ترکیب رنگی ماهواره سنتینل ۲ (با تفکیک مکانی ۱۰ متر) و در شکل ۳ ب در محیط سه‌بعدی گوگل ارث نشان داده شده است. در منطقه مورد مطالعه، ۳۶ اولویت اول و ۲۶ اولویت دوم تعیین شد که در اکثر آنها پوشش گیاهی وجود دارد. در قسمت جنوب و جنوب‌شرق کوه تفتان محدوده‌های اولویت اول بیشتر است و همچنین این محدوده‌ها در راستای مشخصی قرار گرفته‌اند. تقریباً تمام روستاهای اطراف کوه تفتان جزو مناطق اولویت‌دار هستند (شکل ۳).

به منظور تعیین مکان‌های قطعی وجود چشمه‌های آب گرم، نتایج بارزسازی کانی‌ها و پوشش گیاهی به همراه محدوده‌های احتمالی وجود چشمه در محیط گوگل ارث به صورت بصری مورد بررسی قرار گرفت. براساس پارامترهای بصری مانند وجود رسوب سبز رنگ (دارای سطح صاف و براق) به همراه وجود جریان آب و همچنین تطابق با کانی‌ها و پوشش گیاهی بارز شده مکان چشمه‌ها در گوگل ارث مشخص گردید. لازم به ذکر است که تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا به کار رفته در محیط گوگل ارث این امکان را به کاربر می‌دهد بتواند رسوبات سبز رنگ محل چشمه‌ها را از پوشش گیاهی تشخیص دهد چرا که در حالت بزرگنمایی بالا، رسوبات سبز رنگ محل چشمه‌ها دارای سطح صاف بوده درحالی‌که پوشش گیاهی در سایر نقاط دارای رنگ سبز و حالت مخملی هستند. بر این اساس، تعداد ۲۶ چشمه در دامنه‌های جنوبی تا غربی کوه تفتان مشاهده شد که اکثر

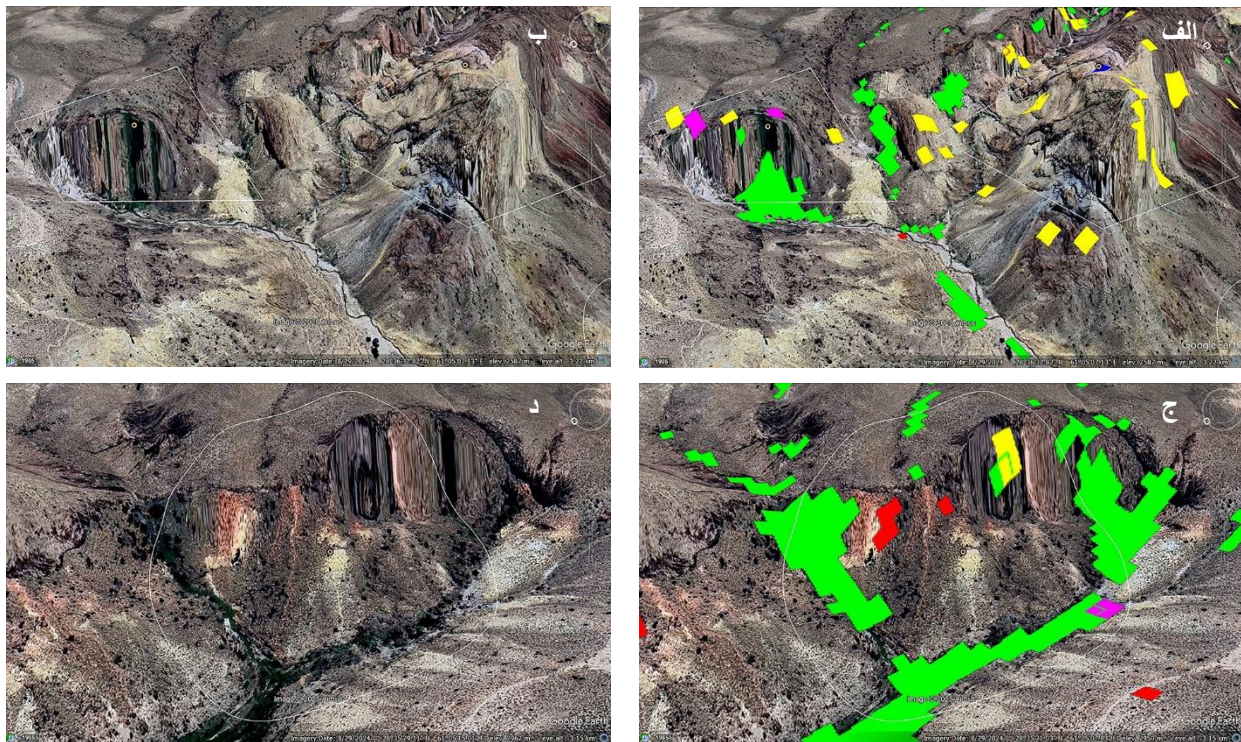
آنها با مناطق اولویت‌دار تطابق داشته و تعداد اندکی از آنها در خارج از محدوده‌های اولویت‌دار قرار دارند. تعدادی از چشمه‌ها با مناطق اولویت اول مطابقت داشته و تعدادی دیگر بر مناطق اولویت دوم منطبق هستند. به عنوان مثال شکل‌های ۴الف و ب انطباق چشمه‌ها با محدوده‌های اولویت دوم را نشان می‌دهند و شکل‌های ۴ج و د و ۵الف و ب تطابق چشمه‌ها با محدوده‌های اولویت اول را به نمایش می‌گذارند. در شکل‌های ۵ج و د چشمه شناسایی شده در خارج از محدوده در نظر گرفته شده دارد ولی با پوشش گیاهی بارز شده منطبق است.



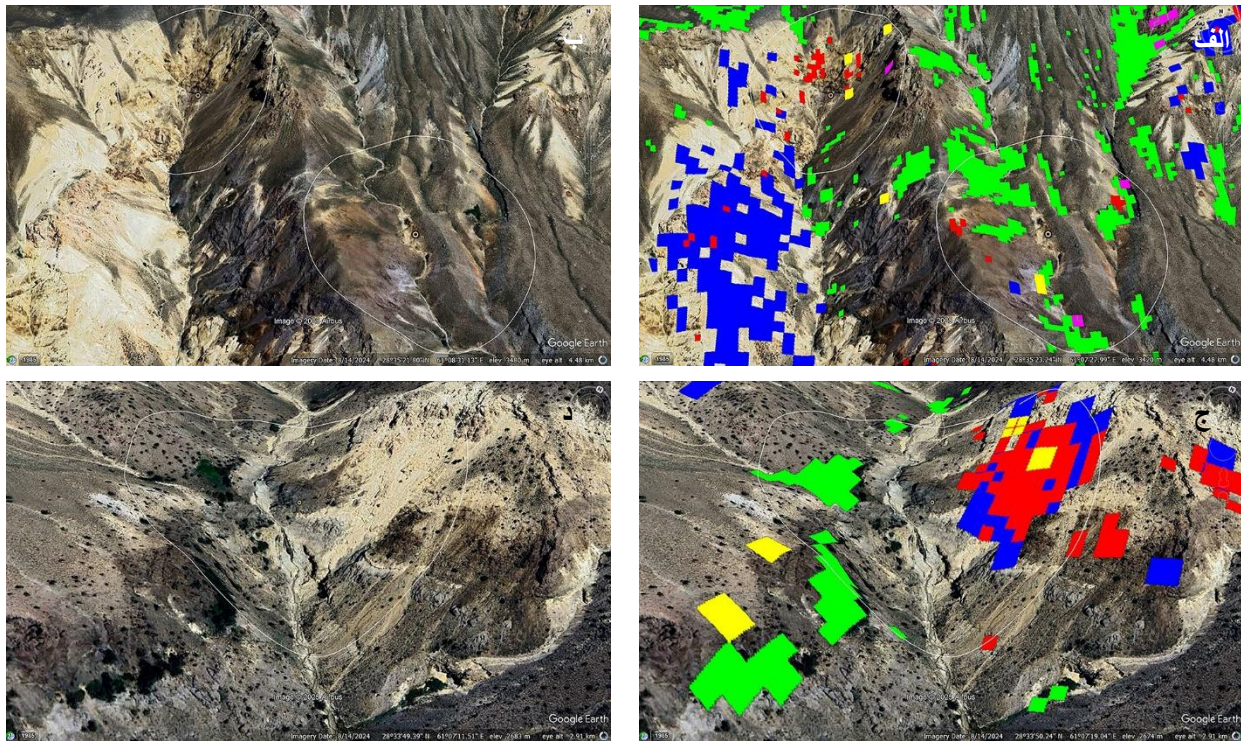
شکل ۳) موقعیت کانی‌ها و پوشش گیاهی بارز شده به همراه محدوده‌های اولویت‌دار: الف) تصویر سنتینل ۲؛ ب) گوگل ارث

همان طور که از مشخصات ظاهری و موقعیت چشمه‌ها نسبت به کوه تفتان مشخص است، چشمه‌های غرب کوه تفتان دارای رسوبات گسترده‌تری بوده و به راحتی در محیط سه‌بعدی گوگل ارث قابل تشخیص هستند (شکل ۴). در حالی که رسوبات محل چشمه‌های واقع در جنوب کوه تفتان دارای وسعت کمتری بوده و به سختی قابلیت تشخیص از پوشش گیاهی (بوته‌های بزرگ و درختان) را دارند به طوری که بعضی از آنها فقط با کمک وجود جریان آب قابل شناسایی هستند (شکل ۵).

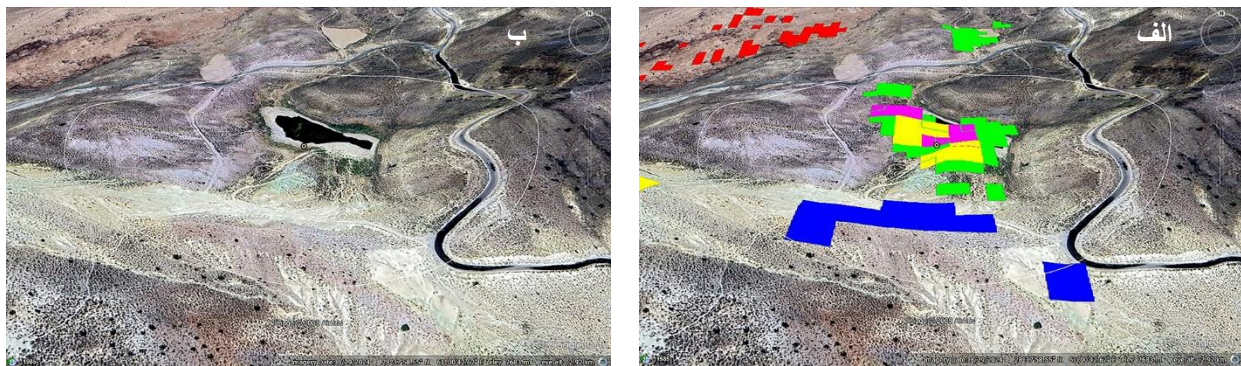
یکی از محدوده‌های اولویت اول که پوشش گیاهی به همراه کانی‌های کلسیت، ژیپس و اپال/کلسدونی در داخل محدوده و ژاروسیت در خارج از محدوده بارزسازی شده است، پس از کاوش بصری در گوگل ارث دارای مشخصات وجود یک استخر در منطقه بود (شکل ۶). با بررسی مطالعات کتابخانه‌ای مشخص شد که این پدیده یک استخر طبیعی به نام دریاچه لاوان است که آب آن به وسیله چشمه‌های متعدد در کف حوضچه تأمین می‌گردد (ملاشاهی و اکبری نوده، ۱۳۹۰).



شکل ۴) موقعیت چشمه‌های آب معدنی در غرب کوه تفتان: الف و ب) منطبق بر اولویت دوم؛ ج و د) منطبق بر اولویت اول

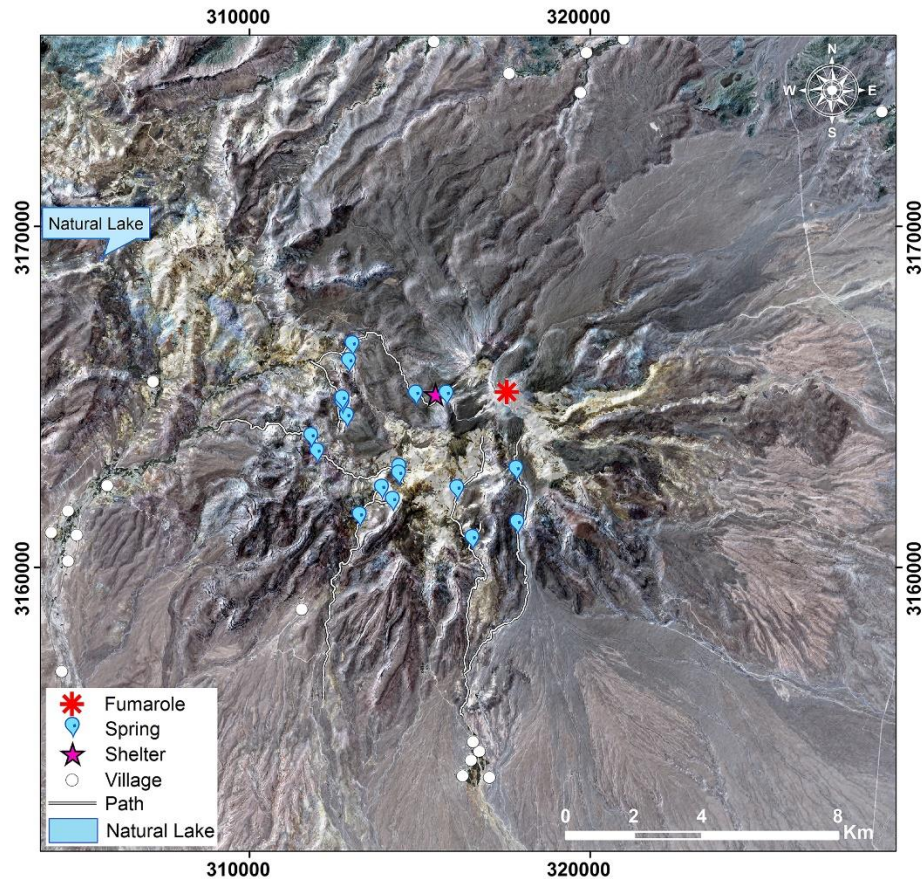


شکل ۵: موقعیت چشمه‌های آب معدنی در جنوب کوه تفتان: الف و ب) منطق بر اولویت اول؛ ج و د) خارج از محدوده اولویت اول



شکل ۶: موقعیت دریاچه طبیعی لاوان در شمال غرب کوه تفتان

از میان روستاهای موجود در منطقه، روستای ترشاب در جنوب کوه تفتان، تمندان و والان در جنوب غرب کوه تفتان، تمین و لهرمیا به ترتیب در شمال و شمال شرق کوه تفتان بر محدوده‌های اولویت اول انطباق دارند و روستاهای جش در شمال و کوشه در جنوب غرب کوه تفتان منطق بر محدوده‌های اولویت دوم هستند (شکل‌های ۳ و ۷). لازم به ذکر است که نامگذاری روستاهای فوق‌الذکر براساس نام روستاها در اپلیکیشن نشان آورده شده است.



شکل ۷: نقشه ژئوتوریسم چشمه‌های آب معدنی منطقه کوه تفتان

۴- نتیجه گیری:

پردازش تصاویر سنجنده استر با استفاده از روش نسبت بانندی به خوبی پوشش گیاهی و نیز کانی‌های مرتبط با چشمه‌های آب معدنی از جمله کلسیت، ژیپس، ژاروسیت و اپال/کلسدونی را در دامنه‌های کوه تفتان بارزسازی کرد. اولویت‌بندی محدوده‌ها براساس حضور یا عدم حضور این کانی‌ها و پوشش گیاهی، موجب افزایش سرعت در شناسایی محل چشمه‌های آب معدنی در دامنه‌های تفتان و نیز دریاچه طبیعی لاوان شد. علاوه بر این، توجه به ویژگی‌های بصری ته‌نشست‌های چشمه‌ها و وجود جریان آب مربوط به هر چشمه دقت شناسایی و تعیین مسیرهای ژئوتوریسمی چشمه‌های آب معدنی تفتان را افزایش داد.

نتایج نشان می‌دهد که چشمه‌ها و مسیره‌های وابسته به آن‌ها عمدتاً در بخش‌های جنوبی تا غربی کوه تفتان پراکنده‌اند و ته‌نشست‌های چشمه‌های واقع در غرب تفتان نسبت به چشمه‌های جنوبی گستره بیشتری دارند. وجود چشمه‌های آب معدنی در این ناحیه سبب سرسبزی روستاهای جنوب‌غرب و جنوب کوه تفتان شده است و به همین دلیل این مناطق در مرحله اولویت‌بندی، در ردیف نخست قرار گرفتند. موقعیت چشمه‌های قطعی براساس مشاهدات انجام‌شده در گوگل ارث تعیین شد و مسیره‌های دسترسی به آن‌ها نیز با توجه به مسیر جریان آب و آبراهه‌ها مشخص گردید. این مسیرها را می‌توان مسیره‌های ژئوتوریسمی چشمه‌های آب معدنی تفتان نامید. باین‌حال، لازم است پیش از هرگونه تأیید نهایی، تمامی این نقاط از طریق بازدید میدانی بررسی و صحت‌سنجی شوند. مسیره‌های ژئوتوریسمی چشمه‌های آب معدنی تفتان می‌تواند برای سازمان میراث فرهنگی و گردشگری استان سیستان و بلوچستان در برنامه‌ریزی توسعه ژئوتوریسم منطقه بسیار سودمند باشد و نقش مهمی در برنامه‌ریزی سفر گردشگران و کوهنوردان به کوه تفتان ایفا کند.

منابع:

- اولادی، ج. (۱۳۹۳). بررسی امکان‌سنجی زمین‌های اکوتوریسم با استفاده از سیستم سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی، منطقه جنگل عباس آباد، ورسک، ایران). *مجله علوم محیط زیست خزر*، ۱۰(۱)، ۸۳.
- بزرگ‌نیا، د.، اولادی، ج.، منوچهری، م. (۱۳۹۱). ارزیابی توانایی‌های اکوتوریسم منطقه ناهارخوران در گرگان با استفاده از سیستم سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی. *سنجش از دور و علوم و اطلاعات فضایی*، ۳۸.
- بلوچی، م. (۱۳۹۱). بررسی ویژگی‌های ژئومورفیک منطقه تفتان و نقش آن‌ها در توسعه توریسم. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سیستان و بلوچستان.
- بلوچی، م.، باقریان، س. (۱۳۹۳). بررسی ویژگی‌های ژئومورفیک منطقه تفتان و نقش آنها در توسعه توریسم با استفاده از مدل پراولونگ. *فضای گردشگری*، ۴(۱۳)، ۷۹-۹۸.
- بومری، م. (۱۳۸۴). بررسی منابع انرژی زمین گرمایی و کانی سازی آتشفشان تفتان با استفاده از ایزوتوپ‌های پایدار آب. *مجله جغرافیا و توسعه*، ۴۰-۲۵.
- حسینجانی‌زاده، م.، حسن‌زاده، ر.، هنرمند، م.، ناصری، ف. (۱۳۹۷). بررسی پتانسیل ژئوتوریسم در شمال‌غرب استان کرمان با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی. *اولین همایش ملی سنجش از دور زمین‌شناختی ایران*.
- حسینجانی‌زاده، م.، حسن‌زاده، ر.، هنرمند، م.، ناصری، ف. (۱۳۹۹). بررسی پتانسیل ژئوتوریسم با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، شهرستان رفسنجان، استان کرمان. *گردشگری و توسعه*، ۹(۴)، ۲۱۵-۲۲۹.

- رخشانی بجد، و. (۱۳۹۲). ارزیابی پتانسیل‌های اکوتوریستی منطقه تفتان: مطالعه موردی، تفتان جنوبی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز.
- زمانی، ز. (۱۳۹۷). بررسی پتانسیل زمین‌گردشگری با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، مطالعه موردی شهرستان کرمان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان.
- سیفی، ع.، حسینجانی زاده، م.، رنجبر، ح.، هنرمند، م. (۱۳۹۶). بررسی کانیهای زهاب اسیدی با استفاده از ویژگیهای طیفی و پردازش تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ (مطالعه موردی: معدن دره‌زار، استان کرمان). مجله محیط‌شناسی، ۴۳(۱)، ۳۱-۴۳.
- سیفی، ع.، حسینجانی‌زاده، م.، مختاری، ز. (۱۴۰۱). سنجش از دور کانی‌های مرتبط با منابع زمین‌گرمایی در ژئوتوریسم و اکتشاف منابع؛ مطالعه موردی تفتان، جنوب‌شرق ایران. چهارمین کنفرانس انجمن سنجش از دور زمین‌شناختی ایران.
- شاگری، ع.، قریشی نیا، س.ک.، مهرابی، ب. (۱۳۹۴). هیدروژئوشیمی عناصر نادر خاکی در چشمه‌های گرمایی و سرد آتشفشان تفتان. مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، ۱۵، ۲۸-۳۹.
- صدرناصری، ح.، کامیابی، س. (۱۳۹۱). کاربرد RS و GIS در شناسایی پتانسیل‌های ژئوتوریسم و ارزیابی آنها با روش پراونگ و نقش آن در گسترش گردشگری به منظور توسعه پایدار جنوب‌شرق مطالعه موردی در شهرستان چابهار. کاربرد سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور در برنامه‌ریزی، ۳(۲)، ۸۵-۹۴.
- لطیفی‌پور، م. (۱۳۹۳). پهنه‌بندی اکوتوریسمی محدوده آتشفشان تفتان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سیستان و بلوچستان.
- مختاری، ز.، احمدی، ع. (۱۳۹۱). ترکیب شیمیایی گازهای خروجی و فعالیت‌های پساآتشفشانی تفتان، جنوب شرق ایران. ژئوشیمی، ۱، ۵۸-۵۰.
- مر، ف.، شاگری، ع.، کمپانی زارع، م.، رئیسی، ع. (۱۳۸۴). زمین آب شیمی و زمین دماسنجی چشمه‌های آب گرم و معدنی دامنه جنوبی و جنوب غربی تفتان. مجموعه مقالات نهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، ۴۰-۲۸.
- ملاشاهی، ح.، اکبری نوده، م.ر. (۱۳۹۰). بررسی نقش چشمه‌های معدنی در توسعه گردشگری استان سیستان و بلوچستان. همایش منطقه‌ای جهاد اقتصادی رهیافت‌ها و راهبردها.
- ممیز، آ.، عباسی، م.، قاسمی، ع. (۱۳۹۱). آینده فرصت‌های کارآفرینی در حوزه زمین‌گردی مطالعه موردی در منطقه جلفا، تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۱۲(۲۶)، ۷-۲۲.
- مهرپرتو، م.، پادیار، ف. (۱۳۸۲). نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ تفتان. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

- Bishop, J.L., Lane, M.D., Dyar, M.D., King, S.J., Brown, A.J., Swayze, G. (2013). Spectral Properties of Ca-sulfates: Gypsum, Bassanite and Anhydrite. Submitted to American Mineralogist 48.
- Calvin, W.M., Littlefield, E.F., Kratt, C. (2015). Remote sensing of geothermal-related minerals for resource exploration in Nevada. *Geothermics* 53, 517–526.
- Duda K, Daucsavage J, Siemonsma D, Brooks B, Oleson R, Meyer D, Doescher C (2020) Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Level 1 Precision Terrain Corrected Registered At-Sensor Radiance Product (ast_11t). US Geological Survey, USA.
- Hosseinjanizadeh, M., Tangestani, M.H., Velasco Roldan, F., Yusta, I. (2014a). Mineral exploration and alteration zone mapping using mixture tuned matched filtering approach on ASTER data at the central part of Dehaj-Sarduiyeh copper belt, SE Iran. *IEEE selected topics in applied earth observations and remote sensing*. Volume 7, Issue 1, 284- 289, 2014.
- Hosseinjanizadeh, M., Tangestani, M.H., Velasco Roldan, F., Yusta, I. (2014b). Spectral characteristics of minerals in alteration zones associated with porphyry copper deposits in the middle part of Kerman copper belt, SE Iran. *Ore Geology Reviews* 62, 191–198.
- ITT Visual Information Solutions (2009) ENVI User's Guide (Version 4.7). Boulder, CO: ITT Visual Information Solutions.
- Ninomiya, Y. (2003). A stabilized vegetation index and several mineralogic indices defined for ASTER VNIR and SWIR data. *Proceedings of IEEE 2003 International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS'03*, 3, 1552–1554.
- Pour AB, Ranjbar H, Sekandari M et al (2023) Remote sensing for mineral exploration. In *Geospatial Analysis Applied to Mineral Exploration* (pp. 17-149). Elsevier.
- Rowan, L.C., Mars, J.C. (2003). Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data. *Remote Sensing of Environment* 84, 350 – 366.
- Zabcic, N. (2008). Derivation of surface pH-values based on mineral abundances over pyrite mining areas with airborne hyperspectral data (Hymap) of Sotiel-Migollas mine complex, Spain. M.S dissertation, University of Alberta, Edmonton, Alberta.
- UNESCO. (2023a). <https://www.unesco.org/en/igpp/geoparks/aras?hub=67817>.
- UNESCO. (2023b). <https://www.unesco.org/en/igpp/geoparks/tabas?hub=67817>.
- UNESCO. (2025). <https://www.unesco.org/en/igpp/geoparks>.