

Spatial analysis of nighttime land surface temperature in Iran using MODIS-Aqua data

Sarhan, E.¹  | Mofidi, A.¹  | Dadashi-Roudbari, A. A.¹  | Minaei, M.¹ 

1. Department of Geography, Faculty of Dr. Ali Shariati Letters and Humanities, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Corresponding Author E-mail: abbasmofidi@um.ac.ir

(Received: 10 Sep 2023, Revised: 7 April 2024, Accepted: 11 Aug 2024, Published online: 5 Oct 2024)

Summary

The main purpose of the current research is to investigate the nighttime LST climatology in Iran. The study of the seasonal regime and annual temperature differences along with the identification of the role of different temperature thresholds and the spatial analysis of Iran's cold spots are among the climatic features studied in the current research. For this purpose, the MYD11A1 product (version 6.1) of the MODIS which is a key instrument onboard the Aqua Satellite with a horizontal resolution of 1000 meters has been used for a period of 19 years (2003-2021). This product is related to the nighttime passage of the satellite at 1:30 local time.

Satellite data were validated using daily soil temperature data from 174 meteorological stations. The accuracy of satellite data showed that the area average values of root mean square error (RMSE) and mean bias error (MBE) compared with station data are 1.7°C and 1.39°C respectively. Also, the PBias statistics results show that the underestimation prevails in the night LST data compared to the soil temperature. In total, the MODIS sensor estimates LST in most regions of the country with an error of less than 10%, which indicates the high efficiency of the MYD11A1 product in assessing Iran's nighttime LST.

The findings showed that the combination of altitude and higher latitude has significant importance in the seasonal changes of nighttime minimum LST in Iran. So, the combination of these two factors plays an important role in the occurrence of the lowest night temperatures in the country in the middle parts of central Alborz and the highlands of Azerbaijan. Thus, the longest period of dominance of low temperatures in Iran is related to 38°N and 36°N latitudes, respectively. The results also indicate that the prevailing temperature zones in Iran fluctuate from the minimum temperature in January to the maximum temperature in July. In the transitional seasons, only April and October have distinct and independent temperature identities, and the rest of the months of the transitional seasons are either connected to winter or connected to summer according to the pattern. Examining the course of intra-annual temperature changes shows that the highest intra-annual temperature concentration and the highest homogeneity are observed in the summer season. On the other hand, the highest level of heterogeneity and the lowest level of temperature concentration are related to the autumn season. Examining the average nighttime temperature difference in Iran also shows that the highest values of the earth surface temperature difference occur in the winter season and the lowest values in the summer season. In a general view, the temperature difference curve fluctuates between a maximum of 56.6°C in January and a minimum of 46.5°C in July. Spatial analysis of nighttime temperature difference showed that the Lut desert experiences the highest average values of nighttime temperature difference throughout the year. In general, lack of moisture, very low percentage of cloud cover, lack of vegetation cover, and very low soil moisture seem to have led to high nighttime temperature fluctuations in the Lut desert. On the other hand, a narrow strip along the southern coastline of the Caspian Sea experiences the lowest nighttime temperature difference in the country. Clearly, the high humidity of the southern coastline of the Caspian Sea plays the main role in reducing the temperature fluctuations of this region. The geographical analysis of cold spots indicates that the coldest spots of Iran are observed in the high peaks, located in high latitudes. Also, the highest geographical concentration of cold spots in Iran is related to the summer season. Meanwhile, the largest spatial distribution of Iran's cold spots can be seen in the winter season, especially in December. The findings also indicate the existence of a regular annual cycle in the spatial arrangement of cold spots in Iran. In this way, in the warm period of the year, the cold spots of Iran are concentrated only in the middle part of the central Alborz. With the beginning of the cold period of the year, we are witnessing a northwest shift of cold spots toward the highlands of Azerbaijan. So that a bimodal pattern replaces the summer concentrated pattern. The bimodal pattern continues at the height of winter with the dispersion of cold spots in Alborz and Azerbaijan, but with the arrival of the warm period of the year, a southeastward shift of cold spots towards the Alborz Mountains begins, with the cold spots completely concentrated on the Damavand peak, this annual cycle ends in the summer season.

Keywords: Land Surface Temperature, Nighttime temperature difference, MODIS, Iran's cold spots, spatial Analysis.

Cite this article: Sarhan, E., Mofidi, A., Dadashi-Roudbari, A. A., & Minaei, M. (2024). Spatial analysis of nighttime land surface temperature in Iran using MODIS-Aqua data. *Journal of the Earth and Space Physics*, 50(3), 677-705. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2024.364448.1007557>

E-mail: (1) elmirasarhan1997@gmail.com | a-dadashi@um.ac.ir | m.minaei@um.ac.ir



تحلیل فضایی دمای شبانه سطح زمین در ایران با استفاده از داده‌های گذر شبانه سنجنده MODIS

المیرا سرهان^۱ | عباس مفیدی^۱ | عباسعلی داداشی رودباری^۱ | مسعود مینایی^۱

۱. گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی دکتر علی شریعتی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: abbasmofidi@um.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۲/۶/۱۹، بازنگری: ۱۴۰۳/۱/۱۹، پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۵/۲۱، انتشار آنلاین: ۱۴۰۳/۷/۱۴)

چکیده

هدف اصلی پژوهش حاضر بررسی اقلیم‌شناسی LST شبانه در ایران است. برای این منظور از محصول MYD11A1 (نسخه ۶/۱) سنجنده MODIS ماهواره Aqua با تفکیک افقی ۱۰۰۰ متر برای یک دوره ۱۹ ساله (۲۰۰۳-۲۰۲۱) استفاده شد. داده‌های ماهواره‌ای با استفاده از داده‌های روزانه دمای خاک تعداد ۱۷۴ ایستگاه هواشناسی درستی سنجی شدند. درستی سنجی داده‌های ماهواره‌ای نشان داد که، مقادیر متوسط پهنه‌ای دو سنجه ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و متوسط اریبی خطا (MBE) در قیاس با داده‌های ایستگاهی به ترتیب $1/39^{\circ}\text{C}$ و $1/7^{\circ}\text{C}$ می‌باشد. همچنین، نتایج به‌کارگیری سنجه PBias بیانگر غلبه کم برآوردی در داده‌های LST شبانه در قیاس با دمای خاک است. در مجموع، سنجنده MODIS دمای سطح زمین را در بیشتر مناطق کشور با خطایی کمتر از ۱۰٪ برآورد می‌کند که بیانگر کارایی بالای محصول MYD11A1 در برآورد LST شبانه ایران است. یافته‌ها نشان داد که، ترکیب ارتفاع و عرض جغرافیایی بالا در تغییرات فصلی LST شبانه ایران از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. بررسی سیر تکوین درون سالانه دما، نشان‌دهنده آن است که، بالاترین تمرکز دمایی درون سالانه و بیشترین همگنی در فصل تابستان مشاهده می‌شود. در مقابل، بیشترین میزان ناهمگنی مربوط به فصل پاییز است. بررسی اختلاف بین کمینه و بیشینه دمای شبانه بیانگر وقوع بالاترین و پایین‌ترین مقادیر اختلاف دمای شبانه به ترتیب در بیابان لوت و نوار باریک سواحل جنوبی دریای خزر می‌باشد. بررسی جغرافیایی نقاط سرد، از قرارگیری سردترین نقاط ایران در قله مرتفع، واقع در عرض‌های جغرافیایی بالا، حکایت دارد. بالاترین تمرکز جغرافیایی نقاط سرد ایران در فصل تابستان و بیشترین پراکنش فضایی آنها در فصل زمستان، به‌ویژه در ماه دسامبر، مشاهده می‌شود. یافته‌ها همچنین بیانگر وجود یک سیر تکوین منظم سالانه در نحوه استقرار نقاط سرد ایران است.

واژه‌های کلیدی: اختلاف دمای شبانه، سنجنده MODIS، دمای سطح زمین، نقاط سرد ایران، تحلیل فضایی.

۱. مقدمه

دمای سطح زمین (LST) به دلیل کاربردهای بسیار وسیعی که در حوزه‌های مختلف علمی از جمله، اقلیم‌شناسی، هواشناسی، کشاورزی، منابع طبیعی، مدیریت منابع آب، محیط‌زیست و سایر رشته‌های علوم محیطی پیدا کرده است، مورد توجه طیف گسترده‌ای از پژوهشگران قرار گرفته است. بررسی پژوهش‌های انجام شده در سال‌های اخیر بیانگر آن است که، به‌طور کلی محصولات LST حاصل از سنجنده‌های ماهواره‌ای در دو قالب کلی مورد استفاده قرار می‌گیرند. دسته اول که طیف قابل توجهی از تحقیقات اخیر را در بر می‌گیرد، پژوهش‌های هستند که

دمای سطح زمین (LST) یکی از مؤلفه‌های بنیادی در تبیین برهم‌کنش سطح زمین و جو در لایه مرزی محسوب می‌شود. این متغیر در سال‌های اخیر به جهت کاربردهای گسترده آن، به یکی از متغیرهای مهم اقلیمی و زیست‌محیطی تبدیل شده است. متغیر LST به‌عنوان دمای پوسته یا رویه زمین تعریف می‌شود که توسط ماهواره‌ها در تصویربرداری از سطح زمین اندازه‌گیری می‌شود. این متغیر تا حدی مسئول تنظیم دمای هوا در لایه زیرین جو است و عامل اصلی تغییر در میزان تابش سطحی محسوب می‌شود (ونگ، ۲۰۰۹).

استناد: سرهان، المیرا؛ مفیدی، عباس؛ داداشی رودباری، عباسعلی و مینایی، مسعود (۱۴۰۳). تحلیل فضایی دمای شبانه سطح زمین در ایران با استفاده از داده‌های گذر شبانه سنجنده

MODIS. مجله فیزیک زمین و فضا، ۵۰(۳)، ۶۷۷-۷۰۵. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2024.364448.1007557>

رایانامه: (۱) m.minaei@um.ac.ir | a-dadashi@um.ac.ir | elmirsarhan1997@gmail.com

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.



DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2024.364448.1007557>

پژوهش‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. در ادامه برخی از این مطالعات مورد بررسی قرار خواهد گرفت. با توجه به اهمیت LST در شکل‌گیری و تکوین فرایندهای فیزیکی، شیمیایی، هیدرولوژیکی و اقلیمی در سطح زمین، محققان بی‌شماری در کشور درصدد مطالعه این متغیر و جنبه‌های مختلف مرتبط با آن برآمده‌اند. نتایج مطالعات بیانگر آن است که وضعیت LST در ایران زمین به شدت به عوامل جغرافیایی و محیطی گوناگون وابسته است (مرادی و همکاران، ۱۳۹۵-الف؛ ۱۳۹۵-ب؛ احمدی و همکاران، ۱۳۹۷-الف؛ مسعودیان، ۱۳۹۹؛ مرادی و همکاران، ۲۰۱۸). نقش عوامل جغرافیایی و ویژگی‌های محیطی به گونه‌ای است که الگوی توزیع فضایی و تغییرات زمانی LST در پهنه‌های جغرافیایی مختلف کشور ارتباط تنگاتنگی با نحوه آرایش و استقرار عوامل جغرافیایی، توپوگرافی، ویژگی‌های محیطی و تنوع اقلیمی در ایران زمین دارد. در این راستا، برخی از مطالعات به‌طور خاص تغییرات زمانی- مکانی LST را در گستره ایران زمین بررسی کرده‌اند که از میان آنها می‌توان به پژوهش‌های زیر اشاره کرد:

مرادی و همکاران (۱۳۹۵-الف) با بهره‌گیری از داده‌های LST سنجنده MODIS ضمن انجام پهنه‌بندی دمایی، چهار پهنه دمایی اصلی را برای کشور شناسایی کردند. نتایج پژوهش نشان داد که قلمرو هریک از پهنه‌های دمایی، هم‌خوانی قابل‌توجهی با ویژگی‌های محیطی و جغرافیایی به‌ویژه ارتفاع، ویژگی‌های رویه زمین و عرض جغرافیایی دارد. مرادی و همکاران (۱۳۹۵-ب) در پژوهش دیگری، به بررسی نرخ تغییر دمای روز هنگام به کمک داده‌های سنجنده MODIS در ایران پرداختند. در این پژوهش ضمن محاسبه شیب LST، تغییرات زمانی- مکانی این متغیر را تحت تأثیر شرایط محیطی، ناهمواری‌ها و میزان انرژی دریافت‌شده از خورشید دانستند. به‌طوری‌که در دوره سرد سال ارتفاعات البرز و زاگرس، برخلاف مناطق پست مرکزی که شیب دمایی مثبتی را تجربه می‌کنند، از یک شیب دمایی منفی برخوردارند. همچنین، نیمه‌ی شرقی کشور، به دلیل خشکی خاک، شیب دمایی بیشتری را نسبت به نیمه‌غربی تجربه می‌کند. بر اساس یافته‌ها، در بیشتر مناطق

کارایی محصولات دمای سطح زمین ماهواره‌ای (عمدتاً سنجنده MODIS) را مورد توجه قرار داده‌اند (وان، ۲۰۱۴؛ دوان و همکاران، ۲۰۱۹؛ ژینگ و همکاران، ۲۰۲۱؛ جیائو و مائو، ۲۰۲۲ و لیو و همکاران، ۲۰۲۳). براین‌دکلی حاصل از این مطالعات نشان‌دهنده کارایی مناسب داده‌های LST سنجنده MODIS در مناطق مختلف جهان است. برای نمونه ژینگ و همکاران (۲۰۲۱) در ارزیابی میزان کارایی دمای سطح زمین روز و شب MODIS، نشان دادند که محصولات MOD11A1 و MYD11A1 در برآورد LST در مقیاس جهانی، در مقایسه با داده‌های مشاهداتی از کارایی بالایی برخوردار هستند. در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی ضمن استفاده از داده LST گذرشبانه سنجنده MODIS، کارایی بالای این محصول را برای مناطق مختلف خاورمیانه و ایران مورد تأیید قرار دادند (القاسمی و همکاران، ۲۰۲۲؛ روشن و همکاران، ۲۰۲۴؛ زرگری و همکاران، ۲۰۲۴؛ سرهان و همکاران، ۲۰۲۴). دسته دوم در برگیرنده مطالعاتی است که به تغییرات زمانی- مکانی LST و روند تغییرات آن در مقیاس‌های مختلف محلی، ملی و منطقه‌ای در مناطق مختلف جهان توجه داشته‌اند. از جمله این مطالعات، می‌توان به پژوهش‌های انجام شده بر روی فلات تبت (یانگ و همکاران، ۲۰۲۱)، چین (یو و همکاران، ۲۰۲۱)، پاکستان (عباسی و همکاران، ۲۰۲۲)، افغانستان (نبی‌زاده و همکاران، ۲۰۲۲)، جنوب آسیا (شوکی و همکاران، ۲۰۲۳) و آلمان (نیکولانو و همکاران، ۲۰۲۳) اشاره کرد. مطالعات فوق، ضمن تأکید بر کارایی مطلوب محصولات دمای سطح زمین MODIS در مطالعات منطقه‌ای، به تغییرات این متغیر و ارتباط آن با سایر متغیرهای بیوفیزیکی و اقلیمی در مناطق مورد بررسی، توجه کرده‌اند.

در ایران نیز پژوهشگران متعددی LST را مورد بررسی قرار داده‌اند. هرچند که بخش اعظم مطالعات انجام شده در ایران، LST را با استفاده از داده‌های سری ماهواره‌های لندست بررسی کرده‌اند (احمدی و داداشی رودباری، ۱۳۹۶؛ احمدی و همکاران، ۱۳۹۸)، اما طی چند سال گذشته، محصولات مختلف سنجنده MODIS نیز در

این استان می‌باشد.

در این میان تعدادی از مطالعات انجام شده نیز درصد بررسی ارتباط بین توپوگرافی و یا ارتفاعات و LST برآمده‌اند. پژوهش‌های انجام شده در این حوزه، تا حد زیادی در گستره ایران زمین، LST را تحت تأثیر ارتفاعات می‌دانند. برای نمونه، مرادی و همکاران (۲۰۱۸) ارتباط بین LST و توپوگرافی را برای یک دوره آماری ۱۳ ساله (۲۰۰۳-۲۰۱۵) با استفاده از محصولات سنجنده MODIS مورد مطالعه قرار دادند. ایشان رابطه معنی‌داری بین LST و توپوگرافی به دست آوردند. مسعودیان و منتظری (۲۰۲۳) نیز توزیع فراوانی LST در ایران زمین را تا حد زیادی به ارتفاع و سپس ویژگی‌های سطح زمین وابسته دانسته‌اند. علاوه بر آن، کربلایی و همکاران (۲۰۲۳) نیز رابطه بین توپوگرافی، LST و LSA (آلبیدو سطح زمین) را به کمک داده‌های سنجنده MODIS، ماهواره‌های Terra و Aqua با تفکیک زمانی روزانه مورد بررسی قرار دادند. نتایج بیانگر تأثیرگذاری بالای ارتفاع بر LST بوده است. رابطه بین ارتفاع و آلبیدو نیز نشان‌دهنده آن است که بین این دو همبستگی قوی وجود دارد، به طوری که با افزایش ارتفاع، آلبیدو نیز افزایش می‌یابد. همچنین کیخسروی کیانی و مسعودیان (۱۳۹۶)، نیز در بررسی ارتباط بین LST و پوشش برف که با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره Terra به انجام رسیده، LST را به شدت تابع ارتفاع دانستند. نتایج مطالعه ایشان نشان داد که، بالاترین دماها در بیابان لوت و دشت جازموریان و پایین‌ترین دماها در ارتفاعات البرز، زاگرس، سهند و سیلان بوقوع پیوسته است. همچنین ایشان شاهد بروز یک ارتباط معکوس بین LST و تعداد روزهای برف‌پوشان در ایران بوده‌اند. در همین راستا، حلییان و صلحی (۱۳۹۹) نیز با استفاده از داده‌های ماهواره‌های Terra و Aqua به این نتیجه دست یافتند که بین درصد برف‌پوش و ارتفاع در بخش مرتفع البرز مرکزی ارتباط مستقیم و قوی وجود دارد که با افزایش ارتفاع، LST کاهش می‌یابد.

بررسی پیشینه پژوهش نشان داد به‌رغم داده‌های بسیار مناسبی که در سطح جهانی برای LST به‌ویژه داده‌های دمای شبانه در دسترس است و پژوهش‌های بسیاری نیز در

کشور در کل سال شیب دمای سطح زمین کم‌برآورد می‌شود. احمدی و همکاران (۱۳۹۷-الف) نیز با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای، الگوی فضایی LST شبانه در ایران را مورد بررسی قرار دادند. یافته‌ها بیانگر آن است که، از نظر زمانی کمینه LST شب‌هنگام در ماه‌های دسامبر تا فوریه بوقوع می‌پیوندد و مقدار متوسط آن تا 20°C کاهش می‌یابد. همچنین الگوی تغییرات مکانی LST شب‌هنگام در ایام گرم سال منسجم‌تر بوده و عمدتاً منطبق بر ارتفاعات و الگوی ناهمواری‌هاست. این مسئله در مناطق واقع در نیمه‌غربی، شمالی، شمالی‌غرب کشور و شمال خراسان برجسته‌تر به نظر می‌رسد. احمدی و همکاران (۱۳۹۷-ب) در پژوهش دیگری، LST روز هنگام را با استفاده از داده‌های سنجنده MODIS بررسی کردند. آنها نشان دادند که میانگین پهنه‌ای بیشینه LST ایران با $46/01^{\circ}\text{C}$ در ماه ژوئیه و میانگین کمینه با $12/26^{\circ}\text{C}$ در ماه ژانویه بوقوع می‌پیوندد. نتایج تحقیق حاکی از آن است که، در دوره گرم سال، به‌ویژه در پهنه‌های گرم ایران (سواحل جنوبی) وردایی دما کاهش می‌یابد. این نتیجه، یافته قبلی مرادی و همکاران (۱۳۹۵-الف)، مبنی بر این که، وردایی دمای سطح در دوره گرم سال برای پهنه‌های اقلیمی گرم به حداقل می‌رسد را مورد تأیید قرار می‌دهد. در یکی دیگر از مطالعات، مسعودیان (۱۳۹۹) فراوانی LST ایران را به مدت ۱۶ سال (۱۳۸۱-۱۳۹۶) با بهره‌گیری از داده‌های MODIS-Aqua بررسی کرد. نتایج پژوهش نشان داد که، توزیع فراوانی LST در ایران تا اندازه‌ی زیادی وابسته به ارتفاع و پس از آن وابسته به عوامل جغرافیایی است. همچنین عابد و همکاران (۲۰۲۲)، به بررسی تغییرات زمانی-مکانی LST در حوضه جازموریان با استفاده از محصولات سنجنده MODIS پرداختند. نتایج نشان داد که پایین‌ترین دماها در ارتفاعات بلند شرق حوضه اتفاق افتاده است. علاوه بر این، در طول دوره مطالعه، LST در ماه ژانویه یک روند افزایشی را بر روی حوضه نشان داده است. شیرغلامی و مسعودیان (۲۰۲۲)، نیز اخیراً تأثیر ارتفاع بر تغییرات زمانی-مکانی LST در استان یزد را بررسی کردند. نتایج تحقیق حاکی از تأثیر قابل توجه ارتفاع بر تغییرات زمانی-مکانی LST در

است. بخشی از تنوع اقلیمی ایران زمین به نحوه پراکنش ناهمواری ها، چگونگی استقرار و گسترش رشته کوه ها و توپوگرافی پیچیده فلات ایران باز می شود. نحوه آرایش رشته های کوه های زاگرس و البرز در غرب و شمال کشور در ترکیب با مناطق پست و هموار داخلی، چون دشت کویر و بیابان لوت، بی شک در ایجاد این تنوع اقلیمی تأثیر گذار است. تغییرات بسیار شدید ارتفاعی در امتداد عرض و طول جغرافیایی به طور محسوسی سبب اختلافات دمایی شبانه روزی بالا و تنوع دمایی قابل توجه، در مقیاس های روزانه، ماهانه و سالانه در ایران زمین شده اند. قرارگیری مناطق پست و بسیار گرم و خشکی، چون بیابان لوت که به عنوان قطب گرمای کره زمین شناخته شده است (میلدرکسلر و همکاران، ۲۰۰۶؛ ۲۰۱۱؛ آذر درخش و همکاران، ۲۰۲۰؛ ژائو و همکاران، ۲۰۲۱)، در برابر رشته کوه های مرتفع که در بخش قابل توجهی از سال دارای پوشش برف و دماهایی پایین بوده و در مواردی با یخچال های طبیعی کوهستانی همراه هستند (فریجنو، ۱۹۹۱؛ موسوی و همکاران، ۲۰۰۹)، بر این تنوع و اختلافات دمایی، دامن زده اند. ایران از نظر ارتفاعی از ۲۶ متر پایین تر از سطح دریا در انزلی تا بیش از ۵۶۰۰ متر در قله دماوند در تغییر است (شکل ۱- الف). عمده مناطق کوهستانی ایران دارای ویژگی هایی همچون دامنه های تند، اقلیم سرد و غیرقابل دسترس شناخته می شوند. بر اساس یک آمار کلی در ایران بیش از یکصد قله با ارتفاع بیش از ۴۰۰۰ متر شناخته شده است که اطلاعاتی از وضعیت دمایی این مناطق در دسترس نمی باشد.

۲-۲. داده ها

در این پژوهش از دو گروه داده شامل داده های ایستگاه های هواشناسی و داده های ماهواره ای سنجنده MODIS استفاده شده است که جزئیات مربوطه به داده ها در جدول ۱ ارائه شده است.

رابطه با دماهای کمینه در مناطق مختلف به انجام رسیده است؛ اما تعداد مطالعات مربوط به دمای کمینه در ایران که با بهره گیری از داده های گذر شب سنجنده های ماهواره ای، با تفکیک افقی بالا و برای یک دوره درازمدت صورت گرفته باشد، بسیار محدود و اندک است. در معدود مطالعات انجام شده نیز که LST را در ایران بررسی کرده اند یا از نسخه های قدیمی محصول MODIS و یا از محصولات با تفکیک افقی ۱۰ کیلومتر آن استفاده کرده اند. این پژوهش سعی دارد تا با بهره گیری از جدیدترین محصول LST شبانه سنجنده MODIS (نسخه ۶/۱) که با تفکیک افقی ۱۰۰۰ متر به صورت روزانه، برای یک دوره درازمدت موجود است، اقلیم شناسی دمای شبانه و به طور کلی دمای کمینه ایران را مورد بررسی قرار دهد. تحلیل زمانی- مکانی LST شبانه در گستره جغرافیایی ایران، از یک سو سبب آشکارسازی رژیم فصلی و اثرات مناطق مرتفع و ناهمواری ها بر این متغیر سطحی شده و از سوی دیگر، امکان شناسایی ویژگی های منطقه ای، پهنه ای، درون سالانه و وردایی ها و اختلافات دمایی و به طور کلی اقلیم شناسی دمای شبانه را فراهم خواهد کرد. لذا هدف اصلی پژوهش حاضر، بررسی اقلیم شناسی LST شبانه، تحلیل زمانی- مکانی آن، تعیین فراوانی آستانه های LST شبانه به همراه درستی سنجی آن برای دو دهه گذشته می باشد. نتایج تحقیق کاربردهای بسیاری در ارتباط با یخچال های کوهستانی، ذخیره گاه های برف، کشاورزی، کوهنوردی، اکوتوریسم و منابع آب خواهد داشت.

۲. روش پژوهش

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

مطالعه حاضر برای ایران به انجام رسیده است. ایران کشوری با اقلیم غالب خشک و نیمه خشک در غرب آسیا قرار گرفته است (شکل ۱- الف). علی رغم غلبه کلی اقلیم خشک و نیمه خشک، ایران از تنوع اقلیمی بالایی برخوردار

جدول ۱. مشخصات داده‌های مورد استفاده در پژوهش.

نوع داده		دوره زمانی	متغیر	تفکیک افقی
ماهواره‌ای	سنجنده MODIS ماهواره Aqua	۲۰۰۳-۲۰۲۱	LST شبانه	یک کیلومتر
ایستگاهی	ایستگاه‌های هواشناسی همدید سازمان هواشناسی	۲۰۰۳-۲۰۲۱	دمای خاک در عمق ۵ سانتی‌متری	نقطه‌ای

۲-۲-۱. داده‌های مشاهداتی

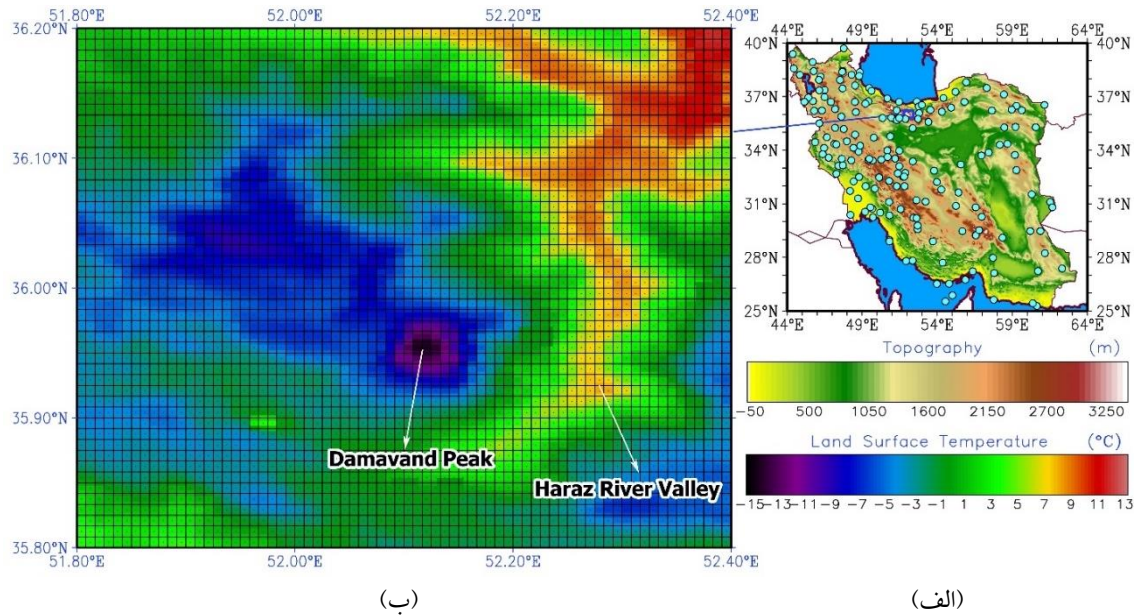
در این پژوهش داده‌های دمای خاک در عمق ۵ سانتی‌متری برای ساعت ۰۰ گرینویچ ثبت شده در ایستگاه‌های هواشناسی همدید سازمان هواشناسی کشور برای دوره آماری ۲۰۰۳-۲۰۲۱ مورد استفاده قرار گرفت. در مجموع پس از بررسی داده‌ها و حذف ایستگاه‌های دارای داده‌های ناقص، ۱۷۴ ایستگاه انتخاب و پردازش‌های آماری بر روی آنها انجام شد. موقعیت ایستگاه‌ها در شکل ۱-الف نشان داده شده است. این داده‌ها برای ارزیابی داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده قرار گرفتند.

۲-۲-۲. محصول دمای سطح زمین (LST) سنجنده

MODIS

در طی چند دهه گذشته، ماهواره‌های پایش زمین اداره ملی هوانوردی و فضایی ایالات متحده آمریکا موسوم به ناسا (NASA) مجموعه‌ای جامع از اندازه‌گیری‌های ماهواره‌ای را در قالب محصولات مختلف برای بهبود درک بشر از سامانه زمین فراهم کرده‌اند. تابش‌سنج تصویربرداری با توان تفکیک متوسط (MODIS) بر روی ماهواره‌های Terra و Aqua نصب شده تا برای شناسایی و پایش تغییرات پدیده‌های زمینی، جوی و اقیانوسی مورد استفاده قرار گیرد. ماهواره‌های Terra و Aqua هر دو مدار قطبی بوده و سنجنده MODIS داده‌ها را در ۳۶ باند طیفی ارائه می‌دهد (لو و همکاران، ۲۰۱۹). ماهواره Terra در دسامبر ۱۹۹۹ پرتاب شد، در حالی که Aqua در می ۲۰۰۲ پرتاب شد. پوشش جهانی این دو ماهواره با در نظر گرفتن پارامترهای مداری آنها در ۱-۲ روز ارائه می‌شود و LST را چهار بار در روز (LSTd) و شب (LSTn) ارائه می‌دهند. در حال حاضر محصولات متنوعی از سنجنده MODIS برای LST

در سطح جهانی در دسترس هستند که می‌توان به محصولات MOD11A1؛ MOD11A2؛ MOD21A1N؛ MOD21A2 از ماهواره Terra و محصولات MYD11A1؛ MYD11A2؛ MYD21A2؛ MYD21A1N؛ MYD21A2 از ماهواره Aqua اشاره کرد. ماهواره Terra در حدود ساعت ۱۰:۳۰ صبح و ۲۲:۳۰ شب از استوا عبور می‌کند. در مقایسه، ماهواره Aqua در حدود ۱:۳۰ بامداد و ۱۳:۳۰ بعدازظهر در جهت مخالف از خط استوا می‌گذرد. هر ۲۴ ساعت، هر دو ماهواره به‌طور همزمان از بالای یک مکان روی زمین عبور می‌کنند (القاسمی و همکاران، ۲۰۲۲). در این میان، براساس نتایج تحقیقات، داده‌های LST گذر شبانه برای هر دو ماهواره در قیاس با محصول گذر روزانه آنها از دقت بیشتری برخوردار بوده و به داده‌های دمای مشاهداتی ایستگاهی نزدیک‌تر هستند (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۱؛ شن و لپتوخ، ۲۰۱۱). این نکته نیز قابل ذکر است که، محصول LST شبانه ماهواره Aqua از دقت بالاتری در مقایسه با محصول مشابه در ماهواره Terra برخوردار است (بنعلی و همکاران، ۲۰۱۲؛ دیداری و همکاران، ۲۰۱۷). لذا در تحقیق حاضر هر چند که ماهواره Terra طول دوره آماری بلندمدت‌تری را نسبت به ماهواره Aqua ارائه می‌دهد، اما هم به دلیل زمان عبور آن در شب (ساعت ۲۲:۳۰) که برای بررسی کمینه دمای سطح زمین مناسب نیست و هم به جهت دقت پایین‌تر، از داده‌های ماهواره Aqua استفاده شده است. در این پژوهش از محصول LST شبانه سنجنده MODIS ماهواره Aqua با گام زمانی روزانه (MYD11A1) برای یک دوره ۱۹ ساله (۲۰۰۳-۲۰۲۱) استفاده شده است تا بتوان شناخت دقیقی از تغییرات زمانی-مکانی و ویژگی‌های آماری دمای کمینه (شبانه) سطح زمین ایران به دست آورد.



شکل ۱. (الف) موقعیت منطقه مورد مطالعه به همراه موقعیت تعداد ۱۷۴ ایستگاه همدید مورد استفاده در تحقیق. (ب) نمونه نقطه شبکه‌های ۱۰۰۰ متری محصول MYD11A1 سنجنده MODIS ماهواره Aqua برش خورده از البرز مرکزی. برای فراهم کردن درک بهتری از تفکیک افقی داده‌ها، مقادیر متوسط سالانه LST شبانه میانگین‌گیری شده برای یک دوره ۱۹ ساله (۲۰۰۳-۲۰۲۱) در تهیه شکل ب استفاده شد. در شکل ب، قله دماوند با دمای متوسط شبانه 15°C - (رنگ بنفش تیره) به عنوان سردترین نقطه اقلیمی ایران در مجاورت دره رودخانه هراز در شرق (محدوده رنگ زرد تا قرمز) به خوبی قابل مشاهده است.

ارزیابی کیفیت داده‌های LST سنجنده MODIS در مقایسه با داده‌های مشاهداتی ایستگاهی در ایران برآمده‌اند (دیداری و همکاران، ۲۰۱۷؛ مرادی و صلاحی، ۲۰۲۳؛ سرهان و همکاران، ۲۰۲۴). از جمله، در یکی از جدیدترین مطالعات، سرهان و همکاران (۲۰۲۴)، ضمن استفاده از داده‌های دمای هوای ۲ متری تعداد ۱۶۸ ایستگاه همدید کشور سعی کردند ارتباط بین داده LST شبانه سنجنده MODIS-Aqua و دمای هوای ۲ متری در مقیاس سالانه مورد ارزیابی قرار دهند. نتایج پژوهش نشان داد که LST شبانه در ایران از دمای هوای ۲ متری سردتر بوده و به طور میانگین 1°C - با آن تفاوت دارد. این تفاوت برای مناطق ساحلی، مناطق پست داخلی و مناطق مرتفع با ارتفاع بیش از ۱۵۰۰ متر به ترتیب، 1°C -، 1°C - و 1°C - گزارش شده است. همچنین، مقدار همبستگی بین این دو داده به طور میانگین $0/98$ به دست آمده است. با این وجود، می‌توان گفت هنوز یک ارزیابی مطلوب و جامع از کیفیت و دقت LST شبانه سنجنده MODIS (محصول MYD11A1) به عمل نیامده است. بر این اساس، در پژوهش حاضر، با استفاده از داده‌های روزانه

برای استخراج MODIS-LST از دو باند مادون قرمز گرمایی، یعنی باند $10/78-11/28$ میکرومتر) و باند $27/77-12/11$ میکرومتر) استفاده می‌شود (دوآن و همکاران، ۲۰۱۸). محصولات LST با استفاده از الگوریتم پنجره مجزا (Split-Window) تولید شده‌اند (وان و همکاران، ۲۰۰۲). دقت محصولات LST سنجنده MODIS در اکثر موارد تحت شرایط آسمان صاف (Clear Sky)، طبق نتایج اعتبارسنجی زمینی حدود 1K است. در این تحقیق دمای سطح زمین شبانه (LST_n) محصول MYD11A1 از نسخه $6/1$ استخراج شده است. داده‌های این محصول با تفکیک افقی ۱۰۰۰ متر از $2002/07/04$ در دسترس هستند (شکل ۱-ب). داده‌های این تحقیق از پایگاه Earth data برای دوره ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۱ تهیه شد و مورد استفاده قرار گرفت.

۳-۲. روش تحقیق

۳-۲-۱. درستی سنجی LST شبانه MODIS-Aqua

در مرور تحقیقات گذشته، برخی پژوهش‌ها درصد

بیش برآوردی و مقادیر منفی این سنجه نشان‌دهنده کم برآوردی در داده مورد مطالعه نسبت به داده‌های مشاهده‌ای است. سنجه آماری PBIAS برخلاف سنجه‌هایی چون ریشه میانگین مربع خطا (RMSE) و متوسط اریبی خطا (MBE) تابعی از دامنه تغییرات دما نمی‌باشد که بر این اساس نتایج مطمئن‌تری برای بررسی میزان کارایی داده‌های ماهواره ارائه می‌دهد. این سنجه به درصد بیان شده و مقدار آن بین صفر و ۱۰۰ است. سنجه همبستگی (r) نیز بیانگر مقدار روابط و میزان هماهنگی بین دو متغیر در طول زمان می‌باشد. روابط سنجه‌های مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۲ آورده شده است. هر یک از سنجه‌های PBIAS، RMSE، MBE و همبستگی پیرسون به ترتیب با بهره‌گیری از روابط ۱ تا ۴ محاسبه می‌شوند.

در روابط جدول ۲ sim مقدار برآورد شده LST (سنجنده MODIS) و obs مقدار مشاهده‌ای (ایستگاه‌های هم‌دید منتخب) است. σ انحراف معیار و μ میانگین است. برای سه سنجه PBIAS، RMSE و MBE هر چه نتیجه به دست آمده کمتر باشد به ترتیب درصد اریبی؛ خطا و اریبی LST ماهواره کمتر است. همچنین مقدار همبستگی پیرسون هر چه به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد کارایی داده‌های ماهواره بالاتر است.

دمای خاک در عمق ۵ سانتی‌متری، برای ساعت ۰۰ گرینویچ، که نزدیک‌ترین داده به داده‌های LST شبانه سنجنده MODIS-Aqua محسوب می‌شود، کیفیت محصول MYD11A1 ارزیابی خواهد شد.

برای درستی‌سنجی LST شبانه برونداد سنجنده MODIS از سنجه‌های همبستگی (r)، ریشه میانگین مربع خطا (RMSE)، متوسط اریبی خطا (Mean Squared Error = MBE) و درصد اریبی (Percent Bias = PBIAS) استفاده شده است (جدول ۲). جهت درستی‌سنجی داده‌ها از مقادیر روزانه LST مربوط به نزدیک‌ترین نقطه شبکه نسبت به هر ایستگاه برای یک دوره آماری ۱۹ ساله استفاده به عمل آمد. هر یک از سنجه‌ها جنبه متفاوتی از داده‌های مورد مطالعه را مورد ارزیابی قرار می‌دهند. سنجه RMSE یکی از مرسوم‌ترین سنجه‌های برآورد خطا است و از آن برای ارزیابی کارایی داده‌های شبیه‌سازی/بازتخلیل در برابر داده‌های مشاهده‌ای استفاده می‌شود و هرچه خروجی آن به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده خطای کمتر در داده‌های شبیه‌سازی/بازتخلیل است. سنجه MBE اریبی مقادیر برآورد شده متغیر را به بزرگ‌تر یا کوچک‌تر بودن از مقادیر مشاهده شده نشان می‌دهد. مقدار بهینه این سنجه صفر است. MBE می‌تواند مثبت یا منفی باشد. مقادیر مثبت آن نشان‌دهنده

جدول ۲. مشخصات ۴ سنجه آماری استفاده شده در پژوهش.

رابطه	سنجه آماری	روش محاسبه سنجه	بازه محاسباتی	مقدار بهینه
(۱)	ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (sim_i - obs_i)^2}$	(0, +∞)	صفر
(۲)	درصد اریبی (PBIAS)	$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) \times 100}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \right]$	(0, 100)	صفر
(۳)	متوسط اریبی خطا (MBE)	$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (obs - sim)}{n}$	(-∞, +∞)	صفر
(۴)	ضریب همبستگی (r)	$r = \frac{\sum (sim_i - \overline{sim})(obs_i - \overline{obs})}{\sqrt{\sum (sim_i - \overline{sim})^2 \sum (obs_i - \overline{obs})^2}}$	(-1, +1)	یک

۲-۳-۲. بررسی اقلیم‌شناسی LST شبانه

پژوهش‌های اقلیمی بیشترین وابستگی را به مفاهیم و تکنیک‌های آماری دارند. در این پژوهش نیز برای دستیابی به اهداف تعیین شده که پیش‌تر اشاره شد از روش‌های آماری همانند میانگین و فراوانی استفاده شده است. برای بررسی توزیع زمانی-مکانی و تحلیل فضایی LST شبانه در ایران، پس از دانلود محصول MYD11A1، سری زمانی بلندمدت روزانه و ماهانه از داده‌ها تهیه شد. سپس داده‌ها از کلون به درجه سلسیوس تبدیل شدند. مراحل انجام تحقیق به اختصار به شرح زیر می‌باشد:

- بررسی وضعیت متوسط درازمدت LST شبانه در مقیاس ماهانه. در این مرحله، داده‌های LST به مقادیر میانگین درازمدت ۱۹ ساله تبدیل شد و نقشه‌ها به تفکیک برای ۱۲ ماه سال تهیه شد و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

- بررسی سیر تکوین زمانی-عرضی و زمانی-طولی مقادیر میانگین LST ماهانه به منظور درک ویژگی‌های اقلیمی و آشکارسازی نقش دو عامل عرض جغرافیایی و ارتفاع در توزیع زمانی-مکانی LST شبانه کشور. در این راستا، هاومولر دیاگرام‌های زمانی-عرضی و زمانی-طولی تهیه شد. در واقع، هدف اصلی از تهیه این کردارها، نشان دادن ارتباط بین تغییرات نصف‌النهاری (عرضی) و مداری (طولی) دمای سطح زمین و زمان (۱۲ ماه سال) و همچنین ارتباط آن با شرایط متناظر ارتفاعی است. این کردارها به وضوح می‌توانند سبب آشکارسازی طول دوره‌های دمای پایین و دوره‌های دمای بالا در امتداد عرض و طول جغرافیایی در گستره ایران زمین شوند و در عین حال، ارتباط بین تغییرات دمایی با عامل ارتفاع در چرخه زمانی ۱۲ ماه سال را نشان دهند. با در نظر گرفتن نصف‌النهاری یا مداری بودن دیاگرام، این مهم با میانگین‌گیری از تمامی نقطه شبکه‌های واقع در یک عرض (طول) جغرافیایی و نشان دادن آنها در یک دیاگرام که محور عمودی آن عرض (طول) جغرافیایی و محور افقی آن زمان برای ۱۲ ماه

سال است، امکان‌پذیر می‌شود.

- بررسی تغییرات درون‌سال‌ی درصدسهم پهنه‌ها با دماهای مختلف. در این مرحله، داده‌های میانگین درازمدت ماهانه به تفکیک برای دوازده ماه سال، مورد استفاده قرار گرفت. ابتدا برای هر ماه خاص، مقادیر LST کمینه و بیشینه استخراج شد. سپس بین مقدار کمینه و بیشینه دما در هر ماه، بازه‌های دمایی $2/5$ درجه‌ای تعریف شد و برای هر بازه‌دمایی، مجموع نقطه‌شبکه‌های درگیر شمارش شد. پس از آن، برای هر ماه نسبت سهم پهنه‌های تحت اشغال هر بازه دمایی در مقایسه با تعداد کل نقطه شبکه‌های کشور (مجموعاً 2234866 نقطه شبکه) به درصد تعیین شد. دلیل لحاظ کردن بازه‌های دمایی $2/5$ درجه‌ای، از یک سو، ممانعت از پیچیدگی کردار و از سوی دیگر، ارائه یک تصویر هموار و کلی از تغییرات درون-سالانه دما در سطح کشور بوده است. برای نمونه، میانگین LST ماه ژانویه در نقاط مختلف کشور بین 25°C و 35°C تغییر می‌یابد. ابتدا تمام نقطه شبکه‌ها در ماه ژانویه که LST برابر و بالاتر از 25°C و پایین‌تر از $22/5^{\circ}\text{C}$ (بازه $2/5$ درجه‌ای اول) در سطح کشور داشته‌اند، شمارش شدند. سپس به همین منوال شمارش تعداد نقطه شبکه‌ها برای سایر بازه‌های دمایی یعنی $22/5^{\circ}\text{C}$ تا 20°C و 20°C تا $17/5^{\circ}\text{C}$ و الی آخر، جهت تعیین تعداد نقطه شبکه‌های تحت اشغال هر یک از بازه‌های دمایی صورت گرفت. در نهایت، با تعیین درصدسهم هر یک از بازه‌ها از مجموع نقطه شبکه‌های کشور، منحنی دمایی ماه ژانویه در حداصل دمای 25°C تا 35°C ، ترسیم شد. در واقع، درصد مربوط به هر یک از بازه‌های دمایی در هر ماه خاص، بیانگر درصدی از مساحت کشور است که دمای اظهارشده برای آن بازه را تجربه می‌کند. در نهایت، امکان ترسیم یک کردار خطی با تعداد ۱۲ منحنی به نشانه ۱۲ ماه سال در یک کردار ترکیبی فراهم شد. تهیه این شکل، امکان مطالعه رژیم فصلی و تغییرات درون-سالانه LST بر روی ایران را فراهم می‌کند.

- بررسی اختلاف دمای شبانه. یکی از ویژگی‌های بارز

۳. نتایج و بحث

۳-۱. درستی سنجی داده LST شبانه

اگرچه داده‌های ماهواره‌ای، به‌عنوان داده‌های پایه مشاهداتی، به‌طور گسترده‌ای در ارزیابی خروجی مدل‌های عددی و ارزیابی‌های اقلیمی به کار گرفته می‌شوند، اما به جهت برخی ویژگی‌های جغرافیایی ایران از جمله، تنوع اقلیمی بالا، گستردگی مداری و نصف‌النهار قابل توجه، پیچیدگی عوارض جغرافیایی، درهم‌تنیدگی خشکی‌ها و دریاها و کوهستانی بودن، امکان بروز خطا و اریبی در داده‌های ماهواره‌ای برآورد شده با الگوریتم‌های محاسباتی افزایش می‌یابد. بر این اساس، در این بخش، کیفیت داده‌های LST گذر شبانه ماهواره Aqua بر روی ایران با بهره‌گیری از داده‌های روزانه دمای خاک در عمق ۵ سانتی‌متر، که در واقع مناسب‌ترین داده در دسترس برای ارزیابی داده‌های فوق محسوب می‌شود، مورد ارزیابی قرار خواهند گرفت. برای این منظور از داده‌های تعداد ۱۷۴ ایستگاه همدید سازمان هواشناسی کشور استفاده شد (شکل ۱-الف). قابل ذکر است که در ایستگاه‌های همدید سازمان هواشناسی کشور داده‌های دمای خاک برای ۳ مرتبه در شبانه‌روز اندازه‌گیری می‌شوند. در این پژوهش از داده‌های دمای خاک در عمق ۵ سانتی‌متر برای ساعت ۰۰ گرینویچ (ساعت ۳/۳۰ به وقت محلی)، که نزدیک‌ترین داده به زمان برداشت شبانه ماهواره Aqua (ساعت ۱/۳۰ به وقت محلی) محسوب می‌شود، استفاده شده است. قبل از انجام ارزیابی، طرح نکات زیر مهم به نظر می‌رسد:

- داده‌های LST ماهواره Aqua یک داده شبکه‌ای با تفکیک افقی ۱ کیلومتر است که در هر نقطه شبکه مقادیر متوسط پهنه‌ای آن نقطه شبکه برآورد شده است. بنابراین، یک تفاوت بنیادی در نحوه و فرایند تولید این داده با داده‌های نقطه‌ای ایستگاه‌های هواشناسی وجود دارد که سبب می‌شود در برخی موارد، داده‌های ایستگاهی نماینده کاملی برای پهنه‌های جغرافیایی مستقر در آنها محسوب

اقلیم ایران، نوسانات بالای دمایی در طول سال و بین مناطق مختلف کشور است. ایران به‌عنوان یک کشور خشک، سوای اختلاف دمای شبانه روزی بسیار بالا (آذر درخش و همکاران، ۲۰۲۰؛ ژائو و همکاران، ۲۰۲۱)، از نوسانات و اختلافات شدید دمایی در ساعات شب نیز برخوردار است. اختلافات یاد شده هم می‌تواند ناشی از اختلافات مکانی دما بین سردترین و گرم‌ترین مناطق کشور باشد (بعد تفاوت‌های مکانی) و هم می‌تواند به‌واسطه وجود اختلافات دمایی در یک نقطه شبکه خاص در طی فصول مختلف سال (بعد تفاوت‌های زمانی) باشد. داده‌های گذر شبانه MODIS-Aqua این امکان را فراهم کرد تا مقادیر اختلاف دما در شب را چه در بعد مکانی و چه در بعد زمانی مورد بررسی قرار دهیم. بدین ترتیب، در این بخش، اختلاف دمای شبانه در گستره ایران زمین مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، با بهره‌گیری از داده‌های LST شبانه، دمای میانگین، میانگین بیشینه و میانگین کمینه برای هر ماه محاسبه شد. در این تحقیق، اختلاف دمای شبانه از دو منظر مورد توجه قرار گرفت. در منظر اول، مقدار اختلاف دمای شبانه بین سردترین و گرم‌ترین نقاط کشور در طول ۱۲ ماه سال شناسایی شد. نتیجه این بخش مشخص کرد که در هر ماه خاص، مقدار اختلاف دمای شبانه بین سردترین و گرم‌ترین مناطق کشور، فارغ از موقعیت مکانی و یا دوری و نزدیکی نقاط کمینه و بیشینه، چند درجه بوده است. در منظر دوم، با بهره‌گیری از مقادیر میانگین کمینه و بیشینه LST شبانه برای هر نقطه شبکه، اختلاف دمای سالانه هر نقطه شبکه محاسبه شد و در نهایت نقشه اختلاف دمای شبانه ایران با لحاظ کردن مقادیر اختلاف برای هر نقطه شبکه ترسیم شد.

- شناسایی سردترین نقاط ایران در طی دوره ۱۹ ساله. در این مرحله، ضمن بررسی مقادیر LST به تفکیک برای ۲۲۸ ماه، پایین‌ترین دمای میانگین ماهانه ثبت شده برای هر ماه استخراج شد و نتایج در قالب نقشه‌های توزیع ماهانه فراوانی نقاط سرد ایران ارائه شد.

نمی‌شوند.

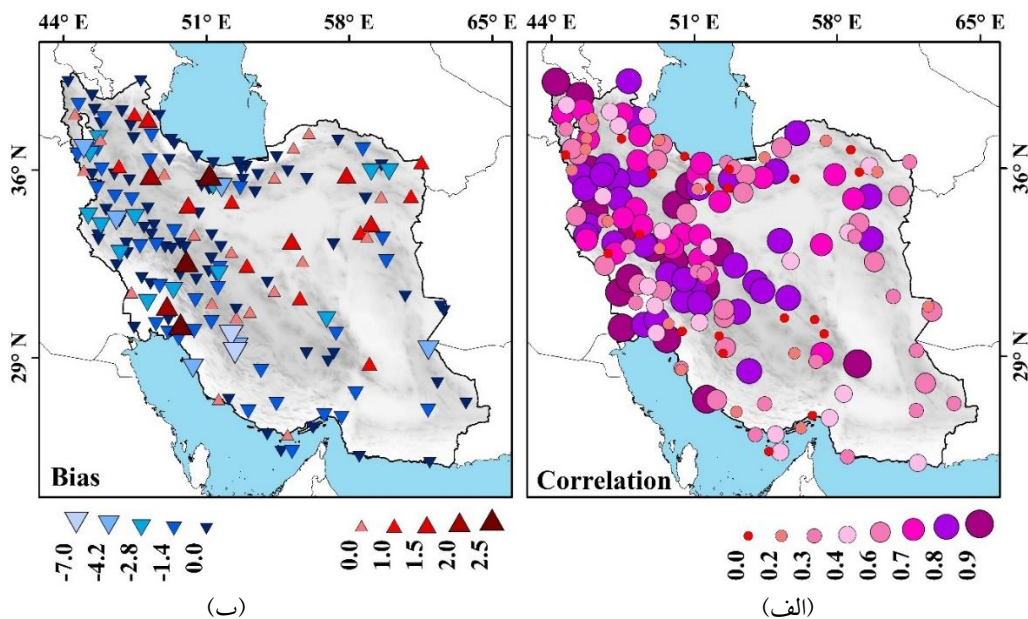
- تغییرات نقطه‌ای ترکیبات و خصوصیات فیزیکی خاک، پوشش سطحی و پوشش گیاهی، رطوبت خاک و سایر عوامل و ویژگی‌های جغرافیایی در خرد مقیاس، همواره مقایسه داده‌های نقطه‌ای ایستگاهی را با داده‌های پهنه‌ای با چالش مواجه می‌سازد. این چالش زمانی برجسته‌تر می‌شود که به واسطه برخی ملاحظات اقتصادی، اجتماعی و ...، نقطه ایستگاه از منظر مکان‌گزینی، نماینده چندان مطلوبی برای آن پهنه جغرافیایی و اقلیمی محسوب نشود.

- ثبت داده‌های دمای خاک در عمق ۵ سانتی‌متر و اختلاف زمانی حدود ۲ ساعت بین زمان ثبت این داده‌ها و داده‌های ماهواره Aqua خود چالش دیگری است که در نهایت سبب پیدایش یک اختلاف چند درجه‌ای دما بین دو نوع داده می‌شود.

علی‌رغم چالش‌های فوق، به جهت اعتباربخشی به نتایج پژوهش، همواره انجام درستی‌سنجی داده‌های به‌کارگرفته‌شده در یک تحقیق از ارزش و اهمیت قابل توجهی برخوردار است. براین اساس، در این تحقیق با بهره‌گیری از چهارسنجه آماری متداول، یعنی سنجه‌های همبستگی، RMSE، متوسط اریبی خطا (MBE) و درصد اریبی (PBIAS)، کیفیت LST ماهواره Aqua مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

بررسی روابط همبستگی روزانه بین داده‌های LST ماهواره‌ای و دمای خاک بیانگر آن است که داده‌های ماهواره‌ای در تمامی پهنه‌های جغرافیایی ایران از مطلوبیت نسبتاً بالایی برخوردارند (شکل ۲-الف). این مطلوبیت در بخش‌های غربی، شمال غربی و شمالی کشور به بالاترین میزان خود می‌رسد. به طوری که در مناطق یادشده، در غالب ایستگاه‌ها همبستگی‌های بالاتر از ۰/۵ و ۰/۶ مشاهده می‌شود. در مقابل، میزان همبستگی در سواحل جنوبی و بخش‌هایی از جنوب شرق و شرق کشور در قیاس با سایر

مناطق پایین‌تر است. این نکته نیز قابل ذکر است که، در مناطق کوهستانی مرتفع، واقع در جنوب غرب، غرب، شمال غرب و شمال کشور، میزان همبستگی‌ها به بالاترین مقدار خود می‌رسد. در واقع، داده‌های ماهواره‌ای در محدوده رشته کوه‌های زاگرس، آذربایجان و البرز ارتباط بسیار خوبی را با داده‌های دمای خاک نشان می‌دهند. در این میان، مشاهده بالاترین میزان همبستگی‌ها در بخش‌های مرتفع رشته کوه زاگرس جالب توجه است. نکته دیگری که در اینجا مهم به نظر می‌رسد، الگوی نامنظم پراکنش ایستگاه‌های دارای همبستگی پایین در سطح کشور است. توضیح بیشتر این که به استثنای سواحل جنوبی و بخش‌های جنوب شرقی و شرقی کشور، در سایر پهنه‌های جغرافیایی، ایستگاه‌های با همبستگی پایین از الگوی خاصی تبعیت نمی‌کنند و تقریباً به شکلی نامنظم و تصادفی در دل مناطق با ضرایب همبستگی بالا جای گرفته‌اند. به نظر می‌رسد کاهش همبستگی در چنین نقاطی بیش از آن که به برآورد نادرست الگوریتم محاسباتی و خطای سنجنده MODIS Aqua مربوط شود به چالش‌های بیان شده در رابطه با به‌کارگیری داده‌های ایستگاهی بازگردد. همین امر موجب شده تا ایستگاه‌های فوق‌الذکر نماینده کاملی برای پهنه جغرافیایی که در آن مستقر هستند، محسوب نشوند. در مجموع، بیش از ۸۴ درصد از نقاط مورد بررسی از همبستگی بالای ۰/۵ با داده‌های ایستگاهی برخوردار بوده‌اند، که این امر بیانگر مطلوبیت بالای داده LST شبانه می‌باشد. نتایج تحقیق حاضر مطالعه اخیر مرادی و صلاحی (۲۰۲۳) را که با بهره‌گیری از داده‌های دمای هوای ۲ متری و دمای خاک برای تعداد قابل توجهی از ایستگاه‌های هواشناسی کشور به انجام رسیده، مورد تایید قرار می‌دهد. با این تفاوت که، در مطالعه یادشده، با ترکیب داده‌های ماهواره‌های Terra و Aqua برای یک دوره تقریباً ۹ ساله، همبستگی‌های پهنه‌ای برای گذر روز هنگام سنجنده‌های MODIS به دست آمده است.



شکل ۲. درستی سنجی داده‌های روزانه LST (محصول MYD11A1) مربوط به گذر شبانه سنجنده MODIS ماهواره Aqua با بهره‌گیری از داده‌های روزانه دمای خاک (عمق ۵ سانتی‌متری، ساعت ۰۰ گرینویچ) برای تعداد ۱۷۴ ایستگاه هواشناسی همدید کشور برای یک دوره آماری ۱۹ ساله (۲۰۲۱-۲۰۰۳). (الف) ضریب همبستگی. (ب) مقادیر متوسط اریبی (°C).

۱/۳۹°C بالغ می‌شود. این عدد از مطلوبیت قابل توجه داده LST شبانه سنجنده MODIS-Aqua در پهنه جغرافیایی ایران حکایت دارد.

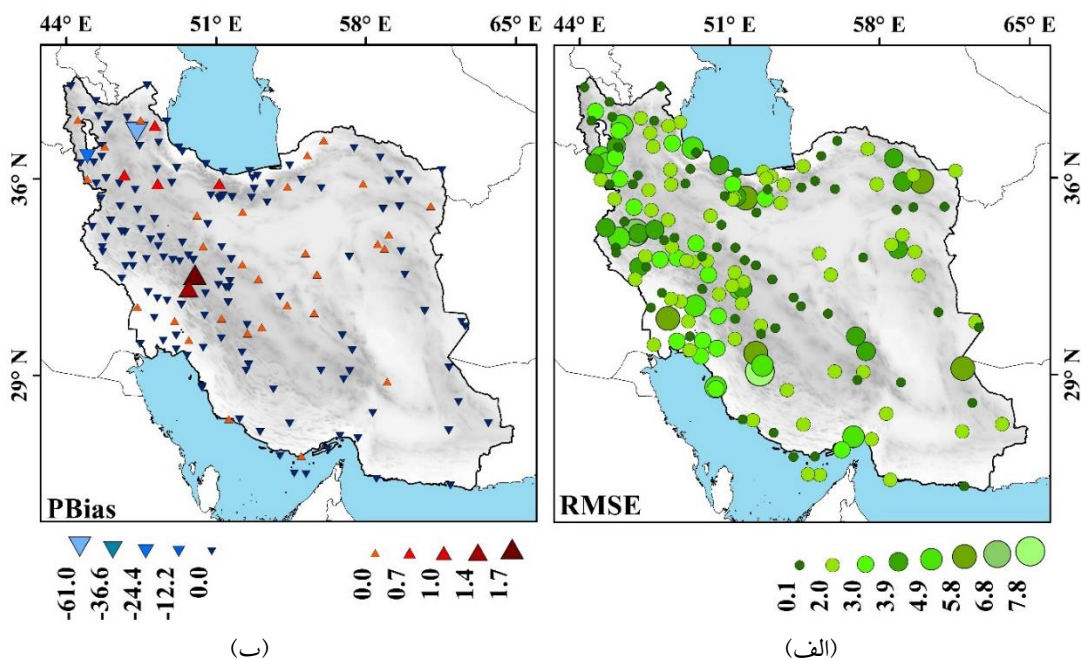
برای درستی‌سنجی محصول MYD11A1 از دو سنجه آماری دیگر، که جنبه‌های دیگری از داده‌ها را مورد ارزیابی قرار می‌دهند، استفاده شده است. این دو سنجه آماری عبارت‌اند از: ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و درصد اریبی (PBIAS). درصد اریبی، برعکس سنجه‌هایی همانند اریبی و RMSE، تحت تأثیر مقدار خود متغیر قرار نمی‌گیرد. به طوری که مثلاً RMSE بزرگ‌تر لزوماً به معنی خطای بزرگ‌تر در داده نمی‌باشد. چراکه، این امر می‌تواند در نتیجه مقدار بزرگ‌تر و تغییرات بیشتر آن متغیر باشد. لذا، در کنار سنجه‌هایی همانند RMSE از سنجه کارآمد درصد اریبی نیز استفاده شده است. درصد اریبی نشان‌دهنده درصد بیش‌برآوردی یا کم‌برآوردی در داده است. نتایج این سنجه نشان می‌دهد تقریباً در ۸۰ درصد از ایستگاه‌های مورد مطالعه، LST شبانه مقادیری کمتر از مقدار واقعی را برآورد کرده است. به عبارتی محصول MYD11A1 در برآورد دمای شبانه ایران، دارای کم‌برآوردی است. همان‌طوری که در شکل ۳-ب مشاهده می‌شود، در

ارزیابی داده‌های LST شبانه سنجنده MODIS-Aqua با استفاده از سنجه متوسط اریبی خطا (MBE) حاکی از وجود یک ویژگی کلی در گستره جغرافیایی ایران زمین است. مهم‌ترین ویژگی، غلبه کم برآوردی داده‌های LST شبانه ماهواره‌ای در قیاس با دمای خاک می‌باشد. با توجه به شکل ۲-ب، از تعداد کل ۱۷۴ نقطه شبکه مورد بررسی، در ۱۴۰ نقطه شبکه (حدود ۸۰ درصد از نقاط)، مقدار LST ماهواره‌ای از مقدار دمای خاک اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های هواشناسی کمتر بوده است. در این رابطه، حدود نیمی از نقاط، مقدار اریبی کمتر از ۱°C را تجربه کرده‌اند. نقاط یادشده، در تمامی مناطق جغرافیایی کشور پراکنده شده‌اند. در رابطه با بیان علت کم برآوردی مقادیر LST شبانه در قیاس با داده‌های ایستگاهی، شاید ذکر این نکته ضروری باشد که، در طول شب، خروج انرژی و کاهش دما در سطح زمین با سرعت بیشتری در قیاس با خاک در عمق ۵ سانتی‌متری به وقوع خواهد پیوست. بدین ترتیب، کم برآوردی داده‌های ماهواره‌ای در قیاس با دمای خاک بسیار منطقی خواهد بود. در مجموع، با در نظر گرفتن ۱۷۴ نقطه شبکه مورد بررسی، مقدار متوسط اریبی داده‌های ماهواره‌ای در قیاس با داده‌های ایستگاهی به

این نظر می‌توان اذعان داشت که این محصول کارایی بالایی را در برآورد LST شبانه ایران دارد (شکل ۳-ب). مقدار RMSE در ایران برای داده LST شبانه از 0.1°C تا $7/8^{\circ}\text{C}$ متغیر است. در این سنجه، برخلاف سنجه درصد اریبی، نمی‌توان الگوی یکنواختی برای تغییرات ریشه میانگین مربعات خطا در ایران در نظر گرفت. به‌طور کلی، مقادیر RMSE در مناطق خشک و نیمه‌خشک داخلی ایران کمتر از رشته‌کوه‌های زاگرس، البرز و شمال غرب است. قبل از آن که این مقدار دارای دلیل اقلیمی باشد دارای دلیل آماری است. چراکه سنجه RMSE از مقدار خود متغیر تأثیر می‌پذیرد، یعنی هرچه مقدار متغیر بزرگ‌تر باشد RMSE نیز بزرگ‌تر است. براین اساس، مناطق داخلی ایران از جمله شرق و جنوب شرق کشور که دارای LST شبانه کمتری نسبت به رشته‌کوه‌های زاگرس، البرز و شمال غرب هستند، مقدار RMSE کمتری را نیز دارا می‌باشند. کمترین مقدار RMSE مربوط به ایستگاه نوشهر و بیشترین مقدار آن مربوط به ایستگاه شیراز می‌باشد. متوسط پهنه‌ای مقدار ریشه میانگین مربعات خطا در ایران $1/7^{\circ}\text{C}$ می‌باشد که همان‌طوری که برای درصد اریبی نیز گفته شد، این نتیجه به‌روشنی نشان می‌دهد که این محصول برای برآورد LST شبانه ایران دارای کارایی بالایی است (شکل ۳-الف).

بیشتر مناطق کشور، به‌ویژه در شمال غرب، رشته‌کوه زاگرس، رشته‌کوه البرز، سواحل جنوبی دریای خزر و سواحل جنوبی ایران، محصول MYD11A1 دارای کم‌برآوردی است.

در مقابل ۲۱ درصد از ایستگاه‌ها دارای بیش برآوردی هستند که بیشتر در مناطق خشک و نیمه‌خشک داخلی دیده می‌شوند. در این میان، بیشینه بیش برآوردی با مقدار $1/7$ درصد مربوط به ایستگاه داران، واقع در استان اصفهان می‌باشد. این نتیجه نشان می‌دهد که محصول MYD11A1 سنجنده MODIS دمای سطح زمین شبانه را در ایران $1/7$ درصد بیشتر از داده ایستگاهی برآورد می‌کند. در مقابل، ایستگاه‌هایی که کم‌برآوردی LST شبانه را نشان داده‌اند نیز غالباً LST را با اریبی کمتر از ۱۲ درصد برآورد کرده‌اند. بیشینه کم‌برآوردی نیز مربوط به دو نقطه شبکه/دو ایستگاه، واقع در شمال غرب کشور می‌باشد. به‌استثنای دو ایستگاه فوق، که داده‌های ماهواره‌ای دما را ۳۶ درصد و ۶۰ درصد کمتر برآورد کرده‌اند، در سایر نقاط، درصد اریبی غالباً کمتر از ۱۲ درصد و یا حتی کمتر از ۱۰ درصد می‌باشد. این نتیجه به‌روشنی نشان می‌دهد که محصول MYD11A1 سنجنده MODIS دمای سطح زمین را در بیشتر مناطق کشور با خطایی کمتر از ۱۰ درصد برآورد می‌کند که از



شکل ۳. درستی سنجی محصول MYD11A1 سنجنده MODIS برای LST شبانه در ایران. (الف) ریشه میانگین مربعات خطا. (ب) درصد اریبی.

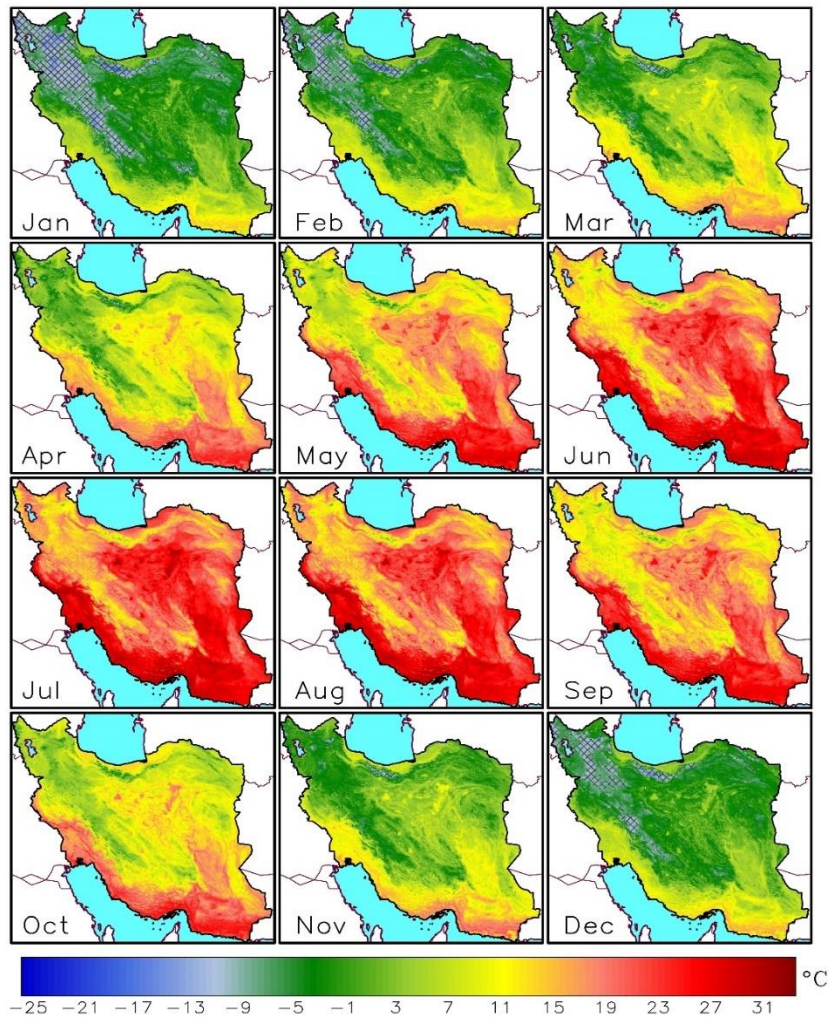
۲-۳. اقلیم‌شناسی LST شبانه

مقادیر متوسط درازمدت LST شبانه در ایران طی ماه‌های مختلف بین کمینه $25/46^{\circ}\text{C}$ و بیشینه $33/04^{\circ}\text{C}$ در نوسان است (شکل ۴). LST‌های بسیار پایین شبانه در محصول MYD11A1 یک چرخه فصلی آشکار را به نمایش می‌گذارند. بررسی‌ها نشان‌دهنده آن است که، دماهای بسیار پایین تنها در مناطق کوهستانی مرتفع ایران قابل مشاهده هستند. در این رابطه، دماهای کمتر از 10°C در یک بازه زمانی از ماه نوامبر تا ماه آوریل در محورهای کوهستانی زاگرس، البرز و آذربایجان، قابل مشاهده هستند (محدوده دارای هاشور در شکل ۴). در فصل زمستان (DJF) بخش‌های مرتفع البرز مرکزی، ارتفاعات آذربایجان شرقی، ارتفاعات مرزی در آذربایجان غربی و مناطق مرتفع زاگرس در حول و حوش عرض 32°N پایین‌ترین دماها را تجربه می‌کنند. در مقابل، دماهای بیش از 20°C در دوره گرم سال در تمامی مناطق واقع در سواحل جنوبی و سرزمین‌های پست و بیابانی داخلی مشاهده می‌شود. در فصل بهار کمینه و بیشینه دمای شبانه نسبت به فصل زمستان افزایش می‌یابد. کمینه LST در ماه‌های آوریل، می و جون به ترتیب $18/06^{\circ}\text{C}$ ، $12/7^{\circ}\text{C}$ و $6/34^{\circ}\text{C}$ به دست آمده است (شکل ۴). همچنین بیشینه دمای شبانه که در ماه‌های زمستان عمدتاً بر سواحل مکران و نوار حاشیه‌ای واقع در جنوب شرق ایران تمرکز یافته بود، در فصل بهار از سواحل جنوبی به سمت مناطق داخلی ایران گسترش می‌یابد. به طوری که در ماه جون، مناطقی با LST شبانه بالاتر از 30°C در دشت کویر نیز مشاهده می‌شود. در فصل تابستان کمینه LST شبانه در هیچ منطقه‌ای از ایران به پایین‌تر (سردتر) از 5°C نمی‌رسد. در مقابل، میانگین بیشینه LST شبانه در ماه آگوست در بیابان لوت به $33/3^{\circ}\text{C}$ بالغ می‌شود.

با خاتمه دوره گرم سال در ایران، میانگین کمینه‌های LST

شبانه به‌طور محسوسی در فصل پاییز کاهش می‌یابد. به طوری که، پایین‌ترین دماهای میانگین شبانه برای ماه‌های سپتامبر، اکتبر و نوامبر به ترتیب $7/86^{\circ}\text{C}$ ، $13/2^{\circ}\text{C}$ و $19/68^{\circ}\text{C}$ در مناطق مرتفع کوهستانی به دست آمده است. در ادامه، در ماه دسامبر، میانگین پایین‌ترین دما در ارتفاعات البرز به $22/6^{\circ}\text{C}$ می‌رسد (شکل ۴). در بررسی توزیع فضایی LST شبانه در ایران، نقش پوشش گیاهی نیز در کنار توپوگرافی، مهم و تعیین‌کننده است. در واقع، مقدار LST شبانه در برخی مناطق جغرافیایی کشور به شدت با شرایط پوشش گیاهی مرتبط است. برای نمونه، دشت مغان و پهنه‌رویشی ارسباران در شمال غرب کشور، به رغم این که در عرض‌های جغرافیایی بالایی قرار گرفته‌اند، اما مقدار LST این مناطق در فصل زمستان بین $0/75^{\circ}\text{C}$ تا $4/5^{\circ}\text{C}$ به دست آمده است (شکل ۴).

در سواحل جنوبی دریای خزر نیز به وضوح می‌توان اثر پوشش گیاهی را بر میانگین LST شبانه به خوبی مشاهده کرد. پوشش گیاهی در مناطق شمالی کشور، معمولاً بیشتر از مناطق شمال‌غربی است (شجاعی‌زاده و همکاران، ۱۴۰۲). این مسئله به وضوح به اقلیم مرطوب و پرباران خزری مربوط می‌شود که برای رشد گیاهان شرایط مطلوب‌تری را فراهم می‌کند. علاوه بر این، میزان پوشش گیاهی معمولاً در تابستان بیشتر از زمستان و بیشتر از میانگین سالانه است. شایان ذکر است که، اثر پوشش گیاهی بر LST با ساعات شب و روز کمی متفاوت است که این نتیجه را می‌توان با تعرق ناکافی پوشش گیاهی در طول شب توضیح داد (یائو و همکاران، ۲۰۱۸). اما آنچه که بیش از همه ساختار فضایی LST شبانه در گستره ایران زمین را از خود متأثر می‌سازد، نه عامل عرض جغرافیایی و نه عامل پوشش گیاهی، بلکه در درجه نخست، وضعیت ناهمواری‌ها، توزیع جغرافیایی رشته‌کوه‌ها و پراکنش ارتفاعات در ایران زمین است.



شکل ۴. میانگین ماهانه LST شبانه در ایران برای یک دوره ۱۹ ساله (۲۰۰۳-۲۰۲۱) با استفاده از داده‌های سنجنده ماهواره Aqua با تفکیک افقی ۱۰۰۰ متر. هاشورها در ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس، آوریل، نوامبر و دسامبر بیانگر مناطقی است که دمای 1°C و پایین‌تر را تجربه می‌کنند.

محققین بی شماری مورد تأکید قرار گرفته است و پژوهشگران متعددی، عامل ارتفاع و توپوگرافی ایران را در توزیع فضایی و جغرافیایی دمای هوا و دمای سطح، بیش از هر عامل دیگری مهم دانسته‌اند (مرادی و همکاران، ۱۳۹۵-الف؛ کیخسروی کیانی و مسعودیان، ۱۳۹۶؛ احمدی و همکاران، ۱۳۹۷-الف؛ حلبیان و صلحی، ۱۳۹۹؛ مرادی و همکاران، ۲۰۱۸؛ شیرغلامی و مسعودیان، ۲۰۲۲؛ مرادی و دارند، ۲۰۲۲؛ کربلایی و همکاران، ۲۰۲۳؛ مسعودیان و منتظری، ۲۰۲۳؛ سرهان و همکاران، ۲۰۲۴).

رابطه مشابهی نیز بین ارتفاع و LST توسط پژوهشگران متعدد در سایر مناطق کوهستانی جهان به دست آمده است (برای نمونه، سان و همکاران، ۲۰۱۵). لازم به ذکر است که،

یک بررسی اجمالی و اولیه بر روی نقشه‌های میانگین LST شبانه در شکل ۵ به خوبی نقش ارتفاعات را در توزیع جغرافیایی دماهای شبانه در ایران زمین یادآور می‌شود. در یک جمع بندی کلی، LST شبانه در تمامی فصول از آرایش ناهموازی‌ها در ایران پیروی می‌کند و در تمام طول سال پایین‌ترین دماها با محورهای کوهستانی رشته کوه‌های مرتفع انطباق دارند. ارتفاع عامل مهمی است که بر میانگین LST در طول شب تأثیر می‌گذارد. در تمامی پهنه‌های جغرافیایی ایران با افزایش ارتفاع LST شبانه کاهش می‌یابد. پراکنش فضایی ارتفاع و میانگین LST نشان‌دهنده یک رابطه معکوس قوی و پایدار بین مقادیر LST و ارتفاع در تمامی ماه‌های سال است. نتیجه فوق، پیش‌تر توسط

ترکیب ارتفاع و عرض جغرافیایی بالا در تغییرات فصلی کمینه LST در ایران از اهمیت قابل توجهی برخوردار است، به طوری که، ترکیب این دو عامل در بروز پایین ترین دماهای شبانه کشور در بخش های میانی البرز مرکزی و ارتفاعات آذربایجان نقش مهمی را بازی می کند. با این وجود، تغییرات LST تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله عوامل جوی (شامل؛ تابش، دمای هوا، زاویه تابش خورشید و پوشش ابر) و ویژگی های سطحی (همانند زبری سطح، پوشش گیاهی، محتوای رطوبت) قرار دارد و وضعیت نهایی دمای سطح زمین در تمامی پهنه های اقلیمی و جغرافیایی ایران را نمی توان با قطعیت ناشی از تغییرات یک یا دو عامل خاص دانست.

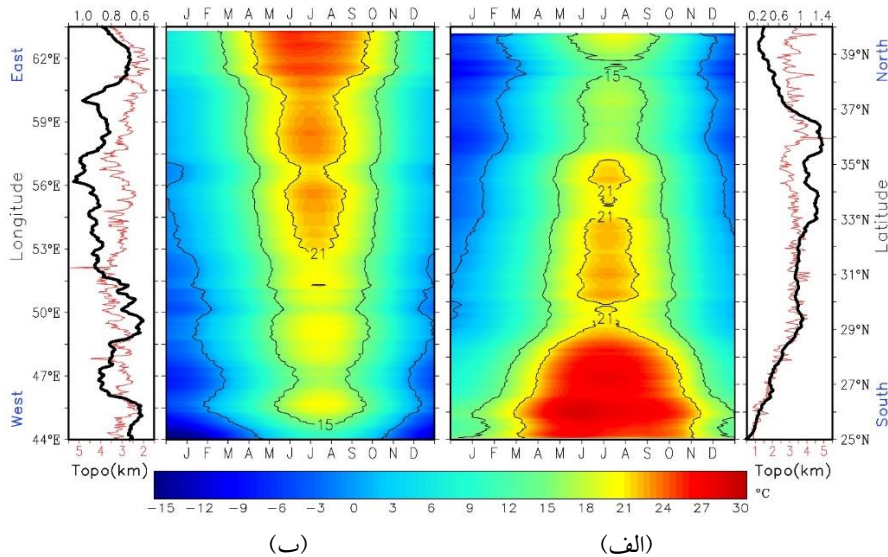
به منظور فراهم کردن درکی عمیق تر از ارتباط بین ارتفاع، عرض جغرافیایی و پراکنش فضایی دما در ایران زمین، تکوین زمانی و پهنه های LST در امتداد طول و عرض جغرافیایی در طول سال مورد بررسی قرار گرفت. بررسی عرضی میانگین LST شبانه در قالب دیاگرام هاومولر حکایت از آن دارد که، به طور کلی با افزایش عرض جغرافیایی در ایران، دوره زمانی تسلط دماهای بالا (در اینجا 15°C) به طور محسوسی کاهش می یابد. به طوری که، دماهای میانگین 15°C که در پایین تر از عرض 28°N تقریباً در تمام ماه های سال تسلط دارند، در بالاتر از عرض 37°N تنها برای حدود ۴ ماه از سال، یعنی در حفاصل ماه جون تا پایان سپتامبر، قابل مشاهده هستند (شکل ۵-الف). علی رغم تبعیت کلی الگوی LST ایران از عرض جغرافیایی، آرایش فضایی رشته کوه ها و نحوه گسترش ارتفاعات به شدت الگوی فوق را از خود متأثر می کند. با توجه به شکل ۵-الف، در گذر از جنوب به شمال، به یکباره در محدوده عرض 29°N به واسطه گسترش ناگهانی و قابل توجه رشته کوه های مرتفع در ایران (شامل رشته کوه های مرتفع زاگرس و کرمان)، شاهد کاهش ناگهانی دوره تسلط دماهای بالا در سطح کشور هستیم. به طوری که، در عرض یادشده، تسلط دماهای بالای 15°C به یکباره از حدود ۱۲ ماه به حدود ۶ ماه در سال (ابتدای آوریل تا پایان ماه سپتامبر)، کاهش می یابد. در ادامه حرکت شمال سو، علی رغم افزایش

عرض جغرافیایی، الگوی فضایی LST تا عرض 36°N تغییر محسوس و قابل توجهی را تجربه نمی کند. اما در حول و حوش عرض 36°N با افزوده شدن رشته کوه البرز به پهنه عرضی کشور، شاهد کاهش دوره تسلط دماهای بالا به کمتر از ۴ ماه در سال (از اواسط ماه می تا پایان ماه سپتامبر) هستیم. در گذر شمال سو، پس از عبور از مدار 36°N همان طوری که شکل ۵-الف نشان می دهد، در حول و حوش عرض 38°N ما شاهد یک گسیختگی کامل در منحنی دمای 15°C می باشیم. به عبارتی، در محدوده عرض 38°N در هیچ کدام از ماه های سال دماهای میانگین شبانه بالای 15°C تجربه نمی شوند. این در حالی است که، در عرض های 39°N تا 40°N دوره میانگین تسلط دماهای بالا مجدداً مشابه عرض های 30°N تا 35°N ، به حدود ۵ ماه در سال، بالغ می شود. بدین ترتیب، بالاترین دوره تسلط دماهای پایین در ایران (در اینجا 10°C)، به ترتیب مربوط به عرض های 38°N و 36°N می باشد. به تعبیری دیگری، دو محدوده عرضی یادشده، طولانی ترین دوره سرد را در کشور تجربه می کنند.

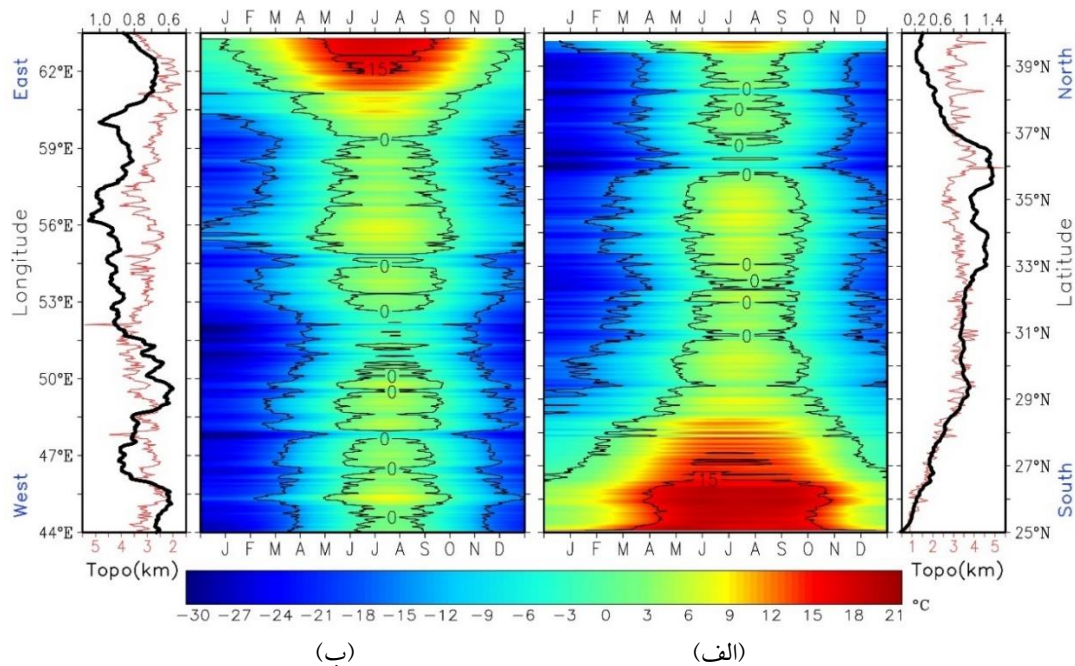
شکل ۵-الف، به خوبی اثر ترکیبی عرض جغرافیایی و رشته کوه های مرتفع را در توزیع فضایی دما در ایران در ماه های مختلف سال نشان می دهد. مضاف بر این، شکل یادشده مبین نقش برجسته رشته کوه های زاگرس، البرز و ارتفاعات آذربایجان در شکل گیری الگوی فضایی دما در ایران است. برای آشکار سازی برخی دیگر از ویژگی های الگوی فضایی توزیع دما در ایران، شکل ۵-ب، وضعیت متوسط LST شبانه را در امتداد مداری (امتداد طول جغرافیایی)، نشان می دهد. بر اساس شکل، هرچه از شرق کشور به سمت غرب حرکت کنیم، به تدریج از دوره تسلط دماهای بالا کاسته شده و بر طول دوره تسلط دماهای پایین افزوده می شود. به طور کلی، در گذر از شرق به غرب کشور، تغییر طول دوره های دماهای بالا و پایین به شکلی بطئی تر و تدریجی تر به وقوع می پیوندد. بدین ترتیب، روند تغییرات مداری دمای ایران در طی ماه های مختلف سال، کندتر است. با این وجود، طول متوسط دوره تسلط دماهای بالا در محدوده طول های جغرافیایی 61°E ، 57°E ،

در مقابل، برخلاف روند کلی تغییرات دما، به یکباره در بالاتر از عرض 39°N ، دوره تسلط دماهای بالا افزایش قابل توجهی را نشان می‌دهد، که به نظر می‌رسد در ارتباط مستقیم با پهنه‌های رویشی ارسباران و دشت مغان در منتهی‌الیه شمالی کشور باشد. در این محدوده، طول متوسط دوره تسلط دماهای بالا به بیش از ۶ ماه در سال بالغ می‌شود (شکل ۶-الف). این درحالی‌است که، در پایین‌تر از عرض 29°N ، دماهای بالا تقریباً در تمام طول سال تسلط دارند. بررسی تکوین زمانی میانگین دمای کمینه شبانه در امتداد مداری، به شکل بارزتری نقش رشته‌کوه‌های مرتفع در توزیع دما را آشکار می‌سازد (شکل ۶-ب). جایی که، ارتفاعات و توده‌های مرتفع کوهستانی خراسان، البرز شرقی، البرز میانی و ارتفاعات شرق آذربایجان، گسیختگی‌های مشخصی را در الگوی توزیع دمای سالانه به ترتیب در طول‌های جغرافیایی 60°E ، 54°E و $52/5^{\circ}\text{E}$ - 50°E و 48°E ایجاد کرده‌اند. با این وجود، روند کلی کاهش دماهای بالا و افزایش طول دوره سرد را می‌توان در جابه‌جایی از شرق به غرب کشور مشاهده کرد (شکل ۶-ب).

50°E و 47°E به شکل محسوس‌تری کاهش می‌یابد، که به نظر می‌رسد بیش از هر عاملی به وجود رشته‌کوه‌های مرتفع در محدوده‌های یادشده، باز می‌شود. برای فراهم کردن درکی بهتر از نقش ارتفاعات و رشته‌کوه‌های مرتفع در تغییر الگوی فضایی دما در ایران، تکوین زمانی-فضایی میانگین کمینه LST شبانه در شکل ۶ ارائه شده است. تفاوت شکل ۶ و ۵ در این است که، در اینجا به جای استفاده از دمای میانگین ماهانه برای ۱۹ سال، از مقادیر دمای مطلق ثبت شده در هر ماه جهت تهیه میانگین استفاده شده است. شکل ۶-الف، ضمن منعکس کردن نقش کلی عرض جغرافیایی در توزیع فضایی دما در ایران، بر اثرات بارز توده‌های مرتفع کوهستانی در محدوده‌های عرضی 29°N ، 32°N و 36°N و 38°N دلالت دارد. در این میان، طولانی‌ترین دوره‌های تسلط دماهای پایین در ایران (در اینجا منحنی همدمای -15°C)، که با گسیختگی و محو کامل دوره تسلط دماهای بالا همراه بوده، در حول و حوش عرض 36°N مشاهده می‌شود. قابل ذکر است که، گسیختگی یادشده نتیجه مستقیم گسترش رشته‌کوه‌های مرتفع البرز در این محدوده جغرافیایی است.



شکل ۵. هاومولرها، تکوینی زمانی-فضایی تغییرات میانگین ماهانه LST شبانه را در ایران برای یک دوره ۱۹ ساله (۲۰۲۱-۲۰۰۳) در امتداد نصف النهاری و مداری نشان می‌دهند. (الف) تغییرات میانگین ماهانه LST در امتداد عرض جغرافیایی، میانگین‌گیری شده برای طول 44°E تا $63/5^{\circ}\text{E}$. (ب) مشابه پنل (الف)، اما در امتداد طول جغرافیایی، میانگین‌گیری شده برای عرض 25°N تا 40°N درجه شمالی. برای ایجاد تمایز، خطوط سیاه به ترتیب معرف دمای 0°C ، 15°C و 21°C می‌باشند. برای مقایسه، برای هر یک از دیاگرام‌ها، مقادیر میانگین (منحنی سیاه ضخیم) و بیشینه (منحنی قرمز نازک) ارتفاع، با ویژگی‌هایی مشابه، در کنار آنها ترسیم شد. دما برحسب درجه سلسیوس و ارتفاع برحسب کیلومتر است.



شکل ۶. همانند شکل ۵، با این تفاوت که در ترسیم هاومولرها از مقادیر میانگین کمینه LST شبانه استفاده شد. (الف) و (ب) به ترتیب مقادیر میانگین کمینه LST شبانه و بیشینه ارتفاع در امتداد عرض و طول جغرافیایی. خطوط سیاه در دو دیاگرام به ترتیب معرف دمای 15°C ، 0°C و 15°C می باشند.

یافته‌ها حاکی از آن است که، پهنه‌های دمایی غالب در ایران از کمینه ژانویه تا بیشینه جولای جابه‌جا می‌شوند (شکل ۷). در میان ماه‌های انتقالی، تنها ماه آوریل و اکتبر دارای هویت دمایی متمایز و مستقل هستند و بقیه ماه‌های فصول انتقالی با توجه به الگو، یا متصل به زمستان و یا متصل به تابستان هستند. مقایسه تغییرات درون سالانه، حکایت از آن دارد که، بالاترین تمرکز دمایی و همگنی در ماه‌های دو فصل تابستان و زمستان مشاهده می‌شود. در این تحقیق منظور از همگنی و تمرکز دمایی، فاصله کمتر بین بالاترین و پایین‌ترین دمای میانگین ثبت شده به درجه سلسیوس برای هر ماه است. بر این اساس، بالاترین تمرکز درون فصلی در ماه‌های فصل تابستان قابل مشاهده است. توضیح بیشتر آن که، در این موقع از سال، تمامی پهنه‌های جغرافیایی ایران در یک بازه دمایی 25°C (حدفاصل دمای 10°C الی 35°C) جای می‌گیرند. ماه‌های دو فصل زمستان و بهار به ترتیب با تجربه بازه‌های دمایی 35°C و 40°C در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند. بیشترین میزان ناهمگنی و کمترین مقدار تمرکز دمایی نیز مربوط به ماه‌های فصل پاییز است که یک بازه دمایی 45°C را در حد فاصل دمای 10°C و 35°C تجربه

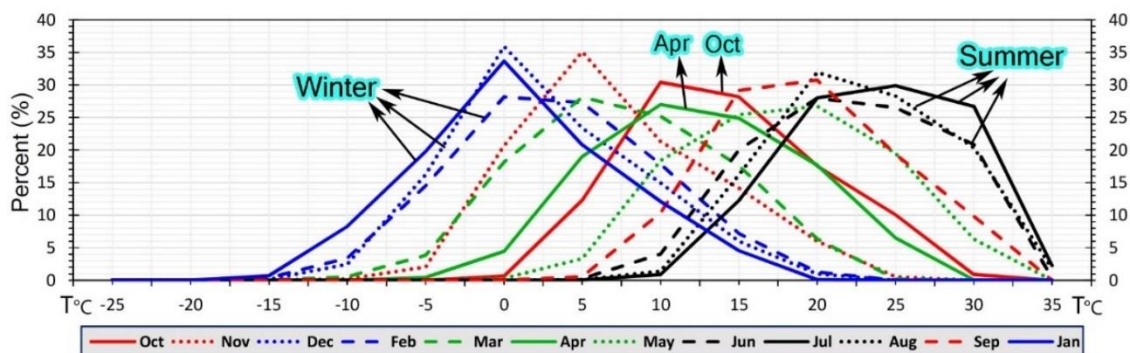
۳-۳. تغییرات درون‌سالی درصد سهم پهنه‌ها با دماهای مختلف

بررسی کمی پهنه‌های دمایی در ماه‌های مختلف سال امکان استخراج برخی حقایق از اقلیم‌شناسی دمای کمینه در ایران را فراهم می‌کند. در این راستا و برای آشکارسازی برخی ویژگی‌های دمایی ایران، از جمله رژیم فصلی و تغییرات درون سالانه دما، در یک بررسی فضایی، تعداد نقطه شبکه‌های تحت اشغال دماهای مختلف به تفکیک برای هر ماه از سال استخراج شد. شکل ۷ به تفکیک برای ۱۲ ماه سال، تغییرات درون سالانه درصد سهم دماهای مختلف در حد فاصل دمای $27/5^{\circ}\text{C}$ (پایین‌ترین دمای میانگین ماهانه تجربه شده در ایران) تا $37/5^{\circ}\text{C}$ (بالاترین دمای میانگین ماهانه تجربه شده در ایران) را به صورت بازه‌های دمایی $2/5^{\circ}\text{C}$ نشان می‌دهد. در این شکل، مجموع مساحت زیر هر منحنی (هر ماه) برابر با تعداد کل نقطه شبکه‌های در برگیرنده ایران است (مجموعاً ۲۲۳۴۸۶۶ نقطه شبکه). بدین ترتیب، در شکل ۷، منحنی مربوط به هر ماه، مقدار مساحت تحت اشغال هر بازه دمایی از $27/5^{\circ}\text{C}$ تا $37/5^{\circ}\text{C}$ را به درصد بیان می‌کند.

ایران به یکباره از ۰/۷ درصد در ماه اکتبر به ۲۳ درصد در ماه نوامبر افزایش می‌یابد. در ادامه، درصد سهم دماهای 0°C و پایین‌تر از ابتدای دوره سرد تا ماه ژانویه به بیشینه خود در ایران می‌رسد. پس از آن، طی ماه‌های فوریه و مارس، مساحت پهنه‌های سرد، روند نزولی به خود گرفته، تا جایی که در گذر از ماه مارس به ماه آوریل به یکباره از ۲۲/۵ درصد به کمتر از ۵ درصد کاهش می‌یابد. بر اساس یافته‌ها، فصول انتقالی در ایران بسیار کوتاه هستند. با توجه به شکل ۷، ماه آوریل به عنوان یک ماه انتقالی، با متوسط سهم ۲۷ درصد برای آستانه دمایی 10°C و بالاتر، هویتی مستقل را در سیر تکوینی سالانه دمای شبانه از خود نشان داده است. این در حالی است که، ماه‌های مارس و می، از نظر وسعت پهنه‌های تحت اشغال دماهای مختلف، به ترتیب به الگوهای دمایی زمستان و تابستان شباهت بیشتری پیدا کرده‌اند. از سوی دیگر، در گذر از ماه‌های فصل پاییز به فصل زمستان، شاهد تسلط یک الگوی دمایی بسیار شبیه به الگوی انتقالی فصل بهار خواهیم بود. در حالی که ماه اکتبر با سهم غالب ۳۰ درصد برای آستانه دمایی 10°C و بالاتر، هویت مستقل پاییزی خود را نمایان می‌سازد، دو ماه سپتامبر و نوامبر از الگویی پاییزی فاصله گرفته و به ترتیب به الگوی دمایی تابستان و زمستان نزدیک‌ترند. بدین ترتیب، با تحلیل فضایی پهنه‌های تحت اشغال دماهای مختلف در طول سال، استقلال دمایی ماه‌های آوریل و اکتبر به عنوان ماه‌های نماینده فصول بهار و پاییز و کوتاه بودن فصول انتقالی در ایران، به خوبی قابل تشخیص است.

می‌کنند. به طور کلی، ناهمگنی و پراکندگی دمایی در فصول انتقالی به گونه‌ای است که هم در ماه‌های فصل پاییز (SON) و هم در ماه‌های فصل بهار (MAM) با گذر زمان یک الگوی غالب سه‌مدی یا سه‌قله‌ای از پراکنش دماهای شبانه مشاهده می‌شود (شکل ۷).

بررسی درصد سهم مساحت تحت اشغال دماهای مختلف در ۱۲ ماه سال، حاکی از آن است که، بیش از ۴۵ درصد از کل مساحت کشور، در تمامی ماه‌های فصل زمستان، دمای برابر و یا پایین‌تر از 0°C را تجربه می‌کنند. به طور دقیق‌تر، در ماه‌های دسامبر، ژانویه و فوریه به ترتیب در ۶۲/۵٪، ۵۵٪ و ۴۶/۵٪ از مساحت کشور دمای 0°C و پایین‌تر مشاهده می‌شود. با این وجود، سهم کلی دماهای 0°C و پایین‌تر از کل ماه‌های سال، تنها ۱۸ درصد می‌باشد. این سهم در قیاس با سهم ۸۲ درصدی دماهای بالاتر از 0°C ، حکایت از تمرکز زمانی دماهای پایین در فصل زمستان دارد. به عبارتی، دماهای کمینه ایران حتی در دوره سرد سال از چنان وسعتی برخوردار نیستند که دماهای بالا، در طول سال برخوردارند. از طرفی، اگر بخواهیم بر اساس درصد مساحت تحت اشغال دماهای مختلف دوره سرد را از دوره گرم سال جدا کنیم، با در نظر گرفتن شکل ۷، دوره سرد سال در ایران با افزایش ناگهانی وسعت پهنه‌های سرد در ماه نوامبر آغاز شده و با کاهش محسوس و ناگهانی وسعت آن در ماه آوریل پایان می‌یابد. بدین ترتیب، دوره سرد اصلی ایران به مدت ۵ ماه در بازه ماه‌های نوامبر تا مارس به وقوع می‌پیوندد. توضیح بیشتر آن که، با آغاز ماه نوامبر، سهم دماهای 0°C و پایین‌تر در



شکل ۷. درصد سهم پهنه‌ها با دماهای مختلف در ایران به تفکیک برای ۱۲ ماه سال برای دوره ۱۹ ساله (۲۰۲۱-۲۰۲۳) با استفاده از داده‌های میانگین LST شبانه MODIS-Aqua. محور افقی دما به درجه سلسیوس و محور قائم سهم پهنه‌ها با دماهای مختلف به درصد. جهت تشخیص الگوهای فصلی، از رنگ‌های آبی، سبز، سیاه و قرمز به ترتیب برای فصل‌های زمستان، بهار، تابستان و پاییز استفاده شده است.

(زایتچک و همکاران، ۲۰۰۷؛ زرین و همکاران، ۲۰۱۱؛ مفیدی و زرین، ۱۳۹۱) خود به یکی از مهم‌ترین ساز و کارها در پیدایش یک محیط خشک، با دماهای بالا و فاقد بارش در خاورمیانه مبدل می‌شوند (مفیدی و زرین، ۲۰۲۲).

۳-۴. اقلیم‌شناسی اختلاف دمای شبانه

یکی از ویژگی‌های اقلیمی مناطق جنب‌حاره، نوسانات شدید دما در بازه‌های زمانی شبانه‌روزی، ماهانه و سالانه است. در واقع، به واسطه کمبود رطوبت، خشکی هوا، دریافت انرژی خورشیدی قابل توجه در طول روز و امکان هدررفت قابل ملاحظه انرژی در ساعات شب، نوسانات بالای دمایی از ویژگی‌های اقلیمی این مناطق محسوب می‌شود. با توجه به استقرار ایران در قلب خاورمیانه به‌عنوان یک کشور جنب‌حاره‌ای، نوسانات دمایی بالا از ویژگی‌های اقلیمی این کشور محسوب می‌شود. سوی نوسانات شبانه‌روزی دما، با توجه به تنوع اقلیمی ایران، نوسانات دما در طول شب و برای یک ساعت معین نیز می‌تواند قابل توجه باشد. بر این اساس، مطالعه نوسانات و اختلافات دمایی مناطق مختلف ایران، به همراه بررسی اختلافات دمایی پهنه‌های اقلیمی معین در طی ماه‌های مختلف سال در طول شب، می‌تواند نتایج اقلیمی ارزشمندی را به‌دنبال داشته باشد. در این پژوهش، اختلاف دمای شبانه از دوجنبه مورد بررسی قرار گرفت. در جنبه نخست، مقدار اختلاف دمای شبانه بین سردترین و گرم‌ترین نقطه شبکه‌های کشور در طول ۱۲ ماه سال شناسایی شد. نتیجه این بخش، فارغ از موقعیت مکانی و یا دوری و نزدیکی نقاط کمینه و بیشینه، تعیین خواهد کرد که در هر ماه خاص، مقدار اختلاف دمای شبانه بین سردترین و گرم‌ترین نقاط کشور چند درجه است. در جنبه دوم، اختلاف دمای سالانه برای هر نقطه شبکه خاص، با بهره‌گیری از مقادیر میانگین کمینه و بیشینه LST شبانه برای نقطه شبکه یاد شده به‌دست آمد. در این حالت، با تفاضل‌گیری بین بالاترین و پایین‌ترین دمای میانگین تجربه شده در هر نقطه شبکه، اختلاف دمای سالانه نقطه شبکه یاد شده تعیین شد. در نهایت نقشه اختلاف دمای شبانه ایران با لحاظ کردن مقادیر

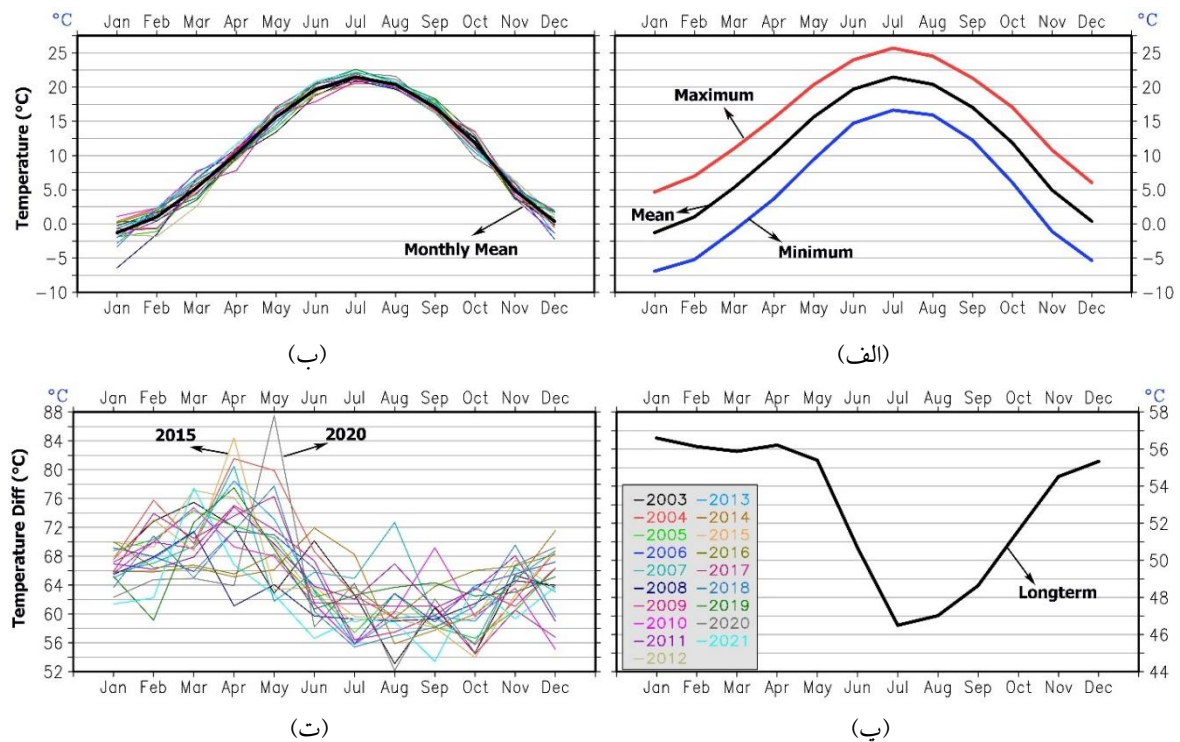
در ادامه بررسی‌ها و در تحلیل سیر تکوینی پهنه‌های با دماهای بالا، افزایش ناگهانی درصد سهم دماهای 20°C و بالاتر در بیش از ۵۰ درصد از مساحت کشور، آغاز دوره گرم را رقم می‌زند. در واقع، دوره گرم سال در ایران با افزایش ناگهانی سهم دماهای 20°C و بالاتر از ۲۴ درصد در ماه آوریل به ۵۲/۵ درصد در ماه می آغاز شده و با کاهش ناگهانی آن از حدود ۶۰ درصد در ماه سپتامبر به ۲۸/۵ درصد در ماه اکتبر پایان می‌یابد. در این میان، سهم بسیار بالای دماهای 20°C و بالاتر در ماه‌های جون، جولای و آگوست به ترتیب با مساحت ۷۵/۶۶٪، ۸۶/۸۲٪ و ۸۲/۳۵٪، ماه‌های فوق را از سایر ماه‌های دوره گرم متمایز ساخته و تفاوت الگوی دمایی فصل تابستان را در سیر تکوینی دوره گرم سال نمایان می‌سازد. بدین ترتیب، در طی سه ماه فصل تابستان به طور متوسط تنها کمتر از ۲۰ درصد از مساحت کشور دمای شبانه کمتر از 20°C را تجربه می‌کند. این در حالی است که، در اوج تابستان (ماه جولای)، در قریب ۳۰ درصد از کل مساحت کشور (۲۲۳۴۸۶۶ نقطه شبکه)، دمای میانگین شبانه 30°C و بالاتر مشاهده می‌شود. بررسی‌ها همچنین بیانگر آن است که، درصد مواقعی از سال که دماهای شبانه 20°C و بالاتر در سطح کشور تسلط می‌یابد (۳۵/۵ درصد)، حدود دو برابر مواقعی است که این سرزمین دمای 0°C و پایین‌تر را تجربه می‌کند (۱۷/۹۲ درصد). از یک سو، سهم بسیار بالای پهنه‌های با دمای بالاتر از 0°C در ۹ ماه از ۱۲ ماه سال، بر تسلط محسوس دماهای بالا بر بخش گسترده‌ای از کشور دلالت دارد و از سوی دیگر، از محلی و محدود بودن زمانی-مکانی پهنه‌های با دماهای پایین در گستره ایران زمین حکایت می‌کند. از منظر اقلیم‌شناسی، استقرار ایران در منطقه جنب‌حاره همراه با نزول دینامیکی و فراگیر هوا در بخش گسترده‌ای از سال، تسلط دماهای بالای را در این سرزمین امری طبیعی می‌سازد. در چنین شرایطی، تنها استقرار رشته‌کوه‌های گسترده و مرتفع، آن هم از نظر زمانی و مکانی به شکلی محدود می‌تواند منشأ تعدیل جو و بروز دماهای پایین باشند. این نکته قابل ذکر است که، رشته‌کوه‌های مرتفع فلات ایران در دوره گرم سال، به‌عنوان چشمه گرمای ارتفاع یافته

نوسان است. در مقابل، منحنی بیشینه دما، در ماه‌های ژانویه و جولای به ترتیب $4/66^{\circ}\text{C}$ و $25/70^{\circ}\text{C}$ را به عنوان مقادیر کمینه و بیشینه در سیر تکوین سالانه تجربه می‌کند (شکل ۸-الف).

در کنار مقادیر درازمدت، اگر به منحنی‌های میانگین ماهانه دما برای ۱۹ سال نیز توجه کنیم، متوجه می‌شویم که بیشترین بی‌هنجاری‌های دمایی در فصل زمستان به‌ویژه در ماه‌های ژانویه و فوریه به وقوع می‌پیوندد. در مقابل، ماه‌های جولای، آگوست و سپتامبر کمترین بی‌هنجاری دمایی را در سیر تکوینی سالانه دما به خود اختصاص می‌دهند (شکل ۸-ب). این نتیجه، با میزان تمرکز و یا پراکندگی منحنی‌های قرمز رنگ در شکل ۶-ب، که معرف سیر تکوین درون سالی دمای کشور برای ۱۹ سال است، نمود یافته است.

اختلاف دمای تمامی نقطه شبکه‌ها در سطح کشور ترسیم شد. با بهره‌گیری از مقادیر بیشینه و کمینه مطلق دما، نقشه اختلاف دمای شبانه ایران برای مقادیر مطلق نیز با انجام فرایندی مشابه تهیه شد.

شکل ۸-الف، میانگین ماهانه LST را برای ۱۲ ماه سال برای گذر شبانه سنجنده MODIS-Aqua نشان می‌دهد. با توجه به شکل، متوسط پهنه‌ای دمای کشور از $1/27^{\circ}\text{C}$ در ماه ژانویه تا $21/46^{\circ}\text{C}$ در ماه جولای تغییر می‌یابد. همگام با آهنگ تغییرات میانگین دما، منحنی‌های میانگین کمینه و بیشینه دمای ماهانه در ایران نیز در طول سال از الگوی مشابهی برخوردارند. به‌طوری‌که، این دو منحنی همچون منحنی میانگین دما، بین کمینه ماه ژانویه و بیشینه ماه جولای تغییر می‌یابند. در این میان، منحنی دمای کمینه از مقدار متوسط $6/91^{\circ}\text{C}$ در ماه ژانویه تا $16/64^{\circ}\text{C}$ در ماه ژوئیه در



شکل ۸. مقادیر میانگین ماهانه LST شبانه برای یک دوره ۱۹ ساله (۲۰۰۳-۲۰۲۱) تهیه شده برای کل پهنه کشور با استفاده از داده‌های سنجنده MODIS ماهواره Aqua. (الف) میانگین ماهانه LST (منحنی سیاه) به همراه میانگین مقادیر بیشینه (منحنی قرمز) و میانگین مقادیر کمینه (منحنی آبی) برای دوره ۱۹ ساله. (ب) میانگین ماهانه درازمدت LST (منحنی سیاه)، به همراه مقادیر میانگین ماهانه برای هر یک از سال‌های مورد مطالعه (منحنی‌های رنگی). (پ) میانگین درازمدت ماهانه اختلاف دمای بیشینه و کمینه شبانه. (ت) اختلاف دمای ماهانه مقادیر مطلق دمای بیشینه و کمینه برای هر یک از سال‌های مورد مطالعه (منحنی‌های رنگی). برای مشخص کردن سال‌ها به‌راهنما در شکل (پ) مراجعه کنید. دما برحسب درجه سلسیوس می‌باشد.

در بررسی پهنه‌ای اختلاف دمای شبانه ایران، چنان که شکل ۸-ب نشان می‌دهد، بالاترین مقادیر میانگین اختلاف دما در طول دوره سرد سال به وقوع می‌پیوندد. جایی که میانگین اختلاف دما در پهنه جغرافیایی ایران در ماه نوامبر از مرز 54°C عبور کرده و تمامی ماه‌های دوره سرد، واقع در حفاصل ماه نوامبر تا پایان ماه می، اختلاف دمای شبانه بالاتر از 55°C را تجربه میکنند. در این میان، در دو ماه ژانویه و آوریل، اختلاف دمای شبانه به بالاترین میزان خود یعنی بیش از 56°C می‌رسد. در مقابل، در فصل تابستان پایین‌ترین اختلاف دمای شبانه در گستره ایران زمین مشاهده می‌شود. به طوری که، اختلاف دمای کشور در این زمان از سال، به‌طور متوسط کمتر از 48°C می‌باشد. در یک نگاه کلی به شکل ۸-پ، منحنی اختلاف دمای کشور بین بیشینه $56/6^{\circ}\text{C}$ در ماه ژانویه و کمینه $46/5^{\circ}\text{C}$ در ماه جولای در نوسان است. برای فراهم کردن جزئیات بیشتری از وضعیت اختلاف دمای کشور، منحنی‌های مقادیر مطلق اختلاف دمای ماهانه برای ۱۹ سال در شکل ۶-ت نشان داده شده است. برای مقایسه، منحنی میانگین اختلاف دمای شبانه نیز ترسیم شده است. با توجه به شکل، منحنی‌های اختلاف مطلق دما، وردایی درون سالی و سال‌به‌سال بسیار بالایی را نشان می‌دهند. با این وجود، ماه‌های آوریل و می، بالاترین اختلاف‌های دمایی و نوسانات را از خود به نمایش گذاشته‌اند. در مقابل، ماه‌های تابستانی، به‌ویژه ماه جولای، پایین‌ترین نوسانات و درعین حال کمترین اختلافات دمایی را در بین ماه‌های سال نشان داده‌اند. با توجه به شکل، بالاترین اختلاف دمای کشور در ماه می سال ۲۰۲۰ و ماه آوریل سال ۲۰۱۵ به ترتیب به مقدار $87/52^{\circ}\text{C}$ و $84/42^{\circ}\text{C}$ به ثبت رسیده است. در کل، ماه آوریل بالاترین اختلاف مطلق دما را در دوره ۱۹ ساله به خود اختصاص داده است. جهت فراهم کردن یک درک فضایی از اقلیم‌شناسی اختلاف دمای شبانه، شکل ۹ تهیه شده است. بررسی مقادیر میانگین سالانه اختلاف دمای شبانه حاکی از آن است که، بیابان لوت بالاترین اختلاف دمای شبانه را در طول سال تجربه می‌کند. به نظر می‌رسد کمبود رطوبت، درصد بسیار پایین ابرناکی، نبود پوشش گیاهی و رطوبت خاک بسیار

کم، در مجموع نوسانات دمایی بالای شبانه را در این بیابان رقم زده است. نوسانات بالای دمای شبانه در بیابان لوت، بالاترین اختلاف دمای متوسط کشور به میزان $16/98^{\circ}\text{C}$ را در بخش جنوب شرقی این بیابان در پی داشته است (شکل ۹-الف). علاوه بر بیابان لوت، در دشت سیستان و بسیاری از نواحی هموار و دشت‌های مرکزی و شرقی ایران نیز میانگین اختلاف دمای شبانه 12°C و بالاتر مشاهده می‌شود. در مقابل، بخش‌های گسترده‌ای از مناطق کوهستانی زاگرس، آذربایجان، خراسان شمالی، نوار ساحلی خلیج فارس و دریای عمان، میانگین اختلاف دمای کمتری بین 8°C الی 10°C را تجربه می‌کنند. در این میان، بخش‌های محدودی از نواحی کوهستانی البرز و آذربایجان از اختلاف دمای بالاتری برخوردارند. نکته جالب توجه، شرایط حاکم در سواحل جنوبی دریای خزر می‌باشد. براساس شکل ۹-الف، یک نوار باریک ساحلی از گیلان تا جلگه گرگان در امتداد خط ساحلی دریای خزر، پایین‌ترین اختلاف دمای شبانه کشور را تجربه می‌کند. به‌وضوح، رطوبت بالای نوار ساحلی دریای خزر نقش اصلی را در کاهش نوسانات دمایی این منطقه بازی می‌کند. در سرتاسر خط ساحلی دریای خزر، میانگین اختلاف دمای شبانه از 8°C تجاوز نکرده و عمدتاً این منطقه، اختلاف دمایی بین 6°C الی 8°C را تجربه می‌کند. بدین ترتیب، پایین‌ترین اختلاف دمای ثبت شده برای ایران به میزان $0/4^{\circ}\text{C}$ مربوط به نوار ساحلی دریای خزر می‌باشد. تهیه نقشه مقادیر مطلق اختلاف دمای شبانه، ویژگی‌های دیگری از اقلیم‌شناسی دمای ایران را آشکار می‌سازد. شکل ۹-ب، مقادیر مطلق اختلاف دمای کشور را برای یک دوره ۱۹ ساله (۲۰۲۱-۲۰۰۳) نشان می‌دهد. در نگاه اول، تفاوت آشکاری بین الگوی فضایی پراکنش مقادیر مطلق اختلاف دمای شبانه در شکل ۹-ب و مقادیر میانگین اختلاف دما در شکل ۹-الف، مشاهده می‌شود. با در نظر گرفتن شکل ۹-ب، بالاترین اختلاف مطلق دمای ایران در یک منطقه نسبتاً هموار در محدوده استان‌های تهران، قم، البرز و اصفهان قابل مشاهده است. در مناطق یادشده، بیشینه اختلاف دما از مرز 70°C عبور کرده و بیشینه مطلق آن به

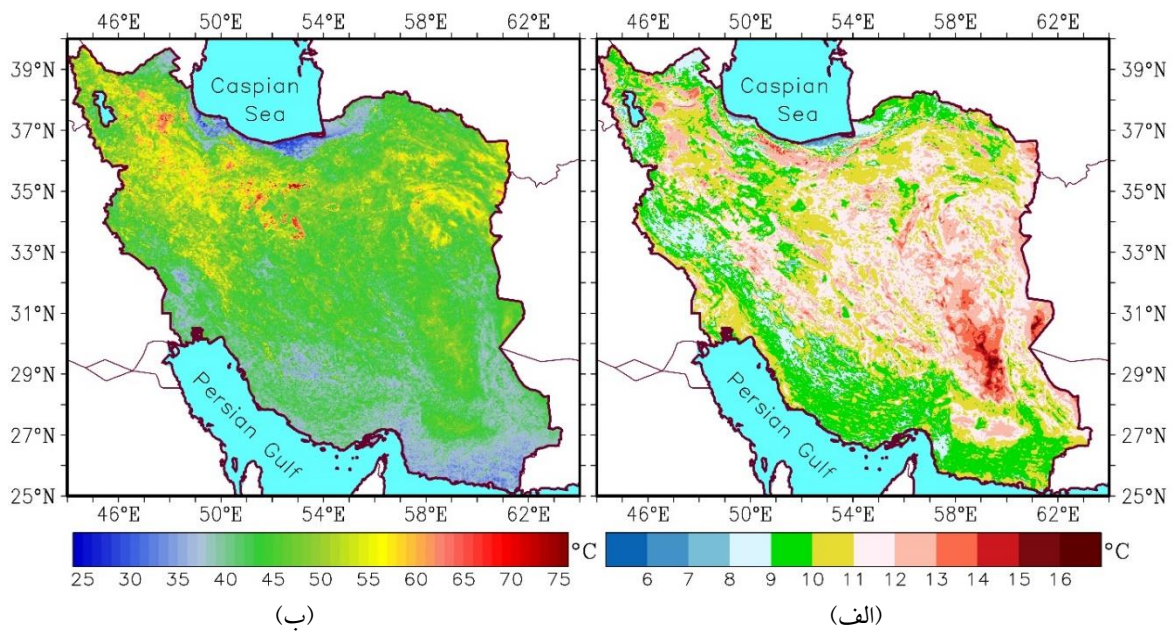
نقاط سرد ایران در ماه‌های دسامبر، ژانویه، فوریه و ماه مارس و به‌طور کلی فصل زمستان به وقوع می‌پیوندد. در مقابل، در طول دوره گرم سال، شاهد بالاترین تمرکز فضایی در پراکنش نقاط سرد بر روی ایران هستیم. به طوری که، در طول ماه‌های جون، جولای، آگوست و سپتامبر تمامی نقاط سرد استخراج شده (به‌استثنای دو مورد در ماه آگوست)، بر روی قله دماوند تمرکز یافته‌اند.

در این میان، ماه‌های انتقالی آوریل و نوامبر از نظر پراکنش فضایی نقاط سرد، شرایط بینابین را تجربه می‌کنند و تا حدودی به الگوی زمستانی میل پیدا کرده‌اند. در مقابل، ماه‌های انتقالی می و اکتبر یک الگوی دو مدی (دو مرکزی) را تجربه کرده‌اند. به نظر می‌رسد الگوی پراکنش فضایی نقاط سرد در ماه‌های انتقالی به‌طور قابل توجهی از الگوی توزیع پهنه‌های دمای کشور (شکل ۷) پیروی می‌کند. جایی که، ماه‌های ابتدایی و انتهایی فصول انتقالی هویت مستقل از خود نداشته و عمدتاً از شرایط حاکم در نزدیک‌ترین فصل مجاور خود تبعیت کرده‌اند. این در حالی است که، ماه‌های می و اکتبر تمایز فصلی خود را به شکل بارزی آشکار کرده و هویت مستقلی را به نمایش گذاشته‌اند.

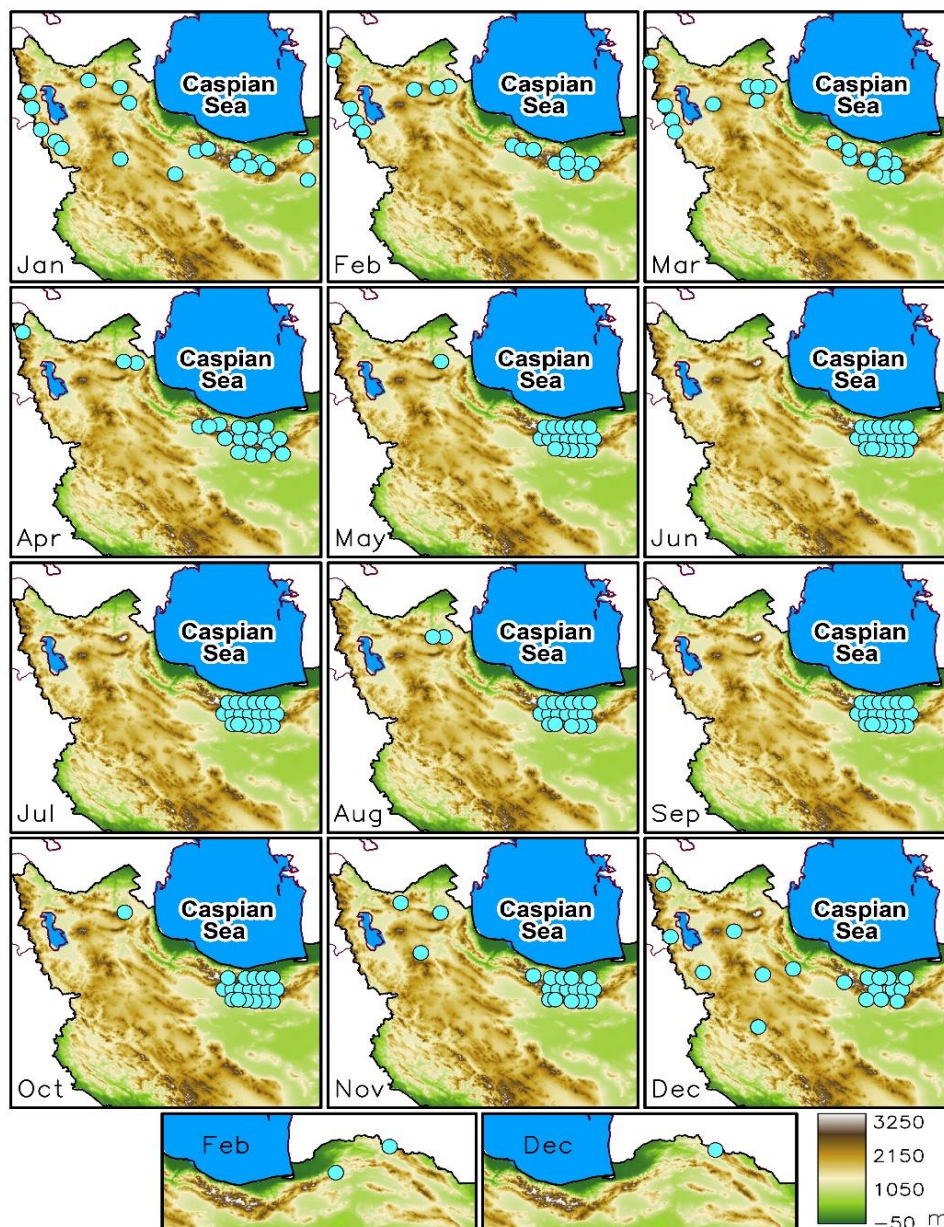
۸۱°C بالغ می‌شود. در کنار مناطق یادشده، بخش‌هایی از آذربایجان و نواحی شمالی زاگرس نیز اختلاف دمای بالایی را تجربه می‌کنند. در مقابل، پایین‌ترین اختلافات دمایی کشور در نوار ساحلی دریای عمان و مهم‌تر از آن در سواحل جنوبی دریای خزر مشاهده می‌شود. رطوبت بالای هوا در مناطق ساحلی، نقش اصلی را در تعدیل و کاهش نوسانات دما دارد. در این میان، کمترین مقدار مطلق اختلاف دمای ثبت‌شده در ایران به مقدار ۱۴/۴۶°C، مربوط به سواحل جنوبی دریای خزر است.

۳-۵. تحلیل فضایی پراکنش نقاط سرد ایران

یکی از سؤالاتی که تحقیق حاضر درصدد پاسخگویی به آن است، این پرسش است که سردترین مناطق کشور در طول سال در کدام مناطق جغرافیایی پراکنده شده‌اند. به‌منظور پاسخگویی به این پرسش، با میانگین‌گیری از دماهای ماهانه، سردترین نقطه کشور در هر ماه طی دوره ۱۹ ساله استخراج شد. شکل ۱۰، توزیع جغرافیایی و موقعیت سردترین نقاط کشور را به تفکیک برای ۱۲ ماه سال نشان می‌دهد. در یک ارزیابی کلی، بیشترین پراکنش فضایی



شکل ۹. اختلاف دمای کمینه و بیشینه LST شبانه در گستره ایران زمین. (الف) میانگین دراز مدت سالانه اختلاف دمای بیشینه و کمینه LST شبانه. (ب) مقادیر مطلق اختلاف دمای بیشینه و کمینه LST شبانه برای کل دوره ۱۹ ساله. اختلافات دما برحسب درجه سلسیوس می‌باشد.



شکل ۱۰. توزیع فضایی سردترین نقاط ایران به تفکیک برای ۱۲ ماه سال با استفاده از داده‌های میانگین ماهانه LST شبانه برای دوره ۱۹ ساله. در این شکل هر دایره بیانگر سردترین نقطه کشور در هر ماه است که با محاسبه میانگین ماهانه از سری داده‌های روزانه به دست آمده است. با توجه به تمرکز جغرافیایی نقاط سرد بر شمال و شمال غرب کشور از نشان دادن نقشه کل کشور صرف نظر شد. دو نقشه پایین شکل، برای نشان دادن سه نقطه سرد خارج از محدوده اصلی برای دو ماه فوریه و دسامبر تهیه شده‌اند.

(شکل ۱۰). نکته جالب توجه دیگر، نبود نقاط سرد ایران در محدوده رشته کوه زاگرس (به استثنای یک مورد در ماه دسامبر) است. بدین ترتیب، می‌توان نتیجه گرفت که، سردترین نقاط ایران در قله مرتفع، واقع در عرض‌های جغرافیایی بالا، به وقوع می‌پیوندند. در واقع، ترکیب عرض جغرافیایی بالا و ارتفاع زیاد، نقش اصلی و تعیین کننده در توزیع جغرافیایی نقاط سرد ایران دارد. این نتیجه، اخیراً

نکته دیگری که از بررسی توزیع فضایی نقاط سرد ایران حاصل می‌شود، تمرکز تمامی نقاط سرد کشور در تمامی ماه‌های سال بر روی قله مرتفع در محدوده رشته کوه البرز و ارتفاعات آذربایجان می‌باشد. از این منظر، موقعیت ترجیحی نقاط سرد ایران در درجه اول بر روی قله دماوند و در درجات بعدی بر روی قله سلیمان، علم کوه و قله مرتفع البرز غربی و ارتفاعات مرزی آذربایجان قابل مشاهده است

- درستی سنجی داده‌های LST شبانه ماهواره Aqua با بهره‌گیری از داده‌های روزانه تعداد ۱۷۴ ایستگاه هواشناسی کشور بیانگر آن است که، بیش از ۸۴ درصد از نقاط مورد بررسی از همبستگی بالای ۰/۵ با داده‌های ایستگاهی برخوردار بوده‌اند، که این امر نشان‌دهنده مطلوبیت بالای داده LST شبانه می‌باشد. در این میان، بالاترین مقادیر همبستگی در مناطق کوهستانی زاگرس، آذربایجان و البرز مشاهده شده است.

- ارزیابی اریبی داده‌ها با استفاده از سنجه متوسط اریبی خطا (MBE) حاکی از آن است که، مقدار متوسط اریبی داده‌های ماهواره‌ای در قیاس با داده‌های ایستگاهی حدود $1/39^{\circ}\text{C}$ می‌باشد. این عدد از مطلوبیت قابل توجه داده LST شبانه سنجنده MODIS-Aqua در پهنه جغرافیایی ایران حکایت دارد. مهم‌ترین ویژگی داده‌ها در این سنجه، غلبه کم بر آوردی داده‌های LST شبانه ماهواره‌ای در قیاس با دمای خاک می‌باشد. نتایج ارزیابی داده‌ها با سنجه درصد اریبی (PBIAS) نیز نتایج مشابهی را منعکس می‌کند. نتایج این سنجه نشان می‌دهد، تقریباً در ۸۰ درصد از ایستگاه‌های مورد مطالعه، LST شبانه مقادیری کمتر از مقدار واقعی را برآورد کرده است. به عبارتی محصول MYD11A1 در برآورد دمای شبانه ایران، دارای کم‌برآوردی است. در مجموع، سنجنده MODIS دمای سطح زمین را در بیشتر مناطق کشور با خطایی کمتر از ۱۰ درصد برآورد می‌کند که از این نظر می‌توان اذعان داشت که این محصول کارایی بالایی را در برآورد LST شبانه ایران دارد. مقدار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) در ایران برای داده LST شبانه از $0/1^{\circ}\text{C}$ تا $7/8^{\circ}\text{C}$ متغیر است. با این وجود، متوسط پهنه‌ای مقدار RMSE در ایران $1/7^{\circ}\text{C}$ می‌باشد، که این نتیجه به‌روشنی نشان می‌دهد که محصول MYD11A1 در برآورد LST شبانه ایران از مطلوبیت بالایی برخوردار بوده و به خوبی می‌تواند شرایط واقعی حاکم در گستره جغرافیایی ایران را صرف نظر از تفاوت‌های اقلیمی موجود منعکس کند.

- نتایج پژوهش حاضر به خوبی نقش ارتفاعات را در توزیع جغرافیایی دماهای شبانه در ایران زمین یادآور می‌شود. در

توسط سرهان و همکاران (۲۰۲۴) در تحلیل فضایی نقاط سرد ایران مورد تأکید قرار گرفته است. به‌عنوان یک نتیجه کلی، در حالی که بالاترین تمرکز جغرافیایی سردترین نقاط ایران مربوط به ماه‌های جون، جولای و سپتامبر و به‌طور کلی فصل تابستان است، بیشترین پراکنش جغرافیایی نقاط سرد در ماه دسامبر به وقوع می‌پیوندد. در ماه دسامبر، سردترین نقاط ثبت شده در طی ۱۹ سال، در یک محدوده جغرافیایی گسترده از ارتفاعات شمال خراسان، البرز مرکزی و شمال رشته‌کوه زاگرس تا ارتفاعات مرکزی و غربی آذربایجان پراکنده شده‌اند (شکل ۱۰). بررسی‌ها همچنین بیانگر وجود یک سیر تکوین سالانه در توزیع نقاط سرد بر روی ایران است. بدین ترتیب که در ماه‌های گرم سال سردترین نقاط ایران در بخش مرکزی البرز تمرکز می‌یابند. با شروع دوره سرد سال، ابتدا در سیلان مرکز دوم سرد شکل می‌گیرد و در ادامه و در گذر از فصل پاییز به زمستان، نقاط سرد در بخش گسترده‌تری از ارتفاعات شمال غرب کشور توزیع می‌شوند. این الگوی دومی و تمایل شمال‌غرب سو تا پایان ماه مارس تداوم می‌یابد، اما پس از آن و با افزایش دمای شبانه، مجدداً شاهد بازگشت نقاط سرد ایران به ارتفاعات رشته‌کوه البرز و تمرکز این نقاط بر روی قله‌های بخش‌های مرکزی و غربی این رشته‌کوه، به‌ویژه بر روی قله دماوند، هستیم.

۴. نتیجه‌گیری

با توجه به هدف اصلی پژوهش، اقلیم‌شناسی LST شبانه با استفاده از داده‌های گذر شبانه سنجنده MODIS-Aqua برای یک دوره ۱۹ ساله مورد بررسی قرار گرفت. تفکیک افقی بالا، گام زمانی مناسب داده‌ها و دسترسی به داده‌های اقلیمی درازمدت، سبب شد تا امکان تحلیل فضایی دمای کمینه ایران به خوبی فراهم شود. علاوه بر این، داده‌ها، مطالعه رژیم‌های فصلی و وردایی‌های درون‌سالی را به شکل مطلوبی امکان‌پذیر ساخته و در شناسایی نقاط سرد ایران، اختلافات دمایی و اثرات عرض جغرافیایی و ارتفاعات بر توزیع فضایی دمای شبانه به طور موفق عمل کردند. در ادامه، مهم‌ترین یافته‌های تحقیق ارائه می‌شود:

دمای شبانه در گستره ایران زمین مشاهده می‌شود. در یک نگاه کلی، منحنی اختلاف دمای کشور بین بیشینه $56/6^{\circ}\text{C}$ در ماه ژانویه و کمینه $46/5^{\circ}\text{C}$ در ماه جولای در نوسان است. - تحلیل فضایی اختلاف دمای شبانه نشان داد که، بیابان لوت بالاترین مقادیر میانگین اختلاف دمای شبانه را در طول سال تجربه می‌کند. به نظر می‌رسد کمبود رطوبت، درصد بسیار پایین ابرناکی، نبود پوشش گیاهی و رطوبت خاک بسیار کم، در مجموع نوسانات دمایی بالای شبانه را در این بیابان رقم زده است. در مقابل، یک نوار باریک ساحلی از گیلان تا جلگه گرگان در امتداد خط ساحلی دریای خزر، پایین‌ترین اختلاف دمای شبانه کشور را تجربه می‌کند. به وضوح، رطوبت بالای نوار ساحلی دریای خزر نقش اصلی را در کاهش نوسانات دمایی این منطقه بازی می‌کند.

- تحلیل فضایی نقاط سرد ایران مبین آن است که، سردترین نقاط ایران در قله مرتفع، واقع در عرض‌های جغرافیایی بالا، به وقوع می‌پیوندند. در واقع، ترکیب عرض جغرافیایی بالا و ارتفاع زیاد، نقش اصلی و تعیین‌کننده در توزیع جغرافیایی نقاط سرد ایران دارد. به عنوان یک نتیجه کلی، در حالی که بالاترین تمرکز جغرافیایی سردترین نقاط ایران مربوط به ماه‌های جون، جولای و سپتامبر و به طور کلی فصل تابستان است، بیشترین پراکنش جغرافیایی نقاط سرد در فصل زمستان، به ویژه در ماه دسامبر، به وقوع می‌پیوندد. - یافته‌ها همچنین بیانگر وجود یک سیر تکوین منظم سالانه در نحوه استقرار نقاط سرد ایران است. بدین ترتیب که، در ماه‌های گرم سال سردترین نقاط ایران تنها در بخش میانی البرز مرکزی (قله دماوند)، تمرکز می‌یابند. با شروع دوره سرد سال، شاهد یک جابه‌جایی شمال غرب سوی نقاط سرد به سوی ارتفاعات آذربایجان هستیم. به طوری که، یک الگوی دو مرکزی (دو مدی) جایگزین الگوی متمرکز تابستانی می‌شود. الگوی دو مدی در اوج زمستان با پراکنش نقاط سرد در محدوده البرز و آذربایجان تداوم می‌یابد، اما با فرا رسیدن دوره گرم سال، یک جابه‌جایی جنوب شرق سوی نقاط سرد به سمت ارتفاعات البرز آغاز می‌شود که با تمرکز کامل نقاط سرد بر روی قله دماوند در فصل تابستان

یک جمع‌بندی کلی، LST شبانه در تمامی فصول از آرایش ناهمواری‌ها در ایران پیروی می‌کند و در تمام طول سال پایین‌ترین دماها با محورهای کوهستانی رشته کوه‌های مرتفع انطباق دارند. ارتفاع عامل مهمی است که بر میانگین LST در طول شب تأثیر می‌گذارد. نتیجه فوق، پیش‌تر در تحقیقات بی‌شماری مورد تأکید قرار گرفته و پژوهشگران متعددی، عامل ارتفاع و توپوگرافی در ایران را در توزیع فضایی دمای هوا و دمای سطح، بیش از هر عامل دیگری مهم دانسته‌اند (مرادی و همکاران، ۱۳۹۵-الف؛ کیخسروی کیانی و مسعودیان، ۱۳۹۶؛ احمدی و همکاران، ۱۳۹۷-الف؛ حلیان و صلحی، ۱۳۹۹؛ مرادی و همکاران، ۲۰۱۸؛ شیرغلامی و مسعودیان، ۲۰۲۲؛ مرادی و دارند، ۲۰۲۲؛ کربلایی و همکاران، ۲۰۲۳؛ مسعودیان و منتظری، ۲۰۲۳).

- بر اساس نتایج، ترکیب ارتفاع و عرض جغرافیایی بالا در تغییرات فصلی کمینه LST در ایران از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. به طوری که، ترکیب این دو عامل در بروز پایین‌ترین دماهای شبانه کشور در بخش‌های میانی البرز مرکزی و ارتفاعات آذربایجان نقش مهمی را بازی می‌کند. بدین ترتیب، بالاترین دوره تسلط دماهای پایین در ایران، به ترتیب مربوط به عرض‌های 38°N و 36°N می‌باشد. به تعبیری دیگری، دو محدوده عرضی یادشده، طولانی‌ترین دوره سرد را در کشور تجربه می‌کنند.

- یافته‌ها حاکی از آن است که پهنه‌های دمایی غالب در ایران از کمینه ژانویه تا بیشینه جولای جابه‌جا می‌شوند. در میان ماه‌های انتقالی، تنها ماه آوریل و اکتبر دارای هویت دمایی متمایز و مستقل هستند و بقیه ماه‌های فصول انتقالی با توجه به الگو یا متصل به زمستان هستند یا متصل به تابستان. بررسی سیر تکوین درون سالانه دما نیز حاکی از آن است که، بالاترین تمرکز دمایی درون سالانه و بیشترین همگنی در فصل تابستان مشاهده می‌شود. این در حالی است که، بیشترین میزان ناهمگنی و کمترین میزان تمرکز دمایی مربوط به فصل پاییز است.

- در بررسی پهنه‌های اختلاف دمای شبانه ایران، بالاترین مقادیر میانگین اختلاف دما در طول دوره سرد سال به وقوع می‌پیوندد. در مقابل، در فصل تابستان پایین‌ترین اختلاف

خاتمه می‌یابد.

پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۹(۲)، ۲۲۷-۲۴۹.

شجاعی‌زاده، ک.؛ احمدی، م. و داداشی رودباری، ع. (۱۴۰۲). ارتباط شاخص‌های پوشش گیاهی با رخداد آتش‌سوزی در نواحی رویشی ایران. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۱۲(۴)، ۹۹-۱۱۶.

کیخسروی کیانی، م.ص. و مسعودیان؛ س.ا. (۱۳۹۶). واکاوی نقش دمای رویه زمین در پراکنش پوشش برف در ایران به کمک داده‌های ماهواره‌ای. *جغرافیا و توسعه*، ۴۹، ۱۸۹-۲۰۴.

مرادی، م.؛ صلاحی، ب. و مسعودیان، س.ا. (۱۳۹۵ الف). پهنه بندی دمای رویه زمین با داده‌های مودیس. *مجله مخاطرات محیط طبیعی*، ۵(۷)، ۱۰۱-۱۱۶.

مرادی، م.؛ صلاحی، ب. و مسعودیان، س.ا. (۱۳۹۵ ب). بررسی شیب دمای سطح زمین در ایران با داده‌های روزنگام مودیس. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۴۸(۴)، ۵۳۲-۵۱۷.

مسعودیان، س.ا. (۱۳۹۹). واکاوی توزیع فراوانی دمای رویه زمین ایران با داده‌های مودیس آکوآ. *فصلنامه جغرافیا و توسعه*، ۱۸(۶۰)، ۲۱-۳۰.

مفیدی، ع. و زرین، آ. (۱۳۹۱). بررسی ماهیت، ساختار و وردایی زمانی گردش بزرگ مقیاس جو تابستانه بر روی جنوب غرب آسیا. *پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*، ۱۱، ۱۵-۴۰.

مراجع

- احمدی، م. و داداشی رودباری، ع. (۱۳۹۶). شناسایی جزایر حرارتی شهری مبتنی بر رویکرد زیست‌محیطی، مطالعه موردی (کلان‌شهر اصفهان). *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۲۸(۳)، ۱-۲۰.
- احمدی، م.؛ داداشی رودباری، ع. و احمدی، ح. (۱۳۹۷-الف). پایش دمای شب هنگام سطح زمین در گستره ایران مبتنی بر برون‌داد سنجنده MODIS. *فصلنامه تحقیقات جغرافیایی*، ۳۳(۱)، ۱۷۴-۱۹۰.
- احمدی، م.؛ داداشی رودباری، ع. و احمدی، ح. (۱۳۹۷-ب). واکاوی دمای روزنگام سطح زمین ایران مبتنی بر برون‌داد سنجنده MODIS. *فصلنامه علوم محیطی*، ۱۶(۱)، ۶۸-۴۷.
- احمدی، م.؛ داداشی رودباری، ع. و اسفندیاری، ن. (۱۳۹۸). پایش جزایر حرارتی شهری با رویکرد تکاملی فرکتال ویژه (FNEA) (مطالعه موردی: کلان‌شهر تهران). *سنجش از دور و GIS ایران*، ۱۱(۱)، ۹۳-۱۱۲.
- حلیان، ا.ح. و صلحی، س. (۱۳۹۹). بررسی ارتباط برف-پوش (SC) و دمای سطح زمین (LST) با مولفه توپوگرافیکی ارتفاع در ارتفاعات البرز مرکزی and diurnal variability across the hottest place on Earth. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 17(12), 2025-2029.
- Benali, A., Carvalho, A. C., Nunes, J. P., Carvalhais, N., & Santos, A. (2012). Estimating air surface temperature in Portugal using MODIS LST data. *Remote Sensing of Environment*, 124, 108-121.
- Didari, S., Norouzi, H., Zand-Parsa, S., & Khanbilvardi, R. (2017). Estimation of daily minimum land surface air temperature using MODIS data in southern Iran. *Theor Appl Climatol*, 130, 1149-1161.
- Duan, S. B., Li, Z. L., Wu, H., Leng, P., Gao, M., & Wang, C. (2018). Radiance-based validation of land surface temperature products derived from Collection 6 MODIS thermal infrared data. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 70, 84-92.
- Duan, S. B., Li, Z. L., Li, H., Göttsche, F. M., Wu, H., Zhao, W., Leng, P., Zhang, X., & Coll, C.

- Abad, B., Salahi, B., Raispour, K., De Luis, M., Serrano, R., & Moradi, M. (2022). Assessment of LST spatial and temporal changes in Jazmourian basin, southeast Iran. *Physical Geography*, 43(6), 809-828.
- Abbasi, B., Qin, Z., Du, W., Fan, J., Li, S., & Zhao, C. (2022). Spatiotemporal Variation of Land Surface Temperature Retrieved from FY-3D MERSI-II Data in Pakistan. *Applied Sciences*, 12(20), 10458.
- Alqasemi, A. S., Hereher, M. E., Al-Quraishi, A. M. F., Saibi, H., Aldahan, A., & Abuelgasim, A. (2022). Retrieval of monthly maximum and minimum air temperature using MODIS aqua land surface temperature data over the United Arab Emirates. *Geocarto International*, 37(10), 2996-3013.
- Azarderakhsh, M., Prakash, S., Zhao, Y., & AghaKouchak, A. (2020). Satellite-based analysis of extreme land surface temperatures

- (2019). Validation of Collection 6 MODIS land surface temperature product using in situ measurements. *Remote sensing of environment*, 225, 16-29.
- Ferrigno, J. G. (1991). *Glaciers of Iran. Glaciers of the Middle East and Africa: Satellite Image Atlas of Glaciers of the World*, U.S. Geological Survey professional paper; 1386-G, G31-G47.
- Jiao, Z. H., & Mu, X. (2022). Global validation of clear-sky models for retrieving land-surface downward longwave radiation from MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 271, 112903.
- Karbalaei, A. R., Hedjazizadeh, Z., & Masoodian, S. A. (2023). Dependency of LSA and LST to topographic factors in Iran, based on remote sensing data. *Theoretical and Applied Climatology*, 1-18.
- Liu, Y., Yu, Y., Wang, H., & Yu, P. (2023). Land surface temperature validation. In *Field Measurements for Passive Environmental Remote Sensing* (pp. 375-389). Elsevier.
- Luo, B., Minnett, P. J., Gentemann, C., & Szczodrak, G. (2019). Improving satellite retrieved nighttime infrared sea surface temperatures in aerosol-contaminated regions. *Remote sensing of environment*, 223, 8-20.
- Masoodian, S. A., & Montazeri, M. (2023). Frequency Distribution Analysis of Land Surface Temperature (LST) over Iran Using Remote Sensing Observations from Aqua MODIS. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 1-11.
- Mildrexler, D. J., Zhao, M., & Running, S. W. (2006). Where are the hottest spots on Earth? *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 87(43), 461-467.
- Mildrexler, D. J., Zhao, M., & Running, S. W. (2011). Satellite finds highest land skin temperatures on Earth. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(7), 855-860.
- Mofidi, A., & Zarrin, A. (2022). On the existence of summer Shamal wind induced by the Zagros Mountains in the Middle East. *Geophys Res Lett.* 49, e2022GL100151.
- Moradi, M., Salahi, B., & Masoodian, S. A. (2018). On the relationship between MODIS Land Surface Temperature and topography in Iran. *Physical Geography*, 39(4), 354-367.
- Moradi, M., & Darand, M. (2022). Trend analysis of land surface temperature over Iran based on land cover and topography. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(8), 7229-7242.
- Moradi, M., & Salahi, B. (2023). The Comparison of MODIS Land Surface Temperature with Meteorological Stations Measurements in Iran. *Journal of the Earth and Space Physics*, 48(4), 161-172.
- Moussavi, M. S., Zoej, M. V., Vaziri, F., Sahebi, M. R., & Rezaei, Y. (2009). A new glacier inventory of Iran. *Annals of Glaciology*, 50(53), 93-103.
- Nabizada, A. F., Rousta, I., Dalvi, M., Olafsson, H., Siedliska, A., Baranowski, P., & Krzyszczak, J. (2022). Spatial and temporal assessment of remotely sensed land surface temperature variability in Afghanistan during 2000–2021. *Climate*, 10(7), 111.
- Nikolaou, N., Dallavalle, M., Stafoggia, M., Bouwer, L. M., Peters, A., Chen, K., Wolf, K., & Schneider, A. (2023). High-resolution spatiotemporal modeling of daily near-surface air temperature in Germany over the period 2000–2020. *Environmental Research*, 219, 115062.
- Roshan, G., Sarli, R., Ghanghermeh, A., Taherizadeh, M., & Niknam, A. (2024). Using satellite-derived land surface temperatures to clarify the spatiotemporal warming trends of the Alborz Mountains in northern Iran. *J. Mt. Sci.*, 21, 449–469.
- Sarhan, E., Mofidi, A., Dadashi-Roudbari, A., Zarrin, A., & Minaei, M. (2024). Climatology of cold spots and LST minimums in Iran using high-resolution satellite data. *Theor Appl Climatol.*, 155, 1395–1413.
- Shawky, M., Ahmed, M. R., Ghaderpour, E., Gupta, A., Achari, G., Dewan, A., & Hassan, Q. K. (2023). Remote sensing-derived land surface temperature trends over South Asia. *Ecological Informatics*, 74, 101969.
- Shen, S., & Leptoukh, G. G. (2011). Estimation of surface air temperature over central and eastern Eurasia from MODIS land surface temperature. *Environmental Research Letters*, 6(4), 045206.
- Shirgholami, M., & Masoodian, S. A. (2022). Assessment of spatial and temporal variations of land surface temperature (LST) due to elevation changes in Yazd Province, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(16), 1372.
- Sun, Z., Wan, H., Imbery, S., Lotz, T., & King, L. (2015). Dynamics of land surface temperature in the Central Tien Shan Mountains. *Mountain Research and Development*, 35(4), 328-337.
- Wan, Z., Zhang, Y., Zhang, Q., & Li, Z. L. (2002). Validation of the land-surface temperature products retrieved from Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data. *Remote sensing of Environment*, 83(1-2), 163-180.
- Wan, Z. (2014). New refinements and validation of the collection-6 MODIS land-surface temperature/emissivity product. *Remote sensing of Environment*, 140, 36-45.
- Weng, Q. (2009). Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote*

- sensing, 64(4), 335-344.
- Xing, Z., Li, Z. L., Duan, S. B., Liu, X., Zheng, X., Leng, P., Gao, M., Zhang, X., & Shang, G. (2021). Estimation of daily mean land surface temperature at global scale using pairs of daytime and nighttime MODIS instantaneous observations. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 178, 51-67.
- Yang, M., Zhao, W., Zhan, Q., & Xiong, D. (2021). Spatiotemporal patterns of land surface temperature change in the Tibetan plateau based on MODIS/Terra daily product from 2000 to 2018. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14, 6501-6514.
- Yao, R., Wang, L., Huang, X., Zhang, W., Li, J., & Niu, Z. (2018). Interannual variations in surface urban heat island intensity and associated drivers in China. *Journal of Environmental Management*, 222, 86-94.
- Yu, Y., Duan, S. B., Li, Z. L., Chang, S., Xing, Z., Leng, P., & Gao, M. (2021). Interannual spatiotemporal variations of land surface temperature in China from 2003 to 2018. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14, 1783-1795.
- Zaitchik, B. F., Evans, J. P., & Smith, R. B. (2007). Regional impact of an elevated heat source: The Zagros Plateau of Iran. *Journal of Climate*, 20(16), 4133-4146.
- Zargari, M., Mofidi, A., Entezari, A., & Baaghideh, M. (2024). Climatic comparison of surface urban heat island using satellite remote sensing in Tehran and suburbs. *Scientific Reports*, 14(1), 643.
- Zarrin, A., Ghaemi, H., Azadi, M., Mofidi, A., & Mirzaei, E. (2011). The effect of the Zagros Mountains on the formation and maintenance of the Iran Anticyclone using RegCM4. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 112, 91-100.
- Zhang, W., Huang, Y., Yu, Y., & Sun, W. (2011). Empirical models for estimating daily maximum, minimum and mean air temperatures with MODIS land surface temperatures. *International Journal of Remote Sensing*, 32(24), 9415-9440.
- Zhao, W., He, J., Wu, Y., Xiong, D., Wen, F., & Li, A. (2019). An analysis of land surface temperature trends in the central Himalayan region based on MODIS products. *Remote Sensing*, 11(8), 900.
- Zhao, Y., Norouzi, H., Azarderakhsh, M., & AghaKouchak, A. (2021). Global Patterns of Hottest, Coldest, and Extreme Diurnal Variability on Earth. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 102(9), E1672-E1681.