



Quantifying the impact of surface and climatic factors on changes in land surface temperature in the Kardeh watershed

Maryam Akbari,¹ Hossein Malekinezhad,^{2*}  Mahboobeh Hajibigloo³

1. Ph.D Student in Watershed Sciences and Engineering, Faculty of Natural Resources and Desert Studies, Yazd University, Yazd, Iran. Email: akbari.maryam035@gmail.com
2. Associate Professor, Rangeland and Watershed Group, Faculty of Natural Resources and Desert Studies, Yazd University, Yazd, Iran; (Corresponding author). Email: hmalekinezhad@yazd.ac.ir
3. Ph.D in Watershed Sciences and Engineering, Faculty of Rangeland and Watershed, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. Email: hajibigloo@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received 18 June 2025
Received in revised form 09 July 2025
Accepted 02 September 2025
Available online 23 September 2025

Keywords:

Bivariate enhancement,
Land surface temperature,
Driving factors,
Geographic detector model,
Spatial heterogeneity

ABSTRACT

Research Topic: This study used surface and climate data in 2020 to analyze the relationships between LST and driving factors using correlation analysis and spatial regression models.

Objective: The objectives of the present study are: (1) to investigate the spatial variations of LST in the Kardeh River Basin, (2) to measure the explanatory power of natural and human factors and their interactions on LST changes, and (3) to determine the appropriate ranges of the main driving factors that can affect the LST of the region. In general, this study uses the Geodetector model to analyze the spatial heterogeneity of LST and investigate the driving factors on this heterogeneity and provides a ranking of the importance of the factors.

Method: In the present study, considering LST as the dependent variable, 9 driving forces including topography (elevation, slope, aspect), land use, vegetation, average annual precipitation, distance from residential area, distance from road and distance from river were considered as independent variables. Then, based on data classification, 21404 random points were generated using the Fishnet feature in ArcGIS and the LST layer and other classified environmental factors were spatially overlapped. Finally, the values of raster cells with the generated random points were extracted and a descriptive table was obtained to determine the correlation between LST and driving parameters and the outputs were implemented in the Geodetector model.

Results: The results show that the changes in LST of the basin are affected by natural conditions and human activities. The average LST in the Kardeh River basin is 33.37 degrees Celsius, which is the highest value in the plains and the lowest value in the highlands and mountainous areas. Therefore, the altitude parameter is the most effective factor on the spatial variability of LST in the study area. According to the results, in the first place, altitude, then land use and average annual precipitation have explanatory power of 43.17%, 31.29% and 21.23%, respectively. The results of the interactive detector analysis showed a two-factor increase for both factors, and the interaction between altitude and land use expressed the highest explanatory power (0.64). Also, the interaction between the altitude factor and other parameters with the highest q value ranged from 0.43 to 0.60. In addition, we determined the optimal range of specific variables that affect LST; Which showed that the low-lying, low-elevation, and shallow-slope areas of the basin are mainly dominated by the intensity of human activities and dryland agriculture and interact with terrestrial factors; as a result, they have the highest temperature.

Conclusions: These findings will help facilitate sustainable management of climate change, analyze surface environmental models and environmental protection, and also improve land management strategies in the Kardeh River Basin and other regions with arid and semi-arid climates.

Cite this article: Akbari, M., Malekinezhad, H., Hajibigloo, M. (2025). Quantifying the impact of surface and climatic factors on changes in land surface temperature in the Kardeh watershed. *ECOHYDROLOGY*, 12(3), 883-900. <http://doi.org/10.22059/IJE.2025.396399.1872>



© Maryam Akbari, Hossein Malekinezhad, Mahboobeh Hajibigloo.

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/IJE.2025.396399.1872>

Background and Objective

Land surface temperature (LST) is an important parameter that reflects the Earth's energy balance and plays an important role in understanding climate change. In mountainous areas, the spatiotemporal distribution of land surface temperature is strongly affected by topographic slopes, vegetation cover, and various land uses. Therefore, as a key factor in the physical processes of the Earth's surface at global and regional scales, analyzing the divergence of the spatial and temporal pattern and spatial heterogeneity of land surface temperature (LST) is essential for analyzing regional climate change processes and their driving mechanisms. Therefore, identifying the main drivers of LST is a very efficient practice for the climate system and ecosystems, and even for human life. Considering that there has been no research on the relationship between surface and climatic factors with LST in the Kardeh Mountain Basin, and the nonlinearity of the effects of factors and the way factors interact has not been sufficiently considered in other studies, in the present study, we selected LST as a dependent variable along with a Geodetector to investigate the impact of human and natural forces on LST changes. The objectives of the present study are: (1) to investigate the spatial changes of LST in the Kardeh River Basin, (2) to measure the explanatory power of natural and human factors and their interactions on LST changes, and (3) to determine the appropriate ranges of the main driving factors that can affect the LST of the region. In general, this study uses the Geodetector model to analyze the spatial heterogeneity of LST and investigate the driving factors on this heterogeneity, and provides a ranking of the importance of the factors.

Materials and Methods

This study used surface and climate data in 2020 to analyze the relationships between LST and driving factors using correlation analysis and spatial regression models. Therefore, in the present study, we quantified the impact of natural and human factors on LST in the Kardeh Basin using the Geodetector model. Considering LST as the dependent variable, 9 driving forces including topography (elevation, slope, aspect), land use, vegetation, average annual precipitation, distance from residential area, distance from road, and distance from river were considered as independent variables. Then, based on the data classification, 21,404 random points were generated using the Fishnet feature in ArcGIS, and the LST layer and other classified environmental factors were spatially overlapped. Then, the values of the raster cells with the generated random points were extracted, and a descriptive table was obtained to quantify the correlation between LST and driving parameters, and the outputs were implemented in the Geodetector model.

Findings

The results show that the changes in LST of the basin are affected by natural conditions and human activities. The average LST in the Kardeh River basin is 33.37 degrees Celsius, which is the highest value in the plains and the lowest value in the highlands and mountainous areas. Therefore, the altitude parameter is the most effective factor on the spatial variability of LST in the study area. According to the results, altitude first, then land use and average annual precipitation have explanatory power of 17.43%, 29.31% and 23.21%, respectively. The results of the interactive detector analysis showed a two-factor increase for both factors, and the interaction between altitude and land use expressed the highest explanatory power (0.64). Also, the interaction between the altitude factor and other parameters with the highest q value ranged from 0.43 to 0.60. In addition, we determined the optimal range of specific variables that affect LST. It showed that the low-lying, low-elevation, and low-slope areas of the basin are mainly dominated by the intensity of human activities and rainfed agriculture and interact with terrestrial factors, resulting in the highest temperatures. These findings will help facilitate sustainable management of climate change, analyze surface environmental models, and protect the environment, as well as improve land management strategies in the Kardeh River Basin and other regions with arid and semi-arid climates.

Conclusion

In this study, the response of natural and human factors to LST change in a mountainous area was measured using a geodetector. Regarding interactions, interactions between natural factors such as elevation and human factors represented by land use are the main factors affecting LST changes in the

Kardeh River Basin. Future research can consider the effects of other driving factors such as groundwater depth, soil moisture, and other climatic parameters (solar radiation, evapotranspiration, air pressure, etc.) on LST. In future studies, the interactive relationship between driving factors and LST changes can be investigated using the integration of artificial intelligence algorithms with natural sciences to automatically identify more complex patterns and relationships in the data. On the other hand, it motivates researchers to deeply understand advanced applications of natural sciences based on artificial intelligence, and thereby contribute to the continuous development of these sciences.

Author Contributions

All authors participated in the design and development of the research project. The initial version of the article was written by Maryam Akbari, and all authors reviewed subsequent versions of the article and provided their views. Finally, all authors read and approved the final version of the article.

Ethical considerations

All stages of conducting and writing this research were carried out in accordance with scientific principles and ethical standards.

Acknowledgements

The authors of the article would like to express their deepest gratitude for the support of Yazd University and all those who helped us in conducting this research.

Funding

The authors declare that they did not receive any funding or financial support in conducting this research.

Conflict of interest

The authors declare that there are no conflicts of interest in this research.

کمی سازی تأثیر عوامل سطحی و اقلیمی بر تغییرات دمای سطح زمین حوضه آبخیز کارده

مریم اکبری^۱، حسین ملکی نژاد^{۲*}، محبوبه حاجی بیگلر^۳

۱. دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران. رایانامه: akbari.maryam035@gmail.com

۲. دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران (نویسنده مسئول). رایانامه: hmalekinezhad@yazd.ac.ir

۳. دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: hajibigloo@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۲۸ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۱ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱ کلیدواژه‌ها: افزایش دوعاملی، دمای سطح زمین، عوامل محرک، مدل آشکارساز جغرافیایی، ناهمگونی مکانی.	موضوع: این مطالعه با استفاده از تحلیل همبستگی و مدل رگرسیون مکانی، از داده‌های سطحی و اقلیمی در سال ۲۰۲۰ استفاده کرد تا روابط بین LST و عوامل محرک را تجزیه و تحلیل کند. هدف: هدف از پژوهش حاضر عبارت‌اند از: ۱. بررسی تغییرات مکانی LST در حوضه رودخانه کارده؛ ۲. اندازه‌گیری قدرت توضیحی عوامل طبیعی و انسانی و تعاملات آن‌ها بر تغییرات LST؛ ۳. تعیین محدوده‌های مناسب عوامل محرک اصلی که می‌توانند بر LST منطقه تأثیر داشته باشند. به‌طور کلی، این مطالعه از مدل Geodetector برای تجزیه و تحلیل ناهمگونی مکانی LST و بررسی عوامل محرک بر این ناهمگونی استفاده می‌کند و رتبه‌بندی اهمیت عوامل را ارائه می‌دهد. روش تحقیق: در پژوهش حاضر با در نظر گرفتن LST به‌عنوان متغیر وابسته، ۹ نیروی محرکه شامل توپوگرافی (ارتفاع، شیب، جهت)، کاربری اراضی، پوشش گیاهی، متوسط بارش سالانه، فاصله از منطقه مسکونی، فاصله از جاده و فاصله از رودخانه به‌عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شدند. سپس براساس طبقه‌بندی داده‌ها، ۲۱۴۰۴ نقطه تصادفی با استفاده از ویژگی Fishnet در ArcGIS تولید شد و لایه LST و سایر عوامل محیطی طبقه‌بندی شده به‌صورت مکانی روی هم قرار گرفتند. در نهایت، مقادیر سول‌های رستری با نقاط تصادفی ایجاد شده استخراج شدند و یک جدول توصیفی برای تعیین کمیت همبستگی بین LST و پارامترهای محرک به دست آمد و خروجی‌ها در مدل Geodetector اجرا گردید. یافته‌ها: نتایج نشان می‌دهد که تغییرات LST حوضه تحت تأثیر شرایط طبیعی و فعالیت‌های انسانی است. میانگین LST در حوضه رودخانه کارده، ۳۳/۳۷ درجه سانتی‌گراد است که در دشت‌ها بالاترین مقدار و در مناطق مرتفع و کوهستانی پایین‌ترین مقدار است. لذا پارامتر ارتفاع مؤثرترین عامل بر تغییرپذیری مکانی LST در منطقه مورد مطالعه است. با توجه به نتایج در درجه اول ارتفاع، سپس کاربری اراضی و متوسط بارش سالانه به‌ترتیب دارای قدرت توضیحی ۴۳/۱۷ درصد، ۳۱/۲۹ درصد و ۲۱/۲۳ درصد هستند. نتایج تحلیل آشکارساز تعاملی، افزایش دوعاملی را برای هر دو عامل نشان داد و تعامل بین ارتفاع و کاربری اراضی بالاترین قدرت توضیحی (۰/۶۴) را بیان کرد. همچنین تعامل بین فاکتور ارتفاع و سایر پارامترها با بالاترین مقدار q ۰/۴۳ تا ۰/۶۰ متغیر بود. علاوه بر این، ما محدوده بهینه متغیرهای خاص را که تأثیرگذار بر LST است، تعیین کردیم؛ که نشان داد مناطق پست و کم‌ارتفاع و کم‌شیب حوضه عمدتاً تحت سلطه شدت فعالیت‌های انسانی و زراعت دیم است و با عوامل زمینی در تعامل است؛ در نتیجه بیشترین دما را به خود اختصاص داده است. نتیجه‌گیری: این یافته‌ها به تسهیل مدیریت پایدار تغییرات اقلیمی، تجزیه و تحلیل مدل‌های محیطی سطحی و حفاظت از محیط زیست و همچنین بهبود راهبردهای مدیریت زمین در حوضه رودخانه کارده و سایر مناطق با اقلیم خشک و نیمه‌خشک کمک خواهد کرد.

استناد: اکبری، مریم؛ ملکی نژاد، حسین؛ حاجی بیگلر، محبوبه. کمی سازی تأثیر عوامل سطحی و اقلیمی بر تغییرات دمای سطح زمین حوضه آبخیز کارده. *اکوهیدرولوژی*، ۹۰۰-۸۸۳، (۳) ۱۲.

<http://doi.org/10.22059/IJE.2025.396399.1872>

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران. © مریم اکبری، حسین ملکی نژاد، محبوبه حاجی بیگلر.



مقدمه

دمای سطح زمین^۱ (LST) پارامتر مهمی است که نشان‌دهنده تعادل انرژی زمین است و نقش مهمی در درک تغییرات اقلیمی ایفا می‌کند. در مناطق کوهستانی، توزیع مکانی-زمانی دمای سطح زمین به شدت تحت تأثیر شیب‌های توپوگرافی، پوشش گیاهی و انواع مختلف کاربری‌ها قرار می‌گیرد. توپوگرافی با تغییر شرایط روشنایی سطح در شیب‌ها و جهات مختلف، بر LST تأثیر می‌گذارد. برای مثال، در نیمکره شمالی، دامنه‌های رو به شمال تابش کمتری نسبت به دامنه‌های جنوبی تجربه می‌کنند و بنابراین LST پایینی دارند (اولاه^۲ و همکاران، ۲۰۲۳). تغییرات در کاربری زمین نیز بر میزان جذب تابش خورشیدی، دمای سطح، میزان تبخیر، انتقال گرما از خاک، ذخیره گرما و تلاطم باد تأثیر خواهد گذاشت (هیوا و پینگ^۳، ۲۰۱۸). لذا LST از طریق بازتاب و زبری سطح تحت تأثیر انواع LULC قرار می‌گیرد و منجر به تفاوت‌های LST بین انواع LULC می‌شود (هو و جیا^۴، ۲۰۱۱؛ لای^۵ و همکاران، ۲۰۱۷). پوشش گیاهی نیز با جذب و انعکاس انرژی تابشی خورشید و کنترل تبادل گرمای نهان و محسوس، می‌تواند بر LST تأثیر بگذارد (اولاه و همکاران، ۲۰۲۳)؛ لذا به عنوان یک عامل کلیدی در فرایندهای فیزیکی سطح زمین در مقیاس‌های جهانی و منطقه‌ای، آنالیز واگرایی الگوی مکانی و زمانی و ناهمگونی مکانی دمای سطح زمین (LST) برای تجزیه و تحلیل فرایندهای تغییر اقلیم منطقه‌ای و مکانیسم‌های محرک آن ضروری است (شای^۶ و همکاران، ۲۰۲۳). بنابراین شناسایی محرک‌های اصلی LST یک عمل بسیار کارآمد برای سیستم اقلیمی و اکوسیستم‌ها و حتی برای زندگی انسان به شمار می‌رود (یو، فانگ و ژتو^۷، ۲۰۲۳).

پیشینه پژوهش

LST معمولاً تحت تأثیر عوامل متعدد قرار می‌گیرد و تعاملات آن‌ها کاملاً پیچیده است. روش‌های آماری مبتنی بر خط از جمله ضریب همبستگی پیرسون، تحلیل رگرسیون خطی و رگرسیون خطی چندگانه گام به گام، به طور گسترده در مطالعات مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با این حال، روش‌های ذکر شده نمی‌توانند به طور کافی همبستگی‌های غیرخطی بین LST و عوامل مختلف را اندازه‌گیری کنند (هو و همکاران، ۲۰۲۰)، یا نمی‌توانند با داده‌های طبقه‌بندی شده سروکار داشته باشند (کوی^۸ و همکاران، ۲۰۱۹). اکثر مطالعات فاقد بررسی کمی مستقیم روابط متغیرها هستند و تعاملات بین عوامل را در نظر نمی‌گیرند. لذا بیشتر مطالعات صورت گرفته روی LST عمدتاً بر رابطه بین LST و تغییرات در نوع پوشش زمین و NDVI (کاکه ممی و همکاران، ۱۳۹۹؛ خدائی و زندی، ۱۴۰۳؛ عابدینی و پاسبان، ۱۴۰۲؛ میکائیلی حاجی‌کندی، سبحانی و ورامش، ۱۴۰۰؛ یاسین و خوان، ۲۰۲۲؛ شولیهه و شیباتا^۹، ۲۰۱۹؛ نصر من الله^{۱۱}، ۲۰۲۰؛ سینگ^{۱۲} و همکاران، ۲۰۲۴) تمرکز کرده است. در سال‌های اخیر، مدل‌ها و روش‌های تحلیلی جدیدی از جمله تحلیل موجک متقاطع حداقل مربعات (قادرپور، اینس و پاگیا تاکیس^{۱۳}، ۲۰۱۸)، ماشین‌های بردار پشتیبان (هانگ^{۱۴} و همکاران، ۲۰۲۰) و مدل آشکارساز جغرافیائی (وانگ، ژانگ و فیو^{۱۵}، ۲۰۱۶) توسعه یافته‌اند. مدل آشکارساز جغرافیائی^{۱۶} (Geodetector) ابزاری جدید برای اندازه‌گیری، کاوش و تحلیل ناهمگونی فضایی است. این مدل می‌تواند به طور عینی اولویت هر عامل محرک و تأثیر مشترک بین عوامل در پدیده‌های جغرافیائی را منعکس کند. این رویکرد، صرف‌نظر از اینکه همبستگی بین

1. Land Surface Temperature
2. Ullah
3. Hua & Ping
4. Hu & Jia
5. Li
6. Xi
7. Yu, Fang & Zhuo
8. Cui
9. Yaseen & Khan
10. Sholihah & Shibata
11. Nasar-u-Minallah
12. Sing
13. Ghaderpour, Ince & Pagiatakis
14. Huang
15. Wang, Zhang & Fu
16. Geodetector

متغیرها خطی یا غیرخطی باشد، امکان شناسایی و بررسی ناهمگونی و لایه‌بندی جغرافیایی را فراهم می‌کند (وانگ و شو،^۱ ۲۰۱۷). محققان برای بررسی عوامل محرک بر ناهمگونی مکانی LST مطالعاتی به شرح زیر انجام داده‌اند:

شوی^۲ و همکاران (۲۰۲۵) با استفاده از تحلیل همبستگی و مدل‌های رگرسیون مکانی (مدل Geodetector)، روابط بین LST و دو عامل محرک پوشش زمین و مدل ارتفاعی رقومی (DEM) را در چین مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد پهنه‌های آبی و جنگل بیشترین تأثیر خنک‌کنندگی را بر LST داشتند. زمین‌های بلااستفاده نیز تأثیر بیشتری بر افزایش LST داشتند. به‌طوری‌که به‌ازای هر ۱ درصد افزایش در نسبت زمین‌های بلااستفاده، دمای سطح زمین ۰/۲۵ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت. شنگ^۳ و همکاران همکاران (۲۰۲۴) در بررسی مقایسه‌ی فصلی عوامل غالب دمای سطح زمین در فلات تبت به این نتیجه رسیدند که سه عامل، دمای هوا، ارتفاع و پایداری حرارتی دائمی یخبندان^۴ (PTS)، تأثیر قابل توجهی بر LST در تمام فصول دارند، درحالی‌که سایر متغیرها بسته به فصل، سهم متفاوتی در LST نشان دادند. یو و همکاران (۲۰۲۳) برای درک عوامل محرک بر ناهمگونی مکانی LST و سهم آن‌ها، با استفاده از GeoDetector، به این نتیجه رسیدند که قدرت توضیحی دمای هوا برای تأثیرگذاری بر ناهمگونی مکانی LST در هر سال با میانگین ۰/۷۴ بیشترین مقدار و پس از آن بخار آب با میانگین ۰/۷ قرار دارد. با این حال، نوع پوشش زمین تأثیری بر ناهمگونی مکانی LST برای تحلیل تک‌متغیره در این مطالعه نداشت. تحلیل برهم‌کنش نیز نشان داد که دمای هوا قوی‌ترین تعامل را با قدرت تأثیر در محدوده ۰/۷۳ تا ۰/۸ با سایر عوامل داشت. وانگ و همکاران (۲۰۲۱) تأثیرات پارامترهای سطح زمین بر LST را براساس مدل Geodetector در حوضه سیردریا، آسیای مرکزی مورد تحلیل قرار دادند. براساس مدل مذکور، مشخص شد که ارتفاع، توزیع LST (۸۴-۹۰ درصد) و تغییرات مکانی-زمانی (۲۲-۲۶ درصد) را بیشتر از سایر پارامترهای سطح زمین توضیح می‌دهد. امامی و کابلی‌زاده (۱۴۰۴) در بررسی روند تغییرات دمای سطحی در شهر اهواز با استفاده از روش‌های OLS و GWR، به این نتیجه رسیدند که همه پارامترهای مستقل کاربری شهری (فاصله از مناطق مسکونی، فاصله از فضای سبز، فاصله از رودخانه، فاصله از صنایع و فاصله از جاده) معنی‌دار هستند و مدل رگرسیون جغرافیایی وزنی^۵ (GWR) نتایج بهتری نسبت به مدل حداقل مربعات معمولی^۶ (OLS) در منطقه مورد مطالعه داشته است. پرور، محمدزاده و سعیدی (۱۴۰۱) ناهمگونی فضایی و عوامل مؤثر بر دمای سطح زمین با استفاده از مدل‌های رگرسیون فضایی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعه بیانگر توانایی بیشتر و پیش‌بینی دقیق‌تر رویکرد GWR نسبت به OLS برای توصیف ناهمگونی فضایی است. پاسخ فضایی دماهای سطح زمین و متغیرهای مختلف تأثیرگذار از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۱ نشان داد توسعه فضای سبز نقش مهمی در تعدیل دماهای سطح زمین ایفا می‌کند.

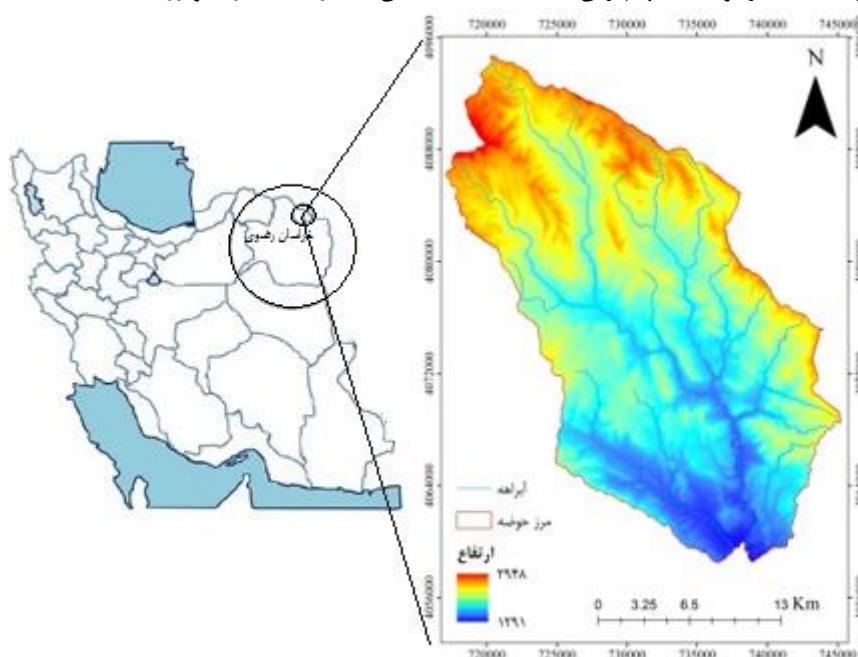
سد بتنی کارده که بر روی رودخانه کارده ساخته شده است، بخش عمده‌ای از آب شرب و کشاورزی شهر مشهد را تأمین می‌کند؛ و از آنجاکه مقادیر ناچیز بارندگی در مناطق نیمه‌خشک و وضعیت تبخیر از سطوح آبی دریاچه‌ها، مخازن و برکه‌ها در نحوه بهره‌برداری بهینه از منابع آبی بسیار مؤثر است، بررسی تأثیر عوامل انسانی و طبیعی بر تغییرات LST می‌تواند در امر برنامه‌ریزی مدیران مفید واقع شود تا گرمایش جهانی، شیوه‌های استفاده از زمین و پیش‌بینی خشکسالی را مد نظر قرار دهند. همچنین با عنایت به اینکه تحقیقاتی در مورد بررسی رابطه بین عوامل سطحی و اقلیمی با LST در حوضه کوهستانی کارده انجام نگرفته، همچنین غیرخطی بودن اثرات عوامل و نحوه تعامل عوامل به‌اندازه کافی در سایر مطالعات در نظر گرفته نشده است، لذا در پژوهش حاضر LST را به‌عنوان یک متغیر وابسته همراه با یک Geodetector برای بررسی تأثیر نیروهای انسانی و طبیعی بر تغییرات LST انتخاب کردیم. هدف از پژوهش حاضر عبارت است از: ۱. بررسی تغییرات مکانی LST در حوضه رودخانه کارده؛ ۲. اندازه‌گیری قدرت توضیحی عوامل طبیعی و انسانی و تعاملات آن‌ها بر تغییرات LST؛ ۳. تعیین محدوده‌های مناسب عوامل محرک اصلی که می‌توانند بر LST منطقه تأثیر داشته باشند. به‌طور کلی، این مطالعه از مدل Geodetector برای تجزیه و تحلیل ناهمگونی مکانی LST و بررسی عوامل محرک بر این ناهمگونی استفاده می‌کند و رتبه‌بندی اهمیت عوامل را ارائه می‌دهد.

1. Wang & Xu
2. Shui
3. Sheng
4. Permafrost Thermal Stability
5. Geographically Weighted Regression
6. Ordinary least squares

روش‌شناسی پژوهش

منطقه مورد مطالعه

حوضه رودخانه کارده با مساحتی حدود ۵۵۰ کیلومتر مربع در شمال شرق ایران و در ۴۲ کیلومتری شمال شهر مشهد واقع است. این حوضه در دامنه‌های جنوبی رشته‌کوه‌های هزار مسجد در محدوده مختصات $10^{\circ} 59'$ تا $40^{\circ} 59'$ طول شرقی و $35^{\circ} 36'$ تا $59^{\circ} 36'$ عرض شمالی قرار دارد (شکل ۱). حوضه کارده، حوضه‌ای کوهستانی و دارای دامنه‌هایی با شیب نسبتاً تند بوده و رودخانه کارده یکی از سرشاخه‌های کشف‌رود در حوضه قره‌قوم است. بلندترین نقطه آن در ارتفاعات هزارمسجد با ارتفاع ۲۹۴۸ متر و پست‌ترین نقطه آن در محل سد کارده با ارتفاع ۱۲۹۱ متر و ارتفاع متوسط آن از سطح دریا ۲۱۲۰ متر است. متوسط بارندگی سالانه ۳۶۷ میلی‌متر و متوسط دمای سالانه به $6/5$ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. این منطقه براساس روش آمبرژه جزء مناطق خشک سرد به شمار می‌آید. شکل عمومی آن به‌صورت کشیده و مستطیلی و شیب متوسط منطقه ۳۴ درجه و محیط حوضه ۱۱۷ کیلومتر است. وضعیت زمین‌شناسی حوضه مربوط به بخشی از زون کپه‌داغ شمال شرق ایران بوده و دارای سازندهای غالباً آهکی و شامل کشف‌رود، مزدوران یک، مزدوران دو، مزدوران سه، شورجه، رسوبات تئوزن و نهشته‌های آبرفتی است. خاک‌های سطحی حوضه دارای منشأ رسوبی و مربوط به دوران دوم و سوم زمین‌شناسی بوده و بخش اصلی به‌صورت صخره‌ای و شامل خاک‌های کم‌عمق تا نیمه‌عمیق و از نظر بافتی عمدتاً دارای بافت سطحی لومی تا لومی-رسی-شنی و با مواد آلی بیش از ۱ درصد است. حوضه کارده دارای ۱۳ روستا با جمعیت حدود ۹۰۱۰ نفر بوده که مهم‌ترین فعالیت اقتصادی آنان دامداری، باغداری و زراعت است.

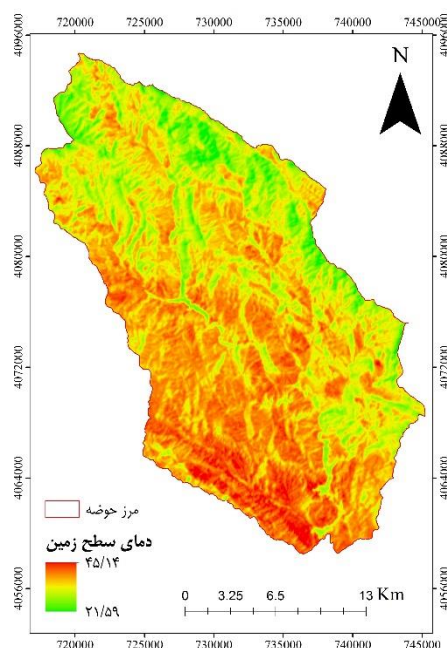


شکل ۱. موقعیت حوضه رودخانه کارده در استان خراسان رضوی، ایران

روش تحقیق

محاسبه دمای سطح زمین

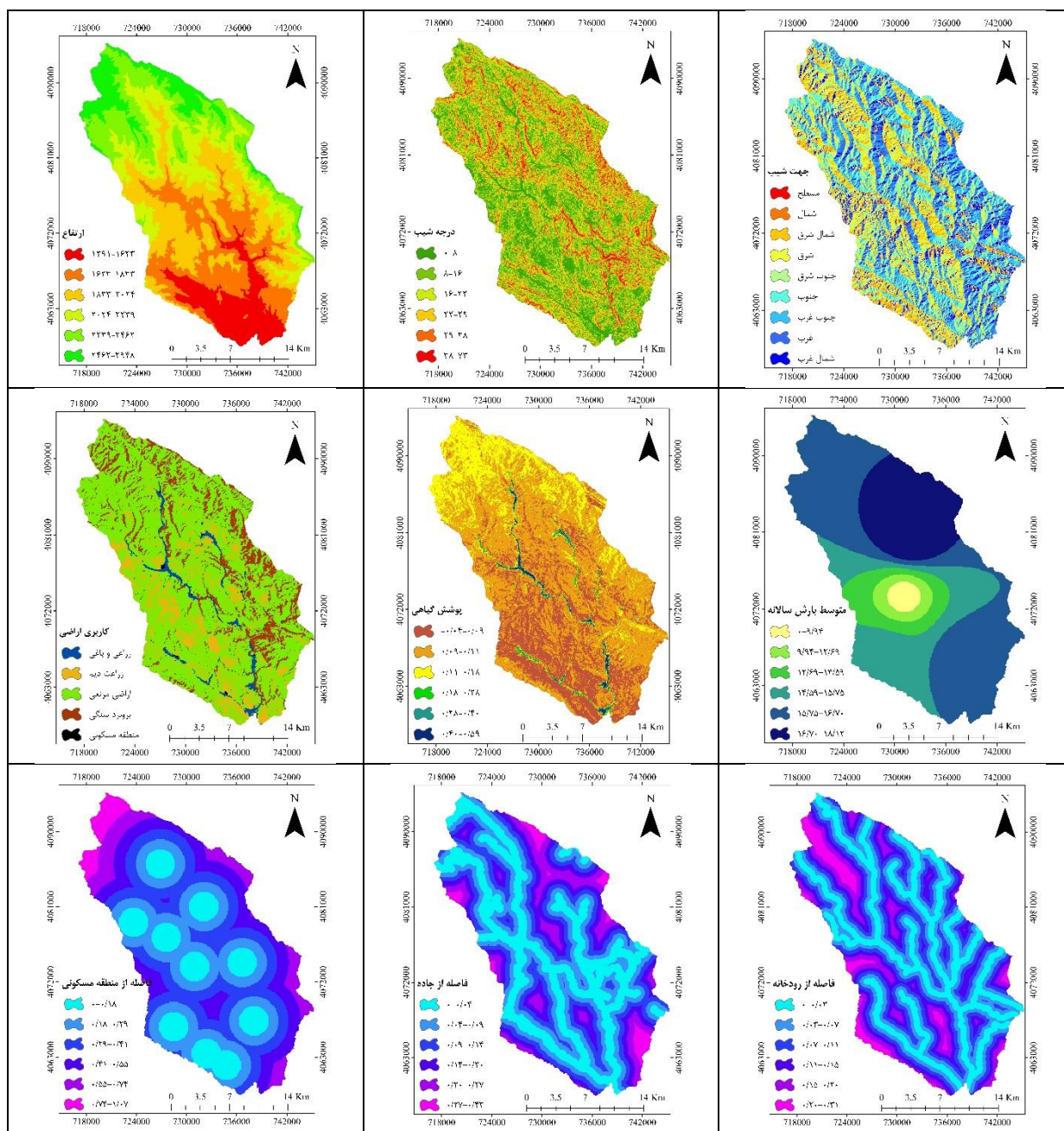
دمای سطح زمین (LST) یک متغیر ضروری در درک فرایندهای سطح زمین و پدیده محیطی موجود در زمین است (بیکر و لای، ۱۹۹۰؛ خاندلوال^۲ و همکاران، ۲۰۱۸). در پژوهش حاضر، باند حرارتی ۱۰ لندست ۸ برای سال ۲۰۲۰ جهت محاسبه LST حوضه رودخانه کارده مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۲).



شکل ۲. توزیع مکانی LST در حوضه رودخانه کارده

پارامترهای محرک و فرایند آماده‌سازی داده‌ها

دمای سطح زمین تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله تغییرات میزان توپوگرافی، کاربری اراضی، مناطق نفوذناپذیر، شرایط اقلیمی و... قرار دارد و با تغییر هریک از آن‌ها دستخوش تغییراتی می‌گردد. با در نظر گرفتن LST به‌عنوان متغیر وابسته، در پژوهش حاضر ۹ نیروی محرکه شامل توپوگرافی (ارتفاع، شیب، جهت)، کاربری اراضی، پوشش گیاهی، متوسط بارش سالانه، فاصله از منطقه مسکونی، فاصله از جاده و فاصله از رودخانه با توجه به کوهستانی بودن حوضه کارده و همچنین گسترش مناطق مسکونی در حاشیه رودخانه کارده و به‌تبع آن، افزایش فعالیت‌های انسانی به‌عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شد. مدل رقومی ارتفاع با وضوح ۳۰ متر با استفاده از سازمان نقشه‌برداری ایران تهیه شد و متعاقباً عوامل شیب، جهت و ارتفاع با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.4 از DEM استخراج گردید. نقشه کاربری اراضی نیز با استفاده از سنجنده OLI/TIRS لندست ۸ برای سال ۲۰۲۰ از سایت سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS) استخراج شد. پس از آماده‌سازی تصاویر، تصحیحات هندسی و رادیومتریکی در نرم‌افزار ENVI 5.3، با استفاده از روش طبقه‌بندی نظارت‌شده (الگوریتم حداکثر احتمال)، نقشه کاربری اراضی حوضه رودخانه کارده به پنج طبقه زراعت آبی و باغی، زراعت دیم، اراضی مرتعی، برونزد سنگی و منطقه مسکونی طبقه‌بندی شد. در فرایند استفاده از Geodetector، داده‌های جهت شیب به نه دسته (مناطق مسطح، شمال، شمال شرقی، شرق، جنوب شرقی، جنوب، جنوب غربی، غرب و شمال غربی) و سایر عوامل محیطی مؤثر بر LST همچون ارتفاع، شیب، متوسط بارش سالانه، پوشش گیاهی، فاصله از منطقه مسکونی، فاصله از جاده و فاصله از رودخانه با استفاده از روش ناپیوستگی طبیعی در ArcGIS 10.4 به‌طور یکنواخت در شش دسته طبقه‌بندی شدند (لایو^۱ و همکاران، ۲۰۲۱a؛ پنگ^۲ و همکاران، ۲۰۱۹) (شکل ۳). سپس براساس طبقه‌بندی داده‌ها، ۲۱۴۰۴ نقطه تصادفی با استفاده از ویژگی Fishnet در ArcGIS تولید شد و در نهایت لایه LST و سایر عوامل محیطی طبقه‌بندی‌شده به‌صورت مکانی روی هم قرار گرفتند. سپس، مقادیر سلول‌های رستری با نقاط تصادفی ایجادشده استخراج شدند و یک جدول توصیفی برای تعیین کمیت همبستگی بین LST و پارامترهای محرک به دست آمد و خروجی‌ها در مدل Geodetector اجرا گردید.



شکل ۳. توزیع مکانی عوامل مؤثر بر LST در حوضه رودخانه کارده

مدل آشکارساز جغرافیایی

Geodetector مجموعه‌ای از روش‌های آماری برای تشخیص ناهمگونی مکانی متغیرها و آشکارسازی محرک‌های آن‌هاست (یانگ^۱ و همکاران، ۲۰۱۸). مزیت این روش این است که نه تنها می‌تواند محرک‌های مؤثر بر تغییرپذیری مکانی متغیر پاسخ، بلکه تأثیر تعامل بین دو محرک بر متغیر پاسخ را نیز تشخیص دهد (وانگ و همکاران، ۲۰۱۰). Geodetector شامل چهار آشکارساز است: آشکارساز عامل^۲ (FD)، آشکارساز تعاملی^۳ (ID)، آشکارساز ریسک^۴ (RD) و آشکارساز اکولوژیکی^۵ (ED). اصول اساسی این چهار آشکارساز به شرح زیر است (یو و همکاران، ۲۰۲۳):

1. Yang
2. Factor detector
3. Interaction detector
4. Risk detector
5. Ecological detector

آشکارساز عامل

آشکارساز عامل برای تعیین میزان تأثیر هر عامل بر تغییرپذیری مکانی $LST(Y)$ استفاده و با استفاده از فرمول زیر محاسبه می شود (گئو^۱ و همکاران، ۲۰۲۴):

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad \text{رابطه ۱}$$

q توانایی عامل محرک X در توضیح توزیع مکانی جغرافیایی LST است. مقدار آن از ۰ تا ۱ متغیر است. هرچه مقدار q بالاتر باشد، توانایی عامل محرک X در توضیح LST قوی تر است. $q = 0$ به این معناست که این دو عامل باهم مرتبط نیستند. متغیر LST یا عامل X را می توان به h دسته مجزا طبقه بندی کرد، $h=1, 2, 3, \dots, L$ ، N_h تعداد واحدها در لایه h و N تعداد کل واحدها در منطقه مورد مطالعه است؛ σ_h^2 واریانس لایه h و σ^2 ارزش کل منطقه Y است.

آشکارساز تعاملی

فاکتور آشکارساز تعاملی برای تعیین اینکه آیا دو عامل بر متغیر وابسته Y اثر متقابل دارند یا خیر، استفاده می شود؛ یعنی اینکه آیا دو عامل باهم قدرت توضیحی LST را افزایش یا کاهش می دهند (یائو^۲ و همکاران، ۲۰۲۴). وقتی عوامل X_i و X_j باهم تعامل دارند، آشکارساز تعاملی، قدرت توضیحی متغیر منطقه ای LST را اندازه گیری می کند. ابتدا، مقادیر q هریک از دو عامل X_i و X_j به طور جداگانه محاسبه می شود: $q(X_i)$ و $q(X_j)$ ، سپس می توان مقدار q تعامل دوعاملی را محاسبه کرد: $q(X_i \cap X_j)$ و در نهایت $q(X_i)$ ، $q(X_j)$ و $q(X_i \cap X_j)$ را باهم مقایسه کرد. جدول ۱ انواع تعاملات را نشان می دهد (وانگ و شو، ۲۰۱۷).

جدول ۱. انواع تعاملات عوامل ژئودکتور

انواع تعامل	توصیفات
کاهش غیرخطی	$q(X_1 \cap X_2) < \min(q(X_1), q(X_2))$
کاهش غیرخطی تک عاملی	$\min(q(X_1), q(X_2)) < q(X_1 \cap X_2) < \max(q(X_1), q(X_2))$
افزایش دوعاملی	$q(X_1 \cap X_2) > \max(q(X_1), q(X_2))$
مستقل	$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$
افزایش غیرخطی	$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$

آشکارساز ریسک

یک آشکارساز ریسک می تواند میانگین متغیر پاسخ را برای هر طبقه از متغیرهای محرک مختلف محاسبه کند و تعیین کند که آیا تفاوت معنی داری بین دو طبقه وجود دارد یا خیر. معناداری تفاوت ها بین طبقات با آماره t آزمایش می شود (یائو و همکاران، ۲۰۲۴؛ گئو و همکاران، ۲۰۲۴):

$$t_{\bar{Y}_{h=1} - \bar{Y}_{h=2}} = \frac{\bar{Y}_{h=1} - \bar{Y}_{h=2}}{\left[\frac{\text{Var}(\bar{Y}_{h=1})}{n_{h=1}} + \frac{\text{Var}(\bar{Y}_{h=2})}{n_{h=2}} \right]^{1/2}} \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن، $\bar{Y}_h$ نشان دهنده میانگین مقدار متغیر LST در طبقه h است؛ n_h تعداد نمونه ها در طبقه h است؛ و Var نشان دهنده واریانس است. آماره t تقریباً از توزیع t استیودنت پیروی می کند (یائو و همکاران، ۲۰۲۴؛ گئو و همکاران، ۲۰۲۴). $H_0: \bar{Y}_{h=1} = \bar{Y}_{h=2}$. اگر H_0 در سطح اطمینان α رد شود، می توان استنباط کرد که تفاوت قابل توجهی بین دو طبقه وجود دارد (گئو و همکاران، ۲۰۲۴).

آشکارساز اکولوژیکی

یک آشکارساز اکولوژیکی برای مقایسه اینکه آیا اثرات عوامل X_1 و X_2 بر توزیع مکانی ویژگی Y ، همان طور که توسط آماره F اندازه گیری شده است (یائو و همکاران، ۲۰۲۴؛ گئو و همکاران، ۲۰۲۴)، تفاوت معناداری دارند یا خیر، استفاده می شود:

$$F = \frac{N_{X1}(N_{X2}-1) \sum_{h=1}^{L1} N_h \sigma_h^2}{N_{X2}(N_{X1}-1) \sum_{h=1}^{L2} N_h \sigma_h^2} \quad \text{رابطه ۳}$$

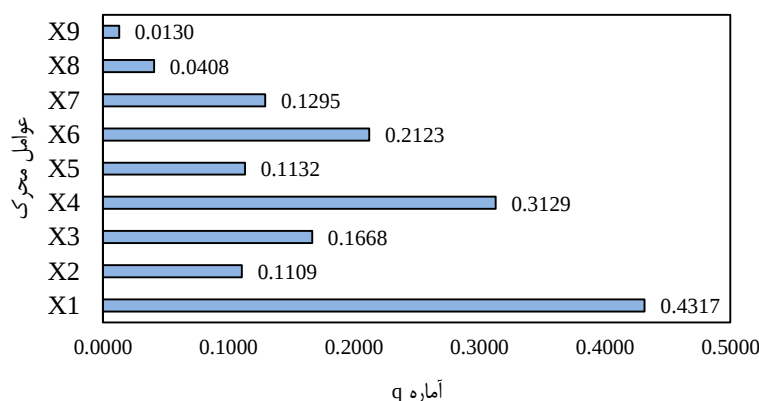
مقادیر نمونه برای X_1 و X_2 به ترتیب N_{X1} و N_{X2} هستند. اعداد طبقه بندی برای X_1 و X_2 به ترتیب L_1 و L_2 هستند. H_0 فرضیه صفر است: $\sum_{h=1}^{L1} N_h \sigma_h^2$ و $\sum_{h=1}^{L2} N_h \sigma_h^2$. اگر فرض H_0 در سطح معنی داری مشخص شده α رد شود، نشان می دهد که تفاوت آماری معنی داری در تأثیر دو عامل X_1 و X_2 بر توزیع جغرافیایی LST وجود دارد (گئو و همکاران، ۲۰۲۴).

یافته های پژوهش

عوامل مؤثر بر توزیع مکانی LST

تحلیل آشکارساز عامل

بر اساس ماژول آشکارساز فاکتور Geodetector، ۹ عامل محرک بر روی LST ارزیابی شدند (شکل ۴). توانایی یک عنصر واحد برای بررسی تغییرات LST را می توان با مقدار q نشان داد. با توجه به شکل ۴، ابتدا عامل ارتفاعی سپس کاربری اراضی و در درجه سوم پارامتر متوسط بارش سالانه به طور قابل توجهی بر LST حوضه کارده تأثیر گذاشتند. عامل ارتفاع با قدرت توضیحی ۴۳/۱۷ درصد، بزرگ ترین مقدار q را دارد. هنگامی که قدرت توضیحی یک عامل (مقدار q) بالاتر از ۰/۲ باشد، می توان آن را به عنوان عامل غالب در توضیح تغییرپذیری مکانی در نظر گرفت (گئو و همکاران، ۲۰۲۴). بنابراین، عامل غالب مؤثر بر LST حوضه کارده عامل ارتفاعی است. پس از آن، کاربری اراضی با قدرت توضیحی ۳۱/۲۹ درصد و متوسط بارش سالانه با قدرت توضیحی ۲۱/۲۳ درصد تأثیر قابل توجهی بر LST دارند. جهت شیب، فاصله از منطقه مسکونی، پوشش گیاهی و مقدار شیب نیز به ترتیب دارای قدرت توضیحی برابر ۱۶/۶۸، ۱۲/۹۵، ۱۱/۳۲ و ۱۱/۰۹ درصد هستند. مقدار q برای فاصله از جاده و فاصله از رودخانه نیز به ترتیب ۴/۰۸ درصد و ۱/۳۰ درصد است که نشان دهنده تأثیر بسیار کم این دو عامل بر LST است. بنابراین، تغییرات در LST در درجه اول تحت تأثیر توپوگرافی در منطقه مورد مطالعه قرار می گیرد.

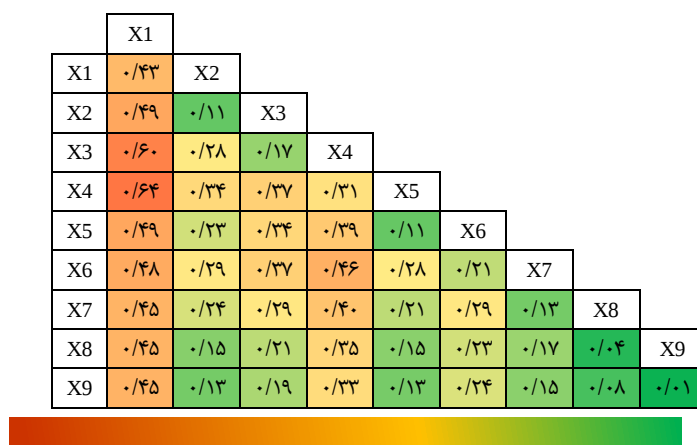


شکل ۴. مقادیر q عوامل محرک در حوضه رودخانه کارده

(X1): ارتفاع، X2: درجه شیب، X3: جهت شیب، X4: کاربری اراضی، X5: پوشش گیاهی، X6: متوسط بارش سالانه، X7: فاصله از منطقه مسکونی، X8: فاصله از جاده، X9: فاصله از رودخانه)

تحلیل آشکارساز تعاملی

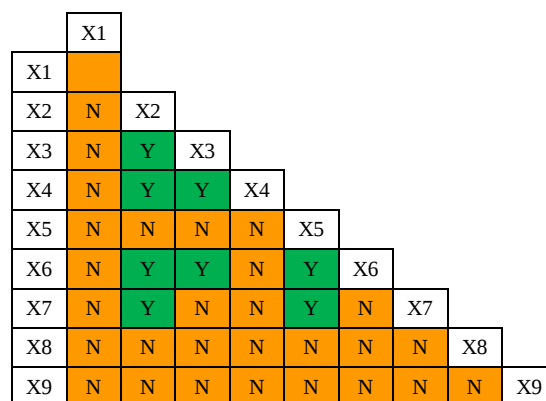
تأثیر مشترک عوامل مختلف بر LST که توسط آشکارساز تعاملی بررسی شده، در شکل ۵ ارائه شده است. LST به طور قابل توجهی بیشتر تحت تأثیر تعامل جفتی عوامل محرک نسبت به تک عاملی قرار گرفته است. در میان ۳۶ جفت تعامل محرکها، ۶۳/۸۹ درصد افزایش دوعاملی و ۳۶/۱۱ درصد افزایش غیرخطی نشان دادند. تعامل بین فاکتور ارتفاع و سایر پارامترها بالاترین مقدار q از ۰/۴۳ تا ۰/۶۴ را دارد که نشان می دهد ارتفاع منطقه مهم ترین متغیر در تعیین LST است. سپس کاربری اراضی از مقدار ۰/۳۱ تا ۰/۴۶ درصد در تعامل با سایر عوامل متغیر بود که نشان می دهد این مؤلفه نیز در تغییر دمای سطح زمین بسیار مؤثر است. مقادیر q مقدار شیب، جهت شیب، پوشش گیاهی، متوسط بارش سالانه و فاصله از منطقه مسکونی در تعامل با سایر عوامل به ترتیب از ۰/۱۱ تا ۰/۳۴، ۰/۱۷ تا ۰/۳۷، ۰/۱۱ تا ۰/۲۸، ۰/۲۱ تا ۰/۲۹ و ۰/۱۳ تا ۰/۱۷ است.



شکل ۵. مقادیر q تعاملی فاکتورها در حوضه رودخانه کارده

تحلیل آشکارسازی اکولوژیکی

از آشکارساز اکولوژیکی برای تعیین اینکه آیا هر عامل محرک تأثیر معنی داری بر توزیع LST در حوضه دارد یا خیر، استفاده شد. نتایج این مطالعه هیچ تفاوت معنی داری را در قدرت توضیحی ارتفاع، کاربری اراضی، متوسط بارش سالانه و فاصله از منطقه مسکونی با سایر عوامل بر تغییرات LST نشان نداد (شکل ۶). درحالی که در حالت تک عاملی بر LST منطقه تأثیر بسیار بالایی داشتند. درمقابل، سایر عوامل همچون مقدار شیب، جهت شیب و پوشش گیاهی، به صورت جداگانه قدرت توضیحی بسیار کمی داشتند اما هنگام ترکیب با سایر عوامل، تفاوت معنی داری ایجاد کردند.



شکل ۶. تفاوت معنی دار بین عوامل

نکته: Y نشان می دهد که دو متغیر به طور قابل توجهی بر LST در سطح اطمینان ۹۵ درصد تأثیر گذاشته اند، درحالی که N تأثیری ندارد.

تحلیل آشکارساز ریسک

آنالیز تشخیص ریسک، محدوده عوامل محرک را که بیشترین تأثیر را بر LST منطقه دارد، ارزیابی کرد، زیرا LST در پاسخ به عوامل مختلف تغییر می‌کند. مقادیر میانگین LST برای عوامل تأثیرگذار مختلف به‌طور قابل توجهی متفاوت است (شکل ۷). نوار قرمز نشان‌دهنده مقدار بالای میانگین LST در طبقه مورد نظر است، که به معنای منطقه‌ای است که به شدت تحت تأثیر عوامل محرک قرار گرفته است. نوار سبز نشان‌دهنده منطقه با تأثیر بسیار کم و نوار خاکستری نشان‌دهنده تأثیر متوسط عامل محرک است.



شکل ۷. مقادیر میانگین LST در هر طبقه از عوامل محرک

از نظر توپوگرافی، شیب و ارتفاع به‌طور مشابه به مقدار LST واکنش نشان دادند. به‌طوری‌که با افزایش ارتفاع و شیب LST کاهش یافته است. بیشترین مقدار LST (۳۹/۰۵) به جهات پست و کم‌ارتفاع حوضه و نزدیک سد کارده و رودخانه اصلی (۱۲۹۱-

۱۶۲۳ متر) و کمترین مقدار LST (۳۰/۰۸) به نقاط مرتفع و کوهستانی و ارتفاعات هزارمسجد (۲۹۴۸-۲۴۶۲ متر) اختصاص داده شده است. همچنین بیشترین مقدار LST در شیب‌های کم تا ۸ درجه و کمترین مقدار LST در شیب‌های بالا رخ داده است. در جهات غربی که بیشتر به اراضی مرتعی و دارای پوشش اختصاص داده شده است، کمترین مقدار LST و بیشترین مقدار LST در مناطق مسطح نمایان شد. مناطق کم‌ارتفاع و کم‌شیب در حوضه کارده بیشتر تحت سلطه شدت فعالیت‌های انسانی و زراعت دیم است و با عوامل زمینی در تعامل است؛ لذا بیشترین LST را به خود اختصاص داده است. از نظر اقلیمی نیز LST با افزایش بارش در محدوده بهینه ۱۶/۷۰-۱۸/۱۲ میلی‌متر، کاهش محسوسی (۳۲/۷۷) نشان داده است. LST در بین انواع مختلف کاربری اراضی به‌طور قابل توجهی متفاوت بود. به‌طوری‌که اراضی مرتعی (۳۰/۶۰) و سپس اراضی کشاورزی (۳۳/۷۹) بیشترین تأثیر خنک‌کنندگی را بر LST حوضه داشتند. اراضی دیم در مناطق پست و کم‌ارتفاع حوضه (۳۸/۷۱) و سپس مناطق مسکونی (۳۶/۸۷) نیز بیشترین LST را به خود اختصاص داده‌اند. همچنین در مناطق غنی از پوشش گیاهی (۰/۴ تا ۰/۵۹) مقدار LST به ۳۰/۸۵ درجه سانتی‌گراد کاهش یافته است. با افزایش فاصله از مناطق مسکونی، رودخانه و جاده نیز روند کاهشی در میانگین LST مشاهده شد. همان‌طور که در نتایج ژئودکتور نشان داده شده، عامل ارتفاع و سپس کاربری اراضی بیشترین تأثیر را بر تغییرات دمای سطح زمین (افزایش LST) داشته است. بنابراین در جدول ۲ میزان تأثیر هر پارامتر بر LST را ارائه داده‌ایم.

جدول ۲. میانگین LST در هر سطح از عوامل محرک

پارامتر	محدوده کاهش LST	متوسط LST (°C)	محدوده افزایش LST	متوسط LST (°C)
ارتفاع (X1)	۲۶۴۲-۲۹۴۸	۳۰/۰۸	۱۶۲۳-۱۲۹۱	۳۹/۰۵
مقدار شیب (X2)	۷۳-۳۸	۳۲/۳۷	۸-۰	۳۶/۶۹
جهت شیب (X3)	غرب	۳۲/۶۱	مسطح	۳۷/۶۴
کاربری اراضی (X4)	اراضی مرتعی	۳۰/۵۸	زراعت دیم	۳۸/۷۱
پوشش گیاهی (X5)	۰/۴ - ۰/۵۹	۳۰/۸۵	۰/۱۷ - ۰/۲۸	۳۷/۱۶
متوسط بارش سالانه (X6)	۱۶/۷۰ - ۱۸/۱۲	۳۲/۷۷	۱۲/۷۰ - ۱۴/۶۰	۳۷/۵۶
منطقه مسکونی (X7)	۰/۷۴ - ۱/۰۸	۳۲	۰ - ۰/۱۷	۳۶/۸۴
فاصله از جاده (X8)	۰/۲۰ - ۰/۲۷	۳۳/۵۶	۰ - ۰/۰۴	۳۵/۸۸
فاصله از رودخانه (X9)	۰/۲۰ - ۰/۳۱	۳۳/۲۹	۰/۰۳ - ۰/۰۷	۳۵/۴۵

بحث

این مطالعه با هدف شناسایی عوامل مؤثر بر ناهمگونی مکانی دمای سطح زمین (LST) در حوضه رودخانه کارده و همچنین بررسی قدرت عوامل محرک بر LST انجام شد.

تأثیر عوامل طبیعی بر تغییرات LST

طبق یافته‌های مدل Geodetector، تغییرات LST در حوضه رودخانه کارده با توجه به کوهستانی بودن منطقه همانند یافته‌های مطالعه وانگ و همکاران (۲۰۲۱)، شو و همکاران (۲۰۱۳) و لایو و همکاران (۲۰۲۱b) عمدتاً تحت تأثیر عامل ارتفاع است که ۴۳/۱۷ درصد از این تغییر در این مطالعه توضیح داده شده است. همچنین همبستگی منفی بین LST و ارتفاع مشاهده شد که با مطالعه لایو و همکاران (۲۰۲۱b) و جاویده (۱۴۰۳) مطابقت دارد. بارش متوسط سالانه نیز با ۲۱/۲۳ درصد تغییر LST را توضیح داد که با توجه به کوهستانی بودن حوضه مورد مطالعه نشان از تأثیر بالای این عامل بر LST منطقه دارد و با افزایش بارش از میزان LST کاسته شده است. مقدار شیب همانند ارتفاع برخلاف پژوهش جاویده (۱۴۰۳) عاملی مؤثر بر تغییر LST است و ارتباط منفی با LST نشان داد (q برابر ۱۱/۰۹). جهت شیب نیز با آماره (q برابر ۱۶/۶۸) در تغییرات LST بسیار مؤثر است. به‌خصوص جهات غربی که با توجه به درصد بیشتر مراتع و پوشش گیاهی، کمترین مقدار LST را دارا هستند و بیشترین مقدار LST در مناطق مسطح متمرکز است که تحت سلطه شدت فعالیت‌های انسانی و زراعت دیم است و با عوامل زمینی در تعامل است. از دیدگاه توپوگرافی، تأثیر مقدار شیب در مقایسه با ارتفاع و جهت شیب کمتر قابل توجه است.

تأثیر عوامل انسانی بر تغییرات LST

عامل محرک انسانی که بر LST تأثیرگذار است، عامل کاربری اراضی است که با آماره ۳۱/۲۹ درصد، تغییرات LST را توضیح داد. جهت تعیین تأثیر عوامل محرک بر LST، جدا از عامل کاربری اراضی، این مطالعه عواملی همچون پوشش گیاهی، فاصله از منطقه مسکونی، فاصله از جاده و فاصله از رودخانه را تجزیه و تحلیل کرد. شاخص پوشش گیاهی نرمال شده با دما همبستگی منفی داشت (q برابر ۱۱/۳۲). مقادیر بالاتر شاخص پوشش گیاهی نشان از این دارد که منطقه دارای پوشش گیاهی بالا منجر به تبخیر و تعرق بالا می شود که این امر خود باعث کاهش دما می گردد. همچنین در این مطالعه در نزدیکی مناطق مسکونی (q برابر ۱۲/۹۵) و با گسترش فعالیت های انسانی دما به بیشترین میزان خود می رسد (۳۶/۸۴ درجه سانتی گراد). جاویده (۱۴۰۳)، یاسین و خوان (۲۰۲۲)، سینگ و همکاران (۲۰۲۴)، خدائی و زندی (۲۰۲۳) و نصر من الله (۲۰۲۰) در مطالعه خود در رابطه با پایش دمای سطح زمین و همبستگی آن با شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده (NDVI) دریافتند که کاهش پوشش گیاهی طبیعی با افزایش دما در یک منطقه نسبت مستقیم دارد که نتایج تحقیق آن ها هم راستا با نتایج پژوهش حاضر است. همچنین در مطالعه آن ها افزایش مناطق مسکونی همانند پژوهش حاضر منجر به افزایش دما می گردد. چون فعالیت های انسانی در جهت کاهش پوشش گیاهی دخیل هستند و کاهش پوشش گیاهی می تواند به دلیل تبدیل سطوح دارای پوشش گیاهی به زمین کشاورزی و سکونتگاه باشد. در این مطالعه، تأثیر فاصله از جاده و فاصله از رودخانه بر LST بسیار اندک است ($q < 0.1$).

تأثیر متقابل عوامل طبیعی و انسانی بر تغییرات LST

هرچند برخی عوامل ذکر شده در بخش قبلی به طور واحد تأثیر بسیار ناچیزی بر LST منطقه داشتند، در تعامل با سایر عوامل تأثیر معناداری را بر LST نشان دادند. با دقت در نتایج و براساس یافته های آشکارساز تعاملی ترکیب متغیرهای محرک می تواند قدرت توضیحی هر عامل واحد، به ویژه با ارتفاع را به طور قابل توجهی افزایش دهد (وانگ و همکاران، ۲۰۲۱). نکته قابل توجه این است که قدرت توضیحی پس از تعامل عوامل با همبستگی بیشتر مانند ارتفاع، بیشتر است. مهم ترین تأثیر بر تغییر LST، تعامل بین ارتفاع و نوع کاربری اراضی بود که ۶۴ درصد از تغییرات LST را توضیح می دهد. این نشان می دهد که عوامل انسانی و طبیعی به طور ترکیبی بر تغییرات LST در حوضه کارده غالب بوده اند. تعامل های برتر متغیر ارتفاع با سایر عوامل به شرح زیر است: ارتفاع کاربری اراضی ($0.64 < \text{ارتفاع} \cap \text{جهت شیب} < 0.60$)، ارتفاع مقدار شیب ($0.49 < \text{ارتفاع} \cap \text{پوشش گیاهی} < 0.49$)، ارتفاع بارش ($0.48 < \text{ارتفاع} \cap \text{فاصله از منطقه مسکونی، فاصله از جاده و فاصله از رودخانه} < 0.45$). همان طور که در الگوی فوق موجود است، تأثیرات فاصله از جاده و فاصله از رودخانه هنگام ترکیب با عامل ارتفاع، قدرت توضیحی را به طور قابل توجهی بهبود بخشیدند (q برابر ۰/۴۵). در حالی که به صورت واحد تأثیرات فاصله از جاده و فاصله از رودخانه بر تغییرات LST بسیار اندک بود (q کمتر از ۰/۱). همچنین ترکیب سایر عوامل با دو پارامتر فاصله از جاده و فاصله از رودخانه قدرت توضیحی بزرگ تر از ۰/۱ را نشان می دهد. مقدار شیب فاصله از جاده (۰/۱۵) و فاصله از رودخانه (۰/۱۳)، جهت شیب فاصله از جاده (۰/۲۱) و فاصله از رودخانه (۰/۱۹)، کاربری اراضی فاصله از جاده (۰/۳۵) و فاصله از رودخانه (۰/۳۳)، پوشش گیاهی فاصله از جاده (۰/۱۵) و فاصله از رودخانه (۰/۱۳)، متوسط بارش سالانه فاصله از جاده (۰/۲۳) و فاصله از رودخانه (۰/۲۴)، فاصله از منطقه مسکونی فاصله از جاده (۰/۱۷) و فاصله از رودخانه (۰/۱۵). که این نتیجه مطابق جدول ۱ نشان دهنده افزایش دو عاملی است ($q(X1 \cap X2) > \text{Max}(q(X1), q(X2))$).

نتیجه گیری و پیشنهادها

در پژوهش حاضر واکنش عوامل طبیعی و انسانی به تغییرات LST در یک منطقه کوهستانی با استفاده از یک ژئودتکتور (Geodetector) اندازه گیری شد. مطالعات قبلی مبتنی بر ژئودتکتور در مورد مکانیسم های اصلی تغییرات LST، عوامل طبیعی را مؤثرترین عوامل بر تغییر LST معرفی کردند (یائو و همکاران، ۲۰۲۳؛ وانگ و همکاران، ۲۰۲۱). مطالعه دیگری عوامل انسانی را عامل اصلی تغییر LST دانستند (شوای و همکاران، ۲۰۲۵). در مورد تعاملات، تعاملات بین عوامل طبیعی همچون ارتفاع و عوامل انسانی که توسط کاربری اراضی نشان داده می شوند، عوامل اصلی مؤثر بر تغییرات LST در حوضه رودخانه کارده هستند. به خاطر محدودیت ایستگاه های هواشناسی و عدم دسترسی به تمام داده ها، داده های این پژوهش با استفاده از سنجش از دور و سیستم

اطلاعات جغرافیایی استخراج شد. شایان ذکر است در پژوهش حاضر به علت وجود تنها یک ایستگاه تبخیرسنجی داخل حوضه کارده، میانگین دمای سالانه در این پژوهش مورد استفاده قرار نگرفت. لذا پیشنهاد می شود در سایر مطالعات اثرات پارامترهای اقلیمی (تابش خورشیدی، متوسط دمای سالانه، تبخیر و تعرق، فشار هوا و...) به همراه سایر عوامل محرک همچون عمق آب های زیرزمینی، رطوبت خاک و... بر LST در نظر گرفته شود. نتایج مطالعه بر روی محرک های ناهمگونی فضایی دمای سطح زمین می تواند مسیرهای جدیدی را برای انتخاب روش های کاهش گرمایش جهانی، شیوه های استفاده از زمین و پیش بینی خشکسالی فراهم کند. همچنین در مطالعات آینده رابطه تعاملی بین عوامل محرک و تغییرات LST می تواند با استفاده از ادغام الگوریتم های هوش مصنوعی با علوم طبیعی مورد بررسی قرار گیرد تا بتوان به طور خودکار الگوها و ارتباطات پیچیده تری را در داده ها شناسایی کرد. از طرفی، به محققان انگیزه می دهد تا عمیقاً کاربردهای پیشرفته علوم طبیعی مبتنی بر هوش مصنوعی را درک کنند و از این طریق به توسعه مستمر این علوم کمک کنند.

References

- Abedini, M., & Pasban, A. (2023). Examination and Evaluation of the Assessment between Land Surface, Land Use and Vegetation Index (Case Study: Khiavchai Watershed, Meshginshahr). *Geography and Human Relationships*, 6(3), 22-37. <https://doi.org/10.22034/gahr.2023.418850.1953>. (in persian)
- Becker, F., & Li, Z. L. (1990). Towards a local split window method over land surfaces. *Remote Sensing*, 11(3), 369-393. <https://doi.org/10.1080/01431169008955028>.
- Cui, C., Wang, B., Ren, H., & Wang, Z. (2019). Spatiotemporal variations in gastric cancer mortality and their relations to influencing factors in S County, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(5), 784.
- Emami, S., & Kabolizadeh, M. (2025). A Remote sensing approach to evaluate the trend of surface temperature changes in Ahvaz city using spatial analysis and regression. *Geography and Development*, 23(79). (in persian)
- Ghaderpour, E., Ince, E. S., & Pagiatakis, S. D. (2018). Least-squares cross-wavelet analysis and its applications in geophysical time series. *Journal of Geodesy*, 92(10), 1223-1236.
- Guo, Y., Cheng, L., Ding, A., Yuan, Y., Li, Z., Hou, Y., ... & Zhang, S. (2024). Geodetector model-based quantitative analysis of vegetation change characteristics and driving forces: A case study in the Yongding River basin in China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 132, 104027. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.104027>.
- Hua, A. K., & Ping, O. W. (2018). The influence of land-use/land-cover changes on land surface temperature: a case study of Kuala Lumpur metropolitan city. *European Journal of Remote Sensing*, 51(1), 1049-1069.
- Hu, D., Meng, Q., Zhang, L., & Zhang, Y. (2020). Spatial quantitative analysis of the potential driving factors of land surface temperature in different "Centers" of polycentric cities: A case study in Tianjin, China. *Science of the total environment*, 706, 135244.
- Hu, Y., & Jia, G. (2010). Influence of land use change on urban heat island derived from multi-sensor data. *International Journal of Climatology*, 30(9), 1382-1395. <https://doi.org/10.1002/joc.1984>.
- Huang, S., Zheng, X., Ma, L., Wang, H., Huang, Q., Leng, G., ... & Guo, Y. (2020). Quantitative contribution of climate change and human activities to vegetation cover variations based on GA-SVM model. *Journal of Hydrology*, 584, 124687. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124687>.
- Javideh, H. (2024). Factors affecting ground surface temperature in urban areas: a case study of Karaj city. *Application of remote sensing and GIS in environmental sciences*, 4(11), 1-22. (in persian)
- Kakehmami, A., Ghorbani, A., Asghari Saraskanroud, S., Qala, E., & Ghafari, S. (2020). Investigating the relationship between land use and vegetation cover changes with land surface temperature in Nemin city. *Remote sensing and geographic information system in natural resources*, 11(2), 27-48. (in persian)
- Khodaie, A., Zandi, R. (2023). Monitoring changes in vegetation cover and its relationship with surface temperature and land use in Khodaafrin and Kalibar cities using Remote sensing technology. *Journal of natural environment*. <http://doi.org/10.22059/jne.2023.365834.2602>. (in persian)
- Khandelwal, S., Goyal, R., Kaul, N., & Mathew, A. (2018). Assessment of land surface temperature variation due to change in elevation of area surrounding Jaipur, India. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 21(1), 87-94. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.01.005>.
- Li, W., Cao, Q., Lang, K., & Wu, J. (2017). Linking potential heat source and sink to urban heat island: Heterogeneous effects of landscape pattern on land surface temperature. *Science of the Total Environment*, 586, 457-465. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.191>.
- Liu, C., Li, W., Wang, W., Zhou, H., Liang, T., Hou, F., ... & Xue, P. (2021a). Quantitative spatial analysis of vegetation dynamics and potential driving factors in a typical alpine region on the northeastern Tibetan Plateau using the Google Earth Engine. *Catena*, 206, 105500. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105500>.
- Liu, W., Meng, Q., Allam, M., Zhang, L., Hu, D., & Menenti, M. (2021b). Driving factors of land surface temperature in urban agglomerations: A case study in the pearl river delta, china. *Remote Sensing*, 13(15), 2858.
- Mikaili HajiKandi, K., Sobhani, B., & Vramesh, S. (2021). Detection of Surface Temperature Changes Using Satellite Images and Real Data and its Relationship with the Covered Vegetation in the

- Southern Part of the Lake Urmia. *Geographical Research*, 36(2): 191-203. <http://georesearch.ir/article-1-1032-en.html>. (in persian)
- Nasar-u-Minallah, M. (2020). Exploring the relationship between land surface temperature and land use change in Lahore using Landsat data. *Pakistan Journal of Scientific & Industrial Research Series A: Physical Sciences*, 63(3), 188-200. <https://doi.org/10.52763/PJSIR.PHYS.SCI.63.3.2020.188.200>.
- Parvar, Z., Mohammadzadeh, M., & Saeidi, S. (2023). Analysis of spatial heterogeneity and driving factors of land surface temperature using spatial regression models. *Journal of Renewable Natural Resources Research*, 13(2), 97-113. (in persian)
- Peng, S., Ding, Y., Liu, W., & Li, Z. (2019). 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017. *Earth System Science Data*, 11(4), 1931-1946. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1931-2019>, 2019.
- Sheng, Q., Zhang, Y., Li, K., Ling, X., & Li, J. (2024). Exploring the Seasonal Comparison of Land Surface Temperature Dominant Factors in the Tibetan Plateau. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 10, 197-203. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-1-2024-197-2024>, 2024.
- Sholihah, R. I., & Shibata, S. (2019, November). Retrieving spatial variation of land surface temperature based on Landsat OLI/TIRS: a case of southern part of Jember, Java, Indonesia. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 362, No. 1, p. 012125). IOP Publishing.
- Shui, C., Shan, B., Li, W., Wang, L., & Liu, Y. (2025). Investigating the influence of land cover on land surface temperature. *Advances in Space Research*, 75(3), 2614-2631. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.11.016>.
- Singh, S., Kumar, P., Parijat, R., Gonengcil, B., & Rai, A. (2024). Establishing the relationship between land use land cover, normalized difference vegetation index and land surface temperature: A case of Lower Son River Basin, India. *Geography and Sustainability*, 5(2), 265-275. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2023.11.006>.
- Ullah, W., Ahmad, K., Ullah, S., Tahir, A. A., Javed, M. F., Nazir, A., ... & Mohamed, A. (2023). Analysis of the relationship among land surface temperature (LST), land use land cover (LULC), and normalized difference vegetation index (NDVI) with topographic elements in the lower Himalayan region. *Heliyon*, 9(2). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13322>.
- Wang, J. F., & Xu, C. D. (2017). Geodetector: Principle and prospective. *Acta Geographica Sinica*, 72(1), 116-134.
- Wang, J. F., Li, X. H., Christakos, G., Liao, Y. L., Zhang, T., Gu, X., & Zheng, X. Y. (2010). Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China. *International Journal of Geographical Information Science*, 24(1), 107-127. <https://doi.org/10.1080/13658810802443457>.
- Wang, J. F., Zhang, T. L., & Fu, B. J. (2016). A measure of spatial stratified heterogeneity. *Ecological indicators*, 67, 250-256. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.02.052>.
- Wang, W., Samat, A., Abuduwaili, J., & Ge, Y. (2021). Quantifying the influences of land surface parameters on LST variations based on GeoDetector model in Syr Darya Basin, Central Asia. *Journal of Arid Environments*, 186, 104415. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104415>.
- Xi, M., Zhang, W., Li, W., Liu, H., & Zheng, H. (2023). Distinguishing dominant drivers on LST dynamics in the Qinling-Daba Mountains in Central China from 2000 to 2020. *Remote Sensing*, 15(4), 878. <https://doi.org/10.3390/rs15040878>.
- Yang, D., Wang, X., Xu, J., Xu, C., Lu, D., Ye, C., ... & Bai, L. (2018). Quantifying the influence of natural and socioeconomic factors and their interactive impact on PM2. 5 pollution in China. *Environmental Pollution*, 241, 475-483. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.05.043>.
- Yaseen, A., & Khan, A. 2022. Monitoring The Land Surface Temperature And Its Correlation With NDVI Of Chiniot By Using GIS Technology And Remote Sensing. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1468097/v1>.
- Yao, B., Gong, X., Li, Y., Li, Y., Lian, J., & Wang, X. (2024). Spatiotemporal variation and GeoDetector analysis of NDVI at the northern foothills of the Yinshan Mountains in Inner Mongolia over the past 40 years. *Heliyon*, 10(20).
- Yu, Y., Fang, S., & Zhuo, W. (2023). Revealing the driving mechanisms of land surface temperature spatial heterogeneity and its sensitive regions in China based on GeoDetector. *Remote Sensing*, 15(11), 2814. <https://doi.org/10.3390/rs15112814>.