



University of
Sistan and Baluchestan

Geography and Territorial Spatial Arrangement

Print ISSN: 2345 - 2277

Online ISSN: 2783 - 5278



Association of Geography
and Planning
of Border Areas of Iran

Identification of Promising Areas for Geothermal Energy Using Satellite Data in Sahand Region

Sayyad Asghari Saraskanroud ^{1✉}, Behrouz Faramarzi Ouri ²

1. Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Social Science, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

✉ E-mail: s.asghari@uma.ac.ir

2. Student in RS & GIS, Department of Physical Geography, Faculty of Social Science, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

E-mail: behrouz.faramarzi.ouri@gmail.com



How to Cite: Asghari Saraskanroud, S & Faramarzi Ouri, B. (2025). Identification of Promising Areas for Geothermal Energy Using Satellite Data in Sahand Region. *Geography and Territorial Spatial Arrangement*, 15 (55), 91-98.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22111/GAIJ.2025.50139.3240>

Article type:

Research Article

Received:

29/10/2024

Received in revised form:

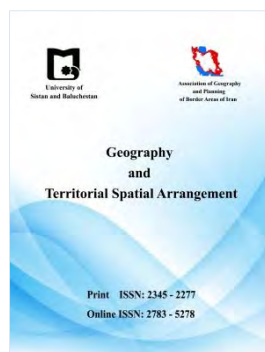
09/02/2025

Accepted:

08/03/2025

Publisher online:

11/03/2025



ABSTRACT

Areas with geothermal potential naturally have evidence on the ground surface that is used in geothermal energy exploration projects to initially locate these areas. The aim of this study is to identify surface geothermal areas by combining surface temperature and energy currents obtained from the SEBAL method using TIRS thermal data of Landsat 8 satellite in the Sahand region of East Azerbaijan province located in the northwest of Iran. For this purpose, one image of Landsat 8 data was used for September 25, 2022, then using single channel James-Sobrino algorithms and split window, the Land surface temperature map was estimated. Then estimated Land surface Temperature image with the thermal data of SLSTR sensor of the Sentinel 3 satellite (for pass time of the Landsat satellite) was validated using the analysis of the linear regression model in the TerrSet software environment, until in the process of identifying geothermal energy to be used. Next, using with Sebal Algorithm the amount of net surface radiation (R_n), net energy directed to the ground (G) and the amount of solar radiation absorbed by the Surface (R_{solar}) was estimated for minimized the effect of solar radiation on the land surface temperature. By combining the heat flows obtained from the Sebal algorithm and the Land surface temperature, the potential areas of geothermal energy were identified and determined. The final results of Maps showed that there are pixels in the study area that are prone to geothermal energy and the presence of natural hot springs in different cities of East Azerbaijan province, especially in the study area increases the probability of geothermal sources and this fact confirm that our study area have a high potential for exploration of geothermal Energy.

Keywords:

Geothermal energy, land surface temperature, Landsat 8, Sahand, Sebal, Thermal anomaly.



© the Author(s).

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

Extended Abstract

Introduction

Energy is one of the necessary things for economic and social development and improving the quality of life, and the existence of continuous, stable, and economical energy is necessary for economic development and growth (Soleimani and Abroumand Azar, 2014). In our country, the use of new energies is faced with obstacles such as the existence of cheap oil, rich hydrocarbon resources, insufficient knowledge of these energies, the unknown benefits of their use and lack of economic justification in initial investments (Shenavaei, 2008). In the meantime, geothermal energy is one of the main sources of new and environmentally friendly energy, if used properly and based on environmental parameters, plays an important role in the energy balance and sustainable development goals of the country (Mojarrad et al., 2019). In recent years, the use of new, low-cost, and fast methods such as remote sensing has always attracted the attention of experts, managers, and decision makers due to their ability to identify and explore phenomena compared to traditional methods (Alavipanah et al., 2011). This issue, shows the importance of the topic chosen for the current research to identify areas prone to surface geothermal energy using remote sensing technology (The method proposed by Emami and Jafari, 2018).

Study Area

The study area spanning approximately 6566 square kilometers. where includes the area around Sahand mountain located in East Azerbaijan province. It is located between 45 degrees 59 minutes to 46 degrees 53 minutes east and latitude 38 degrees 03 minutes to 37 degrees 19 minutes north. The highest elevation within the study area pertains to the peak named Gochgholi (Kamal), reaching an elevation of 3707 meters. and is in Bostanabad city.

Material and Methods

In this research, the day image of OLI and TIRS sensor of Landsat 8 satellite was used to identify areas with geothermal energy potential. Also, ENVI software was used as the main image processing software, SNAP software was used for initial processing, geometric correction and preparation of sentinel 3 images for use in additional software. TerrSet software was used to validate the Land surface temperature and ArcGIS software was used to prepare the output map.

For detection of thermal anomalies caused by geothermal sources, first the image of the LST was calculated as the temperature estimated at the time of satellite image acquisition using James-Sobrino single-band and split-window algorithms and then validated. Then, to remove or minimized effect of absorption and solar radiation from the estimated temperature, the modified thermal model was defined by combining the heat flux obtained from the Sebal method with surface thermal maps (Eq.1). Because the goal was to determine areas prone to geothermal energy, it was tried to minimize the effect of heat and absorption fluxes caused by sunlight in determining these areas, so that the surface thermal anomaly is only caused by the interactions of the heat inside the earth.

1. $(LST > 40^{\circ}\text{C}) \ \& \ (RN < \text{Mean}) \ \& \ (G < \text{Mean}) \ \& \ (R_{\text{solar}} < \text{Mean})$

Result and Discussion

The main goal of this research was to identify the potential areas of geothermal resources by combining the LST and the heat fluxes obtained from the Sebal algorithm. In the final maps obtained from the single-band algorithm and separate window, by comparing the minimum and maximum temperature values, a difference of 1.46 and 9.66 °C was observed, respectively. The primary factor contributing to this thermal disparity is the region's morphology and distinct features (Parhizkar et al, 2020). To check the accuracy of the land surface temperature estimation algorithms, regression model analysis showed the values of R² and correlation coefficient in the single-band algorithm to 0.28 and 0.74 respectively and for the split-window algorithm 0.49 and 0.49, respectively, these values indicate a positive relationship and close alignment between these datasets. Also, the examination of the average absolute error and root mean square error showed the lowest error of 7.45 and 7.71 degrees in the split window method.

To evaluate the accuracy of the algorithms for estimating the land surface temperature, regression analysis and correlation coefficient between the estimated surface temperature and the surface temperature of Sentinel-3 were used. In this analysis, the surface temperature of Sentinel-3 satellite was introduced as an independent variable and the estimated surface temperature using single-band algorithm and a separate window were introduced as the dependent variable in TerrSet software. The results of this analysis estimated the correlation coefficient between the estimated surface temperature based on the meteorological data of the synoptic stations

of the cities located in the study area and the surface temperature obtained from the thermal sensor of the Sentinel-3 satellite for the transit time of the Landsat satellite is 0.67, which indicates a positive relationship and close agreement between these data.

Theoretically, the areas with higher temperature above 40°C It was considered as areas where it was possible to identify geothermal resources in those areas. Then, by combining the were balanced thermal model with the LST map, the heat change factors from one pixel to another were modeled, that on the one hand, topographical and atmospheric corrections were considered in these pixels, and on the other hand, the resulting thermal model was balanced by calculating the heat fluxes obtained from the Sebal algorithm.

For example, if a pixel has the maximum surface temperature, but the effective elements of the Sebal algorithm have minimum values in that pixel, that pixel is considered a prone pixel for geothermal energy is detected, and vice versa. By identifying all the geothermal prone pixels, the thermal anomaly map of the studied area was prepared and this map was analyzed and evaluated.

Conclusion

According to the final maps, it can be said that considering the minimum amount of heat flows obtained from Sabal algorithm in calculating the modified thermal model reduced the effect of factors other than geothermal sources on the identification of geothermal potential pixels. Accordingly, due to the importance of land surface temperature in identifying thermal anomalies caused by geothermal resources, pixels have been identified scattered in different parts of the study area, near which there are hot springs.

This research is considered the first stage of geothermal resource exploration. Therefore, to achieve the final goal, it can be the beginning of further studies on the high potential areas. To increase the confidence factor in identifying areas prone to geothermal energy, it is necessary to combine the results of this research with other layers of information such as geophysics, geology and geochemistry and examine them in future studies. In future studies on comparative exploration of geothermal energy prone areas, the results of this research can be used to limit the studied areas.

Key words: Geothermal energy, land surface temperature, Landsat 8, Sahand, Sebal, Thermal anomaly.

References

- Abedini, M., Ghale, E., Aghazadeh, N., & Mohamadzadeh Shishegaran, M, 2021, Monitoring the surface temperature and studying the land use relationship with surface temperature using oli and tm image sensors (Case Study: Meshginshahr City), Journal of Applied Researches In Geographical Sciences, 22(67): 375-393. (in Persian)
<http://dx.doi.org/10.52547/jgs.22.67.375>
- Ahamzeh, S., Mijani, N., & Karimi Firozjaei, M, 2018, Modeling the Relationship between Land Surface Temperature, Topography and Vegetation Cover Using Landsat 8 Satellite Imagery. Physical Geography Research, 50(1): 35-55. (in Persian)
<https://doi.org/10.22059/jphgr.2018.215259.1006930>
- Ahmadizadeh, S.S.R., Arasteh, F., Fanaee Kheirabad Gh. A., & Ashrafi, A, 2015, Detection of geothermal potentials using thermal remote sensing in south khorasan, Environmental Researches, 5(10): 135. (in Persian)
<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20089597.1393.5.10.12.7>
- Akbari, E., Bahrami, SH., Doran, A., & Ebrahimi, M, 2017, The Effect of some Geographical Parameters on the Land Surface Temperature by Using SEBAL and Decision Tree Methods in Taftan Volcanic Cone, Geographic Space, 17(57): 105-126. (in Persian)
<http://geographical-space.iau-ahar.ac.ir/article-1-1821-fa.html>
- Alavipanah, S.K., Goodarzi Mehr, S., & Khakba, B, 2012, Thermal remote sensing technology and its application to phenomena identification, Science Cultivation Journal, 2(1): 25. (in Persian)
https://www.sciencecultivation.ir/article_242567.html
- Arvin, A, 2019, Land Surface Temperature Detection Using of Satellite Images. Journal of Natural Environmental Hazards, 8(19): 91-102. (in Persian)
<https://doi.org/10.22111/jneh.2017.20855.1284>

Atmospheric correction module: Quac and flaash user's guide, 2009, ITT Visual Information Solutions, powered by idl, Version(4.7).

https://www.nv5geospatialsoftware.com/portals/0/pdfs/envi/flaash_module.pdf

Bastiaanssen, W. G., Pelgrum, H., Wang, J., Ma, Y., Moreno, J. F., Roerink, G. J., & Van der Wal, T, 1998, A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): Part 2: Validation. Journal of hydrology, (212): 213-229.

[https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00254-6](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00254-6)

Cook, M., Schott, J. R., Mandel, J., & Raqueno, N, 2014, Development of an operational calibration methodology for the Landsat thermal data archive and initial testing of the atmospheric compensation component of a Land Surface Temperature (LST) Product from the archive. Remote Sensing, 6(11): 11244-11266.

<https://doi.org/10.3390/rs6111244>

Coolbaugh, M. F., Kratt, C., Fallacaro, A., Calvin, W. M., & Taranik, J. V, 2007, Detection of geothermal anomalies using advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) thermal infrared images at Bradys Hot Springs, Nevada, USA. Remote Sensing of Environment, 106(3): 350-359.

<https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.09.001>

Darvishi, Sh., Rashidpour, M., & Solaimani, K, 2018, Impact of Urban Surface Characteristics On Spatiotemporal Patterns Of Surface Temperature (Case Study: Sanandaj City), MSc Thesis, Faculty Of Environmental Sciences, Haraz, Amol. (in Persian)

<https://civilica.com/doc/871680/>

Dash, P., Göttsche, F.M., Olesen, F.S. and Fischer, H. 2001. Retrieval of land surface temperature and emissivity from satellite data: physics, theoretical limitations and current methods. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 29: 23-30.

<https://doi.org/10.1007/BF02989910>

Du, C., Ren, H., Qin, Q., Meng, J., & Li, J, 2014, Split-window algorithm for estimating land surface temperature from Landsat 8 TIRS data. In 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, 3578-3581.

<https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6947256>

Du, C., Ren, H., Qin, Q., Meng, J., & Zhao, S, 2015, A practical split-window algorithm for estimating land surface temperature from Landsat 8 data. Remote sensing, 7(1): 647-665.

<https://doi.org/10.3390/rs70100647>

Ebrahimi Heravi, B., Rangzan, K., Riahi Bakhtiari H. R., & Taghi Zadeh, A, 2016, Introducing the most appropriate method to extract land surface temperature using landsat 8 satellite images in karaj metropolitan, Iranian Journal Of Remote Sensing & Gis, 8(3): 59-76. (in Persian)

https://gisj.sbu.ac.ir/article_96139.html

Emami, H., & Jafari, A, 2018, Shadow geothermal energy detection using integrating of temperature anomalies and sebal algorithm, Journal of Geomatics Science and Technology, 7(4): 25-44. (in Persian)

<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.2322102.1397.7.4.2.2>

Eneva, M., Coolbaugh, M., & Combs, J, 2006, Application of satellite thermal infrared imagery to geothermal exploration in east central California. GRC Transactions, (30): 407-412.

<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:130523869>

Feizizadeh, B., Didehban, Kh., & Gholamnia, Kh, 2016, Extraction of land surface temperature (LST) based on landsat satellite images and split window algorithm study area: mahabad catchment, Journal of Geographical Data (SEPEHR), 25(98):171-181. (in Persian)

<https://doi.org/10.22131/sepehr.2016.22145>

García-Haro, F. J., Camacho-de Coca, F., Meliá, J., & Martínez, B, 2005, Operational derivation of vegetation products in the framework of the LSA SAF project. In Proceedings of 2005 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, Dubrovnik, Croatia, 19-23.

<https://www.researchgate.net/publication/229022280>

Haselwimmer, C., & Prakash, A, 2013, Thermal infrared remote sensing of geothermal systems. In Thermal infrared remote sensing: sensors, methods, applications Dordrecht: Springer Netherlands, 453-473.

https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-6639-6_22

Isaya Ndossi, M., & Avdan, U, 2016, Application of open-source coding technologies in the production of land surface temperature (LST) maps from Landsat: A PyQGIS plugin. Remote sensing, 8(5): 413.

<https://doi.org/10.3390/rs8050413>

Jiménez-Muñoz, J. C., & Sobrino, J. A, 2008, Split-window coefficients for land surface temperature retrieval from low-resolution thermal infrared sensors. IEEE geoscience and remote sensing letters, 5(4):806-809.

<http://dx.doi.org/10.1109/LGRS.2008.2001636>

Jimenez-Munoz, J. C., Sobrino, J. A., Skoković, D., Mattar, C., & Cristobal, J, 2014, Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data. IEEE Geoscience and remote sensing letters, 11(10): 1840-1843.

<https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2312032>

Keynejhad, S., Fathianpour, N., & Irannejhad, M.R, 2011, Investigating the potential of geothermal resources in east azerbaijan using geological and exploration data. Dissertation For Master's Degree in Mining Exploration, Faculty Of Mining Engineering, Isfahan University Of Technology, Iran. (*in Persian*)

<https://www.virascience.com/thesis/532074/>

Kiavarzmoghadam, M., Samadzadegan, F., Noorollahi, Y., & Sharifi, M.A, 2015, Identification of thermal anomaly points on the earth's surface with the aim of exploring geothermal resources. National Geomatics Conference, (22). (*in Persian*)

<https://sid.ir/paper/893047/fa>

Kogan, F, 1993, United States droughts of late 1980's as seen by NOAA polar orbiting satellites. In Proceedings of IGARSS'93-IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE, 197-199.

<https://doi.org/10.1109/IGARSS.1993.322522>

Lee, K., 1978, Analysis of thermal infrared imagery of the Black Rock Desert geothermal area, Colorado School of Mines Quarterly, 4 (2): 31-44.

<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:130181817>

Li, Z.L.; Tang, B-H.; Wu, H.; Ren, H.; Yan, G.; Wan, Z.; Trigo, I.F. and Sobrino, J.A. (2013). Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives, Remote Sensing of Environment, 131: 14-37.

<https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.12.008>

LU, S. L., SHEN, X. H., ZOU, L. J., ZHANG, G. F., WU, W. Y., LI, C. J., & MAO, Y. J, 2008, Remote sensing image enhancement method of the fault thermal information based on scale analysis: A case study of Jiangshan- Shaoxing Fault between Jinhua and Quzhou of Zhejiang Province, China. Chinese Journal of Geophysics, 51(5): 1048-1058.

<http://dx.doi.org/10.1002/cjg2.1299>

Maleki, M., Ahmadi, Z., & Dousti, R, 2019, Land surface temperature changes in during 1393-1397 periods, Journal of Geography and Human Relations, 2(3): 309-319. (*in Persian*)

<https://www.magiran.com/p1452921>

McMillin, L. M., 1975, Estimation of sea surface temperatures from two infrared window measurements with different absorption. *Journal of geophysical research*, 80(36): 5113-5117.

<https://doi.org/10.1029/JC080i036p05113>

Melesse, A. M., & Nangia, V., 2005, Estimation of spatially distributed surface energy fluxes using remotely- sensed data for agricultural fields. *Hydrological Processes: An International Journal*, 19(14): 2653-2670.

<https://doi.org/10.1002/hyp.5779>

Mojarad, S., Aghajani, H., & Nejati, A., 2019, Thermal remote sensing studies and comparison with aeromagnetic studies in the northern sabalan to sarab area in order to potential geothermal energy promising areas, *Journal of Analytical and Numerical Methods In Mining Engineering*, 9(20): 67-80. (*in Persian*)

https://anm.yazd.ac.ir/article_1626.html

Motahhar, S., 2016, Renewable energy education in Iran. *Iranian Journal of Engineering Education*, 18(69): 77-90.

<https://doi.org/10.22047/ijee.2016.14608>

Ou, X., Jin, Z., Wang, L., Xu, H. J., & Jin, S. Y., 2004, Thermal conductivity and its anisotropy of rocks from the depth of 100 similar to 2000m mainhole of Chinese Continental Scientific Drilling: Revelations to the study on thermal structure of subduction zone. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 109-118.

<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:130002059>

Parhizcar Isalu, R., Valizadeh Kamran, Kh., & Faizizadeh, B., 2020 Determining the best algorithm to calculate land surface temperature with the aim of identifying geothermal areas - case study: meshkinshahr county, *Journal of Geographical Data (SEPEHR)*, 29(114): 79-98. (*in Persian*)

<https://doi.org/10.22131/sepehr.2020.44583>

Peng, F., Xiong, Y. Z., Cheng, Y. X., Fan, Q. C., & Huang, S. P., 2013, Towards Application of remote sensing technology in geothermal prospecting in Xilingol in eastern Inner Mongolia, NE China. *Advanced Materials Research*, (610): 3628-3631.

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.610-613.3628>

Qin, Z., & Karnieli, A., 1999, Progress in the remote sensing of land surface temperature and ground emissivity using NOAA-AVHRR data. *International journal of remote sensing*, 20(12): 2367-2393.

<https://doi.org/10.1080/014311699212074>

Rahimian, M. H., shayannejad, M., Eslamian, S., Jafari, R., Gheysari, M., & Taghvaeian, S., 2017, Evaluation of different LST approaches for determination of pistachio tree canopy temperature through Landsat 8 satellite data, 5(2): 79-98. (*in Persian*)

<http://dx.doi.org/10.29252/jgit.5.2.79>

Richter, R., & Schläpfer, D., 2013, Atmospheric/Topographic Correction for Satellite Imagery (ATCOR-2/3 UserGuide, Version 8.3. 1, February 2014), 2-238.

https://www.academia.edu/download/34690612/atcor3_manual_2013.pdf

Rongali, G., Keshari, A. K., Gosain, A. K., & Khosa, R., 2018, Split-window algorithm for retrieval of land surface temperature using Landsat 8 thermal infrared data. *Journal of Geovisualization and Spatial Analysis*, (2): 1-19.

<https://doi.org/10.1007/s41651-018-0021-y>

Rozenstein, O., Qin, Z., Derimian, Y., & Karnieli, A., 2014, Derivation of land surface temperature for Landsat-8 TIRS using a split window algorithm. *Sensors*, 14(4): 5768-5780.

<https://doi.org/10.3390/s140405768>

Sanyal, S. K., 2018, Sustainability and renewability of geothermal power capacity. In: L.Y. Bronicki (Eds), *Geology and Hydrology of Geothermal Energy*, Springer, New York, N, 47-60.

http://repository.usgin.org/sites/default/files/dlio/files/2011/u19/sustainability_renewability_of_geothermal_power_capacity.pdf

Sheikhzadeh, S., & Jafari, H, 2009, Using geothermal energy to reach a sustainable city, International Research Conference on Science and Technology, (3). *(in Persian)*

<https://sid.ir/paper/856891/fa>

Shenavaei, H, 2006, Renewable energies (with a special look at hydroelectric energy), Journal of Energy Economics Reviews, (7): 75-92. *(in Persian)*

<http://noo.rs/RdTzw>

Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., & Paolini, L, 2004, Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. Remote Sensing of environment, 90(4): 434-440.

<https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.02.003>

Sobrino, J. A., Jiménez- Muñoz, J. C., Sòria, G., Gómez, M., Ortiz, A. B., Romaguera, M., ... & Libonati, R, 2008, Thermal remote sensing in the framework of the SEN2FLEX project: field measurements, airborne data and applications. International Journal of Remote Sensing, 29(17-18): 4961-4991.

<https://doi.org/10.1080/01431160802036516>

Sobrino, J. A., Li, Z. L., Stoll, M. P., & Becker, F, 1997, Multi-channel and multi-angle algorithms for estimating sea and land surface temperature with ATSR data. Oceanographic Literature Review, 2(44): 162-163.

<https://doi.org/10.1080/01431169608948760>

Soleimani, A., & Abroumand Azar, P, 2015, Review of renewable energies and their environmental effects in iran, International Conference on Research In Science and Technology, (1). *(in Persian)*

<https://civilica.com/doc/446754/>

Xiao, J., & Moody, A. (2005). A comparison of methods for estimating fractional green vegetation cover within a desert-to-upland transition zone in central New Mexico, USA. Remote sensing of environment, 98(2-3), 237-250.

<https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.07.011>

Yamaguchi Y., Hase H., Ogawa K, 1992, Remote sensing for geothermal applications. Episodes Journal of International Geoscience.15(1): 62-7.

<https://doi.org/10.18814/epiiugs/1992/v15i1/010>



شناسایی مناطق امیدبخش برای انرژی زمین گرمایی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در منطقه سهند

صیاد اصغری سراسکانرود^{۱*}، بهروز فرامرزی عوری^۲

مقاله پژوهشی

چکیده

مناطق دارای پتانسیل زمین گرمایی به‌طور طبیعی دارای شواهدی در سطح زمین هستند که در پروژه‌های اکتشاف انرژی زمین گرمایی برای مکان‌یابی اولیه آن‌ها استفاده می‌شود. هدف این پژوهش شناسایی مناطق مستعد زمین گرمایی سطحی با ترکیب دمای سطح و جریان‌های انرژی حاصل از روش «سبال» با استفاده از داده‌های حرارتی سنجنده «TIRS» ماهواره لندست ۸ در منطقه سهند استان آذربایجان شرقی واقع در شمال غرب کشور می‌باشد. برای این منظور، یک تصویر از داده‌های لندست ۸ به تاریخ ۲۵ سپتامبر ۲۰۲۲ مورد استفاده قرار گرفت و با استفاده از الگوریتم‌های تک‌باندی «جیمز-سوبرینو» و پنجره مجزا، نقشه دمای مشاهداتی سطح زمین به‌دست آمد. سپس تصویر حرارتی برآورده شده با استفاده از داده حرارتی سنجنده «SLSTR» ماهواره سنتینل ۳ (آخذ شده برای زمان گذر ماهواره‌های لندست از منطقه مورد مطالعه) با استفاده از تحلیل مدل رگرسیون خطی در محیط نرم‌افزار «TerrSet» اعتبارسنجی شد تا در ادامه فرآیند شناسایی منابع زمین گرمایی مورد استفاده قرار گیرد. در ادامه با استفاده از الگوریتم توازن انرژی در سطح زمین (سبال) مقدار تشعشعات خالص دریافتی توسط سطح زمین (Rn)، انرژی خالص هدایت شده به زمین (G) و مقدار تابش جذب شده خورشیدی توسط سطح (Rsolar)، محاسبه گردید تا اثر تشعشعات خورشیدی از روی دمای مشاهداتی سطح به حداقل ممکن برسد. با ترکیب جریان‌های گرمایی حاصل از الگوریتم «سبال» با دمای مشاهداتی سطح، مناطق مستعد انرژی زمین گرمایی شناسایی و تعیین گردیدند. نتایج حاصل از نقشه نهایی نشان داد که پیکسل‌هایی در منطقه مورد مطالعه هستند که مستعد انرژی زمین گرمایی می‌باشند و وجود چشمه‌های آب گرم طبیعی در شهرهای مختلف استان آذربایجان شرقی به‌خصوص منطقه مورد مطالعه، احتمال وجود منابع زمین گرمایی را افزایش داده و تأییدگر این مطلب می‌باشد که منطقه مورد مطالعه دارای پتانسیل انرژی زمین گرمایی جهت اکتشاف منابع زمین گرمایی برخوردار است.

جغرافیا و آمایش شهری- منطقه‌ای
تابستان ۱۴۰۴، سال ۱۵، شماره ۵۵
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۰۸
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۲۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۸
انتشار آنلاین: ۱۴۰۳/۱۲/۲۱
صفحات: ۹۱-۱۳۰



واژه‌های کلیدی:
آنومالی حرارتی، انرژی زمین گرمایی، توازن انرژی در سطح زمین، دمای سطح زمین، سهند، لندست ۸.

مقدمه

انرژی از موارد ضروری برای توسعه اقتصادی، اجتماعی و ارتقای کیفیت زندگی است و وجود انرژی مستمر، پایدار و اقتصادی لازمه توسعه و رشد اقتصادی می‌باشد (سلیمانی و آبرومندآذر، ۱۳۹۴). در این میان، انرژی زمین گرمایی یکی از منابع عمده انرژی‌های نو و سازگار با محیط زیست است که در صورت بهره‌برداری صحیح و مبتنی بر پارامترهای محیط زیستی، نقش مهمی در موازنه انرژی کشور و اهداف توسعه پایدار ایفا می‌کند (مجرد و همکاران، ۱۳۹۸: ۸۰-۶۷). تحقیقات انجام شده بر روی این انرژی نشان می‌دهد که پتانسیل آن را دارد که بخش اعظم انرژی

۱- استاد، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. (نویسنده مسئول) s.asghari@uma.ac.ir
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. behrouz.faramarzi.ouri@gmail.com

مورد نیاز بشر را به صورت پایدار و بدون آلودگی‌های زیست‌محیطی تأمین کند (سانیل، ۱، ۲۰۱۸: ۶۰-۴۷). با توجه به این که محل احداث واحدهای تولید برق زمین‌گرایی دوردست و صعب‌العبور می‌باشند، هزینه ساخت و تولید برق در این واحدها، اصلی‌ترین عامل تأثیرگذار در زمینه ساخت نیروگاه‌های زمین‌گرایی است. ارقام ارائه‌شده در مورد قیمت برق تولیدی در این واحدها با در نظر گرفتن ۳۰ سال عمر مفید و عدم استفاده از سوخت، محاسبه می‌شوند. هزینه واقعی ساخت نیروگاه‌های زمین‌گرایی بیش از ۱۶۰۰ دلار به ازای هر کیلووات ساعت توان نیروگاه است. انرژی زمین‌گرایی برخلاف سایر انرژی‌های تجدیدپذیر (مثل: انرژی خورشیدی، بادی، امواج و غیره) منشأ یک انرژی پایدار به شمار می‌آید. چنان که به طور مداوم و به صورت ۲۴ ساعت در روز و ۳۶۵ روز در سال، می‌توان با بار کامل، از آن برق یا انرژی حرارتی تولید کرد. این در حالی است که سایر انرژی‌های نوفصلی وابسته به زمان و شرایط خاصی هستند (شنوایی، ۱۳۸۷: ۲۵). ایران از جمله کشورهایی است که به علت قرار گرفتن در کمربند آتش‌فشان و زلزله دارای منابع مهم و پتانسیل زمین‌گرایی نسبتاً بالایی است (امامی و جعفری، ۱۳۹۷: ۴۴-۲۵). در کشور ما به کارگیری انرژی‌های نو با موانعی همچون: وجود نفت ارزان و منابع غنی هیدروکربنی، عدم شناخت کافی این انرژی‌ها و مجهول ماندن مزایای استفاده از آن توسط مردم و مسئولان و عدم توجیه اقتصادی در سرمایه‌گذاری‌های اولیه روبه‌روست چرا که انرژی‌های تجدیدپذیر در مقایسه با سوخت‌های فسیلی از هزینه بهره‌برداری پایین‌تر و هزینه‌های سرمایه‌گذاری بالاتری برخوردارند (شنوایی، ۱۳۸۷: ۲۳). طبق چشم‌انداز بیست‌ساله جمهوری اسلامی ایران، تا سال ۱۴۰۴ باید ۱۰ درصد برق مورد نیاز از انرژی‌های تجدیدپذیر تأمین شود (مطهر و عالم‌رجبی، ۲، ۲۰۱۶: ۹۰-۷۷). در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های نوین، کم‌هزینه و سریع مانند فناوری سنجش‌ازدور، به علت توانایی در شناسایی و اکتشاف پدیده‌ها نسبت به روش‌های سنتی همواره مورد توجه متخصصین، مدیران و تصمیم‌گیران بوده است (علوی‌پناه و همکاران، ۱۳۹۰: ۲۵). در مطالعات مربوط به جستجوی منابع زمین‌گرایی، از فناوری سنجش‌ازدور به منظور شناسایی آنومالی‌های حرارتی، گسل و شکستگی‌ها، نقاط آتش‌فشانی و نواحی دگرسانی استفاده می‌شود (یاماگوچی و همکاران، ۳، ۱۹۹۲: ۶۲-۷). این رویکرد، چندین سال است که به عنوان یک ابزار مفید و با ارزش برای شناسایی مناطق مستعد انرژی زمین‌گرایی در مناطق مختلف استفاده می‌شود که امکان انتخاب مناسب‌ترین مناطق را برای اکتشاف تفصیلی با استفاده از پیمایش‌های زمینی هزینه‌بر فراهم آورده است (هاسیمر و پراکاش، ۴، ۲۰۱۳: ۴۷۳-۴۵۳). مطالب فوق، اهمیت موضوع انتخاب‌شده برای پژوهش حاضر جهت شناسایی مناطق مستعد زمین‌گرایی سطحی با استفاده از فناوری سنجش‌ازدور را بیشتر آشکار می‌سازد.

در ایران از سال ۱۳۴۵ مطالعات گسترده‌ای به منظور شناسایی پتانسیل‌های منابع انرژی زمین‌گرایی توسط وزارت نیرو با همکاری مهندسین مشاور ایتالیایی ۵ در نواحی شمال و شمال غرب ایران در محدوده‌ای به وسعت ۲۶۰ هزار کیلومتر مربع آغاز گردید. نتیجه این تحقیقات مشخص نمود که مناطق سبلان، دماوند، خوی، ماکو و سهند با مساحتی بالغ بر ۳۱ هزار کیلومتر مربع جهت انجام مطالعات تکمیلی و بهره‌برداری از انرژی زمین‌گرایی مناسب می‌باشند (شیخ‌زاده و جعفری، ۱۳۹۵).

1- Sanyal

2- Motahhar & Alemrajabi

3- Yamaguchi et al

4- Haselwimmer & Prakash

5- Ente Nazionale per l'energia Elettrica (E.N.EL)

لی (۱۹۷۸) با استفاده از سنجش از دور حرارتی، ناهنجاری‌های حرارتی را در منطقه صحرای «بلک راک» نوادا مشخص کرد. یاماگوچی و همکاران (۱۹۹۲) نقش سنجش از دور برای کاربردهای زمین‌گرایی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که سنجش از دور می‌تواند در مطالعات و اکتشافات انرژی زمین‌گرایی با شناسایی ناهنجاری حرارتی سطح زمین با استفاده از تصاویر مادون قرمز حرارتی، نقشه‌برداری خطواره‌هایی که مسیرهایی برای عبور سیالات زمین‌گرایی هستند و مشخص کردن مناطق دگرسان شده گرمایی با استفاده از الگوهای طیفی در بخش‌های مادون قرمز با طول موج کوتاه، سهمی داشته باشد. انوا و همکاران (۲۰۰۶) با استفاده از تصاویر مادون قرمز حرارتی ماهواره «استر» در شرق کالیفرنیا به اکتشاف منابع زمین‌گرایی در این منطقه پرداختند. آن‌ها سعی نمودند اثرات ناشی از توپوگرافی و آلبیدو^۳ را بر حرارت اصلاح نمایند و عنوان کردند که حذف این اثرات می‌تواند خطاها را کاهش داده و ناهنجاری‌های حرارتی که ضعیف هستند و یا در تصاویر قابل تشخیص نیستند را آشکار سازد. کولبو و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از تصاویر مادون قرمز حرارتی سنجنده «استر» در چشمه‌های آب گرم نوادا، به شناسایی ناهنجاری‌های دمای سطح زمین در ارتباط با منابع زمین‌گرایی پرداختند. آن‌ها تغییرات درجه حرارت سطحی را با توجه به «آلبیدو» اصلاح شده با باندهای مرئی و مادون قرمز حرارتی نزدیک «استر» و همچنین استفاده از مدل ارتفاعی رقومی ۱۰ متر به منظور اعمال تأثیر توپوگرافی، به‌دست آوردند. لو و همکاران (۲۰۰۸) برای شناسایی ناهنجاری‌های حرارتی وابسته به گسل‌ها از تصاویر حرارتی «ETM+» استفاده کردند. آن‌ها مناطقی را که درجه حرارت بالاتری نسبت به محیط اطراف داشتند، به‌عنوان ناهنجاری‌های حرارتی معرفی کردند. در این تحقیق دمای بالاتر از ۴ تا ۱۰ کلوین نسبت به پس‌زمین به‌عنوان «آنومالی حرارتی» شناخته شد و نشان داده شد که محل این «آنومالی‌ها» منطبق بر فعالیت گسل‌ها بود. پنگ و همکاران (۲۰۱۳) نیز از روش مشابهی در منطقه‌ای در شمال شرقی چین استفاده کردند با این تفاوت که از حد آستانه ۳۵ درجه سانتی‌گراد برای شناسایی «آنومالی حرارتی» استفاده کردند.

کی‌نژاد (۱۳۹۰) با بیان این موضوع که استان آذربایجان شرقی به‌خاطر وجود قله آتشفشانی جوان و سایر شواهد اکتشافی، به‌عنوان یکی از مناطق دارای پتانسیل زمین‌گرایی در کشور شناخته شده، به بررسی پتانسیل منابع زمین‌گرایی در این منطقه پرداخته‌اند. احمدی‌زاده و همکاران (۱۳۹۳) با استفاده از سنجش از دور حرارتی، به شناسایی و اکتشاف مناطق زمین‌گرایی در خراسان جنوبی پرداختند. آن‌ها جهت شناسایی دقیق مناطق مستعد زمین‌گرایی، نقشه ناهنجاری‌های دمای سطح زمین را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و تکنیک سنجش از دور تهیه‌نموده و به این نتیجه رسیدند که استان خراسان جنوبی از سطح مناسب و مستعدی برای تولید انرژی زمین‌گرایی برخوردار است. امامی و جعفری (۱۳۹۷) در پژوهش خود جهت شناسایی مناطق مستعد زمین‌گرایی سطحی با استفاده از سنجش از دور در شمال غرب کشور، نقشه مشاهداتی دمای سطح حاصل از سنجنده «TIRS»^۷ ماهواره لندست ۸ را با جریان‌های گرمایی و حرارتی حاصل از الگوریتم «سبال» ترکیب کردند تا تأثیرات حرارتی ناشی از نور

1- Lee

2- Eneva et al

3- Albedo

4- Coolbaugh et al

5- Lu et al

6- Peng et al

7- Thermal Infra-Red Sensor (TIRS)

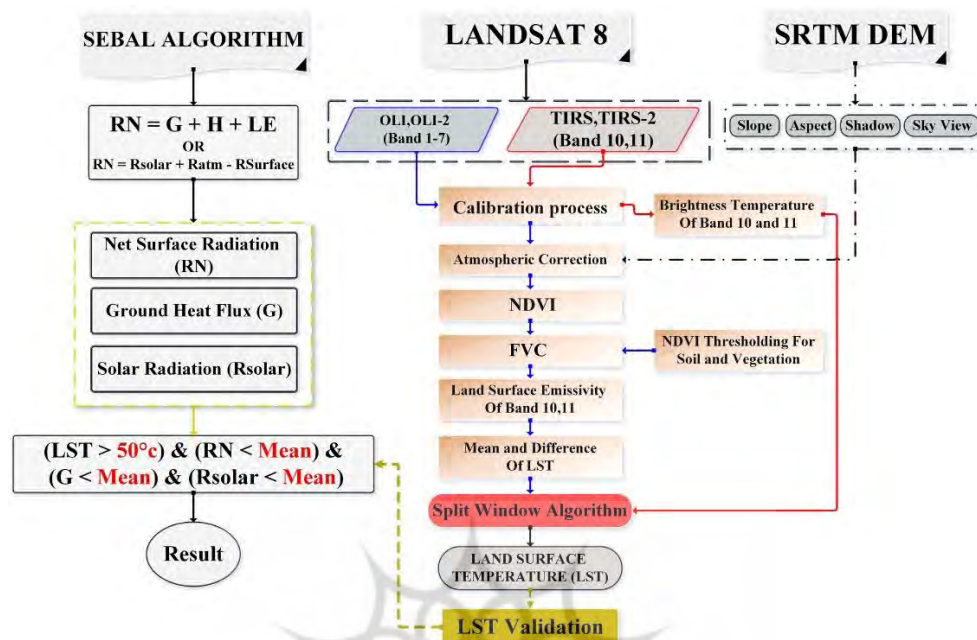
خورشید را در دمای مشاهداتی مدل سازی کرده و اثرات آن را به حداقل برسانند. بر این اساس مناطق نهایی که مستعد وجود منابع زمین گرمایی بود، شناسایی و تعیین گردید. با توجه به بررسی مطالعات انجام شده در زمینه شناسایی مناطق دارای پتانسیل انرژی زمین گرمایی و لزوم توجه به انرژی های نو به جای انرژی های تجدیدناپذیر جهت تأمین و مدیریت پایدار منابع انرژی در سطوح مختلف برنامه ریزی به خصوص در کشور در حال توسعه خودمان، اهمیت مطالعاتی که از روش های نوین در شناسایی این نوع انرژی استفاده می کنند بیش از پیش ضرورت پیدا می کند؛ لذا در پژوهش حاضر با تأکید بر این موضوع، از تکنیک های سنجش از دور حرارتی جهت شناسایی مناطق مستعد زمین گرمایی سطحی با ترکیب دمای مشاهداتی سطح و جریان های گرمایی و حرارتی حاصل از الگوریتم توازن انرژی در سطح زمین (سبال) (روش پیشنهادی امامی و جعفری، ۱۳۹۷)، استفاده شد.

موارد و روش ها

روش تحقیق

با توجه به مطالعات پیشین در زمینه شناسایی منابع زمین گرمایی در شمال غرب کشور به خصوص استان آذربایجان شرقی، در این پژوهش نیز از جریان های گرمایی و حرارتی حاصل از الگوریتم توازن انرژی در سطح زمین (سبال) استفاده شده است. روش پیشنهادی از شش مرحله اصلی تشکیل شده است: در مرحله اول داده های تحقیق پیش پردازش شده و تصحیح توپوگرافی و اتمسفری بر روی آن ها انجام گرفت. برای انجام تصحیح توپوگرافی و اتمسفری با استفاده از افزونه «ATCOR2/3» (پایه سازی شده در نرم افزار «ERDAS IMAGINE 2014» که از پایگاه داده مدل های انتقال تابشی MODTRAN-5 استفاده می کند)، از مدل رقومی ارتفاعی سنجنده SRTM ۱ استفاده شد و مشتقات لازم نظیر شیب ۲، جهت شیب ۳، سایه ۴ و نمای آسمان ۵ استخراج و استفاده گردید. در مرحله دوم نقشه دمای سطح زمین با استفاده از الگوریتم های پنجره مجزا ۶ و تکباندی ۷ استخراج گردید. در مرحله سوم دمای حاصل از الگوریتم های مذکور به دمای هوا تبدیل، سپس دمای هوای پیکسل متناظر ایستگاه سینوپتیک شهرهای منطقه مورد مطالعه با دمای هوای مربوط به زمان گذر ماهواره با استفاده از تحلیل مدل رگرسیون (R2) و ضریب همبستگی) و شاخص های آماری جذر میانگین مربع خطا (RMSE) و متوسط خطای مطلق (MAE) اعتبارسنجی شدند، سپس نقشه آنومالی حرارتی سطح زمین تعیین گردید. در مرحله چهارم، با استفاده از الگوریتم توازن انرژی در سطح زمین (سبال) مقدار تشعشعات خالص دریافتی توسط سطح زمین (RN)، مقدار جریان گرمایی مابین لایه های مختلف خاک (G) و مقدار تابش جذب شده خورشیدی توسط سطح (Rsolar) محاسبه گردید. در مرحله پنجم، ارزیابی و ترکیب این لایه های اطلاعاتی با نقشه های آنومالی حرارتی انجام گرفت و مناطق مستعد انرژی زمین گرمایی شناسایی و تعیین گردیدند و نهایتاً نتایج حاصل آنالیز و بررسی شد. در شکل ۱ فلوچارت فرآیند کلی پژوهش نشان داده شده است.

- 1- Shuttle Radar Topography Mission Digital Elevation Model
- 2- Slope
- 3- Aspect
- 4- Shadow
- 5- Sky View
- 6- Split Window
- 7- Single Channel



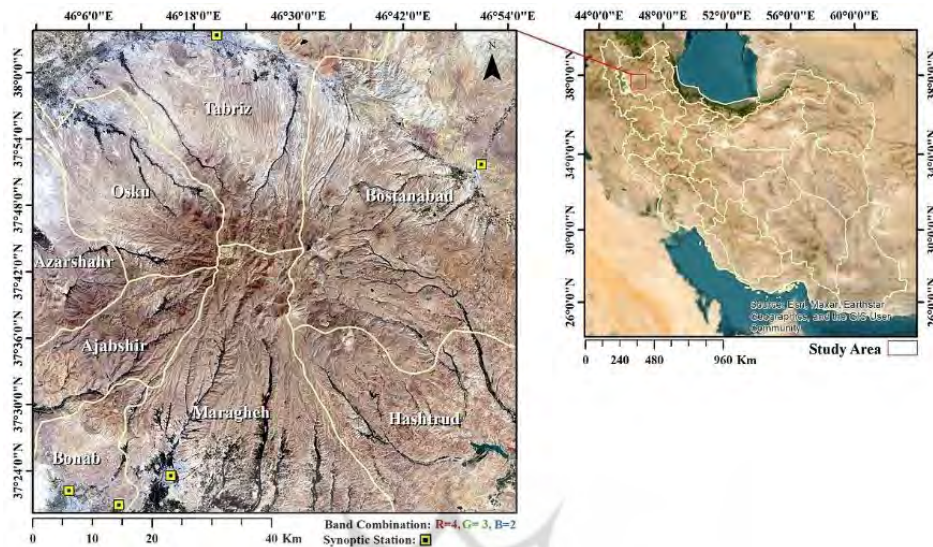
شکل ۱- فلوچارت فرآیند کلی پژوهش

(منبع: نگارندگان، ۱۴۰۳)

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، قسمتی از شمال غرب ایران است با وسعتی حدود ۶۵۶۶ کیلومتر مربع که دربرگیرنده قسمتی از استان آذربایجان شرقی شامل بخش‌هایی از شهرستان‌های تبریز، بستان‌آباد، اسکو، آذرشهر، عجبشیر، هشترود، مراغه و بناب می‌باشد.

شکل ۲) که در بین طول‌های جغرافیایی ۴۵ درجه و ۵۹ دقیقه تا ۴۶ درجه و ۵۳ دقیقه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۷ درجه و ۱۹ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۰۳ دقیقه شمالی واقع شده است. منطقه مورد مطالعه دارای هفت قله مشهور بالای سه هزار متری است که مشهورترین آن‌ها کوه سهند و مرتفع‌ترین آن‌ها قله کمال (قوچ گلی) به ارتفاع ۳۷۰۷ متر می‌باشد و در محدوده شهرستان بستان‌آباد قرار دارد. ارتفاع کوه سهند از سطح دریا ۳۶۹۵ است و مخروطی بسیار پهن و گسترده دارد که از توف‌ها و خاکسترهای فوران تشکیل شده و بر اثر آب‌های جاری دره‌های تنگی در آن‌ها ایجاد شده است (ملکی و همکاران، ۱۳۹۴: ۱۷-۱۲).



شکل ۲- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه
(منبع: نگارندگان، ۱۴۰۳)

داده‌های پژوهش و پیش‌پردازش آن‌ها داده‌های مورد نیاز در این پژوهش شامل:

داده‌های ماهواره‌ای (تصویر روز سنجنده OLI و TIRS ماهواره لندست ۸ مربوط به کالکشن دو، سطح یک که شامل تصحیحات هندسی نیز می‌باشد، همچنین مدل رقومی ارتفاعی^۱ (DEM) سنجنده SRTM^۲ به شماره اندکس-های N37E046V3، N37E045V3، N38E046V3، N38E045V3 با دقت ۳۰ متر (1arc)، این داده‌ها جهت پوشش منطقه مورد مطالعه به صورت موزاییک پردازش شدند، این تصاویر از سایت مربوط به سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده (<https://earthexplorer.usgs.gov>) به صورت رایگان دریافت شد. جدول ۱ مشخصات تصویر ماهواره‌ای استفاده شده در پژوهش حاضر را نشان می‌دهد.

جدول ۱- ویژگی‌های تصویر ماهواره‌ای مورد استفاده در این پژوهش

نام سنجنده	تاریخ دریافت تصویر		ساعت اخذ تصویر		باند	قدرت تفکیک مکانی (m)
	شمسی	میلادی	به وقت محلی	UTC		
OLI	۱۴۰۱/۰۶/۱۴	۲۰۲۲/۰۹/۰۵	۱۱:۰۲	۰۷:۳۲	۱ تا ۷	۳۰
TIRS					۱۱ و ۱۰	۱۰۰

(منبع: نگارندگان، ۱۴۰۳)

1- Digital Elevation Model

2- Shuttle Radar Topography Mission

داده‌های زمینی هم‌زمان با گذر ماهواره از منطقه مورد مطالعه شامل: دمای هوا (درجه سلسیوس)، رطوبت نسبی (درصد) و فشار هوا (هکتوپاسکال)، اخذ شده از اداره کل و مرکز تحقیقات هواشناسی استان آذربایجان شرقی (جدول ۲)

جدول ۲- داده‌های ایستگاه سینوپتیک شهرهای منطقه مورد مطالعه

شهر	کد ایستگاه	ساعت (UTC)	دما (C)	رطوبت نسبی (%)	فشار (hpa)
بستان‌آباد	۹۹۲۴۸	۰۷:۰۰	۱۶/۴	۵۸	۸۳۰/۸
بناب	۹۹۲۳۹		۲۳/۲	۳۷	۸۷۳/۲
تبریز	۴۰۷۰۶		۲۱/۶	۴۲	۸۶۵/۳
مراغه	۴۰۷۱۳		۲۳/۴	۳۴	۸۶۵

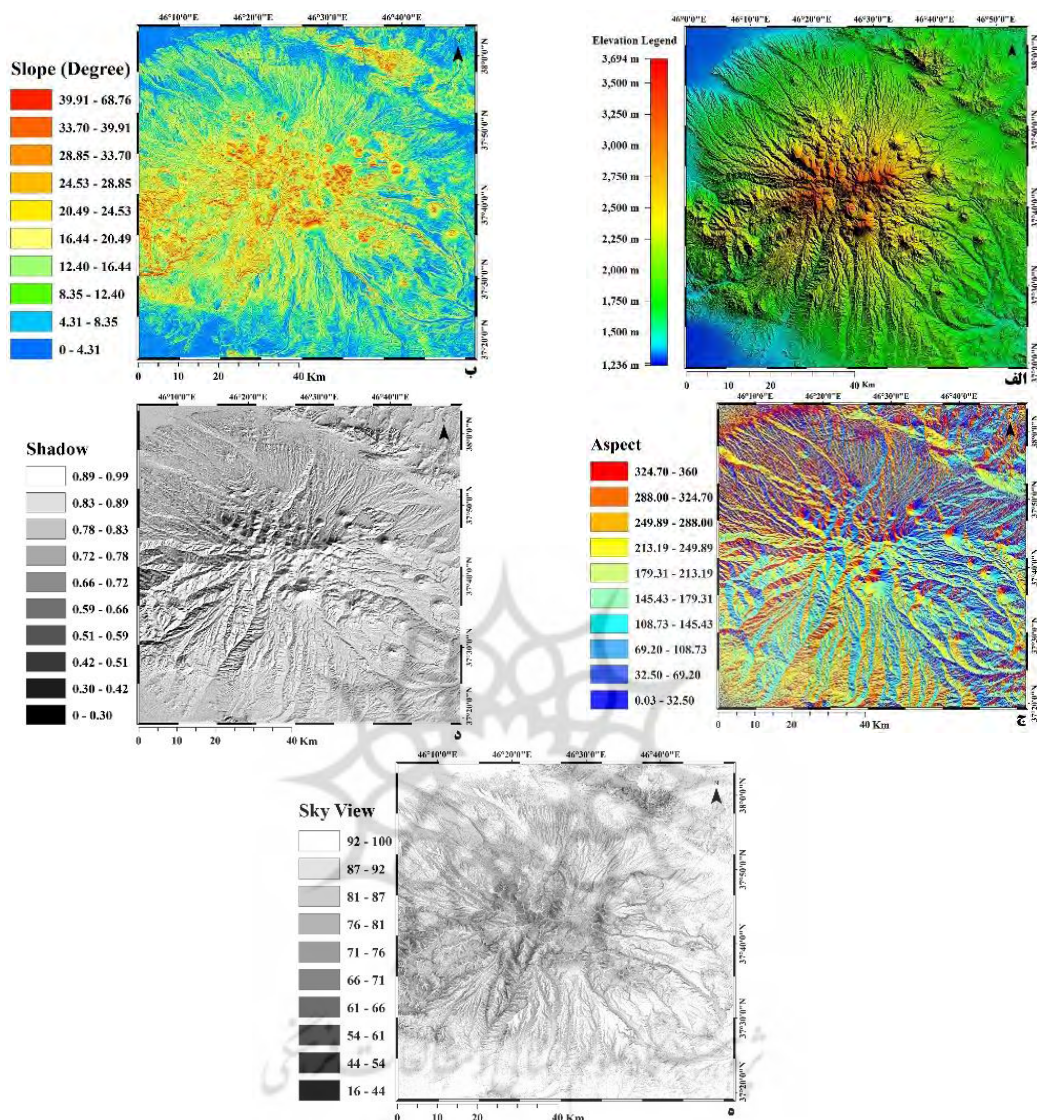
(منبع: نگارندگان، ۱۴۰۳)

در پژوهش حاضر، به منظور برآورد دمای سطح زمین از نرم‌افزار ENVI به عنوان نرم‌افزار اصلی پردازش تصاویر و از نرم‌افزار SNAP جهت پردازش‌های اولیه، تصحیح هندسی و آماده‌سازی تصاویر سنتیل ۳ برای استفاده در نرم‌افزارهای مکمل در پژوهش حاضر استفاده شد، از نرم‌افزار TerrSet جهت اعتبارسنجی دمای سطح بازیابی شده (توجه به این نکته ضروری است که جهت اعتبارسنجی داده‌های حرارتی لندست با استفاده از داده‌های حرارتی سنتیل ۳، تصاویر لندست باید از لحاظ اندازه پیکسل و تعداد سطر و ستون پیکسل‌ها با داده‌های حرارتی سنتیل ۳ برابر باشد) و از نرم‌افزار ArcGIS برای تهیه نقشه خروجی استفاده شده است. برای این منظور از تصویر روز سنجنده OLI، OLI-2 و TIRS، TIRS-2 که تصحیحات هندسی روی آن‌ها توسط خود سازمان USGS صورت پذیرفته، استفاده شده است. بدین منظور قبل از محاسبه و استخراج پارامترهای فیزیکی سطح زمین نظیر: رادیانس انعکاسی- حرارتی سطح، آلبدو سطح، گسیل‌مندی سطح، دما و نظایر آن می‌بایست تصحیح رادیومتریکی که از الزامات اولیه استفاده از تصاویر ماهواره‌ای می‌باشد، بر روی تصویر انجام گیرد. برای رسیدن به این هدف بایستی اثر اتمسفر، روشنایی خورشید و اثر توپوگرافی و ویژگی‌های سطح روی تصاویر در نظر گرفته شده و تأثیر این عوامل در تخمین پارامترهای سطح، حذف یا به حداقل برسد.

برای انجام تصحیح اتمسفری و توپوگرافی از مدل رقومی ارتفاعی داده‌های SRTM استفاده گردید و مشتقات آن نظیر: شیب (Slop)، جهت شیب (Aspect)، برجستگی‌های سایه‌ای (Shadow) و نمای آسمان (Sky View) با استفاده از افزونه ATCOR2/3^۱ پیاده‌سازی شده در نرم‌افزار ERDAS IMAGINE 2014 که از پایگاه مدل‌های انتقال تابشی MODTRAN-5^۲ استفاده می‌کند استخراج گردید. در شکل ۳ مدل رقومی ارتفاعی و مشتقات آن نشان داده شده است.

1- Atmospheric/Topographic Correction

2- Moderate Resolution Atmospheric Transmission



شکل ۳- الف) مدل رقومی ارتفاعی، ب) نقشه شیب، ج) نقشه جهت شیب، د) نقشه سایه، ه) نقشه نمای آسمان (دید به آسمان)
(منبع: نگارندگان، ۱۴۰۳)

ATCOR2 اشاره به تصحیح اتمسفری برای زمین‌های مسطح دارد و ATCOR3 بیانگر تصحیح اتمسفری توأم با تصحیح توپوگرافی است که با پذیرش مدل رقومی ارتفاعی و مشتقات آن این کار را انجام می‌دهد. پایگاه داده MODTRAN شامل طیف گسترده‌ای از مدل‌های انتقال تابشی از قبل محاسبه شده برای شرایط مختلف آب-وهوایی، زوایای مختلف خورشید و سنجنده می‌باشد. در افزونه تصحیح اتمسفری و توپوگرافی (ATCOR) اطلاعات مربوط به تصویر و سنجنده (نظیر: تاریخ و زمان أخذ داده، طول و عرض جغرافیایی، زاویه زینت^۱ خورشید، زاویه سمت^۲ خورشید، نوع سنسور و غیره) از متافایل^۳ هر تصویر استخراج می‌گردد. علاوه بر آن، از الگوریتم پوشش

1- Zenith Angle

2- Azimuth Angle

3- Metafile Of Image

گیاهی متراکم تیره^۱ جهت برآورد ضخامت اپتیکی اتمسفری یا پارامتر قابلیت دید استفاده می‌کند (ریشتر و شلاپفر^۲، ۲۰۱۳). نوع مدل اتمسفری و آئروسول^۳ نیز با استفاده از عرض جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و تاریخ اخذ تصاویر تعیین شد و به افزونه ATCOR معرفی گردید (راهنمای تصحیح اتمسفری^۴، ۲۰۹۹: ۷۱). نهایتاً جهت انجام تصحیح اتمسفری و توپوگرافی، مدل رقومی ارتفاعی منطقه به همراه مشتقات حاصل از آن به افزونه ATCOR معرفی گردید و تصحیح توپوگرافی و اتمسفری بر روی تصاویر انجام گرفت (با تأکید بر این نکته که اندازه پیکسل مدل رقومی ارتفاعی و تصویر منطقه مورد مطالعه قبل از معرفی برای افزونه ذکر شده باید هم‌اندازه شده باشند). با تصحیح توپوگرافی و اتمسفری تصاویر منطقه مورد مطالعه، انعکاس در سطح زمین به دست آمد و تمامی محاسبات لازم بر اساس آن صورت گرفت.

روش‌های برآورد دمای سطح زمین

در این پژوهش برای تخمین دمای سطح زمین از دو روش الگوریتم‌های تک‌باندی^۵ و پنجره مجزا^۶ بر روی باند ۱۰ و ۱۱ ماهواره لندست ۸ استفاده شده است. لازم به ذکر است با توجه به این که باند ۱۰ ماهواره لندست ۸ نسبت به باند ۱۱ به محدوده نهایت تابش زمین (۹/۶۶ میکرومتر) نزدیک‌تر و مقدار نویز آن کمتر است، به همین دلیل در الگوریتم تک‌باندی از باند ۱۰ ماهواره لندست ۸ جهت تخمین دمای سطح زمین استفاده شده است. با داشتن گسیل‌مندی سطح، دمای سطح زمین با استفاده از الگوریتم‌های تک‌باندی و پنجره مجزا قابل محاسبه و بازیابی می‌باشد.

الگوریتم SCJM&S

روش تک‌کانال جزء پرکاربردترین روش‌های تخمین دمای سطح زمین است که برای سنجنده‌هایی که دارای یک باند حرارتی هستند مناسب است. این روش برای اجرا نیاز به اطلاعات دقیق پروفیل اتمسفری از منطقه مورد مطالعه دارد و از رابطه **Error! Reference source not found.** (۲۰۰۴: ۴۴۰-۴۳۴) حاصل می‌شود (خیمنزمونز و سوبرینو^۷،

(۱)

$$T_S = \gamma \gamma \left[\frac{1}{\varepsilon} (\psi_1 L_{Sen} + \psi_2) + \psi_3 \right] + T_{Sen} - \gamma L_{Sen}$$

در این رابطه، T_S دمای سطح زمین برحسب (K)، ε گسیل‌مندی سطح که بدون واحد می‌باشد، γ پارامتر وابسته به تابع پلانک برحسب رادیانس که از رابطه **Error! Reference source not found.** قابل محاسبه

1- Dense Dark Vegetation (DDV)

2- Richter & Schläpfer

3- Aerosol

4- Atmospheric Correction Module: Quac And Flaash User's Guide

5- Single Channel Algorithm

6- Split Windows Algorithm

7- Jiménez & Sobrino

8- Gamma

است ψ_1, ψ_2, ψ_3 به توابع اتمسفری معروفاند که از رابطه **Error! Reference source not found.** قابل محاسبه هستند و L_{Sen}^1 تابش طیفی دریافتی سنجنده در واحد ($W/m^2 / \mu m$) است.

(۲)

$$\left\{ \frac{K_2 L_{sen}}{T_{Sen}^2} \left[\frac{\lambda^4}{k_1} + \lambda^{-1} \right] \right\}^{-1}$$

در رابطه **Error! Reference source not found.** K_1 و K_2 ضرایب ثابت باندهای حرارتی (جدول ۳) به ترتیب در واحدهای ($W/m^2 / \mu m$) و (K) می باشند. T_{sen} دمای ظاهری رسیده^۲ به سنجنده برحسب (K) و λ طول موج مؤثر باند حرارتی برحسب (μm) می باشد.

جدول ۳- ضرایب ثابت باندهای حرارتی لندست ۸

Constant	Band 10	Band 11
K1	۷۷۴/۸۸۵۳	۴۸۰/۸۸۸۳
K2	۱۳۳۱/۰۷۸۹	۱۲۰۱/۱۴۴۲

(منبع: نگارندگان، ۱۴۰۳)

(۳)

$$\psi_1 = \frac{1}{\tau} \quad \psi = -L^{\downarrow} - \frac{L^{\uparrow}}{\tau} \quad \psi_3 = L^{\downarrow}$$

در رابطه **Error! Reference source not found.** τ ضریب عبور اتمسفری برحسب درصد و $L^{\uparrow}$ و $L^{\downarrow}$ به ترتیب تابش اتمسفری رو به بالا و رو به پایین که هر دو در واحد (W/m^2) می باشند. در این پژوهش، توابع اتمسفری مستقیماً از وبسایت محاسبه پارامترهای تصحیح اتمسفری^۳ که توسط سازمان ملی هوانوردی و فضایی آمریکا^۴، ناسا، برای سنجندههای حرارتی لندست توسعه داده شده است، محاسبه گردید که در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴- پارامترهای تصحیح اتمسفری منطقه مورد مطالعه

مسیر و گذر ماهواره	شهر	τ	$L^{\uparrow}$	$L^{\downarrow}$	Surface relative humidity(%)
۰۳۴-۱۶۸	بستان آباد	۰/۸۹	۰/۸۱	۱/۳۷	۵۸
	بناب	۰/۸۹	۰/۸۱	۱/۳۸	۳۷
	تبریز	۰/۸۹	۰/۸۲	۱/۳۹	۴۲
	مراغه	۰/۹۰	۰/۷۸	۱/۳۳	۳۴

(منبع: نگارندگان، ۱۴۰۳)

حال با استفاده از دو الگوریتم مشهور تکباندی، دمای سطح در تصویر لندست ۸ بازیابی و محاسبه گردید.

1- Top of atmospheric spectral radiance

2- Brightness Temperature (BT)

3- Atmospheric Correction Parameter Calculator

4- National Aeronautics And Space Administration

الگوریتم پنجره مجزا (Split Window)

یکی از الگوریتم‌های چندباندی است که دمای سطح زمین را با دقت بالایی محاسبه می‌کند (ابراهیمی هروی و همکاران، ۱۳۹۵: ۷۶-۵۹). این الگوریتم ابتدا در پژوهش (مک میلین^۱، ۱۹۷۵: ۵۱۱۳-۵۱۱۷) برای محاسبه دمای سطح اقیانوس‌ها با به‌کارگیری جذب اتمسفری مختلف در دو باند TIR پیشنهاد شد که نیاز به هیچگونه اطلاعات پروفایل اتمسفری در زمان گذر ماهواره نداشت. اواخر دهه ۱۹۸۰ این الگوریتم‌ها برای محاسبه LST هم استفاده شدند. یکی از مهم‌ترین الگوریتم‌های SW که براساس ساختار ریاضی پیشنهادشده در پژوهش (سوبرینو و همکاران^۲، ۱۹۹۷: ۱۶۲-۱۶۳) بوده و در پژوهش (خیمنزمونز و سوبرینو، ۲۰۰۸: ۸۰۹-۸۰۶) بر روی سنجنده‌های مختلف اعمال شده و در پژوهش‌های متعدد دیگری نیز استفاده شده است، در پژوهش حاضر نیز مورد استفاده قرار گرفت که به‌این منظور از رابطه **Error! Reference source not found.** که دارای معیارهای مختلفی است، استفاده شد (رونگالی و همکاران^۳، ۲۰۱۸: ۱-۱۹).

(۴)

$$LST = TB10 + C1(TB10 - TB11) + C2(TB10 - TB11)^2 + C0 + (C3 + C4W) + (1 - m)(C5 + C6W) \Delta m$$

در این رابطه LST بیانگر دمای سطح زمین برحسب (K) می‌باشد. در حالی که C0 تا C6 بیانگر ضرایب‌های ثابت الگوریتم پنجره مجزا هستند که با شبیه‌سازی اعداد مختلف از شرایط اتمسفر و سطح به‌دست آمدند جدول ۵، همچنین TB10 و TB11 بیانگر دمای روشنایی باند ۱۰ و ۱۱ برحسب (K) که با استفاده از رابطه **Error! Reference source not found.** به‌دست می‌آید. W بیانگر ظرفیت بخار آب اتمسفری می‌باشد که با استفاده از رابطه **Error! Reference source not found.** به‌دست می‌آید. m میانگین و Δm اختلاف در گسیل‌مندی سطحی باندهای ۱۰ و ۱۱ است که از طریق رابطه **Error! Reference source not found.** و رابطه **Error! Reference source not found.** قابل محاسبه می‌باشند.

جدول ۵- ضرایب ثابت الگوریتم پنجره مجزا

Constant	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Value	-۲/۲۶۸	۱/۳۷۸	۰/۱۸۳	۵۴/۳۰۰	-۲/۲۳۸	۱۲۹/۲۰۰	۱۶/۴۰۰

(منبع: رونگالی و همکاران، ۲۰۱۸)

گسیل‌مندی سطح زمین (LSE) یکی از پارامترهای مهم در محاسبه دمای سطح زمین می‌باشد که به‌صورت جداگانه برای هر دو باند حرارتی سنجنده TIRS لندست ۸ با استفاده از مقادیر ارائه‌شده گسیل‌مندی خاک (ϵ_s) و پوشش گیاهی (ϵ_v) طبق جدول ۶ تعیین و براساس **Error! Reference source not found.** به‌دست آمد (رونگالی و همکاران، ۲۰۱۸: ۱۹-۱).

جدول ۶- مقادیر گسیل‌مندی خاک و پوشش گیاهی برای باند ۱۰ و ۱۱.

Emissivity	Band10	Band11
ϵ_s	۰/۹۷۱	۰/۹۷۷

1- Mcmillin

2- Sobrino et al

3- Rongali et al

ε_v	۰/۹۸۷	۰/۹۸۹
-----------------	-------	-------

(منبع: رونگالی و همکاران، ۲۰۱۸)

$$L=E=\varepsilon_s \times (1-FVC)+\varepsilon_v VFVC \quad (5)$$

برآورد دمای روشنایی

دمای به دست آمده از زمین در ارتفاع ماهواره، دمای روشنایی نامیده می شود (کین و کارنلی، ۱۹۹۹: ۲۳۶۷-۲۳۹۳). داده های باندهای حرارتی ۱۰ و ۱۱ را می توان به صورت جداگانه و با استفاده از ثابت حرارتی موجود در فایل متادیتا از طیف درخشندگی به دمای روشنایی (BT) تبدیل کرد که با استفاده از **Error! Reference source not found.** محاسبه می شود (عابدینی و همکاران، ۱۴۰۱: ۳۹۳-۳۷۵).

$$T_{sen} = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{\lambda}}+1\right)} \quad (6)$$

در این رابطه T_{sen} دمای تابشی به کلوین است که بر روی سطح سنجنده ثبت می گردد، K_1 و K_2 ثابت باندهای حرارتی هستند جدول ۳ که از فایل مرجع (Header File) استخراج می گردد و $L_{\lambda}(L_{sen})$ تابش طیفی دریافتی سنجنده در واحد ($W/m^2/sr/\mu m$) می باشد.

برآورد ستون بخار آب

ستون بخار آب در بهبود دقت و بازیابی دمای سطح زمین نقش مهمی ایفا می کند که با استفاده از **Error! Reference source not found.** قابل محاسبه است (ایسایا ندوسی و آودان، ۲۰۱۶: ۴۱۳).

$$W_i = 0.0981 \left\{ \left[0.00 \times 0.6108 \times \exp\left(\frac{7.27 \times (T_0 - 7.15)}{7.3 + (T_0 - 7.15)}\right) + H + 0.1679 \right] \right\} \quad (7)$$

که در این رابطه:

W_i بخار آب اتمسفر، T_0 دمای هوای نزدیک سطح زمین برحسب (K) و RH رطوبت نسبی برحسب درصد می باشد.

میانگین (m) و اختلاف (Δm) در گسیل مندی سطحی باندهای ۱۰ و ۱۱ بعد از محاسبه گسیل مندی سطح زمین برای هر یک از باندهای حرارتی، در این مرحله به محاسبه میانگین و اختلاف گسیل مندی باندهای حرارتی ادامه می دهیم که براساس **Error! Reference source not found.** و **Error! Reference source not found.** قابل محاسبه می باشد (رونگالی و همکاران، ۲۰۱۸: ۱۹-۱).

$$m = \frac{\varepsilon_{00} + \varepsilon_{11}}{2} \quad (8)$$

$$\Delta m = \varepsilon_{00} - \varepsilon_{11} \quad (9)$$

با به دست آوردن پارامترهای موجود در **Error! Reference source not found.** برای الگوریتم Split Window دمای سطح زمین به دست می آید.

اعتبارسنجی دمای سطح زمین

ارزیابی دقت و اعتبارسنجی دمای حاصل از داده‌های ماهواره‌ای اغلب چالش برانگیز بوده و در دهه‌های اخیر چندین الگوریتم برای بازیابی دمای سطح از داده‌های حرارتی گسترش داده شده است اما لازمه به کارگیری هر نوع اطلاعات موضوعی، آگاهی از میزان صحت و درستی آن است (پرهیزکار و همکاران، ۱۳۹۹: ۷۹-۹۸)؛ بنابراین اعتبارسنجی دمای سطح زمین به خاطر لزوم دقت آن در کاربردهای مختلف ضروری به نظر می‌رسد (درویشی و همکاران، ۱۳۹۸: ۳۵-۱۷). در پژوهش حاضر برای اعتبارسنجی دمای بازیابی شده، ابتدا اندازه پیکسل و تعداد سطر و ستون‌های تصاویر لندست ۸ با تصاویر دمای سطح زمین ماهواره سنتینل ۳ با استفاده از نرم‌افزار «Envi» نسبت به هم منطبق شدند. سپس با استفاده از تحلیل رگرسیون و ضریب همبستگی در نرم‌افزار «TerrSet» اعتبارسنجی صورت پذیرفت.

آشکارسازی آنومالی حرارتی سطح زمین

برای آشکارسازی آنومالی‌های حرارتی، ابتدا تصویر دمای سطح زمین به عنوان دمای مشاهداتی در لحظه تصویربرداری با استفاده از دو الگوریتم محاسبه دما تولید سپس اعتبارسنجی گردید. بدیهی است دمای مشاهداتی حاصل، ترکیبی از تشعشعات خورشیدی دریافتی، مقدار تابش خورشیدی جذب شده و گرمای داخلی زمین می‌باشد و در مناطقی که دمای داخلی سطح زمین بیشتر است، باعث تغییرات غیر عادی دمای سطح زمین نیز می‌شود؛ لذا بایستی اثر جذب و تشعشعات خورشیدی را از دمای مشاهداتی حذف و یا به حداقل رساند و به آنومالی حرارتی واقعی سطح زمین رسید. در ادامه برای به حداقل رساندن اثر تشعشعات خورشیدی دریافتی و جذب شده در هر پیکسل از تصویر «LST» جهت آشکارسازی آنومالی حرارتی سطح زمین از الگوریتم توازن انرژی در سطح زمین که به الگوریتم سبال معروف است، استفاده شد ((۱).

محاسبه جریان‌های گرمایی حاصل از الگوریتم توازن انرژی در سطح زمین (سبال)

الگوریتم سبال یکی از مدل‌های کاربردی می‌باشد که از ۲۵ زیرمدل مختلف تشکیل شده است و قادر است متغیرها و جریان‌های انرژی مختلف را در سطح زمین محاسبه کند (باستیانسن و همکاران^۱، ۱۹۹۸: ۲۳۹-۲۱۳). (۱) شکل عمومی این الگوریتم را نشان می‌دهد.

$$R_n + H + G + ET = 0 \quad (1)$$

در رابطه فوق R_n تشعشعات خالص دریافتی توسط سطح زمین برحسب (W/m^2) ، H جریان گرمای محسوس میان سطح زمین و لایه پایین اتمسفر برحسب (W/m^2) ، λET مقدار جریان گرمای نهان مابین سطح و اتمسفر به علت عمل تبخیر برحسب (W/m^2) و G بیانگر جریان گرمایی مابین لایه‌های مختلف خاک یا به عبارتی انرژی خالص هدایت شده به زمین برحسب (W/m^2) است. برای مناطقی با ویژگی‌های آب‌وهوایی مشابه می‌توان λET را بدون تغییر در نظر گرفت؛ بنابراین G پارامتر مؤثر در تعیین دمای سطح و ناهنجاری‌های دمایی می‌باشد. پدیده‌های داخل زمین به صورت رسانای حرارتی عمل می‌کنند و انرژی هسته مرکزی را به لایه‌های نزدیک سطح زمین انتقال می‌دهند که می‌توان از (۲) برای توصیف آن استفاده نمود.

$$\nabla(KVT) - A \quad (2)$$

در (۲) T دما برحسب (K) و K ضریب رسانش حرارتی داخل زمین برحسب (W/(m.k)) و A مقدار گرمای انتقال- یافته برحسب (W) می باشد. ضریب رسانش حرارتی داخل زمین وابسته به ویژگی های فیزیکی و شیمیایی مواد و سنگ های تشکیل دهنده آن است. به عنوان مثال ضریب تداخل سنگ ها و جریان همرفت مواد مایع داخل زمین در تعیین ضریب رسانش حرارتی تأثیرگذار هستند (ایکس و همکاران^۱، ۲۰۰۴: ۱۱۸-۱۰۹)؛ بنابراین به طور کلی می توان گفت انتقال حرارت داخل زمین به سطح زمین، وابسته به میزان رسانش حرارتی مواد و سنگ ها و جریان همرفتی مواد مایع (مانند آب) داخل زمین می باشد. همچنین الگوریتم سبال قادر است جریان های انرژی های گرمایی مختلف را در سطح زمین محاسبه کند. به عبارتی (۱) را می توان به عنوان مجموع سه جزء تابش دیگر به صورت (۳) بیان کرد (ریشتر و شلاپفر^۲، ۲۰۱۴: ۲۳۸-۲).

$$R_n = R_{\text{Solar}} + R_{\text{atm}} - R_{\text{Surface}} \quad (3)$$

که در آن R_{solar} تابش جذب شده خورشیدی توسط سطح در طول موج کوتاه (۰.۳-۳ μm)، R_{atm} تابش طول موج بلند (۳-۱۴ μm) ساطع شده از جو نسبت به سطح و R_{surface} تابش ساطع شده از سطح به جو زمین است. در ادامه جزئیات بیشتری از نحوه محاسبه (۳) به همراه پارامترهای آن بیان شده است. تابش جذب شده خورشیدی توسط سطح زمین می تواند به صورت (۴) محاسبه گردد (ریشتر و شلاپفر، ۲۰۱۴: ۲-۲۳۸).

$$R_{\text{ooar}} = \int_{0.3\mu m}^{2.5\mu m} \{1 - \rho(\lambda)\} E_g(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

که در آن $\rho(\lambda)$ انعکاس سطح زمین، $\{1 - \rho(\lambda)\}$ کسری از تابش جذب شده و $E_g(\lambda)$ تشعشع کلی بر روی سطح زمین برحسب (W/m²) که از روی آلبیدو سطح به صورت (۵) قابل محاسبه است (ریشتر و شلاپفر، ۲۰۱۴: ۲۳۸-۲).

$$E_g = \int_{0.3\mu m}^{2.5\mu m} E_g(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

همچنین تابش ساطع شده از سطح به جو زمین به صورت (۶) محاسبه می گردد (ریشتر و شلاپفر، ۲۰۱۴: ۲۳۸-۲).

$$R_{\text{uaae}} = \epsilon_s T_s^4 \quad (6)$$

که ϵ_s گسیل مندی سطح، σ ثابت استفان- بولتزمن (5.67×10⁻⁸ W/m²/K⁴) و T_s دمای سطح برحسب (K) است. همچنین تابش جوی (R_{atm}) ساطع شده از جو به سمت زمین می تواند به صورت (۷) نوشته شود (ریشتر و شلاپفر، ۲۰۱۴: ۲۳۸-۲).

$$R_{\text{amm}} = \epsilon_a T_a^4 \quad (7)$$

که ε_a گسیل‌مندی هوا، T_a دمای هوای نزدیک سطح زمین (۲ متر بالاتر از سطح زمین) برحسب (K) و σ ثابت استفان-بولتزمن است. گسیل‌مندی هوا از روی دمای متوسط هوا و از طریق (۸) قابل محاسبه است (ریشتر و شلاپفر، ۲۰۱۴: ۲۳۸-۲۴۰).

$$\varepsilon_a = 1 - 11161 \exp\{-7.77 \times 10^{-4} (373 - T_a)^2\} \quad (8)$$

با محاسبه کمیت‌های R_{solar} (تابش خورشیدی جذب‌شده توسط سطح)، R_{atm} (تابش ساطع‌شده از جو نسبت به سطح) و $R_{surface}$ (تابش ساطع‌شده از سطح به جو زمین)، مقادیر R_n (تشعشعات خالص دریافتی توسط سطح زمین) و G (توصیف‌گر جریان گرمایی مابین لایه‌های مختلف خاک یا به عبارتی انرژی خالص هدایت‌شده به زمین که در (۹) قابل محاسبه است) به‌دست می‌آید (ریشتر و شلاپفر، ۲۰۱۴: ۲۳۸-۲۴۰).

$$G = 444 R_n \left(\frac{VAVI_m - VAVI}{VAVI_m} \right) \quad (9)$$

که در آن $SAVI$ شاخص پوشش گیاهی و $SAVI_m$ نشان‌دهنده حداکثر مقدار پوشش گیاهی متراکم می‌باشد. این شاخص گیاهی از (۱۰) قابل محاسبه است.

$$SAVI = \frac{(\rho_{850} - \rho_{650}) \times 0.5}{(\rho_{850} + \rho_{650} + 0.5)} \quad (10)$$

ρ_{650} و ρ_{850} به ترتیب انعکاس در باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک است. با استفاده از روابط مذکور در الگوریتم سبال، مقدار تشعشعات خالص دریافتی توسط سطح زمین (R_n)، انرژی خالص هدایت‌شده به زمین (G) و مقدار تابش خورشیدی جذب‌شده توسط سطح (R_{solar}) محاسبه گردید.

تولید مدل حرارتی تعدیل‌شده با استفاده از دمای مشاهداتی و الگوریتم سبال

جهت محاسبه مدل حرارتی تعدیل‌شده، با ترکیب جریان‌های گرمایی و حرارتی حاصل از روش سبال با نقشه‌های حرارتی سطح، نقشه حرارتی تعدیل‌شده به‌عنوان یک مدل حرارتی تعریف گردید. **Error! Reference source not found.** این مدل حرارتی عوامل تغییر حرارت از پیکسلی به پیکسل دیگر را مدل کرده و از یک-طرف، در محاسبه آن مقدار انعکاس تصحیح توپوگرافی و اتمسفری سطح در نظر گرفته شده که اثرات شیب، جهت شیب و غیره در آن دیده شده است و از طرف دیگر با محاسبه المان‌های الگوریتم توازن انرژی در سطح زمین (سبال)، نظیر: مقدار تشعشعات خالص دریافتی توسط سطح زمین (R_n)، انرژی خالص هدایت‌شده به زمین (G) و مقدار تابش جذب‌شده خورشیدی توسط سطح (R_{solar}) مدل حرارتی حاصل در اثر این عوامل تعدیل گردید. روند کار به این صورت بوده است که در ترکیب این لایه‌ها، فصل مشترک بین حداکثر مقدار دمای مشاهداتی سطح (دمای مشاهداتی سطح زمین معمولاً ناشی از ترکیب تشعشعات خورشیدی و گرمای داخلی زمین می‌باشد و در مناطقی که دمای داخلی سطح زمین بیشتر است، باعث تغییرات غیر عادی دمای سطح زمین نیز می‌شود؛ بنابراین در این پژوهش دمای بالای ۴۰ درجه سانتی‌گراد ملاک ناهنجاری دمایی تعیین گردید) و حداقل مقدار جریان‌های گرمایی و جذبی حاصل از الگوریتم سبال (پیکسل‌های دارای مقادیر کمتر از میانگین تصویر) در نظر گرفته شد. چون هدف تعیین مناطق مستعد برای انرژی زمین‌گرمایی می‌باشد، سعی بر این شد که اثر جریان‌های گرمایی و

جذبی ناشی از نور خورشید در تعیین این مناطق در **Error! Reference source not found.** حداقل مقدار بوده تا آنومالی حرارتی سطحی تنها ناشی از فعل و انفعالات گرمای درون زمین باشد.

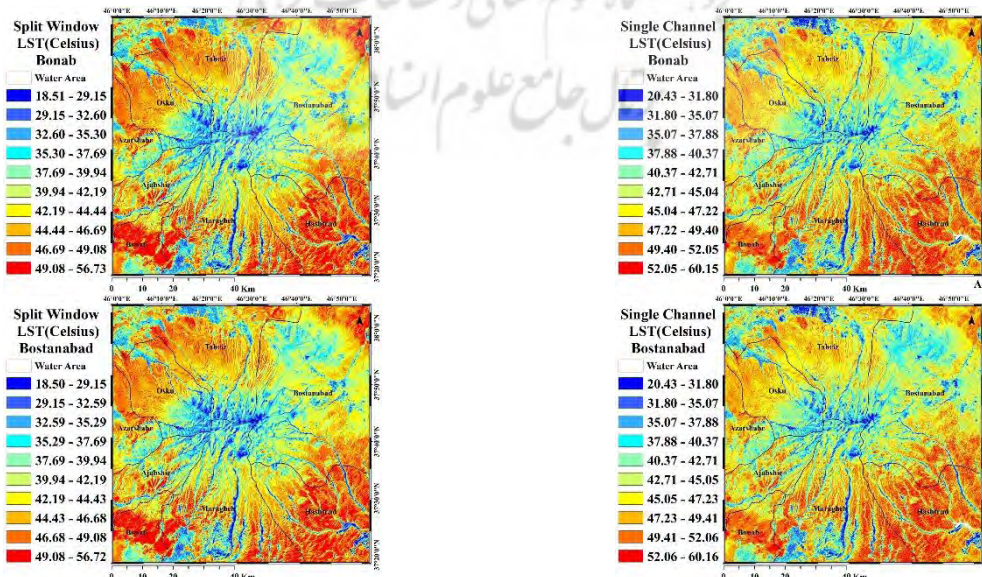
(۲۰) $(LST > 40^{\circ}C) \& (RN < Mean) \& (G < Mean) \& (Rsolar < Mean)$

یافته‌ها و بحث

بررسی دمای سطح منطقه

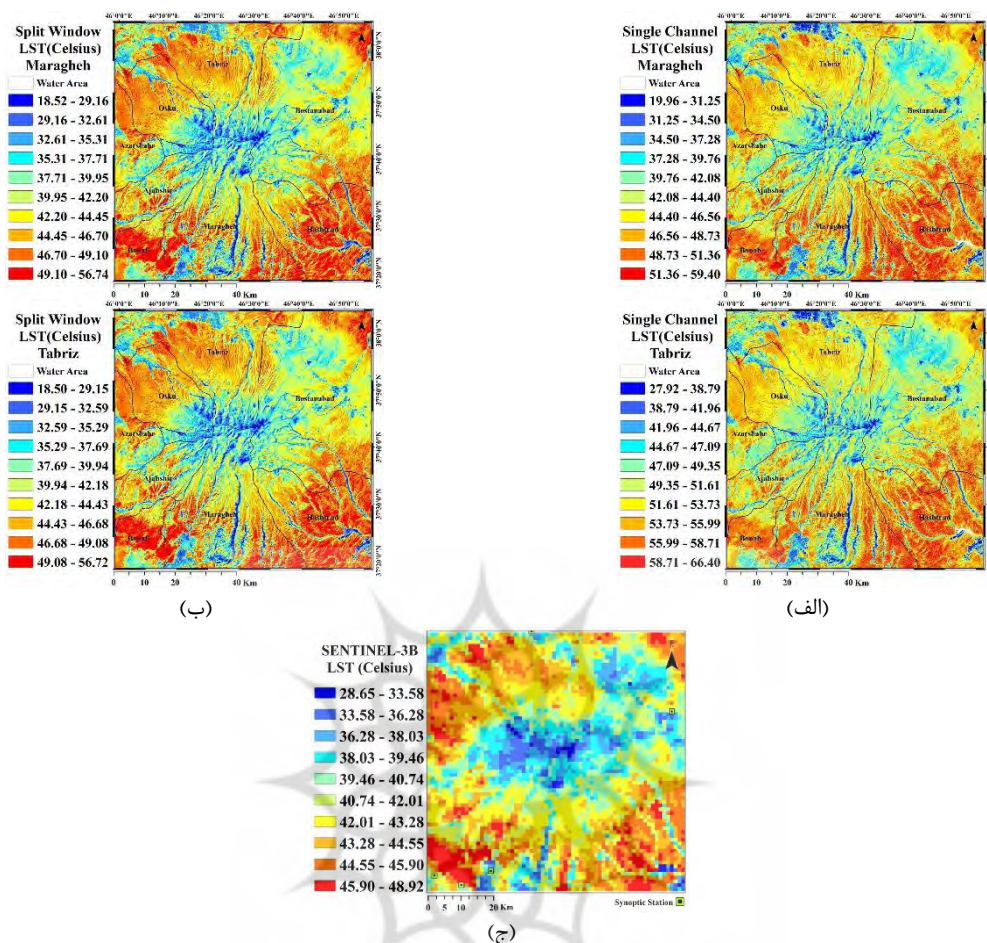
دمای سطح زمین، از جمله شاخص‌های مهم در مطالعه مدل‌های تعادل انرژی در سطح زمین در مقیاس منطقه‌ای و جهانی است (عابدینی و همکاران، ۱۴۰۱: ۳۷۵). آگاهی از دمای سطح زمین، تغییرات زمانی- مکانی چگونگی ترازمندی انرژی سطح زمین را آشکار می‌سازد (لی و همکاران^۱، ۲۰۱۳: ۱۵)؛ از این‌رو کمک فراوانی به طیف وسیعی از مسائل مرتبط با علوم زمین نظیر: اقلیم شهری، تغییرات جهانی محیطی و بررسی تعاملات انسان و محیط می‌کند (اکبری و همکاران، ۱۳۹۶: ۱۵۴). این امر ایجاب می‌کند که از روش‌های علمی (الگوریتم) که امکان محاسبه دمای هر نقطه از سطح زمین را فراهم می‌کند، استفاده کنیم تا بتوانیم تحقیقات و پروژه‌های علوم زمین را در رابطه با دمای سطح زمین انجام دهیم (فیضی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۵: ۱۷۳).

هدف اصلی این پژوهش، شناسایی مناطق مستعد منابع زمین‌گرمایی سطحی با ترکیب دمای مشاهداتی سطح و جریان‌های انرژی حاصل از روش سبال در محدوده اطراف کوه آتشفشانی سهند بود. برای این منظور، از الگوریتم‌های تک‌باندی جیمز- سوپرینو و پنجره مجزا که در پژوهش‌های متعددی مورد ارزیابی قرار گرفته و با توجه به دقتی که در برآورد دمای سطح زمین داشتند مورد توصیه و پیشنهاد قرار گرفته‌اند، استفاده شد. از جمله این تحقیقات می‌توان به پژوهش دَش و همکاران^۲ در سال ۲۰۰۱ و پژوهش آروین در سال ۱۳۹۸ اشاره کرد. نقشه‌های دمای سطح زمین برآوردشده از الگوریتم‌های تک‌باندی و پنجره مجزا و همچنین دمای سطح به‌دست‌آمده از ماهواره سنتینل ۳ در شکل ۴ ارائه شده است.



1- Li et al

2 - Dash et al



شکل ۴- نقشه دمای سطح زمین در منطقه مورد مطالعه، الف) روش الگوریتم تک باندی، ب) روش الگوریتم پنجره مجزا، ج) دمای

حاصل از ماهواره سنتینل ۳

(منبع: نگارندگان، ۱۴۰۳)

توزیع مکانی «LST»:

با استناد به پژوهش فیضی زاده و همکاران (۱۳۹۵)، به دلیل استفاده از معیارهایی مانند: شاخص NDVI، ستون بخار آب و کسر پوشش گیاهی در برآورد دمای سطح زمین با استفاده از الگوریتم‌های ذکر شده، می‌توان گفت مناطقی که دارای پوشش گیاهی متراکم و پوشیده از آب هستند، پایین‌ترین دما و مناطق فاقد پوشش گیاهی معمولاً بالاترین مقدار دمایی را شامل می‌شوند. البته در پژوهش حمزه و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از تحلیل‌های آماری ارتباط بین دمای سطح زمین با عوامل توپوگرافی از جمله ارتفاع، شیب و جهت شیب و عامل پوشش گیاهی بررسی شده و نتیجه ارتباط معکوس بین ارتفاع با دمای سطح و تأثیرگذاری پارامترهای شیب و جهت شیب در مدل‌سازی دمای سطح را نشان داد. در پژوهش دیگری که توسط زیاو و مودی^۱ (۲۰۰۵) در جنوب چین انجام شده است، رابطه بین تغییرات کاربری اراضی و الگوی توزیع دمای سطح زمین مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج بیانگر آن بود که دماهای بیشتر در منطقه مورد مطالعه با الگویی توزیع شده بودند که رابطه مستقیم با توزیع الگوی پوشش اراضی داشتند. بر

همین اساس با توجه به جدول ۷، در نقشه‌های نهایی حاصل از الگوریتم تک‌باندی (شکل ۴، الف)، حداقل و حداکثر دمای سطح زمین در زمان اخذ تصویر ماهواره‌ای به ترتیب براساس داده‌های هواشناسی شهر مراغه و تبریز به دست آمده است که بین ۱۹/۹۶ و ۶۶/۴۰ درجه سلسیوس برآورد شده است. بررسی بصری نقشه‌های نهایی استخراج شده به روش تک‌باندی، نشان می‌دهد که سردترین پیکسل‌ها برای تمامی شهرها با توجه به داده‌های هواشناسی مربوط به آن‌ها (

جدول ۲) و با در نظر گرفتن توپوگرافی منطقه مربوط به ارتفاعات بالا، مناطق دارای پوشش گیاهی و برخی مناطق انسان ساخت می‌باشد. همچنین گرم‌ترین پیکسل‌ها مربوط به ارتفاعات پایین و مناطق عاری از پوشش گیاهی است. برآوردهای حاصل از الگوریتم پنجره مجزا در نقشه‌های نهایی حاصل از این الگوریتم (شکل ۴، ب) و جدول ۷، مقادیر حداقل و حداکثر بسیار نزدیکی را براساس داده‌های هواشناسی هر چهار شهر نشان می‌دهد به طوری که مناطق دارای پوشش گیاهی، ارتفاعات بالا و مناطق پوشیده از آب دارای حداقل دما و مناطق عاری از پوشش گیاهی و ارتفاعات کم دارای حداکثر دما می‌باشند.

جدول ۷- مقایسه حداقل و حداکثر دما بین مقادیر بازیابی شده توسط الگوریتم پنجره مجزا و دمای سطح ماهواره سنتینل ۲

شهر	الگوریتم			
	تک باندی		پنجره مجزا	
	حداقل دما (C°)	حداکثر دما (C°)	حداقل دما (C°)	حداکثر دما (C°)
بستان‌آباد	۲۰/۴۳	۶۰/۱۶	۱۸/۵۰	۵۶/۷۲
بناب	۲۰/۴۳	۶۰/۱۵	۱۸/۵۱	۵۶/۷۳
تبریز	۲۷/۹۲	۶۶/۴۰	۱۸/۵۰	۵۶/۷۲
مراغه	۱۹/۹۶	۵۹/۴۰	۱۸/۵۲	۵۶/۷۴

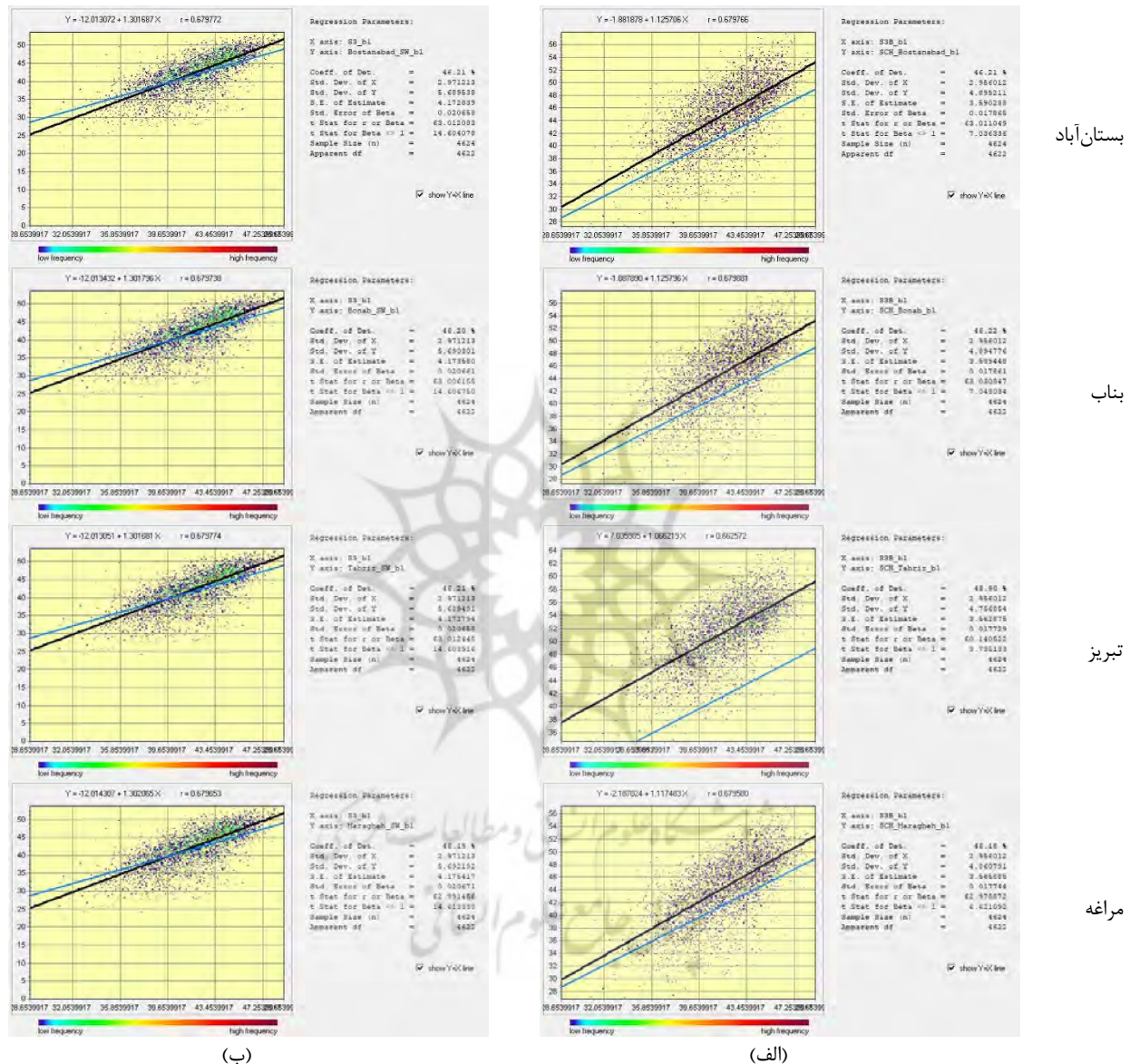
(منبع: نگارندگان، ۱۴۰۳)

بدیهی است دمای سطح زمین به عنوان دمای مشاهداتی، تحت تأثیر عواملی مثل تشعشعات خورشیدی دریافتی، مقدار تابش خورشیدی جذب شده و گرمای داخلی زمین است و در مناطقی که دمای داخلی سطح زمین بیشتر باشد می‌تواند باعث تغییرات غیر عادی دمای سطح زمین (ناهنجاری‌های دمایی) نیز شود. بر همین اساس با توجه به تأثیر ارتفاعات کوه سهند در دمای سطحی مناطق اطراف آن و وجود عوارض و پدیده‌های انسان ساخت با ویژگی‌های متفاوت در منطقه، با مقایسه مقادیر حداقل و حداکثر دما بین الگوریتم تک‌باندی و پنجره مجزا به ترتیب اختلاف ۱/۷۱ و ۲/۶۶ درجه سلسیوس به دست آمد. علت این تفاوت را می‌توان به دقت این دو الگوریتم در برآورد دمای سطح زمین و شرایط منطقه مورد مطالعه نسبت داد. البته اصلی‌ترین عامل اختلاف حرارتی در یک منطقه می‌تواند ناشی از مورفولوژی و ویژگی‌های متفاوت منطقه باشد (پرهیزکار و همکاران، ۱۳۹۹: ۹۸-۷۹).

همان‌طور که قبلاً ذکر شد جهت ارزیابی دقت الگوریتم‌های برآورد دمای سطح زمین، از تحلیل رگرسیون و ضریب همبستگی بین دمای سطح برآورد شده و دمای سطح سنتینل ۳ استفاده شد. در این تحلیل دمای سطح ماهواره سنتینل ۳ به عنوان متغیر مستقل و دمای سطح برآورد شده با استفاده از الگوریتم تک‌باندی و پنجره مجزا به عنوان متغیر وابسته در نرم‌افزار TerrSet معرفی شدند. نتایج حاصل از این تحلیل (

شکل ۵)، ضریب همبستگی بین دمای سطح برآورد شده براساس داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های سینوپتیک شهرهای واقع در منطقه مورد مطالعه با دمای سطح حاصل از سنجنده حرارتی ماهواره سنتینل ۳ برای زمان گذر

ماهواره لندست را مقدار ۰/۶۷ برآورد کرده است که نشان‌دهنده رابطه مثبت و انطباق نزدیک بین این داده‌ها می‌باشد.



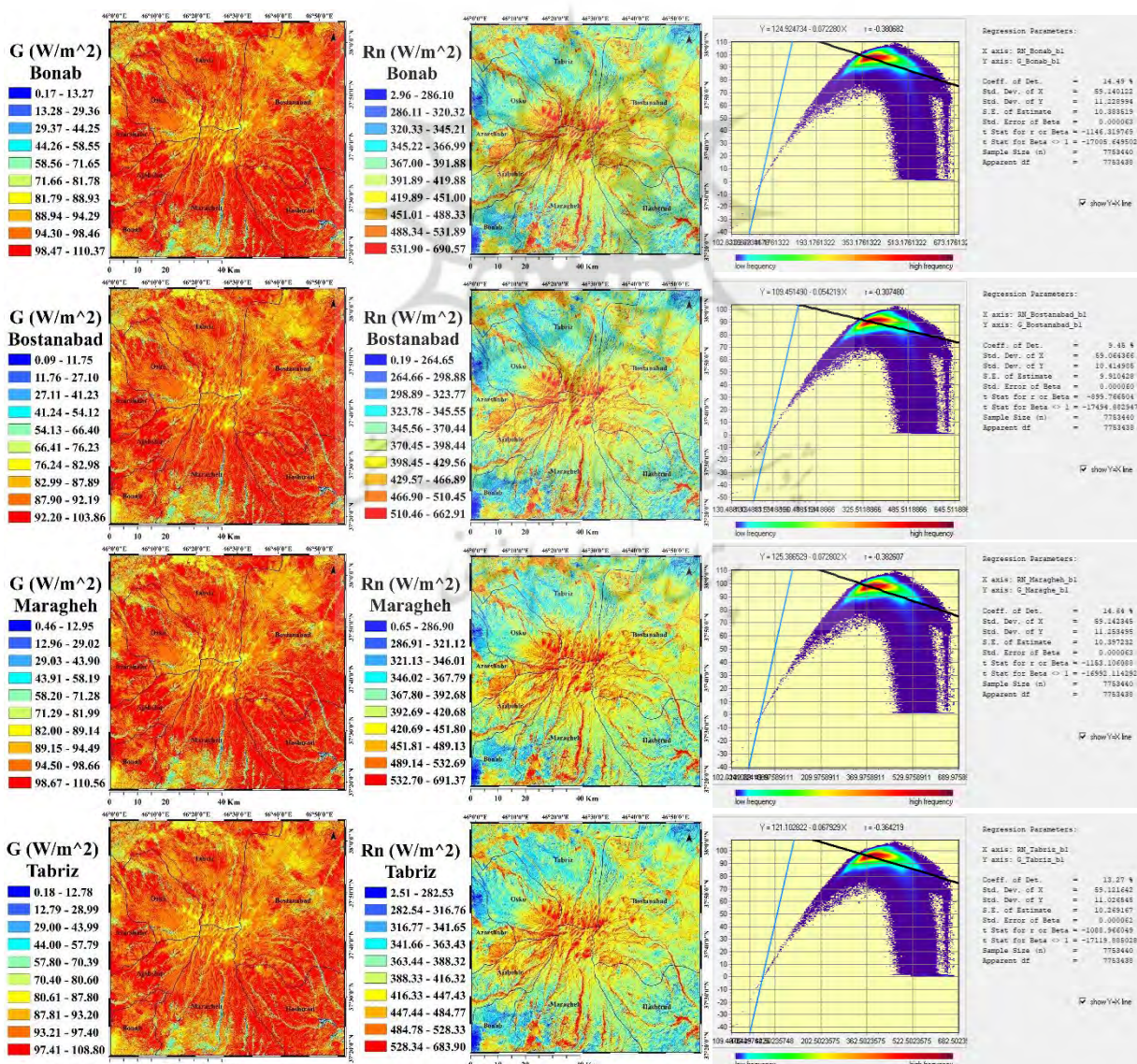
شکل ۵- رگرسیون و ضریب همبستگی بین تصاویر دمای سطح برآوردشده براساس داده‌های سینوپتیک شهرهای منطقه مورد مطالعه و تصاویر دمای سطح سنتینل ۳؛ الف) الگوریتم تک‌باندی، ب) الگوریتم پنجره مجزا (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۳)

آشکارسازی آنومالی حرارتی

برای رسیدن به آنومالی حرارتی که ناشی از عوامل زیرزمینی در گرم کردن سطح زمین باشد، بایستی تصویر حرارتی را نسبت به سایر عوامل گرم‌کننده و خنک‌کننده سطح زمین نرمال نمود (پرهیزکار و همکاران، ۱۳۹۹: ۹۲). در پژوهش‌های مختلف روش‌های متفاوتی برای انجام این کار صورت گرفته است. در پژوهش کیاورزمقدم و

همکاران (۱۳۹۴) همچنین پرهیز کار و همکاران (۱۳۹۹) بعد از برآورد دمای سطح زمین از یک مدل حرارتی که مدل خطی بود و ضرایب مجهول این مدل نیز با استفاده از روش سرشکنی کمترین مربعات محاسبه گردید، برای تعدیل اثرات عواملی مثل نور خورشید، ضریب افت محیط، تبخیر و تعرق استفاده شد تا تأثیر عوامل غیر از منابع زمین گرمایی از نقشه دمای سطح زمین کم شده و به حداقل ممکن برسد و در نتیجه بتوانند آنومالی های حرارتی ناشی از منابع زمین گرمایی را شناسایی کنند. در پژوهش حاضر نیز با توجه به روش مورد استفاده، برای دستیابی به این هدف یکی از مهمترین پردازش های اولیه تصحیح توپوگرافی تصاویر لندست با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی و مشتقات آن در نرم افزار اِرداس و با افزونه آتکور جهت به حداقل رساندن اثرات ناشی از توپوگرافی منطقه و همان طور که قبلاً ذکر شده استفاده از جریان های حرارتی حاصل از الگوریتم سبال جهت تعدیل اثرات ناشی از تابش خورشید بر روی سطح زمین بود.

شکل ۶ جریان های گرمایی حاصل از الگوریتم سبال در منطقه مورد مطالعه را نشان می دهد.



(ج)

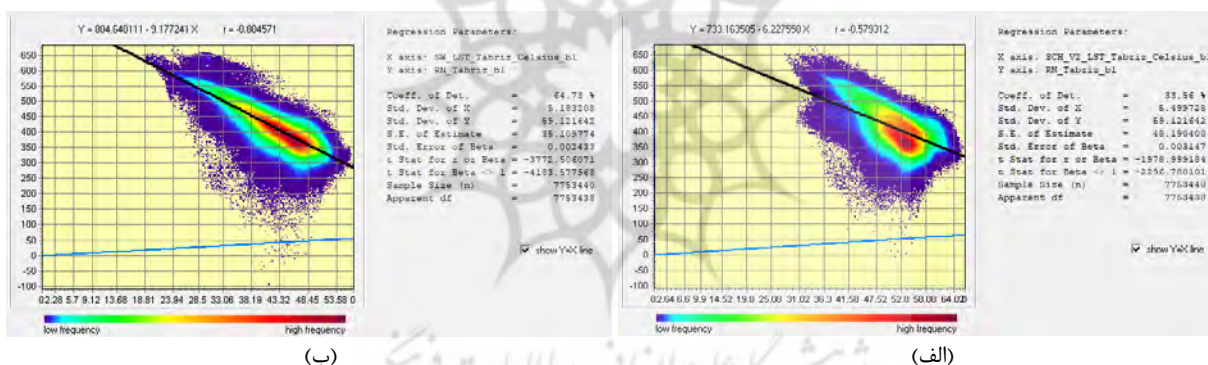
(ب)

(الف)

شکل ۶- رابطه جریان‌های گرمایی حاصل از الگوریتم سیال، (الف) رابطه رگرسیونی (ب) مقدار تشعشعات خالص دریافتی توسط سطح زمین، (ج) انرژی خالص هدایت‌شده به زمین، (د) مقدار تابش جذب‌شده خورشیدی توسط سطح، (ه) نقشه آلبیدو محاسبه‌شده برای منطقه مورد مطالعه (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۳)

شار تابش خالص (RN)

تابش خالص اختلاف بین جریان تابش ورودی و خروجی یا به عبارتی مقدار انرژی موجود در سطح زمین را نشان می‌دهد. افزایش ارتفاع و پوشش گیاهی تا حد زیادی باعث افزایش در میزان جریان تابش خالص شده به‌طوری که وابستگی جریان تابش خالص به تغییرات ارتفاع بیشتر از تغییرات پوشش گیاهی می‌باشد. دمای سطح نیز یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار در جریان تابش خالص می‌باشد. سطوحی که دمای کمتری دارند پتانسیل بالای در شار تابش خورشیدی از خود نشان می‌دهند. بر همین اساس رابطه بین جریان تابش خالص با دما، رابطه‌ای معکوس بوده و با افزایش دما میزان جریان تابش خالص نیز کم می‌شود (شکل ۷).



شکل ۷- رگرسیون و ضریب همبستگی بین تصاویر دمای سطح زمین و شار تابش خالص؛

(الف) الگوریتم تک‌باندی، (ب) الگوریتم پنجره مجزا

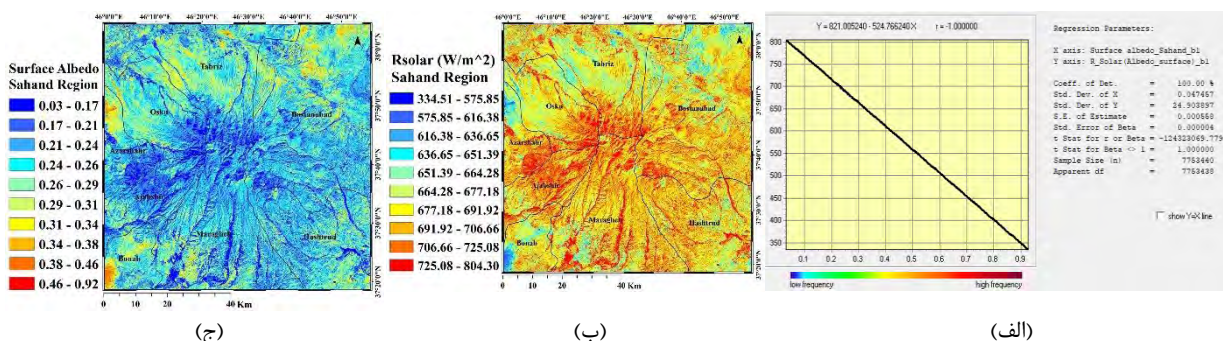
(منبع: نگارندگان، ۱۴۰۳)

تابش خورشیدی جذب‌شده توسط سطح زمین (Rsolar)

با توجه به این که تمام قسمت‌های زمین به یک اندازه تابش خورشیدی دریافت نمی‌کنند؛ بنابراین تابش خورشیدی جذب‌شده توسط سطح زمین نشان‌داد که سطوح مختلف تابش خورشید را به میزان متفاوتی جذب کرده و هرچه یک سطح نور خورشید بیشتری جذب کند، گرم‌تر شده و انرژی بیشتری به‌عنوان گرما بازتاب خواهد کرد؛ بنابراین نسبت تابش خورشیدی ورودی که توسط زمین منعکس می‌شود به‌عنوان آلبیدوی آن شناخته می‌شود. با توجه به توضیحات ذکرشده همبستگی منفی بین آلبیدو و میزان انرژی خورشیدی جذب‌شده توسط سطح زمین وجود دارد. به عبارتی سطوح با آلبیدوی پایین مقدار جذب انرژی خورشیدی بیشتری را از خود نشان می‌دهند و برعکس، به-

عبارتی نقاطی که مقدار آلودگی زیادی دارند انرژی کمتری را در خاک ذخیره می کنند و مناطقی که آلودگی کمتری دارند انرژی بیشتری را در خاک نگهداری می کنند (شکل ۸).

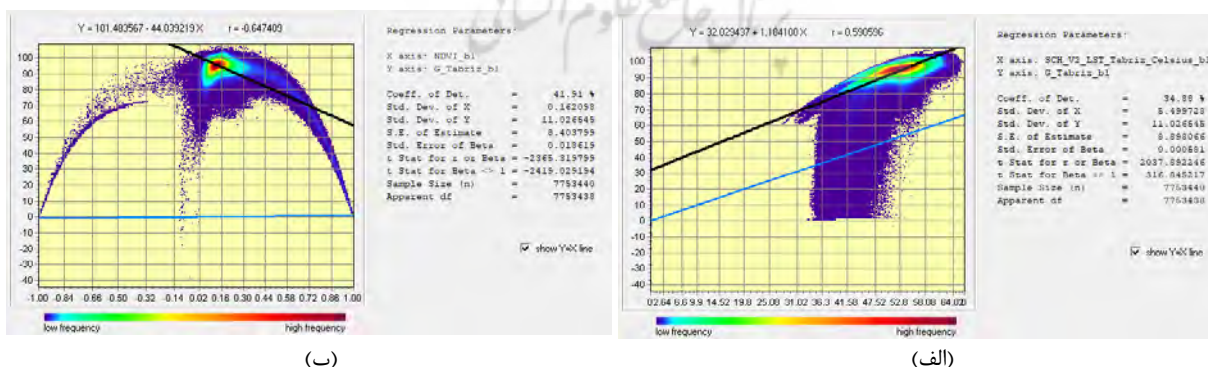




شکل ۸- الف) رگرسیون و ضریب همبستگی بین آلبیدوی سطح زمین و Rsolar، ب) تصویر Rsolar، ب) تصویر آلبیدوی سطح (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۳)

شار گرمایی خاک (G)

همان طور که قبلاً ذکر شد، شار گرمایی خاک جریان گرمایی مابین لایه‌های مختلف خاک، انرژی خالص هدایت شده به زمین یا به عبارتی ذخیره گرما در خاک و پوشش گیاهی به علت رسانش است. در ضمن شار گرما به داخل و خارج از سیستم خاک یک فرآیند انتقال انرژی است و نرخ انتقال انرژی توسط هدایت به ظرفیت مواد برای هدایت انرژی (هدایت حرارتی) و گرادیان دما نسبت به فاصله در داخل مواد بستگی دارد (ملس و نانجیا^۱، ۲۰۰۵: ۲۶۵۳-۲۶۷۰). در میان پارامترهای حاصل از الگوریتم سبال، تنها پارامتری که با دمای سطح زمین رابطه مثبت نشان می‌دهد، شار گرمای خاک می‌باشد. با توجه به این که شناسایی پیکسل‌هایی مستعد انرژی زمین گرمایی با روش مورد استفاده در پژوهش حاضر بیشتر تحت تأثیر سطوح بدون پوشش گیاهی می‌باشد، همچنین به خاطر رابطه معکوسی که بین شار گرمای خاک و پوشش گیاهی وجود دارد؛ بنابراین شار گرمای خاک پارامتر مؤثری در تعیین ناهنجاری‌های حرارتی ناشی از منابع زمین گرمایی می‌باشد (شکل ۹). جدول ۸ نتایج رابطه رگرسیونی جریان‌های گرمایی حاصل از الگوریتم سبال را نسبت به هم نشان می‌دهد.



شکل ۹- رگرسیون و ضریب همبستگی شار گرمای خاک؛ الف) دمای سطح زمین، ب) شاخص پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۳)

جدول ۸- رابطه رگرسیونی بین پارامترهای جریان‌های گرمایی حاصل از الگوریتم سبال

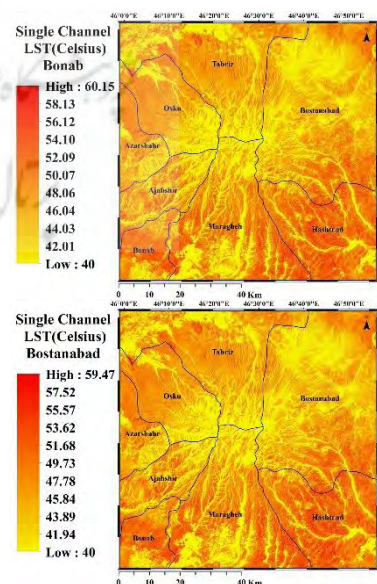
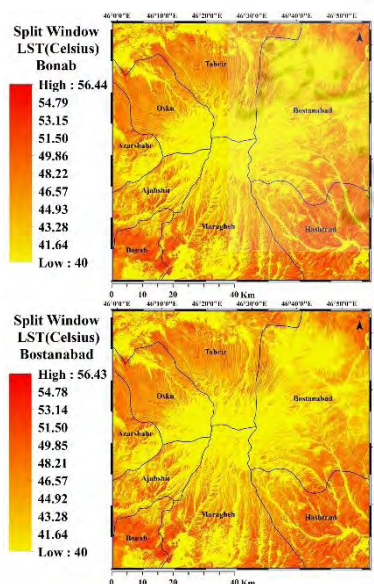
جریان‌های گرمایی حاصل از الگوریتم سبال	مقدار تشعشعات خالص دریافتی توسط سطح زمین (RN)	شار گرمای خاک (G)	مقدار تابش جذب‌شده خورشیدی توسط سطح (RSolar)
RN	-	منفی	مثبت
G	منفی	-	منفی
RSolar	مثبت	منفی	-

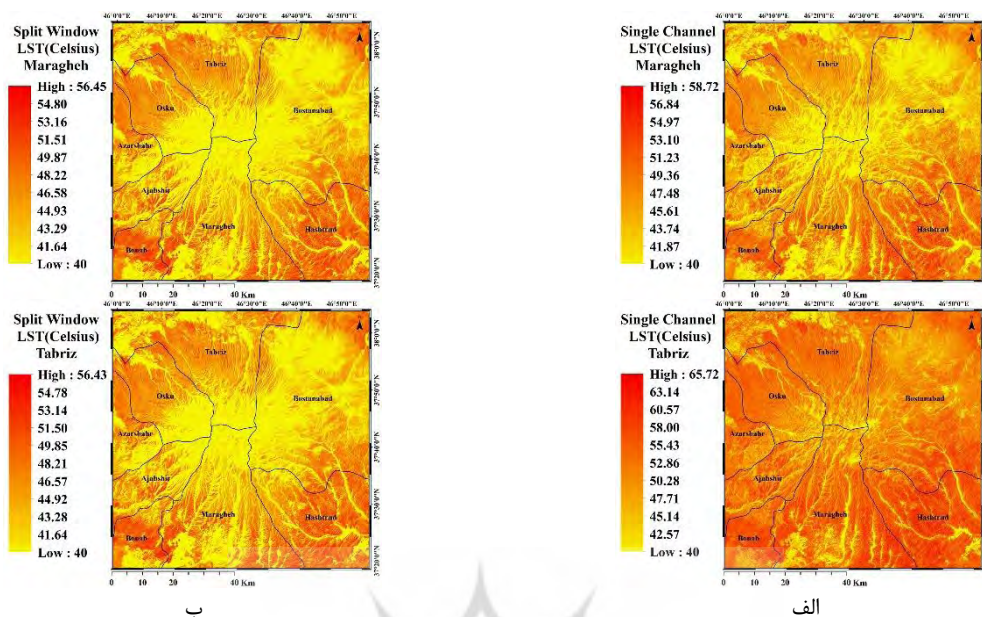
(منبع: نگارندگان، ۱۴۰۳)

شناسایی مناطق مستعد انرژی زمین گرمایی

روش پیشنهادی در این پژوهش، در دو مرحله کلی صورت گرفته است. در مرحله اول، برای محاسبه آنومالی حرارتی، ابتدا از باند حرارتی لندست ۸ استفاده شده و تصویر دمای سطح با توجه به روابط ارائه‌شده، با استفاده از دو الگوریتم محاسبه دما تولید گردید. از لحاظ تئوری، مناطقی که دمای بالاتر و حداکثری داشتند (در این پژوهش دمای بالای ۴۰ درجه سانتیگراد. امامی و جعفری، ۱۳۹۷)، و توسط هر دو الگوریتم مذکور شناسایی شدند، به‌عنوان مناطقی که احتمال شناسایی منابع زمین گرمایی در آن نواحی وجود دارد در نظر گرفته شدند (

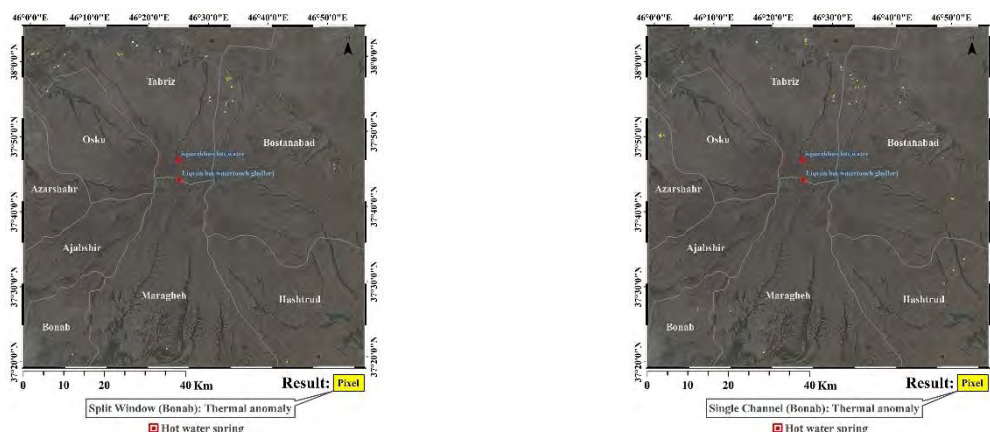
شکل ۱۰). ولی این حرارت سطح زمین زمانی متعلق به حرارت زمین گرمایی خواهد بود که تأثیر عوامل دیگر دخیل در این حرارت نظیر تشعشعات خورشیدی، مقدار انرژی خورشیدی جذب‌شده و اثرات توپوگرافی سطح که باعث جذب متفاوت نور خورشید در قسمت‌های مختلف سطح زمین می‌گردد، از روی آن برداشته شود. برای این منظور در مرحله دوم، با استفاده از الگوریتم توازن انرژی در سطح زمین (سبال) مقدار تشعشعات خالص دریافتی توسط سطح زمین (RN)، انرژی خالص هدایت‌شده به زمین (G) و مقدار تابش جذب‌شده خورشیدی توسط سطح (RSolar) محاسبه گردید.





شکل ۱۰- نقشه دمای بالای ۴۰ درجه سانتیگراد در منطقه مورد مطالعه، الف) روش الگوریتم تک باندی، ب) روش الگوریتم پنجره مجزا (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۳)

سپس با ترکیب این لایه‌های اطلاعاتی با نقشه‌های حرارتی سطح، نقشه حرارتی تعدیل شده به عنوان یک مدل حرارتی تعریف گردید. این مدل حرارتی عوامل تغییر حرارت از پیکسلی به پیکسل دیگر را مدل کرده و از یک طرف، در محاسبه آن تصحیح توپوگرافی و اتمسفری سطح در نظر گرفته شده که اثرات شیب، جهت شیب و غیره در آن دیده شده است و از طرف دیگر با محاسبه المان‌های الگوریتم توازن انرژی در سطح زمین (سبال)، مدل حرارتی حاصل در اثر این عوامل تعدیل گردید. مثلاً اگر در پیکسلی دمای مشاهداتی حاصل از سنجنده دمای حداکثری را نشان دهد و المان‌های مؤثر الگوریتم سبال هم مقادیر حداکثری در آن پیکسل داشته باشند؛ یعنی دمای حداکثری آن پیکسل ناشی از تشعشعات خورشیدی و مقدار حرارت جذب شده از خورشید تلقی می‌گردد نه حرارت ناشی از زمین گرمایی و برعکس، اگر پیکسلی دمای مشاهداتی حداکثری داشته باشد ولی المان‌های مؤثر الگوریتم سبال مقادیر حداقلی در آن پیکسل داشتند، آن پیکسل به عنوان پیکسل مستعد انرژی زمین گرمایی شناسایی می‌شود (شکل ۱۱).



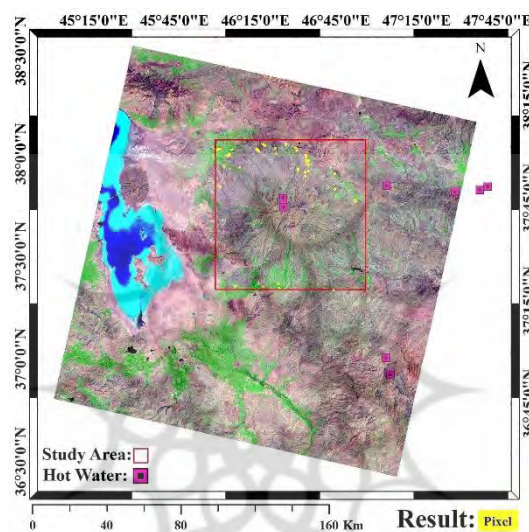


شکل ۱۱ - نقشهٔ آنومالی حرارتی و مناطق مستعد انرژی زمین گرمایی، الف) ترکیب روش SCJM&S با جریان های گرمایی و حرارتی الگوریتم سبال، ب) ترکیب روش Split Window با جریان های گرمایی و حرارتی الگوریتم سبال (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۳)

به این ترتیب مناطق دارای آنومالی حرارتی ناشی از فعل و انفعال های درون زمین تعیین گردید و با شناسایی همهٔ پیکسل های مستعد زمین گرمایی، نقشهٔ آنومالی حرارتی منطقهٔ مورد مطالعه تولید گردید،

شکل ۱۲ پراکندگی پیکسل‌های مستعد انرژی زمین‌گرمایی نسبت به چشمه‌های آب گرم به‌عنوان شواهد ظاهری با تأیید پیکسل‌های شناسایی شده را نشان می‌دهد.

پژوهش حاضر که همسو با نتایج پژوهش‌های امامی و جعفری (۱۳۹۷)، پرهیزکار (۱۳۹۹) و احمدی‌زاده و همکاران (۱۳۹۳) می‌باشد، به این نتیجه رسید که مطالعات سنجش‌ازدور با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به‌عنوان ابزاری مناسب و کم‌هزینه نسبت به روش‌های تجربی و تحلیل‌های زمان‌بر از کارآیی بالایی جهت شناسایی و تهیه نقشه منابع زمین‌گرمایی برخوردار است به‌طوری که با استفاده از این داده‌ها و روش استفاده‌شده مناطقی در نواحی مختلف منطقه مورد مطالعه با توجه به همبستگی مکانی مناسبی که با شواهد ظاهری داشتند، شناسایی شدند.



شکل ۱۲- پراکندگی پیکسل‌های مستعد انرژی زمین‌گرمایی نسبت به چشمه‌های آب گرم

(منبع: نگارندگان، ۱۴۰۳)

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

با توجه به رشد روز افزون جمعیت، توسعه پایدار شهری و نیاز روز افزون به انرژی‌های نو در مقابل انرژی‌های فسیلی، به‌علت تجدیدپذیری، پاک‌بودن و ارزانی این نوع انرژی، فکر به‌کارگیری انرژی‌های نو و تجدیدپذیر از جمله انرژی زمین‌گرمایی را می‌توان تحولی اساسی در حفظ ذخایر نفتی، پایداری اقتصادی و موازین و معیارهای زیست-محیطی دانست. همچنین با در نظر گرفتن مطالعات پیشین در زمینه شناسایی منابع زمین‌گرمایی با استفاده از سنجش‌ازدور حرارتی، پژوهش حاضر نیز با هدف شناسایی پتانسیل‌های انرژی پاک با استفاده از روش سنجش‌ازدور حرارتی در منطقه سهند استان آذربایجان شرقی از ترکیب دمای مشاهداتی سطح با جریان‌های گرمایی و حرارتی حاصل از الگوریتم توازن انرژی در سطح زمین (سبال) استفاده نمود که منجر به شناسایی پیکسل‌های مستعد منابع زمین‌گرمایی شد. با توجه به نقشه‌های نهایی به‌دست‌آمده می‌توان گفت که لحاظ کردن حداقل مقدار جریان‌های گرمایی حاصل از الگوریتم سبال در محاسبه مدل حرارتی تعدیل‌شده، باعث کاهش تأثیر عواملی غیر از منابع زمین‌گرمایی در شناسایی پیکسل‌های مستعد منابع زمین‌گرمایی گردید. بر همین اساس، با توجه به اهمیت دمای سطح زمین در شناسایی ناهنجاری‌های حرارتی ناشی از منابع زمین‌گرمایی، پیکسل‌هایی به‌صورت پراکنده در بخش‌های مختلف منطقه مورد مطالعه شناسایی شده‌اند که در نزدیکی آن‌ها چشمه‌های آب گرم نیز وجود دارد.

این پژوهش مرحله اول اکتشاف منابع زمین‌گرایی در منطقه مورد مطالعه محسوب می‌شود؛ بنابراین جهت رسیدن به هدف نهایی و بهره‌برداری از پتانسیل انرژی زمین‌گرایی، می‌تواند آغازگر مطالعات بیشتری بر روی نواحی پرتانسیل حاصله باشد. برای بالابردن ضریب اطمینان در شناسایی مناطق مستعد انرژی زمین‌گرایی، لازم است نتایج این پژوهش را با لایه‌های اطلاعاتی دیگر مانند: ژئوفیزیک، زمین‌شناسی و ژئوشیمی نیز تلفیق نمود و در مطالعات آتی مورد بررسی قرار داد.

منابع

- ابراهیمی هروی، بهروز؛ رنگزن، کاظم؛ ریاحی بختیاری، حمیدرضا؛ تقی‌زاده، ایوب. (۱۳۹۵). تعیین مناسب‌ترین روش استخراج دمای سطح زمین با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ در کلان‌شهر کرج، نشریه سنجش‌ازدور و GIS ایران، ۸(۳): ۷۶-۵۹.
https://gisj.sbu.ac.ir/article_96139.html
- احمدی‌زاده، سید سعیدرضا؛ آراسته، فاطمه؛ فنایی خیرآباد، غلام‌عباس؛ اشرفی، علی. (۱۳۹۴). شناسایی پتانسیل‌های زمین‌گرایی با استفاده از روش سنجش‌ازدور حرارتی در خراسان جنوبی، مجله پژوهش‌های محیط زیست، ۵(۱۰): ۱۳۵.
<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20089597.1393.5.10.12.7>
- اکبری، الهه؛ بهرامی، شهرام؛ دوران، عاطفه؛ ابراهیمی، مجید. (۱۳۹۶). بررسی تأثیر برخی پارامترهای جغرافیایی بر دمای سطح زمین با استفاده از روش سبال و درخت تصمیم‌گیری در مخروط آتشفشان تفتان، فصلنامه فضای جغرافیایی، ۱۷(۵۷): ۱۰۵-۱۲۶.
<http://geographical-space.iau-ahar.ac.ir/article-1-1821-fa.html>
- امامی، حسن؛ جعفری، اکبر. (۱۳۹۷). شناسایی مناطق مستعد زمین‌گرایی سطحی با ترکیب دمای سطح و جریان‌های انرژی حاصل از روش سبال، نشریه علمی- پژوهشی علوم و فنون نقشه‌برداری، ۷(۴): ۴۴-۲۵.
<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.2322102.1397.7.4.2.2>
- آروین، عباسعلی. (۱۳۹۸). آشکارسازی دمای رویه سطح زمین با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، مخاطرات محیط طبیعی، ۸(۱۹): ۹۱-۱۰۲.
<https://doi.org/10.22111/jneh.2017.20855.1284>
- پرهیزکار عیسی‌لو، رضا؛ ولی‌زاده کامران، خلیل؛ فیضی‌زاده، بختیار. (۱۳۹۹). تعیین بهترین الگوریتم محاسبه دمای سطح زمین جهت شناسایی مناطق زمین‌گرایی (مطالعه موردی: شهرستان مشکین‌شهر)، نشریه اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، ۲۹(۱۱۴): ۷۹-۹۸.
<https://doi.org/10.22131/sepehr.2020.44583>
- حمزه، میجان، کریمی فیروزجائی؛ سعید، نعیم، محمد. (۱۳۹۷). مدل‌سازی ارتباط دمای سطح زمین، شرایط توپوگرافی و پوشش گیاهی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۰(۱): ۳۵-۵۵.
<https://doi.org/10.22059/jphgr.2018.215259.1006930>
- درویشی، شادمان؛ سلیمانی، کریم؛ رشیدپور، مصطفی. (۱۳۹۸). تأثیر شاخص‌های گیاهی و خصوصیات سطح شهری بر تغییرات دمای سطح زمین (مطالعه موردی: شهرستان سنندج)، نشریه سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۱۰(۱): ۱۷-۳۵.
<https://civilica.com/doc/871680/>
- رحیمیان، محمدحسن؛ شایان‌نژاد، محمد؛ اسلامیان، سعید؛ جعفری، رضا؛ قیصری، مهدی؛ تقواییان، صالح. (۱۳۹۶). ارزیابی روش‌های مختلف تعیین دمای پوشش گیاهی درختان پسته به کمک تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸، مهندسی فناوری اطلاعات مکانی، ۵(۲): ۷۹-۹۸.
<http://dx.doi.org/10.29252/jgit.5.2.79>

سلیمانی، احمد؛ آبرومند آذر، پریسا. (۱۳۹۴). بررسی انرژی‌های تجدیدپذیر و اثرات زیست‌محیطی آن‌ها در ایران، کنفرانس بین‌المللی پژوهش در علوم و تکنولوژی.

<https://civilica.com/doc/446754/>

شنوایی، حسین. (۱۳۸۷). انرژی‌های تجدیدپذیر (با نگاه ویژه به انرژی برق آبی)، نشریه بررسی‌های اقتصاد انرژی، (۱۰۴): ۲۱-۳۱.

<http://noo.rs/RdTZw>

شیخ‌زاده، سحر؛ جعفری، حسن. (۱۳۹۵). استفاده از انرژی زمین‌گرمایی برای رسیدن به شهر پایدار، کنفرانس بین‌المللی پژوهش در علوم و تکنولوژی، (۳).

<https://sid.ir/paper/856891/fa>

عابدینی، موسی؛ قلعه، احسان؛ آقازاده، نازفر؛ محمدزاده شیشه‌گران، مریم. (۱۴۰۱). پایش دمای سطح زمین و بررسی رابطه کاربری اراضی با دمای سطح با استفاده از تصاویر سنجنده OLI و TM (مطالعه موردی: شهرستان مشکین‌شهر)، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۲۲(۶۷): ۳۷۵-۳۹۳.

<http://dx.doi.org/10.52547/jgs.22.67.375>

علوی‌پناه، سیدکاظم؛ گودرزی مهر، سعید؛ خاکباز، باهره. (۱۳۹۰). فناوری سنجش از راه دور حرارتی و کاربرد آن در شناسایی پدیده‌ها، نشریه نشاء علم، ۲(۱): ۲۵-۲۹.

https://www.sciencecultivation.ir/article_242567.html

فیضی‌زاده، بختیار؛ دیده‌بان، خلیل؛ غلام‌نیا، خلیل. (۱۳۹۵). برآورد دمای سطح زمین با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ و الگوریتم پنجره مجزا (مطالعه موردی: حوضه آبریز مهاباد)، فصلنامه علمی-پژوهشی اطلاعات جغرافیایی «سپهر»، ۲۵(۹۸): ۱۷۱-۱۸۱.

<https://doi.org/10.22131/sepehr.2016.22145>

کیاوردز مقدم، مجید؛ صمدزادگان، فرهاد، نوراللهی، یونس؛ شریفی، محمدعلی. (۱۳۹۴). شناسایی نقاط آنومالی حرارتی سطح زمین باهدف اکتشاف منابع زمین‌گرمایی. همایش ملی ژئوماتیک.

<https://sid.ir/paper/893047/fa>

کی‌نژاد، صبا؛ مختاری، احمدرضا؛ فتحیانپور، نادر. (۱۳۹۰). بررسی پتانسیل منابع زمین‌گرمایی استان آذربایجان شرقی با استفاده از داده‌های زمین‌شناسی و اکتشافی، پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان.

<https://www.virascience.com/thesis/532074/>

مجرد، سعید؛ نجاتی، علی؛ آقاجانی، حمید. (۱۳۹۸). مطالعات سنجش از دور حرارتی و مقایسه آن با مطالعات مغناطیس‌سنجی هواپرد در محدوده شمال سبلان تا سراب به منظور پتانسیل‌یابی مناطق امیدبخش انرژی زمین‌گرمایی، نشریه روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، (۲۰): ۸۰-۶۷.

https://anm.yazd.ac.ir/article_1626.html (doi: 10.29252/anm.2019.9127.1316)

ملکی، سحر؛ احمدی، سمیرا؛ عینعلی، عباس. (۱۳۹۴). آتشفشان سهند، ماهنامه علوم زمین و معدن، (۱۱۲): ۱۷-۱۲.

<https://www.magiran.com/p1452921>

References

- Atmospheric correction module: Quac and flaash user's guide, 2009, ITT Visual Information Solutions, powered by idl, Version(4.7).
- https://www.nv5geospatialsoftware.com/portals/0/pdfs/envi/flaash_module.pdf
- Bastiaanssen, W. G., Pelgrum, H., Wang, J., Ma, Y., Moreno, J. F., Roerink, G. J., & Van der Wal, T, 1998, A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL).: Part 2: Validation. Journal of hydrology, (212): 213-229.
- [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00254-6](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00254-6)
- Cook, M., Schott, J. R., Mandel, J., & Raqueno, N, 2014, Development of an operational calibration methodology for the Landsat thermal data archive and initial testing of the atmospheric compensation component of a Land Surface Temperature (LST) Product from the archive. Remote Sensing, 6(11): 11244-11266.
- <https://doi.org/10.3390/rs6111244>
- Coolbaugh, M. F., Kratt, C., Fallacaro, A., Calvin, W. M., & Taranik, J. V, 2007, Detection of geothermal anomalies using advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) thermal infrared images at Bradys Hot Springs, Nevada, USA. Remote Sensing of Environment, 106(3): 350-359.
- <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.09.001>
- Dash, P., Göttsche, F.M., Olesen, F.S. and Fischer, H. 2001. Retrieval of land surface temperature and emissivity from satellite data: physics, theoretical limitations and current methods. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 29: 23-30.
- <https://doi.org/10.1007/BF02989910>
- Du, C., Ren, H., Qin, Q., Meng, J., & Li, J, 2014, Split-window algorithm for estimating land surface temperature from Landsat 8 TIRS data. In 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, 3578-3581.
- <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6947256>
- Du, C., Ren, H., Qin, Q., Meng, J., & Zhao, S, 2015, A practical split-window algorithm for estimating land surface temperature from Landsat 8 data. Remote sensing, 7(1): 647-665.
- <https://doi.org/10.3390/rs70100647>
- Eneva, M., Coolbaugh, M., & Combs, J, 2006, Application of satellite thermal infrared imagery to geothermal exploration in east central California. GRC Transactions, (30): 407-412.
- <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:130523869>
- García-Haro, F. J., Camacho-de Coca, F., Meliá, J., & Martínez, B, 2005, Operational derivation of vegetation products in the framework of the LSA SAF project. In Proceedings of 2005 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, Dubrovnik, Croatia, 19-23.
- <https://www.researchgate.net/publication/229022280>
- Haselwimmer, C., & Prakash, A, 2013, Thermal infrared remote sensing of geothermal systems. In Thermal infrared remote sensing: sensors, methods, applications Dordrecht: Springer Netherlands, 453-473.
- https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-6639-6_22
- Isaya Ndossi, M., & Avdan, U, 2016, Application of open-source coding technologies in the production of land surface temperature (LST) maps from Landsat: A PyQGIS plugin. Remote sensing, 8(5): 413.
- <https://doi.org/10.3390/rs8050413>
- Jiménez-Muñoz, J. C., & Sobrino, J. A, 2008, Split-window coefficients for land surface temperature retrieval from low-resolution thermal infrared sensors. IEEE geoscience and remote sensing letters, 5(4):806-809.
- <http://dx.doi.org/10.1109/LGRS.2008.2001636>

- Jimenez-Munoz, J. C., Sobrino, J. A., kkoković, D., Mattar, C., & Cristobal, J., 2014, Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data. *IEEE Geoscience and remote sensing letters*, 11(10): 1840-1843.
<https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2312032>
- Kogan, F., 1993, United States droughts of late 1980's as seen by NOAA polar orbiting satellites. In *Proceedings of IGARSS'93-IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, IEEE, 197-199.
<https://doi.org/10.1109/IGARSS.1993.322522>
- Lee, K., 1978, Analysis of thermal infrared imagery of the Black Rock Desert geothermal area, *Colorado School of Mines Quarterly*, 4 (2): 31-44.
<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:130181817>
- Li, Z.L.; Tang, B-H.; Wu, H.; Ren, H.; Yan, G.; Wan, Z.; Trigo, I.F. and Sobrino, J.A. (2013). Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives, *Remote Sensing of Environment*, 131: 14-37.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.12.008>
- LU, S. L., SHEN, X. H., ZOU, L. J., ZHANG, G. F., WU, W. Y., LI, C. J., & MAO, Y. J., 2008, Remote sensing image enhancement method of the fault thermal information based on scale analysis: A case study of Jiangshan-Shaoxing Fault between Jinhua and Quzhou of Zhejiang Province, China. *Chinese Journal of Geophysics*, 51(5): 1048-1058.
<http://dx.doi.org/10.1002/cjg2.1299>
- McMillin, L. M., 1975, Estimation of sea surface temperatures from two infrared window measurements with different absorption. *Journal of geophysical research*, 80(36): 5113-5117.
<https://doi.org/10.1029/JC080i036p05113>
- Melesse, A. M., & Nangia, V., 2005, Estimation of spatially distributed surface energy fluxes using remotely-sensed data for agricultural fields. *Hydrological Processes: An International Journal*, 19(14): 2653-2670.
<https://doi.org/10.1002/hyp.5779>
- Motahhar, S., 2016, Renewable energy education in Iran. *Iranian Journal of Engineering Education*, 18(69): 77-90.
<https://doi.org/10.22047/ijee.2016.14608>
- Ou, X., Jin, Z., Wang, L., Xu, H. J., & Jin, S. Y., 2004, Thermal conductivity and its anisotropy of rocks from the depth of 100 similar to 2000m mainhole of Chinese Continental Scientific Drilling: Revelations to the study on thermal structure of subduction zone. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 109-118.
<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:130002059>
- Peng, F., Xiong, Y. Z., Cheng, Y. X., Fan, Q. C., & Huang, S. P., 2013, Towards Application of remote sensing technology in geothermal prospecting in Xilingol in eastern Inner Mongolia, NE China. *Advanced Materials Research*, (610): 3628-3631.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.610-613.3628>
- Qin, Z., & Karnieli, A., 1999, Progress in the remote sensing of land surface temperature and ground emissivity using NOAA-AVHRR data. *International journal of remote sensing*, 20(12): 2367-2393.
<https://doi.org/10.1080/014311699212074>
- Richter, R., & Schläpfer, D., 2013, Atmospheric/Topographic Correction for Satellite Imagery (ATCOR-2/3 UserGuide, Version 8.3. 1, February 2014), 2-238.
https://www.academia.edu/download/34690612/atcor3_manual_2013.pdf
- Rongali, G., Keshari, A. K., Gosain, A. K., & Khosa, R., 2018, Split-window algorithm for retrieval of land surface temperature using Landsat 8 thermal infrared data. *Journal of Geovisualization and Spatial Analysis*, (2): 1-19.
<https://doi.org/10.1007/s41651-018-0021-y>

Rozenstein, O., Qin, Z., Derimian, Y., & Karnieli, A, 2014, Derivation of land surface temperature for Landsat-8 TIRS using a split window algorithm. *Sensors*, 14(4): 5768-5780.

<https://doi.org/10.3390/s140405768>

Sanyal, S. K, 2018, Sustainability and renewability of geothermal power capacity. In: L.Y. Bronicki (Eds), *Geology and Hydrology of Geothermal Energy*, Springer, New York, N, 47-60.

http://repository.usgin.org/sites/default/files/dlio/files/2011/u19/sustainability_renewability_of_geothermal_power_capacity.pdf

Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., & Paolini, L, 2004, Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of environment*, 90(4): 434-440.

<https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.02.003>

Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., Sòria, G., Gómez, M., Ortiz, A. B., Romaguera, M., ... & Libonati, R, 2008, Thermal remote sensing in the framework of the SEN2FLEX project: field measurements, airborne data and applications. *International Journal of Remote Sensing*, 29(17-18): 4961-4991.

<https://doi.org/10.1080/01431160802036516>

Sobrino, J. A., Li, Z. L., Stoll, M. P., & Becker, F, 1997, Multi-channel and multi-angle algorithms for estimating sea and land surface temperature with ATSR data. *Oceanographic Literature Review*, 2(44): 162-163.

<https://doi.org/10.1080/01431169608948760>

Xiao, J., & Moody, A. (2005). A comparison of methods for estimating fractional green vegetation cover within a desert-to-upland transition zone in central New Mexico, USA. *Remote sensing of environment*, 98(2-3), 237-250.

<https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.07.011>

Yamaguchi Y., Hase H., Ogawa K, 1992, Remote sensing for geothermal applications. *Episodes Journal of International Geoscience*.15(1): 62-7.

<https://doi.org/10.18814/epiugs/1992/v15i1/010>

