

Pixel-based and sub-pixel analysis of ASTER data for identifying lithological and mineralogical units; a case study of Tutak area, Fars Province

Soheyla Esmaeili^{1*}, Majid H. Tangestani¹, Touba Salehi¹

1-Department of Earth Sciences, Faculty of Sciences, Shiraz University, Shiraz, Iran

Keywords: ASTER, Spectral information divergence, Adaptive coherence estimator, Iron and copper mineralization

1-Introduction

A large number of Earth observation satellites acquire daily massive amounts of remotely sensed data, for which, information extraction is an important task that has led to development of different methods of image processing. Remotely sensed images display a combination of pure and mixed pixels. Pure pixels represent areas covered by a single component while mixed pixels are occupied by more than one class. Therefore, different methods of image processing can be divided into pixel-based and subpixel-based groups. Pixel-based methods assign the mixed pixels to dominant classes (Foody, 2004). The spectral information divergence (SID) algorithm is classified in whole-pixel based group (Keshava, 2003). Sub-pixel methods such as Adaptive Coherence Estimator (ACE) describe the proportions of classes for a pixel in fraction images (Campbell, 1996; Keshava, 2003). A sub-pixel method has the advantage of containing more information when compared to a pixel-based method. Many ore deposits are hosted in specific rock units and are associated with a series of index minerals that can indirectly be used as a key to exploration in remote sensing studies. In this study, the pixel-based SID algorithm was used for mapping marble and greenschist, and the ACE method was applied for mapping ankrite and chlorite as indicator minerals for iron and copper exploration in Tutak area (northeastern Shiraz), located in the Sanandaj-Sirjan metamorphic Zone (SSZ).

2-Methodology

Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflectance Radiometer (ASTER) imagery were used in this study. Firstly, the 30-m SWIR data were re-sampled to 15-m pixel size of VNIR data and the log residual method was used for atmospheric correction.

The spectral information divergence and adaptive coherence estimator were used to detect and distinguish rock units and indicator minerals. The reflectance spectra of field samples were measured using analytical spectral device (ASD) and were identified by the use of USGS spectral library. Moreover, the Spectral Geologist (TSGTM) mineral analysis software was used to rapid and accurate recognition of main minerals in a sample. Then the accuracy of output results was assessed using the parameters of general accuracy and Kappa coefficient calculated in a confusion matrix as well as investigations through field observations.

3- Results and discussion

Green schist has strong absorption features at 2.33, 1.41, and 2.25 μm due to the Mg-OH, hydroxyl group, and Fe-OH vibrational modes, respectively. Additionally, Fe⁺²-bearing minerals in green schist have absorption features at 0.41 and 0.72 μm , and marble shows a strong absorption feature at 2.35 μm due to CO₃⁻² vibration.

Using spectra of field samples, the spectral information divergence method enhanced greenschist and marble units because of their significant spectral differences in VNIR region. Overall accuracy and kappa coefficients resulted by using this algorithm for detection of rock units were 83% and 0.72, respectively (Table1). Using data of USGS spectral library, the outputs of the sub-pixel algorithm of adaptive coherence estimator

*Corresponding author: esmaeili91@gmail.com

DOI: 10.22055/aag.2019.28867.1959

Received 2019-03-17

Accepted 2019-12-19

successfully identified pixels with high abundances of chlorite and ankerite. Results showed that chlorite rich areas with abundances more than 50% overlapped greenschist units, and the areas with chlorite abundances >75% had acceptable conformity with the copper deposits; most prominent of which are occurring in Mazaijan copper deposit. The areas with more than 50% ankerite overlapped the marble units, and districts with abundances >75% indicated increase of abundances of this mineral compared to calcite and dolomite when approaching iron mineralization (Fig 1).

Table1. Confusion matrix of the results obtained by SID algorithm.

Rocks	Reference data			User's accuracy	
	Marble	Greenschist	Total		
Unclassified	1	3	4		
Marble	26	2	28	(26/28)	0.92
Greenschist	1	24	25	(24/25)	0.96
Total	28	29	57		
Producer's accuracy	(26/28)	(24/29)			
	0.93	0.93			
Overall accuracy= 0.837			Kappa coefficients= 0.72		

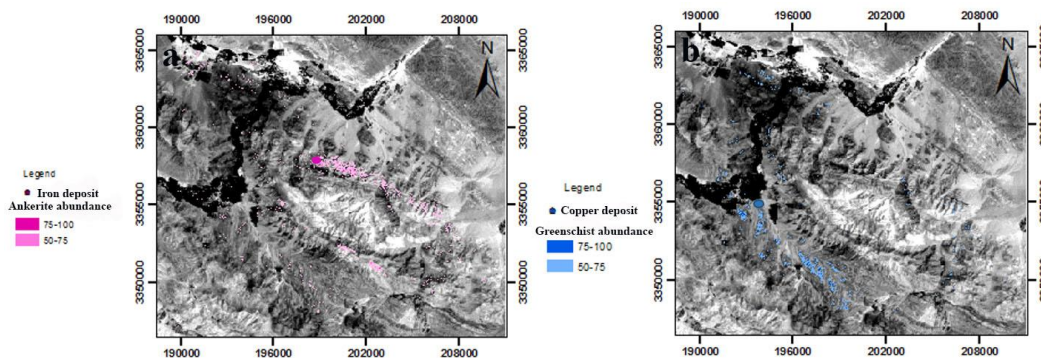


Fig 1. Results of ACE algorithm for chlorite and ankerite mapping and the locations of copper and iron deposits.

4- Conclusion

This study was an attempt to use ASTER VNIR and SWIR data for discriminating metamorphic units and finding the index minerals for iron and copper exploration in Tutak area, southern Iran. Using SID method with the spectra of filed samples as reference enhanced the main metamorphic units including green schist and marble. Furthermore, applying ACE algorithm and reflectance spectra of chlorite and ankerite of the USGS spectral library could determine the relative abundances of these minerals.

References

- Foody, G.M., 2004. Sub-pixel methods in remote sensing, *Remote sensing image analysis: Including the spatial domain*, Springer, Dordrecht 37-49.
- Keshava, N., 2003. A survey of spectral unmixing algorithms. *Lincoln laboratory journal* 14, 55-78.
- Campbell, J.B., 1996. *Introduction to remote sensing*, 2nd edition, Taylor & Francis Ltd, London, 968.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Esmaili, S., Hashemi Tangestani, M., Salehi, T., 2020. Pixel-based and sub-pixel analysis of ASTER data for identifying lithological and mineralogical units; a case study of Tutak area, Fars Province. *Adv. Appl. Geol.* 10(3), 382-390.

DOI: 10.22055/AAG.2019.28867.1959

url: https://aag.scu.ac.ir/article_15347.html?lang=en

تجزیه و تحلیل تمام پیکسلی و زیر پیکسلی داده‌های استر با هدف شناسایی واحدهای سنگی شناسی و کانیایی، مطالعه موردی - ناحیه توتک، استان فارس

سهیلا اسماعیلی*

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

مجید هاشمی تنگستانی

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

طوبی صالحی

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۲۸

*esmaeili91@gmail.com

چکیده

ناحیه توتک به عنوان بخشی از زون دگرگونی سنندج - سیرجان، شمال شرق شیراز، از لحاظ ذخایر آهن و مس با اهمیت است. در این ناحیه، دو کمپلکس مهم دگرگونی سوریان و توتک میزبان این ذخایر هستند. برای شناسایی و نمایان‌سازی واحدهای سنگی و کانی‌های نشانگر از الگوریتم‌های واگرایی اطلاعات طیفی (Spectral Information Divergence) و تخمینگر انسجام توافقی (Adaptive Coherence Estimator) استفاده شد. روش الگوریتم واگرایی اطلاعات طیفی به دلیل تفاوت طیف‌های بازتابی شیبست سبز و ماربل در محدوده مرئی - فروسرخ نزدیک، توانست این دو واحد سنگ‌شناختی را با استفاده از طیف‌های صحرایی به خوبی بارز نماید. میزان دقت کلی و ضریب کاپا این الگوریتم برای واحدهای سنگی ۸۳٪ و ۷۲٪ درصد می‌باشد. نتایج خروجی الگوریتم زیرپیکسلی تخمین‌گر انسجام توافقی پیکسل‌های با کسر فراوانی بالا از کانی‌های کلریت و آنکریت را با استفاده از طیف‌های این کانی‌ها از کتابخانه USGS بارز کرد. فراوانی‌های بالاتر از ۵۰ درصد کلریت منطبق با واحد شیبست سبز و فراوانی‌های بالاتر از ۷۵ درصد با موقعیت جغرافیایی آثار معدنی مزایجان انطباق قابل قبولی را نشان می‌دهد. آنکریت با فراوانی‌های بالاتر از ۵۰ درصد منطبق با واحد ماربل و فراوانی‌های بالاتر از ۷۵ درصد نشانگر افزایش فراوانی این کانی نسبت به کانی‌های کلسیت و دولومیت در این واحد سنگی با نزدیک شدن به کانه‌زایی آهن است. بنابراین بر اساس نتایج بدست آمده، روش تخمینگر انسجام توافقی می‌تواند در شناسایی و تفکیک دقیق کانی‌های هدف مرتبط با ذخایر کانیایی در این پهنه پیشنهاد داده شود.

کلمات کلیدی: استر، واگرایی اطلاعات طیفی، تخمینگر انسجام توافقی، کانه‌زایی مس و آهن

مقدمه

گروه ویژه‌ای از مواد زمینی می‌شوند. در روش‌های رده‌بندی تمام پیکسلی که رده‌بندی‌کننده‌های سخت نیز نامیده می‌شوند، فرض می‌شود که هر پیکسل تصویر بیانگر ناحیه‌ای از سطح زمین است که تنها با یک ماده پوشیده شده است. بنابراین در این روش‌ها پیکسل‌های آمیخته موجود در تصویر که دارای بالاترین سهم از آن ماده هستند را به آن رده نسبت می‌دهند (Foody, 2004). از معایب این روش‌ها این است که سهم دیگر مواد موجود در آن پیکسل نادیده گرفته می‌شود. به تصویر رده‌بندی شده حاصل از این روش‌ها، نقشه موضوعی گفته می‌شود. روش الگوریتم واگرایی اطلاعات طیفی (SID) در این گروه قرار می‌گیرد (Keshava, 2003). در خروجی روش‌های زیر پیکسلی که نام دیگر آن‌ها رده بندی‌کننده نرم است، بر خلاف روش‌های رده‌بندی‌کننده سخت، یک پیکسل ممکن است به چندین پوشش زمینی تعلق داشته باشد (Campbell, 1996). نقشه ایجاد شده از این روش‌ها، نقشه کمی نامیده می‌شود که در آن به ازاء هر یک از پوشش‌های زمینی یک تصویر فراوانی ایجاد می‌شود. روش تخمینگر انسجام توافقی (ACE) در این گروه قرار می‌گیرد (Keshava, 2003; Klompenhouwer et al., 2011). تجزیه و تحلیل پیکسل‌های آمیخته یا جداسازی طیفی، تجزیه این

داده‌های سنجنش از دور به رغم فرصت‌هایی که به وجود می‌آورند، چالش‌های محاسباتی زیادی را نیز ایجاد می‌کنند. به همین دلیل استخراج اطلاعات یکی از مباحث قابل توجه است که باعث به وجود آمدن روش‌های مختلف پردازش تصاویر شده است (Adams and Gillespie, 2006; Wang et al., 2012). اطلاعات به دست آمده از تصاویر دورسنجی، ثبت مقدار بازتاب سطحی هر ماده در میدان دید لحظه‌ای سنجنده است که به ندرت از برهمکنش با یک ماده حاصل می‌شود. در بیشتر تصاویر ماهواره‌ای هر دو پیکسل‌های خالص و آمیخته یافت می‌شوند. پیکسل‌های آمیخته به دو دلیل می‌توانند وجود داشته باشند: (۱) توان تفکیک مکانی سنجنده‌های چند طیفی در مقیاس چندین متر است در نتیجه، پوشش مکانی هر پیکسل می‌تواند در بردارنده چند سیمای مختلف با نشان‌های طیفی متفاوت باشد، (۲) صرف نظر از توان تفکیک مکانی، سیمای مجزا مانند کانی‌ها می‌توانند به صورت آمیختگی‌های همگن یافت شوند که خود می‌تواند باعث ابهام در تشخیص آن‌ها شود (Van der Meer, 1999). بنابراین، روش‌های استخراج اطلاعات می‌توانند در دو گروه تمام‌پیکسلی و زیرپیکسلی قرار گیرند. هر یک از آن‌ها دارای مزیت‌ها و معایبی است که باعث کاهش یا افزایش در بارزسازی

پیشین رخ داده است و ۲) فاز بعدی که حالت دگرگونی قهقرایی یا پس رونده برای فاز اول داشته و در حد رخساره شیست سبز می‌باشد. این فاز اکثر پارازنهای فاز اول را از بین برده است (Houshmandzadeh and Soheili, 1990). در ناحیه مورد مطالعه دو کمپلکس دگرگونی بصورت تقادیس دیده می‌شود. کمپلکس توتک که در مرکز تقادیس واقع شده است و کمپلکس سوریان که روی آن قرار می‌گیرد. هر دو کمپلکس بین دو گسل سوریان در شمال شرق و گسل جیان در جنوب غرب محصور می‌باشند (شکل ۱). گسل سوریان که یک گسل راندگی است، مرز بین پهنه سندنچ - سیرجان و ایران مرکزی و گسل جیان که لبه کم شیب یک گسل بزرگ قاشقی (distric fault) با سازو کار انقباضی است مرز آن را با زاگرس خرد شده تشکیل می‌دهد (Oveisi, 2001). کمپلکس پرموتریاس سوریان مجموعه‌ای متشکل از شیست سبز و میکاشیست می‌باشد که بر روی مجموعه زیرین خود کمپلکس توتک قرار می‌گیرد. کانه‌زایی مس در گرین شیست به صورت توده‌ای، پراکنده و رگه‌ای دیده می‌شود (شکل ۲ a و b) و با نزدیک شدن به ماده معدنی فراوانی کلریت بیشتر می‌شود. آثار معدنی مس مانند چیر و مزایجان در این کمپلکس رخ داده است. کمپلکس توتک متشکل از ماربل، گنیس و شیست می‌باشد و کانه‌زایی آهن بصورت توده‌ای، رگه‌ای و عدسی شکل در ماربل رخ داده است (شکل ۲ ج و د). ترکیب شیمیایی ماربل به سمت ماده معدنی آهن با افزایش آنکریت همراه است مانند آثار معدنی کان گوهر (Ebrahimi, 1999).

مواد و روش‌ها

در این مطالعه از داده‌های استر سطح T1، برداشت شده در سال ۲۰۰۳، استفاده گردید و روش‌های پردازش تصویر بر روی آن‌ها توسط نرم-افزار ENVI 5.1 اجرا شد.

استر اطلاعات طیفی منابع زمینی را در ۱۴ باند طیفی و سه زیرسیستم، مرئی فرورسرخ نزدیک با سه باند طیفی در محدوده ۰/۵۲ تا ۰/۸۶ میکرومتر و توان تفکیک مکانی ۱۵ متر، فرو سرخ موج کوتاه با ۶ باند طیفی در محدوده ۱/۶۰ تا ۲/۴۳ میکرومتر و توان تفکیک ۳۰ متر، فرو سرخ گرمایی با پنج باند طیفی در محدوده ۸/۱۲ تا ۱۱/۶۵ میکرومتر و توان تفکیک مکانی ۹۰ متر را در اختیار کاربر قرار می‌دهد (Abrams and Hook, 1995). تصحیح تداخل سیگنال (Crosstalk) برای بهبود عملکرد جداگانه طیفی باندهای فرو سرخ موج کوتاه اعمال شد. این خطا که ناشی از پراکندگی نور فرودی آشکارساز باند ۴ بر روی آشکارسازهای دیگر بویژه باند ۵ و ۹ است. برای استخراج اطلاعات دقیق از تصاویر ماهواره‌ای، انجام یک سری تصحیحات جهت کاهش عوامل تداخل و نوفه ضروری است. در این مطالعه برای تصحیح جوی از روش باقیمانده لگوریتمی (log residual) استفاده شده است.

در این روش برای حذف تراگیسیلایی جوی، خطاهای دستگامی، اثرات توپوگرافی و سپیدایی از داده‌های ماهواره‌ای طبق رابطه زیر استفاده می‌شود.

$$LR = [B_1 \times (M(B_2))] / [(B_2 \times M(B_1))] \quad (\text{رابطه ۱})$$

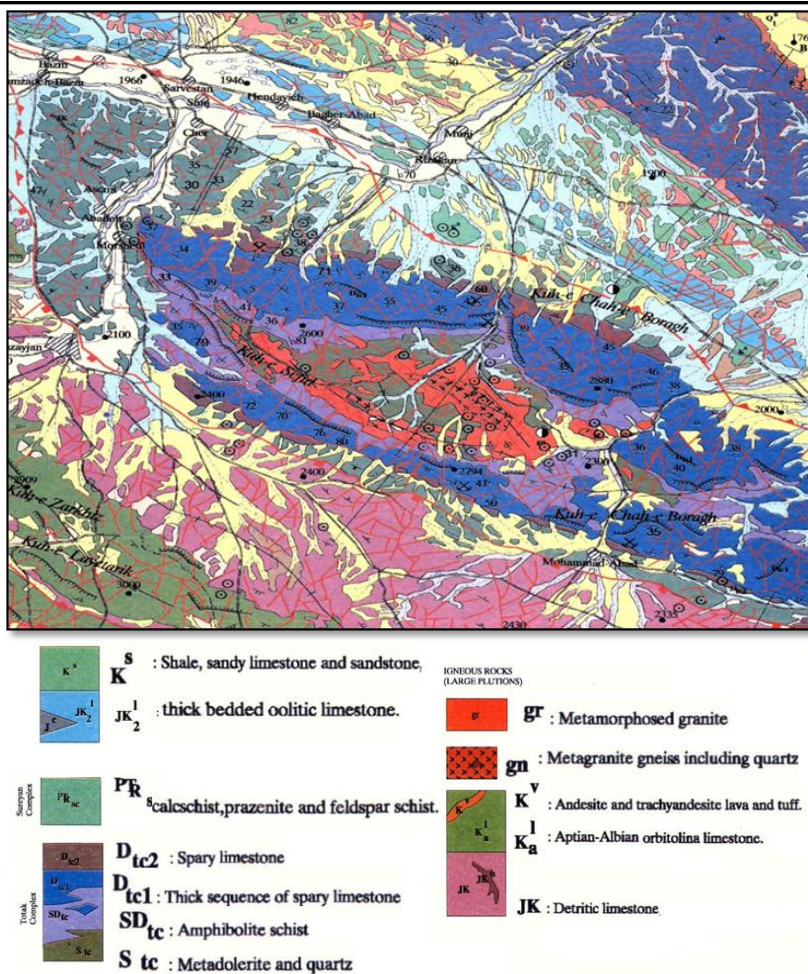
در اینجا B_1 هر کدام از باندهای طیفی، B_2 میانگین باندهای تصویر و M میانگین داده‌ها است. این روش پارامترهای تصحیح را بطور مستقیم از اطلاعات داخل خود تصویر، بدون کمک گرفتن از اطلاعات جانبی تعیین می‌کند (Green and Craig, 1985; Ayoobi and Tangestani, 2017).

پیکسل‌ها به مجموعه‌ای از عضوهای خالص و فراوانی‌های کسری است. عضوهای خالص، طیف‌های استخراج شده مربوط به مواد مختلف و فراوانی‌های کسری، نسبت‌های حضور عضوهای خالص در هر پیکسل است. در واقعیت‌های میدانی بخصوص در پهنه‌های دگرگونی، پدیده اختلاط طیفی همواره یکی از چالش‌های مهم در بازسازی و نقشه برداری واحدهای سنگی و کانیایی بوده است (Foody, 2004). هر چند مطالعات زیادی با استفاده از داده‌های سنجش از دور در جهان و ایران صورت گرفته است اما مطالعات اندکی بر روی پهنه‌های دگرگونی در دسترس می‌باشد. تنها پژوهشگرانی مانند Echter et al., 2003; Rajendran and Nasir, 2015; Chen et al., 2018 با استفاده از روش‌های تمام‌پیکسلی مانند تجزیه مولفه‌های اصلی (PCA) و نقشه‌بردار زاویه طیفی سعی در بازسازی این واحدها و کانی‌های نشانگر نموده‌اند اما توجهی به کاربرد روش‌های زیرپیکسلی نشده است. به هر حال، استفاده از روش‌های زیرپیکسلی می‌تواند در شناسایی و تفکیک دقیق پهنه‌های دگرگونی و کانی‌های نشانگر مفید باشد.

منطقه مورد مطالعه در زون دگرگونی سندنچ - سیرجان واقع شده که به عنوان یک ناحیه با پتانسیل خوب برای اکتشاف ذخایر مس و آهن شناخته شده است (Meshkani et al., 2013). سنجنده استر از جمله سنجنده-های تخصصی است که بر اساس نیازهای زمین‌شناسی و اکتشاف مواد معدنی طراحی شده است و قادر به تفکیک گروه‌های مختلف کانی‌ها از جمله اکسید-ها و هیدروکسیدهای آهن، کربنات‌ها، و رس‌ها می‌باشد (Rowan and Mars, 2003; Rockwell and Hofstra, 2008; Rajendran et al., 2011; van der Meer et al., 2012; Rajendran and Nasir, 2017; Adiri et al., 2017). با توجه به اینکه بسیاری از کانسارها با تشکیل یک سری کانی‌های شاخص همراه می‌باشند که به صورت غیرمستقیم می‌توانند به عنوان کلید اکتشافی در مطالعات سنجش از دور استفاده شوند. با بررسی مطالعات پیشین معلوم گردید که فراوانی کلریت در شیست‌ها با نزدیک شدن به ماده معدنی مس و افزایش آنکریت در ماربل با نزدیک شدن به ذخایر آهن صورت می‌گیرد (Ebrahimi, 1999; Esmaeili, 2011). با توجه به اینکه در منطقه مورد بررسی، مطالعات سنجش از دور بطور دقیق صورت نگرفته و به دلیل حضور کوهستان‌های مرتفع در محدوده، مطالعات سنجش از دور می‌تواند روشی کارآمد باشد. این مقاله تلاش دارد که با اعمال روش تمام پیکسلی و اگرایی اطلاعات طیفی و روش زیرپیکسلی تخمینگر انسجام توافقی بر روی داده‌های استر در محدوده-های مرئی- فرورسرخ نزدیک و فرورسرخ موج کوتاه، واحدهای سنگ‌شناسی و کانی‌های نشانگری که معرف نواحی امیدبخش معدنی مس و آهن هستند را نقشه‌برداری کند.

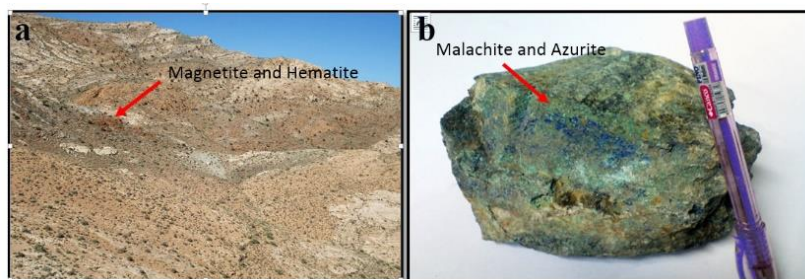
منطقه مطالعاتی

ناحیه مورد مطالعه در زون دگرگونی سندنچ - سیرجان در شمال شرق شیراز، ایران، در بین دو نقطه جغرافیایی "UL=53° 46' 18.08" و "LR=54° 1' 11.20" و "23' 46.84" و "30° 12' 7.82" واقع شده است. پهنه دگرگونی سندنچ - سیرجان توسط سنگ‌های دگرگونی و کمپلکس‌های دگرگون شده مشخص می‌شوند و با پلوتون‌های فراوان دگرشکل شده و غیردگرشکل همراه است. این زون در پالئوژئیک یک ریفت درون قاره‌ای، در مزوژئیک یک کمان ماگمایی و در تریسیری یک کمان پیشین بوده است (Alavi, 1994). در ناحیه مورد مطالعه دو فاز دگرگونی بر توالی سنگ‌های منطقه رخ داده است: ۱) یکی در حد رخساره آمفیبولیت که در اواخر تریاس میانی و اوائل تریاس بالایی در زمان تحول کیمیرین



شکل ۱- نقشه ساده شده زمین شناسی منطقه مورد مطالعه (بر گرفته از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰: (سوریان، سازمان زمین شناسی کشور، سال ۱۳۸۰).

Fig. 1. Simplified geological map of the study area (modified from 1:100,000 geological map of Surian, Geological Survey of Iran, 2001).



شکل ۲- (a) کانی های مس در واحد گرین شیستی کمپلکس سوریان و (b) واحد ماربلی کمپلکس توتک همراه با آثار کانه زایی آهن.

Fig. 2. Copper minerals in the green schist unit of the Surian complex, and (b) Tutak marble complex associated with iron mineralization.

است و از طیف کتابخانه‌ای USGS کانی‌های آنکریت و کلریت و طیف صحرایی نمونه‌های سنگی شیست‌سبز و ماربل به عنوان طیف شناخته شده به الگوریتم‌ها درون‌داد شد.

روش طبقه‌بندی واگرایی اطلاعات طیفی یک روش طبقه‌بندی طیفی است که از اندازه واگرایی برای تطابق پیکسل‌ها به طیف مورد نظر استفاده می‌کند. در این روش هرچه واگرایی کمتر باشد احتمال شباهت پیکسل‌ها بیشتر است. همچنین پیکسل‌های با واگرایی بیشتر از حداکثر آستانه تعیین شده طبقه‌بندی نمی‌شوند (Chang, 2000; Kullback, 1959).

به منظور شناسایی کانی‌های نشانگر تعداد ۱۸ نمونه به عنوان نماینده از واحدهای سنگی و کانیایی دگرگون شده انتخاب و به وسیله دستگاه طیف سنج ASD FieldSpec-3 در محدوده ۰/۳۵ تا ۲/۵ میکرو متر تجزیه شد. برای تفسیر کانی‌شناسی طیف‌های بازتابی و تعیین فراوانی نیمه‌کمی کانی‌ها از نرم افزار تحلیل طیفی TSG استفاده شد. نتایج خروجی بر اساس مشاهدات میدانی و نتایج اندازه گیری‌های طیفی، درستی سنجی شد.

روش‌های پردازش تصویر

برای نقشه‌برداری واحدهای دگرگونی و کانی‌های نشانگر در این منطقه از روش‌های واگرایی اطلاعات طیفی و تخمینگر انسجام توافقی استفاده شده

بحث

بر اساس نتایج به دست آمده از مطالعات طیف‌نمایی نمونه‌های صحرایی به‌وسیله نرم‌افزار TSG، در واحد سنگی شیست‌سبز کانی‌های کلریت، اپیدوت، اکتینولیت و هورنبلند و در واحد ماربل کانی‌های کلسیت، دولومیت و آنکریت حضور دارند (جدول ۱). مقایسه طیف‌های بازنویسی شده به ۹ باند استر شیست‌سبز و ماربل (شکل ۳)، نشان می‌دهد که با وجود شباهت طیفی این دو نمونه در محدوده ۲/۳۳ میکرومتر، آن‌ها در محدوده طیف مرئی-فروسرخ نزدیک، دارای بازتاب‌های مختلف می‌باشند. طیف کلریت‌شیست در باندهای ۲،۱ و ۳ بازتاب کم نشان می‌دهند در حالی که واحد سنگی ماربل در این باندها دارای بازتاب طیفی بالایی است (شکل ۳)، (Cudahy and Hewson, 2002). بازتاب پایین در محدوده مرئی فروسرخ نزدیک در شیست سبز به علت وجود آهن در ساختار کلریت و اپیدوت می‌باشد. به دلیل اختلاف طیفی این دو واحد در محدوده مرئی فروسرخ نزدیک، الگوریتم واگرایی اطلاعات طیفی توانست آن‌ها را از یکدیگر تفکیک نماید (شکل ۴). نتایج خروجی این الگوریتم سازگاری قابل قبولی را با نقشه زمین‌شناسی منطقه و مشاهدات میدانی نشان داد. میزان دقت کاربر برای واحد سنگی شیست سبز ۹۶٪ و برای واحد سنگی ماربل ۹۱٪ می‌باشد، میزان دقت تولید کننده برای واحد سنگی شیست سبز ۸۲٪ و برای واحد سنگی ماربل ۹۲٪ می‌باشد، میزان دقت کلی ۸۳٪ و میزان ضریب کاپا ۷۲٪ درصد می‌باشد (جدول ۲).

بر اساس مشاهدات میدانی پیکسل‌های بارز شده کلریت با فراوانی‌های بالاتر از ۵۰ درصد بوسیله روش تخمینگر انسجام توافقی منطبق با واحد شیست سبز بود. فراوانی‌های بالاتر از ۵۰ درصد کلریت نشان دهنده افزایش فراوانی این کانی نسبت به کانی‌های اکتینولیت و اپیدوت در این واحد سنگی با نزدیک شدن به کانه‌زایی مس است که منطبق با نتایج تحلیل طیفی و واقعیت‌های میدانی است. در یال جنوبی کمپلکس توتک افزایش درمقادیر فراوانی کلریت مشاهده شده که می‌تواند به عنوان یک شاخص اکتشافی مناسب برای شناسایی ذخایر مس در منطقه در نظر گرفته شود، به طوری که موقعیت جغرافیایی آثار معدنی مزایجان با پیکسل‌های کلریت‌دار با فراوانی‌های بالاتر از ۷۵ درصد انطباق قابل قبولی را نشان می‌دهد.

در برخی از نمونه‌های صحرایی علاوه بر کانی کلریت با کسر فراوانی کمتر از ۷۵ درصد، کانی‌های دیگر مانند اپیدوت، هورنبلند و اکتینولیت نیز حضور داشتند (جدول ۱). روند افزایشی فراوانی مقادیر کلریت به سمت یک، منطبق با تغییر ترکیب شیمیایی کلریت از نوع غنی از منیزیم به نوع غنی از آهن است (جدول ۱). بر اساس مشاهدات میدانی پیکسل‌های بارز شده آنکریت با فراوانی‌های بالاتر از ۵۰ درصد منطبق با واحد ماربل بود. فراوانی‌های بالاتر از ۷۵ درصد آنکریت نشان دهنده افزایش فراوانی این کانی نسبت به کانی‌های کلسیت و دولومیت در این واحد سنگی با نزدیک شدن به کانه‌زایی آهن است. با وجود اینکه نتایج بررسی‌های طیفی نیز فراوانی بالای آنکریت در منطقه را تأیید کرد، در برخی از نمونه‌های صحرایی علاوه بر این کانی، کلسیت و دولومیت نیز حضور داشتند (جدول ۱). در یال شمالی کمپلکس توتک افزایش در مقادیر فراوانی آنکریت مشاهده شده که می‌تواند به عنوان یک شاخص اکتشافی مناسب برای شناسایی ذخایر آهن در منطقه در نظر گرفته شود، به طوری که موقعیت جغرافیایی آثار معدنی کان‌گوهر با پیکسل‌های آنکریت‌دار با فراوانی‌های بالاتر از ۷۵ درصد انطباق قابل قبولی را نشان می‌دهد.

روش تخمینگر انسجام توافقی یک روش نقشه بردار زیر پیکسلی است که فراوانی نیمه کمی مواد خاص در یک پیکسل را بر اساس ویژگی‌های طیفی-شان ارائه می‌دهد. این روش از یک تابع توزیع به منظور مدل کردن پس زمینه استفاده می‌کند. به عبارت دیگر این روش نیازی به طیف‌های مربوط به اجزای خالص پس‌زمینه ندارد. که این فرض معادل با حذف پس‌زمینه ساختار یافته است. در این روش پس‌زمینه به صورت یک تابع توزیع گوسین با میانگین صفر و کواریانس مقیاس شده است. با انطباق کامل طیف پیکسل و طیف مرجع حاصل این عبارت یک خواهد بود (Truslow, 2012).

نتایج

ویژگی‌های طیفی

طیف یک سنگ مخلوطی از طیف کانی‌های تشکیل دهنده آن بر حسب میزان کسر فراوانی‌شان است (Clark, 1999). بنابراین ممکن است با تغییر در نوع و درصد کانی‌ها یک سنگ، طیف سنگ تغییر یابد. شکل ۳ طیف کانی‌های کلریت، آنکریت از کتابخانه طیفی USGS و شیست سبز و ماربل از نمونه‌های صحرایی را نشان می‌دهد. کلریت دارای باندهای جذبی قوی آهن فرو در محدوده ۰/۷، ۰/۹ و ۱/۱ میکرومتر و باندهای ترکیبی Mg-OH نزدیک ۲/۳۶-۲/۳۳ میکرومتر می‌باشد (Clark et al., 1990; Gupta, 2003). جذب در محدوده‌های ۰/۷ تا ۱/۱ و ۲/۳۳ تا ۲/۳۶ میکرومتر به ترتیب معادل باندهای ۳ و ۸ استر است. آنکریت دارای جذب‌های مشابه با دولومیت در ۲/۳۳ میکرومتر (باند ۸ استر) و به دلیل وجود Fe به جذب ضعیف در ۲/۲۶ میکرومتر (باند ۷ استر) نشان می‌دهد. شیست سبز دارای باندهای جذبی قوی آهن فرو در محدوده ۰/۷۱، ۰/۹، ۰/۹ میکرومتر (معادل باند ۳ استر) و باندهای ترکیبی Mg-OH نزدیک ۲/۳۳ میکرومتر، منطبق با باند ۸ استر، است (Clark et al., 1990). ماربل دارای یک باند جذبی قوی CO_3^{2-} در ۲/۳۳ میکرومتر (باند ۸ استر) و دو باند قوی در نزدیکی ۱/۴۲ و ۱/۹۱ میکرومتر ناشی از حضور مولکول آب در میان‌بارهای سیال است.

بارزسازی واحدهای سنگی و کانیایی

الگوریتم واگرایی اطلاعات طیفی بر روی دسته‌داده‌های استر جهت بارزسازی واحدهای سنگی ماربل و شیست سبز انجام شد و از طیف نمونه-های صحرایی مرتبط با این واحدها به عنوان طیف مرجع استفاده گردید. پس از اعمال این روش بر روی این واحدهای سنگی، محدوده‌هایی با کمترین واگرایی با استفاده از روش برش چگالی انتخاب گردید و بر روی تصویر خاکستری استر رونهاده شد (شکل ۴).

با توجه به تفکیک مکانی ۱۵ و ۳۰ متر استر در محدوده‌های مرئی فروسرخ نزدیک و فروسرخ موج کوتاه، یک پیکسل از تصویر شامل مخلوطی از پاسخ طیفی از چندین ماده است. از این‌رو، واگرایی اطلاعات طیفی که روشی تمام-پیکسلی است نمی‌تواند در نقشه‌برداری کانی‌های آنکریت و کلریت منطقه مورد مطالعه که در مقادیر زیرپیکسلی یافت می‌شوند، استفاده شود. بدین-ترتیب، روش تخمینگر انسجام توافقی جهت شناسایی تعیین درصد ماده هدف در پیکسل‌های آمیخته بر روی دسته‌داده‌های استر انجام و از طیف نمونه‌های کتابخانه استاندارد USGS کانی‌های کلریت و آنکریت به عنوان عضوهای انتهایی استفاده شد. پس از اعمال این روش، کسری فراوانی خروجی بالاتر از ۰/۵ با استفاده از روش برش چگالی انتخاب و بر روی تصویر خاکستری استر رونهاده شد. براساس نتایج روش تخمینگر انسجام توافقی، کلریت و آنکریت با کسرهای فراوانی ۰/۵ تا ۱ بارز شد. این فراوانی‌ها به دو گروه ۰/۷۵-۰/۵ و ۰/۷۵-۱ درصد تقسیم‌بندی شده‌اند (شکل ۵).

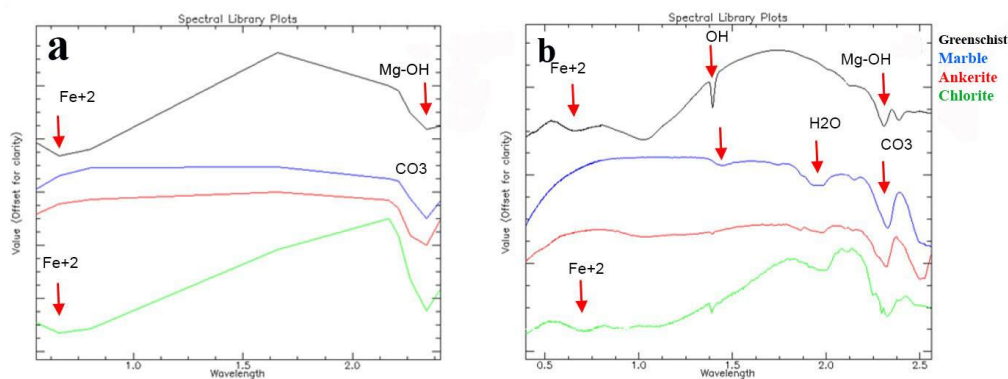
جدول ۱- نتایج حاصل از تحلیل طیفی نمونه‌های صحرایی واحدهای سنگی شیست سبز و ماربل بوسیله نرم‌افزار TSG.
Table 1. Results of spectral analysis of greenschist and marble field samples by TSG software.

Sample Name	Min1 sTSAS	Min2 sTSAS	Min3 sTSAS	w2200	d2200	w2250	d2250	w2350	d2350	d1900
001B.asd	Chlorite-Mg	Epidote				2255.9	0.28	2342.6	0.388	0.121
002B.asd	Muscovite	Chlorite-Mg		2200	0.179	2255.7	0.0987	2348.6	0.143	0.0123
007B.asd	Chlorite-FeMg	Actinolite				2255.4	0.17	2325.8	0.257	0.223
009B.asd	Calcite					2257.6	0.148	2339.5	0.149	0.0502
0011B.sad	Chlorite-Mg	Actinolite	Epidote			2254.7	0.19	2334.8	0.272	0.215
018B.asd	Calcite			2228.6		2266.4	0.051	2323.4	0.0855	0.0345
019B.asd	Chlorite-FeMg	Epidote				2256.2	0.362	2344.9	0.518	0.0754
027B.asd	Calcite	Chlorite-FeMg			0.023	2250.3	0.117	2327.8	0.161	0.0977
034B.asd	Dolomite					2257.6	0.051	2339.2	0.384	0.223
038B.asd	Muscovite	Chlorite-Fe		2208.1	0.106	2256.1	0.0987	2343.2	0.0683	0.0318
043B.asd	Chlorite-FeMg					2253.3	0.226	2335	0.222	0.048
045B.asd	Chlorite-FeMg					2258.6	0.0993	2333.3	0.161	0.0475
046B.asd	Chlorite-Fe	Ankerite		2226.1		2256.1	0.0987	2338.3	0.162	0.0607
050B.asd	Chlorite-Fe	Epidote				2251.6	0.12	2318.6	0.174	0.0484
078B.asd	Ankerite	Actinolite	Epidote			2258.6	0.0987	2344.9	0.161	0.048
080B.asd	Chlorite-Fe	Actinolite				2255.6	0.243	2339.1	0.379	0.0645
083B.asd	Ankerite					2255.4	0.0987	2325.8	0.272	0.0475
084B.asd	Chlorite-Fe	Epidote				2257.4	0.275	2347.9	0.381	0.205

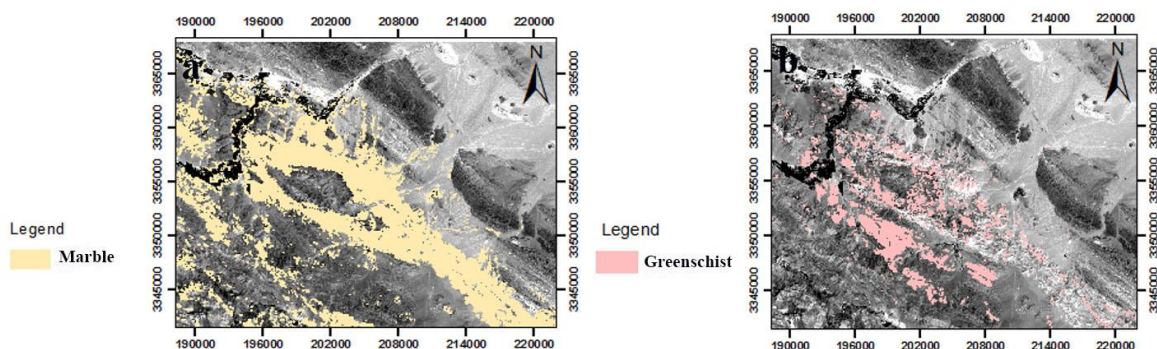
جدول ۲- ماتریس خطا برای نتایج الگوریتم واگرایی اطلاعات طیفی.

Table 2. Confusion matrix of the results obtained by SID algorithm.

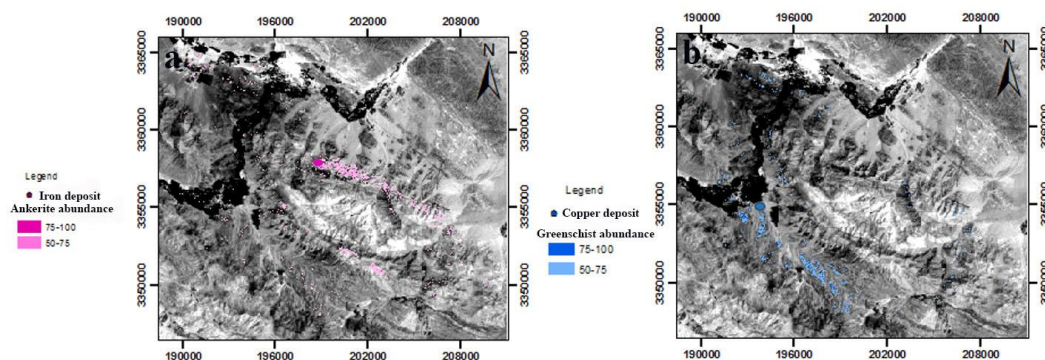
Rocks	Reference data			User's accuracy	
	Marble	Greenschist	Total		
Unclassified	1	3	4		
Marble	26	2	28	(26/28)	0.918571
Greenschist	1	24	25	(24/25)	0.96
Total	28	29	57		
Producer's accuracy	(26/28)	(24/29)			
	0.928571	0.82758621			
Overall accuracy=0.837			Kappa coefficients=0.72		



شکل ۳- (a) طیف بازتابی واحدهای سنگی شیست سبز و ماربل و کانی های کلریت و آنکریت و (b) طیف های بازتابی شده به ۹ باند استر. Fig. 3. (a) Reflectance spectra of greenschist, marble units and chlorite and ankerite, and (b) spectra resampled to 9 ASTER bands.



شکل ۴- نتایج نقشه برداری واحد شیست سبز و ماربل توسط الگوریتم واگرایی اطلاعات طیفی. Fig. 4. Results of SID algorithm for greenschist and marble mapping.



شکل ۵- نتایج نقشه برداری کانی کلریت و آنکریت توسط الگوریتم تخمینگر انسجام توافقی و موقعیت کانه زایی مس و آهن.

Fig. 5. Results of ACE algorithm for chlorite and ankerite mapping and the locations of copper and iron deposits.

استفاده شد. اختلاط آنکریت و کلریت با کانی ها دیگر در یک پیکسل باعث می شود که نتوان از الگوریتم واگرایی اطلاعات طیفی به دلیل عدم تطابق بین پیکسل تصویر و مرجع استفاده نمود. در حالی که روش تخمینگر انسجام توافقی توانسته کلریت و آنکریت را شناسایی کند و روند افزایشی این کانی ها را به درستی تشخیص دهد. این کانی ها به عنوان کانی های نشانگر در واحد - شیستی و ماربلی در تشخیص اندیس های مس و آهن مفید واقع شدند. نتایج پردازش تصاویر با واقعیت های زمینی، اندازه گیری های طیفی، و نقشه های زمین شناسی تطابق خوبی را نشان داد.

نتیجه گیری

این مطالعه به ارزیابی و بررسی قابلیت های روش های تمام پیکسلی و زیر پیکسلی در نمایان سازی پهنه های دگرگونی و کانی های هدف مرتبط با نواحی کانه زایی مس و آهن با استفاده از داده های بازتابی استر پرداخته است. نتایج حاصل نشان داد که شیست سبز و ماربل به دلیل جذب مشترک در محدوده طیفی فرورسوخ موج کوتاه به وسیله نسبت گیری باندی قابل تفکیک نیستند. برای تفکیک آن ها از الگوریتم واگرایی اطلاعات طیفی به علت تفاوت در میزان بازتاب طیفی آن ها در محدوده مرئی - فرورسوخ نزدیک

منابع

- Abrams, M., Hook, S.J., 1995. Simulated ASTER data for geologic studies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 33, 692–699.
- Adams, J.B., Gillespie, A.R., 2006. *Remote sensing of landscapes with spectral images: A physical modeling approach*, 3rd edition Cambridge University Press, p. 1150.
- Adiri, Z., El Harti, A., Jellouli, A., Lhissou, R., Maacha, L., Azmi, M., Bachaoui, E.M., 2017. Comparison of Landsat-8, ASTER and Sentinel 1 satellite remote sensing data in automatic lineaments extraction: A case study of Sidi Flah-Bouskour inlier, Moroccan Anti Atlas. *Advances in Space Research* 60, 2355-2367.
- Ayoobi, I., Tangestani, M.H., 2017. Evaluation of relative atmospheric correction methods on ASTER VNIR–SWIR data in playa environment. *Carbonates and Evaporites* 32, 539-546.
- Campbell, J.B., 1996. *Introduction to remote sensing*, 2nd edition, Taylor & Francis Ltd, London, 968.
- Chang, C., 2000. An Information Theoretic Approach to spectralsariability, Similarity, and discrimination for hyperspectral image analysis. *IEEE Transactions on Information theory* 46, 26-42.
- Chen, Q., Zhao, Z., Jiang, Q., Tan, S., Tian, Y., 2018. Identification of metamorphic rocks in Wuliangshan Mountains (Southwest China) using ASTER data. *Arabian Journal of Geosciences* 11, 311-356.
- Clark, R. N., 1999. Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy. *Manual of remote sensing* 3, 3-58.
- Clark, R.N., King, T.V.V., Klejwa, M., Swayze, G.A., Vergo, N., 1990. High Spectral Resolution Reflectance Spectroscopy of Minerals. *Journal of Geophysical Research* 95, 12653-12680.
- Cudahy, T., Hewson, R., 2002. ASTER geological case histories: porphyry-skarnepithermal, iron oxide Cu-Au and Broken hill Pb-Zn-Ag. Annual General Meeting of the Geological Remote Sensing Group, ASTER Unveiled, Burlington House, Piccadilly, London, UK.
- Ebrahimi S., 1999. Economic geology investigation of the Toutakcomplex, map of Surian, scale 1:100,000. M.Sc. thesis, Shahid Beheshti University, Tehran.
- Echtler, H., Segl, K., Dickerhof, C., Chabrilat, S., Kaufmann, H.J., 2003. Isograde mapping and mineral identification on the island of Naxos, Greece, using DAIS 7915 hyperspectral data, *Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications, and Geology* 61, 115-123.
- Foody, G.M., 2004. Sub-pixel methods in remote sensing, *Remote sensing image analysis: Including the spatial domain*, Springer, Dordrecht 37-49.
- Green, A.A., Craig, M.D., 1985. Analysis of aircraft spectrometer data with logarithmic residuals. *JPL Publ* 85, 111-119.
- Gupta, R. P., 2003. *Remote Sensing Geology*, 655 p Springer Verlag.
- Houshmandzadeh, A., Soheili, M., 1990a. Description of Eqlid 1:250,000scale map, No. G10, Geological Survey of Iran, 157p.
- Keshava, N., 2003. A survey of spectral unmixing algorithms. *Lincoln laboratory journal* 14, 55-78.
- Klompouwer, M.A., Langendijk, E.H.A., Belik, O., Hekstra, G.J., 2011. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office 7, 883-932.
- Meshkani, S.A., Mehrabi, B., Yaghubpur, A., Sadeghi, M., 2013. Recognition of the regional lineaments of Iran: Using geospatial data and their implications for exploration of metallic ore deposits. *Ore Geology Reviews* 55, 48-63.
- Mousivand F., 2010. Geology, geochemistry and genesis of the Chahgaz Zn–Pb–Cu deposit, south of Shahre Babak; and its comparison with the Bavanat Cu–Zn–Ag volcanogenic massive sulfide deposit, in the South Sanandaj–Sirjan zone. Ph.D. thesis, Tarbiat Modares University, Tehran.
- Oveisi B., 2001. Geological map of Surian, scale 1:100,000. Geological Survey of Iran, map No. 6750.
- Rajendran, S., Nasir, S., 2015. Mapping of high pressure metamorphics in the As Sifah region, NE Oman using ASTER data. *Advances in Space Research* 55, 1134-1157.
- Rajendran, S., Nasir, S., 2017. Characterization of ASTER spectral bands for mapping of alteration zones of volcanogenic massive sulphide deposits. *Ore Geology Reviews* 88, 317-335.
- Rajendran, S., Hersi, O.S., Al-Harthy, A., Al-Wardi, M., El-Ghali, M.A., Al-Abri, A.H., 2011. Capability of advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) on discrimination of carbonates and associated rocks and mineral identification of eastern mountain region (Saih Hatat window) of Sultanate of Oman. *Carbonates and evaporates* 26, 351-364.
- Rockwell, B.W., Hofstra, A.H., 2008. Identification of quartz and carbonate minerals across northern Nevada using ASTER thermal infrared emissivity data -Implications for geologic mapping and mineral resource investigations in well-studied and frontier areas. *Geosphere* 4, 218-246.
- 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.
- Truslow, E., 2012. Performance evaluation of the adaptive cosine estimator detector for hyperspectral imaging applications. Doctoral dissertation, Northeastern University.
- Van Der Meer, F., 1998. Imaging spectrometry for geological remote sensing. *Geologie en Mijnbouw* 77, 137-151.
- Wang, Q., Wang, L., Liu, D., 2012. Integration of spatial attractions between and within pixels for sub-pixel mapping. *Journal of Systems Engineering and Electronics* 23, 293-303.

