

Spectral Unmixing of Hyperion Data to Identify the Indicator Minerals of Khoy Region Using A Bilinear Method

Mehdi Ebrahimi¹, Majid M. Oskouei^{2*}, Hadi H. Moghadam³

1. Faculty of Mining Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran
mahdiebrahimi121201@yahoo.com
2. Faculty of Mining Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran
mohammady@sut.ac.ir
3. Faculty of Mining Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran
hj_moghadam@sut.ac.ir

Received: 2023/07/16 - Accepted: 2024/02/29

Abstract

The hyperspectral images are studied to extract the spectral signatures of the elements that comprise the image pixels (end members) and estimate their frequency. The surface reflectance spectrum is considered a linear combination of endmember spectra in linear mixing models. When internal mixing is also important, the linear model is not the answer, and non-linear algorithms should be used. The method used in this research is the generalization and improvement of Nascimento and Fan's bilinear models, known as the generalized bilinear mixing model (BPOGM). This study aims to apply and evaluate this method in the face of data with high mixing and large volumes. Therefore, the data used in this research are Hyperion data of Khoi region, which has good mineral and mineralogical indicators. First, the available pure spectra were extracted using the N-FINDR method. In addition to the excellent compatibility of the N-FINDER method, it has more ability to extract endmembers than the pixel purity index method used in linear separation. In this way, stilbite mineral (representative of zeolite group), vermiculite (representative of mica group), serpentine (representative of olivines of harzburgite and serpentized ultramafic rocks), chlorite (representative of chlorite group), and quartz were identified. Then, using the BPOGM method, which is a solution method for the bilinear GBM model, the frequency of each end member was calculated, and the distribution map was obtained. The results of the non-linear method comply well with the geological map of the region based on mineralogical interpretations of the lithological facies (average accuracy of 78.25), which is completely acceptable at this stage of exploration work.

Keywords

Hyperspectral data, Mineral detection, Spectral unmixing, Non-linear models, Hyperion.

* Corresponding Author



1- Introduction

The high spectral resolution of hyperspectral data reveals the absorption characteristics of materials in different spectral ranges, which greatly helps in their identification. Using these data, in addition to estimating the distribution of materials on the earth's surface, its type can also be recognized. On the other hand, the increase in spatial resolution and the decrease in bandwidth in hyperspectral sensors cause a significant increase in the volume of this type of data, which causes problems in data processing. Therefore, using models and providing different methods to solve these models has become a hot topic among researchers in hyperspectral telemetry. Endmember extraction is a key step in the spectral separation process, and its purpose is to determine the identity of basic ground objects in images, which is done through image data analysis. Endmember extraction has attracted much attention, and researchers are trying to provide the most suitable algorithms for endmember extraction from hyperspectral data.

In some cases, the amount of mixing is not macroscopic, and the internal mixing of the material is also important. The surface reflectance spectrum is considered a linear combination of endmember spectra in linear mixing models. When internal mixing is also important, the linear model is not the answer, and non-linear algorithms should be used. The method used in this research is the generalization and improvement of Nascimento and Fan's bilinear models, known as the generalized bilinear mixing model (BPOGM).

2- Methods

This study aims to apply and evaluate this method in the face of data with high mixing and large volumes. Therefore, the data used in this research are Hyperion data of Khoi region, which has good mineral and mineralogical indicators. First, the available pure spectra were extracted using the N-FINDER method. In addition to the excellent compatibility of the N-FINDER method, it has more ability to extract endmembers than the pixel purity index method used in linear separation. The high spectral resolution of hyperspectral data reveals the absorption characteristics of materials in different spectral ranges, which greatly helps in their identification. Using these data, in addition to estimating the distribution of materials on the earth's surface, its type can also be recognized. On the other hand, the increase in spatial resolution and the decrease in bandwidth in hyperspectral sensors cause a significant increase in the volume of this type of data, which causes problems in data processing. Therefore, using models and providing different methods to solve these models has become a hot topic among researchers in hyperspectral telemetry [1]. In general, the information in a remote-sensing image pixel is a mixture of information from objects on the ground, resulting in mixed pixels. In this case, to use hyperspectral data, it is necessary to decompose these mixed pixels into a set of endmember signatures and their corresponding abundance fractions. This process is called spectral separation or mixed pixel decomposition [2]. Endmember extraction is a key step in the spectral separation process, and its purpose is to determine the identity of the bare ground objects in the images, which is done through image data analysis. Endmember extraction has attracted much attention, and researchers are trying to provide the most suitable algorithms for endmember extraction from hyperspectral data. Four methods are generally used to select end members: 1. Obtaining the spectrum of the end member from the spectral library. 2. Derivation of the end member's spectrum from the image's pure pixels. 3. Automatic acquisition of end member spectrum using factor analysis. 4. Creating end member spectrum using convex geometry [3] and [4]. Among the most popular endmember extraction methods, PPI [5] and [6], VCA [7], N-FINDER [8], NMF [9], MVSA [10], and [11] can be mentioned. Usually, two types of mixing models are considered according to the degree of interference. Linear mixing occurs when the reflected rays from the phenomena in a pixel do not interact and interfere. This model assumes a mixed pixel as a linear combination of end members, with coefficients equal to the abundance of members inside the

pixel. Now, when the mixing is macroscopic, and the beam reaching the sensor is the result of reflection from several materials, nonlinear effects may occur [2, 7]. In modeling multiple nonlinear reflections, the simplest model uses only one secondary reflection or bilinear interaction. In this case, in addition to the main reflection, there is a secondary reflection of the target function or object. Types of bilinear models mainly differ in the limitations related to the mixing parameters [12].

Their mineralogy should be determined before determining the abundance of end members and preparing their distribution map. In this case, to extract the end members from the hyperspectral image, if basic information from the image is accessible, a supervisory method can be used. When this information is unavailable, an automatic end member extraction algorithm (EEA) can be used. For example, algorithms such as pixel purity index, N-FINDER, and vertex component analysis (VCA) can be mentioned. The dominant assumption of these algorithms is that in the data set, there is at least one pure pixel for each end member (an assumption that is not necessarily always correct). With this assumption, the purest pixels are extracted from the image.

The second stage of spectral separation is known as "abundance estimation." after identifying the appropriate model according to the number of end members, using different optimization methods, the said model can be solved, and the abundance results are obtained. Many algorithms have been proposed for frequency estimation in the linear mixing model. These algorithms are based on the principle of least squares, called maximum similarity estimation or Bayesian algorithms. Frequency estimation is more complicated for nonlinear models. Some algorithms for such models are based on least squares estimators, and others are based on support vector machines and neural networks introduced recently. With the given definition of separation, it can be said that examining and analyzing the spectral graphs of hyperspectral images to identify the existing materials and determine the percentage of presence of each of these materials in a pixel is called spectral separation. For this purpose, a step-by-step algorithm was used, which is described below.

Each band in spectral data, both multispectral and hyperspectral, shows a specific region feature. The number of these features or minerals and, more specifically, end members that can be recognized within the hyperspectral image is called virtual dimensions (VD). It is convenient to estimate the number of end members in the region using one of the usual methods at the beginning of the processing. The MNF algorithm is used for this purpose in this research. Like the PCA method, the MNF method is a dimensionality reduction method that determines the axes with the most information about the region. This is done by checking the value and the eigenvalue chart. As a result, after performing MNF, the state where the slope of the eigenvalue graph reaches a uniform and constant value can be considered as an estimate of the end members. As shown in Figure 3, the chart has reached an almost constant value after the 20th band. In other words, most of the information is in the first 20 bands.

3- Results

In the two-line separation discussed in this research, first, using the N-FINDER algorithm, the end members in the image were estimated and extracted. This method is a selection algorithm that starts with P, a random set of image pixel spectrum as an initial set of end members. Next, the volume of the sadak formed by this P end member is calculated. Each remaining spectrum is replaced with each end member until the enormous sadak volume is obtained compared to any other formed sadak. In this case, the vertices of the said vertex are considered as the end members.

Then, the frequency of these end members in the image was calculated using the BPOGM algorithm, and using the existing spectral library and the SAM and SFF methods, the primary candidates for an end member were considered. The spectral angle mapper (SAM) method calculates the similarity between the spectrum of the endmembers and the reference spectrum by

calculating the spectral angle between them, and the spectral structure fitting (SFF) method determines the degree of similarity by the physical phase of the spectral signatures. In this case, the score obtained from the sum of the two methods can be considered the final score to identify the mineral type of each member.

To increase the accuracy of the selection, in addition to the score for each mineral, the compatibility of the unknown and reference charts was also checked visually. Then, the distribution of each abundance image band was compared with the geological map, and the best candidate was selected for each end member.

4- Conclusions

To obtain a criterion for determining the accuracy and correctness of the separation process, the ratio of the area of abundance to the area of the corresponding geological structure was used. Consider. Suppose A is a geological unit on the ground with area S_A and B is a part of abundance with area S_B that correctly represents this unit. In that case, the ratio $S_B/S_A * 100$ can be a quantitative measure to evaluate the accuracy of obtained abundance (B). For all abundance groups whose genus was specified in the previous section, the areas of the abundance map and the geological unit were first used (c) (b) (a). The ROI plot was determined, and the mentioned ratio was calculated. The average computed accuracy is 78.25%, which is entirely satisfactory.

Despite the appropriate and clear physical interpretations, the mentioned bilinear model can also have weaknesses. Since a bilinear term involves multiplying at least two end terms with less than one, this measure may be smaller than the actual end-term value. This defect is aggravated in the mentioned model, where bilateral interactions are accompanied by coefficients and parameters smaller than one. Another disadvantage of the GBM model is that it does not consider the interactions between two identical materials. This defect may not have much effect on smooth surfaces, but in cases where we are faced with rough surfaces, it can have significant impacts and be seen as an essential distribution in the overall signal.

References

1. Borengasser, M.; Hungate, W. S.; and Watkins, R.; 2008; "Hyperspectral Remote Sensing, Principles and applications", CRC Press, Taylor & Francis Group.
2. Bioucas-Dias, J. M.; Parente, M.; Plaza, A.; Dobigeon, N.; Du, Q.; Gader, P. Chanussot, J.; 2012; "Hyperspectral Unmixing Overview: Geometrical, Statistical, and Sparse Regression-Based Approaches"; IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing; 5(2); 354-379.
3. Mozaffar, M. H.; Zoej, M. J. V.; Sahebi, M. R.; Rezaei, Y.; 2008; "Vegetation endmember extraction in Hyperion images"; The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences; 37(B7); 409-412.
4. Fan, W.; Hu, B.; Miller, J.; Li, M.; 2009; "Comparative study between a new nonlinear model and common linear model for analyzing laboratory simulated - forest hyperspectral data"; International Journal of Remote Sensing; 30; 2951-2962.
5. Boardman, J. W.; 1993; "Automating spectral unmixing of AVIRIS data using convex geometry concepts"; Summaries of the 4th Annual JPL Airborne Geoscience Workshop. Volume 1: AVIRIS Workshop.
6. Boardman, J. W.; Kruse, F. A.; Green, R. O.; 1995; "Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data"; Summaries Proceedings of the Fifth JPL Airborne Earth Science Workshop, Pasadena, 95-101.

7. Nascimento, J. M.; Dias, J. M.; 2005; "Vertex component analysis: A fast algorithm to unmix hyperspectral data"; IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 43, 898-910.
8. Winter, M. E.; 1999; "N-FINDR: An algorithm for fast autonomous spectral end-member determination in hyperspectral data"; in *Imaging Spectrometry V*, 266-276.
9. Miao, L.; Qi, H.; 2007; "Endmember extraction from highly mixed data using minimum volume constrained nonnegative matrix factorization"; IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 45, 765-777.
10. Li, J.; Bioucas-Dias, J. M.; 2008; "Minimum volume simplex analysis: A fast algorithm to unmix hyperspectral data"; in IGARSS 2008-2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, III-250-III-253.
11. Dobigeon, N.; Altmann, Y.; Brun, N.; and Moussaoui, S.; 2016; "Linear and nonlinear unmixing in hyperspectral imaging"; *Data Handling in Science and Technology: Resolving Spectral Mixtures*, 41.
12. Nascimento, J. M.; Bioucas-Dias, J. M.; 2011; "Hyperspectral unmixing based on mixtures of Dirichlet components"; IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 50, 863-878.

مقاله پژوهشی

جداسازی طیفی داده‌های هایپریون با هدف تشخیص کانی‌های شاخص منطقه خوی با استفاده از یک روش دوخطی

مهدی ابراهیمی^۱، مجید محمدی اسکوئی^{۲*}، هادی جمشید مقدم^۳

۱. دانشجوی کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند، mahdiebrahimi121201@yahoo.com

۲. استاد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند، mohammady@sut.ac.ir

۳. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند، hj_moghadam@sut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۲۵ - پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۰

چکیده

مهم‌ترین هدف از مطالعه تصاویر ابرطیفی، استخراج امضاهای طیفی عناصر تشکیل‌دهنده پیکسل‌های تصویر (اعضای انتهایی) و تخمین فراوانی آن‌ها است. در مدل‌های خطی اختلاط طیف انعکاسی سطح به عنوان یک ترکیب خطی از طیف‌های اعضای انتهایی در نظر گرفته می‌شود. در شرایطی که اختلاط داخلی نیز مهم است، مدل خطی جوابگو نبوده و باید از الگوریتم‌های غیرخطی استفاده کرد. روشی که در این تحقیق به کار گرفته شد، تعمیم و بهبود یافته مدل‌های دوخطی ناسیمنتو و فان است که با عنوان مدل اختلاط دوخطی تعمیم یافته (BPOGM) شناخته می‌شود. هدف از این مطالعه، بکارگیری و ارزیابی این روش در مواجهه با داده‌های با اختلاط بالا و حجم داده زیاد است. بنابراین، داده‌های به کار گرفته شده در این تحقیق، داده‌های ابرطیفی هایپریون مربوط به منطقه خوی است که شاخص‌های معدنی و کانیایی خوبی در منطقه دارد. ابتدا طیف‌های خالص موجود به وسیله روش N-FINDER که سازگاری خوبی با مدل‌های دوخطی دارد، استخراج شد. علاوه بر سازگاری خوب روش N-FINDER، نسبت به روش اندیس خلوص پیکسلی که در جداسازی خطی استفاده می‌شود، دارای قدرت بیشتری در استخراج اعضای انتهایی است. به این ترتیب، کانی استیلیت (نماینده گروه زئولیت‌ها)، ورمیکولیت (نماینده گروه میکا)، سرپانتین (نماینده اولیوین‌های هارزبورژیت و سنگ‌های اولترامافیک سرپانتینی شده)، کلریت (نماینده گروه کلریت) و کوارتز شناسایی شد. سپس با استفاده از روش BPOGM که روش حلی برای مدل دوخطی GBM است، فراوانی هر عضو انتهایی محاسبه شد و نقشه فراوانی به دست آمد. نتایجی که از روش غیرخطی بدست آمد، انطباق خوبی با نقشه زمین‌شناسی منطقه بر اساس تفسیرهای کانی‌شناسی رخساره‌های سنگ‌شناسی (میانگین صحت ۷۸٫۲۵) داشت که در این مرحله از کارهای اکتشافی کاملاً قابل قبول است.

کلمات کلیدی

داده هایپراسپکترال، تشخیص کانی، جداسازی طیفی، مدل‌های غیرخطی، هایپریون.

از محبوب ترین روش‌های استخراج اعضای انتهایی می‌توان به PPI [۵] و [۶]، VCA [۷]، NFINDR [۸]، NMF [۹]، MVSA [۱۰] و [۱۱] اشاره کرد.

معمولا بر حسب میزان تداخل، دو نوع مدل اختلاط در نظر گرفته می‌شود. اختلاط خطی زمانی رخ می‌دهد که پرتوهای بازتاب یافته از پدیده‌های موجود در یک پیکسل، با هم تعامل و تداخل^۵ نداشته باشند. این مدل یک پیکسل مخلوط را به صورت ترکیب خطی از اعضای انتهایی، با ضرایبی برابر با میزان فراوانی اعضا در داخل پیکسل در نظر می‌گیرد. حال زمانی که اختلاط ماکروسکوپی بوده و پرتو رسیده به سنسور حاصل انعکاس از چند ماده باشد، اثرات غیرخطی ممکن است اتفاق بیافتد [۲، ۷].

در مدلسازی بازتاب‌های چندگانه غیرخطی، ساده‌ترین مدل، استفاده از تنها یک بازتاب ثانویه یا تعامل دوخطی است. در این حالت علاوه بر بازتاب اصلی یک بازتاب ثانویه از تابع هدف یا شی مورد نظر وجود دارد. انواع مدل‌های دوخطی به صورت عمده در محدودیت‌های مرتبط با پارامترهای اختلاط اختلاف دارند [۱۲].

این مدل اختلاط اولین بار توسط ناسیمنتو و دیاز (۲۰۰۹) برای یک سناریو غیرخطی معرفی شد. طبق این مدل پیکسل مشاهده شده y را می‌توان به صورت رابطه ۱ نشان داد [۱۳]:

$$\sum_{r=1}^R a_r m_r + \sum_{i=1}^{R-1} \sum_{j=i+1}^R \beta_{ij} m_i \odot m_j + n \quad (1)$$

که در آن:

β_{ij} میزان گسترش تداخل بین دو جزء (اعضای انتهایی) $m_i \odot m_j$ ضرب هادامارد^۶ بین اعضای انتهایی i ام و j ام و n نماینده میزان نویز یا نوفه تصویر

علاوه بر این، اعمال یکسری محدودیت‌های فیزیکی بر روی تمام انواع مدل‌های آرایه شده لازم و ضروری است. مدل یا شده نیز از این قاعده مستثنی نیست و محدودیت‌های زیر باید برای آن در نظر گرفته شود (رابطه ۲) [۱۲] و [۱۳]:

قدرت تفکیک طیفی بالای داده‌های ابرطیفی باعث آشکار شدن ویژگی‌های جذبی مواد در محدوده‌های طیفی مختلف می‌شود که این امر کمک به سزایی در شناسایی آن‌ها دارد. با استفاده از این داده‌ها علاوه بر تخمین توزیع مواد سطح زمین می‌توان جنس آن را نیز تشخیص داد. از طرفی، افزایش قدرت تفکیک فضایی همراه با کاهش پهنای باند در سنجنده‌های ابرطیفی موجب افزایش چشمگیر در حجم این نوع داده‌ها است که باعث بروز مشکلاتی در پردازش داده‌ها می‌شود. بنابراین، بکارگیری مدل‌ها و آرایه روش‌های مختلفی برای حل این مدل‌ها، موضوع داغ در بین پژوهشگران حوزه دورسنجی ابرطیفی شده است [۱].

بطور کلی، اطلاعات درون یک پیکسل تصویر سنجنش از دور مخلوطی از اطلاعات اشیا روی زمین است که منتج به پیکسل‌های مخلوط^۱ می‌شود. در این حالت، برای استفاده از داده‌های ابرطیفی لازم است این پیکسل‌های مخلوط به مجموعه‌ای از امزاهای^۲ اعضای انتهایی^۳ و کسرهای فراوانی^۴ متناظرشان تجزیه شوند. این فرآیند، جداسازی طیفی و یا تجزیه پیکسل مخلوط نامیده می‌شود [۲].

استخراج اعضای انتهایی یک گام کلیدی در فرآیند جداسازی طیفی است و هدف از آن تعیین هویت اشیا پایه‌ای زمین موجود در تصاویر است که از طریق تجزیه و تحلیل داده‌های تصاویر انجام می‌شود استخراج اعضای انتهایی توجه زیادی را به خود جلب کرده است و محققان در تلاشند تا مناسب‌ترین الگوریتم‌ها را برای استخراج اعضای انتهایی از داده‌های ابرطیفی آرایه دهند. چهار روش عموماً در انتخاب اعضای انتهایی استفاده می‌شود که عبارتند از:

- بدست آوردن طیف عضو انتهایی از کتابخانه طیفی
- استنتاج طیف عضو انتهایی از پیکسل‌های خالص خود تصویر.
- بدست آوردن اتوماتیک طیف عضو انتهایی با استفاده از آنالیز فاکتور.
- ایجاد طیف عضو انتهایی با استفاده از هندسه محدب [۳] و

¹ Mixed pixels

² Signature

³ Endmember

⁴ Abundance fraction

⁵ Interaction

⁶ Hadamard

برای جداسازی غیرخطی بر پایه مدل دوخطی تعمیم یافته معرفی کردند. روش پیشنهادی بر روی یک تصویر ابرطیفی هوایی با تعداد زیاد اعضای انتهایی اعمال شد و کارایی خوبی را هم در کیفیت جداسازی و بار محاسباتی با سادگی پیاده‌سازی نشان داد [۱۵].

هر کدام از راه‌حل‌های فوق حداقل یکی از مشکلات زیر را شامل می‌شوند: بار محاسباتی زیاد، حساسیت به مقاردهی اولیه و پیکسل محور بودن که مانع اعمال اینگونه الگوریتم‌ها در مواردی که تصاویر ابرطیفی بزرگ وجود دارد، می‌شود. بنابراین در سال ۲۰۱۶، چانگ لی و همکاران، برای حل مساله حداقل مربعات تحت قید مرز، روش گرادیان بهین نستروف که با نام روش شیب بهین مرز تصویر شده^۳ شناخته می‌شود را معرفی کردند. با این کار بسیاری از مشکلات اشاره شده رفع شد [۱۶]. تنوعی از انواع مدل‌های دوخطی بر اساس مدل GBM و روش‌های مختلف حل مساله بهینه‌سازی آن را می‌توان در کارهای [۱۶] تا [۲۰] بیان کرد.

روش دوخطی مورد استفاده در این پژوهش که قبلاً بر روی داده‌های تمرینی آزمایش شده و کارایی و عملکرد آن در تعیین فراوانی‌ها بررسی شده است بر روی داده‌های ابرطیفی منطقه خوی که دارای شاخص‌های معدنی و کانیایی خوبی است به منظور جداسازی و شناسایی شاخص‌های منطقه استفاده شد. علاوه بر این، داده‌های یاد شده اختلاط بالا و حجم پیکسلی زیادی دارند. بنابراین داده‌های مناسبی برای ارزیابی عملکرد الگوریتم BPOGM محسوب می‌شدند در این حالت، ابتدا اعضای انتهایی موجود در تصویر به وسیله روش NFINDR استخراج شد. سپس با در نظر گرفتن مدل دو خطی GBM و با استفاده از روش حل مدل BPOGM که در سال ۲۰۱۶ ارزیابی شد و طبق نتیجه‌گیری حاصل شده در آن پژوهش که این الگوریتم را نسبت به روش‌های دیگر برای حل مدل دوخطی روش کارآمدتری در نظر می‌گرفت، فراوانی اعضای انتهایی محاسبه شد در نهایت نقشه فراوانی هر عضو و نقشه کلی منطقه تهیه شود. برای افزایش دقت یک معیار کمی برای قضاوت در میزان صحت نتایج بدست آمده در روش ترکیبی NFINDR و BPOGM ارائه شد. نقشه‌های فراوانی با نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه مقایسه شد و با توجه به تطبیق توزیع هر کدام از اعضای انتهایی از نقشه‌های فراوانی و

اعضای انتهایی $a_r \geq 0 \quad r = 1, \dots, R$

$$\beta_{i,j} \geq 0 \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, R-1 \\ j = i, \dots, R+1 \end{cases} \quad (2)$$

$$\sum_{r=1}^R a_r + \sum_{i=1}^{R-1} \sum_{j=i+1}^R \beta_{i,j} = 1$$

$$y = \sum_{p=1}^{R^*} a_p^* m_p^* + n$$

مدل دوخطی دیگر تحت عنوان مدل فان به صورت یک تابع غیرخطی است که در آن ضرایب غیرخطی به صورت حاصلضرب فراوانی دو عضو انتهایی متداخل تعریف می‌شود. حلیمی و همکاران در سال ۲۰۱۱ یک مدل دوخطی تعمیم یافته^۱ را برای جداسازی طیفی تصاویر ابرطیفی با توجه به اثرات پراکنش‌های چندگانه مطالعه کردند. این مدل تعمیمی از یک مدل اختلاط خطی و مدل اختلاط دوخطی فان است. بطورکلی طبق مدل GBM، پیکسل مشاهده شده را می‌توان به صورت رابطه ۳ نوشت [۴] و [۱۲] و [۱۴]:

$$Y_p = \sum_{r=1}^R a_r m_r + \sum_{i=1}^{R-1} \sum_{j=i+1}^R \gamma_{i,j} a_i a_j m_i \odot m_j + n \quad (3)$$

$$0 \leq \gamma_{i,j} \leq 1, \forall i \in \{1, \dots, R-1\}, \forall j \in \{i+1, \dots, R\}$$

که در آن $\gamma_{i,j}$ یک ضریب است که تعاملات میان اعضای انتهایی i ام و j ام را در پیکسل مورد بررسی، کنترل می‌کند [۱۴].

روش‌های مختلفی برای حل مدل دو خطی تعمیم‌یافته تا به امروز ارائه شده است. حلیمی و همکاران برای تخمین فراوانی و ضرایب غیرخطی مدل GBM از یک الگوریتم بی‌زین سلسله مراتبی استفاده کردند. تخمینگر بی‌زین مربوطه نیز از نمونه‌هایی که با استفاده از روش MCMC^۲ استخراج میشوند، تقریب زده شدند. علاوه بر این، حلیمی از روش دیگری بر پایه کمینه کردن یک تابع هزینه، تحت قیدهای مناسب برای فراوانی و ضرایب غیرخطی استفاده کرد. در این روش از گرادیان محدود شده نزولی جفت شده با یک روش جستجوی خط استفاده شد [۱۴].

در سال ۲۰۱۲ یوکویا و همکاران یک روش نوین بهینه‌سازی دیگری را با عنوان ماتریس فاکتورگیری نیمه منفی

¹ Generalized Bilinear Model (GBM)

² Markov Chain Monte Carlo

³ Bound Projected Optimal Gradient Method (BPOGM)

جدول ۱- ویژگی‌های هرکدام از واحدهای زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

متامورفیک، گنیس-آمفیبولیت میکاشیست- کوارتزآرنایت و سنگ آهک متبلور	M _t
الترامافیک سرپانتینی شده(عموما هارزبورژیت و دونیت)+ سرپانتین	U _b
گدازه‌های بازالتی حفره‌دار همراه با سنگ آهک + گدازه‌های پیروکسن آندزیتی حفره‌دار همراه با اسکوری	PE ^{VLS}
متاولکانیک سبز تیره همراه با کمی شیست سبز و سنگ آهک بلورین	M _t ^{mt}
کنگلومرا همراه با میان لایه‌های ماسه سنگ	PL-Q
تناوب شیل و ماسه سنگ همراه با میان لایه‌های کنگلومرا همراه با سنگ آهک	K ^S
آمفیبولیت به رنگ سبز تیره در برخی موارد همراه با میکاشیست	am
تراورتن	Q ^{tr}
مارن خاکستری متمایل به سبز با تداخلی از ماسه سنگ	Om _q ^{LM}
سنگ آهک نومولیت‌دار خاکستری روشن همراه با شیل	PE
میکروکوارتز، مونوزودیوریت، گرانیت دانه درشت تا میکروگرانیت پورفیری	M _{dg}
آهک پلاژیک صورتی رنگ، جریان‌های گدازه بازالتی+کلریت	K ^{lv}
کنگلومرا همراه با میان لایه‌های ماسه سنگ	Q-PL
گدازه‌های بازالتی بالشتی همراه با سنگ آهک پلاژیک صورتی رنگ + گدازه بازالتی همراه با کمی شیل و آهک + تناوب متادیا بازالت و آهک پلاژیک	K ^{bp}
متادیوریت و متاگابرو	dg

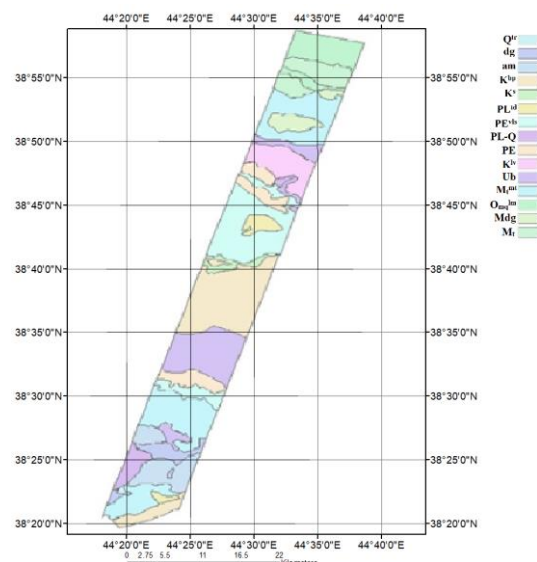
۲- داده‌های هایپراسپکترال مورد استفاده

این مطالعه بر روی قسمتی از یک تصویرهایپریون با ابعاد ۲۴۶×۲۴۴۷ معادل ۵۴۱٫۷۶۵۸ کیلومترمربع واقع در قسمت شمال غربی استان آذربایجان غربی با هدف انجام جداسازی طیفی انتخاب شد. تصویر استفاده شده دارای قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر و پهنای باند طیفی ۱۰ نانومتر بوده و دارای

سنگ‌شناسی مربوط، صحت نتایج به صورت درصد برای هر عضو بدست آمد. با وجود عدم تطابق زمانی تاریخ تصویربرداری داده‌ها با نقشه‌های زمین‌شناسی مورد استفاده در این پژوهش، اختلاف تصویربرداری با مشاهدات زمینی برای تهیه نقشه‌های یاد شده چندان زیاد نیست و این اختلاف ناچیز در بحث زمین‌شناسی و اکتشافات محسوس نیست، بنابراین نقشه‌های یاد شده بعد از ساده‌سازی می‌توانند به عنوان ملاک مناسبی برای بررسی کارآیی روش ما در مقیاس واقعی محسوب شوند.

۱-۱- منطقه مطالعاتی

منطقه مورد مطالعه در شمال غربی استان آذربایجان غربی واقع شده است و فاصله آن از شهرهای خوی، ماکو و سلماس به ترتیب ۴۰، ۲۵ و ۳۰ کیلومتر است. علاوه بر این قسمت بالایی منطقه مورد مطالعه در ورقه ماکو واقع شده است و قسمت میانی با عبور از ورقه خوی و دیزج به ورقه قره ضیال‌الدین می‌رسد. تمامی نقشه‌های زمین‌شناسی مورد استفاده (ورقه خوی، ماکو، دیزج و قوطور) با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ بوده و توسط سازمان زمین‌شناسی کشور تهیه شده است که برای بارزتر شدن ویژگی‌های زمین‌شناسی این بخش در نرم‌افزار ArcGIS 10.5 ساده‌سازی شد (شکل ۱). ویژگی‌های هر کدام از واحدهای زمین‌شناسی به صورت خلاصه در جدول ۱ ارایه شده است.



شکل ۱- نقشه ساده‌سازی شده منطقه با استفاده از نقشه‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ ماکو، خوی، دیزج و قوطور

که مقادیر شیب و آزیموت هر پیکسل از تصویر DEM در قالب تصاویر شیب و آزیموت استخراج می شود و با توجه به شکل مقادیر (γ_i) بر اساس رابطه ۴ محاسبه است:

$$IL = \cos \gamma_i = \cos \theta_p \cos \theta_z + \sin \theta_p \sin \theta_z \cos(\phi_a - \phi_o) \quad (4)$$

که در آن:

θ_p : زاویه شیب مربوط به هر پیکسل.

θ_z : $(38/43)$ زاویه زینت خورشید.

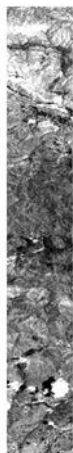
ϕ_a : $(122/4793)$ زاویه آزیموت خورشید.

ϕ_o : زاویه آزیموت هر پیکسل.

زویای زینت و آزیموت خورشید برای تمامی پیکسل ها یکسان اند و در داده های جانبی ماهواره ای موجودند.

در این تحقیق از داده های DEM با اندازه پیکسل های ۳۰ متر استفاده شده، سپس با استفاده از نرم افزار ENVI باندهای شیب و آزیموت از تصویر DEM استخراج شد. مراحل کدنویسی مربوط به تصحیح توپوگرافی در نرم افزار متلب انجام شده است.

در نهایت، برای تشخیص و حذف باندهای بد، نسبت میانگین ^{میانگین} انحراف معیار در یک منطقه همگن از تصویر برای تک باندها محاسبه می شود که به عنوان معیاری برای نسبت سیگنال به نوفه (SNR) در نظر گرفته می شود و باندهایی که مقدار پایینی از آن دارند، به عنوان باند بد حذف می شوند. به این ترتیب، تعداد ۸۷ باند حذف شده و یک تصویر ۱۳۳ باندهای پس از تصحیحات اتمسفری و توپوگرافی مورد پردازش قرار گرفت (شکل ۲).



شکل ۲- تصویر هایپریون منطقه مورد مطالعه بعد از تصحیحات اتمسفری و توپوگرافی

۲۲۰ باند غیر تکراری در بازه طول موجی ۳۵۶ تا ۲۵۷۷ نانومتر است که در تابستان سال ۲۰۰۴ تصویربرداری شده است. برای جلوگیری از ورود اعداد صفر مربوطه به حاشیه تصویر به ماتریس سیگنال داده در نرم افزار متلب اقدام به چرخش تصویر به صورت پادساعتگرد به میزان ۱۵ درجه شد (شکل ۲).

۳- پیش پردازش های انجام شده

برای استخراج اطلاعات دقیق از تصاویر سنجنش از دور نیاز به یک سری عملیات موسوم به عملیات پیش پردازش به منظور کاهش نوفه است. عملیات پیش پردازش مربوطه به داده های هایپراسپکترال شامل مراحل بررسی کیفی داده ها و حذف باندهای بد، تصحیح اتمسفری و تصحیح توپوگرافی است.

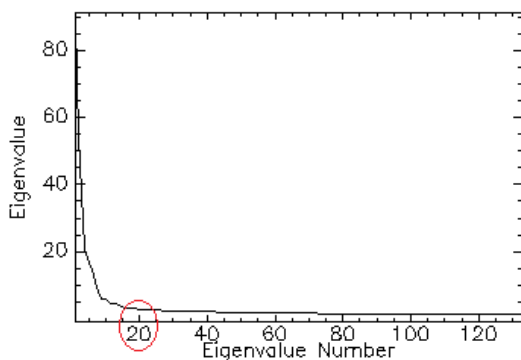
اثرات اتمسفری قدرت تمایز میان اشیا را نیز پایین می آورد که عملاً باعث مشکل تر ساختن استخراج اطلاعات از تصویر می شود. طول مسیری که امواج الکترومغناطیس تا رسیدن به سنجنده طی می کنند نیز بر اثرات اتمسفری تاثیرگذار است. سنجنده هایی که زاویه دید بزرگتری دارند دارای اثرات اتمسفری بیشتری در حاشیه تصویر نسبت به مرکز تصویرند. اثرات اتمسفری را در صورت حاد بودن معمولاً با الگوریتم های مختلف بر روی تصویر کاهش می دهند. در نتیجه در این تحقیق از الگوریتم QUAC^۱ استفاده شد.

علاوه بر این، به دلیل ناهمواری سطح زمین همه نقاط به یک اندازه در معرض تابش آفتاب قرار ندارند و این باعث می شود که امواج دریافتی به وسیله سنسور که از سطح زمین انعکاس می یابند برای یک ترکیب زمین شناسی مشابه، در نقاط مختلف متفاوت باشد. به طوری که در مناطق سایه دار انعکاس، کمتر از مقدار مورد انتظار خواهد بود. بنابراین در یک تصویر ماهواره ای با فرض یکسان بودن ترکیب سطحی، مقادیر عددی پیکسل های مربوط به نقاط سایه، کمتر از نقاطی است که در معرض تابش مستقیم قرار دارند. به این دلیل برای افزایش دقت پردازش باید اثرات توپوگرافی را از بین برد. به عبارتی بر روی داده ها باید تصحیح توپوگرافی انجام گیرد. انجام این کار نیازمند داده های ارتفاعی رقومی (DEM) منطقه است. با استفاده از داده های DEM (تهیه شده از پردازش داده های ASTER توسط سازمان زمین شناسی آمریکا با قدرت تفکیک زمینی ۳۰ متر)، زاویه بین بردار نرمال سطح زمین و اشعه خورشید (γ_i) در هر پیکسل قابل محاسبه است. به این صورت

^۱ QUick Atmospheric Correction

۴- جداسازی طیفی

گفته می‌شود. مناسب است که در ابتدای پردازش، تخمینی از تعداد اعضای انتهایی موجود در منطقه با یکی از روش‌های معمول بدست آورد. در این تحقیق از الگوریتم MNF^۳ برای این منظور استفاده شده است. روش MNF مانند روش PCA^۴ یک روش کاهش ابعادی برای تعیین محورهایی است که بیشترین اطلاعات از منطقه را دارند که این کار با بررسی مقدار و نمودار مقادیر ویژه انجام می‌گیرد. در نتیجه، پس از انجام MNF حالتی که شیب نمودار مقادیر ویژه به یک مقدار یکنواخت و ثابتی برسد، می‌تواند به عنوان تخمینی از اعضای انتهایی در نظر گرفته شود. همانطور که در شک ۳ نیز مشهود است، نمودار پس از باند بیستم به یک مقدار تقریباً ثابتی رسیده است. به عبارتی بیشتر اطلاعات در ۲۰ باند اول است.



شکل ۳ - نمودار الگوریتم MNF

در جداسازی دوخطی که در این تحقیق به آن پرداخته شده است، ابتدا با استفاده از الگوریتم N-FINDR، اعضای انتهایی موجود در تصویر، تخمین و استخراج شد. این روش یک الگوریتم انتخابی است که با P مجموعه تصادفی از طیف پیکسل‌های تصویر به عنوان مجموعه‌ای اولیه از اعضای انتهایی شروع می‌شود. در ادامه، حجم سادک شکل گرفته به وسیله این P عضو انتهایی محاسبه می‌شود، سپس هر طیف باقیمانده با هر عضو انتهایی جایگزین می‌شود تا اینکه بزرگترین حجم سادک نسبت به هر سادک دیگر شکل یافته حاصل شود. در این حالت، رئوس سادک یاد شده به عنوان اعضای انتهایی نهایی در نظر گرفته می‌شود.

سپس، فراوانی این اعضای انتهایی در تصویر با استفاده از الگوریتم BPOGM محاسبه و با استفاده از کتابخانه طیفی موجود و با روش‌های SAM^۵ و SF^۶ کاندیداهای اولیه برای

قبل از تعیین مقدار فراوانی اعضای انتهایی و تهیه نقشه توزیع آن‌ها، باید جنس کانی‌شناسی آن‌ها را تعیین کرد. در این حالت برای استخراج اعضای انتهایی از تصویر ابرطیفی و در صورتی که اطلاعات اولیه‌ای از تصویر قابل دسترسی باشد، از یک روش نظارتی و در مواردی هم که این اطلاعات در دسترس نیستند، می‌توان از یک الگوریتم استخراج اعضای انتهایی (EEA) اتوماتیک استفاده کرد. برای مثال، می‌توان الگوریتم‌هایی مانند شاخص خلوص پیکسل، N-FINDER و آنالیز مولفه رئوسی (VCA) را نام برد.

فرض غالب این الگوریتم‌ها این است که در مجموعه داده‌ها، حداقل یک پیکسل خالص برای هر عضو انتهایی وجود دارد (فرضی که لزوماً همیشه صحیح نیست) و با این فرض، خالص‌ترین پیکسل‌ها از تصویر استخراج می‌شود.

مرحله دوم جداسازی طیفی با عنوان «تخمین فراوانی» شناخته می‌شود که بعد از شناسایی مدل مناسب با توجه به تعداد اعضای انتهایی با استفاده از روش‌های مختلف بهینه‌سازی، مدل یاد شده قابل حل و نتایج فراوانی حاصل می‌شود.

در مدل اختلاط خطی، الگوریتم‌های بسیاری برای تخمین فراوانی پیشنهاد شده‌اند. این الگوریتم‌ها روی اصل حداقل مربعات پایه‌ریزی شده است که از آن می‌توان تخمین حداکثر شباهت یا الگوریتم‌های بیزین را نام برد.

تخمین فراوانی برای مدل‌های غیرخطی پیچیده‌تر است. برخی الگوریتم‌ها برای اینگونه مدل‌ها روی تخمین‌گرهای حداقل مربعات پایه‌ریزی و برخی دیگر بر پایه ماشین بردار پشتیبان^۱ و شبکه‌های عصبی‌اند که اخیراً معرفی شده‌اند.

با تعریفی که از جداسازی ارائه شد، می‌توان گفت، بررسی و تجزیه نمودارهای طیفی تصاویر ابرطیفی برای شناسایی مواد موجود و تعیین درصد حضور هر کدام از این مواد در یک پیکسل، جداسازی طیفی نامیده می‌شود. برای این منظور، از یک الگوریتم گام به گام که در ادامه تشریح می‌شود، استفاده شده است.

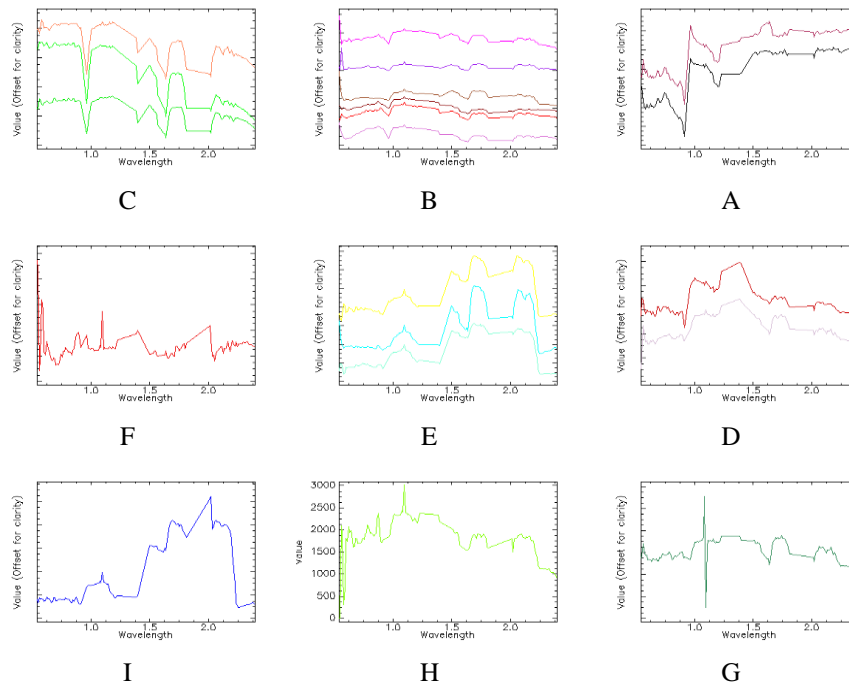
هر باند موجود در داده‌های طیفی، اعم از چندطیفی و ابرطیفی، ویژگی خاصی از منطقه را نشان می‌دهد. به تعداد این ویژگی‌ها و یا کانی‌ها و به طور خاص‌تر، اعضای انتهایی که می‌توان در داخل تصویر ابرطیفی تشخیص داد، ابعاد مجازی^۲

^۳ Minimum Noise Fraction^۴ Principal Component Analysis^۵ Spectral Angle Mapper^۶ Spectral Feature Fitting^۱ support vector machine^۲ Virtual Dimensionality (VD)

شناسایی نوع کانی هر عضو در نظر گرفته شود.

برای افزایش دقت در انتخاب علاوه بر امتیاز مربوط به هر کانی، تطابق نمودارهای مجهول و مرجع به صورت بصری نیز بررسی شد. سپس توزیع هر باند تصویر فراوانی با نقشه زمین‌شناسی مقایسه و بهترین کاندیدا برای هر عضو انتهایی انتخاب شد (شکل ۴).

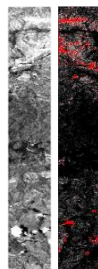
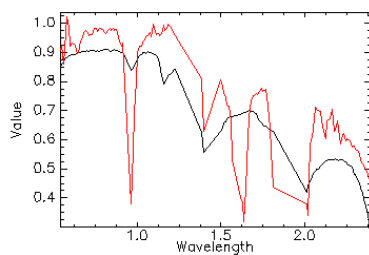
یک عضو انتهایی مورد توجه قرار گرفت. روش نقشه‌بردار زاویه طیفی (SAM) شباهت بین طیف اعضای انتهایی و طیف مرجع را به وسیله محاسبه زاویه طیفی بین آن‌ها محاسبه می‌کند و روش برازش ساختار طیفی (SFF)، میزان شباهت را به وسیله فاز فیزیکی امضای طیفی تعیین می‌کند. در این حالت امتیاز حاصل از مجموع دو روش می‌تواند به عنوان امتیاز نهایی برای



شکل ۴- نمودار طیفی اعضای انتهایی

نمودارهای مشابه تلفیق شده و در نهایت ۹ عضو انتهایی به ترتیب زیر تعیین شد.

گروه A: با مقایسه کتابخانه طیفی از بین کانی‌هایی که پیشنهاد می‌شوند، بر حسب امتیاز روش SAM و SFF (در بازه (۱,۰)) و بررسی بصری، گروه زئولیت (استیلیت) به گروه A اختصاص یافت (شکل ۵). همچنین با مقایسه نقشه فراوانی با نقشه زمین‌شناسی منطقه نتیجه‌گیری شد که منطقه مورد مطالعه همانطور که از نقشه فراوانی مشخص است، در یک سوم بالایی و در یک سوم پایینی منطقه با توجه به ساختار تمامورفیک و متاولکانیک قسمت‌های مورد اشاره، مستعد گروه زئولیت است. از دیگر کانی‌های این گروه که با امتیاز پایینتر از استیلیت تشخیص داده شد می‌توان به چابازیت^۱، مسولیت^۲ و اکولسیت^۳ اشاره کرد.

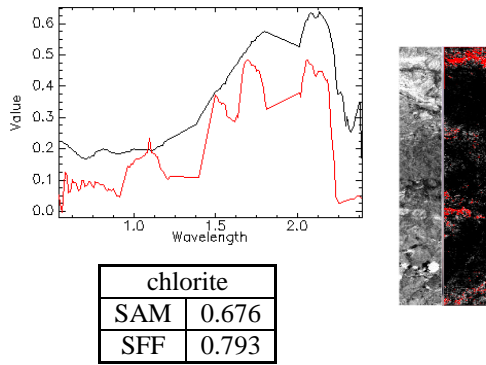


Stilbite	
SAM	0.856
SFF	0.877

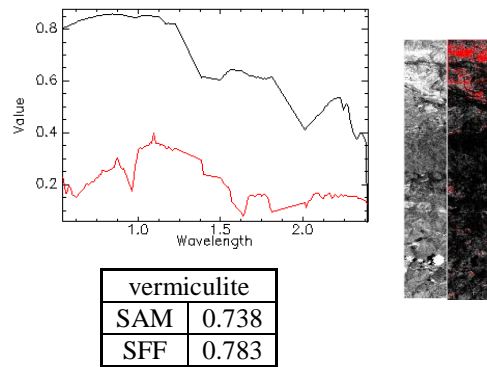
شکل ۵- مقایسه نمودار طیفی عضو انتهایی A با نزدیکترین طیف مرجع به همراه نقشه فراوانی

گروه B: با مقایسه نقشه فراوانی و نقشه زمین‌شناسی و با توجه به مناطق تحت پوشش فراوانی، و همچنین با مقایسه طیف مربوطه با کتابخانه طیفی (شکل ۶)، گروه میکا (ورمیکولیت و ...) به این گروه تعلق گرفت.

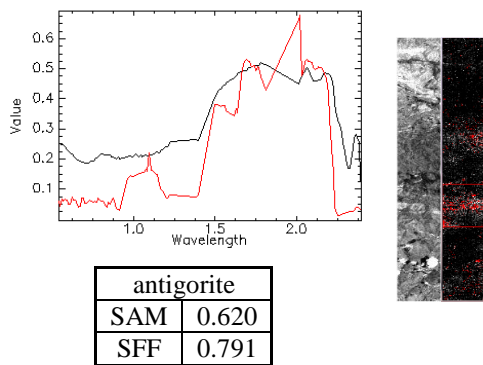
¹ Chabazite
² Mesolite
³ Ecolecite



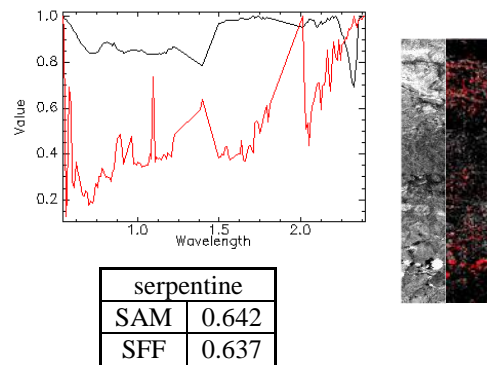
شکل ۸- مقایسه نمودار طیفی عضو انتهایی E با نزدیکترین طیف مرجع به همراه نقشه فراوانی



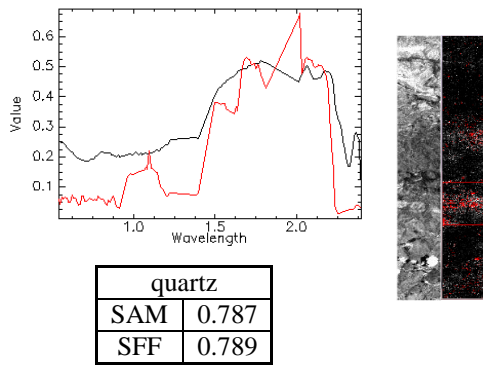
شکل ۶- مقایسه نمودار طیفی عضو انتهایی B با نزدیکترین طیف مرجع به همراه نقشه فراوانی



شکل ۹- مقایسه نمودار طیفی عضو انتهایی H با نزدیکترین طیف مرجع به همراه نقشه فراوانی



شکل ۷- مقایسه نمودار طیفی عضو انتهایی D با نزدیکترین طیف مرجع به همراه نقشه فراوانی



شکل ۱۰- مقایسه نمودار طیفی عضو انتهایی I با نزدیکترین طیف مرجع به همراه نقشه فراوانی

گروه I: با توجه به روال قبلی و همچنین با توجه به پراکندگی بالا و نشان دادن فراوانی بالا، جنس این گروه از نوع کوارتز یا کلسدون انتخاب شد که با توجه به ژنز منطقه حضور این گروه کاملاً منطقی است (شکل ۱۰).

۴-۱- تعیین میزان دقت و صحت جداسازی

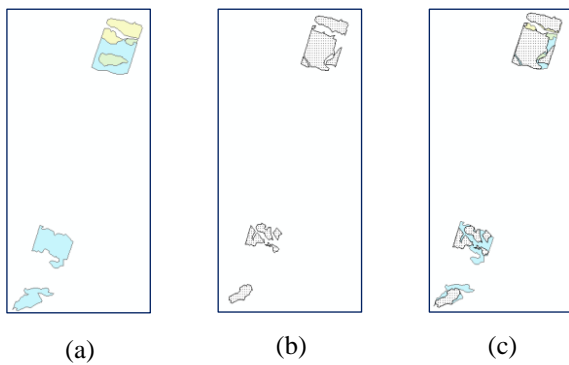
برای بدست آوردن معیاری برای تعیین دقت و صحت روند

گروه C، F و G: فراوانی مربوط به این اعضای انتهایی با توجه به شکل توزیع آن‌ها مشخص است که نشانگر ابرهای موجود در تصویر است.

گروه D: مانند سایر گروه‌ها برای تعیین جنس این عضو انتهایی، تمرکز فراوانی بر روی نقشه زمین‌شناسی مشخص شد و با توجه به نوع ساختار منطقه و همچنین مقایسه نمودار طیفی این گروه با نمودارهای کتابخانه طیفی، سرپانتین (حاصل از اولیوین‌های هارزبورژیت و سایر سنگ‌های الترامافیک) برای این گروه فراوانی انتخاب شد که دارای تطابق مناسب با منطقه الترامافیکی سرپانتینی شده است (شکل ۷).

گروه E: پس از انجام مقایسه با کتابخانه طیفی و نقشه زمین‌شناسی و با توجه به ماگمایی- دگرگونی بودن ناحیه تحت پوشش با فراوانی و همچنین نتایج مقایسه، به کلریت اختصاص داده شد (شکل ۸).

گروه H: با توجه به ناحیه تحت پوشش، سرپانتین (آنتیگوریت و ...) اختصاص یافت (شکل ۹).



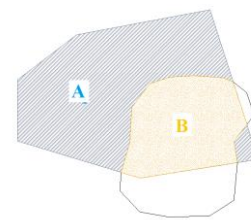
شکل ۱۲- واحد زمین شناسی (a)، توزیع (b) و انطباق آنها با هم (c) برای عضو انتهایی A که صحت برابر ۶۷٫۹۵٪ می باشد
جدول ۲. مقادیر صحت جداسازی طیفی برای هر عضو انتهایی

صحت جداسازی (درصد)	مساحت فراوانی منطبق بر واحد (کیلومتر مربع)	مساحت واحد زمین شناسی (کیلومتر مربع)	گروه
۶۷٫۹۵	۹۳٫۴۲۵	۱۷۳٫۴۹۹۴	A
۸۴٫۳۴	۴۹٫۸۵۵۴	۵۹٫۱۱۳۳	B
۸۶٫۵۲	۵۳٫۹۷۵۴	۶۲٫۳۸۶۴	D و H
۴۶٫۷۸	۷۰٫۷۴۷۹	۱۵۱٫۲۳۵۵۲	E
۷۵٫۶۸	۴۰٫۹۹۹۴۳	۵۴۱٫۷۶۵۸	I
۷۸٫۲۵			میانگین

در این تحقیق، دلیل انتخاب منطقه خوی، وجود شاخص‌های معدنی و کانیایی در این منطقه است. همچنین نتایجی که از روش غیرخطی بدست آمد، انطباق خوبی با نقشه زمین‌شناسی منطقه (میانگین صحت ۷۸٫۲۵) داشته و صحت خوبی را نشان داد که ملاک خوبی برای کارهای آینده است.

علاوه بر این با بررسی جدول ۲، مشاهده می‌شود که گروه E کمترین میزان صحت نسبت به گروه‌های دیگر دارد در حالی که بخش وسیعی از منطقه را پوشش می‌دهد این امر می‌تواند ناشی از عدم تطابق کافی کانی‌های گروه کلریت با نقشه زمین‌شناسی منطقه باشد، بر عکس گروه سرپانتین (H,D) و گروه میکایی (B) صحت و انطباق بالایی با نقشه زمین‌شناسی منطقه دارند.

جداسازی، از نسبت مساحت فراوانی به مساحت ساختار زمین شناسی منطبق بر آن استفاده شد (شکل ۱۱).



شکل ۱۱- مثال شماتیکی از درصد همپوشانی یک واحد زمین شناسی (A) با فراوانی آن (B)

اگر A یک واحد زمین‌شناسی روی زمین به مساحت S_A و B قسمتی از فراوانی با مساحت S_B باشد که به طور صحیح نشانگر این واحد است، نسبت $100 \times \frac{S_B}{S_A}$ می‌تواند یک معیار کمی برای ارزیابی صحت فراوانی بدست آمده (B) باشد. برای کلیه گروه‌های فراوانی که جنس آن‌ها در بخش قبل مشخص شد، ابتدا مساحت‌های نقشه فراوانی و واحد زمین‌شناسی با استفاده از رسم ROI مشخص و نسبت یا شده محاسبه شد که نتایج آن برای اعضای انتهایی در جدول ۲ ارایه شده است. میانگین صحت محاسبه شده در کل برابر ۷۸٫۲۵ درصد است که کاملاً رضایت بخش است. در شکل ۱۲ به عنوان نمونه این ترسیمات و مساحت‌ها در مورد عضو انتهایی A نشان داده شده است.

۵- نتیجه‌گیری

هدف از تجزیه طیفی تصاویر ابرطیفی، استخراج امضاهای طیفی عناصر تشکیل‌دهنده پیکسل‌های تصویر ابرطیفی (اعضای انتهایی) و تخمین فراوانی آن‌ها است. در مدل‌های مربوط به اختلاط خطی، فرض مساله بر این است که مقیاس اختلاط ماکروسکوپی بوده و طیف انعکاسی سطح به عنوان یک ترکیب خطی از تعداد محدودی از طیف‌های در ارتباط با اعضای انتهایی در نظر گرفته می‌شود. در صورتی که در برخی موارد میزان اختلاط ماکروسکوپی نبوده و یا اختلاط داخلی ماده نیز مهم است. بنابراین، برای فائق آمدن بر این مشکلات، مدل‌های دوخطی معرفی شدند. مدلی که در این تحقیق در نظر گرفته شد، تعمیم و بهبود یافته مدل‌های دوخطی ناسیمنتو و فان است که با عنوان مدل اختلاط دوخطی تعمیم‌یافته شناخته می‌شود.

- autonomous spectral end-member determination in hyperspectral data"; in *Imaging Spectrometry V*, 266-276.
9. Miao, L.; Qi, H.; 2007; "Endmember extraction from highly mixed data using minimum volume constrained nonnegative matrix factorization"; *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45, 765-777.
 10. Li, J.; Bioucas-Dias, J. M.; 2008; "Minimum volume simplex analysis: A fast algorithm to unmix hyperspectral data"; in *IGARSS 2008-2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, III-250-III-253.
 11. Dobigeon, N.; Altmann, Y.; Brun, N.; and Moussaoui, S.; 2016; "Linear and nonlinear unmixing in hyperspectral imaging"; *Data Handling in Science and Technology: Resolving Spectral Mixtures*, 41.
 12. Nascimento, J. M.; Bioucas-Dias, J. M.; 2011; "Hyperspectral unmixing based on mixtures of Dirichlet components"; *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50, 863-878.
 13. Halimi, A.; Altmann, Y.; Dobigeon, N.; Tourneret, J.-Y.; 2011; "Nonlinear unmixing of hyperspectral images using a generalized bilinear model"; *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49, 4153-4162.
 14. Yokoya, N.; Chanussot, J.; Iwasaki, A.; 2012; "Generalized Bilinear Model based nonlinear unmixing using Semi-Nonnegative Matrix Factorization"; *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(2), 1430-1437.
 15. Qu, Q.; Nasrabadi, N. M.; Tran, T. D.; 2014; "Abundance Estimation for Bilinear Mixture Models via Joint Sparse and Low-Rank Representation"; *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(7), 4404 - 4423.
 16. Zhang, X.; Lin, H.; Cen, Y.; Zhang, L.; Yang, H.; 2016; "A nonlinear spectral unmixing method for Abundance retrieval of mineral mixtures"; *Remotely Sensed Data Compression, Communications, and Processing XII*, 98740Z.
 17. Mei, X.; Ma, Y.; Li, C.; Fan, F.; Huang, J.; Ma, J.; 2018; "Robust GBM hyperspectral image unmixing with superpixel segmentation based low rank and sparse representation"; *Neurocomputing*, 275, 2783-2797.
 18. Li, C.; Ma, Y.; Huang, J.; Mei, X.; Liu, C.; Ma, J.; 2016; "GBM-based unmixing of hyperspectral data using bound projected optimal gradient method"; *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 13, 952-956.
 19. Ahmad, T.; Raha, S.; Lyngdoh, R. B.; Sahadevan, A. S.; Gupta, P. K.; Misra, A.; 2022; "Robust generalized bilinear model with weighted low-rank representation for hyperspectral image unmixing"; *Journal of Applied Remote Sensing*, 16(2), 024524.
- مدل دوخطی اشاره شده با وجود تفسیرهای فیزیکی مناسب و روشن، می‌تواند دارای نقاط ضعف و کاستی‌هایی نیز باشد. همواره به دلیل اینکه یک اصطلاح دوخطی شامل ضرب حداقل دو عضو انتهایی با مقادیر کمتر از یک است، این امکان وجود دارد که این اندازه کوچکتر از مقدار عضو انتهایی واقعی باشد. این نقص در مدل یاد شده که تعاملات دوجانبه با ضرایب و پارامترهای کوچکتر از یک همراهاند، تشدید می‌شود.
- یکی دیگر از معایب مدل GBM، عدم در نظر گرفتن تداخلات موجود بین دو ماده یکسان است. این نقص شاید بر روی سطوح صاف زیاد تاثیرگذار نباشد ولی در هنگام مواجهه با سطوح زبر، می‌تواند اثرات چشمگیری داشته باشد و به صورت یک توزیع قابل توجه در سیگنال کلی مشاهده شود.

منابع

1. Borengasser, M.; Hungate, W. S.; and Watkins, R.; 2008; "hyperspectral Remote Sensing, Principles and applications", CRC Press, Taylor & Francis Group.
2. Bioucas-Dias, J. M.; Parente, M.; Plaza, A.; Dobigeon, N.; Du, Q.; Gader, P. Chanussot, J.; 2012; "Hyperspectral Unmixing Overview: Geometrical, Statistical, and Sparse Regression-Based Approaches"; *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*; 5(2) ; 354-379.
3. Mozaffar, M. H.; Zoj, M. J. V.; Sahebi, M. R.; Rezaei, Y.; 2008; "Vegetation endmember extraction in hyperion images"; *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*; 37(B7); 409-412.
4. Fan, W.; Hu, B.; Miller, J.; Li, M.; 2009; "Comparative study between a new nonlinear model and common linear model for analysing laboratory simulated - forest hyperspectral data"; *International Journal of Remote Sensing*; 30; 2951-2962.
5. Boardman, J. W.; 1993; "Automating spectral unmixing of AVIRIS data using convex geometry concepts"; *Summaries of the 4th Annual JPL Airborne Geoscience Workshop. Volume 1: AVIRIS Workshop*.
6. Boardman, J. W.; Kruse, F. A.; Green, R. O.; 1995; "Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data"; *Summaries Proceedings of the Fifth JPL Airborne Earth Science Workshop, Pasadena*, 95-101.
7. Nascimento, J. M.; Dias, J. M.; 2005; "Vertex component analysis: A fast algorithm to unmix hyperspectral data"; *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43, 898-910.
8. Winter, M. E.; 1999; "N-FINDR: An algorithm for fast