

Research Article

Detection and Monitoring of Geomorphic Landforms in Areas with Shadow and Cloud Cover Using Remote Sensing Techniques and Fuzzy Segmentation

Heeva Elmizadeh ^{1*}, Hadi Mahdipour ²

1- Assistant Professor Department of Marine Geology, Faculty of Marine Natural Resources, Khorramshahr University Marine Science and Technology, Khorramshahr, Iran

2- Chief Innovation Office, Sinenta Corp, Almeria, Spain

Keywords: *Segmentation, Fusion, HR-PRS panchromatic images, Fuzzy clustering, GeoEye-1 sensor.*

1- Introduction

Geoforms are constantly changing under the influence of human activities and natural factors, and these changes can be defined as the change of topographic components over time or as spatial-spectral displacement of the earth's surface cover over time (Pires et al., 2016; Makowski et al., 2017). In this regard, it is extracting information, monitoring, detecting and evaluating geomorphic features in different periods from the primary and controversial needs in geology and other environmental sciences. On the other hand, remote sensing technology is a valuable and efficient tool for studying and monitoring terrestrial phenomena (Chen et al., 2014; Chang et al., 2015; Aboutalebi et al., 2018). In recent decades, regional-scale telemetry data due to its outstanding and unique advantages (wide coverage area, high temporal, spatial and spectral resolution in the visible, infrared and thermal spectra, and spectral variability Radiometry, integrated vision) and digital format suitable for computer processing have been widely used as the most critical technology in detecting surface cover and surface features for a variety of applications in geological studies. Also, using Geoforms has been possible to extract information, identify, analyze, environmental monitor, model and predict future changes in land surface cover. By identifying and extracting land texture information and edge geometry, it is possible to observe, monitor, measure, model, and detect differences and time-series differences in phenomena, complications and land surface patterns to prepare a map and reveal lineaments (Zhang et al., 2018; Benincasa et al., 2019; Capolongo et al., 2019; Du et al., 2020).

Maps of lineaments and linear features of different regions are extracted visually, automatically and semi-automatically (combination of visual and automatic methods), each of which has its own advantages and disadvantages. For various studies and applications, visual extraction methods are one of the most common methods for detecting lineaments, in which the user determines the location of the lineaments in the image according to experience, skill, knowledge of the ground and image processing methods (Fitton and Cox, 1998; Altinoglu, 2014; Hong and Nam, 2017). Regarding the application of fuzzy segmentation methods in satellite imagery and feature detection, various methods and algorithms for edge improvement and detection, change detection, clarification and extraction of lines using digital development data processing. They have found that each of them has advantages and disadvantages. These methods may show different results in the same environments. In this regard, the purpose of this study is to detect and monitor geomorphic lineaments (ridges and *thalweg*) as well as to correct and reduce atmospheric effects (shadow and cloud cover) using the technique remote sensing and fuzzy segmentation algorithms and

* Corresponding author email address: Elmizadeh@kmsu.ac.ir

radiometric features and spatial information of HR-PRS panchromatic images are also used for segmentation images.

2- Material and methods

This study, to detect and monitor geological lines (ridges and thalweg) and correct and reduce atmospheric effects (shadow and cloud cover) from HR-PRS panchromatic images of GeoEye-1 sensor from the northern highlands in the Middle Zagros have been used. With a height of 681 km, this sensor receives satellite images with a spatial resolution of 41 cm in the panchromatic band and 1.65 m in multispectral bands in a strip 15.2 km wide on the ground. In this regard, after radiometric and geometric processing, based on fuzzy properties, the input images are integrated with MATLAB software, and then, using MSA, FWS, IDF and CFM algorithms (Table 1), fuzzy segmentation of HR-PRS panchromatic images was performed. In these methods, fuzzy clustering is performed several times for different clusters (from C_{min} to C_{max}) and is determined by evaluating the clustering output and selecting the best number of regions (C^*). Also, in the processing stage, the image is clustered to reach a certain number of clusters, so fuzzy segmentation is done after applying Defuzzification. Using these methods and based on fuzzy characteristics, the input images were fusion and then, using fuzzy clustering, in this research, fusion output, which has a fuzzy nature, has been used as an intermediate output for segmentation. In this regard, DN values and histological and radiometric properties have been used to improve the performance of fuzzy segmentation. In this way, in the studied images, pixels with the same row and column represent the same geographical position on the ground and are ready to be segmented. Finally, the studied fuzzy clustering algorithms with fuzzy parameters are applied to the input HR-PRS images, and the results are discussed

Table 1: Fuzzy segmentation methods studied

Row	segmentation Method	Explanation	Reference
1	Mean-Shift Algorithm (MSA)	It is one of the most common methods in segmentation all types of images, especially panchromatic images.	(Ming et al, 2012; Bayram et al, 2018)
2	Classical Fusion Method and FCM (CFM)	A multi-image segmentation method is based on the usual fusion methods (at the pixel level) and FCM.	(Naeini et al, 2013; Zheng et al, 2019)
3	Fuzzy Watershed Segmentation (FWS)	It is one of the most common methods in segmentation all types of images, especially panchromatic images.	(Carleer and Wolff, 2005; Yu et al, 2015)
4	Interval-valued Data Fuzzy c-means (IDF)	One of the latest methods that extracts the fuzzy feature from the input image and segmentation it using the fuzzy feature with periodic numbers using FCM.	(Fourie, 2015; Yu et al, 2014)

3- Results and discussions

In order to compare and analyze the performance of fuzzy clustering algorithms in the segmentation process, MSA, FWS, IDF and CFM algorithms were applied and processed on HR-PRS panchromatic images of the study area. In this regard, the performance of the studied algorithms according to two spatial and radiometric qualitative criteria in the fuzzy segmentation of the study area was investigated.

Criterion 1: In this spatial criterion, the precise segmentation and detection of ridges (lines corresponding to the highest mountain peaks) and thalweg (lines corresponding to the valleys with the lowest height) are referred to as lineaments; it is considered from the surrounding environment.

Criterion 2: In this radiometric criterion, segmentation is considered independent of unwanted factors, such as covering the clouds and their shadows in the input image and marked with circles (Fig 4).

The results of fuzzy segmentation and comparison of the studied algorithms show that the Interval-valued Data Fuzzy c-means (IDF) method in the study area performs better than other methods for fuzzy

segmentation and lineaments detection. Furthermore, in general, it has the best performance in detecting lineaments and surface features. The Classical Fusion Method (CFM) and the Mean-Shift Algorithm (MSA) also detect lineaments. However, due to their sensitivity to noise, they face the problem of creating additional borders and have a moderate performance in detecting the texture of areas of the image covered by the shadow of clouds. As a result, as shown in (Figures 3-c and d), it has not well identified the main boundaries in the shadow and cloud cover area, which is the criterion for radiometric evaluation.

4- Conclusion

This study proves the effectiveness and efficiency of the segmentation methods studied in identifying and removing cloud cover and shadows from remote sensing images. These findings offer new ideas for remote sensing studies, especially in precise information extraction from images and image processing. Therefore, according to the research results, fuzzy clustering algorithms are a suitable and optimal method for integrating HR-PRS satellite image information to detect fuzzy lineaments and segmentation. Applying the studied fuzzy segmentation algorithms to the study area shows that the Interval-valued Data Fuzzy c-means (IDF) method best detects lineaments. However, the difference in the performance of this algorithm is in the fuzzy segmentation of the lineaments in the cloud shadow because of radiometric, that is due to the use of fuzzy numbers, noise resistance and remote data, and textural, structural and spectral properties for efficient clustering and target identification in this method. Also, in this regard, and considering the desirable properties of fuzzy clustering algorithms, it can be said that the use of fuzzy numbers and fuzzy properties of the usual type (Gaussian) are the best features for the segmentation and detection of lineaments and using existing metrics for numbers. Fuzzy, each of which will give a different property to the segmentation output, as well as fuzzy membership degrees and distance parameters, can generally lead to better results in Fuzzy C-Means (FCM) and fuzzy segmentation using HR-PRS satellite imagery. Furthermore, because HR-PRS panchromatic images are used for fuzzy segmentation in this study, in future research, fuzzy clustering algorithms can be applied to multispectral and hyperspectral images according to the intended application. The entropy of the pixel membership degrees can also be used to reveal lineaments and boundaries between regions and how to pass from one region to another and by using the local and general spatial relationships of the pixels while using normal fuzzy numbers and GG-FCM clustering method, images with fuzzy parameters in an efficient and optimal method in the target areas and have a desirable performance for more robust fuzzy clustering; Because of the ambiguity in the input numbers, it is better that other parameters affecting clustering are also fuzzy and ambiguous.

References

- Aboutalebi, M., Torres-Rua, A. F., Kustas, W. P., Nieto, H., Coopmans, C., McKee, M., 2018. Assessment of different methods for shadow detection in high-resolution optical imagery and evaluation of shadow impact on calculation of NDVI, and evapotranspiration. *Irrigation Science* 37(3), 407–429. [https://DOI: 10.1007/s00271-018-0613-9](https://doi.org/10.1007/s00271-018-0613-9).
- Bayram. B., Demir. N., Akpınar. B., Oy. S., Erdem. F., Vögtle. T., Seker. D. Z., 2018. Effect of Different Segmentation Methods Using Optical Satellite Imagery to Estimate Fuzzy Clustering Parameters for SENTINEL-1A SAR Images, *International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences* 42(1), 39-43. [https:// DOI: 10.5194/isprs-archives-42-1-39-2018](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-42-1-39-2018)
- Benincasa, M., Falcini, F., Adduce, C., Sannino, G., Santoleri, R., 2019. Synergy of Satellite Remote Sensing and Numerical Ocean Modelling for Coastal Geomorphology Diagnosis. *Remote Sensing* 11(22), 2636. <https://doi.org/10.3390/rs11222636>
- Capolongo, D., Refice, A., Bocchiola, D., D'Addabbo, A., Vouvalidis, K., Soncini, A., Stamatopoulos, L., 2019. Coupling multitemporal remote sensing with geomorphology and hydrological modeling for post flood recovery in the Strymonas dammed river basin (Greece). *Science of the Total Environment* 651, 1958–1968. [https:// DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.114](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.114)
- Carleer, A., Debeir, O., Wolff, E., 2005. Assessment of very high spatial resolution satellite image segmentations, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 71, 1285-1294. [https:// DOI: 10.14358/PERS.71.11.1285](https://doi.org/10.14358/PERS.71.11.1285)

- Du, S., Du, S., Liu, B., Zhang, X., Zheng, Z. 2020. Large-scale urban functional zone mapping by integrating remote sensing images and open social data. *GIScience and Remote Sensing* 57(3), 411–430. <https://doi.org/10.1080/15481603.2020.1724707>
- Fan, J., Wang, J. 2018. A Two-Phase Fuzzy Clustering Algorithm Based on Neurodynamic Optimization with Its Application for PolSAR Image Segmentation. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* 26(1), 72–83. [https:// DOI: 10.1109/TFUZZ.2016.2637373](https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2016.2637373)
- Fourie, C., 2015. On Attribute Thresholding and Data Mapping Functions in a Supervised Connected Component Segmentation Framework, *Remote Sensing* 7(6), 7350-7377. <https://doi.org/10.3390/rs70607350>
- Hong, H., Nam, J. 2017. Automatic detection of contact lines in slot coating flows. *AICHe Journal* 63(6), 2440–2450. <https://doi.org/10.1002/aic.14752>
- Makowski, C., Finkl, C. W., Vollmer, H. M. 2017. Geoform and Landform Classification of Continental Shelves using Geospatially Integrated IKONOS Satellite Imagery. *Journal of Coastal Research* 331, 1–22. [https:// DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-16A-00003.1](https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-16A-00003.1)
- Miao, Z., Shi, W., Samat, A., Lisini, G., Gamba, P. 2016. Information Fusion for Urban Road Extraction from VHR Optical Satellite Images. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 9(5), 1817–1829. [https:// doi: 10.1109/JSTARS.2015.2498663](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2498663).
- Ming, D., Ci, T., Cai, H., Li, L., Qiao, C., Du, J. 2012. Semivariogram-based spatial bandwidth selection for remote sensing image segmentation with mean-shift algorithm, *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE* 9, 813-817. [https:// DOI: 10.1109/LGRS.2011.2182604](https://doi.org/10.1109/LGRS.2011.2182604)
- Pires, A., Chaminé, H. I., Piqueiro, F., Pérez-Alberti, A., Rocha, F. 2016. Combining coastal geoscience mapping and photogrammetric surveying in maritime environments (Northwestern Iberian Peninsula): focus on methodology. *Environmental Earth Sciences* 75(3), 104–116. [https:// DOI: 10.1007/s12665-015-4936-z](https://doi.org/10.1007/s12665-015-4936-z)
- Wang, T., Shi, J., Husi, L., Zhao, T., Ji, D., Xiong, C., Gao, B. 2017. Effect of solar-cloud-satellite geometry on land surface shortwave radiation derived from remotely sensed data. *Remote Sensing* 9(7), 690. <https://doi.org/10.3390/rs9070690>
- Yu, H., Xu, L., Feng, D., He, X. 2015. Independent feature subspace iterative optimization based fuzzy clustering for synthetic aperture radar image segmentation. *Journal of Applied Remote Sensing*, 9(1), 095060. [https:// DOI: 10.1117/1.JRS.9.095060](https://doi.org/10.1117/1.JRS.9.095060)
- Yu, X., He, H., Hu, D., Zhou, W., 2014. Land cover classification of remote sensing imagery based on interval-valued data fuzzy c-means algorithm, *Science China Earth Sciences* 57, 1306-1313. <https://doi.org/10.1007/s11430-013-4689-z>
- Zhang, Y., Jiang, P., Zhang, H., Cheng, P. 2018. Study on Urban Heat Island Intensity Level Identification Based on an Improved Restricted Boltzmann Machine. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(2), 186. <https://doi.org/10.3390/ijerph15020186>
- Zheng, Z., Cao, J., Lv, Z., Benediktsson, J.A., 2019. Spatial–Spectral Feature Fusion Coupled with Multi-Scale Segmentation Voting Decision for Detecting Land Cover Change with VHR Remote Sensing Images. *Remote Sensing* 11(16), 2-22. <https://doi.org/10.3390/rs11161903>

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Elmizadeh, H., Mahdipour, H., 2023. Detection and Monitoring of Geomorphic Landforms in Areas with Shadow and Cloud Cover Using Remote Sensing Techniques and Fuzzy Segmentation. *Adv. Appl. Geol.* 13(1), 72-89.

DOI:10.22055/AAG.2022.36423.2179

URL: https://aag.scu.ac.ir/article_18110.html

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

آشکارسازی و پایش عوارض زمینریخت‌شناسی در مناطق با پوشش سایه و ابر با استفاده از تکنیک‌های دورسنجی و ناحیه‌بندی فازی

هیوا علمیزاده *

دانشیار ژئومورفولوژی، گروه زمین شناسی دریایی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر

هادی مهدی‌پور

مؤسسه سینتا، دفتر اصلی نوآوری، آلمریا، اسپانیا

Elmizadeh@kmsu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۲/۳۰

چکیده

در این پژوهش با هدف آشکارسازی و پایش عوارض زمینریخت‌شناسی (خط‌الراس‌ها و خط‌القعرها) و همچنین تصحیح و کاهش اثرات جوی (پوشش سایه و ابر) از تصاویر پانکروماتیک HR-PRS سنجنده GeoEye-1 مربوط به ارتفاعات شمالی تله زنگ در زاگرس میانی استفاده شده است. در این راستا پس از پیش‌پردازش‌های رادیومتریک و هندسی، بر اساس ویژگی‌های فازی به ادغام تصاویر ورودی در نرم‌افزار MATLAB پرداخته و سپس با بهره‌گیری از الگوریتم‌های MSA، FWS، IDF و CFM به ناحیه‌بندی فازی تصاویر پانکروماتیک HR-PRS اقدام گردید. نتایج ناحیه‌بندی فازی و مقایسه الگوریتم‌های مورد بررسی نشان می‌دهد که الگوریتم IDF (Interval-valued Data Fuzzy c-means) در محدوده مورد مطالعه عملکرد مناسب‌تری نسبت به سایر روش‌ها جهت ناحیه‌بندی فازی و آشکارسازی خطواره‌ها دارد. اوج تفاوت عملکرد این الگوریتم در ناحیه‌بندی خطواره‌های محدوده سایه ابر می‌باشد که ماهیتی رادیومتریکی دارد و این کار به درستی توسط این روش صورت گرفته است. دلیل این امر استفاده از اعداد فازی، مقاومت در برابر نویز و داده‌های دور افتاده و نیز ویژگی‌های بافتی، ساختاری و طیفی جهت خوشه‌بندی کارا و شناسایی هدف در این روش می‌باشد. نتایج این پژوهش اثربخشی و کارایی الگوریتم‌های ناحیه‌بندی فازی مورد مطالعه را در آشکارسازی عوارض زمینریخت‌شناسی خطواره‌ها و از بین بردن پوشش ابرها و سایه‌ها در تصاویر ماهواره‌ای HR-PRS ثابت می‌کند. در همین حال، این یافته‌ها ایده‌های جدیدی را برای مطالعات سنجش از دور به ویژه در زمینه استخراج دقیق اطلاعات از تصاویر و پردازش تصویر ارائه می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: ناحیه‌بندی، فرایند ادغام، تصاویر پانکروماتیک HR-PRS، خوشه‌بندی فازی، سنجنده GeoEye-1

۱- مقدمه

Aboutalebi et al., 2018; Jurado et al., 2020). در چند دهه اخیر داده‌های دور سنجی در مقیاس منطقه‌ای به دلیل مزیت‌های برجسته و منحصر به فرد آن مانند سطح پوشش وسیع، توان تفکیک زمانی، مکانی و طیفی بالا در محدوده‌های طیفی مرئی، مادون قرمز و حرارتی، تنوع طیفی و رادیومتریک، دید یکپارچه و فرمت رقومی مناسب برای پردازش در کامپیوتر، به طور گسترده‌ای به عنوان مهم‌ترین تکنولوژی در آشکارسازی پوشش سطحی و عوارض سطح زمین برای کاربردهای گوناگون در مطالعات زمین شناسی مطرح شده و امکان استخراج اطلاعات، شناسایی، تجزیه و تحلیل، پایش محیطی، مدل‌سازی و پیش‌بینی تغییرات آبی پوشش سطحی زمین را فراهم ساخته است؛ تا با شناسایی و استخراج اطلاعات بافت زمین و هندسه لبه‌ها، امکان مشاهده، نظارت،

ژئو فرم‌ها تحت تاثیر فعالیت‌های انسانی و عوامل طبیعی به طور مداوم در حال تغییر هستند و این تغییرات به عنوان دگرگونی اجزاء توپوگرافی در طول زمان یا به عنوان جابه‌جایی مکانی-طیفی پوشش سطحی زمین در گذر زمان قابل تعریف می‌باشند (Pires et al., 2016; Makowski et al., 2017). در این رابطه استخراج اطلاعات، پایش، آشکارسازی و ارزیابی عوارض زمینریخت‌شناسی در دوره‌های زمانی مختلف، مناطق صعب‌العبور و مقیاس بزرگ، از نیازهای اساسی و بحث برانگیز در زمین‌شناسی و سایر علوم محیطی می‌باشد؛ همچنین از طرف دیگر تکنولوژی سنجش از دور ابزار مفید و کارآمدی جهت مطالعه و پایش عوارض و پدیده‌های سطح زمین به شمار می‌آید

بازدیدهای میدانی، مستلزم صرف زمان و هزینه زیادی بوده و همواره خطای کاربر امری اجتناب ناپذیر است. برای کاهش این خطا، روش‌های استخراج اتوماتیک با استفاده از داده‌های مکانی سنجش از دور مانند عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای با میدان دید وسیع و الگوریتم‌های ناحیه‌بندی، کاربر را در تشخیص دقیق‌تر خطوطاره‌ها هدایت کرده و بهترین نتیجه را ارائه می‌دهند. مزیت و برتری استخراج اتوماتیک خطوطاره‌ها بر روش بصری و دستی، علاوه بر سرعت بالای آن، یکسان بودن عملیات برای کلیه تصاویر، موقعیت مکانی بالا، عدم دخالت کاربر در انتخاب موقعیت خطوط و استخراج خطوطاره در مناطقی می‌باشد که چشم انسان قادر به تشخیص آن نیست. در این رابطه با وجود توان تفکیک بالای تصاویر پنکروماتیک HR-PR، در بسیاری موارد تشخیص لندفرم‌ها و عوارض خطی در تصاویری که دارای پوشش سایه و ابرها باشند، می‌تواند منجر به کاهش و از دست رفتن اطلاعات بارزش این تصاویر شود (Swetnam et al., 2020; Jurado et al., 2018). وجود پوشش سایه و ابرها، در فرایند استخراج و آشکارسازی کیفیت داده‌ها را کاهش می‌دهد و یکی از چالش‌های مهم در سنجش از دور می‌باشد که به نوبه خود ممکن است در دقت تحقیقات سنجش از دور مانند تشخیص تغییرات و ارزیابی‌های مختلف لندفرم‌ها و پدیده‌های محیطی تأثیر بگذارد. از این رو استفاده از الگوریتم‌های ناحیه‌بندی جهت تصحیح اثرات جوئی و جدا سازی آن و به منظور آشکارسازی و پایش عوارض در تصاویر ماهواره‌ای نقش اساسی ایفا می‌کند و در سال‌های اخیر عملکرد قابل قبولی در ناحیه‌بندی تصاویر پنکروماتیک با توان تفکیک مکانی بالا (HR-PRS) داشته است (Aboutalebi et al., 2018; Arai et al., 2018; Iwahashi et al., 2018; Jurado et al., 2020). از این رو فرایند استخراج و آشکارسازی دقیق و به موقع سیستم خطوطاره‌ها، برای شناخت عوارض و ساختارهای زمین‌شناسی (گسل‌ها)، توپوگرافی (خط‌الراس‌ها، خط‌القرها و سیستم‌های زهکشی) و نیز خطوطاره‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی (مرز زمین‌های کشاورزی و ساختمان‌ها)، به ویژه در مناطق صعب العبور و دارای دسترسی دشوار حایز اهمیت فراوان بوده و می‌تواند پایه‌ای جهت فهم بهتر روابط و برهم‌کنش‌های انسان و پدیده‌های طبیعی در مطالعات زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی، ژئومورفولوژی و مدیریت منابع را فراهم می‌آورد. در این راستا

اندازه‌گیری، مدل‌سازی و تشخیص تفاوت‌ها و اختلاف سری زمانی پدیده‌ها، عارضه‌ها و الگوی سطح زمین و تفسیر نهایی جهت تهیه نقشه و آشکارسازی خطوطاره‌ها را فراهم نماید (Fan and Wang et al., 2018; Zhang et al., 2018; Benincasa et al., 2019; Capolongo et al., 2019; Du et al., 2020). در این میان خطوطاره‌ها و عوارض خطی از مهم‌ترین ساختارهای زمین‌شناسی و ژئومورفیک می‌باشند که با طول‌های متفاوت در سطح زمین و در یک مسیر مستقیم و یا منحنی (اندکی خمیده) ظاهر می‌شوند. این عوارض بزرگ توپوگرافی خطی که با الگویی متفاوت از عارضه‌های مجاور تفاوت آشکاری نسبت به محیط اطراف خود دارند، می‌توانند نشان‌دهنده و بازتاب برخی از پدیده‌های زیرسطحی نیز باشند (Nakao et al., 2019; Epuh et al., 2020). در این ارتباط شاخصه‌های توپوگرافی و تغییرات سریع توپوگرافی مانند فرورفتگی‌ها و گودی‌های خطی، دره‌های مستقیم، گسیختگی در امتداد ستیغ‌ها، ترانشه‌های ممتد، سطوح هم‌تراز، مرز یا لبه صخره‌های مستقیم، جابه‌جایی سیستماتیک رودخانه‌ها، وجود چشمه‌ها، نشست، اختلاف و تغییرات ناگهانی تن رنگ سطح زمین ناشی از تغییرات رطوبت خاک، پوشش گیاهی خطی و نیز تغییرات در نوع و ارتفاع گیاهان، در پردازش تصاویر و شناسایی خطوطاره‌های یک منطقه کمک زیادی می‌کنند. همه این پدیده‌های سطحی به طور معمول در نتیجه عوارض ساختاری مانند گسل‌ها، درزه‌ها، شکستگی‌ها، چین‌ها، لایه‌بندی یا سیستم‌های زهکشی ایجاد می‌شوند. هر چند در برخی از موارد ممکن است خطوطاره‌ها با عوارض انسانی مانند جاده‌ها، خطوط لوله نفت و گاز یا راه آهن اشتباه گرفته شوند (Nakao et al., 2019; Masoud and Koike, 2017; Xu et al., 2020).

نقشه پوشش زمین و عوارض خطی مناطق مختلف به صورت بصری، اتوماتیک و نیمه اتوماتیک (تلفیق روش بصری و اتوماتیک) استخراج می‌شوند که هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارند. جهت مطالعات و کاربردهای مختلف، روش‌های استخراج بصری از متداول‌ترین روش‌های تشخیص خطوطاره‌ها می‌باشند که در آن کاربر با توجه به تجربه، مهارت، دانش شناخت زمین و روش‌های پردازش تصویر، محل خطوطاره‌ها را در تصویر مشخص می‌کند (Hong and Nam, 2017; Xu et al., 2020)؛ اما در پژوهش‌های با مقیاس منطقه‌ای، استخراج این خطوطاره‌ها، صرفاً با روش بصری و

اعمال نمودند تا ویژگی‌های مورد نظر برای خوشه‌بندی آن حاصل شوند. ارزیابی دقت نتایج نشان داد نمونه‌های نویز با دریافت درجه عضویت کمتر، اثر کمتری را در تعیین مراکز خوشه‌ها داشتند. Xu و همکاران (۲۰۱۹) نیز ناحیه‌بندی تصویر چند طیفی را بر اساس الگوریتم خوشه‌بندی فازی همراه با انتروپی و مدل گاوسی ارائه نمودند. آنها با استفاده از روش‌های خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی و به کمک محاسبه ضریب شباهت، به ادغام پیکسل‌ها (نواحی) پرداختند. نتایج نشان داد که بدون استفاده از روش ضرایب لاگرانژ و با استفاده از معیارهای اعتبارسنجی خوشه، نتایج ناحیه‌بندی سریع و دقیق ارزیابی شده است. همچنین Jurado و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از تجزیه و تحلیل سلسله‌مراتبی و ویژگی‌های مکانی و چند طیفی، ناحیه‌بندی و طبقه‌بندی بدون نظارت فضاهای طبیعی را برای بازسازی هندسی انواع محیط‌ها از جمله پوشش گیاهان و سنگ‌ها انجام دادند. نتایج امکان انجام یک ناحیه‌بندی دقیق را با در نظر گرفتن ویژگی‌های چند طیفی و مکانی با تعداد نامشخصی از خوشه‌ها نشان داد.

مرور منابع نشان می‌دهد مطالعات و پژوهش‌های کاربردی و مفیدی در خصوص ناحیه بندی فازی و حذف اثر پوشش سایه و ابر از تصاویر ماهواره‌ای انجام شده است. در این رابطه، مدل‌ها و الگوریتم‌های مختلف اصلاح سایه به منظور بازسازی اطلاعات از دست رفته و تولید تصاویر بدون سایه یا با تأثیرات کم ناشی از سایه توسعه یافته‌اند (Jurado et al., 2020). این الگوریتم‌ها شامل فرایند دو مرحله‌ای تشخیص محل سایه و سایه زدایی (تصحیح سایه) می‌باشند. در این رابطه روش‌های متداول مورد استفاده برای شناسایی و حذف ابر و سایه (سایه‌های ابر) را می‌توان در دو کلاس دسته بندی کرد: در دسته اول مطالعات از روش‌های مبتنی بر هندسه استفاده می‌کنند که در آن جهت تعیین موقعیت‌ها و توزیع سایه‌ها و همچنین حذف پوشش ابر و سایه‌ها، از روابط هندسی خورشید، ابرها و سنجنده استفاده می‌شود. دسته دوم روش‌های مبتنی بر طیفی (Silva et al., 2018) هستند که مانند این پژوهش به تفاوت‌های ویژگی چند طیفی یا فضاهای رنگی متفاوت سایه‌ها در باندهای حرارتی یا انعکاسی بستگی دارد و بر اساس مشخصات طیفی پیکسل‌های مجاور فضایی و نزدیک به اهداف، اطلاعات از دست رفته در اثر سایه را بازیابی می‌کنند. بر این اساس هدف این پژوهش حاضر نیز ناحیه‌بندی فازی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای GeoEye-

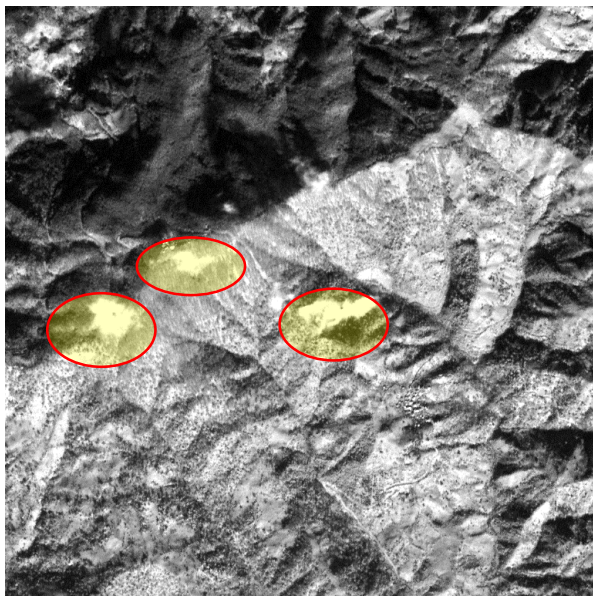
هدف این پژوهش، آشکارسازی و پایش پوشش زمین و عوارض ژئومورفیکی و همچنین تصحیح و کاهش اثرات جوی (پوشش سایه و ابر) با استفاده از تکنیک‌های دورسنجی و الگوریتم‌های ناحیه‌بندی فازی می‌باشد و جهت ناحیه‌بندی تصاویر از ویژگی‌های رادیومتریکی و اطلاعات مکانی تصاویر پنکروماتیک HR-PRS نیز استفاده می‌گردد.

۲- پیشینه تحقیق

در خصوص اعمال روش‌های ناحیه‌بندی فازی در تصاویر ماهواره‌ای و آشکارسازی عوارض، روش‌ها و الگوریتم‌های مختلفی برای بهبود و آشکارسازی لبه، بارزسازی تغییرات، واضح سازی و استخراج خطواره‌ها با استفاده از پردازش داده‌های رقومی توسعه یافته‌اند که هر کدام از آنها دارای مزایا و معایبی هستند و ممکن است در محیط‌های یکسان نتایج مختلفی را نشان دهند. در این رابطه پژوهش‌های کاربردی با استفاده از روش‌های بهبود تصویر و بر پایه تلفیقی از فیلترهای آشکارساز لبه و استخراج خودکار تصاویر (Athanasas et al., 2018)، فیلترهای جهتی و غیرجهتی مانند آنالیز مولفه‌های اصلی، لاپلاس (Iqbal et al., 2020) Sobel (Chen et al., 2020) Canny (Cao et al., 2018; Nemer Pelliza et al., 2020) و فیلترهای مورفولوژیکی (Rodríguez-Caballero et al., 2016; Vizilter et al., 2016) صورت گرفته است. نتایج پردازش‌ها و مقایسه با داده معتبر زمینی حاکی از دقت ناحیه‌بندی استفاده شده داشته و این روش‌ها در تشخیص نواحی کوچک تصاویر و دقت ناحیه بندی قابلیت بالایی نشان دادند. همچنین دنبال کردن لبه‌ها مانند جستجوی گراف، الگوریتم ادیسون، الگوریتم ردیابی قطعه‌ای (Ni et al., 2016; Nakao et al., 2019) و الگوریتم‌های استخراج عوارض مانند تبدیل هاف (Landmark et al., 2015; Chen et al., 2016) و تبدیل رادون (Liu et al., 2017; Wang et al., 2019) نیز در تشخیص و استخراج خطواره‌ها، شناسایی خوشه‌ها با انواع شکل، اندازه و چگالی و دقت در ناحیه‌بندی به خوبی عمل می‌نمایند. این روش‌ها جهت اختصاص هر پیکسل به خوشه‌های مختلف، یافتن تعداد خوشه‌های بهینه و مراکز خوشه‌ها برای هر پیکسل در ناحیه‌بندی تصاویر کارایی خوبی نشان دادند. همچنین در این رابطه Wang و همکاران (۲۰۱۹) با هدف ارائه روشی جهت استخراج جاده‌های شهری با استفاده از تبدیل هاف در تصاویر سنجش از دور، آشکارسازی لبه را بر روی تصاویر

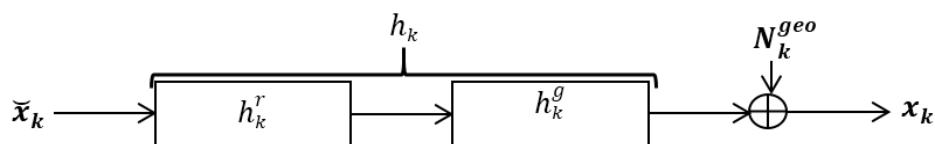
فازی استفاده شده است و جهت ناحیه بندی فازی تصاویر از ویژگی های رادیومتریکی و اطلاعات مکانی تصاویر پنکروماتیک HR-PRS سنجنده GeoEye-1 نیز استفاده می گردد. علاوه بر این، با هدف بهبود دقت آشکارسازی پوشش سطح زمین از اعداد و روش های خوشه بندی فازی استفاده می گردد. محدوده مورد مطالعه در این پژوهش بخش مرکزی زاگرس در ارتفاعات شمال تله زنگ با طول جغرافیایی $48^{\circ}55'$ و عرض جغرافیایی $32^{\circ}58'$ می باشد (شکل ۱).

مدل کردن پیش پردازش های رادیومتریک و هندسی: با توجه به انجام پیش پردازش های رادیومتریک و هندسی در ایستگاه زمینی، می توان مجموعه این پردازش ها را به صورت یک فیلتر خطی و مستقل از زمان $h_k = h_k^r * h_k^g$ مدل سازی نمود که در آن h_k^r تصحیحات رادیومتریک و h_k^g تصحیحات هندسی را مدل می نماید (شکل ۲).



شکل ۱- تصاویر محدوده مورد مطالعه که توسط سنجنده GeoEye-1 حاصل شده اند. در مرکز تصویر سمت چپ نیز محدوده های تحت پوشش سایه و ابر نمایان است.

Fig. 1. Images of the study area obtained by GeoEye-1 sensor. In the center of the image on the left, areas covered by shadows and clouds are also visible



شکل ۲- مدل سازی انجام تصحیحات رادیومتریک و هندسی در ایستگاه های زمینی
Fig. 2. Modeling of radiometric and geometric corrections in ground stations

همان حدود تغییرات \tilde{x}_k خواهد بود. اما گاهی برخی پیکسل‌ها علاوه بر نویز نامحسوس، تحت تاثیر عوامل پیش‌بینی نشده (نظیر قرار گرفتن در زیر سایه و لکه سفید ابر) نیز قرار می‌گیرند. این عوامل پیش‌بینی نشده می‌توانند به سه صورت سایه، لکه سفید ابر و یا هر دوی این عوامل با یکدیگر هر پیکسل را تحت تاثیر قرار دهند؛ به طوری که در یک تصویر، پیکسل k -ام در سایه ابر و یا در زیر ابر که لکه‌ای روشن دیده می‌شود قرار بگیرد و یا در دو تصویر مختلف هر دوی این وقایع برای پیکسل k -ام اتفاق بیفتد. بنابراین محدوده تغییرات $x_k^{(I)}$ برای این دسته از پیکسل‌ها بیشتر از دامنه تغییرات ممکنه \tilde{x}_k خواهد بود و در آنها پیکسل‌ها در ساده‌ترین شکل تحت تاثیر نویز نامحسوس قرار گرفته‌اند (Aboutalebi et al., 2018; Wang et al., 2017). با توجه به اینکه در تصاویر HR-PRS مساحت کمی تحت پوشش سایه یا زیر ابر قرار می‌گیرند، پوشش زمینی دارای مدل نویز (شامل اتمسفر و اغتشاشات ناشی از تصحیحات هندسی) همگن بوده و مجموعه نویز موجود در تصویر، برای تمامی پیکسل‌ها دارای توزیع یکسان می‌باشد. بنابراین عبارت $\sigma^2 = \sigma_{\tilde{x}_k}^2 = \sigma_{x_k}^2$ برای تمامی پیکسل‌ها ($k = 1, \dots, n$) درست می‌باشد. از این رو روابط (۳ و ۴)، برای پیکسل‌های تحت پوشش سایه و زیر لکه سفید ابر نیز صادق می‌باشند. تنها تفاوتی که در این حالت وجود دارد این است که دیگر مقدار ϵ_k عددی کوچک نبوده و بزرگ می‌باشد. با توجه به محدوده تغییرات مقادیر پیکسل‌ها [۰-۲۵] (توان تفکیک رادیومتریک در تصاویر HR-PRS، ۸ بیت است) برای پیکسل‌های در سایه $\epsilon_k = 255$ - و برای پیکسل‌هایی که در زیر لکه سفید ابر قرار گرفته‌اند $\epsilon_k = 255$ می‌باشد. در دسته‌بندی نقاط روی زمین براساس ویژگی رادیومتریکی، اگر مقادیر واقعی پیکسل‌ها در ویژگی مورد نظر (ویژگی رادیومتریکی) با $\tilde{X} = \{\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_k, \dots, \tilde{x}_n\}$ نمایش داده شوند، برای مقدار واقعی هر پیکسل محدوده‌ای در نظر گرفته می‌شود و علاوه بر آن برای هر ناحیه خاص (پوشش زمینی) از زمین یک محدوده از اعداد برای مقادیر واقعی پیکسل‌ها وجود دارد. در این روش، اثر خطا در نحوه Defuzzification با الگوریتمی نظیر LMSE و تغییر در نوع اعداد فازی و متریک مورد استفاده، تعدیل شده و خروجی‌های دقیق‌تری را نتیجه داده و در این حالت برای پیکسل‌ها مقادیری حاصل می‌شود که این مقادیر، محدوده جدیدی از دامنه پیکسل‌های ورودی را به وجود می‌آورند

در این راستا در تصحیحات هندسی، نویز N_k^{geo} به مقدار پیکسل اضافه می‌گردد. بنابراین داریم (Richards, 2013):

$$x_k = \tilde{x}_k * h_k + N_k^{geo} \quad (\text{رابطه ۱})$$

در پیکسل‌های تصویر HR-PRS (جز پیکسل‌هایی که در سایه و یا زیر لکه سفید ابر قرار می‌گیرند) میانگین x_k تقریباً برابر با \tilde{x}_k می‌باشد. یعنی داریم:

$$\mu_{x_k} = \mathcal{E}[x_k] = \tilde{x}_k + \epsilon_k \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن ϵ_k عدد کوچکی می‌باشد ($k = 1, \dots, n$). با توجه به اینکه در تصاویر ماهواره‌ای، مقادیر پیکسل‌ها یعنی $\{x_k\}_{k=1}^n$ (که هر کدام پیشامدی از متغیر تصادفی مربوط به خود یعنی $\{x_k\}_{k=1}^n$ هستند) حول مقدار واقعی $\{\tilde{x}_k\}_{k=1}^n$ کمی تغییر می‌کنند. از آنجایی که در تصاویر ماهواره‌ای برداشت ما از تصاویر نزدیک به واقعیت بوده و با وجود مستقل بودن x_k ‌ها از یکدیگر، مقادیر پیکسل‌ها در یک پوشش زمینی خاص و یکسان به یکدیگر نزدیک می‌باشند، این رابطه نزدیک به واقعیت است. در اکثر تصاویر ماهواره‌ای این پدیده به وضوح قابل مشاهده می‌باشد. از طرفی دیگر از آنجایی که x_k خود متشکل از چندین متغیر تصادفی است، طبق قضیه حد مرکزی x_k به توزیع نرمال (با میانگین \tilde{x}_k) میل می‌کند که خود دلیلی بر درستی فرض فوق می‌باشد. در این راستا با توجه به اینکه مقدار ϵ_k تقریباً برای پیکسل‌های مختلف متفاوت است، متغیر تصادفی x_k به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود (Wang et al., 2018) (رابطه ۳):

$$x_k = \tilde{x}_k + \epsilon_k \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در آن داریم:

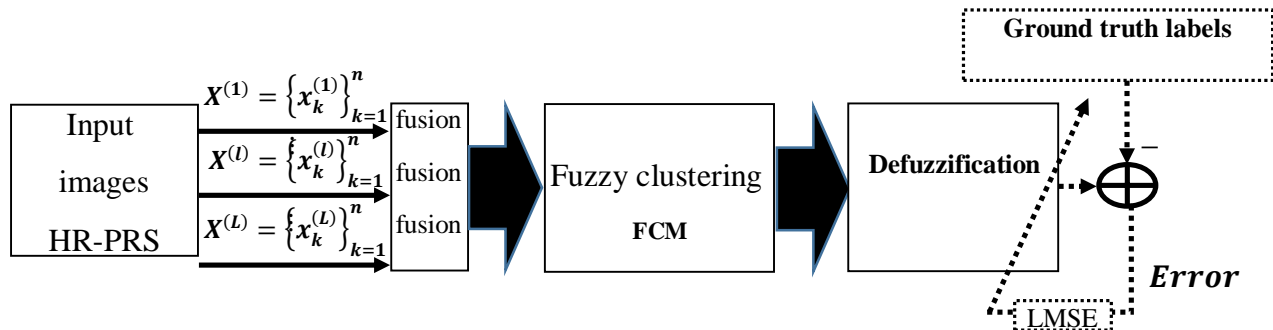
$$(\text{رابطه ۴})$$

$$\mu_{\tilde{x}_k} = \mathcal{E}[\tilde{x}_k] = \tilde{x}_k, \quad \sigma_{\tilde{x}_k}^2 = \sigma_{x_k}^2 = \sigma^2, \quad k = 1, \dots, n$$

با توجه به وجود نویز نامحسوس در تصاویر HR-PRS، عواملی مانند قرارگیری پیکسل‌ها در سایه و زیر لکه‌های سفید ابر باعث تفاوت مقادیر واقعی زمینی و مقادیر پیکسل‌ها می‌گردد. با این وجود بیشتر پیکسل‌های تصاویر به طور معمول تحت تاثیر عوامل پیش‌بینی نشده نظیر حضور در سایه یا زیر ابر قرار نمی‌گیرند. در این پیکسل‌ها فقط نویز اتمسفر و سنجنده (نویز نامحسوس) مقادیر پیکسل‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در این دسته از پیکسل‌ها چون مقادیر واقعی و دامنه تغییرات فقط تحت تاثیر نویز نامحسوس قرار می‌گیرند، محدوده تغییرات مقادیر ثبت شده توسط سنجنده‌ها در تصاویر ناچیز بوده و در

found. (۳) آمده است. بنابراین این پدیده منجر به تولید ناحیه‌بندی و خوشه‌های دقیق‌تر در منطقه می‌شود.

(Aboutalebi et al., 2018; Silva et al., 2018). ساختار کلی ناحیه‌بندی فازی در (Error! Reference source not



شکل ۳- روش‌های ناحیه‌بندی فازی برای ناحیه‌بندی مقاوم تصاویر HR-PRS
Fig. 3. proposed methods for segmentation of HR-PRS images

از روش‌های بسیار مرسوم در ناحیه‌بندی انواع تصاویر، بخصوص تصاویر پنکروماتیک می‌باشد که به بررسی تقسیم‌بندی چند مرحله‌ای تصویر مجموعه سطحی با نگاشت کرنل و مدل‌سازی ثابت تکه‌ای داده‌های تصویر آن می‌پردازد (Carleer and Wolff, 2005; Yu et al., 2015). در این روش یک تابع کرنل به طور ضمنی داده‌های اصلی را به داده‌هایی با ابعاد بالاتر نگاشت می‌کند تا مدل ثابت تکه‌ای قابل اجرا شود. این پردازش منجر به جایگزینی انعطاف‌پذیر و مؤثر برای مدل‌سازی پیچیده داده‌های تصویر می‌شود.

الگوریتم IDF (Interval-valued Data Fuzzy c-) از جدیدترین روش‌های ناحیه‌بندی ارائه شده می‌باشد که به استخراج ویژگی فازی از تصاویر ورودی پرداخته و با استفاده از مدل نمودن ویژگی فازی با اعداد دوره‌ای به ناحیه‌بندی آن با استفاده از FCM می‌پردازد (Fourie, 2015; Yu et al., 2014).

در این الگوریتم‌ها خوشه‌بندی فازی چندین بار و برای تعداد خوشه‌های مختلف (از C_{min} تا C_{max}) انجام گرفته و با ارزیابی خروجی خوشه‌بندی و انتخاب بهترین تعداد نواحی (\hat{C}) تعیین شده است. در ادامه بر اساس مقادیر بدست آمده برای ویژگی‌ها در تصاویر ورودی، مقادیر هر ویژگی به صورت یک عدد فازی بیان می‌شود (مجموعه اعداد فازی $\tilde{X} = \{\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_n\}$ ، که با $\tilde{x}_k = (\tilde{x}_{k,1}, \dots, \tilde{x}_{k,p})$ ، $k = 1, \dots, n$ توجه به تصاویر HR-PRS و مجموعه‌های $X^{(1)}, \dots, X^{(\ell)}, \dots, X^{(L)}$ تعیین می‌شوند). این فرایند باعث

در این نوشتار پس از پیش‌پردازش‌های رادیومتریک و هندسی، بر اساس ویژگی‌های فازی به ادغام تصاویر ورودی در نرم‌افزار MATLAB پرداخته و سپس با استفاده از الگوریتم‌های MSA، FWS، IDF و CFM به ناحیه‌بندی مقاوم پوشش زمینی اقدام گردید.

الگوریتم MSA (Mean-Shift Algorithm) از روش‌های بسیار مرسوم در ناحیه‌بندی انواع تصاویر، بخصوص تصاویر پنکروماتیک می‌باشد که تصویر را به قطعات همگن در تجزیه و تحلیل تصویر مبتنی بر شی (object-based image analysis, OBIA) تقسیم می‌کند (Ming et al., 2012; Bayram et al., 2018). هدف این روش انتخاب مقیاس قبل از تقسیم‌بندی در OBIA است و یک روش انتخاب پهنای باند فضایی مبتنی بر آمار فضایی را بر اساس تقسیم‌بندی میانگین شیفت پیشنهاد می‌کند.

الگوریتم CFM (Classical Fusion Method and FCM) نیز یک روش ناحیه‌بندی چندتصویری مبتنی بر روش‌های ادغام معمول (در سطح پیکسل) و FCM می‌باشد. در این روش تصاویر ورودی با استفاده از روش‌های مرسوم ادغام در سطح پیکسل (min, mean, max, Kalman و ...) ادغام می‌شوند تا یک تصویر ادغام شده (سخت، نه فازی) حاصل شود (Zheng et al., 2019). سپس انواع روش‌های خوشه‌بندی و ناحیه‌بندی به تصویر ادغام شده اعمال می‌شود تا در نهایت تصویر ناحیه‌بندی شده حاصل شود. الگوریتم FWS (Fuzzy Watershed Segmentation)

فازی دارد، به عنوان یک خروجی میانی جهت ناحیه‌بندی استفاده شده‌است. فرایند ادغام داده، یک تکنیک مؤثر جهت استفاده بهینه از حجم وسیع داده‌ها می‌باشد که از ترکیب اطلاعات مختلف، جهت رسیدن به اطلاعات مفید و جدید با دقت بالا استفاده می‌نماید. با توجه به ماهیت تصاویر HR-PRS، در تصاویر ادغامی اعداد فازی نرمال (گوسی) مناسب‌ترین نوع اعداد جهت مدل نمودن پیکسل‌ها می‌باشند. در نهایت الگوریتم‌های خوشه‌بندی فازی مورد بررسی که دارای پارامترهای فازی هستند، بر روی تصاویر HR-PRS ورودی اعمال شده و نتایج آن مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

۴- نتایج و بحث

از جمله چالش‌های پیش رو در ناحیه‌بندی تصاویر HR-PRS می‌توان به عدم امکان حذف کامل انواع نویزها و عوامل پیش‌بینی نشده در این تصاویر و نیز عدم امکان استفاده همزمان از تمامی اطلاعات موجود و نیز عدم امکان مدل نمودن و حذف اثرات عدم قطعیت تصاویر در خروجی ناحیه‌بندی اشاره نمود. با توجه به مزایای استفاده از ویژگی‌ها و روش‌های خوشه‌بندی فازی جهت ناحیه‌بندی، در این پژوهش از ویژگی‌های فازی و نیز نسخه‌های تعمیم‌یافته روش خوشه‌بندی FCM (Fuzzy C-Means) جهت ناحیه‌بندی تصاویر HR-PRS استفاده گردید. در این رابطه جهت مقایسه و تحلیل عملکرد الگوریتم‌های خوشه‌بندی فازی در فرایند ناحیه‌بندی، الگوریتم‌های FWS، MSA، IDF و CFM بر روی تصاویر پنکروماتیک HR-PRS محدودده مورد مطالعه اعمال و پردازش گردید. در این راستا عملکرد الگوریتم‌های مورد بررسی طبق دو معیار کیفی مکانی و رادیومتریکی در ناحیه‌بندی فازی محدودده مورد مطالعه مورد بررسی قرار گرفت.

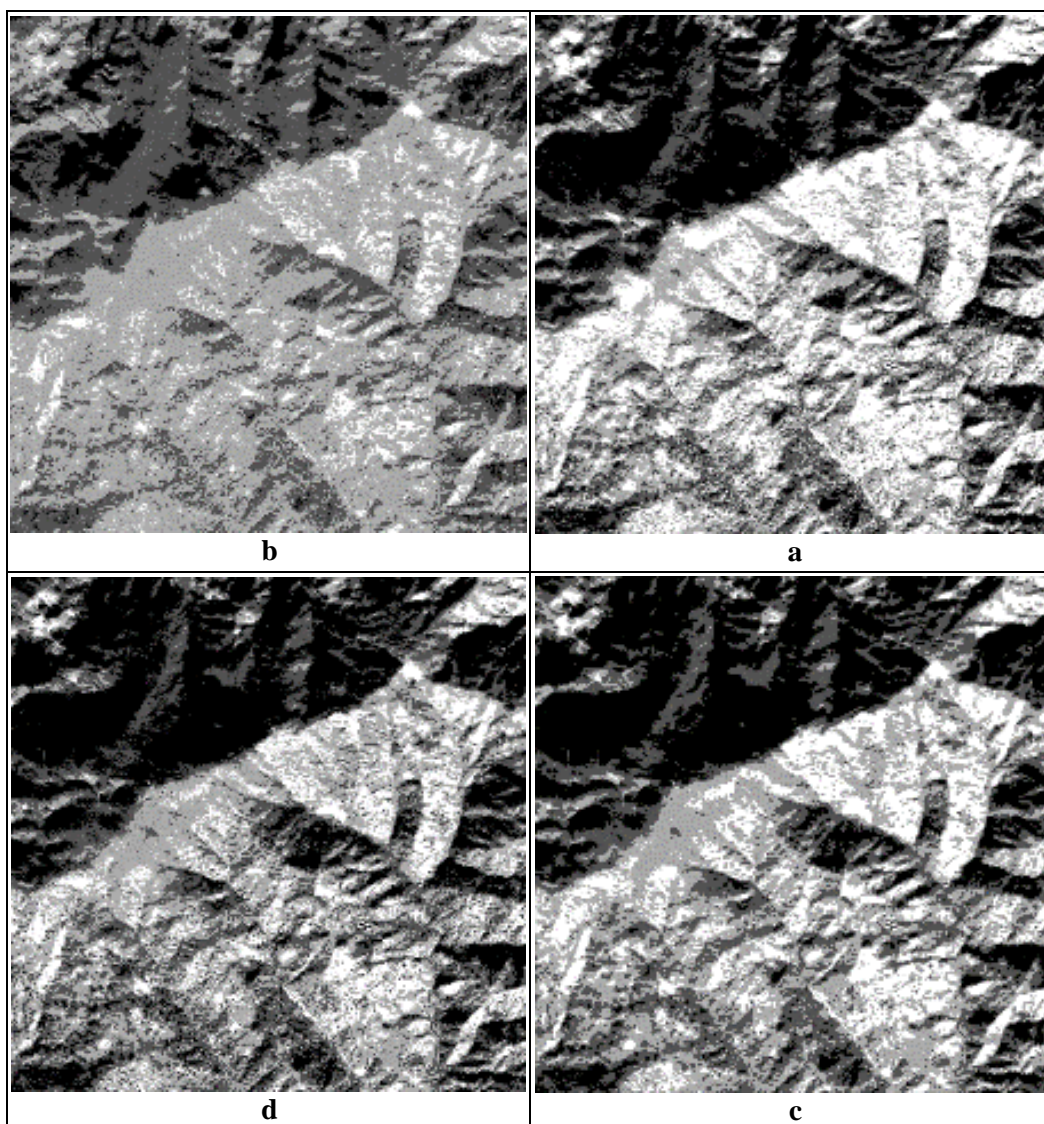
معیار ۱: در این معیار مکانی، ناحیه‌بندی دقیق و آشکارسازی خط‌الراس‌ها (خطوط متناظر با قله کوه‌ها که دارای بیشترین ارتفاع هستند) و خط‌القعرها (خطوط متناظر با دره‌ها که دارای کمترین ارتفاع هستند) که از مجموعه آنها به عنوان خطواره‌ها یاد می‌شود، از محیط پیرامون مد نظر می‌باشد.

معیار ۲: در این معیار رادیومتریکی، ناحیه‌بندی مستقل از عوامل ناخواسته یعنی پوشش ابرها و سایه‌های آنها که در تصویر ورودی موجود می‌باشد و در **Error! Reference source not found.** دواپری مشخص شده‌اند، مد نظر می‌باشد.

افزایش احتمال وجود مقادیر واقعی ویژگی‌ها در مقادیر در نظر گرفته شده برای آن می‌گردد می‌آورند (Xu et al., 2020; Wu, 2019). در الگوریتم‌های خوشه‌بندی ارائه شده این پژوهش متریک به کار گرفته شده برای اعداد فازی، مقدار فازی را دارا می‌باشد و جهت حالت‌هایی که درجه عضویت نیز ماهیتی فازی دارد، روش‌های خوشه‌بندی ارائه می‌گردد.

در این راستا ضمن استفاده از الگوریتم‌های خوشه‌بندی فازی با خروجی فازی و تخصیص درجه تعلق فازی به پیکسل‌ها جهت مدل نمودن عدم قطعیت مکانی، از انواع اعداد فازی با توابع عضویت مختلف نیز برای ورودی استفاده می‌شود تا عدم قطعیت ذاتی نیز مدل گردد. در الگوریتم‌های مورد بررسی مدل دلخواه عدم قطعیت را می‌توان جهت اعداد ورودی در نظر گرفت. همچنین بسیاری از متریک‌ها قابل تعمیم به حوزه اعداد فازی بوده و می‌توانند در خوشه‌بندی به کار روند که هر یک ویژگی خاصی به روش خوشه‌بندی می‌دهند. همچنین در مرحله پردازش جهت رسیدن به تعداد مشخصی خوشه، تصویر خوشه‌بندی می‌شود تا پس از اعمال Defuzzification بر روی آن، ناحیه‌بندی فازی صورت گیرد. در این مرحله با اختصاص هر پیکسل به یک خوشه و برجسب‌زنی هر یک از پیکسل‌ها بر اساس اندازه مرکز خوشه‌ای که بیشترین درجه تعلق را به آن دارا می‌باشد، تصویر ناحیه‌بندی شده حاصل می‌شود که در آن مرز نواحی کاملاً مشخص بوده و بسته به برجسب پیکسل، هر چه این برجسب بزرگتر باشد، رنگ روشن‌تری به آن اختصاص می‌یابد. در این رابطه جهت بهبود عملکرد ناحیه‌بندی فازی از مقادیر DN و ویژگی‌های بافتی و رادیومتریکی استفاده شده است. بنابراین دو حالت برای الگوریتم‌های ناحیه‌بندی در نظر گرفته شده است. در یک حالت مقادیر DN یا ویژگی رادیومتریکی تصاویر پنکروماتیک ورودی و در حالت دیگر مقادیر DN به همراه ویژگی‌های کنتراست، آنتروپی، انرژی و همگنی به دست آمده از ماتریس GLCM (Gray-Level Co-Occurrence) و ویژگی‌های به دست آمده بر پایه انرژی بافت لاوز (Laws, 1980) از تصاویر مورد مطالعه استخراج شده و جهت استفاده از اطلاعات مکانی تصاویر و دستیابی به نتایج بهتر ناحیه‌بندی مورد استفاده قرار گرفته‌است. این ویژگی‌ها لبه‌ها، تک‌نقطه‌ها، میانگین وزن‌دار و موج‌ها را در دو بعد نمایش می‌دهند (Tabib Mahmoudi et al., 2015). در این راستا از فرآیند Fusion تصاویر پنکروماتیک HR-PRS که ماهیتی

نتایج ناحیه‌بندی فازی و مقایسه الگوریتم‌های مورد بررسی



شکل ۴- نتایج ناحیه‌بندی الگوریتم‌های خوشه‌بندی هنگام اعمال بر روی در محدوده مورد مطالعه: (a) IDF, (b) FWS, (c) CFM, (d) CFM

Fig. 4. Segmentation results of fuzzy clustering algorithms in the study area. (a) IDF, (b) FWS, (c) CFM, (d) CFM

ناهمگنی در بازتاب طیفی سطح اشیا زمین باشد، موثر باشد و به طور قابل توجهی اثر خوشه‌بندی فازی را بهبود بخشد. این نتایج با (Yu et al., 2014; Zhao et al., 2019; Xu et al., 2019) مطابقت دارد. به ویژه، این فرآیند با تشخیص و حذف اثرات ابر و سایه‌های ابر در تصاویر که معیاری رادیومتریکی است، می‌تواند اطلاعات از دست رفته را بازسازی نماید و اشکالات ناحیه‌بندی ناشی از همپوشانی ویژگی‌های طیفی بین طبقات نتایج خوشه‌بندی را کاهش و بهبود دهد. همچنین الگوریتم IDF قابلیت تفکیک پذیری عوارض را تنظیم و دقت

نشان می‌دهد که روش IDF در محدوده مورد مطالعه عملکرد مناسب‌تری نسبت به سایر روش‌ها جهت ناحیه‌بندی فازی و آشکارسازی عوارض سطح زمین دارد (شکل ۴a). در این روش ابهام موجود در ناحیه‌بندی تصاویر پنکروماتیک HR-PRS لحاظ شده و در مجموع دارای بهترین عملکرد در زمینه آشکارسازی خطواره‌ها و عوارض سطحی می‌باشد. همچنین بر اساس نتایج، روش IDF کارایی بالایی برای توصیف ویژگی‌های خوشه‌بندی فازی دارد و چنین فرآیندی می‌تواند جهت دستیابی به ماهیت فازی داده‌های دورسنجی که ناشی از عدم قطعیت و

در برابر نویز و داده‌های دور افتاده، با استفاده از تعریف فاصله و درجه عضویت فازی در هنگام خوشه‌بندی اعداد فازی مثلثی (به عنوان یکی از پرکاربردترین اعداد فازی)، گامی جهت نزدیکتر شدن به واقعیت برداشته می‌شود؛ چرا که با توجه به وجود ابهام در اعداد ورودی، بهتر است سایر پارامترهای مؤثر در خوشه‌بندی (نظیر فاصله و درجه عضویت) نیز فازی بوده و ابهام داشته باشند.

۵- نتیجه‌گیری

تصاویر ماهواره‌ای با وضوح بالا (HR-PRS) اطلاعات دقیق و مفصلی در مورد پوشش زمین ارائه می‌دهند؛ اما وجود سایه می‌تواند میزان اطلاعاتی را که می‌توان از این تصاویر استخراج کرد، کاهش دهد؛ بنابراین تصحیح و از بین بردن اثر شرایط جوّی در تصاویر ماهواره‌ای و همچنین بازیابی و بازسازی اطلاعات تصاویر متأثر از ابرها و سایه‌ها، برای بسیاری از کاربردهای ژئومورفیک و منابع طبیعی ضروری است. در این رابطه، یکی از مشکلاتی که در روش‌های خوشه‌بندی اعداد فازی ارائه شده وجود دارد، علاوه بر عدم تطابق کامل تصاویر ورودی در روش‌های ناحیه‌بندی چندتصویری و ادغام در سطح پیکسل؛ این است که فاصله بین دو عدد فازی، یک مقدار سخت در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش جهت حل این مساله در روش‌های خوشه‌بندی مورد بررسی، متریک به کار گرفته شده برای اعداد فازی، مقدار فازی را دارا می‌باشد و از آنجایی که روش‌های خوشه‌بندی فازی هنگامی که اعداد ورودی آنها فازی هستند کمتر مورد بررسی قرار گرفته‌اند، در این نوشتار با هدف بهبود عملکرد روش‌های خوشه‌بندی فازی، هنگامی که اعداد ورودی غیر سخت هستند، الگوریتم‌هایی ارائه گردید و سعی شد تا نتیجه خوشه‌بندی بهبود یافته و با استفاده از آنها در ناحیه‌بندی تصاویر، دقت ناحیه‌بندی نیز بهبود یابد. نتایج نشان داد که استفاده از تئوری فازی و تعمیم روش‌های خوشه‌بندی اعداد سخت توده‌ای به اعداد فازی و امکان به کارگیری انواع اعداد فازی و انواع متریک‌های موجود برای هر عدد فازی که هر کدام ویژگی متفاوتی را به خروجی ناحیه‌بندی خواهند داد، روش مناسب جهت ادغام اطلاعات تصاویر ماهواره‌ای HR-PRS با هدف ناحیه‌بندی می‌باشد. علاوه بر آن، با هدف بهبود دقت ناحیه‌بندی منطقه، استفاده از اعداد و روش‌های خوشه‌بندی فازی باعث بهبود نتایج می‌گردد.

نتایج این پژوهش اثربخشی و کارایی روش‌های ناحیه‌بندی

بالتری را ارائه می‌دهد و تشخیص و آشکارسازی عوارض خطی را تسهیل نموده و مرزهای اضافی را حذف می‌کند (Feng et al., 2019). در این روش خوشه‌بندی، یکی از تعمیم‌های رایج و پرکاربرد FCM یعنی Gath-Geva (که تاکنون فقط برای خوشه‌بندی اعداد سخت ارائه شده و از آن به عنوان خوشه‌بندی فازی بهینه یاد می‌شود) به حوزه اعداد فازی گسترش می‌یابد. همچنین با فازی سازی پارامترهای فاصله، درجه عضویت و هر دو با یکدیگر، گامی جهت رسیدن به خوشه‌بندی مقاوم‌تر برداشته می‌شود؛ چرا که با توجه به وجود ابهام در اعداد ورودی، بهتر است سایر پارامترهای مؤثر در خوشه‌بندی نیز فازی بوده و ابهام داشته باشند.

همچنین روش‌های CFM و MSA نیز در شناسایی و آشکارسازی خطواره‌ها که معیاری مکانی است، دارای عملکرد مناسبی هستند و در تقسیم‌بندی پیکسل‌های تصاویر پنکروماتیک HR-PRS مورد مطالعه خطواره‌ها و مرزهای تصویر را به خوبی تفکیک نموده‌اند. به طور کلی این الگوریتم‌ها برای ناحیه‌بندی فازی و استخراج اطلاعات پدیده‌های مکانی از تصاویر پنکروماتیک HR-PRS کارایی خوبی نشان می‌دهند (Ming et al., 2012; Bayram et al., 2018; Feng et al., 2019)؛ اما به دلیل حساسیت نسبت به نویز با مسئله پیدایش مرزهای اضافی روبرو هستند و در زمینه تشخیص بافت مناطقی از تصویر که تحت پوشش سایه ابرها قرار دارند، دارای عملکرد متوسطی هستند؛ در نتیجه همانگونه که در (شکل ۴c) دیده می‌شود، خطواره‌ها و مرزهای اصلی را در محدوده تحت پوشش سایه و ابر که معیار ارزیابی رادیومتریکی می‌باشد به خوبی تشخیص نداده است. همچنین در این رابطه الگوریتم FWS در هر دو معیار ارزیابی مکانی و رادیومتریکی عملکرد مناسبی را از خود نشان نداده و ناحیه‌بندی فازی و آشکارسازی خط الراس‌ها و خط القعرها و مناطق تحت پوشش سایه ابرها را به خوبی انجام نداده است (شکل ۴b).

نتایج نشان داد که با توجه به وجود ابهام ذاتی و مکانی در تصاویر، استفاده از ویژگی‌های فازی جهت ناحیه‌بندی نسبت به روش‌های موجود ارجحیت داشته و ویژگی‌های فازی نوع نرمال (گوسی)، بهترین نوع ویژگی‌ها برای این هدف می‌باشند و اثبات می‌کند که استفاده از اعداد فازی در حالت کلی می‌تواند ما را به نتایج بهتری در ناحیه‌بندی تصاویر برساند. از طرفی با توجه به خواص مطلوب روش‌های خوشه‌بندی فازی از جمله مقاومت

خوشه‌بندی فازی را همراه با تکنیک های تشخیص هدف و زمین آمار به منظور شناسایی مناطق سایه و پیش‌بینی اطلاعات در مناطق مربوطه بر روی تصاویر چند طیفی و ابر طیفی نیز اعمال نمود. در این رابطه می‌توان جهت آشکارسازی پوشش زمین و مرز بین نواحی و نحوه گذر از یک ناحیه به ناحیه دیگر از آنتروپی مقادیر درجه عضویت پیکسل‌ها نیز استفاده نمود و مرز بین نواحی و نحوه گذر از یک ناحیه به ناحیه دیگر را به خوبی آشکار نمود. همچنین با بهره‌گیری از روابط مکانی محلی و کلی پیکسل‌ها ضمن استفاده از اعداد فازی نرمال و روش خوشه‌بندی GG-FCM تصاویر با پارامترهای فازی به یک روش کارآمد و بهینه در مناطق هدف دست یافت و عملکرد مطلوبی جهت خوشه‌بندی مقاوم‌تر فازی داشته باشیم؛ چرا که با توجه به وجود ابهام در اعداد ورودی، بهتر است سایر پارامترهای مؤثر در خوشه‌بندی نیز فازی بوده و ابهام داشته باشند. استفاده از پارامترهای فازی (فاصله و درجه تعلق) در هنگام اعمال روش‌های مختلف خوشه‌بندی فازی به انواع اعداد فازی (به خصوص اعداد فازی نرمال) می‌تواند جهت بهبود عملکرد در تحقیقات آینده مورد بررسی قرار گیرد. انتظار می‌رود بتوان در آینده از این ویژگی روش‌های پیشنهادی در کاربردهایی چون تخمین میزان رطوبت زمین، تخمین جذر و مد و میزان تراکم پوشش گیاهی استفاده نمود.

قدردانی

نویسندگان از حمایت‌های مالی دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر برای انجام این پژوهش تشکر می‌نمایند. این مقاله مستخرج از نتایج طرح تحقیقاتی اجرا شده با شماره قرارداد ۱۶۰ از محل اعتبارات ویژه پژوهشی دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر می‌باشد. همچنین از سردبیر و داوران محترم مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته به دلیل راهنمایی‌های علمی ارزنده که منجر به غنای بیشتر مقاله حاضر گردیده است، کمال تشکر را دارند.

مورد مطالعه را در شناسایی و از بین بردن پوشش ابرها و سایه‌ها از تصاویر سنجش از دور ثابت می‌کند. در همین حال، این یافته‌ها ایده‌های جدیدی را برای مطالعات سنجش از دور به ویژه در زمینه استخراج دقیق اطلاعات از تصاویر و پردازش تصویر ارائه می‌دهد. از این رو مطابق نتایج پژوهش استفاده از الگوریتم‌های خوشه‌بندی فازی، روش مناسب و بهینه جهت ادغام اطلاعات تصاویر ماهواره‌ای HR-PRS با هدف آشکارسازی پوشش زمین و ناحیه‌بندی فازی می‌باشد. به طور کلی نتایج اعمال الگوریتم‌های ناحیه‌بندی فازی مورد بررسی بر روی محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد روش IDF بهترین عملکرد را در خوشه‌بندی سریع حجم وسیع داده ورودی و همچنین آشکارسازی پوشش زمین در محدوده سایه ابر داشته است. اما اوج تفاوت عملکرد این الگوریتم در ناحیه‌بندی فازی خطواره‌های محدوده سایه ابر می‌باشد که ماهیتی رادیومتریکی دارد و این کار به درستی توسط این روش صورت گرفته است. دلیل این امر استفاده از اعداد فازی، مقاومت در برابر نویز و داده‌های دور افتاده و نیز ویژگی‌های بافتی، ساختاری و طیفی جهت خوشه‌بندی کارا و شناسایی هدف در این روش می‌باشد. همچنین در این رابطه و با توجه به ویژگی‌های مطلوب الگوریتم‌های خوشه‌بندی فازی می‌توان گفت استفاده از اعداد فازی و ویژگی‌های فازی نوع نرمال (گوسی) از بهترین ویژگی‌ها جهت ناحیه‌بندی و آشکارسازی خطواره‌ها می‌باشند. در این رابطه به کارگیری انواع متریک‌های موجود برای اعداد فازی که هر کدام ویژگی متفاوتی را به خروجی ناحیه‌بندی خواهند داد و نیز با فازی سازی درجه عضویت و پارامترهای فاصله و هر دو با یکدیگر، در حالت کلی می‌تواند ما را به نتایج بهتری در خوشه‌بندی فازی FCM و ناحیه‌بندی منطقه و تشخیص لبه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای HR-PRS برساند.

با توجه به اینکه در این پژوهش از تصاویر پنکروماتیک HR-PRS جهت ناحیه‌بندی فازی استفاده گردید، می‌توان در پژوهش‌های آتی با توجه به کاربرد مورد نظر الگوریتم‌های

مراجع

Aboutalebi, M., Torres-Rua, A., Kustas, W., Nieto, H., Coopmans, C., McKee, M., 2018. Assessment of different methods for shadow detection in high-resolution optical imagery and evaluation of shadow impact on calculation of NDVI, and evapotranspiration. *Irrigation Science* 37(3), 407–429. <https://doi.org/10.1007/s00271-018-0613-9>.

- Arai, R., Kodaira, S., Takahashi, T., Miura, S., Kaneda, Y., 2018. Seismic evidence for arc segmentation, active magmatic intrusions and syn-rift fault system in the northern Ryukyu volcanic arc. *Earth, Planets and Space* 70(1). <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0830-8>
- Athanassas, C.D., Vaiopoulos, A., Kolokoussis, P., Argialas, D., 2018. Remote Sensing of Mars: Detection of Impact Craters on the Mars Global Surveyor DTM by Integrating Edge- and Region-Based Algorithms. *Earth, Moon, and Planets* 121(1-2), 59–72. [https:// DOI: 10.1007/s11038-018-9515-3](https://doi.org/10.1007/s11038-018-9515-3)
- Bayram, B., Demir, N., Akpınar, B., Oy, S., Erdem, F., Vögtle, T., Seker, D., 2018. Effect of Different Segmentation Methods Using Optical Satellite Imagery to Estimate Fuzzy Clustering Parameters for SENTINEL-1A SAR Images, *International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences* 42(1), 39-43. [https:// DOI: 10.5194/isprs-archives-42-1-39-2018](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-42-1-39-2018)
- Benincasa, M., Falcini, F., Adduce, C., Sannino, G., Santoleri, R., 2019. Synergy of Satellite Remote Sensing and Numerical Ocean Modelling for Coastal Geomorphology Diagnosis. *Remote Sensing* 11(22), 2636. <https://doi.org/10.3390/rs11222636>
- Cao, J., Chen, L., Wang, M., Tian, Y., 2018. Implementing a Parallel Image Edge Detection Algorithm Based on the Otsu-Canny Operator on the Hadoop Platform. *Computational Intelligence and Neuroscience* 2018, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2018/3598284>
- Capolongo, D., Refice, A., Bocchiola, D., D'Addabbo, A., Vouvalidis, K., Soncini, A., Stamatopoulos, L., 2019. Coupling multitemporal remote sensing with geomorphology and hydrological modeling for post flood recovery in the Strymonas dammed river basin (Greece). *Science of the Total Environment* 651, 1958–1968. [https:// DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.114](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.114)
- Carleer, A., Debeir, O., Wolff, E., 2005. Assessment of very high spatial resolution satellite image segmentations, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 71, 1285-1294. [https://doi: 10.14358/PERS.71.11.1285](https://doi.org/10.14358/PERS.71.11.1285)
- Chen, G., Jiang, Z., Kamruzzaman, M., 2020. Radar remote sensing image retrieval algorithm based on improved Sobel operator. *Journal of Visual Communication and Image Representation* 71, 102720. [https://doi:10.1088/1742-6596/1933/1/012037](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1933/1/012037)
- Chen, Y., Li, Y., Zhang, H., Tong, L., Cao, Y., Xue, Z., 2016. Automatic power line extraction from high resolution remote sensing imagery based on an improved Radon transform. *Pattern Recognition* 49, 174–186. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2015.07.004>
- Du, S., Du, S., Liu, B., Zhang, X., Zheng, Z., 2020. Large-scale urban functional zone mapping by integrating remote sensing images and open social data. *GIScience and Remote Sensing* 57(3), 411–430. <https://doi.org/10.1080/15481603.2020.1724707>
- Epuh, E., Okolie, C., Daramola, O., Ogunlade, F., Oyatayo, F., Akinnusi, S., Emmanuel, E., 2020. An integrated lineament extraction from satellite imagery and gravity anomaly maps for groundwater exploration in the Gongola Basin. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 20, 100346. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100346>
- Fan, J., Wang, J., 2018. A Two-Phase Fuzzy Clustering Algorithm Based on Neurodynamic Optimization with Its Application for PolSAR Image Segmentation. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* 26(1), 72–83. [https:// DOI: 10.1109/TFUZZ.2016.2637373](https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2016.2637373)
- Feng, G., Ni, M., Ou, S., Yan, W., Xu, J., 2019. A preferential interval-valued fuzzy c-means algorithm for remotely sensed imagery classification. *International Journal of Fuzzy Systems* 21(7), 2212-2222. [https:// DOI: 10.1109/SPAC46244.2018.8965521](https://doi.org/10.1109/SPAC46244.2018.8965521)
- Fourie, C., 2015. On Attribute Thresholding and Data Mapping Functions in a Supervised Connected Component Segmentation Framework, *Remote Sensing* 7(6), 7350-7377. <https://doi.org/10.3390/rs70607350>
- Hong, H., Nam, J., 2017. Automatic detection of contact lines in slot coating flows. *AIChE Journal* 63(6), 2440–2450. <https://doi.org/10.1002/aic.14752>
- Iqbal, M., Riaz, M., Ali, S., Ghafoor, A., Ahmad, A., 2020. Underwater Image Enhancement Using Laplace Decomposition. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* (19), 1–5. [https:// DOI: 10.1109/IDAP.2018.8620727](https://doi.org/10.1109/IDAP.2018.8620727)

- Iwahashi, J., Kamiya, I., Matsuoka, M., Yamazaki, D., 2018. Global terrain classification using 280 m DEMs: segmentation, clustering, and reclassification. *Progress in Earth and Planetary Science* 5(1), 114–126. <https://doi.org/10.1186/s40645-017-0157-2>
- Jurado, J., Cárdenas, J., Ogayar, C., Ortega, L., Feito, F., 2020. Semantic Segmentation of Natural Materials on a Point Cloud Using Spatial and Multispectral Features. *Sensors* 20(8), 2244. <https://doi.org/10.3390/s20082244>
- Landmark, K., Schistad Solberg, A., Albregtsen, F., Austeng, A., Hansen, R., 2015. A Radon-Transform-Based Image Noise Filter With Applications to Multibeam Bathymetry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 53(11), 6252–6273. <https://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2015.2436380>
- Laws, K., 1980. Rapid texture identification, in 24th annual technical symposium, pp. 376–381. <https://doi.org/10.1117/12.959169>
- Liu, W., Zhang, Z., Chen, X., Li, S., Zhou, Y., 2017. Dictionary Learning-Based Hough Transform for Road Detection in Multispectral Image. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 14(12), 2330–2334. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2017.2764042>
- Mahmoudi, F., Samadzadegan, F., Reinartz, P., 2015. Object recognition based on the context aware decision-level fusion in multi views imagery, *Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(1), 12–22. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.362103>
- Makowski, C., Finkl, C., Vollmer, H., 2017. Geoforn and Landform Classification of Continental Shelves using Geospatially Integrated IKONOS Satellite Imagery. *Journal of Coastal Research* 331, 1–22. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-16A-00003.1>
- Masoud, A., Koike, K., 2017. Applicability of computer-aided comprehensive tool and shaded digital elevation model for characterizing and interpreting morphotectonic features from lineaments. *Computers and Geosciences* 106, 89–100. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.06.006>
- Miao, Z., Shi, W., Samat, A., Lisini, G., Gamba, P., 2016. Information Fusion for Urban Road Extraction from VHR Optical Satellite Images. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 9(5), 1817–1829. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2498663>
- Ming, D., Ci, T., Cai, H., Li, L., Qiao, C., Du, J., 2012. Semivariogram-based spatial bandwidth selection for remote sensing image segmentation with mean-shift algorithm, *Geoscience and Remote Sensing Letters* 9(1), 813–817. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2011.2182604>
- Nakao, D., Masumoto, S., Nemoto, T., 2019. Development of Lineament Extraction Method based on Topography Characteristics and Segment Tracing Algorithm (STA) using Digital Elevation Model. *Geoinformatics* 30(3), 87–100. https://doi.org/10.6010/geoinformatics.30.3_87
- Nemer Pelliza, K., Pucheta, M., Flesia, A., 2020. Optimal Canny's Parameters Regressions for Coastal Line Detection in Satellite-Based SAR Images. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 17(1), 82–86. <http://dx.doi.org/10.1109/LGRS.2019.2916225>
- Ni, C., Zhang, S., Liu, C., Yan, Y., Li, Y., 2016. Lineament Length and Density Analyses Based on the Segment Tracing Algorithm: A Case Study of the Gaosong Field in Gejiu Tin Mine, China. *Mathematical Problems in Engineering* 2016, 1–7. <https://doi.org/10.1155/2016/5392453>
- Pires, A., Chaminé, H., Piqueiro, F., Pérez-Alberti, A., Rocha, F., 2016. Combining coastal geoscience mapping and photogrammetric surveying in maritime environments (Northwestern Iberian Peninsula): focus on methodology. *Environmental Earth Sciences* 75(3), 104–116. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4936-z>
- Richards, J., 2013. Correcting Registering Images, in *Remote Sensing Digital Image Analysis*, ed: Springer, pp. 27–77. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-30062-2>
- Rodríguez-Caballero, E., Afana, A., Chamizo, S., Solé-Benet, A., Canton, Y., 2016. A new adaptive method to filter terrestrial laser scanner point clouds using morphological filters and spectral information to conserve surface micro-topography. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 117, 141–148. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.04.004>
- Silva, G., Carneiro, G., Doth, R., Amaral, L., de Azevedo, D., 2018. Near real-time shadow detection and removal in aerial motion imagery application. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 140, 104–121. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.11.005>

- Swetnam, T., Gillan, J., Sankey, T., McClaran, M., Nichols, M., Heilman, P., McVay, J., 2018. Considerations for Achieving Cross-Platform Point Cloud Data Fusion across Different Dryland Ecosystem Structural States. *Frontiers in Plant Science* 8, 140-151. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02144>
- Tabib Mahmoudi, F., Samadzadegan, F., Reinartz, P., 2015. Object recognition based on the context aware decision-level fusion in multiviews imagery," *Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, IEEE Journal of 8, pp. 12-22. [https:// DOI: 10.1109/JSTARS.2014.2362103](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2362103)
- Vizilter, Y., Rubis, A., Zheltov, S., Vygolov, O., 2016. Change detection via morphological comparative filters. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 3(3), 279–286. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-III-3-279-2016>
- Wang, C., Guo, P., Wang, H., Yang, F., 2019. Urban Trunk Roads Extraction Using Hough Transform and NDVI in Airborne Hyperspectral Remote Sensing Images. *Journal of Physics: Conference Series* 1237, 032030. <https://doi.org/10.3390/rs9060590>
- Wang, T., Shi, J., Husi, L., Zhao, T., Ji, D., Xiong, C., Gao, B., 2017. Effect of solar-cloud-satellite geometry on land surface shortwave radiation derived from remotely sensed data. *Remote Sensing* 9(7), 690. <https://doi.org/10.3390/rs9070690>
- Wang, T., Yan, G., Mu, X., Jiao, Z., Chen, L., Chu, Q., 2018. Toward operational shortwave radiation modeling and retrieval over rugged terrain. *Remote Sensing of Environment* 205, 419– 433. [https:// DOI: 10.1109/TGRS.2020.2994384](https://doi.org/10.1109/TGRS.2020.2994384)
- Xu, J., Feng, G., Fan, B., Yan, W., Zhao, T., Sun, X., Zhu, M., 2020. Landcover classification of satellite images based on an adaptive interval fuzzy c-means algorithm coupled with spatial information. *International Journal of Remote Sensing* 41(6), 2189-2208. <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1685718>
- Xu, J., Wen, X., Zhang, H., Luo, D., Li, J., Xu, L., Yu, M., 2020. Automatic extraction of lineaments based on wavelet edge detection and aided tracking by hillshade. *Advances in Space Research* 65(1), 506–517. [https://DOI:10.1016/j.asr.2019.09.045](https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.09.045)
- Xu, Y., Chen, R., Li, Y., Zhang, P., Yang, J., Zhao, X., Wu, D., 2019. Multispectral Image Segmentation Based on a Fuzzy Clustering Algorithm Combined with Tsallis Entropy and a Gaussian Mixture Model. *Remote Sensing* 11(23), 2772. <https://doi.org/10.3390/rs11232772>
- Yang, S., Qiao, Y., Yang, L., Jin, P., Jiao, L., 2014. Hyperspectral Image Classification Based on Relaxed Clustering Assumption and Spatial Laplace Regularizer. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 11(5), 901–905. <https://doi.org/10.3390/rs14215530>
- Yu, H., Xu, L., Feng, D., He, X., 2015. Independent feature subspace iterative optimization based fuzzy clustering for synthetic aperture radar image segmentation. *Journal of Applied Remote Sensing* 9(1), 095060. [https:// DOI: 10.1117/1.JRS.9.095060](https://doi.org/10.1117/1.JRS.9.095060)
- Yu, X., He, H., Hu, D., Zhou, W., 2014. Land cover classification of remote sensing imagery based on interval-valued data fuzzy c-means algorithm, *Science China Earth Sciences* 57, 1306-1313. <https://doi.org/10.1007/s11430-013-4689-z>
- Zhang, Y., Jiang, P., Zhang, H., Cheng, P., 2018. Study on Urban Heat Island Intensity Level Identification Based on an Improved Restricted Boltzmann Machine. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 15(2), 186. <https://doi.org/10.3390/ijerph15020186>
- Zhao, F., Li, C., Liu, H., Fan, J., 2019. A multi-objective interval valued fuzzy clustering algorithm with spatial information for noisy image segmentation. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems* 36(6), 5333-5344. [https:// DOI: 10.3233/JIFS-181191](https://doi.org/10.3233/JIFS-181191)
- Zheng, Z., Cao, J., Lv, Z., Benediktsson, J.A., 2019. Spatial–Spectral Feature Fusion Coupled with Multi-Scale Segmentation Voting Decision for Detecting Land Cover Change with VHR Remote Sensing Images. *Remote Sensing* 11(16), 2-22. <https://doi.org/10.3390/rs11161903>