

Monitoring environmental changes in the Bakhtegan Basin based on analysis of daily and nighttime LST trends using MODIS-Aqua

Majid Montazeri^{1*} 

1. Corresponding Author, Associate Professor, Department of Physical Geography, University of Isfahan, Isfahan, Iran

Email: m.montazeri@geo.ui.ac.ir

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7051-9420>

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	Environmental changes, driven by both natural and human factors, rank among the most significant challenges of the current century. Due to its high sensitivity to fluctuations in water resources, vegetation, and land use, Land Surface Temperature (LST) serves as an effective indicator for monitoring environmental changes. This study aimed to investigate and monitor environmental changes in the Maharloo-Bakhtegan watershed based on LST temporal trends. To this end, daily and nighttime LST data from the MODIS/Aqua sensor were utilized for the period spanning 2002 to 2020. LST trends were analyzed on a pixel-by-pixel basis using the non-parametric Mann-Kendall test at a 95% confidence level, and the magnitude of these trends was estimated using Sen's slope estimator. The results indicated that the spatial patterns of LST trends effectively reflect environmental changes across the basin. Daytime LST was primarily influenced by topography and elevation, whereas nighttime LST variations showed a stronger correlation with the status of water bodies, soil moisture, and land-use changes. Increasing trends in daytime LST—at an average rate of approximately 0.4°C—were observed mainly in dried-up water bodies and wetlands (including Lakes Bakhtegan, Tashk, Maharlu, and Kaftar) as well as along the Shadkam River. These trends reflect the consequences of water scarcity, reduced surface runoff, and declining soil moisture. Conversely, downward trends in nighttime LST—at a rate of approximately 0.2°C—were identified in parts of these regions, linked to the drying up of water sources and the subsequent changes in their thermal regimes. Furthermore, upward trends in nighttime LST—averaging approximately 0.1°C—were observed in the city of Shiraz, the agricultural lands upstream and downstream of the Doroodzan Dam, and the vicinity of the Molasadra Dam. These patterns align with the expansion of human activities, agricultural development, and the formation of urban heat islands.
Article history:	
Received: ---	
Revised: ---	
Accepted: ---	
Published: ---	
Keywords: Environmental changes, MODIS Aqua LST data, Mann-Kendall test, Sen's estimator, Bakhtegan basin	
How to Cite: Last Name, Initial., Last Name, Initial., & Last Name, Initial. (2021). Title of paper. <i>Journal of Natural Environmental Hazards</i> , -- (--), ----.	



© The Author/Authors

DOI: 000000000000000000

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

Environmental change is one of the most pressing challenges of the twenty-first century, driven by both natural processes and human activities. In arid and semi-arid regions, these changes are commonly manifested through declining water resources, wetland degradation, land-use transformations, agricultural expansion, and rapid urbanization. Since many of these processes directly affect the surface energy balance, Land Surface Temperature (LST) has become a valuable indicator for monitoring environmental dynamics. LST is highly sensitive to variations in water availability, vegetation cover, soil moisture, and land-use conditions, making it an effective tool for detecting and assessing environmental change over large spatial and temporal scales.

The Bakhtegan Basin, located in Fars Province, Iran, has experienced substantial environmental transformations during the last two decades. These include the desiccation of major lakes and wetlands such as Bakhtegan, Tashk, Maharloo, and Kaftar, reduced river discharge, agricultural expansion, and urban growth. Such changes have significantly altered the thermal characteristics of the land surface. Therefore, analyzing long-term LST trends can provide valuable insights into the magnitude and spatial patterns of environmental change within the basin. The primary objective of this study was to investigate and monitor environmental changes in the Maharloo–Bakhtegan Basin using daytime and nighttime LST trend analyses.

DATA AND METHODOLOGY

This study utilized daytime and nighttime Land Surface Temperature products derived from the MODIS Aqua sensor for the period 2002–2020. These datasets provide consistent long-term observations suitable for assessing environmental changes across the basin. Annual mean LST values were calculated for each pixel to generate time series suitable for trend analysis.

Temporal trends were evaluated using the non-parametric Mann–Kendall test, which is widely applied in environmental and climatological studies because it does not require normally distributed data and is robust against outliers. Trend significance was assessed at the 95% confidence level. To quantify the magnitude of change, Sen's slope estimator was applied to each pixel, providing estimates of annual warming or cooling rates. The analyses were conducted on a pixel-by-pixel basis, enabling detailed spatial assessment of temperature trends throughout the basin. The resulting trend patterns were subsequently interpreted in relation to topography, water resources, agricultural activities, and urban development.

Table 1. Spatial statistics of surface temperature variables of Bakhtegan Lake basin (C)

	Minimum	Maximum	Range	Mean	Median	S. D	C.V	Skew
Nighttime LST	-1.9	16.4	18.3	6.9	7.3	3.5	50	-0.12
Daytime LST	19.2	46	26.9	34.2	34.4	3.9	12	-0.24

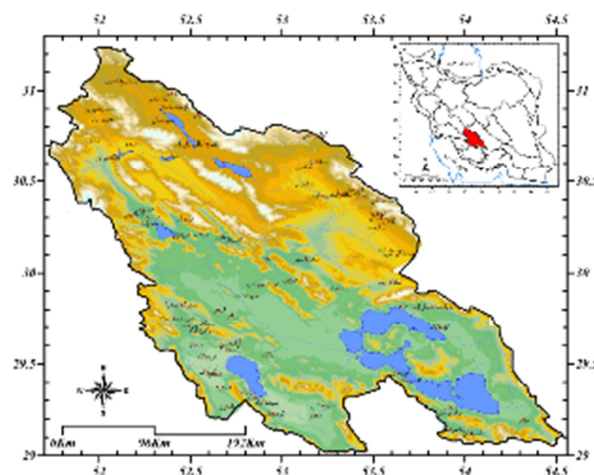


Figure 1: Topographic location of the Bakhtegan Basin

RESULTS AND DISCUSSION

The results demonstrated that spatial patterns of LST trends effectively reflect the environmental changes that have occurred within the Bakhtegan Basin during the study period. Distinct differences were observed between daytime and nighttime temperature trends, indicating the influence of different controlling factors.

Daytime LST patterns were found to be strongly controlled by topography and elevation. Mountainous regions exhibited relatively low temperatures and weak trends, whereas lowland and central basin areas showed stronger warming tendencies. Significant positive daytime LST trends, averaging approximately 0.4°C over the study period, were primarily observed in dried lakebeds and wetlands, including Bakhtegan, Tashk, Maharloo, and Kaftar Lakes. Similar warming trends were also detected along the Shadkam River and other areas affected by reduced water availability. These increases are indicative of declining soil moisture, shrinking surface water resources, increased exposure of bare soil, and enhanced absorption of solar radiation.

In contrast, nighttime LST exhibited a different spatial response. Nighttime temperature variations were more strongly influenced by water bodies, soil moisture conditions, and land-use changes than by elevation. Significant negative nighttime trends, averaging about 0.2°C , were identified across portions of the dried lakebeds and wetland areas. The disappearance of water bodies altered local thermal regimes by reducing heat storage capacity and modifying nighttime heat release processes, resulting in cooler nighttime surface temperatures.

Positive nighttime LST trends, averaging approximately 0.1°C , were observed in Shiraz City, agricultural lands located upstream and downstream of Doroodzan Dam, and areas surrounding Molla Sadra Dam. These warming patterns are consistent with increasing human activities, agricultural intensification, urban expansion, and the development of urban heat islands. Among all studied areas, Shiraz exhibited the most pronounced nighttime warming, highlighting the significant impact of urbanization on local thermal conditions.

CONCLUSION

The findings indicate that long-term analysis of Land Surface Temperature provides an effective approach for detecting and monitoring environmental changes in arid and semi-arid basins. Spatial patterns of LST trends successfully captured the impacts of wetland desiccation, declining water resources, soil moisture reduction, agricultural development, and urban expansion across the Bakhtegan Basin.

While increasing daytime temperatures were primarily associated with the drying of lakes and wetlands, nighttime temperature trends proved particularly useful for identifying the effects of land-use change and human activities. The complementary analysis of daytime and nighttime LST therefore offers a more comprehensive understanding of environmental processes than either dataset alone.

The study demonstrates the value of satellite-derived LST products for environmental monitoring and highlights their potential application in water resource management, land-use planning, drought assessment, and wetland conservation. The methodology and findings can support evidence-based decision-making aimed at promoting sustainable management of vulnerable arid and semi-arid ecosystems.

ETHICAL CONSIDERATIONS

Conflict of Interest Statement: The authors declare no conflict of interest.

Ethical Statement: This article does not contain any studies with human participants or animals performed by any of the authors.

REFERENCES

References (in Persian)

Bagheri, M. H.; Bagheri, A. and Sahouli, Gh. A. 2016, Analysis of changes in the Bakhtegan lake water body under the influence of natural and human factors. *Iran-Water Resources Research*, Volume 12, Issue 3, Number 37, 1-11. https://www.iwrr.ir/article_41333.html. [In Persian]

Iran Water Resources Management Company. 2012, Guidelines and criteria for the division and coding of watersheds and study areas at the national level. No, 310. [In Persian]

ertdhk, B., Khan-Ahmadi-Bafghi, H., & Daneshkar-Arasateh, P. 2021, Forecasting the Area of the Bakhtegan and Tashk Lake Using Remote Sensing and Climatic Factors. *Iran-Water Resources Research*. Volume 17, Issue 1, 56, 151-165. doi: 20.1001.1.17352347.1400.17.1.9.0. [In Persian]

Torabi, Gh., Aghamohammadi Zanjirabad, H., & Behzadi, S. 2018, Monitoring the status of Bakhtegan Lake and surrounding areas using satellite imagery and computational intelligence. *Ecohydrology*, Volume 5, Issue 1, 251-263. doi: 10.22059/ije.2018.244595.767. [In Persian]

References (in English)

Ayenew, T. 2004, Environmental implications of changes in the levels of lakes in the Ethiopian Rift. *Regional Environmental Change*, 4(4), 192–204. <https://doi.org/10.1007/s10113-004-0083-x>

Lian, D., Yuan, B., Li, X., Shi, Z., Ma, Q., Hu, T., ... & Liu, Y. 2024, The contrasting trend of global urbanization-induced impacts on day and night land surface temperature from a time-series perspective. *Sustainable Cities and Society*, 109, 105521. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105521>

Shakiba, F., Roustae, I., Mazidi, A., & Olafsson, H. 2024, Spatial and temporal variation of daytime and nighttime land surface temperature and its drivers over Iran's watersheds using remote sensing. *Earth Science Informatics*, 17(4), 3567-3587. doi:10.1007/s12145-024-01344-0.

پایش تغییرات محیطی حوضه بختگان بر پایه تحلیل روند دمای رویه زمین روزانه و شبه MODIS-Aqua

مجید منتظری^{۱*} 

۱. دانشیار، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران (نویسنده مسئول)

ایمیل: m.montazeri@geo.ui.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7051-9420>

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ---/---/--- تاریخ ویرایش: ---/---/--- تاریخ پذیرش: ---/---/--- تاریخ انتشار: ---/---/--- واژه‌های کلیدی: تغییرات محیطی، داده های دمای رویه مودیس آکوا، آزمون مان کندال، تخمینگر شیب سن، حوضه بختگان.	تغییرات محیطی از مهم ترین چالش های قرن حاضر به شمار می روند و تحت تأثیر عوامل طبیعی و انسانی رخ می دهند. دمای رویه زمین به دلیل حساسیت بالا به تغییرات منابع آب، پوشش گیاهی و کاربری اراضی، می تواند به عنوان شاخصی مناسب برای پایش تغییرات محیطی مورد استفاده قرار گیرد. هدف این پژوهش بررسی و پایش تغییرات محیطی در حوضه مهارلو-بختگان بر اساس روندهای زمانی دمای رویه زمین است. بدین منظور از داده های دمای رویه زمین سنجنده مودیس آکوا در دو نوبت روزانه و شبانه طی دوره ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۰ استفاده شد. روند تغییرات دما به صورت یاخته مینا با استفاده از آزمون ناپارامتری مان کندال در سطح اطمینان ۹۵ درصد و برآوردگر شیب سن مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که الگوهای مکانی روند دمای رویه زمین بازتاب مناسبی از تغییرات محیطی حوضه هستند. دمای روزانه عمدتاً تحت تأثیر توپوگرافی و ارتفاع قرار دارد، در حالی که تغییرات دمای شبانه بیش از هر عامل دیگری از وضعیت پهنه های آبی، رطوبت خاک و تغییرات کاربری اراضی تأثیر می پذیرد. روندهای افزایشی دمای روزانه با نرخ متوسط حدود ۰/۴ درجه سلسیوس، عمدتاً در پهنه های آبی و تالابی خشک شده از جمله دریاچه های بختگان، طشک، مهارلو و کافت و نیز در امتداد رود شادکام مشاهده شد که بیانگر تأثیر کم آبی، کاهش جریان های سطحی و افت رطوبت خاک است. در مقابل، روندهای کاهش دمای شبانه با نرخ حدود ۰/۲ درجه سلسیوس در بخش هایی از این پهنه ها مشاهده شد که با خشک شدن منابع آبی و تغییر رژیم حرارتی آن ها مرتبط است. همچنین روندهای افزایشی دمای شبانه با نرخ حدود ۰/۱ درجه سلسیوس در محدوده شهر شیراز، اراضی کشاورزی پایین دست و بالادست سد درودزن و محدوده سد ملاصدرا مشاهده شد که با گسترش فعالیت های انسانی، توسعه کشاورزی و شکل گیری جزایر گرمایی شهری همخوانی دارد.

استناد: نام خانوادگی، نام؛ نام خانوادگی، نام (۱۴۰۰). عنوان مقاله. مخاطرات محیط طبیعی، ---، (---)، ---

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

مقدمه

پایش تغییرات محیطی در مقیاس حوضه‌ای طی دهه‌های اخیر به‌طور گسترده بر داده‌های سنجش از دور متکی شده است. در این میان، دمای رویه زمین به دلیل ارتباط مستقیم با ویژگی‌های فیزیکی سطح زمین، تغییرات پوشش گیاهی، رطوبت خاک و پهنه‌های آبی، به یکی از مهم‌ترین شاخص‌های پایش تغییرات محیطی تبدیل شده است (Lillesand et al., 2015). داده‌های دمای رویه سنجنده مودیس به واسطه پوشش زمانی روزانه، تداوم بلندمدت، ثبات رادیومتریک و دسترسی آزاد، کاربرد گسترده‌ای در بررسی روندهای حرارتی، خشکسالی، تغییرات کاربری اراضی و ارزیابی اثرات خشک شدن پهنه‌های آبی یافته‌اند. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که افزایش دمای رویه زمین معمولاً همزمان با کاهش سطح آب، کاهش پوشش گیاهی و گسترش اراضی بایر رخ می‌دهد و از این رو دمای رویه زمین یکی از حساس‌ترین شاخص‌ها برای آشکارسازی تغییرات محیطی در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود (Weng et al., 2004; Mashala et al., 2023).

در سطح جهانی، داده‌های مودیس برای پایش تغییرات محیطی در بسیاری از پهنه‌های آبی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. پژوهش‌های انجام‌شده در دریاچه آرال، دریاچه چاد، تالاب‌های آفریقا و دریاچه‌های چین نشان داده‌اند که کاهش سطح آب و خشک شدن پهنه‌های آبی با افزایش قابل توجه دمای رویه زمین و تغییر در موازنه انرژی سطح همراه است (Shi et al., 2015; Nwilo et al., 2019; Du et al., 2015; Lu et al., 2025). نتایج این مطالعات بیانگر آن است که دمای رویه زمین می‌تواند به‌عنوان شاخصی کارآمد برای ردیابی پیامدهای محیطی ناشی از تغییرات هیدرولوژیکی مورد استفاده قرار گیرد.

در ایران نیز کاربرد دمای رویه زمین برای پایش دریاچه‌ها و تالاب‌های در معرض خشکی گسترش یافته است. مطالعات انجام‌شده در دریاچه ارومیه، هامون، پیرشان، مهارلو و بختگان نشان داده‌اند که کاهش تراز آب و افت مساحت پهنه‌های آبی معمولاً با افزایش دمای رویه زمین و تشدید شرایط حرارتی محیط همراه است. همچنین وجود روابط معنادار میان دمای رویه زمین، شاخص‌های پوشش گیاهی و تغییرات کاربری اراضی در بسیاری از این پژوهش‌ها گزارش شده است (فیروزی، ۲۰۲۰؛ شکیبا و همکاران، ۲۰۲۰؛ نصیری، ۲۰۲۳؛ هزبزی و آیدین، ۲۰۲۵).

حوضه بختگان طی سه دهه اخیر یکی از مهم‌ترین کانون‌های تغییرات محیطی در ایران بوده است. پژوهش‌های مختلف نشان داده‌اند که ترکیبی از عوامل اقلیمی و انسانی شامل کاهش بارش، خشکسالی‌های متوالی، سدسازی بر روی رودخانه کر، افزایش برداشت آب و توسعه اراضی کشاورزی موجب کاهش شدید ورودی آب و خشک شدن بخش‌های وسیعی از دریاچه بختگان شده است (باقری و همکاران، ۲۰۱۶؛ مظفری و همکاران، ۲۰۲۲). پیامد این تغییرات، کاهش سطح آب، گسترش اراضی بایر و شوره‌زارها، ایجاد کانون‌های گردوغبار نمکی و تغییر در شرایط اکولوژیکی حوضه بوده است.

در زمینه سنجش از دور نیز مطالعات متعددی روندهای محیطی حوضه را بررسی کرده‌اند. ترابی و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از تصاویر لندست کاهش محسوس پهنه آبی و افزایش شوره‌زارها را طی دوره ۱۹۹۱ تا ۲۰۱۷ گزارش کردند. نصیری و همکاران (۲۰۲۳) افزایش بیش از ۸ درجه‌ای میانگین دمای رویه زمین را همزمان با روند خشک شدن دریاچه نشان دادند. همچنین رحیم‌آبادی و همکاران (۲۰۲۴) وجود رابطه معکوس میان دمای رویه زمین و پوشش گیاهی را در حوضه بختگان، طشک و مهارلو تأیید کردند. این مطالعات اگرچه نقش دمای رویه زمین

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

را در آشکارسازی تغییرات محیطی نشان داده‌اند، اما عمدتاً بر بررسی میانگین‌های منطقه‌ای، روابط آماری میان متغیرها یا تغییرات پهنه‌های آبی متمرکز بوده‌اند.

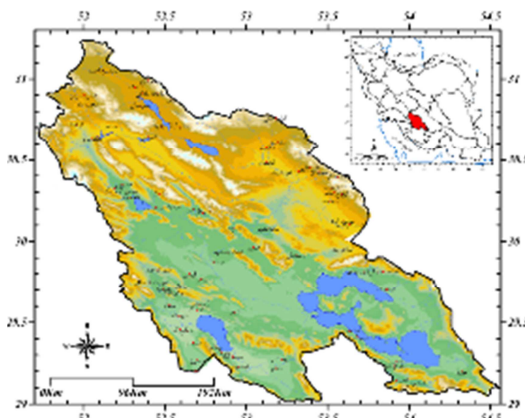
با وجود پژوهش‌های انجام‌شده، هنوز تحلیل جامع و یاخته‌مبنای روندهای بلندمدت دمای رویه زمین در مقیاس کل حوضه و بررسی تفکیکی رفتار دمای روزهنگام و شب‌هنگام کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از اینرو نوآوری پژوهش حاضر در ارائه یک تحلیل یکپارچه و مکانی از روندهای بلندمدت دمای رویه زمین در تمامی یاخته‌های محدوده حوضه و تفکیک و مقایسه روندهای روزهنگام و شب‌هنگام است. برخلاف تحلیل‌های مبتنی بر میانگین کلی حوضه یا تعداد محدودی نقطه، رویکرد یاخته‌مبنای این پژوهش امکان آشکارسازی ناهمگنی‌های درون حوضه‌ای، تعیین جهت و شدت روند در هر یاخته و شناسایی نواحی دارای رفتار حرارتی متفاوت را فراهم می‌کند. بررسی مستقل دمای روز و شب می‌تواند تفاوت پاسخ حرارتی رویه زمین در دو بخش شبانه‌روز را مشخص سازد؛ تفاوت‌هایی که ممکن است در تحلیل مقادیر میانگین پنهان بمانند. علاوه بر این، ارتباط فضایی روندهای دمایی با فرآیندهای مختلف محیطی از جمله خشک‌شدن پهنه‌های آبی، توسعه کشاورزی، گسترش مناطق شهری و تغییرات کاربری اراضی در سطح کل حوضه به‌صورت یکپارچه بررسی نشده است. از این رو پژوهش حاضر با بهره‌گیری از داده‌های مودیس آکوا طی دوره ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۰ و استفاده از آزمون مان کندال و برآوردگر شیب سن، به تحلیل روندهای فضایی دمای رویه زمین در دو زمان روز و شب پرداخته و تلاش می‌کند نقش این روندها را در آشکارسازی تغییرات محیطی حوضه بختگان تبیین کند.

داده‌ها و روش‌ها

موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

حوضه آبی دریاچه‌های طشک، بختگان و مهارلو با نام اختصاری مهارلو-بختگان یکی از حوضه‌های بسته ایران است که در تقسیم‌بندی حوضه‌های آبی ایران، حوضه فرعی به شمار می‌رود و زیرمجموعه حوضه آبی فلات مرکزی است (شکل ۱-۳). این حوضه در اقلیم خشک تا نیمه‌خشک قرار دارد. میانگین بلندمدت بارش سالانه حوضه حدود ۲۷۰ میلی‌متر و از کمتر از ۲۰۰ میلی‌متر در بخش‌های کم‌ارتفاع جنوب‌شرقی تا بیش از ۷۰۰ میلی‌متر در ارتفاعات شمال‌غربی متغیر است. مساحت حوضه، ۳۱۴۹۲ کیلومتر مربع است و شامل رودهایی است که به دریاچه طشک، دریاچه بختگان و دریاچه مهارلو منتهی می‌شوند. شیب نسبی حوضه از شمال غرب به جنوب شرق است و رودها و مسیل‌های آن به دو چاله اصلی منتهی می‌شوند (شکل ۱). نخستین چاله، دریاچه‌های کم‌عمق بختگان و طشک در شرق حوضه هستند که به وسیله تنگه‌ای به هم مرتبط می‌شوند. مهم‌ترین منبع این دو دریاچه، رود گر است. چاله دوم، دریاچه مهارلو است که در جنوب حوضه و در نزدیکی شیراز قرار دارد و محل تخلیه آب‌های سطحی و زیرزمینی زیرحوضه خود است (شرکت مدیریت منابع آب ایران، ۱۳۸۳). مرتفع‌ترین نقطه در خط-الرأس شمالی حوضه به ۳۹۰۵ متر می‌رسد در حالیکه پست‌ترین نقطه حوضه با ارتفاع حدود ۱۳۶۶ متر در بخش شمالی دریاچه مهارلو واقع است. متوسط ارتفاع حوضه بختگان حدود ۲۰۳۳ متر برآورد شد.

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.



شکل ۱: موقعیت توپوگرافی حوضه بختگان. منبع: نویسنده

داده‌ها

در این پژوهش از فرآورده دمای رویه زمین سنجنده مودیس آکوا (MYD11A1, Collection 6.1) با تفکیک مکانی ۱ کیلومتر و تفکیک زمانی روزانه برای دوره ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۰ استفاده شد. این فرآورده، دمای رویه زمین را در دو زمان عبور ماهواره، شامل حدود ساعت ۱۳:۳۰ (روزهنگام) و ۰۱:۳۰ (شب‌هنگام)، ارائه می‌کند. فرآورده MYD11A1 یک فرآورده سطح ۳ است که مقادیر دمای رویه زمین را عمدتاً برای شرایط آسمان صاف ارائه می‌کند (Wan, 2019). از این رویه‌یاخته‌هایی که بازیابی دما در آن‌ها به دلیل ابرناکی یا سایر عوامل انجام نشده است، فاقد مقدار معتبر دمای رویه بوده و در فرایند استخراج، وارد تحلیل نشده‌اند. داده‌های مربوط به محدوده حوضه مهارلو-بختگان از پایگاه داده فرآورده‌های مودیس ۱ استخراج و برای کل دوره مطالعه سازمان‌دهی شدند. مقادیر دمای رویه زمین در فرآورده MYD11A1 به صورت اعداد صحیح ذخیره می‌شوند. بنابراین در مرحله پیش‌پردازش، ابتدا مقادیر خام در ضریب مقیاس ۰/۰۲ ضرب شدند تا دما بر حسب کلوین به دست آید. سپس با کسر مقدار ۲۷۳/۱۵، داده‌ها از مقیاس کلوین به درجه سلسیوس تبدیل شدند. پس از این مرحله، سری‌های زمانی دمای رویه زمین روزهنگام و شب‌هنگام برای تمامی یاخته‌های واقع در محدوده حوضه استخراج گردید. در مجموع، برای هر یک از سری‌های زمانی روزهنگام و شب‌هنگام، ماتریسی شامل ۳۶۶۷۰ یاخته مکانی و حدود ۶۹۴۰ روز مشاهده زمانی، تهیه شد.

روش پردازش

از آنجا که فرآورده MYD11A1 یک فرآورده استاندارد سطح ۳ دمای رویه زمین است، تصحیحات رادیومتریکی، جوی و الگوریتم‌های بازیابی دما در مراحل تولید آن اعمال شده‌اند. در این پژوهش، داده‌های دمای رویه زمین روزهنگام و شب‌هنگام این فرآورده به طور مستقیم برای تحلیل روند مورد استفاده قرار گرفتند.

به منظور کاهش نوسانات کوتاه‌مدت و تمرکز بر تغییرات بلندمدت، ابتدا میانگین ماهانه دمای رویه زمین برای هر یاخته از مقادیر روزانه موجود محاسبه شد. یاخته‌های فاقد مقدار بازیابی‌شده یا دارای مقدار NaN، در محاسبه میانگین وارد نشدند. سپس میانگین سالانه از میانگین حسابی مقادیر ماهانه به دست آمد تا تمام ماه‌های سال وزن یکسانی در برآورد مقدار سالانه داشته باشند. در این پردازش، آستانه مستقلی برای حداقل تعداد روزهای معتبر در هر

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

ماه یا سال در نظر گرفته نشد. در مرحله بعد روند زمانی دما با استفاده از آزمون ناپارامتری من-کندال بررسی گردید. این آزمون، به دلیل اتکا به رتبه‌ها و عدم نیاز به فرض توزیع نرمال داده‌ها، در مقایسه با بسیاری از روش‌های پارامتری حساسیت کمتری به مقادیر حدی دارد و به‌طور گسترده برای تحلیل روند سری‌های زمانی اقلیمی، هیدرولوژیکی و داده‌های سنجش از دور به کار می‌رود (Mann, 1945; Hirsch & Slack, 1984; Hamed, 2008; Militino et al., 2020).

آزمون من-کندال به صورت یاخته‌مبنا بر سری‌های زمانی سالانه دمای رویه زمین اعمال شد و برای هر یاخته، آماره Z و مقدار احتمال (p -value) محاسبه گردید. معناداری روندها در سطح اطمینان ۹۵ درصد ارزیابی شد و تنها یاخته‌هایی که دارای روند معنادار بودند در تهیه نقشه‌های نهایی مورد استفاده قرار گرفتند. در این آزمون، مقادیر مثبت آماره Z بیانگر روند افزایشی و مقادیر منفی آن نشان‌دهنده روند کاهشی دمای رویه زمین هستند.

به منظور برآورد شدت و نرخ تغییرات دما، از برآوردگر شیب سن (Sen's Slope Estimator) استفاده شد. این شاخص نرخ تغییر دمای رویه زمین را در طول دوره مطالعه برای هر یاخته محاسبه می‌کند و به دلیل ماهیت ناپارامتری، نسبت به مقادیر حدی و نوسانات غیرعادی حساسیت کمتری دارد. از آنجا که محاسبات بر پایه سری زمانی سالانه انجام شده است، مقادیر شیب سن بر حسب درجه سلسیوس در سال ($^{\circ}\text{C yr}^{-1}$) گزارش شدند. مقادیر مثبت شیب سن بیانگر افزایش دمای رویه زمین و مقادیر منفی آن نشان‌دهنده کاهش دما هستند. در نقشه‌های روند نیز طیف رنگی بیانگر مقدار شیب سن بوده و شدت رنگ‌ها میزان تغییرات دمای رویه زمین را در طول دوره مطالعه نشان می‌دهد.

در نهایت، نقشه‌های فضایی روندهای معنادار و شدت تغییرات استخراج و الگوی پراکنش مکانی آنها در ارتباط با تغییرات کاربری اراضی، پهنه‌های آبی، توسعه فعالیت‌های کشاورزی و گسترش فیزیکی سکونتگاه‌های انسانی بررسی شد. تفسیر این الگوها با بهره‌گیری از شواهد موجود در تصاویر ماهواره‌ای گوگل ارث و نتایج مطالعات پیشین انجام گرفت.

یافته‌های تحقیق

بررسی میانگین بلندمدت دمای روزهنگام

با نگاهی به شکل ۲، الگوی کلی توزیع دمای رویه زمین در روزهنگام به‌خوبی نمایان است. نتایج نشان می‌دهد که دمای رویه زمین در حوضه مهارلو-بختگان از شمال به جنوب افزایش می‌یابد. این الگو عمدتاً تحت تأثیر شرایط توپوگرافی و اختلاف ارتفاع در سطح حوضه شکل گرفته است؛ به‌طوری که نواحی مرتفع و کوهستانی شمال حوضه دماهای پایین‌تر و دشت‌ها و مناطق کم‌ارتفاع جنوبی دماهای بالاتری را تجربه می‌کنند. میانگین دمای رویه زمین در روزهنگام حدود ۳۴ درجه سلسیوس برآورد شد (جدول ۱). بیشینه دمای رویه به حدود ۴۶ درجه سلسیوس در نواحی کم‌ارتفاع جنوبی حوضه می‌رسد، در حالی که کمینه دمای رویه حدود ۱۹ درجه سلسیوس بوده و عمدتاً در ارتفاعات و مناطق کوهستانی شمال حوضه مشاهده می‌شود. همچنین پهنه‌های آبی نظیر دریاچه‌های سد درودزن و ملاصدرا و نیز دریاچه‌های مهارلو و بختگان، به دلیل ظرفیت حرارتی بالای آب، در ساعات روز از دمای رویه کمتری نسبت به اراضی پیرامون برخوردار هستند. ضریب چولگی دمای رویه روزهنگام برابر با ۰/۲۴- است که بیانگر چولگی

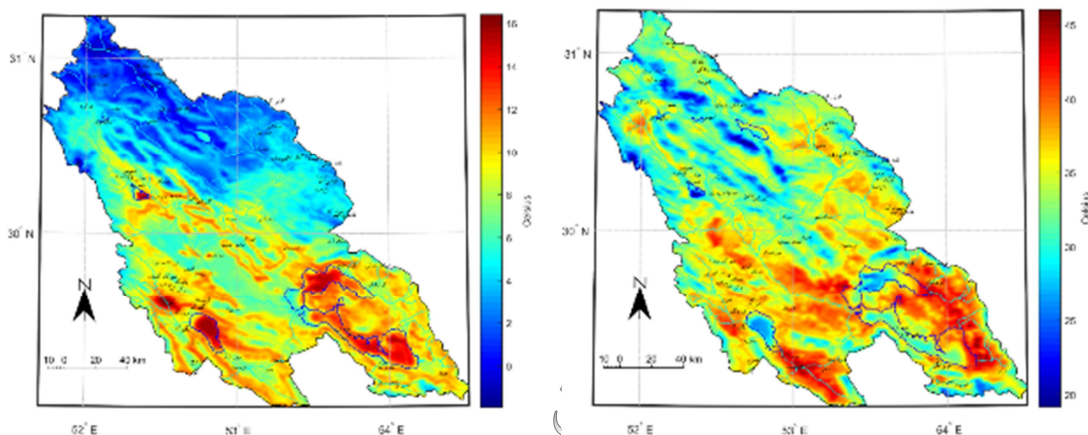
این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

منفی توزیع دما و وجود تعداد محدودی از یاخته‌های دارای دماهای بسیار پایین‌تر از میانگین است. این مقادیر عمدتاً در نواحی مرتفع شمال حوضه مشاهده می‌شوند که در شکل ۲ با طیف رنگ‌های آبی قابل تشخیص هستند.

جدول ۱: آماره‌های مکانی متغیرهای دمای رویه حوضه دریاچه بختگان (سلسیوس)

چولگی	کمینه	بیشینه	دامنه	میانگین	میانه	انحراف معیار	درصد تغییرات
۰/۱۲-	-۱/۹	۱۶/۴	۱۸/۳	۶/۹	۷/۳	۳/۵	۵۰
۰/۲۴-	۱۹/۲	۴۶	۳۶/۹	۳۴/۲	۳۴/۴	۳/۹	۱۲

بررسی میانگین بلندمدت دمای شب هنگام



شکل ۲: نقشه میانگین بلندمدت دمای رویه زمین روز هنگام شکل ۳: نقشه میانگین بلندمدت دمای رویه زمین شب هنگام

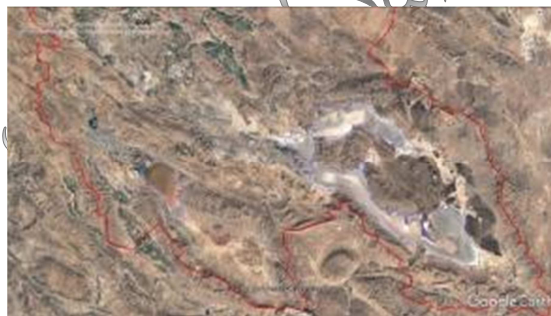
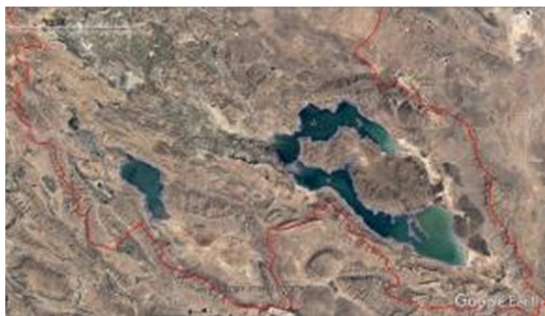
میانگین دمای رویه زمین در شب هنگام حدود ۷ درجه سلسیوس برآورد شد که تنها حدود یک‌پنجم میانگین دمای روز هنگام حوضه است. الگوی مکانی دمای رویه شب هنگام تفاوت قابل توجهی با الگوی دمای روز هنگام دارد. کمترین دماها در نواحی مرتفع و کوهستانی شمال حوضه مشاهده می‌شود، به‌طوری که حداقل دمای رویه به حدود ۱/۹- درجه سلسیوس می‌رسد. در مقابل، بیشترین دماهای شبانه در محدوده دریاچه‌های طشک، بختگان و مهارلو و همچنین مخازن سدهای درودزن و ملاصدرا مشاهده می‌شود، به‌گونه‌ای که حداکثر دمای رویه به حدود ۱۶/۵ درجه سلسیوس می‌رسد. گرم‌تر بودن این پهنه‌ها در ساعات شب را می‌توان به ظرفیت حرارتی بالای آب و وجود رطوبت سطحی و زیرسطحی نسبت داد. آب در طول روز انرژی بیشتری ذخیره کرده و در طول شب آن را به تدریج آزاد می‌کند؛ از این رو پهنه‌های آبی و اراضی مرطوب پیرامون آن‌ها در مقایسه با مناطق خشک اطراف، دمای بالاتری را حفظ می‌کنند. همچنین دره‌های رودخانه‌ای و شبکه آب‌های جاری به صورت خطواره‌های حرارتی مشخصی در سطح حوضه نمایان هستند که نسبت به اراضی مجاور از دمای شبانه بالاتری برخوردارند (شکل ۲).

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.



شکل ۴: تصویر ماهواره‌ای کلانشهر شیراز در سال ۱۹۸۵. شکل ۵: تصویر ماهواره‌ای کلانشهر شیراز در سال ۲۰۲۰. مآخذ: گوگل ارث.

این الگو هم در بخش‌های شمالی و هم در نواحی مرکزی حوضه به‌خوبی قابل مشاهده است. نکته قابل توجه دیگر، ظهور یک لکه حرارتی با دمای بالاتر بر روی کلان‌شهر شیراز است که بیانگر شکل‌گیری جزیره گرمایی شهری شبانه در این محدوده می‌باشد (شکل ۳). شکل‌های ۴ و ۵ نشان می‌دهد که گسترش فیزیکی شهر شیراز، افزایش سطوح نفوذناپذیر و کاهش نسبی پوشش گیاهی طی سه دهه اخیر، موجب تشدید ذخیره و بازتاب حرارت در محیط شهری شده و زمینه شکل‌گیری و توسعه جزیره گرمایی شبانه را فراهم کرده است. این موضوع در پژوهش‌های متعددی واکاوی شده است ((Azhdari et al. (2018), Kamali Maskooni et al. (2021), Zandi et al. (2021), Kashki et al. (2022).

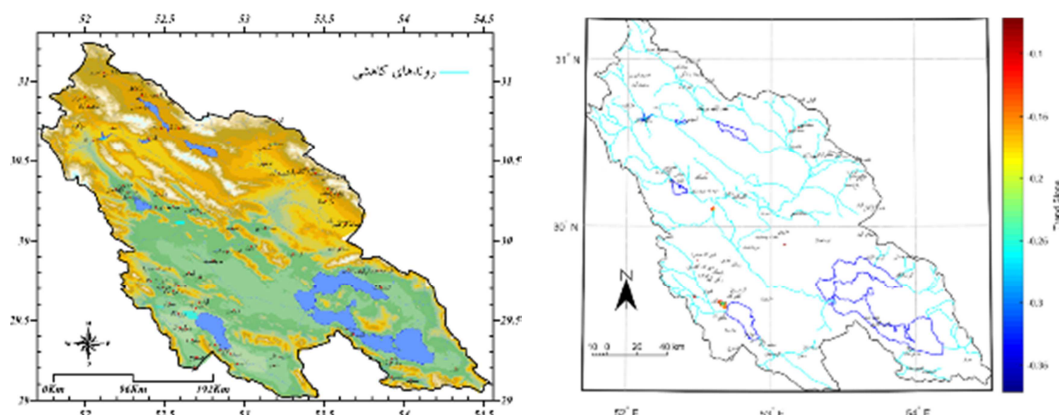


شکل ۶: تصویر ماهواره‌ای دریاچه بختگان، سال ۱۹۹۳. شکل ۷: تصویر ماهواره‌ای دریاچه بختگان، سال ۲۰۲۰. مآخذ: گوگل ارث.

پس از تحلیل سیمای کلی دمای رویه زمین در حوضه مهارلو-بختگان، سری‌های زمانی سالانه دمای رویه برای دو دوره روزهنگام و شب‌هنگام تهیه شد. به منظور ارزیابی تغییرات بلندمدت، آزمون ناپارامتری مان کندال بر روی سری‌های زمانی هر یاخته اعمال و معنی‌داری روندها در سطح ۹۵ درصد بررسی گردید. سپس شدت و جهت روندها با استفاده از برآوردگر شیب سن محاسبه و نتایج به صورت نقشه‌های روند دمای رویه زمین نمایش داده شد.

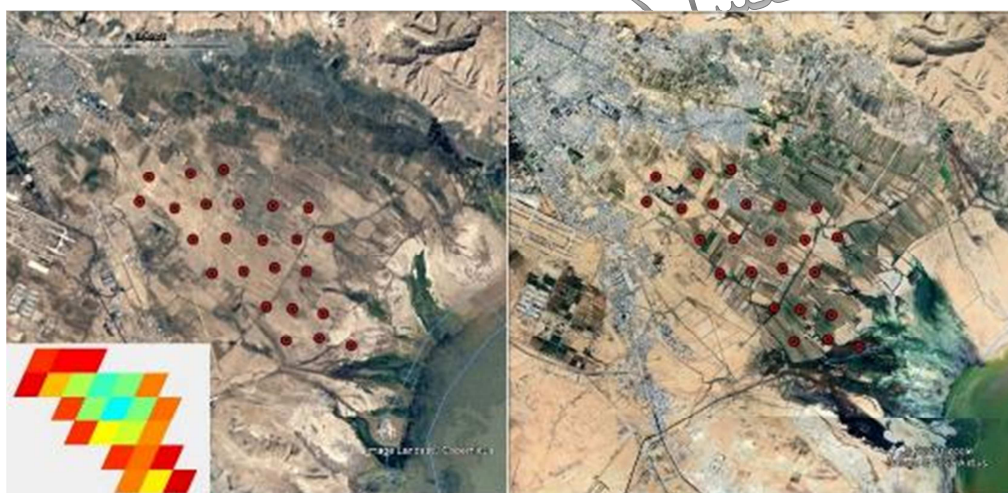
بررسی روند سالانه دمای رویه زمین روز هنگام

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.



شکل ۸: نقشه شیب روند کاهشی دمای رویه زمین روز هنگام. شکل ۹: نقشه توپوگرافی روند کاهشی دمای رویه زمین روز هنگام

از مجموع ۳۶۶۷۰ یاخته واقع در حوضه، تنها ۴۵ یاخته (معادل ۰/۱۲ درصد از مساحت حوضه) در دوره مورد مطالعه دارای روند کاهشی معنادار دمای رویه زمین در روز هنگام بودند (شکل ۱۰). از این تعداد، ۲۴ یاخته در محدوده جنوب شرقی فرودگاه شیراز و شمال دریاچه مهارلو قرار دارند. بررسی تصاویر چندزمانه منطقه نشان می دهد که توسعه اراضی کشاورزی و افزایش پوشش گیاهی در این محدوده احتمالاً موجب افزایش تبخیر و ترق و در نتیجه کاهش دمای رویه زمین در ساعات روز شده است. نتایج برآوردگر شیب سن نشان داد که دمای رویه این مناطق به طور متوسط با نرخ ۰/۱۵ درجه سلسیوس کاهش یافته است (شکل ۸).



شکل ۱۰: تصویر ماهواره ای توسعه مزارع در جنوب شرق فرودگاه شیراز و شمال دریاچه مهارلو (۲۰۲۰-۲۰۰۱)، مآخذ: گوگل ارث.

علاوه بر این، روندهای کاهشی در ۴ یاخته در غرب شهر شیراز نیز مشاهده می شود (شکل ۱۱). در این منطقه به دلیل توسعه فضای سبز، روندهای کاهشی در دمای رویه زمین روز هنگام با نرخ ۰/۱ درجه سلسیوس کاهش یافته است (شکل ۸).

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.



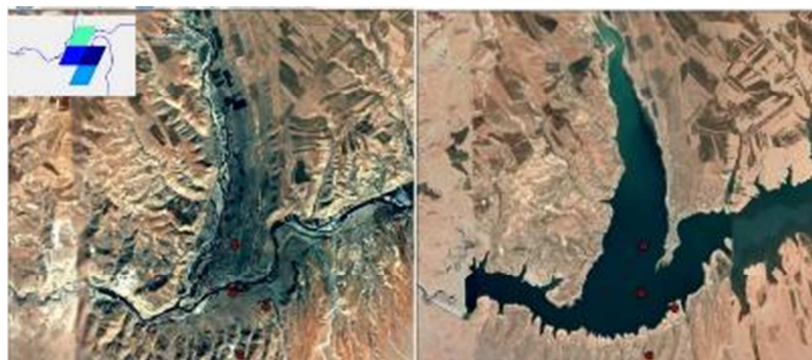
شکل ۱۱: تصویر ماهواره‌ای توسعه فضای سبز در غرب شهر شیراز (۲۰۲۰-۲۰۰۱)، ماخذ: گوگل ارث.

محدوده بعدی شامل ۶ یاخته است که روند کاهشی دمای رویه روز هنگام را با نرخ ۰/۱۵ درجه سلسیوس نشان می‌دهد (شکل ۸) که علت آنرا می‌توان به توسعه مزارع در منطقه‌ای در جنوب ماهین، دره بید و درودزن، نسبت داد (شکل ۱۲).



شکل ۱۲: تصویر ماهواره‌ای توسعه مزارع در جنوب ماهین و درودزن (۲۰۲۰-۲۰۰۰)، ماخذ: گوگل ارث.

سد ملاصدرا بر روی سرشاخه‌های اصلی رود گرّ احداث شده است. یکی از این سرشاخه‌ها با جهت عمومی شمال غربی-جنوب شرقی جریان داشته و از سمت شرق به مخزن سد وارد می‌شود، در حالی که سرشاخه اصلی دیگر از شمال به دریاچه سد ملاصدرا می‌پیوندد. شایان ذکر است که عملیات آگیری این سد از سال ۱۳۸۸ (۲۰۰۹) آغاز شده است؛ از این رو کاهش دمای رویه در محدوده مخزن را می‌توان به عنوان یکی از پیامدهای مستقیم ایجاد این پهنه آبی جدید در رژیم حرارتی منطقه تفسیر کرد (شکل ۱۳).



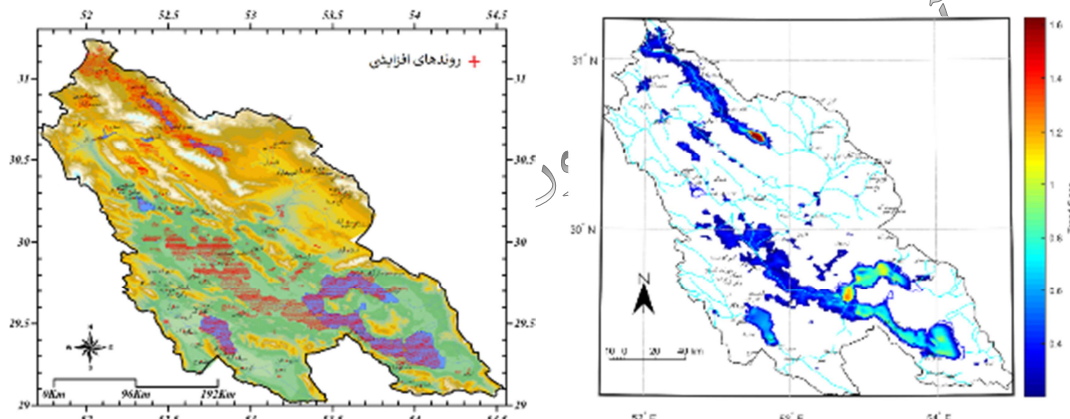
شکل ۱۳: تصویر ماهواره‌ای محل احداث سد ملاصدرا (۲۰۲۰-۲۰۰۸)، ماخذ: گوگل ارث.

در مقابل، روندهای افزایشی دمای رویه زمین در روز هنگام از گستره و فراوانی بیشتری برخوردار بوده و بیش از ۶۰۰۰ یاخته را شامل می‌شوند که حدود ۱۶/۶ درصد از مساحت حوضه را پوشش می‌دهند (شکل ۱۴). نتایج

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

برآوردگر شیب سن نشان داد که میانگین نرخ افزایش دمای رویه در این مناطق حدود 0.4°C درجه سلسیوس است. الگوی پراکنش این روندها بیانگر آن است که بخش عمده مناطق دارای افزایش دما در امتداد شبکه آب‌های جاری قرار گرفته‌اند. با توجه به اینکه بسیاری از رودخانه‌ها و آبراهه‌های حوضه طی دو دهه اخیر با کاهش جریان یا خشک‌شدگی مواجه شده‌اند، روندهای افزایشی دمای رویه به صورت نوارهای خطی در امتداد این شبکه‌ها نمایان شده است. از مهم‌ترین این مناطق می‌توان به مسیر رود شادکام از محدوده باباشیخ‌احمد تا دریاچه کافتَر (شکل ۱۶)، مسیر رود گر از شمال شهرک صدرا و شمال مرودشت تا دریاچه بختگان، و همچنین پهنه دریاچه مهارلو اشاره کرد (شکل ۱۴). این الگو نشان می‌دهد که کاهش جریان‌های سطحی و افت رطوبت خاک نقش مهمی در افزایش دمای رویه زمین و تشدید گرمایش سطحی در بخش‌های مختلف حوضه داشته است.

در حوضه مهارلو-بختگان سه سامانه اصلی رودخانه‌ای قابل تشخیص است. نخست، رودخانه شادکام (ساریاتن) که از چشمه‌ای به همین نام در ارتفاعات کوه آلمالیجه سرچشمه می‌گیرد. این رودخانه پس از عبور از دشت نمدان و آبیاری اراضی پیرامون، با جهت عمومی شمال‌غربی-جنوب‌شرقی جریان یافته و در نهایت به دریاچه کافتَر می‌ریزد. بخشی از روندهای افزایشی دمای رویه زمین در روزنه‌گام در امتداد این رودخانه مشاهده می‌شود که بیانگر کاهش جریان آب و افت رطوبت در بستر و اراضی مجاور آن است (شکل‌های ۱۴ و ۱۵).



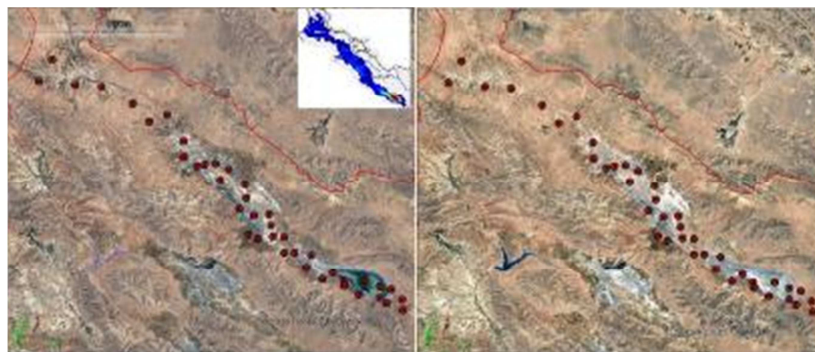
شکل ۱۴: نقشه شیب روند افزایشی دمای رویه زمین روزنه‌گام. شکل ۱۵: نقشه توپوگرافی روند افزایشی دمای رویه زمین روزنه‌گام

دومین سامانه، رودخانه سیوند است که با طول تقریبی ۱۱۰ کیلومتر یکی از رودخانه‌های نسبتاً دائمی حوضه به شمار می‌رود. این رودخانه از ارتفاعات سفیددرغوک و تنگ گورک در دهستان قنقری، واقع در شمال‌غرب دهبید، سرچشمه گرفته و پس از عبور از بخش‌هایی از شهرستان‌های آاده و مرودشت، از شمال تخت جمشید گذشته و در نهایت در غرب مرودشت به رودخانه گر می‌پیوندد.

سومین و مهم‌ترین سامانه رودخانه‌ای حوضه، رودخانه گر است که از به‌هم‌پیوستن آب چشمه‌ها و سرشاخه‌های متعددی در ارتفاعات شمال‌غربی حوضه، از جمله کوه‌های سیدمحمد، پالنگری، مارگون، گمبیل، دلخان و کهکران، شکل می‌گیرد. این رودخانه پس از عبور از تنگ براق وارد شهرستان مرودشت شده و پس از گذر از سد ملاصدرا و دشت کامفیروز، به سد درودزن می‌رسد. رودخانه گر سپس از دشت رامجرد، جنوب مرودشت، شهرستان زرقان و دشت گربال عبور کرده و در نهایت به دریاچه بختگان می‌ریزد. طول این رودخانه از سرچشمه تا دریاچه بختگان حدود ۲۸۰ کیلومتر است.

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

سامانه‌های رودخانه‌ای یادشده در نهایت آب مورد نیاز دریاچه‌های کافت‌ر، طشک، بختگان و مهارلو را تأمین می‌کنند. با این حال، توسعه بهره‌برداری‌های کشاورزی در بالادست، برداشت گسترده آب از منابع سطحی و زیرزمینی و همچنین احداث سدهای متعدد بر روی سرشاخه‌های اصلی، موجب کاهش جریان‌های ورودی به این دریاچه‌ها شده است. افزون بر این، افزایش دما و تشدید تبخیر در دهه‌های اخیر نیز در کاهش تراز آب این پهنه‌های آبی نقش داشته است. پیامد این شرایط، کاهش یا خشک‌شدن بخش‌هایی از دریاچه‌ها و ظهور روندهای افزایشی دمای رویه زمین بر سطح آن‌هاست؛ روندی که در نقشه‌های دمای رویه روزهنگام به‌خوبی قابل مشاهده است و بازتابی از دگرگونی‌های هیدرولوژیکی و محیطی حوضه به شمار می‌رود.



شکل ۱۶: تصویر ماهواره‌ای روند افزایشی دمای رویه رودشادکام و دریاچه کافت‌ر (۲۰۲۰-۲۰۰۲)، ماخذ: گوگل ارث.

شکل ۱۶ الگوی روندهای افزایشی دمای رویه زمین در محدوده رود شادکام و دریاچه کافت‌ر را نشان می‌دهد. نتایج تحلیل روند بیانگر آن است که دمای رویه روزهنگام در این منطقه با نرخ متوسط حدود ۰/۴ درجه سلسیوس افزایش یافته است (شکل ۱۴). به نظر می‌رسد کاهش منابع آب و افت جریان رودخانه شادکام در سال‌های اخیر، موجب کاهش سطح زیرکشت و گسترش اراضی آیش در بخشی از دشت‌های پیرامون شده باشد. همچنین دریاچه کافت‌ر طی سال‌های اخیر با کاهش شدید تراز آب و در برخی دوره‌ها با خشک‌شدگی گسترده مواجه بوده است. کاهش رطوبت سطحی، افت رطوبت خاک و جایگزینی پهنه‌های آبی با سطوح خشک و بایر، از مهم‌ترین عوامل افزایش دمای رویه زمین در این محدوده محسوب می‌شوند. بنابراین، روندهای افزایشی دمای روزهنگام در اطراف رود شادکام و دریاچه کافت‌ر را می‌توان بازتابی از تشدید کم‌آبی و تغییرات هیدرولوژیکی و محیطی این بخش از حوضه دانست.



شکل ۱۷: تصویر ماهواره‌ای روند افزایشی دمای رویه منطقه (گوربهرام) آسپاس (۲۰۲۰-۲۰۰۵)، ماخذ: گوگل ارث.

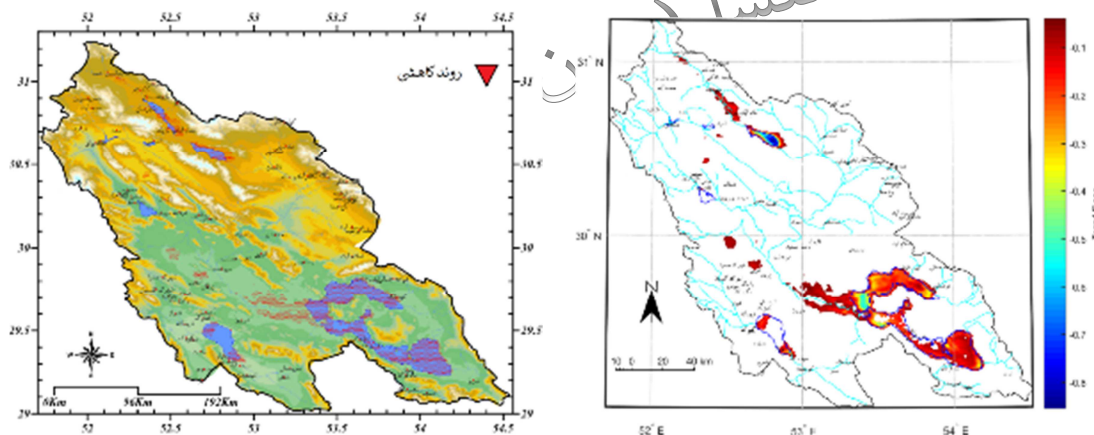
شکل ۱۷ روندهای افزایشی دمای رویه زمین را در دشت‌های واقع در شمال‌شرقی و جنوب‌شرقی دریاچه سد ملاصدرا نشان می‌دهد. نتایج تحلیل روند بیانگر آن است که این مناطق طی دوره مطالعه با افزایش معنادار دمای رویه روزهنگام مواجه بوده‌اند. بررسی تصاویر ماهواره‌ای سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۰۵ نشان می‌دهد که در بخش‌هایی از این

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

دشت‌ها، سطح اراضی زراعی کاهش یافته و بخشی از زمین‌های کشاورزی به اراضی آیش یا کم‌پوشش تبدیل شده‌اند. به نظر می‌رسد کاهش دسترسی به منابع آب و افت رطوبت خاک، موجب کاهش تراکم پوشش گیاهی و افزایش سهم سطوح برهنه در منطقه شده باشد. این تغییرات سبب افزایش جذب و ذخیره انرژی در سطح زمین و در نتیجه افزایش دمای رویه روز هنگام شده است. شواهد حاصل از مقایسه تصاویر ماهواره‌ای دو دوره زمانی، این تغییرات محیطی و اثر آن بر الگوی حرارتی منطقه را به خوبی نشان می‌دهد.

بررسی روند دمای رویه زمین شب هنگام

حدود ۲۸۹۰ یاخته، معادل ۸ درصد از مساحت حوضه، دارای روندهای کاهشی معنادار دمای رویه زمین در شب هنگام هستند. این روندها عمدتاً بر پهنه دریاچه‌های طشک، بختگان، کافت، بخش‌های شمالی و جنوبی دریاچه مهارلو و همچنین تالاب گمجان منطبق می‌باشند (شکل ۱۸). این پهنه‌های آبی که در گذشته از آب کافی برخوردار بودند، طی دو دهه اخیر با کاهش شدید تراز آب مواجه شده و در برخی موارد به‌طور کامل یا فصلی خشک شده‌اند. نتایج برآوردگر شیب سن نشان می‌دهد که دمای رویه شب هنگام در این مناطق به‌طور متوسط با نرخ حدود ۰/۲ درجه سلسیوس کاهش یافته است. به نظر می‌رسد کاهش سطح آب و از بین رفتن پهنه‌های آبی موجب کاهش ظرفیت ذخیره و آزادسازی گرما در ساعات شب شده و در نتیجه دمای رویه شب هنگام نسبت به گذشته کاهش یافته است. بنابراین، روندهای کاهشی دمای شبانه را می‌توان یکی از نشانه‌های آشکار خشک شدن دریاچه‌ها و تالاب‌های حوضه مهارلو-بختگان دانست در صفحه ۲۶ پاسخ داده شده است.

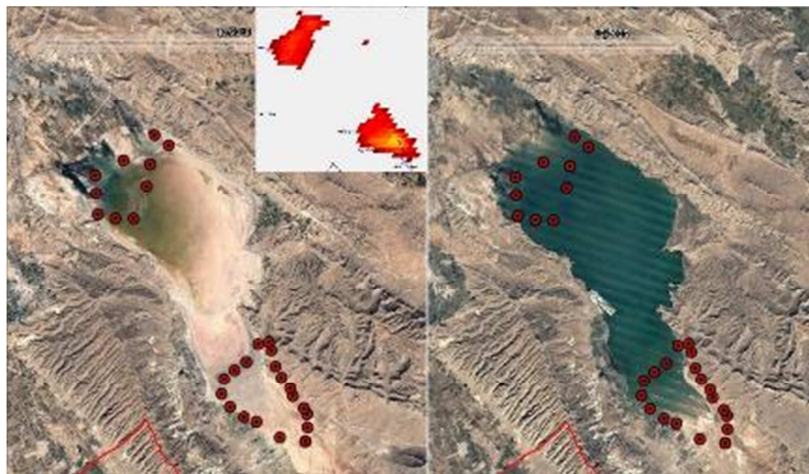


شکل ۱۸: نقشه شیب روند کاهشی دمای رویه زمین شب هنگام

شکل ۱۹: نقشه توپوگرافی روند کاهشی دمای رویه زمین شب هنگام

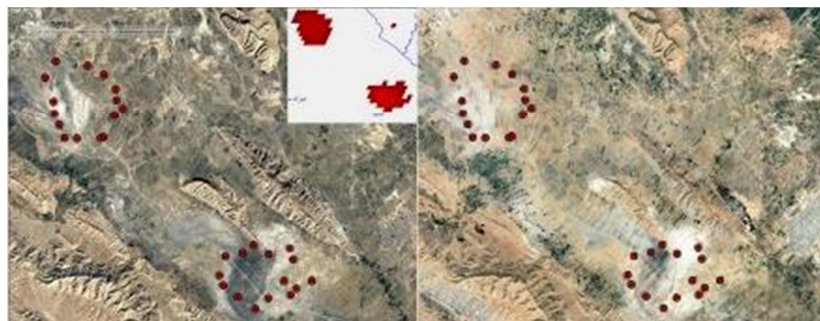
پهنه‌های آبی به دلیل گرمای ویژه و ظرفیت حرارتی بالای آب، در طول روز مقدار قابل توجهی انرژی گرمایی را ذخیره کرده و در ساعات شب به تدریج آن را آزاد می‌کنند. از این رو، سطح دریاچه‌ها و تالاب‌ها در شرایط طبیعی معمولاً در شب گرم‌تر از اراضی برهنه و خشک پیرامون خود باقی می‌ماند. با این حال، کاهش تراز آب و خشک شدن تدریجی دریاچه‌ها و تالاب‌ها موجب از بین رفتن این ویژگی حرارتی شده است. در نتیجه، سطوحی که پیش‌تر به واسطه حضور آب از دمای شبانه بالاتری برخوردار بودند، پس از خشک شدن گرمای کمتری ذخیره و آزاد کرده و دماهای پایین‌تری را تجربه می‌کنند. به همین دلیل، پهنه‌های خشک شده در تحلیل روند دمای رویه شب هنگام، روندهای کاهشی معناداری را نشان می‌دهند (شکل ۱۸). روند خشک شدن دریاچه‌های طشک، بختگان و مهارلو و کاهش تدریجی سطح آب آن‌ها پیش‌تر در شکل‌های ۶ و ۷ ارائه شده است.

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.



شکل ۲۰: تصویر ماهواره‌ای روند کاهشی دمای رویه اطراف دریاچه مهارلو (۲۰۱۸-۲۰۰۵)، ماخذ: گوگل ارث.

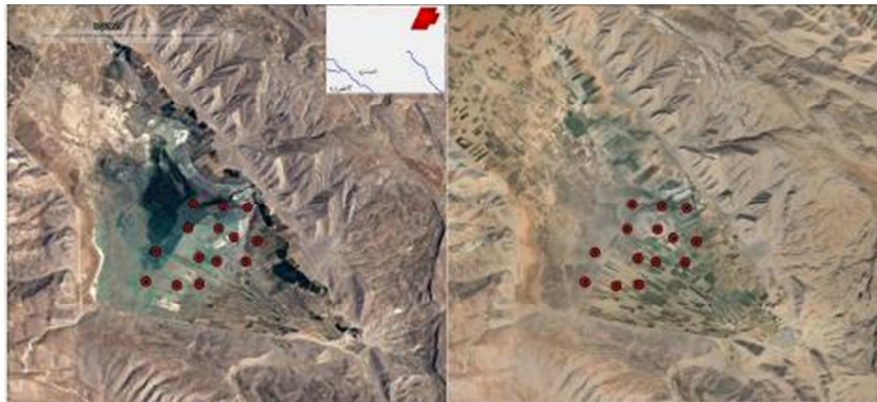
بخش‌های شمالی و جنوبی دریاچه مهارلو نیز به دلیل از دست دادن بخش اعظمی از آب خود طی سال‌های اخیر، در شب‌هنگام روندهای کاهشی نشان داده است (شکل ۲۰).



شکل ۲۱: تصویر ماهواره‌ای روند کاهشی دمای رویه زمین در غرب مرودشت (۲۰۲۰-۱۹۹۶)، ماخذ: گوگل ارث.

در شکل ۲۱ دو پهنه در غرب مرودشت قابل مشاهده است که مقایسه تصاویر سال‌های ۱۹۹۶ و ۲۰۲۰ بیانگر تغییرات چشمگیر در وضعیت رطوبتی آن‌هاست. به نظر می‌رسد این مناطق در سال ۱۹۹۶ از رطوبت بیشتری برخوردار بوده‌اند، در حالی که تا سال ۲۰۲۰ بخش قابل توجهی از رطوبت خود را از دست داده و به سطوحی خشک‌تر تبدیل شده‌اند. کاهش رطوبت خاک موجب کاهش ظرفیت حرارتی سطح زمین و در نتیجه کاهش توان ذخیره و آزادسازی انرژی گرمایی در طول شب می‌شود. بنابراین، این سطوح در ساعات شب با سرعت بیشتری سرد شده و دماهای پایین‌تری را تجربه می‌کنند. به نظر می‌رسد روندهای کاهشی دمای رویه شب‌هنگام مشاهده شده در این دو پهنه، عمدتاً ناشی از کاهش رطوبت خاک و خشک‌تر شدن شرایط محیطی منطقه باشد (شکل ۲۱).

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.



شکل ۲۲: تصویر ماهواره‌ای روند کاهشی دمای رویه زمین در روستای بکان (۱۹۹۳-۲۰۲۰)، ماخذ: گوگل ارث.

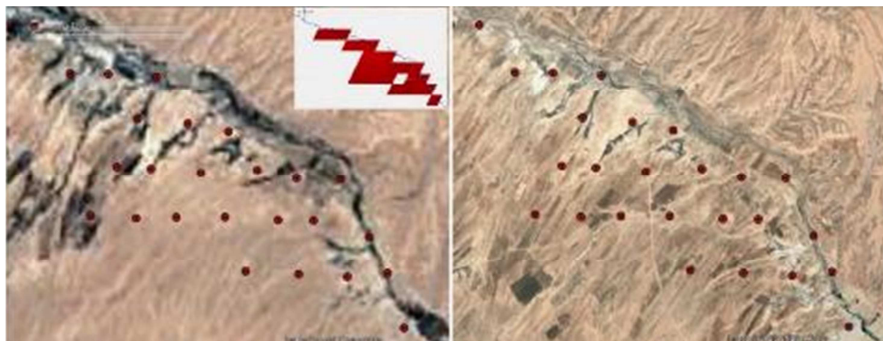
در شمال شرقی کامفیروز، آرایش ناهمواری‌ها به گونه‌ای است که یک فرورفتگی نسبتاً بسته با شکل تقریبی مثلثی ایجاد شده است. این محدوده از دو طرف به ارتفاعات محصور می‌شود و در رأس آن، روستای بکان در دامنه کوه استقرار یافته است. به نظر می‌رسد این ناحیه در گذشته محل تمرکز رواناب‌ها و آب‌های جاری ناشی از ارتفاعات پیرامونی بوده و به صورت یک تالاب فصلی عمل می‌کرده است. با این حال، بررسی تصاویر ماهواره‌ای نشان می‌دهد که این تالاب طی دهه‌های اخیر به تدریج خشک شده و بخش عمده آن به اراضی کشاورزی تبدیل شده است. از بین رفتن پهنه آبی و کاهش رطوبت خاک احتمالاً موجب کاهش ظرفیت ذخیره و آزادسازی گرما در ساعات شب شده است. بنابراین، روندهای کاهشی دمای رویه شب‌هنگام مشاهده شده در این محدوده را می‌توان با خشک شدن تالاب فصلی بکان و تغییر کاربری اراضی آن مرتبط دانست (شکل ۲۲).



شکل ۲۳: تصویر ماهواره‌ای روند کاهشی دمای رویه زمین در جنوب روستای آسپاس (۱۹۹۳-۲۰۲۰)، ماخذ: گوگل ارث.

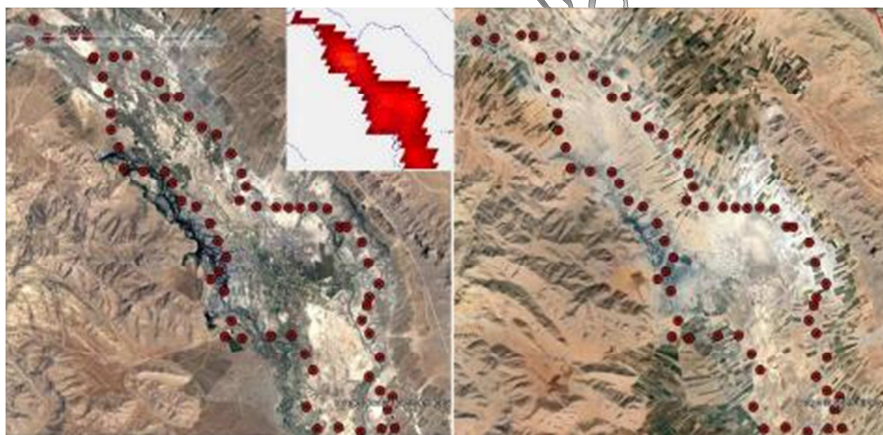
آسپاس، از روستاهای بخش سده شهرستان اقلید، در شرق منطقه تنگ براق واقع شده است. در اراضی جنوبی این روستا، به دلیل وجود یک فرورفتگی طبیعی با شکل کاسه‌ای، شرایط مناسبی برای تجمع رواناب‌ها و آب‌های سطحی فراهم شده است. همچنین وجود چندین چشمه در حاشیه شرقی این محدوده، در گذشته موجب شکل‌گیری پهنه‌ای مرطوب با ویژگی‌های تالابی شده بود. بررسی شواهد موجود و تصاویر ماهواره‌ای نشان می‌دهد که این چشمه‌ها در سال‌های اخیر با کاهش آبدهی مواجه شده و یا بخشی از آن‌ها خشک شده‌اند. در نتیجه، وسعت و رطوبت این پهنه مرطوب کاهش یافته است. به نظر می‌رسد کاهش رطوبت سطحی و از بین رفتن تدریجی شرایط تالابی، موجب کاهش ظرفیت ذخیره و آزادسازی گرما در ساعات شب شده و به همین دلیل این محدوده در نقشه روند دمای رویه شب‌هنگام، روندی کاهشی را نشان می‌دهد (شکل ۲۳).

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.



شکل ۲۴: تصویر ماهواره‌ای روندکاهشی دمای رویه زمین در جنوب روستای باباشیخ احمد (۲۰۲۰-۱۹۹۰)، ماخذ: گوگل ارث.

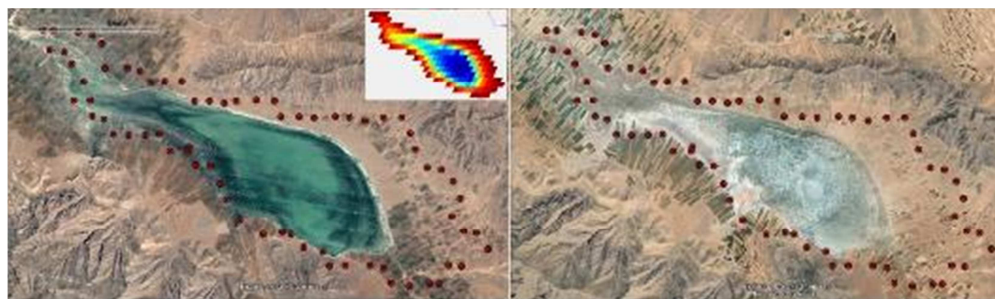
روستای باباشیخ احمد در ناحیه‌ای کوهستانی در شمال حوضه بختگان و در سرشاخه‌های رود شادکام واقع شده است. این منطقه در گذشته به دلیل برخورداری از پوشش برفی مناسب و وجود چشمه‌های متعدد، از منابع آبی نسبتاً فراوانی بهره‌مند بوده و در نتیجه از پوشش گیاهی متراکم‌تری نسبت به شرایط کنونی برخوردار بوده است. بررسی و مقایسه تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه نشان می‌دهد که طی سال‌های اخیر بخشی از منابع آبی منطقه کاهش یافته یا کم‌آب شده و همزمان از تراکم و گستره پوشش گیاهی نیز کاسته شده است. به نظر می‌رسد کاهش رطوبت خاک و افت پوشش گیاهی موجب کاهش ظرفیت ذخیره و آزادسازی انرژی گرمایی در سطح زمین شده باشد. از این‌رو، روندهای کاهشی دمای رویه شب‌هنگام مشاهده‌شده در این محدوده را می‌توان با کاهش منابع آبی و تنزل پوشش گیاهی منطقه مرتبط دانست (شکل ۲۴).



شکل ۲۵: تصویر ماهواره‌ای روندکاهشی دمای رویه زمین در غرب روستای نظام‌آباد (۲۰۲۰-۱۹۹۰)، ماخذ: گوگل ارث.

در شمال دریاچه کافت‌ر و در غرب روستای نظام‌آباد، پهنه‌ای نسبتاً هموار با شیب بسیار اندک وجود دارد که شرایط مناسبی برای تجمع آب‌های سطحی فراهم کرده است. به دلیل ضعف زهکشی طبیعی، این محدوده در گذشته به صورت مانداب یا گوراب عمل کرده و برای مدت طولانی رطوبت خود را حفظ می‌کرده است. بررسی تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه نشان می‌دهد که این پهنه طی سال‌های اخیر بخشی از رطوبت و آب سطحی خود را از دست داده و به تدریج خشک‌تر شده است. کاهش رطوبت خاک و از بین رفتن شرایط ماندابی، ظرفیت ذخیره و آزادسازی گرما را در ساعات شب کاهش داده است. از این‌رو، روندهای کاهشی دمای رویه شب‌هنگام مشاهده‌شده در این محدوده را می‌توان با خشک‌تر شدن محیط و کاهش رطوبت سطحی آن مرتبط دانست (شکل ۲۵).

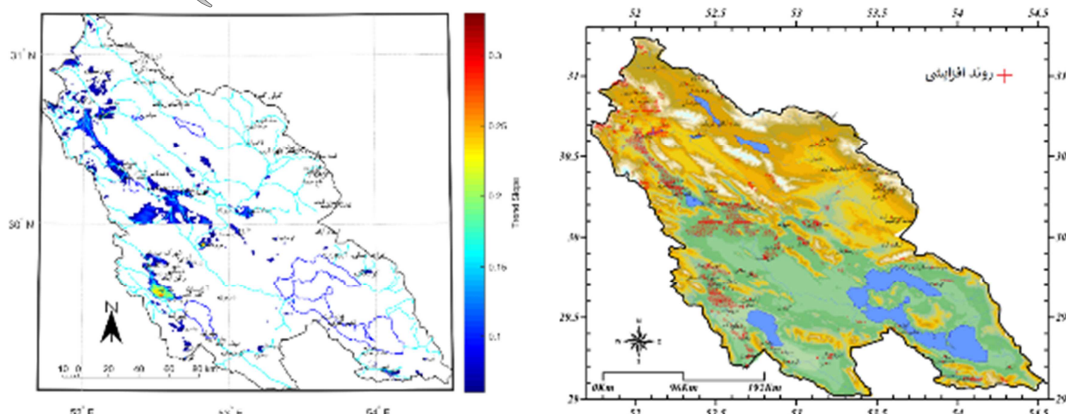
این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.



شکل ۲۶: تصویر ماهواره‌ای روند کاهشی دمای رویه شبانه در دریاچه کافترا (۲۰۲۰-۲۰۰۵)، ماخذ: گوگل ارث.

یکی از پهنه‌های آبی حوضه بختگان، دریاچه کافترا است. همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، رودخانه شادکام از بخش‌های شمالی حوضه و در حوالی روستای بابا شیخ احمد سرچشمه می‌گیرد و با جهت‌گیری شمال‌غربی-جنوب‌شرقی در نهایت به این دریاچه می‌ریزد. این دریاچه در گذشته از حجم آب بیشتری برخوردار بوده، به‌طوری‌که اراضی گسترده‌ای در اطراف آن زیر کشت قرار داشت. با این حال در سال‌های اخیر، میزان آب آن به‌طور چشمگیری کاهش یافته و بخشی از زمین‌های کشاورزی حاشیه آن، به‌ویژه در نواحی شرق و جنوب‌شرق، متروک شده‌اند. در نتیجه این تغییرات، در این منطقه نیز دمای سطح زمین در شب روندی کاهشی را نشان می‌دهد (شکل ۲۶).

حدود ۲۲۹۰ پانته معادل ۶/۲ درصد از وسعت حوضه، روندهای معنادار افزایش دمای رویه شب‌هنگام را نشان می‌دهد. متوسط نرخ روند افزایش دمای رویه شب‌هنگام حدود ۰/۱ درجه سلسیوس است (شکل ۲۷). افزایش دمای رویه شب‌هنگام می‌تواند ناشی از افزایش رطوبت خاک، گسترش پوشش گیاهی در قالب جنگل‌های مصنوعی، توسعه مزارع کشاورزی، ایجاد پهنه‌های آبی مصنوعی مانند احداث سد و یا تشکیل جزایر گرمایی شبانه ناشی از توسعه فیزیکی شهرها، باشد (شکل ۲۷). در ادامه می‌توان با مراجعه به تصاویر ماهواره‌ای دلایل هریک از لکه‌هایی که بر روی شکل ۲۷، روند افزایشی دمای شب‌هنگام را نشان می‌دهند را، درک نمود.

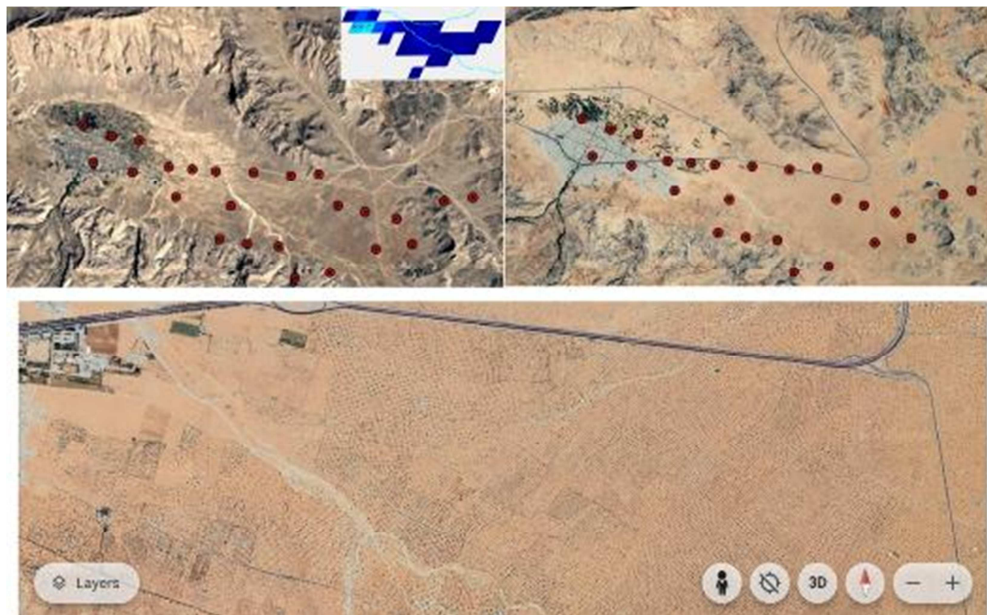


شکل ۲۷: نقشه شیب روند افزایشی دمای رویه زمین شب‌هنگام شکل ۲۸: نقشه روند افزایشی دمای رویه زمین شب‌هنگام

یکی از نمودهای افزایش دمای رویه زمین در شب، در محدوده شهر استهبان در جنوب‌شرق حوضه قابل مشاهده است. این شهر در گذشته با وسعتی محدود شکل گرفته بود، اما طی سال‌های اخیر و هم‌زمان با رشد جمعیت، توسعه فیزیکی آن نیز به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است. این روند می‌تواند به ایجاد جزیره گرمایی ضعیف در سطح شهر منجر شده و بخشی از افزایش دمای شب‌هنگام را توجیه کند. از سوی دیگر، بخشی از باغات انجیر واقع در شمال شهر به کاربری‌های شهری اختصاص یافته و در مقابل، اراضی گسترده‌ای در شرق استهبان به کشت انجیر تبدیل

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

شده‌اند. گسترش این باغات نیز در افزایش دمای رویه زمین طی شب نقش دارد، زیرا رطوبت موجود در خاک موجب جذب و نگهداشت انرژی گرمایی شده و از اتلاف سریع آن در ساعات شب جلوگیری می کند (شکل ۲۹).



شکل ۲۹: تصویر ماهواره‌ای افزایش دمای رویه شب‌هنگام در انجیرستان‌های شرق استهبان (۱۹۸۴-۲۰۲۰)، ماخذ: گوگل ارث.

توسعه فیزیکی شهر نیز موجب شکل‌گیری یک جزیره گرمایی ضعیف در محدوده شهری شده و این امر در افزایش روند دمای رویه زمین در شب نقش داشته است. از سوی دیگر، در ارتفاعات جنوبی این شهر نیز گسترش درختزارها از طریق افزایش رطوبت خاک، به افزایش دمای شب‌هنگام سطح زمین منجر شده است (شکل ۴-۳۶).



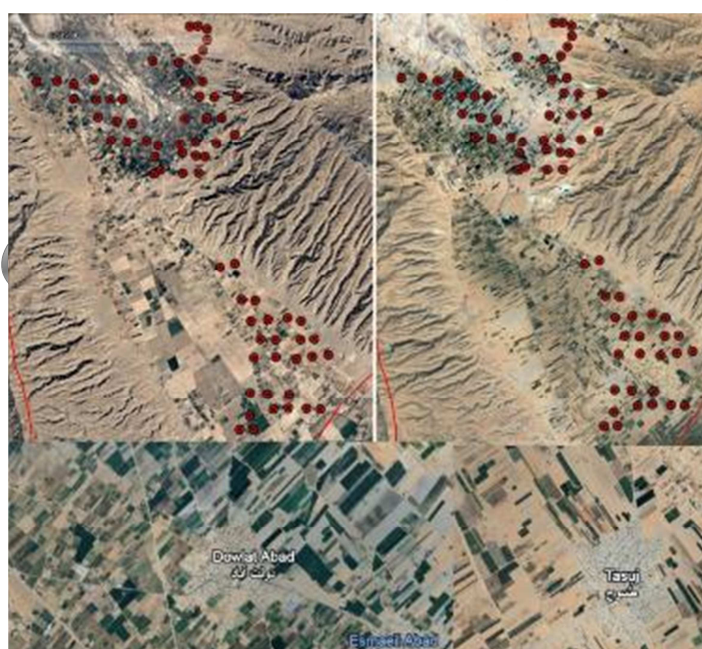
شکل ۳۰: تصویر ماهواره‌ای روند افزایشی دمای رویه شب‌هنگام در نیریز و جنوب آن (۱۹۸۴-۲۰۲۰)، ماخذ: گوگل ارث.

شهر سروسرستان در جنوب دریاچه مهارلو و در مسیر ارتباطی شیراز-فسا واقع شده است. بررسی تصاویر ماهواره‌ای نشان می‌دهد که گسترش کالبدی شهر، هم‌زمان با توسعه اراضی کشاورزی در جنوب آن، از عوامل مؤثر در افزایش دمای رویه زمین در شب‌هنگام بوده است. به نظر می‌رسد توسعه فیزیکی شهر با ایجاد جزیره حرارتی شبانه همراه شده و در مقابل، گسترش زمین‌های کشاورزی نیز از طریق افزایش رطوبت خاک، به ذخیره بیشتر انرژی گرمایی در ساعات شب و در نتیجه افزایش دمای رویه زمین کمک کرده است (شکل ۳۱).

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.



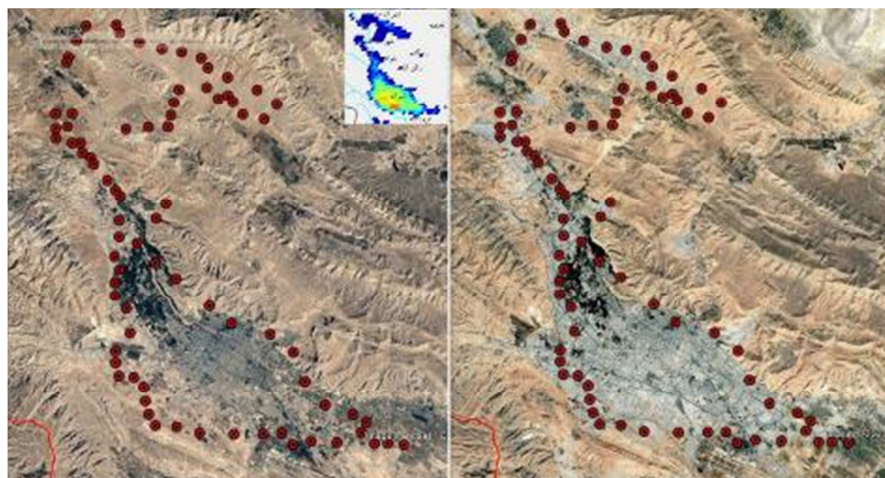
شکل ۳۱: تصویر ماهواره‌ای روند افزایشی دمای رویه شب‌هنگام در شهر سروستان (۱۹۸۴-۲۰۲۰)، مأخذ: گوگل ارث.



شکل ۳۲: تصویر ماهواره‌ای روند افزایشی دمای رویه شب‌هنگام در طسوج (۱۹۸۴-۲۰۲۰)، مأخذ: گوگل ارث.

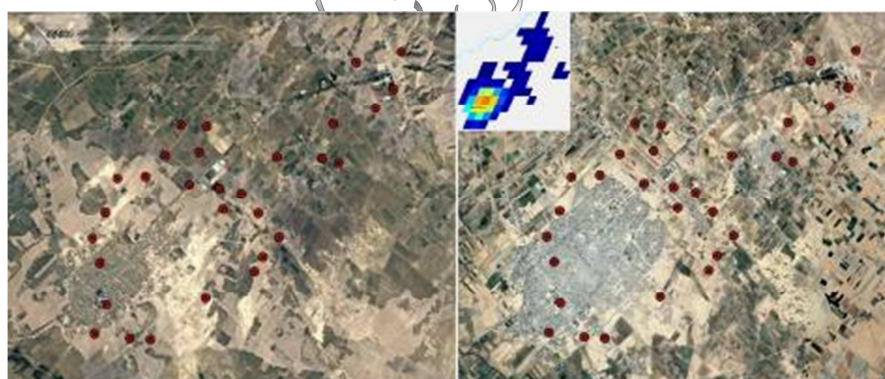
طسوج و دولت‌آباد از توابع شهرستان کوار در استان فارس هستند و در غرب دریاچه مهارلو قرار گرفته‌اند. به دلیل توپوگرافی هموار و وجود منابع آب سطحی، بخش قابل توجهی از اراضی این منطقه به کشاورزی اختصاص یافته است. به نظر می‌رسد افزایش دمای رویه زمین در شب‌هنگام در این ناحیه، عمدتاً ناشی از بالا بودن رطوبت خاک به دلیل آبیاری مزارع کشاورزی باشد (شکل ۳۲).

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.



شکل ۳۳: تصویر ماهواره‌ای روند افزایشی دمای رویه شب‌هنگام در شیراز (۱۹۸۴-۲۰۲۰)، ماخذ: گوگل ارث.

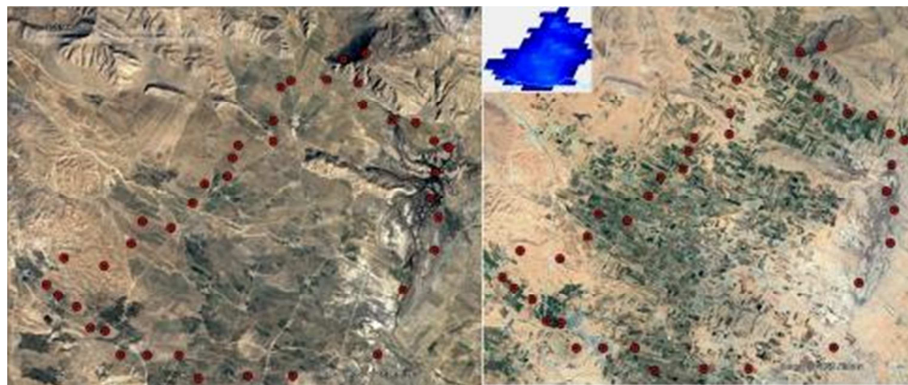
شهر شیراز در چند دهه اخیر رشد قابل توجهی داشته و امروزه به یک کلان‌شهر تبدیل شده است. مقایسه تصاویر ماهواره‌ای نیز به خوبی گسترش فیزیکی این شهر را نشان می‌دهد. این روند توسعه منجر به شکل‌گیری جزیره حرارتی شبانه در محدوده کلان‌شهر شده و در نتیجه، روند دمای رویه زمین در شب هنگام در آن افزایشی بوده است (شکل ۳۳). بیشترین نرخ افزایش دمای رویه زمین در شب هنگام در شیراز به حدود ۰/۲۵ درجه سلسیوس می‌رسد؛ به گونه‌ای که مجموع افزایش دمای شب هنگام در این کلان‌شهر حدود ۵ درجه سلسیوس برآورد شده است (شکل ۲۷).



شکل ۳۴: تصویر ماهواره‌ای روند افزایشی دمای رویه شب‌هنگام در مرودشت (۱۹۸۴-۲۰۲۰)، ماخذ: گوگل ارث.

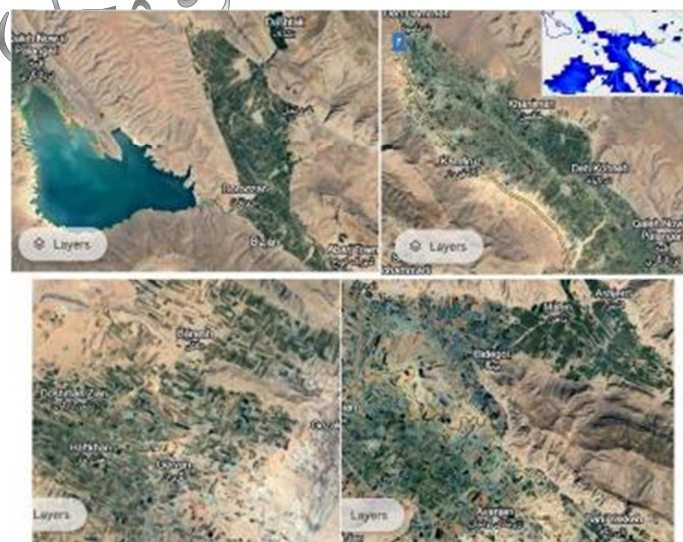
شهر مرودشت نیز از شهرهای شناخته شده استان فارس به شمار می‌رود. رود سیوند از شمال این شهر عبور کرده و پس از گذر از غرب آن، در ادامه به رود گُر می‌پیوندد. همچنین مجموعه تاریخی ارزشمند تخت جمشید، یکی از مهم‌ترین آثار باستانی ایران و جهان، در شمال شرق مرودشت قرار دارد. بررسی توسعه کالبدی شهر در سه دهه اخیر نشان می‌دهد که این روند موجب افزایش دمای رویه زمین در محدوده شهری شده و به احتمال زیاد به شکل‌گیری جزیره حرارتی شبانه در این شهر انجامیده است. مقایسه تصاویر ماهواره‌ای نیز به خوبی این تغییرات و روند افزایشی را تأیید می‌کند (شکل ۳۴).

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.



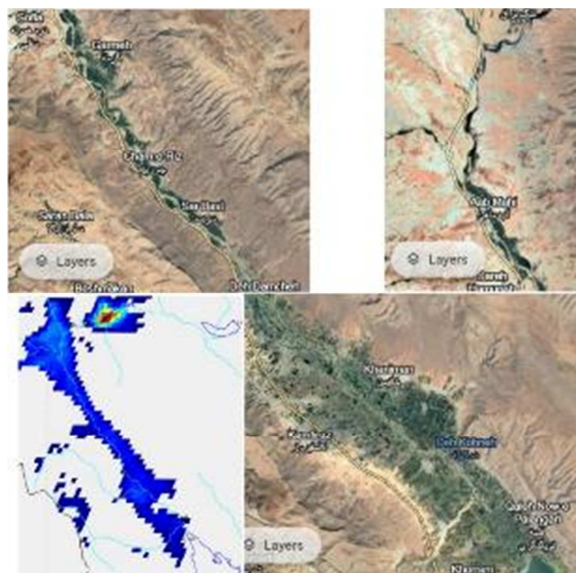
شکل ۳۵: تصویر ماهواره‌ای روند افزایشی دمای رویه شب هنگام در بیضا (۱۹۸۴-۲۰۲۰)، ماخذ: گوگل ارث.

در پایین دست سد درودزن، اراضی هموار و حاصلخیز متعددی به زیر کشت رفته‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به مناطق بیضا، رامجرد، فالونک، فتوح‌آباد، ماهین، آشجرد، بیدگل و سایر نواحی مشابه اشاره کرد. بخش عمده‌ای از این زمین‌ها به کشت برنج اختصاص یافته‌اند، به‌طوری‌که حدود ۸ تا ۱۰ هزار هکتار از اراضی استان فارس به این محصول اختصاص دارد (خبرگزاری ایانا، ۱۳۹۵). در همین راستا، استان فارس پس از استان‌های گیلان، مازندران و گرگان در رتبه چهارم تولید برنج کشور قرار گرفته است (باشگاه خبرنگاران جوان، ۱۴۰۱). شالیزارهای این استان عمدتاً در نواحی پایین دست سد درودزن و منطقه ملاصدرا گسترش یافته‌اند و به‌ویژه در کامفیروز، کشت برنج از رونق قابل توجهی برخوردار بوده و شهرت ملی یافته است. گسترش فعالیت‌های کشاورزی و آبیاری گسترده در این مناطق موجب افزایش رطوبت خاک شده که به نوبه خود باعث ذخیره بیشتر انرژی گرمایی در خاک می‌گردد؛ در نتیجه، دمای رویه زمین در ساعات شب روندی افزایشی را نشان می‌دهد (شکل ۳۵ و ۳۶).



شکل ۳۶: تصاویر توسعه زمین‌های کشاورزی در بالا دست و پایین دست سد درودزن (۲۰۲۰)، ماخذ: گوگل ارث.

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.



شکل ۳۷: توسعه کشاورزی در امتداد دره رود گر حد فاصل سد ملاصدرا تا سد درودزن (۲۰۲۰)، ماخذ: گوگل ارث.

در امتداد دره رود گر حدفاصل سد ملاصدر در محل تنگ بُراق تا دریاچه سد درودزن، زمین‌های مستعد کشاورزی به زیر کشت رفته است و همین موضوع باعث شده که روند دمای رویه شب‌هنگام افزایشی باشد (شکل ۳۷)



شکل ۳۸: موقعیت دریاچه سد ملاصدرا نزدیکی تنگ بُراق (۲۰۲۰)، ماخذ: گوگل ارث.

محدوده دریاچه سد ملاصدرا، آبیگری مخزن و جایگزینی پهنه آبی به جای اراضی مرتعی موجب تغییر قابل توجه در رژیم حرارتی منطقه شده است. آب به دلیل برخورداری از ظرفیت حرارتی (گرمای ویژه) بالا، در طول روز انرژی بیشتری را ذخیره کرده و با آهنگ کندتری گرم می‌شود و در طول شب نیز گرمای ذخیره‌شده را به تدریج آزاد می‌کند. در نتیجه، دمای رویه شب‌هنگام در محدوده مخزن سد روندی افزایشی را نشان می‌دهد (شکل ۳۸). نتایج برآوردگر شیب سن نشان داد که نرخ افزایش دمای رویه شب‌هنگام بر روی دریاچه سد ملاصدرا حدود 0.3°C درجه سلسیوس است که طی دوره مطالعه به افزایش تجمعی حدود 6°C درجه سلسیوس منجر شده است (شکل ۲۷).

به طور خلاصه حدود $85/8\%$ درصد از مساحت حوضه فاقد روند معنادار دمای شبانه بود. این نتیجه به معنای نبود تغییر دما در این نواحی نیست، بلکه نشان می‌دهد که شیب تغییرات در مقایسه با نوسانات بین‌سالانه، در سطح آماری مورد بررسی به اندازه کافی پایدار و قوی نبوده است. تغییرپذیری شرایط جوی، رطوبت خاک، پوشش گیاهی، ویژگی‌های حرارتی سطح، ارتفاع و کاربری اراضی می‌تواند باعث نوسان دمای شبانه و تضعیف سیگنال روند شود. همچنین، ناهمگنی مکانی این عوامل ممکن است اثرهای گرمایشی و سرمایشی را در بخش‌هایی از حوضه خنثی

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

کند. در نتیجه، الگوی به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که تغییرات معنادار دمای شبانه عمدتاً ماهیتی موضعی دارند و نمی‌توان آن‌ها را به‌عنوان یک روند فراگیر در کل حوضه تفسیر کرد. از دیدگاه محیطی نیز، ارزیابی پیامدهای تغییر دما باید بر کانون‌های دارای روند معنادار متمرکز شود، درحالی‌که نواحی فاقد روند معنادار باید به‌عنوان مناطق دارای شواهد آماری ناکافی، و نه الزاماً مناطق بدون تغییر، در نظر گرفته شوند.

نتایج و بحث

الگوهای مکانی و زمانی دمای رویه زمین در حوضه مهارلو-بختگان تحت تأثیر برهم‌کنش عوامل طبیعی و انسانی قرار دارند. در مقیاس حوضه‌ای، توپوگرافی مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده الگوی میانگین دمای روزهنگام است؛ به‌طوری‌که نواحی مرتفع شمالی به دلیل ارتفاع بیشتر و دریافت انرژی کمتر، دماهای پایین‌تری نسبت به دشت‌ها و فروافتادگی‌های جنوبی تجربه می‌کنند. این الگو با نتایج مطالعات انجام شده در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان مطابقت دارد که ارتفاع و ناهمواری را از مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده توزیع فضایی دمای رویه زمین معرفی کرده‌اند (Mashala et al., 2023).

با وجود این، تحلیل روندهای بلندمدت نشان داد که تغییرات دمایی حوضه تنها تابع شرایط توپوگرافی نیست، بلکه به‌شدت از تغییرات محیطی ناشی از فعالیت‌های انسانی و نوسانات هیدرواقليمی تأثیر می‌پذیرد. روندهای افزایشی دمای روزهنگام در امتداد رودخانه‌ها، تالاب‌ها و دریاچه‌های طشک، بختگان، مهارلو و کافت‌ر بیانگر تأثیر کاهش منابع آب سطحی و افت رطوبت خاک بر افزایش دمای رویه زمین است. خشک‌شدن پهنه‌های آبی موجب کاهش شار گرمای نهان و افزایش سهم گرمای محسوس در موازنه انرژی سطح می‌شود؛ فرآیندی که در نهایت به افزایش دمای روزهنگام منجر می‌گردد. این یافته با نتایج مطالعات انجام‌شده در دریاچه آرال، دریاچه چاد و سایر تالاب‌های در معرض خشکی همخوانی دارد (Shi et al., 2015; Nwilo et al., 2019).

در مقابل، رفتار دمای شب‌هنگام، الگوی متفاوتی را نشان داد. پهنه‌های آبی به دلیل ظرفیت حرارتی بالا، در طول روز انرژی بیشتری ذخیره کرده و در شب به‌تدریج آن را آزاد می‌کنند؛ از این‌رو معمولاً دمای شبانه آن‌ها از اراضی پیرامون بیشتر است. خشک‌شدن تدریجی دریاچه‌های طشک، بختگان، مهارلو و کافت‌ر این ویژگی حرارتی را تضعیف کرده و موجب شکل‌گیری روندهای کاهشی معنادار دمای شبانه در بستر این پهنه‌ها شده است. این نتایج نشان می‌دهد که پیامدهای حرارتی خشک‌شدن دریاچه‌ها تنها به افزایش دمای روز محدود نمی‌شود، بلکه تغییر محسوسی در رژیم حرارتی شبانه نیز ایجاد می‌کند. چنین رفتاری در مطالعات مربوط به تالاب‌ها و دریاچه‌های خشک‌شده جهان نیز گزارش شده است (Shakiba et al., 2020; Nwilo et al., 2019).

بخشی از روندهای کاهشی دمای روزهنگام در حوضه با توسعه اراضی کشاورزی و افزایش پوشش گیاهی مرتبط است. افزایش پوشش گیاهی و رطوبت خاک از طریق تشدید تبخیر و تعرق، بخشی از انرژی دریافتی سطح را مصرف کرده و موجب کاهش دمای رویه زمین می‌شود. این موضوع به‌ویژه در اراضی کشاورزی پایین‌دست و بالادست سد درودزن و محدوده سد ملاصدرا مشاهده شد و با نتایج پژوهش‌های انجام‌شده در حوضه بختگان و سایر مناطق خشک ایران مطابقت دارد (باقری و همکاران، ۲۰۱۶؛ مظفری و همکاران، ۲۰۲۲).

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

نتایج دمای شب‌هنگام همچنین بیانگر گسترش جزایر گرمایی شهری در شهرهای شیراز، مرودشت، نیریز، سrostan و استهبان است. روندهای افزایشی دمای شبانه در این مناطق را می‌توان به افزایش سطوح نفوذناپذیر، کاهش پوشش گیاهی، افزایش ذخیره حرارت در مصالح ساختمانی و رشد فیزیکی شهرها نسبت داد. از آنجا که اثر جزیره گرمایی شهری معمولاً در ساعات شب شدیدتر از روز ظاهر می‌شود، نتایج این پژوهش با مبانی نظری و یافته‌های مطالعات جهانی در زمینه اقلیم شهری و دمای رویه زمین همخوانی دارد (Logan et al., 2020; Lian et al., 2024).

الگوهای مشاهده‌شده نشان‌دهنده تغییرات حرارتی معنادار اما از نظر مکانی محدود و ناهمگن در بخش‌هایی از حوضه است. تمرکز برخی از این روندها در نواحی هم‌جوار با پهنه‌های آبی خشک‌شده و مناطق دارای گسترش فعالیت‌های کشاورزی و شهری، احتمال ارتباط تغییرات دمای رویه زمین با دگرگونی‌های محیطی و کاربری اراضی را مطرح می‌کند؛ با این حال، این تغییرات را نمی‌توان به کل حوضه تعمیم داد.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که دمای رویه زمین، به‌ویژه در تحلیل‌های تفکیکی روزهنگام و شب‌هنگام، می‌تواند به عنوان شاخص مؤثر برای پایش و آشکارسازی تغییرات محیطی در حوضه‌های خشک و نیمه‌خشک مورد استفاده قرار گیرد.

نتیجه‌گیری آماده انتشار
این پژوهش با استفاده از سری زمانی بلندمدت دمای رویه زمین سنجنده مودیس آکوا طی دوره ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۰، الگوهای مکانی و زمانی تغییرات حرارتی حوضه مهارلو-بختگان را در دو زمان روزهنگام و شب‌هنگام مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد که دمای رویه زمین از حساسیت بالایی نسبت به تغییرات محیطی برخوردار است و می‌تواند به عنوان شاخص مناسب برای آشکارسازی تحولات اکولوژیکی و هیدرولوژیکی در مقیاس حوضه‌ای مورد استفاده قرار گیرد.

یافته‌ها نشان داد که توزیع فضایی دمای روزهنگام عمدتاً تحت تأثیر ویژگی‌های توپوگرافی و ارتفاع قرار دارد، در حالی که تغییرات دمای شب‌هنگام بیش از هر عامل دیگری از وضعیت پهنه‌های آبی، رطوبت خاک و تغییرات کاربری اراضی تأثیر می‌پذیرد. خشک‌شدن دریاچه‌های طشک، بختگان، مهارلو و کافر و همچنین کاهش سطح آب تالاب‌های منطقه، موجب افزایش دمای روزهنگام و کاهش دمای شب‌هنگام در این پهنه‌ها شده است. این نتایج نشان می‌دهد که خشک‌شدن منابع آبی نه تنها چرخه هیدرولوژیک منطقه را دگرگون می‌کند، بلکه رژیم حرارتی سطح زمین را نیز به طور محسوسی تحت تأثیر قرار می‌دهد.

روندهای افزایشی دمای روزهنگام با نرخ حدود ۰/۴ درجه سلسیوس عمده‌تاً در امتداد رودخانه‌ها و آبراهه‌های خشک‌شده مشاهده شد که بیانگر نقش کاهش رطوبت خاک و افت جریان‌های سطحی در تشدید گرمایش سطحی است. در مقابل، توسعه اراضی کشاورزی (شالیزارهای برنج) و افزایش پوشش گیاهی از طریق افزایش تبخیر و تعرق و تعدیل تبادل انرژی سطح، موجب کاهش دمای روزهنگام شده بویژه در پایین دست دست ملامصدرا و درودزن شده است؛ به‌گونه‌ای که میانگین روند کاهشی در این مناطق حدود ۰/۱۵ درجه سلسیوس برآورد شد. همچنین روندهای افزایشی دمای شب‌هنگام با نرخ متوسط ۰/۱ درجه سلسیوس در مراکز شهری حوضه مشاهده شد که بیانگر گسترش جزایر گرمایی شهری و افزایش تأثیر فعالیت‌های انسانی بر محیط حرارتی منطقه است. بیشترین افزایش دمای

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

شب‌هنگام در کلان‌شهر شیراز مشاهده شد که طی دوره مطالعه به حدود ۶ درجه سلسیوس رسید. در مقابل، پهنه‌های آبی، تالاب‌ها و دریاچه‌های خشک‌شده حوضه روندهای کاهشی دمای شب‌هنگام با نرخ متوسط ۰/۲ درجه سلسیوس را تجربه کردند.

در مجموع، نتایج پژوهش نشان می‌دهد که حوضه مهارلو-بختگان طی دو دهه اخیر تحت تأثیر هم‌زمان خشکسالی‌های مکرر و نوسانات بارش، کاهش منابع آب سطحی، توسعه کشاورزی، گسترش شهرنشینی و تغییرات کاربری اراضی، دچار دگرگونی حرارتی گسترده‌ای شده است. این تغییرات می‌تواند پیامدهای مهمی برای منابع آب، پایداری اکوسیستم‌های تالابی، زیستگاه پرندگان مهاجر، فعالیت‌های کشاورزی و کیفیت زندگی ساکنان منطقه به همراه داشته باشد.

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که تحلیل تفکیکی دمای رویه زمین در زمان‌های روز و شب می‌تواند ابزاری کارآمد برای پایش تغییرات محیطی و شناسایی کانون‌های بحرانی در حوضه‌های خشک و نیمه‌خشک باشد. از این رو، بهره‌گیری از داده‌های دمای رویه زمین در کنار سایر داده‌های سنجش از دور می‌تواند نقش مؤثری در مدیریت منابع آب، برنامه‌ریزی کاربری اراضی، احیای تالاب‌ها و کاهش آثار ناشی از تغییرات محیطی در حوضه بختگان ایفا کند.

منابع

باقری، محمد حسین؛ باقری علی و سهولی، غلام عباس. (۱۳۹۵). تحلیل تغییرات پهنه آبی دریاچه بختگان تحت تأثیر عوامل طبیعی و انسانی. *تحقیقات منابع آب/ایران*، جلد ۱۲، شماره ۳، شماره ۳۷، ۱-۱۱.

شرکت مدیریت منابع آب ایران. (۱۳۹۱). دستورالعمل‌ها و معیارهای تقسیم‌بندی و کدگذاری حوزه‌های آبخیز و مناطق مطالعاتی در سطح ملی. شماره ۳۱۰.

ثقفیان، بهرام، خان‌احمدی بافقی، هما، و دانشکار آراسته، پیمان. (۱۴۰۰). پیش‌بینی مساحت دریاچه بختگان و طشک با استفاده از سنجش از دور و عوامل اقلیمی. *تحقیقات منابع آب/ایران*، جلد ۱۷، شماره ۱، ۵۶، ۱-۱۶۵.

ترابی، غزال، آقامحمدی زنجیرآباد، حسین و بهزادی، سعید. (۱۳۹۷). پایش وضعیت دریاچه بختگان و مناطق اطراف آن با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و هوش محاسباتی. *کوهیدرولوژی*، جلد ۵، شماره ۱، ۲۴۳-۲۵۱.

Ayenew, T. 2004, Environmental implications of changes in the levels of lakes in the Ethiopian Rift. *Regional Environmental Change*, 4(4), 192–204. <https://doi.org/10.1007/s10113-004-0083-x>

Du, C., Ren, H., Qin, Q., Meng, J., & Zhao, S. 2015, A practical split-window algorithm for estimating land surface temperature from Landsat 8 data. *Remote Sensing*, 7(1), 647-665. <https://doi.org/10.3390/rs70100647>

Firoozi, F., Mahmoudi, P., Jahanshahi, S. M. A., Tavousi, T., Liu, Y., & Liang, Z. 2020, Modeling changes trend of time series of land surface temperature (LST) using satellite remote sensing productions (case study: Sistan plain in east of Iran). *Arabian Journal of Geosciences*, 13(10), 367. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05314-w>

Han, Y., Huang, B., & Gao, H. 2024, Constructing a High Temporal Resolution Global Lakes Dataset via Swin-Unet with Applications to Area Prediction. *arXiv preprint arXiv:2408.10821*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.10821>

Hojabari, J., & Aydin, Y. 2025, Spatio-temporal Dynamics of Land Surface Temperature and Land Use and Land Cover Changes in the Urmia Lake Basin: Exploring Land-Atmosphere Interactions Through Satellite Data and Ground Observations (2000–2023). *Earth Systems and Environment*, 1-20. <https://doi.org/10.1007/s41748-025-00808-7>

Lian, D., Yuan, B., Li, X., Shi, Z., Ma, Q., Hu, T., ... & Liu, Y. 2024, The contrasting trend of global urbanization-induced impacts on day and night land surface temperature from a time-series perspective. *Sustainable Cities and Society*, 109, 105521. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105521>

Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. 2015, Remote sensing and image interpretation. John Wiley & Sons.

Logan, T. M., Zaitchik, B., Guikema, S., & Nisbet, A. 2020, Night and day: The influence and relative importance of urban characteristics on remotely sensed land surface temperature. *Remote Sensing of Environment*, 247, 111861. doi:10.1016/j.rse.2020.111861

- Lu, Z., Chen, Z., Zhou, M., Lei, D., & Chen, Y. 2025, Spatiotemporal patterns of water and vegetation in Poyang Lake from 2013 to 2021 using remote sensing data. *Plos one*, 20(7), e0327579. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0327579>
- Mashala, M. J., Dube, T., Mudereri, B. T., Ayisi, K. K., & Ramudzuli, M. R. 2023, A systematic review on advancements in remote sensing for assessing and monitoring land use and land cover changes impacts on surface water resources in semi-arid tropical environments. *Remote Sensing*, 15(16), 3926. <https://doi.org/10.3390/rs15163926>
- Mozafari, M., Hosseini, Z., Fijani, E., Eskandari, R., Siahpoush, S., & Ghader, F. 2022, Effects of climate change and human activity on lake drying in Bakhtegan Basin, southwest Iran. *Sustainable Water Resources Management*, 8(4), 109. <https://doi.org/10.1007/s40899-022-00707-z>
- Nasiri, A., Khosravian, M., Zandi, R., Entezari, A., & Baaghde, M. 2023, Monitoring the physical changes of lakes Bakhtegan and Tashk through land surface temperature and groundwater-level changes using remote-sensing technology. *Environmental Earth Sciences*, 82(19), 454. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-11117-5>
- Nasiri, A., Khosravian, M., Zandi, R., Entezari, A., & Baaghde, M. 2023, Analysis of physical changes in Fars province water zones related to climatic parameters using remote sensing, Bakhtegan, Tashk, Iran. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 26(3), 851-861. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2023.09.003>
- Nwilo, P., Umar, A., Adepoju, M., & Okolie, C. 2019, Spatio-temporal assessment of changing land surface temperature and depleting water in the Lake Chad area. *South African Journal of Geomatics*, 8(2), 144-159. doi: 10.4314/sajg.v8i2.3
- Pekel, J. F., Cottam, A., Gorelick, N., & Belward, A. S. 2016, High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540(7633), 418-422. <https://doi.org/10.1038/nature20584>
- Rahimabadi, P. D., Liu, B., Azarnivand, H., Malekian, A., & Damaneh, H. E. 2024, The nexus between land use/cover changes and land surface temperature: Remote sensing-based two-decadal analysis in Tashk-Bakhtegan-Maharloo basin. *Journal of Arid Environments*, 225, 105269. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2024.105269>
- Shakiba, F., Rosta, I., Mazidi, A., & Olafsson, H. 2024, Spatial and temporal variation of daytime and nighttime land surface temperature and its drivers over Iran's watersheds using remote sensing. *Earth Science Informatics*, 17(4), 3567-3587. doi:[10.1007/s12145-024-01344-0](https://doi.org/10.1007/s12145-024-01344-0)
- Shi, K., Zhang, Y., Zhu, G., Qin, B., & Pan, D. 2018, Deteriorating water clarity in shallow waters: Evidence from long-term MODIS and in-situ observations. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 68, 287-297. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.12.015>
- Shi, W., & Wang, M. 2015, Decadal changes of water properties in the Aral Sea observed by MODIS-Aqua. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(7), 4687-4708. <https://doi.org/10.22059/jesphys.2021.323427.1007318>
- Smith, A. M., Wooster, M. J., Drake, N. A., Dipotso, P. M., Falkowski, M. J., & Hudak, A. T. 2005, Testing the potential of multi-spectral remote sensing for retrospectively estimating fire severity in African Savannahs. *Remote sensing of environment*, 97(1), 92-115. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.04.014>
- Weng, Q., Lu, D., & Schubring, J. 2004, Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*, 89(4), 467-483. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.005>